การบำบัดไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดผ่านกระบวนการร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน ด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

นางสาวเพ็ญพิชา สท้านวัตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NITROGEN TREATMENT IN CLOSED AQUACULTURE SYSTEM BY NITRIFICATION-DENITRIFICATION CO-PROCESSES USING BIOCORD^{TM} BIOFILTER

Miss Penpicha Satanwat

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 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดผ่านกระบวนการร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด
โดย	นางสาวเพ็ญพิชา สท้านวัตร
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.สรวิศ เผ่าทองศุข

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี)

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

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจพร สุวรรณศิลป์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.มะลิวัลย์ คุตะโค)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เพ็ญพิชา สท้านวัตร: การบำบัดไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดผ่านกระบวนการร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด (NITROGEN TREATMENT IN CLOSED AQUACULTURE SYSTEM BY NITRIFICATION-DENITRIFICATION CO-PROCESSES USING BIOCORD™ BIOFILTER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.สรวิศ เผ่าทองศุข, 267 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดผ่านกระบวนการร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดชนิดเส้นใย แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกเป็นการประเมินประสิทธิภาพเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำที่เวลาแตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มเชื้อ ซึ่งตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 7 สัปดาห์ สามารถบำบัดไนโตรเจนผ่านกระบวนการบำบัดร่วมได้อย่างสมบูรณ์ โดยมีอัตราไนทริฟิเคชัน 75.62±9.45 มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน ดีไนทริฟิเคชัน 144.88±5.99 มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน และปริมาณจุลชีพสะสมบนมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพ 50.89±3.41 กรัม/ม. ตามลำดับ การทดลองช่วงที่ 2 เป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบที่เน้นการบำบัดแอมโมเนียซึ่งมีความเป็นพิษสูงต่อสัตว์น้ำ จากการศึกษาผลของการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน พบว่าชุดควบคุมที่ไม่เติมเมทานอลสามารถบำบัดแอมโมเนียได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีอัตราการบำบัด 60.19±3.12 มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน และสามารถบำบัดไนเทรตโดยอาศัยสารอินทรีย์จากตะกอนในระบบเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับแบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟซึ่งมีอัตราการบำบัด 10.50±1.17 มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน จากนั้นศึกษาผลของการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ พบว่าการขยำและแกว่งตัวกรองในน้ำสะอาดสามารถลดปริมาณตะกอนส่วนเกินซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดสภาวะแอนแอโรบิกภายในมัดเส้นใย โดยการแกว่งตัวกรองเป็นวิธีที่สะดวกและประหยัดเวลาในการใช้งานจริง โดยมีอัตราไนทริฟิเคชัน 47.80±2.88 มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน ดีไนทริฟิเคชัน 8.73±0.66 มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน และปริมาณจุลชีพคงเหลือบนตัวกรองชีวภาพ 32.21±4.30 กรัม/ม. ตามลำดับ และสุดท้ายศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ พบว่าการทำความสะอาดตัวกรองด้วยความถี่ 2 3 และ 4 สัปดาห์/ครั้ง สามารถเพิ่มอัตราไนทริฟิเคชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการทำความสะอาดด้วยความถี่ 2 สัปดาห์/ครั้ง ส่งผลให้ตัวกรองมีประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียสูงสุดเท่ากับ 67.61±7.69 มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน การทดลองช่วงสุดท้ายเป็นการประเมินประสิทธิภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ ผลการทดลองพบว่าตัวกรองชีวภาพสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ เท่ากับ 0.17±0.01 0.12±0.07 และ 5.85±0.68 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการกักเก็บตะกอนภายในมัดเส้นใยเนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะของจุลชีพสูง โดยสามารถควบคุมปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบให้มีค่าไม่เกิน 86.67±2.33 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล.

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
ปีการศึกษา	2557	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

5570321821: MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEYWORDS: ไนทริฟิเคชัน (NITRIFICATION)/ ดีไนทริฟิเคชัน (DENITRIFICATION)/ ตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด (BIOCORD™ BIOFILTER)/ ระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด (CLOSED AQUACULTURE SYSTEM)

PENPICHA SATANWAT: NITROGEN TREATMENT IN CLOSED AQUACULTURE SYSTEM BY NITRIFICATION-DENITRIFICATION CO-PROCESSES USING BIOCORD™ BIOFILTER. ADVISOR: ASSOC. PROF. WIBOONLUK PUNGRASMI, Ph.D., CO- ADVISOR: SORAWIT POWTONGSOOK, Ph.D., 267 pp.

This research involved nitrogen removal in recirculating aquaculture system by nitrification-denitrification co-processes using Biocord™ fibrous biofilter media. The experiment was divided into 3 parts. The first experiment evaluated effect of biofilter acclimation periods on nitrogen removal rate. The results showed that removal efficiency increased with acclimation time. Biocord™ acclimation for 7 weeks was enough for complete nitrification of 75.62±9.45 mg.-N/m/day and denitrification of 144.88±5.99 mg.-N/m/day with 50. 89±3.41 g/m-biofilter of accumulated biomass. The second experiment was to investigate the optimal condition and effect of external carbon source for ammonia removal via nitrification-denitrification processes. The result illustrated that the highest nitrification rate was found in control without methanol addition which was 60.19±3.12 mg.-N/m/day. Furthermore, nitrate removal rate of 10.50±1.17 mg.-N/m/day was achieved by heterotrophic bacteria using internal carbon from digested sludge. Thereafter, removal of excess solid particles from fibrous bundle was examined. The results showed that biofilter cleaning by squeeze and stirred in water can removed excess solid deposited which cause anaerobic condition in the fibrous. This cleaning method is convenient and easy to be applied with the practical nitrification rate of 47.80±2.88 mg.-N/m/day and denitrification rate of 8.73±0.66 mg.-N/m/day with the remained biomass of 32.21±4.30 g/m-biofilter. Finally, the effect of frequent cleaning of biofilter was conducted. The result showed that sediment removal every 2, 3 and 4 weeks could enhance nitrification rate in which the highest rate of 67.61±7.69 mg.-N/m/day was found in treatment cleaning every 2 weeks. The last experiment evaluated nitrogen removal efficiency of Biocord™ in Tilapia culture tanks. It was found that Biocord™ biofilter could control ammonia nitrite and nitrate concentrations under 0.17±0.01, 0.12±0.07 and 5.85±0.68 mg-N/l, respectively. In addition, due to high surface area for microbial adhesion of Biocord™ fibrous, suspended solid in fish tank was controlled below 86.67±2.33 mg/l throughout the experimental period.

Department:	Environmental Engineering	Student's Signature .....
Field of Study:	Environmental Engineering	Advisor's Signature .....
Academic Year:	2014	Co-Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

อันดับแรกขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร.สรวิศ เผ่าทองศุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับหลักวิชาการและองค์ความรู้ที่มีประโยชน์ในการออกแบบงานวิจัย รวมถึงความเอาใจใส่ดูแล การให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนความช่วยเหลือในแต่ละขั้นตอนระหว่างการดำเนินงานจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจพร สุวรรณศิลป์ กรรมการ และ ดร.มะลิวัลย์ คุตะโค ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำชี้แนะ และแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่อบรมสั่งสอน และให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์สำหรับการประกอบวิชาชีพวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ขอขอบพระคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่ วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมีในการทำงานวิจัย รวมถึงขอขอบคุณ คุณปวีณา ตปนียวรวงศ์ คุณสุรเชษฐ์ บุรุษอาชาไนย คุณสราวุธ สัตยากวี และคุณเสรี ดอนเหนือ ตลอดจนบุคลากรของศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเลทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการทำงานวิจัยและการวิเคราะห์ทางด้านวิทยาศาสตร์

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนสนับสนุนบางส่วนจากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (รหัสโครงการ RES560530068-FW) ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายตลอดการทำวิจัย และขอขอบคุณการสนับสนุนเครื่องมือ Microplate Spectrophotometer จากโครงการ Thai Government Stimulus Package 2 (TKK2555) จนสามารถดำเนินงานวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา บุคคลในครอบครัว รวมถึงเพื่อนสนิททุกคนที่คอยสนับสนุน เป็นแรงผลักดัน และเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดสำหรับผู้วิจัยเสมอมา จนกระทั่งสามารถสำเร็จการศึกษาและได้รับปริญญามหาบัณฑิตตามที่ตั้งใจ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญรูป ..... ฐ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 ระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ 5
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ 8
2.2.1 แอมโมเนีย 8
2.2.2 ไนไทรต์ 9
2.2.3 ไนเทรต 9
*2.2.4 อุณหภูมิ*10
2.2.5 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ 10
2.2.6 ความเป็นกรด-ด่าง 11
2.2.7 สภาพความเป็นด่าง 12
2.2.8 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 12

หน้า

2.2.9 อนุภาคของแข็งแขวนลอย 13
2.3 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด 13
2.4 ประเภทของสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำ 14
2.4.1 สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน 14
2.4.2 สารประกอบแอมโมเนียไนโตรเจน 15
2.4.3 สารประกอบไนไทรต์ 15
2.4.4 สารประกอบไนเทรต 15
2.5 การบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำด้วยกระบวนการทางชีวภาพ 15
2.5.1 กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน 16
2.5.2 กระบวนการไนทริฟิเคชัน 17
2.5.3 กระบวนการดีไนทริฟิเคชัน 20
2.6 ตัวกรองชีวภาพสำหรับการบำบัดน้ำจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด 25
2.7 การเจริญของจุลชีพบนตัวกรองชีวภาพ 29
2.8 ชีววิทยาของปลานิลและรูปแบบการเลี้ยงปลานิล 32
2.8.1 อนุกรมวิธาน และสรีรวิทยาของปลานิล 32
2.8.2 *รูปแบบการเลี้ยงปลานิล* 33
2.8.3 ปัจจัยทางคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลานิล 34
2.9 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 35
2.9.1 การบำบัดไนโตรเจนผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน 35
2.9.2 การบำบัดไนโตรเจนผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน 36
2.9.3 การบำบัดไนโตรเจนด้วยระบบแบบยึดเกาะกับตัวกลางผ่านกระบวนการร่วม ไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน 39
2.9.4 การใช้งานไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ 41

หน้า

บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย 45
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี 45
3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง 45
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ 45
3.1.3 สารเคมี 46
3.2 แผนการทดลอง 48
3.3 การดำเนินงานวิจัย 54
3.3.1 การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดแบบจมน้ำ 54
3.3.2 การทดลองช่วงที่ 2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไนโตรเจนด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด 62
3.3.3 การทดลองช่วงที่ 3 การประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด ในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ 69
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 79
4.1 การศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดแบบจม 79
4.1.1 การประเมินอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพ ไบโอคอร์ดแบบจม 79
4.1.2 การศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด 81
4.1.3 การศึกษาอัตราดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด 84
4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไนโตรเจนด้วยตัวกรองชีวภาพ ไบโอคอร์ด 89
4.2.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ 89
4.2.2 การศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด 101
4.2.3 การศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด 112

Chulalongkorn University

4.3 การประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ 123

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 138

5.1 สรุปผลการทดลอง 138

5.2 ข้อเสนอแนะ 140

รายการอ้างอิง 142

ภาคผนวก ก 149

ภาคผนวก ข 157

ภาคผนวก ค 172

ภาคผนวก ง 228

ภาคผนวก จ 250

ภาคผนวก ฉ 255

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 268

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำตามการจัดการคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยง 6

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบของปริมาณออกซิเจนละลายต่อสัตว์น้ำ 11

ตารางที่ 2.3 ผลกระทบของความเป็นกรด-ด่างต่อสัตว์น้ำ..... ..11

ตารางที่ 2.4 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด..... 14

ตารางที่ 2.5 ผลกระทบของโลหะหนักต่อกระบวนการไนทริฟิเคชัน 20

ตารางที่ 2.6 ผลของสารอินทรีย์คาร์บอนต่ออัตราดีไนทริฟิเคชัน 21

ตารางที่ 2.7 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วม ไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน 24

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด 28

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ศึกษาในการประเมินอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด.....57

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในการประเมินอัตราไนทริฟิเคชัน ของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด.....57

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ศึกษาในการประเมินอัตราดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด....60

ตารางที่ 3. 4 ตัวแปรที่ศึกษาในการประเมินอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรอง ชีวภาพไบโอคอร์ดเมื่อแปรค่าสัดส่วนการเติมคาร์บอนต่อไนโตรเจน.....64

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ศึกษาในการประเมินอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน เมื่อแปรเปลี่ยนวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด.....67

ตารางที่ 3.6 ระยะเวลาที่ศึกษาในการประเมินอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน เมื่อแปรค่าความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด.....68

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ศึกษาในการประเมินอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน เมื่อแปรค่าความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด.....69

ตารางที่ 3.8 ตัวแปรที่ศึกษาในการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด ในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ.....73

Chulalongkorn University

หน้า

ตารางที่ 3.9 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ.74

ตารางที่ 4.1 คุณภาพน้ำระหว่างการศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 7 สัปดาห์.....84

ตารางที่ 4.2 คุณภาพน้ำระหว่างการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบสำหรับชุดควบคุมและชุดทดลอง.....98

ตารางที่ 4.3 คุณภาพน้ำระหว่างการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดสำหรับชุดควบคุมและชุดทดลอง.....110

ตารางที่ 4.4 คุณภาพน้ำระหว่างการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดสำหรับชุดควบคุมและชุดทดลอง.....120

ตารางที่ 4.5 คุณภาพน้ำระหว่างการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำสำหรับชุดควบคุมและชุดทดลอง.....130

ตารางที่ 4.6 การเจริญเติบโตของปลานิลระหว่างการประเมินประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำสำหรับชุดควบคุม.....132

ตารางที่ 4.7 การเจริญเติบโตของปลานิลระหว่างการประเมินประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำสำหรับชุดทดลอง.....133

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของปลานิลระหว่างการทดลองกับงานวิจัยอื่น (ค่าเฉลี่ยของชุดควบคุมและชุดทดลอง).....134

ตารางที่ 4.9 ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนในอาหารปลา ตะกอนในบ่อเลี้ยงและปลานิลเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHNS/O ANALYZER.....136

ตารางที่ 4.10 ปริมาณไนโตรเจนเข้าสู่ระบบกับไนโตรเจนคงเหลือในวันสุดท้ายระหว่างการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพของไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจน.....136

Chulalongkorn University

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ขั้นตอนในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ..... 16
รูปที่ 2.2 ระบบจานหมุนชีวภาพ..... 26
รูปที่ 2.3 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบโปรยกรอง..... 27
รูปที่ 2.4 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิดไดซ์เบด..... 27
รูปที่ 2.5 ระบบตัวกรองชีวภาพแบบไมโครบีดส์ฟิลเตอร์..... 28
รูปที่ 2.6 การเพิ่มความหนาของชั้นไบโอฟิล์มบนตัวกรองชีวภาพ..... 29
รูปที่ 2.7 ลักษณะของปลานิล..... 32
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย..... 49
รูปที่ 3.2 แผนผังการดำเนินการทดลองช่วงที่ 1..... 51
รูปที่ 3.3 แผนผังการดำเนินการทดลองช่วงที่ 2..... 52
รูปที่ 3.4 แผนผังการดำเนินการทดลองช่วงที่ 3..... 53
รูปที่ 3.5 ตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดชนิดเส้นใย..... 54
รูปที่ 3.6 (ก) การเตรียมตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดให้อยู่ในรูปแบบที่พร้อมใช้งาน
และ (ข) การปรับสภาพตัวกรองด้วยการบ่มในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ..... 55
รูปที่ 3.7 การติดตั้งถังปฏิกรณ์สำหรับประเมินอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ
ไบโอคอร์ด..... 56
รูปที่ 3.8 การติดตั้งถังปฏิกรณ์สำหรับประเมินอัตราดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ
ไบโอคอร์ด..... 60
รูปที่ 3.9 การติดตั้งถังปฏิกรณ์สำหรับประเมินอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของ
ตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดเมื่อแปรค่าสัดส่วนการเติมคาร์บอนต่อไนโตรเจนเข้าระบบ.. 63
รูปที่ 3.10 การติดตั้งถังปฏิกรณ์สำหรับประเมินอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน
เมื่อแปรเปลี่ยนวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด..... 65

หน้า

รูปที่ 3.11 (ก) การล้างโดยการขยำตัวกรองในน้ำสะอาด (ข) การล้างโดยการแกว่งตัวกรองในน้ำสะอาด และ (ค) การใช้น้ำสะอาดฉีดล้างตัวกรอง 66

รูปที่ 3.12 พันธุ์ปลานิลที่ใช้สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ 70

รูปที่ 3.13 การเตรียมบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำสำหรับชุดควบคุมที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ 71

รูปที่ 3.14 (ก) การพันตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดรอบโครงตะแกรงเหล็ก และ (ข) การติดตั้งโครงตะแกรงเหล็กที่มีตัวกรองชีวภาพลงในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำสำหรับชุดทดลอง 72

รูปที่ 3.15 (ก) การชั่งน้ำหนักสัตว์น้ำ และ (ข) การวัดความยาวสัตว์น้ำ สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของระบบสัตว์น้ำ 78

รูปที่ 4.1 อัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่เวลาการบ่มเชื้อแต่ละสัปดาห์ 80

รูปที่ 4.2 ปริมาณจุลชีพและตะกอนชีวภาพที่สะสมบนมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำที่เวลาแต่ละสัปดาห์ 81

รูปที่ 4.3 ปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ระหว่างการศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 7 สัปดาห์ 82

รูปที่ 4.4 ค่าพีเอช และความเป็นด่าง ระหว่างการศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ ไบโอคอร์ด 83

รูปที่ 4.5 ปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ระหว่างการศึกษาอัตราดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 7 สัปดาห์ 85

รูปที่ 4.6 ค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และความเป็นด่าง ระหว่างการศึกษาอัตราดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด 87

รูปที่ 4.7 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ระหว่างการศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด 88

รูปที่ 4.8 ปริมาณซีโอดี ระหว่างการศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด 89

Chulalongkorn University

หน้า

รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ระหว่างการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ 90

รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไทรต์ ระหว่างการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ 91

รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเทรต ระหว่างการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ 93

รูปที่ 4.12 อัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดเมื่อมีการแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบแตกต่างกัน 95

รูปที่ 4.13 ค่าพีเอช และความเป็นด่าง ระหว่างการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ 97

รูปที่ 4.14 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ระหว่างการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ 99

รูปที่ 4.15 ปริมาณซีโอดี ระหว่างการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ 100

รูปที่ 4.16 ปริมาณจุลชีพและตะกอนชีวภาพคงเหลือบนมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดสำหรับชุดควบคุมและชุดทดลอง 101

รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ระหว่างการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด 103

รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไทรต์ ระหว่างการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด 104

รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเทรต ระหว่างการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด 106

รูปที่ 4.20 อัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดเมื่อแปรเปลี่ยนวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองแตกต่างกัน 107

รูปที่ 4.21 ค่าพีเอช และความเป็นด่าง ระหว่างการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด 109

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

รูปที่ 4.22 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ระหว่างการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด....111

รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ระหว่างการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด....113

รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไทรต์ ระหว่างการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด....114

รูปที่ 4.25 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเทรต ระหว่างการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด....116

รูปที่ 4.26 อัตราการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดเมื่อแปรค่าความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองแตกต่างกัน....118

รูปที่ 4.27 ค่าพีเอช และความเป็นด่าง ระหว่างการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด....120

รูปที่ 4.28 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ระหว่างการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด....122

รูปที่ 4.29 ปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ระหว่างการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ....126

รูปที่ 4.30 ปริมาณตะกอนแขวนลอยในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ ระหว่างการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ....127

รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำระหว่างชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในวันที่ 10 ของการทดลอง....127

รูปที่ 4.32 ค่าพีเอช และความเป็นด่าง ระหว่างการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ....128

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์ของประเทศไทยมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วเพื่อรองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้นของตลาดและผู้บริโภค เกษตรกรจึงนิยมเลี้ยงสัตว์น้ำในระดับความหนาแน่นสูง (Intensive Aquaculture System) เพื่อให้ได้ผลผลิตปริมาณมากต่อพื้นที่การเลี้ยงที่จำกัด โดยรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำความหนาแน่นสูง คือการเลี้ยงด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด (Recirculation Aquaculture Systems; *RAS*) ซึ่งเป็นการเลี้ยงในบ่อปิดที่ผนวกเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพน้ำ และหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่เพื่อให้การเลี้ยงสัตว์น้ำมีความยั่งยืน [1] แต่ปัญหาสำคัญของระบบดังกล่าว คือการสะสมตัวของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในระดับความเข้มข้นสูง โดยอนินทรีย์ไนโตรเจนเหล่านี้เกิดจากกิจกรรมของจุลชีพในบ่อเลี้ยงระหว่างการดำรงชีพของสัตว์น้ำ ซึ่งได้แก่ การย่อยสลายอาหารประเภทโปรตีนที่เหลือจากการบริโภค และของเสียที่สัตว์น้ำขับถ่ายออกมา การสะสมของแอมโมเนียปริมาณเพียงเล็กน้อยส่งผลกระทบต่อสุขภาพของสัตว์น้ำโดยเป็นอันตรายต่อเหงือก และลดความสามารถในการขนถ่ายออกซิเจนของเลือด [2] ดังนั้นในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำควรควบคุมความเข้มข้นของแอมโมเนียไม่เกิน 0.025 มก.-ไนโตรเจน/ล. โดยทั่วไปแนวทางที่ใช้ดำเนินการเพื่อบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนมักถูกออกแบบให้อยู่ในรูปของถังปฏิกรณ์ชีวภาพหลายถังต่อเนื่องกัน ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดสูง แต่มีข้อเสียเรื่องราคาค่าก่อสร้างและความสิ้นเปลืองพื้นที่ในการติดตั้ง

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดภายใต้สภาวะจำลองของระบบบ่อไร้ดินในโรงเรือนด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดชนิดเส้นใยสังเคราะห์โพลิโพรไพลีนในสภาวะแบบจมอยู่ในน้ำ (Biocord^{TM} Biofilter) ซึ่งสามารถติดตั้งภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำได้ จึงประหยัดพื้นที่และค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างถังปฏิกรณ์ โดยกลไกการบำบัดไนโตรเจนของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดเริ่มจากการออกซิไดซ์แอมโมเนียบริเวณพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพในสภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันด้วยแบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายเออร์จนอยู่ในรูปของไนไทรต์ และไนเทรตที่มีความเป็นพิษลดลง อย่างไรก็ตามการสะสมของไนเทรตในระดับความเข้มข้นสูงกว่า 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. ส่งผลให้สัตว์น้ำเกิดความเครียด และมีอัตราการบริโภคอาหารลดลง [3] ดังนั้นการรีดิวซ์ไนเทรตต่อจนอยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชันโดยดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียภายใต้สภาวะกึ่งไร้อากาศหรือแอนน็อกซิกจึงมีความสำคัญ ในปัจจุบันตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดไนโตรเจนจาก

ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีความทนทาน ทำความสะอาดง่าย และมีประสิทธิภาพการบำบัดสูง โดยมีพื้นที่ผิวสำหรับการยึดเกาะของจุลชีพสูงถึง 2.8 ตร.ม./ม.ไบโอคอร์ด [4, 5] ซึ่งเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายเออร์และดีไนทริฟายเออร์ นอกจากนี้ด้วยรูปแบบการเจริญ และการเกาะติดของจุลชีพบนมัดเส้นใยตัวกรองชีวภาพในลักษณะการสร้างสารไลโปโพลิแซ็กคาไรด์ (Lipopolysaccharide) เกิดเป็นชั้นฟิล์มชีวภาพหรือไบโอฟิล์มเพื่อช่วยในการยึดเกาะของจุลชีพ และทำหน้าที่ปกป้องเซลล์จากสิ่งแวดล้อมภายนอก [6] เมื่อชั้นไบโอฟิล์มมีความหนามากขึ้นจะทำให้เกิดสภาวะกึ่งไร้อากาศขึ้นภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพโดยอาจมีผลทำให้การรีดิวซ์ไนเทรตเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ เพื่อเป็นการพิสูจน์แนวความคิดดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดชนิดเส้นใยผ่านกระบวนการร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันเพื่อให้ได้สภาวะในการเดินระบบบำบัดอย่างสมดุลและต่อเนื่องโดยเน้นการบำบัดแอมโมเนียซึ่งมีความเป็นพิษสูงต่อสัตว์น้ำ และสามารถรีดิวซ์ไนเทรตที่เกิดขึ้นได้บางส่วน ทั้งนี้หากแนวทางนี้สามารถดำเนินการได้จริงจะเป็นวิธีการที่สะดวก ประหยัดค่าใช้จ่าย และลดพื้นที่ในส่วนของการติดตั้งระบบบำบัดลงได้โดยเหมาะสำหรับฟาร์มที่มีพื้นที่จำกัด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดชนิดเส้นใยในสภาวะแบบจมอยู่ในน้ำ

1.2.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดเมื่อแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน วิธีการล้างทำความสะอาด และความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

1.2.3 เพื่อประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำผ่านกระบวนการร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับปฏิบัติการ ดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกำหนดขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1.3.1 ตัวกรองชีวภาพที่ใช้ในการศึกษาการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน คือตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดชนิดเส้นใย (Biocord™ biofilter) ซึ่งผลิตจากเส้นใยโพลิโพรไพลีน (Polypropylene; PP) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มม. น้ำหนัก 34 ก./ม. ไบโอคอร์ด และมีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะของจุลชีพ เท่ากับ 2.8 ตร.ม./ม.ไบโอคอร์ด หรือ 82.35 ตร.ม./กก.ไบโอคอร์ด

1.3.2 การทดลองช่วงที่ 1 และ 2 ดำเนินการทดลองแบบแบทช์ (Batch experiment) ในถังปฏิกรณ์ทรงกระบอกสูงปริมาตร 2 ลิตร ด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์และโซเดียมไนเทรต เพื่อเป็นแหล่งแอมโมเนียและไนเทรตสำหรับจุลชีพกลุ่มไนทริฟายเออร์และดีไนทริฟายเออร์ตามลำดับ สำหรับการทดลองช่วงที่ 3 ดำเนินการทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous experiment) ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำปริมาตร 240 ลิตร โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำเป็นเวลา 100 วัน ด้วยน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำในสภาวะจำลองเหมือนจริงด้วยระบบปิดภายในโรงเรือน

1.3.3 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา คืออัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของน้ำในถังปฏิกรณ์ 5 ค่า (1:1 2:1 3:1 4:1 และ 5:1) วิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด 3 วิธี (การขยำตัวกรองเบาๆในน้ำสะอาด การแกว่งตัวกรองในน้ำสะอาด และการใช้น้ำสะอาดฉีดล้างตัวกรอง) ความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ 4 ค่า (1 2 3 และ 4 สัปดาห์/ครั้ง) และการเปรียบเทียบสภาวะการติดตั้ง และไม่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด เมื่อทำการเลี้ยงสัตว์น้ำต่อเนื่องโดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำเป็นเวลา 100 วัน

1.3.4 แหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนที่ใช้ในกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน คือเมทานอล

1.3.5 สัตว์น้ำที่ใช้ในการทดลอง คือปลานิล (*Oreochromis nilotica* Linn.) ทำการเลี้ยงภายใต้สภาวะจำลองของระบบบ่อไร้ดินในโรงเรือน ภายในบ่อพลาสติกปริมาตร 240 ลิตร ที่ความหนาแน่นเริ่มต้น 0.5 กก./ลบ.ม. ของปริมาตรน้ำจืดในบ่อ และให้อาหารเม็ดสำเร็จรูปด้วยอัตราร้อยละ 3–5 ต่อวันของน้ำหนักปลาทั้งหมดในถัง

1.3.6 ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอน ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบ และปริมาณจุลชีพบนตัวกรองชีวภาพ ฯลฯ ตามวิธีมาตรฐานที่ระบุใน Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWA, WPCF, 2005) [7] โดยในทุกการทดลองไม่มีการตรวจวัดปริมาณไนโตรเจนในรูปของก๊าซไนโตรเจน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนีย และไนเทรตผ่านกระบวนการบำบัดร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน และศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดชนิดเส้นใยในสภาวะแบบจมอยู่ในน้ำ โดยข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบส่วนระบบบำบัดที่ติดตั้งภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำซึ่งประยุกต์ใช้งานได้จริง นอกจากนี้องค์ความรู้ที่ได้รับยังสามารถถ่ายทอดแก่กลุ่มเกษตรกร และผู้ประกอบการเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อส่งเสริมให้มีการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ

ปัจจุบันการเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์ของประเทศไทยมีบทบาทสำคัญ เนื่องจากทรัพยากรสัตว์น้ำที่ได้จากธรรมชาติมีปริมาณไม่แน่นอนและมีแนวโน้มลดลง โดยมีสาเหตุมาจากการเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำธรรมชาติ ประกอบกับความต้องการแหล่งอาหารโปรตีนจากการบริโภคสัตว์น้ำมีมากขึ้น จึงกล่าวได้ว่าการเลี้ยงสัตว์น้ำถือเป็นรายได้หลักของประเทศ ดังจะเห็นได้จากมูลค่าการส่งออกสินค้าสัตว์น้ำที่สร้างรายได้เป็นจำนวนมากในช่วงปีที่ผ่านมา ดังนั้นเป้าหมายของการพัฒนาระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำจึงมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มผลผลิตสัตว์น้ำปริมาณมากต่อพื้นที่การเลี้ยงที่จำกัด โดยทั่วไปรูปแบบของระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถจำแนกออกได้ ดังนี้

2.1.1 รูปแบบของระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำที่จำแนกตามการจัดการคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยง [8-10] *สามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ ดังนี้*

2.1.1.1 ระบบเปิด (Open Systems) เป็นระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบดั้งเดิมในบ่อดิน หรือกระชังที่มีการนำน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติเข้าสู่ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำโดยตรง และถ่ายน้ำเสียที่เกิดขึ้นออกสู่ธรรมชาติโดยปราศจากกระบวนการบำบัด ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ทางน้ำเนื่องมาจากของเสียที่เกิดขึ้นมีมากเกินความสามารถในการรองรับของเสีย และการฟอกตัวตามธรรมชาติของแหล่งน้ำ นอกจากนี้การควบคุมคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำให้เหมาะสมสามารถทำได้ยาก ส่งผลให้ต้องทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำบ่อยครั้ง และทำให้สัตว์น้ำเสี่ยงต่อการติดโรคระบาดได้ง่าย

2.1.1.2 ระบบกึ่งเปิด (Semi-Open Systems) เป็นระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำที่พัฒนามาจากระบบดั้งเดิมโดยลดปริมาณการเปลี่ยนถ่ายน้ำลง หรือทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำบางช่วงเวลาเพื่อควบคุมคุณภาพน้ำในระบบให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ และระบบมีความยืดหยุ่นสูงโดยมีศักยภาพในการเปิด หรือปิดระบบเมื่อคุณภาพน้ำภายนอกไม่เหมาะสม นอกจากนี้ยังมีการให้อาหารสัตว์น้ำ และดูแลรักษาความสะอาดภายในบ่ออย่างต่อเนื่อง ทำให้ได้ผลผลิตสัตว์น้ำปริมาณมาก และเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบดั้งเดิมแบบเปิด

2.1.1.3 ระบบปิดหรือระบบหมุนเวียนน้ำ (Closed or Recirculating Systems) เป็นระบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อลดปัญหาการปล่อยน้ำเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยเป็นรูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำบ่อปิดที่ผนวกเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพน้ำ และหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่เพื่อให้การเลี้ยงสัตว์น้ำมีความยั่งยืน ข้อดีของระบบคือ ใช้ปริมาณน้ำในการเลี้ยงสัตว์น้ำน้อยกว่าระบบดั้งเดิมและระบบกึ่งเปิด

นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำได้ โดยเหมาะสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์ในระดับความหนาแน่นสูง อย่างไรก็ตามการเลี้ยงด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดยังมีข้อจำกัดและมีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากสามารถเกิดการสะสมตัวของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากเศษอาหาร และสิ่งขับถ่ายของสัตว์น้ำได้ง่าย จึงต้องทำการติดตั้งปั๊มหมุนเวียนน้ำเข้า-ออกเพื่อผ่านกระบวนการบำบัดตลอดเวลา ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและต้องการพื้นที่ในการติดตั้งส่วนของระบบบำบัด นอกจากนี้การควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียจำเป็นต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการจัดการระบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถแก้ปัญหาได้เมื่อมีเหตุขัดข้องเกิดขึ้น ทั้งนี้การเปรียบเทียบรูปแบบของระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำตามการจัดการคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยง สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำตามการจัดการคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยง [10]

ระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ	ข้อดี	ข้อจำกัด
ระบบดั้งเดิมแบบเปิด	- การลงทุนต่ำ - ประหยัดค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนถ่ายน้ำ	- สัตว์น้ำเสี่ยงต่อการติดโรค - ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
ระบบกึ่งเปิด	- สัตว์น้ำเสี่ยงต่อการติดโรคลดลง - ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมลดลง	- มีความซับซ้อนในการควบคุมระบบมากขึ้น
ระบบปิด หรือระบบหมุนเวียนน้ำ	- สามารถควบคุมคุณภาพน้ำภายในบ่อ - ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม - เหมาะสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์	- เสียค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและการเดินระบบสูง - ต้องการพื้นที่เพื่อติดตั้งส่วนระบบบำบัด - ระบบมีความซับซ้อนและต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการควบคุม

2.1.2 รูปแบบของระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำที่จำแนกตามลักษณะทางกายภาพของบ่อเลี้ยง [3, 10, 11] *สามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ ดังนี้*

2.1.2.1 *ระบบบ่อดินกลางแจ้ง (Outdoor earthen pond)* เป็นรูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำที่ดำเนินการง่าย และมีต้นทุนในการบำบัดต่ำ เนื่องจากระบบสามารถบำบัดไนโตรเจนที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ กล่าวคือการได้รับแสงอย่างเพียงพอทำให้เกิดการเจริญเติบโต และการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายและแพลงก์ตอนพืช ซึ่งสามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายให้กับระบบได้ จากนั้น

แบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟจะทำการออกซิไดซ์แอมโมเนียจากเศษอาหาร และสิ่งขับถ่ายของสัตว์น้ำให้อยู่ในรูปของไนไทรต์ และไนไทรตผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอโดยอาศัยออกซิเจนจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายและแพลงก์ตอนพืช นอกจากนี้กระบวนการดังกล่าวยังทำให้เกิดสารอินทรีย์ขนาดเล็ก ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ และฟอสเฟต ที่สาหร่ายสามารถดูดซึมไปใช้ในการเจริญเติบโตได้โดยเป็นการหมุนเวียนสารตามธรรมชาติ และสุดท้ายการรีดิวซ์ไนเทรตให้อยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนจะเกิดขึ้นต่อเนื่องโดยดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียบริเวณดินตะกอนพื้นบ่อภายใต้สภาวะกึ่งไร้อากาศ อย่างไรก็ตามเนื่องจากกลไกการบำบัดทั้งหมดเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ จึงไม่สามารถควบคุมประสิทธิภาพการบำบัดได้ โดยอัตราการบำบัดจะขึ้นอยู่กับการเติมออกซิเจนของสาหร่าย และอัตราการย่อยสลายไนโตรเจนโดยไนทริฟายเออร์และดีไนทริฟายเออร์

2.1.2.2 *ระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง (Outdoor lining pond)* เป็นบ่อดินกลางแจ้งที่ปูทับด้วยวัสดุสังเคราะห์หรือบ่อกลางแจ้งที่สร้างจากวัสดุอื่น เช่น ซีเมนต์ และพลาสติก จึงไม่มีดินภายในบ่อ กลไกการบำบัดแอมโมเนียตามธรรมชาติสามารถเกิดขึ้นได้ผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันคล้ายคลึงกับระบบบ่อดิน แต่เนื่องจากระบบไม่มีการสะสมของตะกอนดินบริเวณพื้นบ่อ ดังนั้นการรีดิวซ์ไนเทรตจึงเกิดขึ้นได้น้อยมากเมื่อเทียบกับระบบบ่อดินกลางแจ้ง นอกจากนี้การที่ระบบได้รับแสงอย่างเพียงพอทำให้เกิดการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืชซึ่งสามารถควบคุมคุณภาพน้ำภายในบ่อได้ในระดับหนึ่ง นั่นคือ สามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนียให้มีค่าต่ำกว่า 0.03 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ลิตร โดยสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (C:N:P ratio) ที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืช มีค่าเท่ากับ 106:16:1 อย่างไรก็ตามการได้รับแสงตามธรรมชาติเกินความต้องการอาจส่งผลให้แพลงก์ตอนพืชเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วจนเกินขีดความสามารถในการรองรับของระบบ จึงเกิดการบดบังแสง และสร้างความขุ่นให้กับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ นอกจากนี้การตายของแพลงก์ตอนพืชยังทำให้เกิดการปลดปล่อยแอมโมเนียกลับคืนสู่ระบบเป็นวัฏจักร และเกิดการทับถมกันจนกลายเป็นการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศหรือแอนแอโรบิกได้

2.1.2.3 *ระบบบ่อเลี้ยงภายในโรงเรือน (Indoor pond)* เป็นการเลี้ยงสัตว์น้ำภายในอาคารหรือโรงเรือนที่มีหลังคาคลุม โดยอาศัยบ่อซีเมนต์ บ่อพลาสติก หรือบ่อดินที่มีการปูพื้นด้วยพลาสติก จึงไม่ได้รับแสงตามธรรมชาติ หรือได้รับแสงน้อยกว่าระบบบ่อกลางแจ้ง และไม่มีตะกอนดินบริเวณพื้นบ่อ ทำให้กลไกการบำบัดตามธรรมชาติสามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียได้เพียงอย่างเดียว ส่งผลให้เกิดการสะสมตัวของไนเทรตในระดับความเข้มข้นสูง อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวสามารถแก้ปัญหาในเรื่องของสภาพดิน และการติดโรคในสัตว์น้ำเนื่องมาจากปนเปื้อนของเชื้ออันไม่พึงประสงค์จากดิน ตลอดจนสามารถควบคุมพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำได้ง่ายกว่าระบบอื่น

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

คุณภาพน้ำมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิต และปริมาณผลผลิตสัตว์น้ำ เนื่องจากน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการเจริญเติบโต กิจกรรมทางชีวเคมี การรักษาสมดุลร่างกาย การขับถ่าย และการสืบพันธุ์ของสัตว์น้ำ ดังนั้นการเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์จึงควรควบคุมคุณภาพน้ำภายในบ่อให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลผลิตปริมาณมากตามความต้องการ โดยปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำมีดังนี้

2.2.1 แอมโมเนีย (Ammonia; NH_3)

แอมโมเนียเป็นสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เกิดจากการย่อยสลายเศษอาหาร ซึ่งส่วนใหญ่มีโปรตีนสูงถึงร้อยละ 25–30 ดังนั้นการให้อาหารสัตว์น้ำมากเกินความต้องการก่อให้เกิดการสะสมตัวของแอมโมเนียในระบบ นอกจากนี้แอมโมเนียยังเกิดจากการเปลี่ยนกรดอะมิโนในร่างกายของสัตว์น้ำ และขับออกมาในรูปของสิ่งปฏิกูล โดยทั่วไปแอมโมเนียที่พบในน้ำมี 2 รูป คือ รูปของแอมโมเนียที่ไม่แตกตัว หรือแอมโมเนียอิสระ (Un-Ionized Form; NH_3) และรูปของแอมโมเนียที่แตกตัวได้ หรือแอมโมเนียมอิออน (Ionized-Form; NH_4^+) โดยแอมโมเนียทั้ง 2 รูปสามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้โดยขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ปริมาณเกลือแร่ และอุณหภูมิของน้ำ ซึ่งพีเอชจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนรูปของแอมโมเนียในน้ำมากกว่าปริมาณเกลือแร่และอุณหภูมิ ดังแสดงในสมการสมดุลเคมีที่ (2.1)

(Low pH) $NH_4^+ + OH^- \longleftrightarrow NH_3 + H_2O$ (High pH) (2.1)

เมื่อพีเอชและอุณหภูมิของน้ำสูงขึ้นทำให้อัตราส่วนของแอมโมเนียต่อแอมโมเนียมอิออนสูงขึ้น ในทางตรงข้ามพบว่าเมื่อปริมาณเกลือแร่สูงขึ้นทำให้สมดุลเคมีย้อนกลับส่งผลให้อัตราส่วนของแอมโมเนียมอิออนต่อแอมโมเนียสูงขึ้น โดยทั่วไปแอมโมเนียจะมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมากกว่าแอมโมเนียมอิออน ซึ่งผลกระทบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ระดับ ดังนี้

- ความเป็นพิษในระดับเฉียบพลัน (Acute toxicity)

ความเป็นพิษของแอมโมเนียในลักษณะเฉียบพลันจะส่งผลให้สัตว์น้ำตายทันที ซึ่งสัตว์น้ำต่างชนิดกันจะสามารถทนต่อความเป็นพิษได้ในระดับที่แตกต่างกัน

- ความเป็นพิษในระดับที่ไม่ทำให้สัตว์น้ำตาย (Sublethal toxicity)

แอมโมเนียในระดับความเข้มข้นต่ำส่งผลกระทบต่อกระบวนการเมตาบอลิซึม นั่นคือเมื่อปริมาณแอมโมเนียในน้ำสูงขึ้น ทำให้สัตว์น้ำขับแอมโมเนียออกจากเลือดได้น้อยลง ส่งผลให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียในเลือดและเนื้อเยื่อ และเกิดผลเสียต่อปฏิกิริยาชีวเคมีในเซลล์ นอกจากนี้ยังเป็นอันตรายต่อเหงือก และลดความสามารถในการขนถ่ายออกซิเจนของเลือดส่งผลให้สัตว์น้ำอ่อนแอและ

ติดโรคได้ง่าย โดยมีรายงานว่าการสะสมของแอมโมเนียในน้ำเพียง 0.1 มก.-ไนโตรเจน/ล. ทำให้สัตว์น้ำเครียดและส่งผลต่อการติดโรคของสัตว์น้ำ ดังนั้นในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำควรควบคุมระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียไม่เกิน 0.025 มก.-ไนโตรเจน/ล. [2, 8, 10, 12]

2.2.2 ไนไทรต์ (Nitrite; NO_2^-)

ไนไทรต์เป็นสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เกิดจากการออกซิไดซ์แอมโมเนียผ่านกระบวนการไนไทรเทชัน (Nitritation) โดยแอมโมเนียออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย (Ammonium-oxidizing Bacteria; AOB) โดยทั่วไปไนไทรต์เป็นรูปที่ไม่คงตัวจึงเกิดการออกซิไดซ์ต่อจนอยู่ในรูปของไนเทรต อย่างไรก็ตามในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีปริมาณแอมโมเนียสูงอาจเกิดการสะสมตัวของไนไทรต์ได้ ความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำเกิดจากการที่ไนไทรต์ไปออกซิไดซ์เฟอร์รัสอิออน (Fe^{2+}) ที่เป็นองค์ประกอบของฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) ในเลือดของสัตว์น้ำเกิดเป็นเฟอร์ริกอิออน (Fe^{3+}) ทำให้ฮีโมโกลบินเปลี่ยนเป็นเมทธีโมโกลบิน (Methemoglobin) ซึ่งมีความสามารถในการรับออกซิเจนต่ำลง ทำให้เลือดไม่สามารถลำเลียงออกซิเจนได้จนเกิดภาวะออกซิเจนในเลือดต่ำกว่าปกติ หรืออาการเลือดน้ำตาลในสัตว์น้ำ (Hypoxia and Brown blood disease) โดยทั่วไปควรควบคุมระดับความเข้มข้นของไนไทรต์ไม่เกิน 1 มก.-ไนโตรเจน/ล. ซึ่งการลดความเป็นพิษของไนไทรต์สามารถทำได้โดยเติมแคลเซียมและคลอไรด์ นอกจากนี้การควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วง 7.5–8.5 ทำการเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง และเปลี่ยนถ่ายน้ำเป็นประจำสามารถลดความเป็นพิษของไนไทรต์ได้เช่นกัน [12, 13]

2.2.3 ไนเทรต (Nitrate; NO_3^-)

ไนเทรตเป็นสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เกิดจากการออกซิไดซ์ไนไทรต์ผ่านกระบวนการไนเทรเทชัน (Nitratation) โดยไนไทรต์ออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย (Nitrite-oxidizing Bacteria; NOB) โดยทั่วไปไนเทรตเป็นสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนที่มีความเสถียรสูง และมีความเป็นพิษน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามในระบบที่มีปริมาณออกซิเจนละลายสูงสามารถเกิดการสะสมของไนเทรตเนื่องจากกระบวนการไนทริฟิเคชันได้ การสะสมไนเทรตจนถึงความเข้มข้นระดับหนึ่งอาจส่งผลให้สัตว์น้ำเกิดความเครียด อัตราการบริโภคอาหารต่ำ อัตราการเจริญเติบโตช้า และอัตราการเจริญพันธุ์ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าไนเทรตมีความเป็นพิษต่อตับปลา ก่อให้เกิดแผลและผื่นแดงตามลำตัวและครีบ และขัดขวางการขนถ่ายออกซิเจนในกระบวนการเมตาบอลิซึมของสัตว์น้ำ โดยความเข้มข้นของไนเทรตที่เหมาะสมในการเลี้ยงสัตว์น้ำทางทฤษฎีควรมีค่าต่ำกว่า 23 มก.-ไนโตรเจน/ล. แต่ในทางปฏิบัติระบุว่าเมื่อความเข้มข้นของไนเทรตมีค่าเกิน 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. ควรทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำในระบบ [11-15]

2.2.4 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ เนื่องจากสัตว์น้ำเป็นสัตว์เลือดเย็น (Poikilotherma) อุณหภูมิในร่างกายจึงเปลี่ยนแปลงตามสิ่งแวดล้อม โดยกระบวนการเมตาบอลิซึมจะเพิ่มขึ้น 2–3 เท่า เมื่ออุณหภูมิน้ำเพิ่มขึ้น 10 °ซ โดยทั่วไปสัตว์น้ำจะใช้เหงือกในการควบคุมอุณหภูมิภายในร่างกายให้ต่างจากอุณหภูมิน้ำประมาณ 0.5–1 °ซ ซึ่งสัตว์น้ำขนาดเล็กจะสามารถปรับและรักษาอุณหภูมิร่างกายได้ดีกว่าสัตว์น้ำขนาดใหญ่ เนื่องจากมีสัดส่วนปริมาตรของเหงือกต่อร่างกายมากกว่า อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำอย่างรวดเร็วอาจเป็นสาเหตุให้สัตว์น้ำอ่อนแอหรือช็อกตายได้ นอกจากนี้อุณหภูมิยังมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำอื่น นั่นคือเมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายลดลง ปฏิกิริยาชีวเคมีของจุลชีพสูงขึ้น เกิดการชะละลายของสารพิษจำพวกยากำจัดศัตรูพืชลงสู่แหล่งน้ำ และเร่งการดูดซึมสารพิษที่ละลายน้ำเข้าสู่ร่างกายของสัตว์น้ำได้รวดเร็วขึ้น โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำมีค่าอยู่ในช่วง 19–28 °ซ [16, 17]

2.2.5 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen; DO)

ปริมาณออกซิเจนละลายเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการเมตาบอลิซึม การเจริญเติบโต และสืบพันธุ์ของสัตว์น้ำ โดยอัตราการใช้ออกซิเจนของสัตว์น้ำจะแตกต่างกันตามชนิด ขนาด พฤติกรรม และสภาพแวดล้อม นั่นคือสัตว์น้ำขนาดเล็กจะใช้ออกซิเจนต่อหน่วยน้ำหนักมากกว่าสัตว์น้ำขนาดใหญ่ และอัตราการใช้ออกซิเจนของสัตว์น้ำที่เคลื่อนที่จะสูงกว่าสัตว์น้ำที่อยู่นิ่ง ทั้งนี้ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการละลายของออกซิเจน ได้แก่ อุณหภูมิ และความเค็ม โดยเมื่อน้ำมีอุณหภูมิและความเค็มสูงขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการละลายของออกซิเจนลดลง และในระบบที่มีปริมาณออกซิเจนละลายไม่เพียงพอยังเป็นสาเหตุให้เกิดการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยแบคทีเรียกลุ่มแอนแอโรบิก โดยจะมีการก๊าซผลิตมีเทน (Methane; CH_4) และไฮโดรเจนซัลไฟล์ (Hydrogen sulfide; H_2S) ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพของสัตว์น้ำ การควบคุมปริมาณออกซิเจนในระบบสามารถทำได้โดยการติดตั้งเครื่องเติมอากาศ ทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำ และทำความสะอาดบ่ออย่างต่อเนื่อง โดยควรควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายให้มีค่ามากกว่า 5 มก.-ออกซิเจน/ล. ในทางตรงข้ามหากปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีค่าสูงเกินระดับอิ่มตัวอาจส่งผลให้เกิดฟองอากาศในเลือดของสัตว์น้ำซึ่งอาจเป็นอันตรายถึงตายได้ [10, 18] โดยผลกระทบของปริมาณออกซิเจนละลายต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบของปริมาณออกซิเจนละลายต่อสัตว์น้ำ [18]

ปริมาณออกซิเจน (มก.-ออกซิเจน/ล.)	ผลกระทบต่อสัตว์น้ำ
<1	เป็นระดับที่อันตรายถ้าสัตว์น้ำอาศัยอยู่เป็นเวลานาน
1–5	เป็นระดับที่ทำให้อัตราการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำลดลง และการสืบพันธุ์ผิดปกติถ้าสัตว์น้ำอาศัยอยู่เป็นเวลานาน
>5	เป็นระดับปกติสำหรับสัตว์น้ำทั่วไป

2.2.6 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ความเป็นกรด-ด่าง หรือพีเอช คือความเข้มข้นของไฮโดรเจนอิออนในน้ำ (H^+) โดยในระบบที่มีค่าพีเอชสูงหรือต่ำเกินไปส่งผลให้สัตว์น้ำเกิดความเครียด และมีอัตราการเจริญเติบโตลดลง โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำมีค่าอยู่ในช่วง 7.8–8.5 และไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชเกิน 2 หน่วยต่อวัน ในช่วงพีเอชระหว่าง 4–6 และ 9–11 ทำให้สัตว์น้ำมีอัตราการเจริญเติบโตช้า อ่อนแอ และสามารถติดโรคได้ง่าย นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชยังส่งผลต่อการแตกตัวของสารพิษโดยระบบที่มีพีเอชสูงทำให้พิษของแอมโมเนียเพิ่มขึ้นและพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลง [8, 19] ผลกระทบของความเป็นกรด-ด่างต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลกระทบของความเป็นกรด-ด่างต่อสัตว์น้ำ [19]

ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ผลกระทบต่อสัตว์น้ำ
<5	เป็นอันตรายและอาจทำให้สัตว์น้ำตายได้อย่างรวดเร็ว
5–7	อัตราการเจริญเติบโตและอัตราการบริโภคอาหารลดลง และอาจทำให้สัตว์น้ำตายได้ถ้าอาศัยอยู่เป็นเวลานาน
7.5–8.5	เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ
8.5–10.5	อัตราการเจริญเติบโตและอัตราการบริโภคอาหารลดลง และอาจทำให้สัตว์น้ำตายได้ถ้าอาศัยอยู่เป็นเวลานาน
>10.5	เป็นอันตรายและอาจทำให้สัตว์น้ำตายได้อย่างรวดเร็ว

2.2.7 สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)

สภาพความเป็นด่างของน้ำ คือความสามารถของน้ำในการรับไฮโดรเจนอิออนเพื่อให้กรดอยู่ในสภาวะเป็นกลาง โดยทั่วไปสารประกอบที่ทำให้เกิดสภาพด่างในน้ำมี 3 ชนิด ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ไบคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และคาร์บอเนต (HCO_3^-) โดยสภาพด่างในน้ำสามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชได้ด้วยระบบบัฟเฟอร์ (Buffer system) กล่าวคือค่าพีเอชของระบบจะคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเติมกรดแก่หรือเบสแก่เข้าสู่ระบบในปริมาณเล็กน้อย ดังแสดงในสมการที่ (2.2) และ (2.3)

$$HCO_3^- \longleftrightarrow CO_3^{2-} + H_2O \qquad (2.2)$$

$$CO_3^{2-} + H_2O \longrightarrow 2OH^- + CO_2^- \qquad (2.3)$$

สภาพด่างที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีค่ามากกว่า 100 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. และสภาพด่างสำหรับการเลี้ยงปลานิลควรอยู่ในช่วง 20–150 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. [8, 18]

2.2.8 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)

ไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดจากการสะสมของสารอินทรีย์ และตะกอนแขวนลอยบริเวณพื้นบ่อ ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวเกิดสภาวะไร้อากาศ และแบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria; SRB) สามารถใช้ออกซิเจนที่อยู่ในรูปของสารประกอบซัลเฟต (SO_4^{2-}) ในการรับอิเล็กตรอน ทำให้เกิดซัลไฟด์ (S^{2-}) ดังแสดงในสมการสมดุลเคมีที่ (2.4)

$$\text{Organic Matter} + SO_4^{2-} \longrightarrow S^{2-} + H_2O + CO_2 \qquad (2.4)$$

ซัลไฟด์ที่พบในแหล่งน้ำสามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไฮโดรซัลไฟด์อิออน (HS^-) และไบซัลไฟด์อิออน (S^{2-}) ซึ่งสัดส่วนของซัลไฟด์ที่พบขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของแหล่งน้ำโดยน้ำที่มีพีเอชต่ำจะพบไฮโดรเจนซัลไฟด์มาก และน้ำที่มีพีเอชเป็นกลางจะพบสารประกอบจำพวกซัลไฟด์อิออน (HS^- และ S^{2-}) ดังแสดงในสมการสมดุลเคมีที่ (2.5) และ (2.6)

$$S^{2-} + H^+ \longleftrightarrow HS^- \qquad (2.5)$$

$$HS^- + H^+ \longleftrightarrow H_2S \qquad (2.6)$$

โดยทั่วไปไฮโดรเจนซัลไฟล์จะมีความเป็นพิษมากกว่าไฮโดรซัลไฟด์อิออนและไบซัลไฟด์อิออน โดยความเป็นพิษเกิดจากการที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ไปสกัดกั้นการแพร่ของออกซิเจนในเซลล์ส่งผลให้ปริมาณแลกเตท (Lactate) ในเลือดของสัตว์น้ำสูงขึ้น เป็นสาเหตุให้กระบวนการเมตาบอลิซึมถูกยับยั้ง โดยระดับความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ปลอดภัยสำหรับสัตว์น้ำมีค่าอยู่ในช่วง 0.01–0.05 ส่วนในล้านส่วน [13, 20]

2.2.9 อนุภาคของแข็งแขวนลอย (Suspended solid matter)

อนุภาคของแข็งแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเกิดจากเศษอาหาร สิ่งขับถ่าย และการเจริญเติบโตของเซลล์ของจุลชีพภายในบ่อ โดยสัตว์น้ำจะบริโภคอาหารเพียงร้อยละ 80–90 ของปริมาณอาหารทั้งหมด และอาหารส่วนที่ไม่ถูกบริโภคจะเกิดการย่อยสลาย ซึ่งสามารถประเมินปริมาณของแข็งแขวนลอยเบื้องต้นได้โดยคำนวณจากน้ำหนักแห้งในอัตราร้อยละ 25 ของปริมาณอาหารที่ให้ในระบบ โดยทั่วไปควรควบคุมปริมาณของแข็งแขวนลอยในระบบให้มีค่าต่ำกว่า 80 มก./ล. เนื่องจากอนุภาคของแข็งแขวนลอยสามารถบดบังการหาอาหาร และเกิดการอุดตันบริเวณเหงือกของสัตว์น้ำ ซึ่งส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการหายใจ อัตราการฟักไข่ และการสร้างเซลล์สืบพันธุ์ นอกจากนี้อนุภาคของแข็งแขวนลอยซึ่งเป็นสารอินทรีย์จะเกิดย่อยสลายโดยจุลชีพภายในระบบเป็นสาเหตุให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง [21-23]

2.3 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด

ตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม [24] เรื่องการกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด และกำหนดให้บ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่จะต้องถูกควบคุมการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังปรากฏในในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 125 ตอนพิเศษ 21 ง ลงวันที่ 30 มกราคม 2551 หน้า 16 และ 20 ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

“บ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด” หมายความว่า พื้นที่ที่ปรับให้ขังน้ำได้ โดยวิธีการต่างๆ เพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำแต่ไม่รวมถึงบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง หรือบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำกร่อยที่มีประกาศของรัฐมนตรีกำหนดให้เป็นแหล่งกำเนิดมลพิษไว้แล้ว

“พื้นที่บ่อ” หมายความว่า พื้นที่บ่อที่ใช้เลี้ยง และให้หมายความรวมถึงคู คลองส่ง และระบายน้ำ

“สัตว์น้ำ” หมายความว่า สัตว์น้ำจืดที่เพาะเลี้ยงในบ่อ เช่น ปลา กุ้ง หอย เต่า จระเข้

“น้ำทิ้ง” หมายความว่า น้ำที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแล้วจนเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งตามที่กำหนดไว้ในประกาศนี้ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

“บ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดประเภท ก” หมายความว่า บ่อที่ใช้เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่กินพืชเป็นอาหารทุกชนิด ซึ่งใช้น้ำจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติ โดยไม่มีการเติมสารที่ก่อให้เกิดความเค็ม เช่น น้ำทะเล น้ำใต้ดินที่มีค่าความเค็ม เกลือ หรือสารอื่นใด ลงในบ่อเพาะเลี้ยงดังกล่าว

“บ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดประเภท ข” หมายความว่า บ่อที่ใช้เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่กินเนื้อเป็นอาหารทุกชนิด หรือสัตว์น้ำอื่นๆ ที่กินทั้งเนื้อและพืชเป็นอาหาร ซึ่งใช้น้ำจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติโดยไม่มีการเติมสารที่ก่อให้เกิดความเค็ม เช่น น้ำทะเล น้ำใต้ดินที่มีค่าความเค็ม เกลือ หรือสารอื่นใดลงในบ่อเพาะเลี้ยงดังกล่าว

“บ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดประเภท ค” หมายความว่า บ่อที่มีการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทุกชนิด ซึ่งมีการใช้สารที่ก่อให้เกิดความเค็ม เช่น น้ำทะเล น้ำใต้ดินที่มีค่าความเค็ม เกลือ หรือสารอื่นใดเติมลงในบ่อเพาะเลี้ยงเพื่อปรับระดับค่าความเค็มของน้ำที่ใช้เพาะเลี้ยงให้เหมาะสมกับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชนิดนั้นๆ

ตารางที่ 2.4 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด [10]

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	เกณฑ์มาตรฐานสูงสุด			
		มาตรฐาน ก	มาตรฐาน ข	มาตรฐาน ค	
				พื้นที่น้อยกว่า 10 ไร่	พื้นที่มากกว่าหรือเท่ากับ 10 ไร่
บีโอดี	มก./ล.	ไม่เกิน 20	ไม่เกิน 20	-	ไม่เกิน 20
สารแขวนลอย	มก./ล.	ไม่เกิน 80	ไม่เกิน 80	-	ไม่เกิน 80
แอมโมเนีย	มก.-ไนโตรเจน/ล.	-	ไม่เกิน 1.1	-	ไม่เกิน 1.1
ไนโตรเจนรวม	มก.-ไนโตรเจน/ล.	-	ไม่เกิน 4.0	-	ไม่เกิน 4.0
ฟอสฟอรัสรวม	มก.-ฟอสฟอรัส/ล.	-	ไม่เกิน 0.5	-	ไม่เกิน 0.5
พีเอช	-	-	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-8.5
สภาพนำไฟฟ้าที่ 25°ซ	เดซิซีเมน/ม.	-	-	ไม่เกิน 0.75	ไม่เกิน 0.75

2.4 ประเภทของสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำ

ไนโตรเจนเป็นสารอาหารที่มีความสำคัญต่อระบบนิเวศน์ในแหล่งน้ำเนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในโปรตีนและเซลล์ของสิ่งมีชีวิต โดยทั่วไปสามารถแบ่งประเภทของสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำออกเป็น 4 ประเภท [2] ดังนี้

2.4.1 สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic-nitrogen compounds)

สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน หมายถึง สารประกอบไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตจำพวกพืชและสัตว์ รวมถึงของเสียที่เกิดจากเศษอาหารที่เหลือจากการ

บริโภค และของเสียจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำ นอกจากนี้สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนยังรวมไปถึงสารที่เกิดจากการย่อยสลายของจุลชีพ ได้แก่ โปรตีน คลอโรฟิลล์ กรดอะมิโน กรดนิวคลีอีก กรดยูริก และยูเรีย เป็นต้น

2.4.2 สารประกอบแอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia-nitrogen compounds)

สารประกอบแอมโมเนียไนโตรเจน หมายถึง สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนีย หรือสารประกอบแอมโมเนียซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนรูปของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนโดยกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งภายในสภาวะมีอากาศอย่างเพียงพอและสภาวะไร้อากาศ โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารประกอบแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำ 2 รูปแบบ คือ แอมโมเนียอิสระ และแอมโมเนียมอิออน พบว่าแอมโมเนียอิสระมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมากกว่าแอมโมเนียมอิออนประมาณ 50 เท่า

2.4.3 สารประกอบไนไทรต์ (Nitrite-nitrogen compounds)

สารประกอบไนไทรต์ หมายถึง สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของไนไทรต์ซึ่งเกิดจากกระบวนการออกซิเดชันสารประกอบแอมโมเนียผ่านกระบวนการไนไทรเทชันโดยแอมโมเนียมออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย หรือกระบวนการออกซิเดชันที่ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบแอมโมเนียไนโตรเจนผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอ โดยทั่วไปไม่ค่อยพบไนไทรต์ในแหล่งน้ำเนื่องจากเป็นรูปที่ไม่คงตัวจึงเกิดการออกซิไดซ์ต่อให้อยู่ในรูปของไนเทรต อย่างไรก็ตามในกรณีที่แหล่งน้ำมีปริมาณแอมโมเนียสูงมากก็มีโอกาสเกิดการสะสมของไนไทรต์ได้

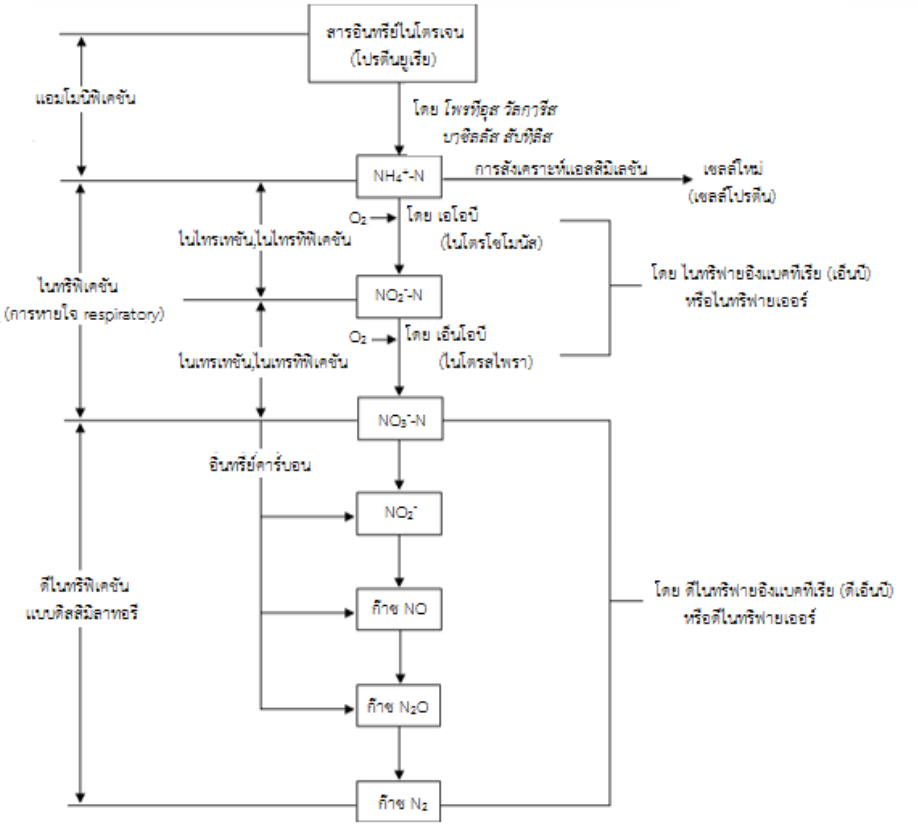
2.4.4 สารประกอบไนเทรต (Nitrate-nitrogen compounds)

สารประกอบไนเทรต หมายถึง สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปไนเทรตซึ่งเกิดจากกระบวนการออกซิเดชันสารประกอบไนไทรต์ผ่านกระบวนการไนเทรเทชันโดยไนไทรต์ออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย หรือกระบวนการออกซิเดชันที่สมบูรณ์ของสารประกอบแอมโมเนียไนโตรเจนผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอ โดยทั่วไปไนเทรตเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่มีความเสถียรสูงและมีความเป็นพิษน้อยที่สุด

2.5 การบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

การบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำสามารถเกิดขึ้นผ่าน 3 กระบวนการหลักต่อเนื่องกัน นั่นคือกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน ไนทริฟิเคชัน และดีไนทริฟิเคชัน โดยอาศัยการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟ (Heterotroph) ในการเปลี่ยนรูปสารประกอบ

อินทรีย์ไนโตรเจนให้อยู่ในรูปของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนผ่านกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอและสภาวะไร้อากาศ จากนั้นไนทริฟายอิงแบคทีเรียซึ่งเป็นจุลชีพในกลุ่มออโตโทรฟ (Autotroph) จะทำการออกซิไดซ์แอมโมเนียให้อยู่ในรูปของไนไทรต์ และไนเทรตผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอ และสุดท้ายดีไนทริฟายเออร์จะทำการรีดิวซ์ไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อจนอยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจน ซึ่งเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่ไม่มีผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ทางน้ำผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชันภายใต้สภาวะกึ่งไร้อากาศหรือแอนน็อกซิก โดยขั้นตอนในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนต่างๆ ในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ [25]

2.5.1 กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนให้อยู่ในรูปของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน หรือเรียกว่าไนโตรเจนมิเนอรัลไลเซชัน (Nitrogen mineralization) โดยจุลชีพที่มีบทบาทได้แก่ แอมโมนิฟายอิงแบคทีเรีย (Ammonifying bacteria) แบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟ

แอคทิโนมัยซีทีส และสิ่งมีชีวิตจำพวกราซึ่งสามารถพบภายในน้ำ และดินตะกอนบริเวณพื้นบ่อ กระบวนการแอมโมนิฟิเคชันเริ่มต้นจากการเปลี่ยนโปรตีนภายในเศษอาหารและของเสียจากการขับถ่ายสัตว์น้ำให้อยู่ในรูปของกรดอะมิโน จากนั้นกรดอะมิโนจะเกิดการลดอะมีน (Deamination) และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารประกอบอนินทรีย์แอมโมเนียไนโตรเจน โดยกระบวนการดังกล่าวสามารถเกิดได้ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีอากาศ แต่เนื่องจากบริเวณดินตะกอนพื้นบ่อมีสารอินทรีย์ไนโตรเจนสะสมในปริมาณมากดังนั้นการผลิตแอมโมเนียส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นภายใต้สภาวะไร้อากาศบริเวณผิวของดินตะกอน ทั้งนี้อัตราการผลิตแอมโมเนียขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ พีเอช ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ปริมาณและประเภทของสารอินทรีย์ในน้ำ โดยน้ำที่มีค่าพีเอชเป็นกลางหรือด่างเล็กน้อยจะมีอัตราการผลิตแอมโมเนียสูงและอัตราการผลิตแอมโมเนียจะเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 40°ซ ในส่วนของแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันสามารถนำไปใช้ได้ 3 รูปแบบ นั่นคือถูกดูดซับไว้กับอนุภาคของดินเหนียว (Clay micelle) ถูกดูดซึมเพื่อเป็นแหล่งอาหารของพืช และถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปไนเทรตผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน ซึ่งการใช้แอมโมเนียโดยสิ่งมีชีวิตในสองรูปแบบหลังสามารถเกิดได้ดีในน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนละลายสูง [10, 26, 27]

2.5.2 กระบวนการไนทริฟิเคชัน (Nitrification)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนแอมโมเนียจากกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันให้อยู่ในรูปไนเทรตโดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟ เช่น *Arthrobacter* และ *Aspergillis* และแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟ หรือไนทริฟายเออร์ภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอ แต่ทั้งนี้เนื่องจากไนทริฟายอิงแบคทีเรียมีบทบาทในกระบวนการดังกล่าวมากกว่า จึงตั้งสมมุติฐานว่ากระบวนการไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นโดยอาศัยไนทริฟายเออร์ และใช้คาร์บอนไดออกไซด์หรือไบคาร์บอเนตเป็นแหล่งคาร์บอนเพียงอย่างเดียว โดยประกอบด้วย 2 ขั้นตอนย่อย คือ กระบวนการไนไทรทริฟิเคชัน (Nitritification) หรือไนไทรเทชัน (Nitritation) และกระบวนการไนเทรทริฟิเคชัน (Nitratification) หรือไนเทรเทชัน (Nitratation) [28, 29] โดยมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไนไทรทริฟิเคชัน หรือไนไทรเทชัน เป็นการออกซิไดซ์แอมโมเนียให้อยู่ในรูปไนไทรต์ โดยอาศัยแอมโมเนียมออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย (Ammonium-oxidizing Bacteria; AOB) เช่น ไนโตรโซโมแนส (*Nitrosomonas* spp.) และไนโตรโซสปิรา (*Nitrosospira* spp.) เป็นต้น ดังแสดงในสมการที่ (2.7) และ (2.8) โดยสมการสตอยชิโอเมตริค (Stoichiometric formulas) สำหรับไนโตรโซโมแนสมีค่ายีลด์ (Yield) เท่ากับ 0.15 ก.วีเอสเอส/ก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน และมีการใช้ออกซิเจนในการออกซิไดซ์แอมโมเนีย เท่ากับ 3.22 มก.-ออกซิเจน/มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน

$$55NH_4^+ + 76O_2 + 109HCO_3^- \longrightarrow C_5H_7O_2N + 54NO_2^- + 57H_2O + 104H_2CO_3 \quad (2.7)$$

หรือ $$55NH_4^+ + 76O_2 + 5CO_2 \longrightarrow C_5H_7O_2N + 54NO_2^- + 52H_2O + 109H^+ \quad (2.8)$$

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการไนเทรทริฟิเคชัน หรือไนเทรเทชัน เป็นการออกซิไดซ์ไนไทรต์ที่เกิดขึ้นให้อยู่ในรูปไนเทรต โดยแบคทีเรียกลุ่มไนไทรต์ออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย (Nitrite-oxidizing Bacteria; NOB) เช่น ไนโตรแบคเทอร์ (*Nitrobacter* spp.) และไนโตรสปิรา (*Nitrospira* spp.) เป็นต้น ดังแสดงในสมการที่ (2.9) และ (2.10) โดยสมการสตอยชิโอเมตริคสำหรับไนโตรแบคเทอร์มีค่ายีลด์เท่ากับ 0.02 ก.วีเอสเอส/ก.ไนไทรต์-ไนโตรเจน และมีการใช้ออกซิเจนในการออกซิไดซ์ไนไทรต์ เท่ากับ 1.11 มก.-ออกซิเจน/มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน

$$400NO_2^- + NH_4^+ + 4H_2CO_3 + HCO_3^- + 195O_2 \longrightarrow C_5H_7O_2N + 3H_2O + 400NO_3^- \quad (2.9)$$

หรือ $$400NO_2^- + NH_4^+ + 5CO_2 + 195O_2 + 2H_2O \longrightarrow C_5H_7O_2N + 400NO_3^- + H^+ \quad (2.10)$$

โดยเมื่อรวมกระบวนการไนทริฟิเคชันทั้ง 2 ขั้นตอนเข้าด้วยกัน สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (2.11)

$$NH_4^+ + 1.86O_2 + 1.98HCO_3^- \rightarrow 0.02C_5H_7O_2N + 0.98NO_3^- + 1.04\ H_2O + 1.88\ H_2CO_3 \quad (2.11)$$

จากสมการที่ (2.11) สามารถสรุปได้ดังนี้

- ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิไดซ์แอมโมเนียให้อยู่ในรูปไนเทรต เท่ากับ 4.33 มก.-ออกซิเจน/มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน
- สภาพความเป็นด่างไบคาร์บอเนต (Bicarbonate alkalinity; HCO_3^-) ที่ใช้ในกระบวนการออกซิไดซ์แอมโมเนีย มีค่าเท่ากับ 8.64 มก.-ไบคาร์บอเนต/มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ในกรณีที่น้ำมีค่าความเป็นด่างไม่พอจะส่งผลให้อัตราไนทริฟิเคชันลดลง
- ปริมาณเซลล์ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณแอมโมเนียที่ถูกออกซิไดซ์ เนื่องจากจุลชีพที่มีบทบาทในกระบวนการไนทริฟิเคชันเป็นแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟซึ่งมีค่ายิลด์ต่ำ

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไนทริฟิเคชัน ได้แก่

- อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลต่อการเจริญเติบโตของไนโตรแบคเทอร์มากกว่าไนโตรโซโมนัส โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไนทริฟิเคชันมีค่าประมาณ 30–36 °ซ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำอย่างกะทันหันส่งผลให้จุลชีพช็อกและหยุดทำงานได้ [14]

- ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen; DO)

ในทางปฏิบัติการออกซิไดซ์แอมโมเนียสามารถเกิดขึ้นเมื่อปริมาณออกซิเจนละลายเท่ากับ 1 มก.-ออกซิเจน/ล. เนื่องจากไนทริฟายเออร์มีความไวต่อปริมาณออกซิเจนละลายความเข้มข้นต่ำ ทั้งนี้หากระบบมีปริมาณออกซิเจนละลายสูงจะส่งผลให้อัตราไนทริฟิเคชันเกิดเร็ว แต่การเติมอากาศมากจนเกินไปทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและเสียค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูง ในทางตรงข้ามถ้าปริมาณออกซิเจนละลายต่ำกว่า 0.5–2.0 มก.-ออกซิเจน/ล. อาจทำให้ปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชัน ส่งผลให้เกิดกระบวนการรีดักชันแทนได้ [14]

- ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญของไนโตรโซโมนัส และไนโตรแบคเทอร์ มีค่าอยู่ในช่วง 8.0–8.5 และ 7.0–8.0 ตามลำดับ แต่เนื่องจากกระบวนการไนทริฟิเคชันมีการใช้ค่าสภาพเป็นด่างส่งผลให้ค่าพีเอชในระบบลดลง และหากค่าพีเอชในระบบต่ำกว่า 7.0 หรือสูงกว่า 8.5 อาจทำให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียและไนไทรต์ในระบบและส่งผลยับยั้งการทำงานของไนทริฟายเออร์ [19]

- ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (Ammonia concentration)

การสะสมของแอมโมเนียในระดับความเข้มข้นเท่ากับ 10–150 และ 0.1–1.0 มก.ไนโตรเจน/ล. ส่งผลยับยั้งการทำงานของไนโตรโซโมแนส และไนโตรแบคเทอร์ ตามลำดับ ในทางกลับกันหากความเข้มข้นของแอมโมเนียซึ่งเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการไนทริฟิเคชันต่ำเกินไป ส่งผลให้อัตราการบำบัดแอมโมเนียลดลง [5, 30]

- อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงส่งผลยับยั้งการทำงานของไนทริฟายเออร์ เนื่องจากสารอินทรีย์คาร์บอนมีผลกระตุ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟ จึงเป็นสาเหตุให้แบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟถูกแย่งอาหาร ออกซิเจน และที่ว่างในกระบวนการสร้างฟิล์มชีวภาพ โดยทั่วไปดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียมีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่าไนทริฟายเออร์ถึง 5 เท่า และสามารถทำงานเพื่อผลิตผลผลิตได้ดีกว่า 2–3 เท่า [11, 31]

- สารยับยั้งกระบวนการไนทริฟิเคชัน (Inhibitory substance)

สารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์หลายชนิดสามารถแสดงความเป็นพิษและขัดขวางการเจริญเติบโตของไนทริฟายอิงแบคทีเรีย ตัวอย่างสารดังกล่าว ได้แก่ ยาฆ่าแมลง (Pesticide) ไซนาไนด์ (Cyanide) ฟีนอล (Phenol) เมอร์แคพแทน (Mercaptan) และไธโอยูเรีย (Thiourea) เป็นต้น นอกจากนี้โลหะหนักบางชนิดสามารถยับยั้งการทำงานและการเจริญเติบโตของไนทริฟายเออร์ได้เช่นกัน [25] โดยระดับความเข้มข้นของโลหะหนักที่ส่งผลต่อกระบวนการไนทริฟิเคชัน สามารถแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ผลกระทบของโลหะหนักต่อกระบวนการไนทริฟิเคชัน [25]

โลหะ	**ความเข้มข้น (มก./ล.)**	**ผลกระทบ**
โคบอลต์	0.08–0.5	ยับยั้งกิจกรรมของไนโตรโซโมนัส (เชื้อบริสุทธิ์)
โครเมียม$^{+3}$	>0.25	ยับยั้งกิจกรรมของไนโตรโซโมนัส (เชื้อบริสุทธิ์)
	118	ยับยั้งกิจกรรมของสลัดจ์ไวงานร้อยละ 75
ทองแดง	0.05–0.56	ยับยั้งกิจกรรมของไนโตรโซโมนัส (เชื้อบริสุทธิ์)
	4	ไม่ส่งผลกระทบต่อกิจกรรมของสลัดจ์ไวงาน
นิกเกิล	>0.25	ยับยั้งกิจกรรมของไนโตรโซโมนัส (เชื้อบริสุทธิ์)
สังกะสี	0.08–0.5	ยับยั้งกิจกรรมของไนโตรโซโมนัส (เชื้อบริสุทธิ์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- พื้นที่ผิวสำหรับการยึดเกาะของจุลชีพ (Surface area)

การเพิ่มวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากและมีรูพรุนเพื่อเป็นวัสดุตัวกลางในการยึดเกาะของจุลชีพมีประโยชน์ต่อไนทริฟายเออร์ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟที่มีอัตราการเจริญเติบโตต่ำ โดยสามารถกระตุ้นการเจริญเติบโต และเพิ่มประสิทธิภาพการออกซิไดซ์แอมโมเนีย นอกจากนี้ความสามารถในการดูดซับสารละลายของตัวกรองชีวภาพยังมีส่วนช่วยทำให้จุลชีพบนวัสดุตัวกลางสามารถนำสารอินทรีย์มาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น [13, 32, 33]

2.5.3 กระบวนการดีไนทริฟิเคชัน (Denitrification)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนไนเทรตจากกระบวนการไนทริฟิเคชันให้อยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจน โดยแบคทีเรียที่มีบทบาทสามารถจำแนกออกเป็น 2 กลุ่ม คือจุลชีพที่สามารถเจริญได้ในสภาวะที่ไม่มีไนเทรตโดยสามารถย่อยสลายโปรตีนผ่านกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน และจุลชีพที่เจริญได้ในสภาวะ

ที่มีไนเทรตเท่านั้น ส่วนใหญ่กระบวนการดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นโดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรียพวกแฟคัลเททีฟ (Facultative) หรือดีไนทริฟายอิงแบคทีเรีย ภายใต้สภาวะกึ่งไร้อากาศหรือแอนน็อกซิก โดยใช้ไนเทรต ไนไทรต์ ไนตริกออกไซด์ (NO) หรือซัลเฟต (SO_4^{2-}) เป็นตัวรับอิเลคตรอนแทนออกซิเจน แบคทีเรียที่มีบทบาทในกระบวนการ ได้แก่ แบคทีเรียในสกุลซูโดโมแนส (*Pseudomonas*) บาซิลลัส (*Bacillis*) โปโรโคลอน (*Parocolon*) ไทโอบาซิลลัส (*Thiobacillis)* โครโมแบคทีเรียม (*Chromobacterium*) โครีนีแบคทีเรียม (*Corynebacterium*) เซอร์ราเทีย (*Serratia*) ไฮโปไฟโมโครเบียม (*Hypophomicrobium*) และอะโครโมแบคเตอร์ (*Achromobacter*) กระบวนการดีไนทริฟิเคชันประกอบด้วย 4 ขั้นตอนต่อเนื่องกัน เริ่มต้นจากการเปลี่ยนไนเทรตให้อยู่ในรูปของไนไทรต์โดยเอนไซม์ไนเทรตรีดักเทส ไนไทรต์ถูกเปลี่ยนเป็นไนตริกออกไซด์ (Nitric oxide; NO) โดยเอนไซม์ไนไทรต์รีดักเทส ไนตริกออกไซด์ถูกเปลี่ยนเป็นไนตรัสออกไซด์ (Nitrous oxide; N_2O) โดยเอนไซม์ไนตริกออกไซด์รีดักเทส และสุดท้ายไนตรัสออกไซด์ถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas; N_2) โดยเอนไซม์ไนตรัสออกไซด์รีดักเทสตามลำดับ ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$NO_3^- \xrightarrow[\text{reductase}]{\text{nitrate}} NO_2^- \xrightarrow[\text{reductase}]{\text{nitrite}} NO \xrightarrow[\text{reductase}]{\text{nitric oxide}} N_2O \xrightarrow[\text{reductase}]{\text{nitrous oxide}} N_2$$

จุลชีพที่มีบทบาทในกระบวนการดีไนทริฟิเคชันต้องการสารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอน และใช้ในกระบวนการกำจัดออกซิเจน (Deoxygenation) โดยชนิดของแหล่งคาร์บอนแบ่งเป็น 2 ประเภท คือแหล่งคาร์บอนจากภายใน ได้แก่ น้ำเสีย สลัดจ์ หรือตะกอนจุลชีพภายในระบบ และในกรณีที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ภายในระบบไม่เพียงพอจะต้องมีการเติมสารอินทรีย์จากภายนอกเข้าสู่ระบบ ได้แก่ เมทานอล (Methanol) เอทานอล (Ethanol) โมลาส (Molasses) อะซิเตท (Acetate) และแป้งที่ผ่านการย่อย (Hydrolyzed starch) เป็นต้น แต่เนื่องจากเมทานอลเป็นสารที่อินทรีย์คาร์บอนที่มีประสิทธิภาพ มีกำลังรีดิวซ์สูง ให้ค่ายิลด์ต่ำ ไม่มีการสะสมของไนไทรต์ และราคาถูกกว่าสารอินทรีย์คาร์บอนประเภทอื่น จึงนิยมใช้เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนในระบบบำบัดน้ำเสีย [11, 13, 34] โดยผลของสารอินทรีย์คาร์บอนต่ออัตราดีไนทริฟิเคชัน ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ผลของสารอินทรีย์คาร์บอนต่ออัตราดีไนทริฟิเคชัน [35]

แหล่งคาร์บอน	**อุณหภูมิของน้ำ (°ซ)**	**อัตราดีไนทริฟิเคชัน (มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/มก.เอ็มแอลวีเอสเอส.วัน)**
เมทานอล	25	0.21–0.32
เมทานอล	20	0.12–0.90
น้ำเสีย	15–27	0.03–0.11
คาร์บอนเอ็นโดจีนัส	12–20	0.017–0.048

สำหรับปัจจัยที่ก่อให้เกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันแบบไม่สมบูรณ์ (Incomplete denitrification) ได้แก่ ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน ปริมาณจุลชีพ และระยะเวลาสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไม่เพียงพอ เป็นต้น โดยเมื่อนำกระบวนการสังเคราะห์เซลล์มาพิจารณาร่วมกับการใช้เมทานอลเป็นแหล่งคาร์บอน และไนเทรตเป็นตัวรับอิเลคตรอนสามารถแสดงในสมการที่ (2.12) และสมการสมการสตอยชิโอเมตริคสำหรับแบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟมีค่ายีลด์เท่ากับ 0.4 มก.วีเอสเอส/มก.ซีโอดี [35, 36]

$$NO_3^- + 1.08CH_3OH + 0.24H_2CO_3 \longrightarrow 0.056C_5H_7O_2N + 0.47N_2 + 1.68H_2O + HCO_3^- \quad (2.12)$$

โดยสามารถคำนวณความต้องการใช้เมทานอลในกรณีที่น้ำเสียมีไนเทรต ไนไทรต์ และปริมาณออกซิเจนละลาย ได้ดังสมการที่ (2.13)

$$C_m = 2.47(NO_3\text{-}N) + 1.53(NO_2\text{-}N) + 0.87\,(DO) \quad (2.13)$$

เมื่อ C_m = ความเข้มข้นของเมทานอลที่ต้องการใช้ (มก./ล.)

NO_3-N = ความเข้มข้นของไนเทรตในน้ำเสีย (มก.-ไนโตรเจน/ล.)

NO_2-N = ความเข้มข้นของไนไทรต์ในน้ำเสีย (มก.-ไนโตรเจน/ล.)

DO = ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำเสีย (มก.-ออกซิเจน/ล.)

จากสมการที่ (2.12) สามารถสรุปได้ดังนี้

- ปริมาณไนเทรตที่ใช้เป็นตัวรับอิเลคตรอนตัวสุดท้ายในกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน เมื่อคิดในเทอมของออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 2.86 มก.-ออกซิเจน/มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน
- กระบวนการดีไนทริฟิเคชันสามารถเพิ่มปริมาณความเป็นด่างให้กับระบบได้เท่ากับ 3.57 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน ซึ่งเมื่อพิจารณาเทียบกับปริมาณความเป็นด่างที่ใช้ในกระบวนการไนทริฟิเคชัน พบว่าการบำบัดน้ำเสียผ่านกระบวนการร่วมสามารถลดปริมาณสารเคมีที่ต้องเติมเพื่อเพิ่มความเป็นด่างให้กับระบบได้ถึงร้อยละ 41.32

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน ได้แก่

- อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดกระบวนการรีดิวซ์ไนเทรตมีค่าอยู่ในช่วง 2–50°ซ และดีไนทริฟายเออร์สามารถเจริญเติบโต และทำงานได้ดีในช่วง 5–25°ซ และ >20°ซ ตามลำดับ

นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำเสียอย่างกะทันหันทำให้จุลชีพช็อกและหยุดทำงาน ส่งผลให้ระบบวิบัติได้ [11]

- ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen; DO)

ปริมาณออกซิเจนละลายส่งผลเสียต่อกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน เนื่องจากออกซิเจนเป็นตัวรับอิเลคตรอนที่ให้พลังงานจากการออกซิไดซ์แหล่งคาร์บอนสูงกว่าไนเทรต ดังนั้นจุลชีพจึงเลือกใช้ออกซิเจนในการรับอิเลคตรอนก่อนไนเทรต ทำให้สารอินทรีย์คาร์บอนในระบบเหลือไม่เพียงพอสำหรับกระบวนการรีดิวซ์ไนเทรต ส่งผลให้เกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันแบบไม่สมบูรณ์ โดยทั่วไปควรควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายในระบบให้มีค่าไม่เกิน 0.1–0.2 มก.-ออกซิเจน/ล. [11]

- ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-reduction potential; ORP)

การควบคุมสภาวะแอนน็อกซิกไม่สามารถทำได้โดยใช้หัวโพรบวัดปริมาณออกซิเจนละลาย เนื่องจากปริมาณออกซิเจนละลายสำหรับสภาวะแอนน็อกซิกและแอนแอโรบิกมีค่าเท่ากัน นั่นคือไม่เกิน 0.2 มก.-ออกซิเจน/ล. ดังนั้นจึงต้องอาศัยหัวโพรบโออาร์พีเป็นตัวควบคุมกระบวนการที่เกิดขึ้นแทน โดยค่าโออาร์พีที่เหมาะสมสำหรับสภาวะกึ่งไร้อากาศหรือแอนน็อกซิกอยู่ในช่วง -50 ถึง -100 มิลลิโวลต์ และถ้าโออาร์พีมีค่าต่ำกว่า -100 มิลลิโวลต์ ระบบจะเข้าสู่สภาวะไร้อากาศหรือแอนแอโรบิก และเกิดการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟล์ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพสัตว์น้ำ และการทำงานของจุลชีพภายในระบบ [25]

- ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

กระบวนการดีไนทริฟิเคชันสามารถผลิตสภาพความเป็นด่างให้กับระบบ ซึ่งสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงของพีเอชได้ด้วยระบบบัฟเฟอร์ ส่งผลให้ค่าพีเอชมีความเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยพีเอชที่เหมาะสมสำหรับดีไนทริฟายเออร์มีค่าอยู่ในช่วง 6.5–8.5 และในกรณีที่ระบบมีค่าพีเอชต่ำกว่า 7 ส่งผลให้กระบวนการดีไนทริฟิเคชันถูกยับยั้ง และเกิดไนตรัสออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas; GHG) เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายแทน [18]

- สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)

ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียสามารถผลิตคาร์บอเนต (HCO_3^-) ออกมาในกระบวนการรีดิวซ์ไนเทรต ส่งผลให้สภาพความเป็นด่างของระบบเพิ่มขึ้น เท่ากับ 3.57 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน

- ความเข้มข้นของไนไทรต์ (Nitrite concentration)

ไนไทรต์ในรูปของกรดไนตรัส (HNO_2) ความเข้มข้น 0.13 มก.ไนไทรต์-ไนโตรเจน/ล. มีความเป็นพิษและยับยั้งการทำงานของดีไนทริฟายเออร์ โดยปัญหาดังกล่าวจะเกิดขึ้นในระบบบำบัดร่วม

ไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน แต่เนื่องจากไนไทรต์สามารถแตกตัวเป็นไอออนได้ถึง 100 มก.ไนไทรต์-ไนโตรเจน/ล. ในช่วงพีเอชเท่ากับ 6–8 ดังนั้นผลกระทบในลักษณะนี้จึงเกิดขึ้นไม่มากนัก [14]

- อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

การควบคุมอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในสัดส่วนที่น้อย เพียงพอ และมากเกินพอต่อกระบวนการดีไนทริฟิเคชันตามทฤษฎี พบว่ามีอัตราการบำบัดซีโอดีใกล้เคียงกัน แต่การบำบัดไนเทรตและไนไทรต์สามารถเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์เมื่อสัดส่วนดังกล่าวมีค่าสูงขึ้น โดยอัตราส่วนระหว่างซีโอดีต่อไนโตรเจนทางทฤษฎี และทางปฏิบัติมีค่าเท่ากับ 5.0–10.0 และ 3.0–6.0 ตามลำดับ [5, 13, 34]

- สารยับยั้งกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน (Inhibitory substance)

สารประกอบอินทรีย์ และอนินทรีย์หลายชนิดสามารถแสดงความเป็นพิษต่อดีไนทริฟายเออร์ได้เช่นเดียวกับไนทริฟายเออร์ ตัวอย่างเช่น ยาฆ่าแมลง ไซยาไนด์ ฟีนอล อะเซทิลีน ซัลไฟด์ (Sulfide) โปแตสเซียมไซยาไนด์ (Potassium Cyanide) ไดไธออล (Dithiol) และโอ-ฟีแนนโธลีน (O-Phenanthrolone) เป็นต้น [3]

จากที่กล่าวมา พบว่ากระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน เป็นกระบวนการที่สามารถเกิดขึ้นได้ต่อเนื่องโดยอาศัยจุลชีพหลัก 2 กลุ่ม คือไนทริฟายเออร์และดีไนทริฟายเออร์ ดังนั้นการรวมระบบบำบัดไนโตรเจนภายในถังปฏิกรณ์เดียวจึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ ประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง และลดค่าใช้จ่ายในการเติมสารเคมี แต่เนื่องจากทั้ง 2 กระบวนการสามารถเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นการควบคุมระบบจึงมีความซับซ้อนมากขึ้น [35] โดยสามารถสรุปสภาวะที่เหมาะสมสำหรับระบบบำบัดไนทริฟิเคชัน ดีไนทริฟิเคชัน และระบบบำบัดร่วม ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน [10]

ปัจจัยที่มีผล	กระบวนการไนทริฟิเคชัน	กระบวนการดีไนทริฟิเคชัน	กระบวนการบำบัดร่วม
อุณหภูมิ (°ซ)	30–36	25–35	30–35
ออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)	มากกว่า 1	น้อยกว่า 0.2	ไนทริฟิเคชันมีค่า >1 ดีไนทริฟิเคชันมีค่า <0.2
ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)	+100	-50 ถึง -100	ไนทริฟิเคชันมีค่า +100 ดีไนทริฟิเคชันมีค่า -50 ถึง -100
ค่าพีเอช	7.0–8.5	6.5–8.5	7.5–8.0
สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	ยับยั้งกระบวนการบำบัด	3–5	อัตราส่วนที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับระบบ

2.6 ตัวกรองชีวภาพสำหรับการบำบัดน้ำจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด

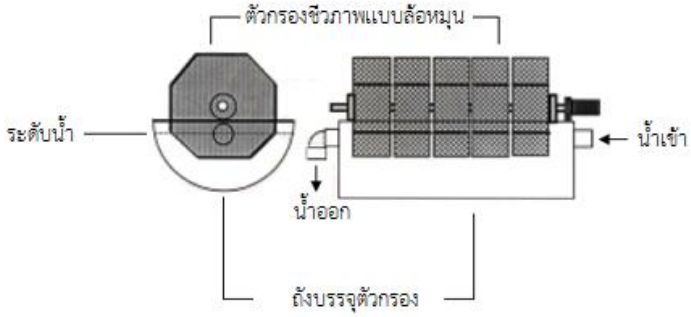
ระบบบำบัดทางชีวภาพสามารถจำแนกตามการเจริญเติบโตของจุลชีพเป็น 2 รูปแบบ นั่นคือ ระบบจุลชีพแขวนลอย (Suspended microbial growth) และระบบจุลชีพเกาะติดผิวตัวกลาง หรือ ระบบฟิล์มตรึง (Attached microbial growth or Fixed Film system) โดยการเลือกรูปแบบของระบบบำบัดขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของน้ำเสีย ความเหมาะสมของเงินทุน และพื้นที่ในการติดตั้ง สำหรับงานวิจัยนี้ต้องการระบบบำบัดที่สามารถบำบัดสารประกอบไนโตรเจนภายใต้สภาวะแอโรบิกและแอนน็อกซิกพร้อมกันอย่างสมดุลและต่อเนื่อง ดังนั้นระบบฟิล์มตรึงจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม โดยมีการเลือกใช้วัสดุตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพียงพอต่อการยึดเกาะของจุลชีพกลุ่มไนทริฟายเออร์และดีไนทริฟายเออร์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูง อาศัยพลังงานในการเติมอากาศเพื่อให้เกิดการฟุ้งกระจายของจุลชีพ หรือค่าใช้จ่ายในการเดินระบบน้อยกว่าระบบจุลชีพแขวนลอย และประหยัดพื้นที่ในการติดตั้งส่วนของระบบบำบัด ทั้งนี้ระบบฟิล์มตรึงยังสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 รูปแบบ นั่นคือตัวกรองชีวภาพแบบตัวกลางเคลื่อนที่ (Moving bed) และตัวกรองชีวภาพแบบตัวกลางอยู่กับที่ หรือฟิกซ์เบด (Fixed bed) โดยตัวกรองชีวภาพแบบอยู่กับที่มีอัตราการบำบัดสูงกว่าแบบเคลื่อนที่ เนื่องจากแบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตและสร้างชั้นฟิล์มชีวภาพได้ดีกว่า สำหรับตัวกรองชีวภาพที่ใช้ในระบบบำบัดควรทำมาจากวัสดุประเภทไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ที่มีความแข็งแรง และไม่ทำปฏิกิริยากับสารประกอบอื่นในน้ำ ตัวอย่างเช่น หิน ทราย พลาสติกโพลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) และพลาสติกโพลิโพรไพลีน (Polypropylene; PP) เป็นต้น [1, 5, 28, 37] โดยรูปแบบของระบบบำบัดด้วยตัวกรองชีวภาพสามารถจำแนกออกได้ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.6.1 ระบบจานหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor; RBC)

เป็นระบบบำบัดที่ประกอบด้วยตัวกลางพลาสติกทรงกระบอกหลายแผ่นเรียงซ้อนกันบนเพลากลาง โดยมีพื้นที่ผิวสำหรับการยึดเกาะของจุลชีพประมาณ 200 ตร.ม./ลบ.ม. ตัวกลางถูกติดตั้งในถังคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีระยะจมตัวประมาณร้อยละ 40 จุลชีพหลักที่พบเป็นแบคทีเรียในกลุ่มใช้ออกซิเจน รา โปรโตซัว และสาหร่าย สำหรับน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบจะต้องผ่านถังตกตะกอนปฐมภูมิเพื่อแยกเศษดินทรายออกก่อน หลักการทำงานของระบบ คือเพลากลางจะทำการหมุนในแนวนอนด้วยอัตรา 2–5 รอบ/นาที เพื่อให้ไนทริฟายเออร์สามารถสัมผัสกับน้ำเสีย และเกิดการย่อยสลายแอมโมเนียผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน และเมื่อแผ่นหมุนชีวภาพอยู่เหนือระดับน้ำ จุลชีพจะสามารถสัมผัสกับอากาศ และเกิดการถ่ายเทออกซิเจนเข้าไปยังชั้นฟิล์มชีวภาพ ในขณะเดียวกันแรงเฉือนของการหมุนสามารถรักษาความหนาของชั้นฟิล์มชีวภาพให้คงที่ ทำให้จุลชีพเกิดการสัมผัสกับน้ำเสียและอากาศอย่างทั่วถึง สำหรับเมือกตะกอนที่หลุดร่อนออกมาจะต้องทำการสูบออกเพื่อไม่ให้

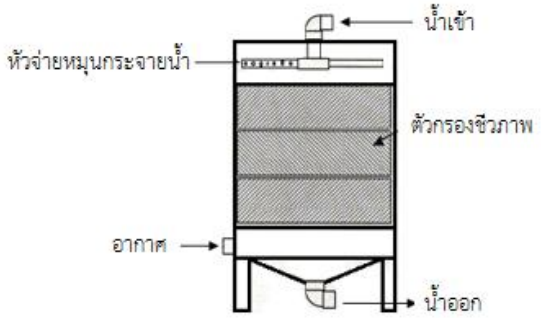
เกิดสภาวะไร้อากาศ โดยอัตราการบำบัดแอมโมเนียของระบบมีค่าประมาณ 0.19–0.79 ก.-แอมโมเนียทั้งหมด/ตร.ม./วัน อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของระบบบำบัดขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของตัวกลาง ความเร็วรอบของการหมุน ปริมาณออกซิเจนละลาย และอุณหภูมิของน้ำ นอกจากนี้การใช้งานระบบจานหมุนชีวภาพเป็นเวลานานส่งผลให้ความสามารถในการรักษาความหนาของชั้นไบโอฟิล์มลดลง ทำให้ปริมาณจุลชีพที่เกาะบนตัวกลางชีวภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้การหมุนเพลา และอายุการใช้งานของเพลาลดลง [1, 5]



รูปที่ 2.2 ระบบจานหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor; RBC) [1, 5]

2.6.2 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบโปรยกรอง (Trickling Filter; TF)

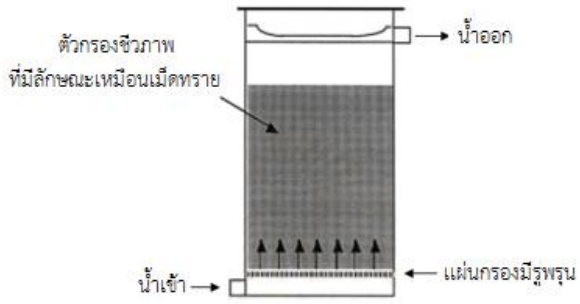
เป็นระบบบำบัดแบบตัวกลางไม่เคลื่อนที่ ซึ่งตัวกลางที่บรรจุอยู่ในระบบอาจทำจากหินขนาด 2.5–10 ซม. ถ่านหิน หรือพลาสติกที่มีน้ำหนักเบา ซึ่งมีพื้นที่ผิวสำหรับการยึดเกาะของจุลชีพประมาณ 100–1,000 ตร.ม./ลบ.ม. จุลชีพหลักที่พบ ได้แก่ แบคเรียในกลุ่มที่ใช้ และไม่ใช้ออกซิเจน สาหร่าย ราโปรโตซัว และอาจมีการพบหนอนหรือลูกน้ำบริเวณพื้นผิวของตัวกรองชั้นบนสุด หลักการทำงานของระบบ คือน้ำเสียจะถูกปล่อยจากหัวจ่ายหมุนกระจายน้ำเกิดเป็นฝอยสายน้ำไหลตามแรงโน้มถ่วงผ่านชั้นตัวกลาง การบำบัดจะเกิดขึ้นในระหว่างที่น้ำเสียไหลผ่านชั้นตัวกลางที่มีจุลชีพเกาะติดอยู่ โดยไนทริฟายเออร์จะใช้ออกซิเจนจากอากาศในการออกซิไดซ์แอมโมเนีย และเมื่อปริมาณจุลชีพที่เกาะติดบนตัวกลางเพิ่มขึ้นจนเป็นชั้นหนาจะเกิดสภาวะขาดอาหารและอากาศภายใต้ชั้นฟิล์มชีวภาพส่งผลให้จุลชีพตายและหลุดร่อนออกมา ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไม่คงที่ซึ่งเป็นข้อเสียของระบบดังกล่าว นอกจากนี้ในการใช้งานระบบโปรยกรองมักพบการเจริญเติบโตของสาหร่ายบริเวณผิวของตัวกรองชีวภาพชั้นบนสุด ส่งผลให้เกิดการอุดตันของตะกอน และของแข็งแขวนลอยบนตัวกรองชีวภาพ โดยอัตราการบำบัดแอมโมเนียของระบบมีค่าประมาณ 0.24–0.64 ก.-แอมโมเนียทั้งหมด/ตร.ม./วัน [1, 5, 28]



รูปที่ 2.3 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบโปรยกรอง (Trickling Filter; TF) [1, 5]

2.6.3 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Bioreactor)

เป็นระบบบำบัดที่ประกอบด้วยตัวกลางขนาดเล็ก เช่น เม็ดทราย แอนทราไซต์ เม็ดเซรามิค หรือเม็ดพลาสติกโพลิสไตรีน (Polystyrene bead) ขนาดประมาณ 1–3 มม. ทำให้มีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะของจุลชีพสูงถึง 4,000–20,000 ตร.ม./ลบ.ม. หลักการทำงานของระบบ คือน้ำเสียจะถูกสูบเข้าทางก้นถังปฏิกรณ์ ทำให้เกิดการยกตัวและเคลื่อนที่ของตัวกลางแบบไหลวน ซึ่งช่วยให้แบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายเออร์เกิดการสัมผัสกับน้ำเสียได้อย่างทั่วถึง ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพชนิดนี้มีจุดเด่น คือ สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียสูง และสามารถบรรเทาปัญหาการอุดตันซึ่งพบมากในระบบแบบโปรยกรอง โดยอัตราการบำบัดแอมโมเนียมีค่าประมาณ 0.24–0.55 ก.-แอมโมเนียทั้งหมด/ตร.ม./วัน [1, 3, 5]

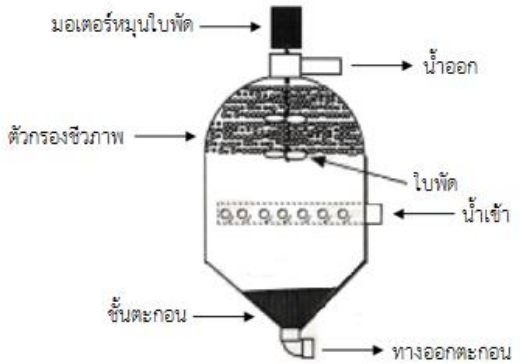


รูปที่ 2.4 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Bioreactor) [1, 5]

2.6.4 ระบบตัวกรองชีวภาพแบบไมโครบีดส์ฟิลเตอร์ (Microbeads Filter)

เป็นระบบบำบัดที่อาศัยตัวกรองชีวภาพชนิดไมโครบีดส์ฟิลเตอร์ขนาด 1–3 มม. และมีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะของจุลชีพประมาณ 1,260–3,780 ตร.ม/ลบ.ม. จุดเด่นของระบบ คือถูกออกแบบให้

เกิดการแยกตะกอนของแข็งเพื่อป้องกันการอุดตันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยหลักการทำงานเริ่มจากน้ำเสียจะเข้าสู่ระบบทางด้านข้างของถังปฏิกรณ์ จากนั้นตะกอนแขวนลอยที่ปนเข้ามากับน้ำเสียซึ่งมีน้ำหนักมากจะตกลงสู่ด้านล่างของถังปฏิกรณ์โดยอาศัยแรงโน้มถ่วง ส่วนน้ำเสียจะถูกดันผ่านตัวกรองซึ่งเป็นเม็ดพลาสติกขนาดเล็ก และเกิดการออกซิไดซ์แอมโมเนียโดยไนทริฟายเออร์ โดยอัตราการบำบัดแอมโมเนียของระบบมีค่าประมาณ 0.3–0.6 ก.-แอมโมเนียทั้งหมด/ตร.ม./วัน [1, 3, 5, 30]



รูปที่ 2.5 ระบบตัวกรองชีวภาพแบบไมโครบีดส์ฟิลเตอร์ (Microbeads Filter) [1, 5]

สำหรับการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยตัวกรองชีวภาพ ปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้ตัวกลางไบโอคอร์ดเพื่อเป็นที่ยึดเกาะของจุลชีพ เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ คือ ที่มีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะของจุลชีพสูง ทำความสะอาดง่าย มีความเหนียว และความทนทาน จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้ไบโอคอร์ดถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในระบบบำบัดน้ำเสียชนิดฟิล์มตรึง [4, 5, 38] โดยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดสามารถแบ่งได้ตามชนิดของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 2.8

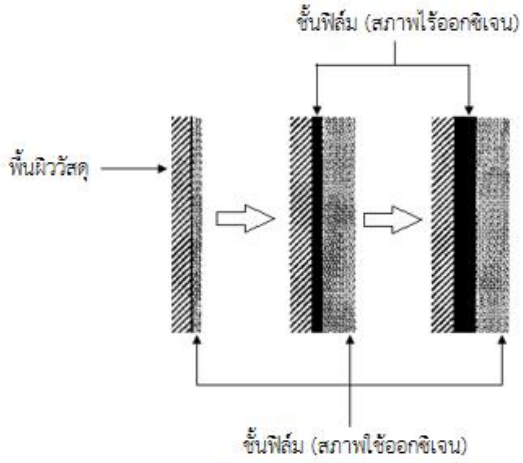
ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด [39]

วัสดุ	**สี**	**เส้นผ่านศูนย์กลาง** ภายนอก/ภายในมัดเส้นใย (มม.)	**น้ำหนัก** (กก./100 ม.)	**พื้นที่ผิว** (ตร.ม./ม.)
โพลิโพรไพลีน	ขาว	45/5	3.4	2.8
ไวไนลอน-โพลิโพรไพลีน	น้ำตาล-ขาว	45/5	3.4	1.63
โพลิไวนิลคลอไรด์	ฟ้า	45/5	5.5	1.42
ไบไนลอน	น้ำตาล	45/5	3.3	0.55
ไนลอน-ทีทอน	ขาว	25/3	1.6	0.42

2.7 การเจริญของจุลชีพบนตัวกรองชีวภาพ

การเกาะติดของจุลชีพบนตัวกรองชีวภาพเริ่มต้นจากการขนส่งและการดูดซับสารอินทรีย์ขนาดเล็กที่เกิดจากการย่อยสลายโดยจุลชีพแขวนลอยตามธรรมชาติบนพื้นผิวของวัสดุตัวกลาง (Transportation and adsorption) ซึ่งตัวกรองชีวภาพแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน เมื่อวัสดุตัวกลางมีสารอาหารและปริมาณออกซิเจนละลายอย่างเพียงพอ ส่งผลให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ จากนั้นจุลชีพบนพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพจะเริ่มเพิ่มจำนวนมากขึ้นและเกิดการสร้างสารไลโปโพลิแซ็กคาไรด์ (Lipopolysaccharide) ซึ่งเป็นสารประกอบโพลิเมอร์ของผนังเซลล์ที่ช่วยในการยึดเกาะของจุลชีพและทำหน้าที่ปกป้องเซลล์จากสิ่งแวดล้อมภายนอก ทั้งนี้การเจริญเติบโตของจุลชีพจะทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มชีวภาพเพิ่มขึ้น โดยในระยะเริ่มต้นซึ่งปริมาณแบคทีเรียยังไม่มากนัก ฟิล์มชีวภาพจะอยู่ในสภาวะที่อากาศสามารถถ่ายเทเข้าออกได้อย่างสะดวกหรือเรียกว่าสภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic layer) ต่อมาเมื่อจุลชีพมีการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนเซลล์ ส่งผลให้ฟิล์มชีวภาพมีความหนาเพิ่มขึ้นจนออกซิเจนไม่สามารถแพร่ผ่านได้และเกิดสภาวะขาดอากาศบริเวณด้านในของชั้นไบโอฟิล์ม (Anaerobic layer) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 การรวมกลุ่มแบบพึ่งพาอาศัยกันของจุลินทรีย์หลายชนิดบนวัสดุตัวกลาง ตัวอย่างเช่น การเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายเออร์และดีไนทริฟายเออร์บนตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดส่งผลให้จุลชีพมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงกว่าเมื่อเทียบกับระบบบำบัดแบบจุลินทรีย์แขวนลอย [6, 35]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 การเพิ่มความหนาของชั้นไบโอฟิล์มบนตัวกรองชีวภาพ [35]

ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญของไนทริฟายเออร์ และดีไนทริฟายเออร์บนตัวกรองชีวภาพมีดังนี้

- ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen; DO)

กระบวนการไนทริฟิเคชัน และดีไนทริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นเมื่อปริมาณออกซิเจนละลายมีค่าประมาณ 1 และไม่เกิน 0.2 มก.-ออกซิเจน/ล. ตามลำดับ โดยออกซิเจนละลายในระบบจะแพร่ผ่านชั้นฟิล์มชีวภาพแผ่นบางด้านบน (Stagnant layer) สู่ชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบเซลล์ของไนทริฟายเออร์ (Slime layer) จากนั้นออกซิเจนจะแพร่เข้ามาสู่ชั้นเมมเบรนของจุลชีพทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลชีพกลุ่มออโตโทรฟ ส่วนด้านในของชั้นไบโอฟิล์มซึ่งเป็นบริเวณที่ออกซิเจนแพร่ลงมาไม่ถึงจึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานของดีไนทริฟายเออร์ นอกจากนี้แบคทีเรียออกซิไดซ์แอมโมเนียบางชนิดสามารถเจริญได้ในสภาวะกึ่งไร้อากาศหรือแอนน็อกซิกโดยเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนละลายต่ำสามารถใช้ไนไทรต์เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นไนตริกออกไซด์ หรือไนตรัสออกไซด์ ทำให้ในสภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนละลายจำกัดสามารถเกิดได้ทั้งกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน [11]

- ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต และการทำงานของไนโตรโซโมแนสไนโตรแบคเทอร์ และดีไนทริฟายเออร์มีค่าอยู่ในช่วง 7.2–8.8 7.2–9.0 และ 6.5–8.5 ตามลำดับ โดยทั่วไปนิยมควบคุมค่าพีเอชของระบบให้อยู่ในช่วง 6–9 เพื่อให้เกิดกระบวนการบำบัดร่วมได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้จุลชีพสามารถปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงของพีเอชอย่างช้าๆ โดยอัตราการปรับตัวของจุลชีพขึ้นอยู่กับอุณหภูมิน้ำ และความเข้มข้นของแอมโมเนีย [25]

- อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

สัดส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบส่งผลต่อการทำงานของไนทริฟายเออร์ และดีไนทริฟายเออร์ โดยในการบำบัดไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วมควรควบคุมอัตราส่วนให้มีค่าน้อยกว่า 5.0 เนื่องจากไนทริฟายอิงแบคทีเรียมีอัตราการเจริญต่ำกว่าดีไนทริฟายอิงแบคทีเรีย

- ความเค็มของน้ำ (Salinity)

ตัวกรองชีวภาพสามารถทำงานได้ในน้ำจืดจนถึงน้ำที่มีค่าความเค็มอยู่ในช่วง 0–40 พีเอสยู แต่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงความเค็มอย่างช้าๆ โดยการเปลี่ยนความเค็มอย่างรวดเร็วในระดับ 5 ส่วนในพันส่วนอย่างฉับพลัน จะทำให้จุลชีพกลุ่มไนทริฟายเออร์หยุดการทำงานอย่างกะทันหันและส่งผลต่อกระบวนการบำบัด โดยอัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนียในน้ำทะเลมีค่าน้อยกว่าในน้ำจืดประมาณ 6 เท่า และในทางตรงข้ามพบว่าความเค็มในรูปของโซเดียมคลอไรด์มีผลต่อดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียเล็กน้อยโดยสามารถทนต่อความเค็มได้ประมาณ 30,000 มก.-โซเดียมคลอไรด์/ล. [40]

- สารยับยั้งการทำงาน (Inhibitory substance)

สารประกอบอินทรีย์ อนินทรีย์ และโลหะหนักหลายชนิดสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตและขัดขวางการทำงานของไนทริฟายเออร์และดีไนทริฟายเออร์ นอกจากนี้ในระบบบำบัดที่มีแอมโมเนียความเข้มข้นสูงจะเกิดการสะสมของไนไทรต์ซึ่งมีผลยับยั้งการทำงานของไนทริฟายอิงแบคทีเรีย

- อนุภาคของแข็งแขวนลอย (Suspended solid matter)

ของแข็งแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำที่เกิดจากเศษอาหาร สิ่งขับถ่าย สลัดจ์ และตะกอนจุลชีพ สามารถสะสมและเกิดการอุดตันบนตัวกรองชีวภาพ ทำให้ออกซิเจนไม่สามารถแพร่ผ่านเข้าสู่ด้านในของมัดเส้นใย ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการทำงานของไนทริฟายอิงแบคทีเรีย นอกจากนี้ตะกอนแขวนลอยยังมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนของแบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟายเออร์ ทำให้จุลชีพในกลุ่มดังกล่าวเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วและแย่งพื้นที่ว่างในกระบวนการสร้างไบโอฟิล์ม ส่งผลให้เกิดกระบวนการไนทริฟิชันแบบไม่สมบูรณ์

- ชนิดของตัวกรองชีวภาพ (Types of biofilter)

ตัวกรองชีวภาพควรทำจากวัสดุที่มีความแข็งแรง มีน้ำหนักเบาโดยมีค่าความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกับน้ำเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบที่มีความแข็งแรง มีความเฉื่อยทางชีววิทยา (biological inert) มีสมบัติทางเคมีและทางกลคงที่ โดยไม่ทำปฏิกิริยากับสารประกอบอื่นในน้ำ และไม่เป็นอันตรายต่อจุลชีพและสัตว์น้ำ มีช่องว่างหรือรูพรุนเพียงพอเพื่อให้ของเหลวสามารถไหลผ่านบริเวณผิวของตัวกรองได้อย่างทั่วถึง ทำให้จุลชีพมีโอกาสสัมผัสกับน้ำเสียและอากาศได้อย่างต่อเนื่องและเกิดการสร้างชั้นฟิล์มชีวภาพอย่างรวดเร็ว โดยวัสดุตัวกรองที่นิยมใช้มี 2 ประเภท คือวัสดุตัวกรองจากธรรมชาติ เช่น ทราย หิน เปลือกหอย และวัสดุตัวกรองสังเคราะห์ เช่น เซรามิค พลาสติก ซึ่งวัสดุจากธรรมชาติจะมีราคาถูก หาได้ง่ายตามท้องถิ่น แต่มักมีปัญหาเรื่องน้ำหนัก อายุการใช้งาน และการอุดตันเนื่องจากช่องว่างระหว่างตัวกรองมีน้อย ส่วนวัสดุสังเคราะห์จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง มีพื้นที่ในการยึดเกาะของจุลชีพมาก แต่มักมีราคาแพง

- พื้นที่ผิวสำหรับการยึดเกาะของจุลชีพ (Surface area)

พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกรองชีวภาพ คือผลรวมของพื้นที่ทั้งหมดของตัวกรองที่จุลชีพสามารถยึดเกาะได้ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของตัวกรอง และอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตร โดยทั่วไปในงานบำบัดน้ำเสียนิยมเลือกใช้ตัวกรองขนาดเล็ก เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากเมื่อเทียบกับตัวกรองขนาดใหญ่ ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่า

2.8 ชีววิทยาของปลานิลและรูปแบบการเลี้ยงปลานิล

ปลานิลเป็นสัตว์เศรษฐกิจที่มีการเลี้ยงกันอย่างแพร่หลาย เป็นแหล่งผลิตอาหารโปรตีนที่มีต้นทุนต่ำคุณภาพสูง และเป็นพันธุ์ปลาที่นิยมใช้เป็นตัวแทนของปลาทดลองในงานค้นคว้าวิจัยทางประมง เนื่องจากเป็นสัตว์น้ำที่ทนต่อสภาพแวดล้อม อัตราการเติบโตสูง และมีรสชาติดี

2.8.1 อนุกรมวิธาน และสรีรวิทยาของปลานิล

ปลานิล (Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*) เป็นปลาน้ำจืดชนิดหนึ่งที่มีถิ่นกำเนิดจากทวีฟแอฟริกา ซึ่งการจัดลำดับทางอนุกรมวิธานของปลานิลแสดงได้ดังนี้

Kingdom : Animalia

Phylum : Vertebrata

Class : Osteichthyes

Order : Percifomes

Family : Cichlidae

Genus : *Oreochromis*

Species : *niloticus*

รูปที่ 2.7 ลักษณะของปลานิล (*Oreochromis nilotica* Linn.)

ปลานิลมีเป็นรูปร่างคล้ายปลาหมอเทศ (*O. mossambicus*) แตกต่างกันที่ปลานิลมีลำตัวสั้นแบน ริมฝีปากบนล่างเสมอกัน บริเวณแก้มมีเกล็ด 4 แถว มีลาดพาดขวางลำตัว 9–10 แถบ ครีบหลังต่อกันเป็นครีบเดียว ประกอบด้วยก้านครีบแข็ง 15–18 อัน และก้านครีบอ่อน 12–24 อัน ครีบก้นมีก้านครีบแข็ง 3 อัน และก้านครีบอ่อน 9–10 อัน บนแถบเส้นข้างลำตัวมีเกล็ด 33 อัน ทางด้านข้างมีเกล็ดตามแนวเฉียงจากตอนต้นของครีบหลังลงมาถึงเส้นข้างลำตัว 5 เกล็ด และจากเส้นข้างลำตัวลงมาถึงส่วนหน้าของครีบก้น 13 เกล็ด ครีบหางตัดตรง ลำตัวมีสีเขียวปนน้ำตาล ตรงกลางเกล็ดมีสีเข้ม

ที่กระดูกแก้มมีจุดสีเข้มอยู่ 1 จุด บริเวณปลายอ่อนของครีบหลัง ครีบก้น และครีบหางมีจุดสีขาวและเส้นสีดำตัดขวางอยู่ทั่วไป ปลานิลตัวผู้และตัวเมียมีลักษณะคล้ายกันมาก แต่จะสังเกตความแตกต่างได้โดยการดูช่องเพศที่อยู่ใกล้กับช่องทวาร โดยตัวผู้จะมีติ่งเพศ (genital papilla) ยื่นยาวค่อนข้างแหลม มีช่องเปิดเพียงช่องเดียวอยู่ตรงปลายติ่งทำหน้าที่ขับปัสสาวะและน้ำเชื้อ ส่วนตัวเมียจะมีติ่งเพศยื่นออกมาในลักษณะสั้นและกลมมน บนติ่งเพศจะมีช่องเปิด 2 ช่อง ช่องแรกอยู่ตรงส่วนปลายทำหน้าที่เป็นช่องขับปัสสาวะ อีกช่องอยู่ถัดไปทางส่วนหน้า บริเวณกลางติ่งเพศมีขนาดใหญ่และมีสีชมพูเรื่อหรือสีเนื้อ ทำหน้าที่เป็นช่องปล่อยไข่ นอกจากนี้สีบนลำตัวใต้คางของตัวผู้จะเข้มกว่าตัวเมียโดยเฉพาะในฤดูผสมพันธุ์ ปลานิลสามารถวางไข่ได้ตลอดปีโดยใช้เวลา 2–3 เดือนต่อครั้ง และสามารถสืบพันธุ์ได้เมื่อมีอายุประมาณ 4 เดือนขึ้นไป [17]

2.8.2 *รูปแบบการเลี้ยงปลานิล*

ปัจจุบันมีการเลี้ยงปลานิลกันอย่างแพร่หลาย โดยรูปแบบการเลี้ยงสามารถแบ่งตามความหนาแน่น ชนิด ปริมาณอาหารที่เลี้ยง และลักษณะการดำเนินการเลี้ยงออกเป็น 3 ประเภท [17] ดังนี้

2.8.2.1 *การเลี้ยงแบบยังชีพ (Extensive)* เป็นการเลี้ยงตามธรรมชาติโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อบริโภคภายในครัวเรือนเป็นหลักโดยอาศัยอาหารที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ บางกรณีอาจมีการเติมปุ๋ยแต่ไม่มีการให้อาหารเสริม ส่งผลให้ผลผลิตสัตว์น้ำที่ได้ต่อพื้นที่การเลี้ยงต่ำ ส่วนมากจะทำการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นเริ่มต้นเท่ากับ 5,000–20,000 ตัว/เฮกเตอร์ หรือ 0.5–2 ตัว/ตร.ม.

2.8.2.2 *การเลี้ยงแบบกึ่งพัฒนา (Semi-intensive)* มีวัตถุประสงค์เพื่อการบริโภคและจำหน่ายส่วนที่เหลือ มีการให้ปุ๋ยเพื่อเพิ่มอาหารเพียงอย่างเดียวหรือมีการเติมอาหารเสริมบ้างเล็กน้อย ผลผลิตสัตว์น้ำที่ได้ต่อพื้นที่การเลี้ยงสูงกว่าการเลี้ยงแบบยังชีพ ส่วนมากจะทำการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นเริ่มต้นเท่ากับ 20,000–40,000 ตัว/เฮกเตอร์ หรือ 2–4 ตัว/ตร.ม.

2.8.2.3 *การเลี้ยงแบบพัฒนา (Intensive)* มีวัตถุประสงค์ในเชิงพาณิชย์โดยเน้นการเลี้ยงสัตว์น้ำในระดับความหนาแน่นสูงเพื่อให้ได้ผลผลิตสัตว์น้ำที่มีคุณภาพและมีปริมาณมากต่อพื้นที่การเลี้ยงที่จำกัด นั่นคือจะมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำและเติมอากาศตลอดเวลาเพื่อรักษาคุณภาพน้ำในระบบ นอกจากนี้จะมีการเติมสารเคมีเพื่อปรับคุณภาพน้ำและกำจัดโรคในสัตว์น้ำ สำหรับอาหารที่ใช้ในการเลี้ยงเป็นอาหารเม็ดสำเร็จรูปโปรตีนสูงเพื่อเร่งการเจริญเติบโตและให้ได้น้ำหนักสัตว์น้ำตามความต้องการของตลาดและผู้บริโภค ส่วนมากจะทำการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นเริ่มต้นเท่ากับ 40,000–100,000 ตัว/เฮกเตอร์ หรือ 4–10 ตัว/ตร.ม.

2.8.3 ปัจจัยทางคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลานิล

คุณภาพน้ำเป็นสิ่งสำคัญในระบบเลี้ยงปลานิลเนื่องจากเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อสุขภาพและการดำรงชีวิตของปลา โดยปัจจัยทางคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลานิล มีดังนี้

2.8.3.1 อุณหภูมิ (Temperature) ปลานิลสามารถทนอุณหภูมิได้ในช่วงกว้างประมาณ 10–42 °ซ โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10 °ซ หรือสูงกว่า 42 °ซ ปลาสามารถดำรงอยู่ได้ไม่นานและอาจตายได้ ปลานิลสามารถบริโภคอาหารได้ดีเมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงกว่า 24 °ซ โดยน้ำที่มีอุณหภูมิสูงทำให้อัตราการบริโภคอาหารสูงขึ้น และจะหยุดบริโภคอาหารเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 15 °ซ นอกจากนี้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 °ซ ปลาจะไม่วางไข่ โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเติบโตและวางไข่ของปลานิลอยู่ในช่วง 19–28 และ 26–29 °ซ ตามลำดับ [17]

2.8.3.2 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen; DO) ปริมาณออกซิเจนละลายที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 5 มก.-ออกซิเจน/ล. จนถึงจุดอิ่มตัว อย่างไรก็ตามปลานิลสามารถทนต่อสภาพน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำในช่วง 0–0.4 มก.-ออกซิเจน/ล. โดยที่ปริมาณออกซิเจนต่ำกว่า 0.3 มก.-ออกซิเจน/ล. ปลาจะว่ายขึ้นสู่ผิวน้ำเพื่อรับออกซิเจนซึ่งเป็นสาเหตุของอาการเครียด นอกจากนี้ปลานิลสามารถบริโภคอาหารได้ปกติเมื่อมีปริมาณออกซิเจนละลายสูงกว่า 3 มก.-ออกซิเจน/ล. และเมื่อปริมาณออกซิเจนลดลงจะส่งผลให้อัตราการย่อยอาหารใช้เวลานานกว่าปกติ ดังนั้นจึงควรควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำให้มีค่ามากกว่า 0.3 มก.-ออกซิเจน/ล. [17]

2.8.3.3 ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปลานิลสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอชเท่ากับ 6.5–8.5 และน้ำที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลาไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชเกิน 2 หน่วยในรอบวัน นอกจากนี้ในช่วงพีเอชเท่ากับ 4–6 และ 9–11 ปลาจะเจริญเติบโตช้าและอ่อนแอ โดยปลานิลจะตายเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 3.5–4.5 [17]

2.8.3.4 สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) สภาพความเป็นด่างในระบบที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลานิลควรมีค่ามากกว่า 20–40 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. หรือควรอยู่ในช่วง 200–300 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต /ล. [12]

2.8.3.5 ความเค็ม (Salinity) เนื่องจากปลานิลเป็นปลาน้ำจืดดังนั้นระดับความเค็มที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตจึงมีค่าต่ำ และการเปลี่ยนแปลงระดับความเค็มอย่างกะทันหันส่งผลโดยตรงต่อสุขภาพของสัตว์น้ำ

2.8.3.6 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบไม่ควรเกิน 0.002 มก./ล. โดยความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์คล้ายกับการขาดออกซิเจนแต่รุนแรงกว่า ซึ่งปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์เพียงเล็กน้อยสามารถทำให้ปลาตายได้ภายในเวลา 48 ชม. [16]

2.9 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การบำบัดไนโตรเจนผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน

Aurelio และ Thomas (1996) [41] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียและไนไทรต์จากการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด โดยเปรียบเทียบระหว่างระบบถังกรองชีวภาพ (Floating bead filter; FBF) และระบบจานหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contacter; RBC) จากการทดลองพบว่าระบบบำบัดแบบผสมมีอัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนีย และไนไทรต์เท่ากับ 60.6 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน และ 59.6 มก.ไนไทรต์-ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน หรือคิดเป็นร้อยละ 30.7 และ 51.7 ของน้ำเสียเข้าสู่ระบบตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพพบว่าระบบจานหมุนชีวภาพมีอัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนียและไนไทรต์สูงกว่า ในขณะที่ระบบถังกรองชีวภาพสามารถกักเก็บตะกอนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำได้ดีกว่า

Al - Hafedh และคณะ (2003) [42] ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียจากการเลี้ยงปลานิลระดับความหนาแน่นสูงด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน เมื่อแปรค่าวัสดุตัวกลางในการยึดเกาะของไนทริฟายอิงแบคทีเรีย 3 ชนิด นั่นคือ Plastic roll, PVC pipe และ Scrub pads โดยทำการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนและทำการกรองผ่านถังกรองทรายแบบไหลขึ้น จากนั้นน้ำเสียที่ปราศจากตะกอนจะไหลเข้าสู่ปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันที่บรรจุวัสดุตัวกรองชีวภาพ จากการทดลองพบว่าวัสดุตัวกลางทั้ง 3 ชนิดมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ โดย Plastic roll มีอัตราการบำบัดไนโตรเจนสูงสุดเมื่อเทียบกับ PVC pipe และ Scrub pads นั่นคือมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียทั้งหมด (Total Ammonia Nitrogen; TAN) และไนไทรต์ไนโตรเจน (Nitrite Nitrogen; NO_2-N) เท่ากับ 43 และ 9.6 มก.-ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน ซึ่งคิดเป็นอัตราร้อยละ 25.49 และ 26.30 ตามลำดับ แต่ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องของราคาที่ค่อนข้างสูง ตัวกลางชนิด PVC pipe ซึ่งมีราคาถูก และใช้งานได้ง่ายจึงเป็นวัสดุทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับตัวกลางในกระบวนการไนทริฟิเคชัน

Suhr และ Pedersen (2010) [37] ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียจากการเลี้ยงปลาเรนโบว์เทราท์ (Rainbow trout) ความหนาแน่นเท่ากับ 32 กก./ลบ.ม. ของปริมาตรน้ำในบ่อ ที่อุณหภูมิ 8 °ซ ผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอ เมื่อแปรค่าวัสดุตัวกรองชีวภาพในการยึดเกาะของไนทริฟายอิงแบคทีเรีย 2 ชนิด นั่นคือตัวกรองชีวภาพแบบฟิกซ์เบด (Fixed bed; FB) โดยเลือกใช้ Bioblock (Polyethylene netshaped cylinders, 200 ตร.ม./ลบม.) และตัวกรองชีวภาพแบบตัวกลางเคลื่อนที่ (Moving bed; MB) โดยเลือกใช้ Biomedia (Polypropylene carriers, 850 ตร.ม./ลบม.) ทำการทดลองแบบต่อเนื่องเป็น

เวลา 100 วัน ด้วยความเข้มข้นแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (Total Ammonia Nitrogen; TAN) เริ่มต้นเท่ากับ 2.89 มก.-ไนโตรเจน/ล. จากการทดลองพบว่าอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพแบบฟิกซ์เบด และแบบตัวกลางเคลื่อนที่ มีค่าเท่ากับ 98 และ 231 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน ตามลำดับ และเมื่อทำการเดินระบบต่อเนื่องเป็นเวลา 2 สัปดาห์ พบว่า Bioblock มีอัตราไนทริฟิเคชันเพิ่มขึ้น เท่ากับ 146 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน เนื่องจากแบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตและสร้างชั้นฟิล์มชีวภาพบนตัวกรองชีวภาพแบบตัวกลางไม่เคลื่อนที่ได้ดีกว่า ส่งผลให้ระบบมีความยืดหยุ่น สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนเข้าระบบ (Ammonia Loading) ได้มากกว่า และมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าระบบแบบตัวกลางเคลื่อนที่

มะลิวัลย์ คุตะโค และคณะ (2551) [43] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียจากการเลี้ยงกุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*) รูปแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้งด้วยระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันโดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ในดินตะกอนจากบ่อเลี้ยงกุ้ง จากการประเมินประสิทธิภาพเบื้องต้นพบว่าการตากดินตะกอนก่อนบ่มส่งผลยับยั้งกระบวนการไนทริฟิเคชัน และการบ่มดินตะกอนภายใต้สภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนละลายต่ำกว่า 2.5 มก.-ออกซิเจน/ล. ส่งผลให้ความหลากหลายของแบคทีเรียในดินตะกอนลดลง สำหรับการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนจากการเลี้ยงกุ้งขาวพบว่าการบรรจุดินตะกอนสามารถบำบัดแอมโมเนียความเข้มข้น 0.2 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ได้หมดภายในเวลา 1 วัน โดยมีอัตราไนทริฟิเคชันอยู่ในช่วง 0.21–0.28 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล./วัน

2.9.2 การบำบัดไนโตรเจนผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน

Menasveta และคณะ (2001) [44] ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไนเทรตจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำด้วยระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชันภายใต้สภาวะแอนน็อกซิก ระบบที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำปริมาตร 9 ลบ.ม. ตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน และระบบดีไนทริฟิเคชันซึ่งอาศัยคอลัมน์ลดออกซิเจน คอลัมน์รีดิวซ์ไนเทรตปริมาตร 143 ลิตร และคอลัมน์เพิ่มออกซิเจน เดินระบบการทดลองเป็นเวลา 81 สัปดาห์ โดยแปรเปลี่ยนชนิดของตัวกลางในการยึดเกาะของจุลชีพ เชื้อที่มีบทบาทในกระบวนการ และแหล่งอินทรีย์คาร์บอนสำหรับกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน การทดลองประกอบด้วย ชุดการทดลองที่ 1: อาศัย porous plastic balls ในการยึดเกาะของจุลชีพกลุ่ม mangrove soil โดยมีการเติมเอทานอลเป็นแหล่งคาร์บอน ชุดการทดลองที่ 2: อาศัยเปลือกหอยนางรมทุบเป็นวัสดุตัวกรองชีวภาพสำหรับเชื้อดีไนทริฟายเออร์ และเติมเอทานอล และชุดการทดลองที่ 3: เลือกใช้เปลือกหอยนางรมเช่นเดิมแต่ไม่มีการเติมเชื้อจุลชีพ และเติมเมทานอลเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน จากการทดลองพบว่าตัวกรองไนทริฟิเคชันสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนียและไนไทรต์ในระบบให้มีค่าต่ำกว่า 0.5 และ 0.2

มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ สำหรับระบบดีไนทริฟิเคชันของชุดการทดลองที่ 1 สามารถควบคุมปริมาณไนเทรตให้มีค่าต่ำกว่า 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. และชุดการทดลองที่ 2 และ 3 ที่มีการบรรจุเปลือกหอยนางรมทุบเป็นวัสดุตัวกรองชีวภาพสามารถรีดิวซ์ไนเทรตให้อยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนภายใน 9 สัปดาห์ โดยมีความเข้มข้นของไนเทรตลดลงจาก 165 เหลือ 25 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เอทานอลเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอนสามารถเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์เมื่อเติมแบคทีเรีย *Bacillus* spp. ลงไปเป็นหัวเชื้อ และพบว่าเมื่อกระบวนการสิ้นสุดมีกรดอินทรีย์เกิดขึ้นส่งผลให้ค่าพีเอชของระบบลดลงต่ำมาก ในขณะที่เมทานอลเป็นแหล่งคาร์บอนที่มีประสิทธิภาพมากกว่าโดยสามารถเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่ต้องเติมแบคทีเรีย

Saliling และคณะ (2007) [45] ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ หรือระบบบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นไนเทรตสูง โดยประยุกต์ใช้วัสดุตัวกลางดีไนทริฟิเคชันที่ผลิตจากแผ่นไม้ และฟางข้าวสาลีเป็นทางเลือกแทนการใช้เม็ดพลาสติกโพลีเอทิลีนซึ่งมีราคาแพง ทำการบรรจุวัสดุตัวกลางในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบไหลขึ้น (Up-flow reactor) เดินระบบการทดลองโดยแปรค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลอง 3 ระดับ คือ 50 120 และ 200 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. จากการทดลองพบว่าการใช้แผ่นไม้ และฟางข้าวสาลีเป็นวัสดุตัวกลางมีประสิทธิภาพการบำบัดไนเทรตความเข้มข้น 200 มก.-ไนโตรเจน/ล. ใกล้เคียงกับการใช้เม็ดพลาสติกซึ่งมีประสิทธิภาพถึงร้อยละ 99 โดยมีอัตราการรีดิวซ์ไนเทรต เท่ากับ 1,360 1,360 และ 1,330 ก.-ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน ตามลำดับ ภายในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรต เท่ากับ 3.34–3.64 3.26–3.46 และ 3.41–3.95 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำเสียที่ผ่านถังปฏิกรณ์ที่บรรจุแผ่นไม้และฟางข้าวสาลีมีปริมาณแอมโมเนียและไนไทรต์ในระดับความเข้มข้นต่ำประมาณ 0 และ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ดังนั้นแผ่นไม้และฟางข้าวสาลีจึงเป็นวัสดุทางเลือกที่เหมาะสม เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง และราคาถูก แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของอายุการใช้งาน กล่าวคือเมื่อทำการเดินระบบต่อเนื่องเป็นเวลา 140 วัน พบว่าแผ่นไม้และฟางข้าวสาลีมีการสูญเสียมวลคิดเป็นร้อยละ 16.2 และ 37.7 ตามลำดับ

Hamlin และคณะ (2008) [46] ได้ศึกษาผลของชนิดของสารอินทรีย์ และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในการรีดิวซ์ไนเทรตสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด โดยใช้สารอินทรีย์คาร์บอน 4 ชนิด นั่นคือเมทานอล (Methanol) กรดอะซิติค (Acetatic acid) โมลาส (Molasses and Cerelose^{TM}) และแป้งที่ผ่านการย่อย (Hydrolyzed starch) ในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบไหลขึ้น ขนาด 1.89 ลบ.ม. ที่มีการบรรจุตัวกรองชีวภาพโพลิเอทิลีนปริมาตร 1 ลบ.ม. เดินระบบการทดลองโดยผ่านน้ำเสียเข้าระบบไนทริฟิเคชันแบบตัวกลางเคลื่อนที่เพื่อออกซิไดซ์แอมโมเนียให้อยู่ในรูปของไนเทรต จากนั้นสูบน้ำเสียเข้าระบบดีไนทรฟิเคชันด้วยอัตราเร็ว

เท่ากับ 10 ล./นาที จากการทดลองพบว่าการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนทั้ง 4 ชนิด สามารถรีดิวซ์ไนเทรตในช่วงความเข้มข้นเท่ากับ 11–57 มก.ไนโตรเจน/ล. ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดไม่แตกต่างกัน โดยการเติมเมทานอล อะซิเตท และโมลาส มีอัตราดีไนทริฟิเคชันเท่ากับ 670–680 ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน ซึ่งสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมเท่ากับ 2:1 7:1 และ 2.5:1 ตามลำดับ ส่วนการเติมแป้งที่ผ่านการย่อยเป็นแหล่งคาร์บอนทำให้มีอัตราดีไนทริฟิเคชันเท่ากับ 680 ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน และมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมเท่ากับ 2.5:1

วิลาสินี ไตรยราช (2546) [2] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนเทรตจากระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับการเลี้ยงกุ้งด้วยระบบแบบท่อยาว 50 ม. ที่มีการบรรจุตัวกรองชีวภาพไบโอบอลเติมเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 5 และควบคุมค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันภายในระบบมีค่าอยู่ในช่วง -310 ถึง -320 มิลลิโวลต์ เดินระบบการทดลองแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 210 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่มีการติดตั้งระบบบำบัดไนทริฟิเคชันเพียงอย่างเดียวกับชุดทดลองที่ผสมผสานระหว่างระบบไนทริฟิเคชัน และดีไนทรีฟิเคชันแบบท่อยาว จากการทดลองพบว่าระบบท่อยาวมีประสิทธิภาพการบำบัดไนเทรตมากกว่าร้อยละ 80 โดยสามารถควบคุมปริมาณไนเทรตภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำให้มีค่าต่ำกว่า 20 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. โดยไม่พบการสะสมของไนไทรต์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟล์ ในขณะที่ชุดควบคุมมีการสะสมไนเทรตในระดับสูงกว่า 80 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. และมีอัตราการรอดของสัตว์น้ำต่ำกว่าชุดทดลอง

วลัยภรณ์ วุฒิเมธา (2551) [47] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตควบคู่กับการศึกษากลุ่มจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ และสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไนเทรตภายในถังปฏิกรณ์ปริมาตร 5 ลิตร ความเข้มข้นไนเทรตเริ่มต้นเท่ากับ 100 มก.ไนโตรเจน/ล. แปรค่าการเติมกลูโคสในสัดส่วนซีโอดีต่อไนเทรตที่น้อย เพียงพอ และมากเกินพอต่อกระบวนดีไนทริฟิเคชันตามทฤษฎี เท่ากับ 2:1 5:1 และ 8:1 จากการทดลองพบว่าถังปฏิกิริยาทั้งสามมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีใกล้เคียงกัน นั่นคือมากกว่าร้อยละ 90 แต่ประสิทธิภาพการบำบัดไนเทรตและไนไทรต์จะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่อสัดส่วนดังกล่าวมีค่าสูงขึ้น และเมื่อทำการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลากักเก็บน้ำ และภาระบรรทุกไนเทรตที่มีผลต่อการเดินระบบ โดยแปรค่าระยะเวลากักเก็บ 3 ระดับ เท่ากับ 12 8 และ 4 ชม. จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนเทรตในระบบยูเอเอสบี คืออัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตในช่วง 5:1–8:1 และระยะเวลากักเก็บน้ำที่ 4 ชม. ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและไนเทรตมีค่ามากกว่าร้อยละ 90

ชลธิชา พลายชุม (2553) [11] ได้ศึกษาการพัฒนาความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุทดแทนดินและศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไนเทรตจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์ โดยเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่มีการบรรจุดินในถังดีไนทริฟิเคชันด้วยความหนา 5 ซม. กับชุดทดลองที่มีการใช้วัสดุทดแทนดินธรรมชาติ 3 ชนิด นั่นคือ ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม จากการทดลองพบว่าดิน

ธรรมชาติมีอัตราการรีดิวซ์ไนเทรตสูงสุดเท่ากับ 5,383.01 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/พื้นที่ผิวก้นถัง/วัน แต่เนื่องจากการใช้ดินเป็นวัสดุตัวกลางก่อให้เกิดการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟล์ ดังนั้นหินพัมมิสจึงเป็นวัสดุทดแทนที่มีประสิทธิภาพ โดยมีอัตราดีไนทริฟิเคชันเท่ากับ 3,906.53 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/พื้นที่ผิวก้นถัง/วัน ในส่วนของการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการรีดิวซ์ไนเทรตโดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้เมทานอล และกากน้ำตาลเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน และหาค่าสัดส่วนซีโอดีต่อไนเทรตที่เหมาะสม พบว่าเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมมากกว่ากากน้ำตาล เนื่องจากเป็นสารที่มีกำลังรีดิวซ์สูง ให้ค่ายิลด์ต่ำ มีราคาถูก ไม่มีการสะสมตัวของแอมโมเนีย และไม่มีปัญหาเรื่องสีของน้ำ โดยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตที่ทำให้เกิดอัตราการบำบัดสูงสุด เท่ากับ 5:1 และเมื่อติดตั้งระบบบำบัดเข้ากับบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 90 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนเทรตได้มากกว่าร้อยละ 80 โดยมีอัตราการรีดิวซ์ไนเทรตเฉลี่ย 6,311.29 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/พื้นที่ผิวก้นถัง/วัน

รัชฎาพร ไชยศรี (2556) [13] ได้ศึกษาพัฒนาระบบย่อยตะกอน และระบบบำบัดไนเทรตภายในถังปฏิกรณ์เดียว โดยอาศัยคอลัมน์อะคริลิกใส จำนวน 2 ท่อซ้อนกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ด้านนอกและด้านในเท่ากับ 17 และ 5.4 ซม. ตามลำดับ ในการแยกตะกอนและบำบัดน้ำเสียจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยแปรค่าสัดส่วนการเติมเมทานอลเข้าสู่ระบบเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมเมทานอล จากการทดลองพบว่าคอลัมน์สามารถแยกตะกอนได้ดีที่สุดที่อัตราการไหลเท่ากับ 360 ล./ชม. โดยเมื่อเติมเมทานอลในสัดส่วนซีโอดีต่อไนเทรตเท่ากับ 3:1 ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพการรีดิวซ์ไนเทรตและอัตราดีไนทริฟิเคชันเท่ากับ ร้อยละ 33.32 และ 5,102.88 มก.-ไนโตรเจน/วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มแผ่นดักตะกอนเป็นตัวกลางพลาสติกภายในคอลัมน์เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการยึดเกาะของดีไนทริฟายเออร์ส่งผลให้อัตราการรีดิวซ์ไนเทรตสูงขึ้น อีกทั้งยังช่วยป้องกันการลอยและฟุ้งตัวของตะกอนซึ่งเกิดจากการดันตัวของก๊าซภายในระบบ

2.9.3 การบำบัดไนโตรเจนด้วยระบบแบบยึดเกาะกับตัวกลางผ่านกระบวนการร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน

ธัญญา พันธุ์ฤทธิ์ดำ (2541) [48] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนจากระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับการเลี้ยงกุ้งกุลาดำด้วยระบบผสมระหว่างบ่อบรรจุตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันชนิดเส้นใยสังเคราะห์ไบโอโพลิมา (Bio-polyma) โดยมีอัตราการหมุนเวียนน้ำเท่ากับ 7.125 ครั้งต่อวัน และระบบบำบัดไนเทรตซึ่งประกอบด้วยคอลัมน์ลดปริมาณออกซิเจนละลาย คอลัมน์บรรจุวัสดุตรึงเชื้อดีไนทริฟายอิงแบคทีเรีย และคอลัมน์เพิ่มปริมาณออกซิเจนละลาย โดยควบคุมอัตราการถ่ายน้ำให้อยู่ในช่วง 40–110 มล./นาที ทำการเปรียบเทียบกับชุดควบคุมซึ่งไม่มีการติดตั้งระบบบำบัดเป็นเวลา 305 วัน จากการทดลองพบว่าระบบบำบัดร่วมสามารถควบคุมความ

เข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของกุ้งกุลาดำ นอกจากนี้ยังพบว่ากระบวนการรีดิวซ์ไนเทรตสามารถเกิดขึ้นภายในตัวกรองชีวภาพไบโอโพลิมา เนื่องจากลักษณะการรวมตัวของเส้นใยเป็นเกลียวซึ่งช่วยเพิ่มโอกาสการเกิดสภาวะแอนน็อกซิกขึ้นภายในได้อย่างสมบูรณ์

ศิริวรรณ ศิลาภากุล (2545) [49] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนจากระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับการเลี้ยงกุ้งด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกเบดนิ่ง ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่มีอากาศ และไร้อากาศที่บรรจุวัสดุตัวกรองชีวภาพไบโอบอลสำหรับการยึดเกาะของจุลชีพ จากการทดลองพบว่าถังปฏิกรณ์ชีวภาพดังกล่าวสามารถบำบัดไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์พร้อมกันโดยไม่มีการสะสมของไนโตรเจนในระบบ ซึ่งมีอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันอยู่ในช่วง 60–870 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน และ 10–80 มก.ไนไทรต-ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน ตามลำดับ

นฤภู จูประจักษ์ (2547) [50] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย และไนไทรตจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับการเลี้ยงกุ้งด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกแบบเบดนิ่งที่มีการไหลวนภายนอก โดยทำการบรรจุพลาสติกไบโอบอลที่ผ่านการตรึงเชื้อลงในถังปฏิกรณ์ในส่วนที่มีอากาศและส่วนที่ไร้อากาศซึ่งสามารถรองรับปริมาณน้ำเสียได้ 60 ลิตร จากการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์พบว่ากระบวนการไนทริฟิเคชัน และดีไนทริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นพร้อมกันโดยมีอัตราการบำบัดอยู่ในช่วง 0.563–3.971 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล./วัน และ 2.290–18.913 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล./วัน ตามลำดับ และเมื่อติดตั้งระบบบำบัดเข้ากับบ่อเลี้ยงกุ้งในชุดทดลองเปรียบเทียบกับชุดควบคุม พบว่าถังปฏิกรณ์สามารถควบคุมสารประกอบไนโตรเจนในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำโดยไม่ต้องมีการเติมเมทานอล ซึ่งสภาวะที่ใช้ในการเดินระบบบำบัดร่วม คือปริมาณออกซิเจนละลายในส่วนที่มีอากาศและไร้อากาศ เท่ากับ 3–5 และ 0–2 มก./ล. ตามลำดับ สภาพความเป็นด่างมีค่ามากกว่า 100 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. และค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในส่วนไร้อากาศมีค่าอยู่ระหว่าง -400 ถึง +100 มิลลิโวลต์

รุ่งนภา สุทธิศรี (2549) [51] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนจากระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับการเลี้ยงกุ้งกุลาดำในโรงเรือนด้วยระบบผสมระหว่างบ่อบำบัดที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพชนิดเส้นใยสังเคราะห์ไบโอโพลิมาสำหรับบำบัดแอมโมเนีย และระบบบำบัดแบบท่อยาว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ความยาว 50 ม. ที่บรรจุตัวกรองชีวภาพไบโอบอลสำหรับกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน โดยในช่วงต้นของท่อมีการเติมเมทานอลเพื่อเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอนสำหรับดีไนทริฟายเออร์ เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนระหว่างบ่อเลี้ยงกุ้งความหนาแน่นสูง (150 ตัว/ตร.ม.) และความหนาแน่นปกติ (30 ตัว/ตร.ม.) เป็นเวลา 132 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดระยะเวลาในการทดลอง จากการทดลองพบว่าระบบผสมดังกล่าวสามารถควบคุม

ความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจนให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นพิษต่อกุ้งกุลาดำ นั่นคือความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์และ ไนเทรตในบ่อเลี้ยงความหนาแน่นสูง เท่ากับ 0.086 0.04 และ 30.45 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ และในบ่อเลี้ยงความหนาแน่นปกติ เท่ากับ 0.06 0.023 และ 23.29 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน และระบบบำบัดแบบท่อยาวสามารถควบคุมคุณภาพน้ำได้โดยไม่จำเป็นต้องทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดระยะเวลาในการเลี้ยง นอกจากนี้น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดสามารถนำกลับมาใช้เลี้ยงกุ้งในรอบต่อไปได้

2.9.4 การใช้งานไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

ธนทร ศรีสุข (2551) [38] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด โดยทำการปรับสภาพตัวกรองชีวภาพก่อนการทดลองด้วยการเติมอาหารกุ้งซึ่งสามารถกระตุ้นกระบวนการไนทริฟิเคชันได้ในระยะเวลา 3–4 สัปดาห์ โดยตัวกรองที่ปรับสภาพแล้วจะมีอัตราไนทริฟิเคชันเบื้องต้น เท่ากับ 24.1 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน จากการทดลองพบว่าตัวกรองชีวภาพสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนีย และไนไทรต์ในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำให้มีค่าน้อยกว่า 1.0 มก.ไนโตรเจน/ล. ถึงแม้ปริมาณของเสียอนินทรีย์ไนโตรเจนจะเพิ่มมากกว่า 3 เท่า นั่นคือจาก 5 เป็น 18.3 มก.ไนโตรเจน/ล/วัน. โดยตัวกรองชีวภาพมีอัตราไนทริฟิเคชันเท่ากับ 27.6–41.2 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน และการล้างทำความสะอาดตัวกรองสามารถลดความเสี่ยงในการเกิดซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากกระบวนการทางชีวภาพแบบแอนแอโรบิกได้ โดยการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพด้วยความถี่ 1 ครั้งต่อสองสัปดาห์ สามารถเพิ่มผลผลิตสัตว์น้ำได้ประมาณ 25–30 กก./ลบ.ม. นอกจากนี้ยังพบว่าตัวกรองชีวภาพมีความสามารถในการจับตะกอนจุลชีพที่ดีส่งผลให้กระบวนการดีไนทริฟิเคชันมีส่วนร่วมในการควบคุมปริมาณสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบ

เอกชัย มาลาพล (2551) [5] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียจากบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้งผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด โดยเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมที่ความหนาแน่น 150 ตัว/ตร.ม. ในบ่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ม. ทำการปรับสภาพตัวกรองชีวภาพด้วยการเติมอาหารกุ้งซึ่งสามารถกระตุ้นกระบวนการไนทริฟิเคชันได้สมบูรณ์ในระยะเวลา 22 วัน เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในบ่อเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 84 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดระยะเวลาการทดลอง จากการทดลองพบว่าไบโอคอร์ดสามารถควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไทรต์เท่ากับ 0.20 และ 0.18 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าชุดควบคุมที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไทรต์ เท่ากับ 0.27 และ 9.52 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ และการซัก

ทำความสะอาดตัวกรองด้วยความถี่ 1 ครั้ง/สัปดาห์ ส่งผลให้มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยเท่ากับ 153 มก.-ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน และสัตว์น้ำมีอัตราการรอดตายร้อยละ 93 นอกจากนี้งานวิจัยดังกล่าวยังได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการรีดิวซ์ไนเทรตด้วยถังดินโดยแปรค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนด้วยการเติมเมทานอลหรือกลูโคส 4 ระดับ นั่นคือ 0.06:1 0.3:1 1.6:1 และ 3.3:1 เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน จากการทดลองพบว่าการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนสามารถเพิ่มอัตราการบำบัดไนเทรตของดินตะกอนได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยการใช้เมทานอลและกลูโคสให้ผลการทดลองไม่แตกต่างกัน ซึ่งชุดควบคุมมีอัตราดีไนทริฟิเคชันเฉลี่ยเท่ากับ 386 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน แต่เมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจาก 0.06:1 เป็น 3.3:1 ทำให้อัตราดีไนทริฟิเคชันเพิ่มขึ้นจาก 516 เป็น 2,849 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน

ทยากร สุวรรณรัตน์ (2552) [20] ได้ศึกษาการประเมินประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในการเพาะเลี้ยงปลาขนาดตลาดในโรงเรือนที่ระดับความหนาแน่นสูงโดยผสมผสานกระบวนการร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน นั่นคือระบบประกอบด้วยบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่บรรจุตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน และระบบบำบัดดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งระบบบำบัดเป็นเวลา 81 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดระยะเวลาการทดลอง จากการทดลองพบว่าระบบสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตให้มีค่าต่ำกว่า 0.7 0.76 และ 16.94 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตในบ่อควบคุมมีค่าสูงถึง 18.2 51.68 และ 62.76 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ อัตราการรอดตายของบ่อทดลองและบ่อควบคุมมีค่าไม่แตกต่างกัน นั่นคือร้อยละ 92 แต่ทั้งนี้ปลาในบ่อทดลองมีอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยเท่ากับ 1.03 ก./วัน ซึ่งสูงกว่าในบ่อควบคุมที่มีค่าเท่ากับ 0.8 ก./วัน

เพ็ญพิชญา พินิจธนภาคย์ (2556) [10] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในการเลี้ยงสัตว์น้ำในโรงเรือนที่ระดับความหนาแน่นสูงด้วยถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันโดยใช้ตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนทริฟิเคชัน และหินพัมมิสในการบำบัดร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน จากการทดสอบประสิทธิภาพเบื้องต้นพบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด และหินพัมมิสมีค่าเท่ากับ 42.4 และ 640 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน ตามลำดับ และอัตราการบำบัดไนเทรตของหินพัมมิสมีค่าเท่ากับ 169.1 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน สำหรับการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำจริงได้เลือกใช้หินพัมมิสเพียงอย่างเดียวเนื่องจากสามารถบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียด้วยการกรองผ่านใยกรองน้ำแล้วจึงไหลเข้าสู่ปฏิกรณ์ กระบวนการไนทริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายอย่างเพียงพอและมีการปิดฝาถังปฏิกรณ์ด้วยพลาสติก จากนั้น

กระบวนการดีไนทริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นต่อเนื่องในสภาวะที่ทำการควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการเปิดปั๊มเวียนน้ำและมีการเติมเมทานอลเพื่อเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในสัดส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 จากการทดลองพบว่าระบบดังกล่าวสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนียและไนเทรตให้มีค่าต่ำกว่า 1 และ 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ในขณะที่ไนเทรตของชุดควบคุมมีค่าสูงถึง 352.47 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล.

สรุปประเด็นสำคัญจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1) การบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำประกอบด้วย 2 กระบวนการหลัก นั่นคือกระบวนการไนทริฟิเคชัน และดีไนทริฟิเคชัน โดยเริ่มจากการออกซิไดซ์แอมโมเนียที่เกิดจากเศษอาหารและสิ่งขับถ่ายของสัตว์น้ำซึ่งมีความเป็นพิษสูง โดยการสะสมของปริมาณแอมโมเนียเพียง 0.025 มก.-ไนโตรเจน/ล. ส่งผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพของสัตว์น้ำ การลดความเป็นพิษของแอมโมเนียสามารถทำได้โดยเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของไนไทรต์และไนเทรตซึ่งมีความเป็นพิษต่ำกว่าผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันโดยอาศัยแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอ อย่างไรก็ตามการสะสมของไนเทรตในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำในระดับสูงกว่า 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. อาจส่งผลให้สัตว์น้ำเกิดความเครียดและมีอัตราการบริโภคอาหารลดลง ดังนั้นการรีดิวซ์ไนเทรตต่อจนอยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชันโดยจุลชีพกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟภายใต้สภาวะแอนน็อกซิกจึงมีความสำคัญเช่นกัน

2) กระบวนการบำบัดร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์เดียวเป็นระบบบำบัดทางชีวภาพที่มีประสิทธิภาพการบำบัดสูง ประหยัดค่าใช้จ่าย ลดพื้นที่ในส่วนของระบบบำบัด และได้รับความนิยมเนื่องจากไม่มีการสะสมตัวของสารประกอบไนโตรเจนในระบบโดยสามารถบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตให้อยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนซึ่งไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสัตว์น้ำและสิ่งแวดล้อม อีกทั้งกระบวนการดีไนทริฟิเคชันสามารถเพิ่มความเป็นด่างให้กับระบบได้ ซึ่งเมื่อรวมถังปฏิกรณ์เข้าด้วยกันสามารถลดปริมาณการเติมสารเคมีไบคาร์บอเนตได้ร้อยละ 41.32 อย่างไรก็ตามในส่วนของการดำเนินการบำบัดร่วมภายในถังปฏิกรณ์เดียวสามารถทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายเออร์และดีไนทริฟายเออร์ต้องการสภาวะที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตและการทำงานที่แตกต่างกัน กล่าวคือการออกซิไดซ์แอมโมเนียเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนละลายมากกว่า 3 มก.-ออกซิเจน/ล. และเนื่องจากไนทริฟายเออร์ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟที่มีอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการทำงานต่ำกว่าดีไนทริฟายอิงแบคทีเรีย เมื่อรวมถังปฏิกรณ์เข้าด้วยกันอาจส่งผลให้กระบวนการบำบัดร่วมเกิดขึ้นอย่างไม่สมดุล ในส่วนของการรีดิวซ์ไนเทรตเกิดขึ้นภายใต้สภาวะแอนน็อกซิกโดยควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0–2 มก.-ออกซิเจน/ล. อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยพบว่าการเติมอากาศเล็กน้อยสามารถเพิ่มอัตราการบำบัดไนเทรตได้ สำหรับ

การเติมสารอินทรีย์คาร์บอนจากภายนอกเข้าสู่ระบบนิยมใช้เมทานอลเนื่องจากเป็นสารที่มีประสิทธิภาพและไม่มีการสะสมตัวของไนไทรต์ โดยทั่วไปทฤษฎีระบุว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการดีไนทริฟิเคชันมีค่าอยู่ในช่วง 3:1–5:1 หรือ 5:1–10:1

3) กระบวนการบำบัดทางชีวภาพโดยอาศัยตัวกลางในการยึดเกาะของจุลชีพเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูง อาศัยพลังงานในการเดินระบบน้อย ประหยัดค่าใช้จ่าย และพื้นที่ในส่วนของการติดตั้งระบบบำบัด นอกจากนี้ยังเหมาะสำหรับการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วมภายใต้สภาวะแอโรบิกและแอนน็อกซิกภายในถังปฏิกรณ์เดียวกันเนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะในการยึดเกาะของจุลชีพเพียงพอสำหรับแบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายเออร์และดีไนทริฟายเออร์ โดยตัวกรองชีวภาพแบบฟิกซ์เบดจะมีอัตราการบำบัดสูงกว่าระบบแบบตัวกลางเคลื่อนที่เนื่องจากจุลชีพสามารถเจริญเติบโตและสร้างชั้นฟิล์มชีวภาพได้ดีกว่า ทั้งนี้การเลือกชนิดและวัสดุตัวกลางควรคำนึงถึงพื้นที่ผิว ความแข็งแรง ราคาของวัสดุ ความยาก-ง่ายของการติดตั้งในการใช้งานจริง และข้อจำกัดเรื่องอายุการใช้งาน สำหรับการบ่มเชื้อตัวกรองชีวภาพขั้นต้นก่อนนำไปใช้งานจริงควรใช้เวลาประมาณ 45 วัน ภายใต้สภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนละลายมากกว่า 2.5 มก.-ออกซิเจน/ล. เพื่อให้เกิดความหลากหลายของจุลชีพบนตัวกรองชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยพบว่าการบ่มตัวกรองชีวภาพภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำโดยอาศัยเศษอาหารและสิ่งขับถ่ายของสัตว์น้ำสามารถเหนี่ยวนำให้ตัวกรองชีวภาพเกิดการบำบัดอย่างสมบูรณ์และทำให้อัตราการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำเพิ่มขึ้นได้ถึงร้อยละ 7–16

4) การบำบัดสารประกอบไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วมด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดเป็นการบำบัดทางชีวภาพแบบระบบฟิล์มตรึงที่สามารถดำเนินงานได้ง่าย โดยไบโอคอร์ดมีความทนทาน สามารถทำความสะอาดได้ง่าย มีประสิทธิภาพการบำบัด และการเก็บกักตะกอนสูง โดยมีพื้นที่ผิวเพียงพอต่อการยึดเกาะของจุลชีพกลุ่มไนทริฟายเออร์และดีไนทริฟายเออร์ นอกจากนี้เนื่องจากตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดสามารถติดตั้งไว้ได้ภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและการก่อสร้างถังปฏิกรณ์ต่ำ และสามารถลดพื้นที่ในส่วนของระบบบำบัดได้อีกด้วย

บทที่ 3
แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

- ถังปฏิกรณ์ทรงกระบอกสูง ปริมาตร 2 ลิตร
- ถังพลาสติก ปริมาตร 240 ลิตร
- ตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดชนิดเส้นใย (Biocord™ biofilter)
- เครื่องเติมอากาศ (Air Pump)
- หัวทรายจ่ายอากาศ (Air Stone)
- สายยางพลาสติก (Plastic cord)
- ท่อพีวีซีและข้อต่อ
- ตะแกรงเหล็ก
- อุปกรณ์จับปลา
- เครื่องชั่งน้ำหนักปลา ยี่ห้อ Sartorius รุ่น PT 1200
- อุปกรณ์วัดความยาว
- พันธุ์ปลานิลจากบริษัท ป.เจริญฟาร์ม (P.CHAREON FARM)
- อาหารปลากินพืช ยี่ห้อซีพี สูตร 9932 ที่มีปริมาณโปรตีนไม่น้อยกว่าร้อยละ 15

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

- เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 9125
- เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 9147
- เครื่องวัดค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (DO meter) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 9147
- เครื่องวัดค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP meter) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 213

Chulalongkorn University

- เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Milton Roy รุ่น Spectronic Genesys 5 และ 10 UV scanning
- เครื่องอ่านค่าบนไมโครเพลท (Microplate reader) ยี่ห้อ BioTek รุ่น PowerWave XS2
- เครื่องอบอุณหภูมิสูง (Hot air oven) ยี่ห้อ Memmert
- หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ยี่ห้อ HIRAYAMA รุ่น HICLAVE HVE-50
- โถดูดความชื้น (Desiccator)
- เครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer)
- เครื่องเขย่าสาร (Vortex Mixer GENIE 2) ยี่ห้อ Scientific Industries รุ่น G560E
- ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)
- ชุดกรองสำหรับกระบอกฉีดยา (Syringe filter holder)
- เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP3100s
- เครื่องชั่งสารเคมี 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP210s
- กระดาษกรอง Whatman GF/C ขนาด 25 และ 47 มม.
- เครื่องแก้ว เช่น หลอดทดลอง หลอดหยด บีกเกอร์ กระบอกตวง ขวดวัดปริมาตร ขวดรูปชมพู่ ฯลฯ
- ไมโครปิเปต
- ชุดทดสอบแอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต คลอรีน และค่าความเป็นด่าง ยี่ห้อ AQUA-VBC ของศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.3 สารเคมี

- 1,10-Phenanthroline monohydrate ($C_{12}H_8N_2.H_2O$)
- Ammonium Chloride (NH_4Cl)
- Ammonium heptamolybdate ($(NH_4)_6Mo_7O_{24}{\cdot}_4H2O$)
- Ammonium iron (II) sulfate hexahydrate ($(NH_4)_2Fe(SO_4)_2.6H_2O$)
- Ammonium sulfate ($(NH_4)_2SO_4$)

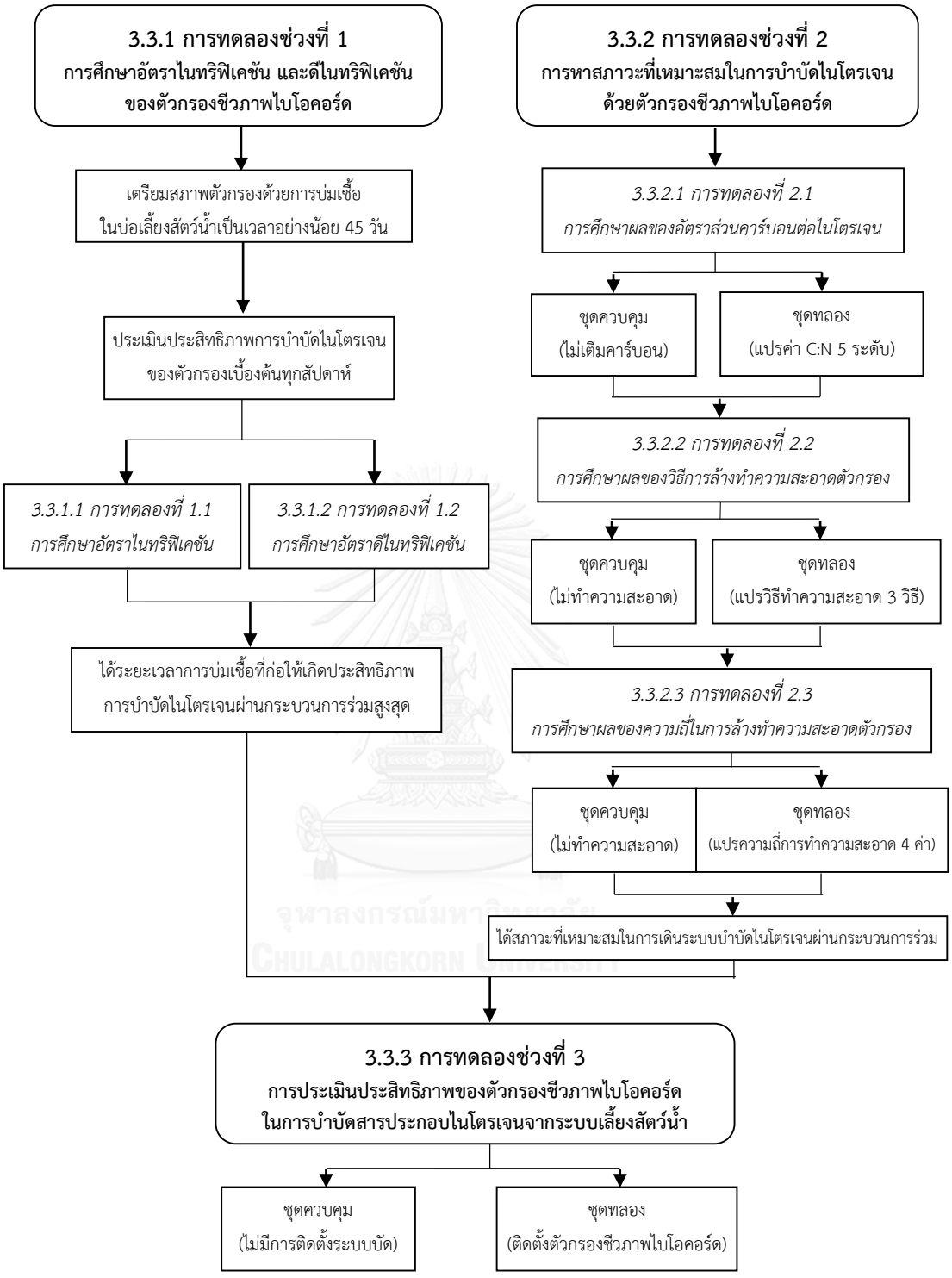
- Boric acid (H_3BO_3)
- Calcium chloride dihydrate ($CaCl_2.2H_2O$)
- Cobalt (II) chloride hexahydrate ($CoCl_2.6H_2O$)
- Copper (II) sulfate pentahydrate ($CuSO_4.5H_2O$)
- De-ionized water (DI)
- Ethanol (C_2H_5OH)
- Ferrous Ammonium Hexahydrate ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2.6H_2O$)
- Ferrous Sulfate ($FeSO_4.7H_2O$)
- Hydrochloric acid (HCl)
- Iron (III) chloride ($FeCl_3$)
- Iron (II) sulfate heptahydrate ($FeSO_4.7H_2O$)
- Magnesium sulfate heptahydrate ($MgSO_4.7H_2O$)
- Manganese (II) chloride tetrahydrate ($MnCl_2.4H_2O$)
- Mercury (II) sulphate ($HgSO_4$)
- Methanol (CH_3OH)
- NNED (N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride)
- Phenol (C_6H_5OH)
- Potassium dichromate ($K_2Cr_2O_7$)
- Potassium hydrogen phosphate (KH_2PO_4)
- Potassium nitrate (KNO_3)
- Potassium persulfate ($K_2O_8S_2$)
- Silver sulfate ($AgSO_4$)
- Sodium bicarbonate ($NaHCO_3$)
- Sodium chloride (NaCl)
- Sodium citrate dihydrate ($Na_3C_6H_5O_7.2H_2O$)

- Sodium hydroxide (NaOH)
- Sodium hypochlorite (NaOCl)
- Sodium nitrate ($NaNO_3$)
- Sodium nitrite ($NaNO_2$)
- Sodium nitroprusside dihydrate ($Na_2Fe(CN)_5NO.2H_2O$)
- Sodium salicylate ($C_6H_4(OH)COONa$)
- Sodium sulfite (Na_2SO_3)
- Sulfuric acid (H_2SO_4)
- Sulphanilamide ($C_6H_8N_2O_2S$)
- Zinc chloride ($ZnCl_2$)

3.2 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา และประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดผ่านกระบวนการร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดชนิดเส้นใยในสภาวะแบบจมอยู่ในน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย

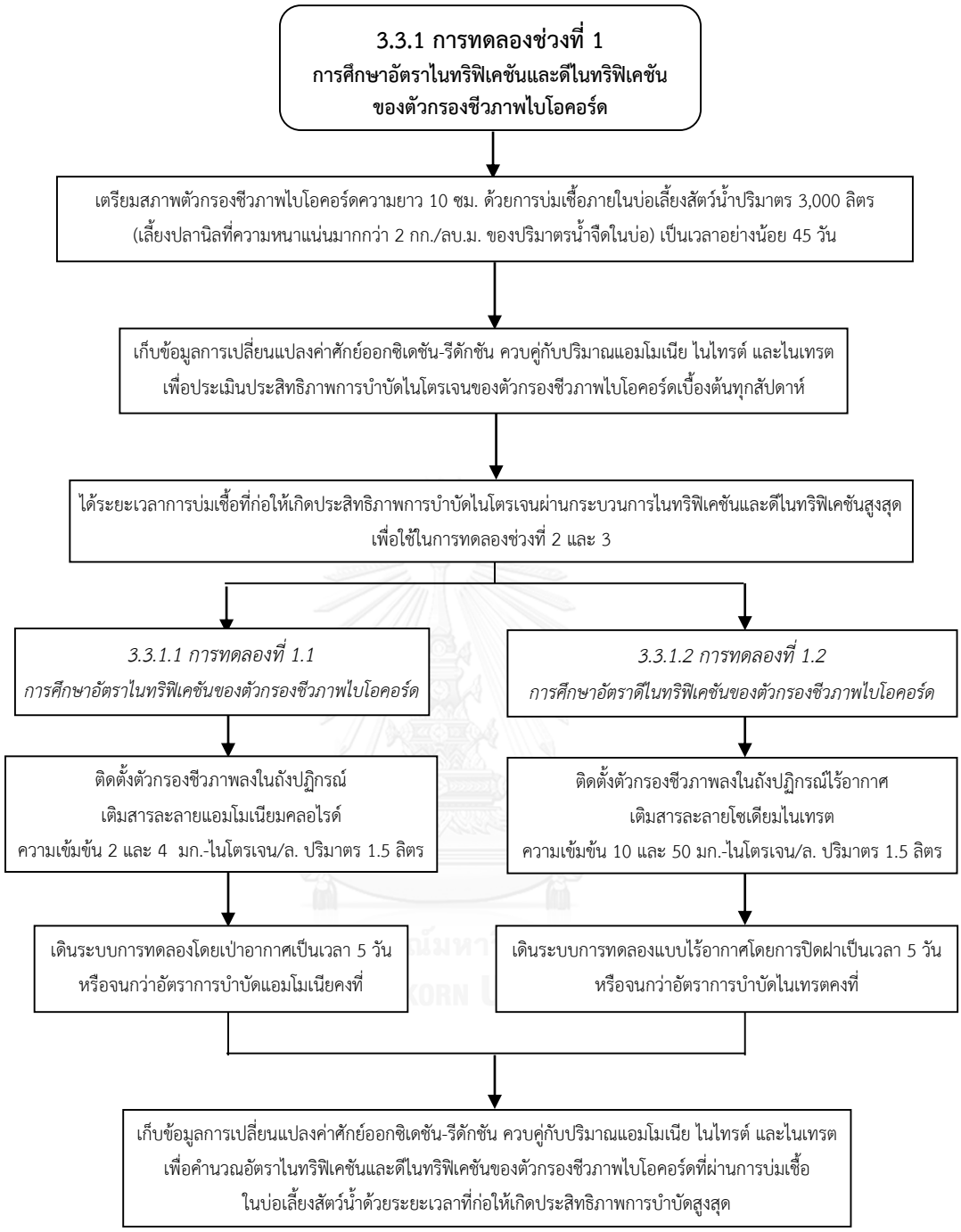
งานวิจัยนี้ดำเนินการในระดับห้องทดลอง ที่อุณหภูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

การทดลองช่วงที่ 1 เป็นการศึกษาอัตราไนทริฟิเคชัน และดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดแบบจมน้ำที่เวลาการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำแต่ละสัปดาห์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อย ได้แก่ การศึกษาอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอ เพื่อใช้ในการคำนวณอัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อหนึ่งหน่วยความยาวของตัวกรองชีวภาพ และการศึกษาอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันภายใต้สภาวะกึ่งไร้อากาศหรือแอนน็อกซิก เพื่อใช้ในการคำนวณอัตราการบำบัดไนเทรตต่อหนึ่งหน่วยความยาวของตัวกรอง ซึ่งทั้ง 2 ขั้นตอนย่อยเดินระบบการทดลองแบบแบทช์ ดังแสดงรายละเอียดในแผนผังรูปที่ 3.2 และหัวข้อ 3.3.1

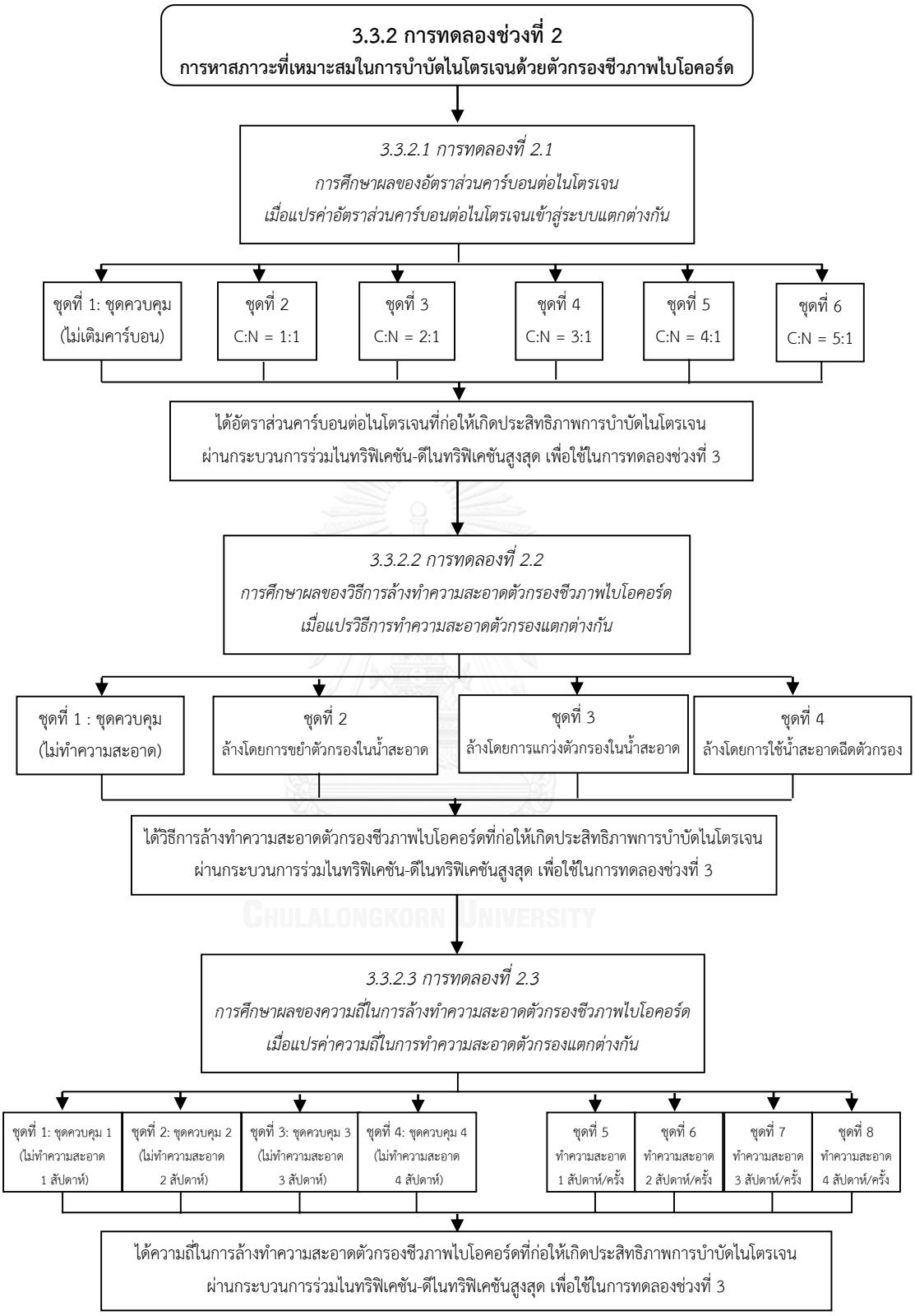
การทดลองช่วงที่ 2 เป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ได้แก่ การศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (หัวข้อ 3.3.2.1) การศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาด (หัวข้อ 3.3.2.2) และความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด (หัวข้อ 3.3.2.3) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบบำบัดร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน โดยเน้นการบำบัดแอมโมเนียซึ่งมีความเป็นพิษสูง และสามารถเกิดการรีดิวซ์ไนเทรตได้บางส่วน ซึ่งทั้ง 3 ขั้นตอนย่อยเดินระบบการทดลองแบบแบทช์ ดังแสดงรายละเอียดในแผนผังรูปที่ 3.3 และหัวข้อ 3.3.2

การทดลองช่วงที่ 3 เป็นการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำจำลองแบบปิดภายในโรงเรือน ปริมาตร 240 ลิตร โดยเลือกระยะเวลาการบ่มเชื้อตัวกรองชีวภาพที่ทำให้เกิดการบำบัดสูงสุดจากการทดลองช่วงที่ 1 คำนวณความยาวของตัวกรองชีวภาพสำหรับติดตั้งในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำโดยอาศัยค่าอัตราการบำบัดไนโตรเจนต่อหนึ่งหน่วยความยาวของตัวกรอง และเดินระบบการทดลองแบบต่อเนื่องด้วยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน วิธีการล้างทำความสะอาด และความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 2 ทำการประเมินประสิทธิภาพโดยเปรียบเทียบผลการทดลอง กับชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 100 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ดังแสดงรายละเอียดในแผนผังรูปที่ 3.4 และหัวข้อ 3.3.3

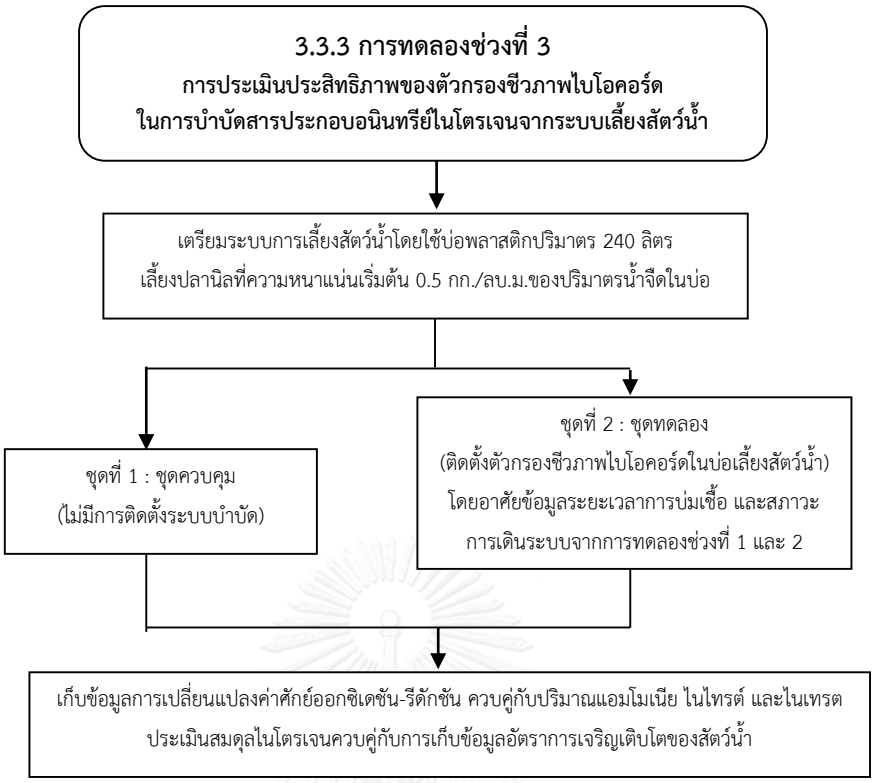
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 3.2 แผนผังการดำเนินการทดลองช่วงที่ 1



รูปที่ 3.3 แผนผังการดำเนินการทดลองช่วงที่ 2



รูปที่ 3.4 แผนผังการดำเนินการทดลองช่วงที่ 3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3 การดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดแบบจมน้ำ

การทดลองส่วนนี้เป็นการหาอัตราการบำบัดแอมโมเนียผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน และการบำบัดไนเทรตผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ระยะเวลาการบ่มเชื้อแต่ละสัปดาห์ เพื่อให้ได้เวลาการบ่มเชื้อที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด โดยแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วน นั่นคือการศึกษาอัตราไนทริฟิเคชัน และการศึกษาอัตราดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในสภาวะแบบจมอยู่ในน้ำโดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1.1 การศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดแบบจม

- *การเตรียมและปรับสภาพตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด*

วัสดุตัวกรองชีวภาพที่ใช้ในการทดลอง คือตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดชนิดเส้นใยสังเคราะห์โพลิโพรไพลีนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มม. มีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะของจุลชีพ เท่ากับ 2.8 ตร.ม./ม.ไบโอคอร์ด หรือ 82.35 ตร.ม./กก.ไบโอคอร์ด [5] ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยก่อนการนำตัวกรองชีวภาพมาใช้ในการทดลองจะต้องทำการเตรียมและปรับสภาพ เพื่อให้เกิดการเกาะติดและเพิ่มจำนวนของจุลชีพตามธรรมชาติบนมัดเส้นใยด้วยการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยตัดตัวกรองให้มีความยาวพอเหมาะที่จะนำไปทดสอบประสิทธิภาพ (สำหรับการทดลองนี้เลือกใช้ความยาวเท่ากับ 10 ซม.) อบตัวกรองที่อุณหภูมิ 103 – 105 °ซ เพื่อชั่งน้ำหนักแห้งก่อนการบ่มเชื้อด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง และติดหมายเลขบนตัวกรองชีวภาพเพื่อให้ง่ายต่อการติดตามน้ำหนัก ดังรูปที่ 3.6 (ก)

รูปที่ 3.5 ตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดชนิดเส้นใย

ปรับสภาพตัวกรองด้วยการบ่มภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำโดยอาศัยเศษอาหารที่เหลือจากการบริโภค และสิ่งขับถ่ายตามธรรมชาติของสัตว์น้ำในการเหนี่ยวนำเพื่อให้เกิดการเกาะติดของจุลชีพและเกิดกระบวนการบำบัดอย่างสมบูรณ์ บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นของศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเป็นถังผ้าใบพลาสติกปริมาตร 3,000 ลิตร ที่ดำเนินการภายใต้สภาวะจำลองของระบบบ่อไร้ดินภายในโรงเรือนดังรูปที่ 3.6 (ข) เลี้ยงปลานิลที่ความหนาแน่นสูง (มากกว่า 2 กก./ลบ.ม.ของปริมาณน้ำจืดในบ่อ) ให้อาหารทุกวันด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปสำหรับปลากินพืชที่ขายทั่วไปตามท้องตลาดในอัตราร้อยละ 3–5 ต่อวันของน้ำหนักปลาทั้งหมดในบ่อ [13, 22] ทำการควบคุมค่าความเป็นด่างให้อยู่ในช่วง 100–150 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟ และให้อากาศอย่างเพียงพอผ่านทางหัวทรายเพื่อควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายให้มีค่ามากกว่า 4 มก.-ออกซิเจน/ล. ทำการบ่มเชื้อเป็นเวลาอย่างน้อย 45 วัน [10] โดยระหว่างการบ่มเชื้อจะทำการประเมินประสิทธิภาพเบื้องต้นทุกสัปดาห์ด้วยการนำตัวกรองมาวิเคราะห์อัตราการไนทริฟิเคชัน ดีไนทริฟิเคชัน และปริมาณจุลชีพสะสมบนมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

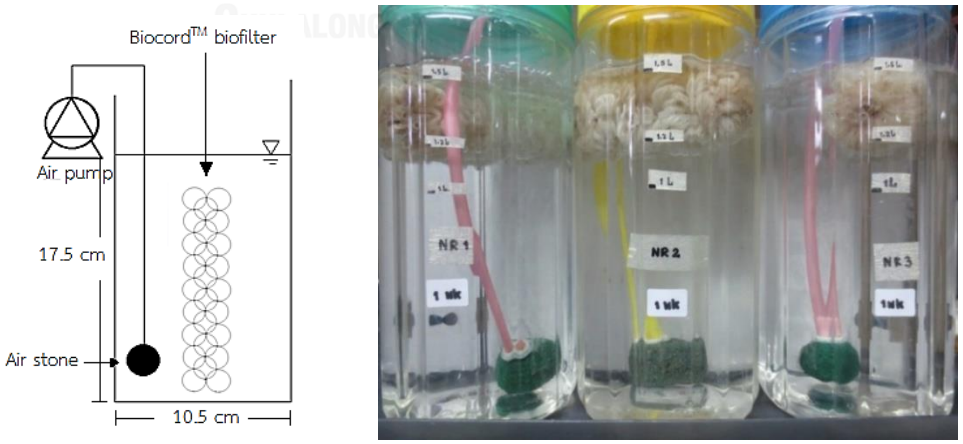
(ก) (ข)

รูปที่ 3.6 (ก) การเตรียมตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดให้อยู่ในรูปแบบที่พร้อมใช้งาน
และ (ข) การปรับสภาพตัวกรองด้วยการบ่มในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อให้เกิดการเกาะติดของจุลชีพ

- *การประเมินอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด*

ติดตั้งตัวกรองชีวภาพความยาว 10 ซม. (ปริมาตรบรรจุของไบโอคอร์ด 159 มล.) ที่ผ่านการเตรียมและปรับสภาพแล้ว ลงในถังปฏิกรณ์ทรงกระบอกสูงปริมาตร 2 ลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.5 ซม. สูง 23 ซม. (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) โดยทั่วไประบบเลี้ยงสัตว์น้ำจะควบคุมระดับความเข้มข้น

ของแอมโมเนียไม่เกิน 0.1 มก.-ไนโตรเจน/ล. [2] ดังนั้นการทดลองนี้จึงเลือกใช้ความเข้มเข้มเริ่มต้นของแอมโมเนียมคลอไรด์ เท่ากับ 2 มก.-ไนโตรเจน/ล. (เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ประมาณ 0.0115 ก.) ปริมาตร 1.5 ลิตร ปรับค่าความเป็นด่างของระบบด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตให้อยู่ในช่วง 100–150 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. โดยกระบวนการออกซิไดซ์แอมโมเนียจะมีการปลดปล่อยพลังงานซึ่งจุลชีพอาศัยพลังงานที่เกิดขึ้นในดึงการคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) หรือคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและมีการปลดปล่อยไฮโดรเจนอิออน (H^+) ออกมา ดังนั้นระบบจึงมีความต้องการค่าสภาพความเป็นด่างอย่างเพียงพอ [25] ต่อสายเครื่องเติมอากาศเพื่อควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายให้มีค่ามากกว่า 4 มก.-ออกซิเจน/ล. ดังรูปที่ 3.7 เดินระบบการทดลองแบบแบทช์เป็นระยะเวลา 5 วัน หรือจนกว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียคงที่ เก็บน้ำตัวอย่างเพื่อตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย โดยในวันแรกของการทดลองจะเก็บน้ำตัวอย่างด้วยความถี่ 3 ชม./ครั้ง จากนั้นในวันถัดไปจะเก็บน้ำตัวอย่างด้วยความถี่ในช่วง 6–12 ชม./ครั้ง และเมื่อตรวจพบว่าปริมาณแอมโมเนียหมดลงจะทำการถ่ายน้ำออกเพื่อทำการทดลองรอบที่ 2 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการออกซิไดซ์แอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพเมื่อเพิ่มความข้นของแอมโมเนียมคลอไรด์เริ่มต้น โดยเติมสารละลายแอมโมเนียคลอไรด์ความเข้มข้น 4 มก.-ไนโตรเจน/ล. (0.0229 ก.) ปริมาตร 1.5 ลิตร เดินระบบการทดลองเช่นเดิม ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ ปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ควบคู่กับการวัดพารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำ ได้แก่ ค่าออกซิเจนละลายน้ำ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ เป็นต้น สำหรับค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันจะทำการตรวจวัด 2 จุด นั่นคือภายในถังปฏิกรณ์ และภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพตามรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.7 การติดตั้งถังปฏิกรณ์สำหรับประเมินอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการประเมินอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด	ความยาว 10 ซม.
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์	ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.-ไนโตรเจน/ล. ปริมาตร 1.5 ลิตร
2. ถังปฏิกรณ์	ทรงกระบอกสูง ปริมาตร 2 ลิตร
3. ระยะเวลาในการเดินระบบ	5 วัน หรือจนกว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียคงที่
ตัวแปรตาม	**พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์**
1. ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล./วัน)	พารามิเตอร์ทางคุณภาพ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต
2. พารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำ	ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าความเป็นด่าง
3. ปริมาณอากาศในน้ำและตะกอนสะสมบนมัดเส้นใยของตัวกรอง	ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP)

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในการประเมินอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

พารามิเตอร์	**วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์**	**จุดเก็บตัวอย่าง**	**ความถี่ในการวิเคราะห์**
1. พารามิเตอร์คุณภาพน้ำทางเคมี			
แอมโมเนีย (NH_4^+-N)	Salicylate – Hypochlorite method (ดัดแปลงจาก Bower และ Holm-Hansen, 1980) [52]	ในถังปฏิกรณ์	ทุก 3 และ 6-12 ชั่วโมง
ไนไทรต์ (NO_2^--N)	Colorimetric and Spectrophotometric Method (ดัดแปลงจาก Strickland และ Parsons, 1972) [53]	ในถังปฏิกรณ์	ทุก 3 และ 6-12 ชั่วโมง
ไนเทรต (NO_3^--N)	Ultraviolet Spectrophotometric Method [7]	ในถังปฏิกรณ์	ทุก 3 และ 6-12 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในการประเมินอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด (ต่อ)

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่าง	ความถี่ในการวิเคราะห์
2. พารามิเตอร์คุณภาพน้ำทางกายภาพ			
ออกซิเจนละลาย (DO)	DO Meter (HANNA, HI 9147)	ในถังปฏิกรณ์	ทุกวัน
พีเอช (pH)	pH Meter (HANNA, HI 9125)	ในถังปฏิกรณ์	ทุกวัน
อุณหภูมิ (Temperature)	Thermometer (HANNA, HI 9147)	ในถังปฏิกรณ์	ทุกวัน
ค่าโออาร์พี (ORP)	ORP Meter (HANNA, HI 213)	ในถังปฏิกรณ์และมัดเส้นใย	ทุกวัน
ความเป็นด่าง (Alkalinity)	Test kit (AQUA-VBC ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)	ในถังปฏิกรณ์	ทุกวัน
3. พารามิเตอร์ทางจุลินทรีย์			
ปริมาณจุลชีพบนตัวกรองชีวภาพ	Total solids dried at 103 - 105°C	ตัวกรองชีวภาพ	เริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- *การคำนวณอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด*

การคำนวณอัตราการลดลงของแอมโมเนียภายในถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันเพื่อใช้ในการประเมินระยะเวลาการบ่มเชื้อตัวกรองชีวภาพที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.1) (3.2) (3.3) และ (3.4) ดังนี้

อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/วัน)

$$= \frac{\text{สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เริ่มต้น (มก.-ไนโตรเจน/ล.) x ปริมาตรสารละลาย (ล.)}}{\text{เวลาที่ทำให้สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ในระบบหมด (วัน)}} \quad (3.1)$$

หรือคำนวณจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ในระบบกับเวลา

$$= \text{ความชันของกราฟ (มก.-ไนโตรเจน/ล./วัน) x ปริมาตรสารละลาย (ล.)} \quad (3.2)$$

อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อความยาวตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน)

$$= \frac{\text{อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/วัน)}}{\text{ความยาวไบโอคอร์ดที่ใช้ในการทดลอง (ม.)}} \quad (3.3)$$

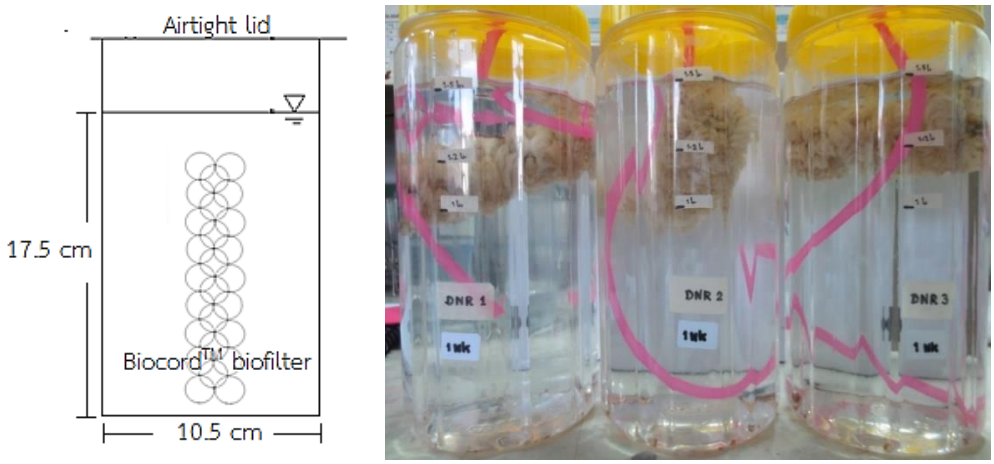
อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อพื้นที่ผิวตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน)

$$= \frac{\text{อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อความยาวไบโอคอร์ดต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน)}}{\text{พื้นที่ผิวจำเพาะของไบโอคอร์ด (ตร.ม./ม.ไบโอคอร์ด)}} \quad (3.4)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3.1.2 การศึกษาอัตราดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดแบบจม

ติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศปริมาตรเท่ากับถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการประเมินอัตราไนทริฟิเคชัน (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) ดังรูปที่ 3.8 สร้างสภาวะไร้อากาศในถังปฏิกรณ์ด้วยการปิดฝา และเดินระบบการทดลองแบบแบทช์ ทั้งนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมามีรายงานว่าความเข้มข้นของไนเทรตที่เหมาะสมในการเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีค่าไม่เกิน 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. [3] ดังนั้นในการทดลองจึงเลือกใช้ความเข้มข้นไนเทรตเริ่มต้นเท่ากับ 10 มก.-ไนโตรเจน/ล. (เติมโซเดียมไนเทรตประมาณ 0.0911 ก.) ปริมาตร 1.5 ลิตร โดยไม่ต้องปรับสภาพความเป็นด่างเนื่องจากกระบวนการรีดิวซ์ไนเทรตสามารถเพิ่มความเป็นด่างให้กับระบบได้ เติมเมทานอลลงในถังปฏิกรณ์เพื่อเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนสำหรับกระบวนการดีไนทริฟิเคชันในสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 [11] (เติมเมทานอลประมาณ 0.086 มล.)



รูปที่ 3.8 การติดตั้งถังปฏิกรณ์สำหรับประเมินอัตราดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

เดินระบบการทดลองแบบแบทช์เป็นระยะเวลา 5 วัน หรือจนกว่าอัตราการบำบัดไนเทรตคงที่ เก็บน้ำตัวอย่างด้วยความถี่เช่นเดียวกับการประเมินอัตราไนทริฟิเคชัน และเมื่อตรวจพบว่าปริมาณไนเทรตหมดลงจะทำการถ่ายน้ำออก และทำการทดลองรอบที่ 2 เพื่อศึกษาความสามารถในการรีดิวซ์ไนเทรตเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไนเทรตเริ่มต้นเท่ากับ 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. (0.4554 ก.) ปริมาตร 1.5 ลิตร และปรับสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 (0.427 มล.) เดินระบบการทดลองเช่นเดิม โดยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนควบคู่กับการตรวจวัดพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำเช่นเดียวกับที่แสดงในตารางที่ 3.1 และรายละเอียดของตัวแปรที่ทำการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการประเมินอัตราดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด	ความยาว 10 ซม.
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. สารละลายโซเดียมไนเทรต	ความเข้มข้น 10 และ 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. ปริมาตร 1.5 ลิตร
2. ถังปฏิกรณ์	ทรงกระบอกสูง ปริมาตร 2 ลิตร
3. ระยะเวลาในการเดินระบบ	5 วัน หรือจนกว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียคงที่
4. ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน	เมทานอล
5. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	5:1

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการประเมินอัตราดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด (ต่อ)

ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
1. ประสิทธิภาพการบำบัดไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล./วัน)	พารามิเตอร์ทางคุณภาพ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต
2. พารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำ	ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าความเป็นด่าง
3. ปริมาณอากาศในน้ำและตะกอนสะสมบนมัดเส้นใยของตัวกรอง	ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP)
4. ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน	ซีโอดี (วิเคราะห์เมื่อทำการเติมเมทานอลเข้าสู่ระบบ)

- *การคำนวณอัตราดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด*

การคำนวณอัตราการลดลงของไนเทรตภายในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันเพื่อใช้ในการประเมินระยะเวลาการบ่มเชื้อตัวกรองชีวภาพที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.5) (3.6) (3.7) และ (3.8) ดังนี้

อัตราการบำบัดไนเทรตต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/วัน)

$$= \frac{\text{สารละลายโซเดียมไนเทรตเริ่มต้น (มก.-ไนโตรเจน/ล.)} \times \text{ปริมาตรสารละลาย (ล.)}}{\text{เวลาที่ทำให้สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ในระบบหมด (วัน)}} \quad (3.5)$$

หรือคำนวณจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารละลายโซเดียมไนเทรตในระบบกับเวลา

$$= \text{ความชันของกราฟ (มก.-ไนโตรเจน/ล./วัน)} \times \text{ปริมาตรสารละลาย (ล.)} \quad (3.6)$$

อัตราการบำบัดไนเทรตต่อความยาวตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน)

$$= \frac{\text{อัตราการบำบัดไนเทรตต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/วัน)}}{\text{ความยาวไบโอคอร์ดที่ใช้ในการทดลอง (ม.)}} \quad (3.7)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อัตราการบำบัดไนเทรตต่อพื้นที่ผิวตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน)

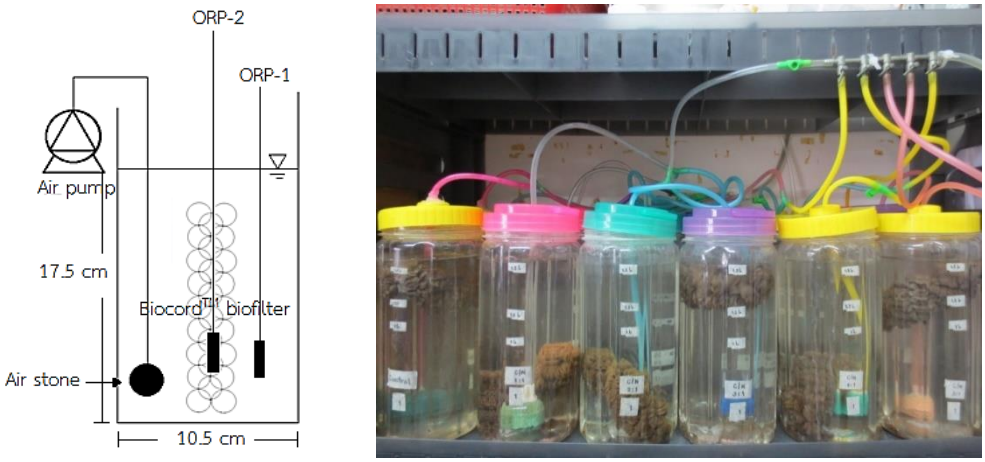
$$= \frac{\text{อัตราการบำบัดไนเทรตต่อความยาวไบโอคอร์ดต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน)}}{\text{พื้นที่ผิวจำเพาะของไบโอคอร์ด (ตร.ม./ม.ไบโอคอร์ด)}} \quad (3.8)$$

3.3.2 การทดลองช่วงที่ 2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไนโตรเจนด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

การทดลองส่วนนี้เป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด เพื่อให้ได้ข้อมูลสภาวะการเดินระบบบำบัดร่วมอย่างสมดุลและมีประสิทธิภาพภายในถังปฏิกรณ์เดียว โดยเน้นการบำบัดแอมโมเนียซึ่งมีความเป็นพิษสูงต่อสัตว์น้ำ สามารถแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 3 ส่วน นั่นคือ การศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน การศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาด และความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดโดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.2.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ

เนื่องจากทางทฤษฎีระบุว่าสารอินทรีย์คาร์บอนมีผลกระตุ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟายเออร์ นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งพลังงานหรือเป็นตัวให้อิเล็กตรอนในกระบวนการรีดิวซ์ไนเทรต อย่างไรก็ตามการเติมเมทานอลส่งผลยับยั้งการเจริญเติบโตของไนทริฟายเออร์ ดังนั้นการทดลองนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการหาสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการบำบัดไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วมอย่างสมดุลและมีประสิทธิภาพ โดยติดตั้งตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในถังปฏิกรณ์ปริมาตรเท่ากับถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองช่วงที่ 1 (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) บรรจุสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 มก.-ไนโตรเจน/ล. ปริมาตร 1.5 ลิตร เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับกระบวนการไนทริฟิเคชัน โดยไนทริฟายเออร์ซึ่งอาศัยอยู่บริเวณพื้นผิวของไบโอคอร์ดจะทำการออกซิไดซ์แอมโมเนียให้อยู่ในรูปของไนเทรต จากนั้นไนเทรตที่เกิดขึ้นจะถูกรีดิวซ์ต่อจนอยู่ในรูปก๊าซไนโตรเจนโดยแบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพ ปรับค่าสภาพความเป็นด่าง และต่อสายเครื่องเติมอากาศเพื่อสร้างสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟ สำหรับแบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟสามารถทำงานได้ภายใต้สภาวะแอนน็อกซิกภายใต้ชั้นไบโอฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3. 9 การติดตั้งถังปฏิกรณ์สำหรับประเมินอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน ของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดเมื่อแปรค่าสัดส่วนการเติมคาร์บอนต่อไนโตรเจนเข้าระบบ

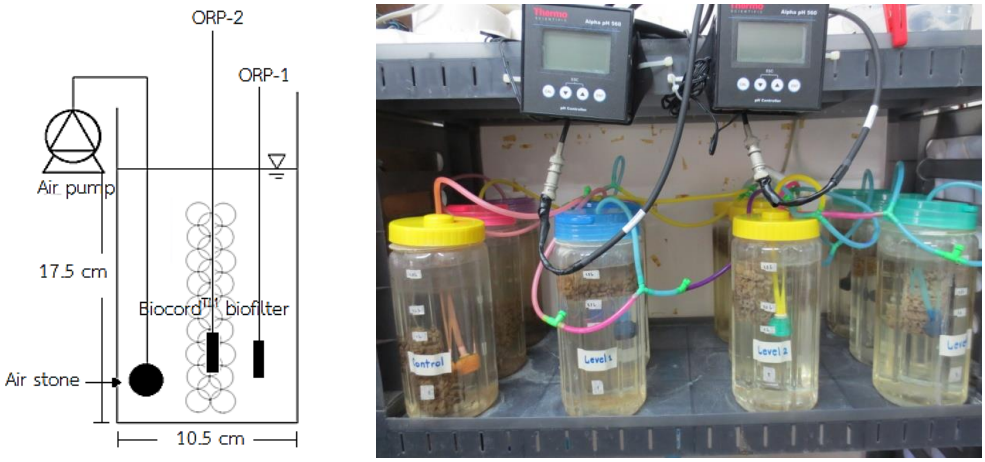
เดินระบบการทดลองแบบแบทช์โดยแปรค่าสัดส่วนการเติมเมทานอลเข้าสู่ระบบในปริมาณที่แตกต่างกัน เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมเมทานอล กับชุดทดลองที่เติมเมทานอลในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนแตกต่างกัน 5 ระดับ คือ 1:1 (เติมเมทานอลประมาณ 0.017 มล.) 2:1 (0.034 มล.) 3:1 (0.051 มล.) 4:1 (0.068 มล.) และ 5:1 (0.086 มล.) โดยในแต่ละค่าของการทดลองจะทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 10 วัน หรือจนกว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตคงที่ เก็บน้ำตัวอย่างด้วยความถี่เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 และเมื่อตรวจพบว่าปริมาณแอมโมเนียและไนเทรตหมดลง จะทำการถ่ายน้ำออกเพื่อทำการทดลองรอบที่ 2 โดยเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 4 มก.-ไนโตรเจน/ล. และแปรค่าสัดส่วนการเติมเมทานอลเข้าสู่ระบบ นั่นคือชุดควบคุมไม่มีการเติมสารอินทรีย์ และชุดทดลองเติมเมทานอลในสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 1:1 (0.085 มล.) 2:1 (0.171 มล.) 3:1 (0.256 มล.) 4:1 (0.342 มล.) และ 5:1 (0.427 มล.) เดินระบบการทดลองเช่นเดิม โดยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนควบคู่กับการตรวจวัดพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำเช่นเดียวกับที่แสดงในตารางที่ 3.1 และรายละเอียดของตัวแปรที่ทำการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.4 สำหรับการคำนวณอัตราการลดลงของแอมโมเนียและไนเทรตสามารถทำได้โดยอาศัยสมการที่ (3.1) ถึง (3.8) เพื่อวิเคราะห์หาค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วมอย่างสมดุลและต่อเนื่องเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 3. 4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการประเมินอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดเมื่อแปรค่าสัดส่วนการเติมคาร์บอนต่อไนโตรเจนเข้าระบบ

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	ไม่เติมสารอินทรีย์คาร์บอน และแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 5 ระดับ คือ 1:1 2:1 3:1 4:1 และ 5:1
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์	ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.-ไนโตรเจน/ล. ปริมาตร 1.5 ลิตร
2. ถังปฏิกรณ์	ทรงกระบอกสูง ปริมาตร 2 ลิตร
3. ระยะเวลาในการเดินระบบ	10 วัน หรือจนกว่าอัตราการบำบัดคงที่
4. ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน	เมทานอล
ตัวแปรตาม	**พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์**
1. ประสิทธิภาพการบำบัด (มก.ไนโตรเจน/ล./วัน)	พารามิเตอร์ทางคุณภาพ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต
2. พารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำ	ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าความเป็นด่าง
3. ปริมาณอากาศในน้ำและตะกอนสะสมบนมัดเส้นใยของตัวกรอง	ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP)
4. ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน	ซีโอดี (วิเคราะห์เมื่อทำการเติมเมทานอลเข้าสู่ระบบ)

3.3.2.2 การศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

สำหรับช่วงแรกของการใช้งานตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ จะเกิดการเพิ่มจำนวนของจุลชีพและความหนาของชั้นไบโอฟิล์มบนมัดเส้นใย ส่งผลให้อัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามสำหรับการใช้งานในระยะยาวการสะสมของตะกอนจุลชีพบนมัดเส้นใยในปริมาณมากเกินไปส่งผลให้ดีไนทริฟายเออร์มีปริมาณเพิ่มขึ้นและเกิดการแย่งอาหารกับไนทริฟายเออร์ ดังนั้นการทดลองนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการหาวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพที่เหมาะสมเพื่อควบคุมปริมาณตะกอนสะสมและก่อให้เกิดการบำบัดร่วมอย่างสมดุล โดยการติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การติดตั้งถังปฏิกรณ์สำหรับประเมินอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน เมื่อแปรเปลี่ยนวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

ทำการแปรเปลี่ยนวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 7 สัปดาห์ ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ การล้างโดยการขยำตัวกรองเบาๆในน้ำสะอาด (รูปที่ 3.11 (ก)) การล้างโดยการแกว่งตัวกรองในน้ำสะอาด (รูปที่ 3.11 (ข)) และการใช้น้ำสะอาดฉีดล้างตัวกรอง (รูปที่ 3.11 (ค)) จากนั้นติดตั้งตัวกรองที่ผ่านการทำความสะอาดลงในถังปฏิกรณ์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่บ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลาเท่ากันแต่ไม่ผ่านการทำความสะอาด เดินระบบการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา ควบคุมอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนตามสัดส่วนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1 โดยในแต่ละค่าของการทดลองจะทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 10 วัน หรือจนกว่าอัตราการบำบัดคงที่ และเมื่อตรวจพบปริมาณแอมโมเนียและไนเทรตหมดลง จะทำการถ่ายน้ำออกเพื่อทำการทดลองรอบที่ 2 โดยเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียเริ่มต้น วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนควบคู่กับการวัดพารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำ และตรวจวัดค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันจำนวน 2 จุด เช่นเดียวกับที่แสดงในตารางที่ 3.1 และรายละเอียดของตัวแปรที่ทำการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.5 จากนั้นคำนวณอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเพื่อวิเคราะห์หาวิธีการล้างทำความสะอาดที่ส่งผลให้เกิดการบำบัดร่วมอย่างสมดุลและต่อเนื่องเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 3.11 วิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดแตกต่างกัน 3 วิธี โดย (ก) การล้างโดยการขยำตัวกรองเบาๆในน้ำสะอาด (ข) การล้างโดยการแกว่งตัวกรองในน้ำสะอาด และ (ค) การใช้น้ำสะอาดฉีดล้างตัวกรอง

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการประเมินอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเมื่อแปรเปลี่ยนวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. วิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด	ไม่ล้างทำความสะอาด และแปรเปลี่ยนวิธีการล้างทำความสะอาด 3 วิธี คือ การขยำตัวกรองเบาๆในน้ำสะอาด แกว่งตัวกรองในน้ำสะอาด และใช้น้ำสะอาดฉีดล้างตัวกรอง
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์	ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.-ไนโตรเจน/ล. ปริมาตร 1.5 ลิตร
2. ถังปฏิกรณ์	ทรงกระบอกสูง ปริมาตร 2 ลิตร
3. ระยะเวลาในการเดินระบบ	10 วัน หรือจนกว่าอัตราการบำบัดคงที่
4. ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน	เมทานอล
5. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 2.1
ตัวแปรตาม	**พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์**
1. ประสิทธิภาพการบำบัด (มก.ไนโตรเจน/ล./วัน)	พารามิเตอร์ทางคุณภาพ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต
2. พารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำ	ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าความเป็นด่าง
3. ปริมาณอากาศในน้ำและตะกอนสะสมบนมัดเส้นใยของตัวกรอง	ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP)
4. ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน	ซีโอดี (วิเคราะห์เมื่อทำการเติมเมทานอลเข้าสู่ระบบ)

3.3.2.3 การศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ต่อเนื่องมาจากการทดลองที่ 2.2 เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสมในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพเพื่อให้กระบวนการบำบัดร่วมเกิดขึ้นอย่างสมดุล โดยเดินระบบการทดลองแบบแบทช์และติดตั้งชุดอุปกรณ์เช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา (3.3.2.2) แปรค่าความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ โดยเปรียบเทียบระหว่างตัวกรองในชุดควบคุมที่ผ่านการบ่มเชื้อและนำไปใช้งานจริงในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำความหนาแน่นสูง (มากกว่า 2 กก./ลบ.ม.ของปริมาณน้ำจืดในบ่อ) เป็นเวลา 1 2 3 และ 4 สัปดาห์ กับตัวกรองในชุดทดลองที่มีการทำความสะอาดด้วยวิธีที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 2.2 และนำไปใช้งานจริงในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 1 2 3 และ 4 สัปดาห์ เช่นเดียวกัน โดยระยะเวลาในการใช้งานและการทดสอบประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดดังแสดงในตารางที่ 3.6 ทั้งนี้ในแต่ละค่าของการทดลองจะทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 10 วัน หรือจนกว่าอัตราการบำบัดคงที่ และเมื่อตรวจพบปริมาณแอมโมเนียและไนเทรต

หมดลงจะทำการเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียเริ่มต้นและแปรความถี่ในการล้างทำความสะอาดเช่นเดิม วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนควบคู่กับการวัดพารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำตามรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 3.1 และรายละเอียดของตัวแปรที่ทำการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.7 จากนั้นคำนวณอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเพื่อวิเคราะห์หาความถี่ในการล้างทำความสะอาดที่ส่งผลให้เกิดการบำบัดร่วมอย่างสมดุลและต่อเนื่องเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 3.6 ระยะเวลาในการใช้งานและทดสอบประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพสำหรับชุดควบคุมและชุดทดลองในการประเมินอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเมื่อแปรค่าความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

ชุดการทดลอง	ลำดับที่	ระยะเวลาในการดำเนินงาน (สัปดาห์)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ชุดควบคุม (ไม่ทำความสะอาด)	1	←	-	-	-	-	-	-	→	■			
	2	←	-	-	-	-	-	-	→		■		
	3	←	-	-	-	-	-	-		→		■	
	4	←	-	-	-	-	-	-			→		■
ชุดทดลอง (ทำความสะอาด)	1	←	-	-	-	-	-	○	→	■			
	2	←	-	-	-	-	-	○	→		■		
	3	←	-	-	-	-	-	○		→		■	
	4	←	-	-	-	-	-	○			→		■

หมายเหตุ

- ←- - -→ การบ่มตัวกรองชีวภาพ
- ←——→ การใช้งานตัวกรองชีวภาพในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ
- ○ การทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพด้วยวิธีที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 2.2
- ■ การประเมินประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพเป็นเวลา 10 วัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการประเมินอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเมื่อแปรค่าความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด	ไม่ล้างทำความสะอาดตัวกรองเป็นเวลา 1 2 3 และ 4 สัปดาห์ และแปรค่าความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรอง 4 ค่า คือ 1 2 3 และ 4 สัปดาห์/ครั้ง
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์	ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.-ไนโตรเจน/ล. ปริมาตร 1.5 ลิตร
2. ถังปฏิกรณ์	ทรงกระบอกสูง ปริมาตร 2 ลิตร
3. ระยะเวลาในการเดินระบบ	10 วัน หรือจนกว่าอัตราการบำบัดคงที่
4. ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน	เมทานอล
5. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 2.1
6. วิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 2.2
ตัวแปรตาม	**พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์**
1. ประสิทธิภาพการบำบัด (มก.ไนโตรเจน/ล./วัน)	พารามิเตอร์ทางคุณภาพ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต
ตัวแปรตาม	**พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์**
2. พารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำ	ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าความเป็นด่าง
3. ปริมาณอากาศในน้ำและตะกอนสะสมบนมัดเส้นใยของตัวกรอง	ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP)
4. ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน	ซีโอดี (วิเคราะห์เมื่อทำการเติมเมทานอลเข้าสู่ระบบ)

3.3.3 การทดลองช่วงที่ 3 การประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

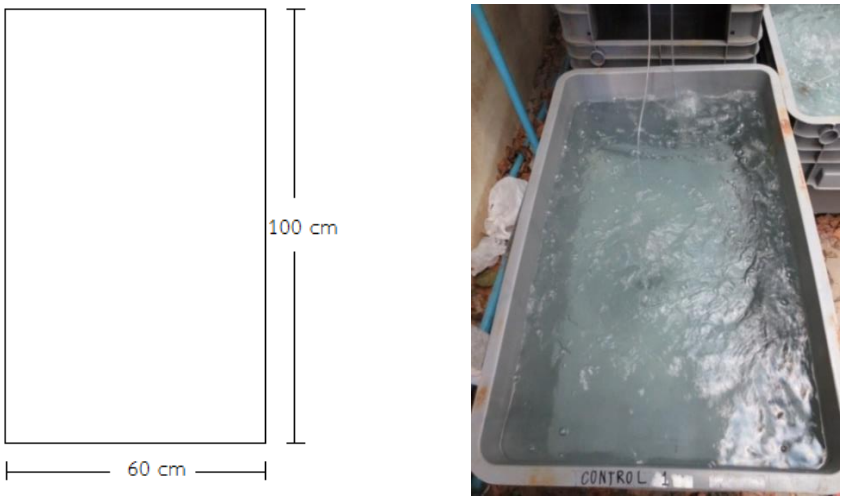
การทดลองส่วนนี้เป็นการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำจำลองแบบปิดภายในโรงเรือนของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดแบบจม โดยเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งระบบบำบัด กับชุดทดลองซึ่งติดตั้งตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยอาศัยข้อมูลระยะเวลาการบ่มเชื้อเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดลองช่วงที่ 1 ออกแบบความยาวตัวกรองชีวภาพที่ติดตั้งภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ และเดินระบบบำบัดร่วมด้วยสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 2 ซึ่งได้แก่ ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน วิธีการล้างทำความสะอาด และความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ เพื่อให้

เกิดการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนอย่างสมดุลและต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเน้นการบำบัดแอมโมเนียเป็นหลัก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- *การเตรียมพันธุ์ปลานิลและบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำสำหรับชุดควบคุม*

พันธุ์ปลานิลที่ใช้ในการทดลองมาจากบริษัท ป.เจริญฟาร์ม (P.CHAREON FARM) ตำบลวังตะเคียน อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา ดังรูปที่ 3.12 เมื่อขนส่งพันธุ์ปลามาจากบริษัทจะทำการปรับอุณหภูมิด้วยการลอยถุงบรรจุสัตว์น้ำภายในบ่อพักประมาณ 15–60 นาที จากนั้นเปิดปากถุงและตักน้ำใส่ โดยเว้นระยะห่างในการตักแต่ละครั้งประมาณ 5 นาที เพื่อปรับค่าพีเอชและป้องกันไม่ให้สัตว์น้ำเกิดอาการช็อคเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและพีเอชอย่างกระทันหัน สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งระบบบัดจะใช้บ่อพลาสติกปริมาตร 240 ลิตร ขนาดกว้างxยาวx สูง เท่ากับ 60x100x40 ลบ.ซม. บรรจุน้ำจืดปริมาตร 200 ลิตร (ความสูงของระดับน้ำประมาณ 35 ซม.) ปรับค่าสภาพความเป็นด่างเริ่มต้นให้มีค่าอยู่ในช่วง 100–150 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. และต่อสายเครื่องเติมอากาศเพื่อสร้างสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ และการทำงานของไนทริฟายเออร์ โดยรูปแบบของการเตรียมบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำสำหรับชุดควบคุมดังรูปที่ 3.13

รูปที่ 3.12 พันธุ์ปลานิลที่ใช้สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ



รูปที่ 3.13 การเตรียมบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำสำหรับชุดควบคุมที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

- *การออกแบบความยาวตัวกรองชีวภาพ และการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำสำหรับชุดทดลอง*

การออกแบบความยาวตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดสำหรับติดตั้งภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำของชุดทดลองคำนวณจากอัตราการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนต่อความยาวตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน) ภายใต้การเดินสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองในส่วนที่ 2.3 ตามสมการที่ (3.9) และ (3.10) ตามลำดับ

อัตราการเกิดของเสียในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/วัน)

= น้ำหนักรวมของสัตว์น้ำ (กก.) x อัตราการให้อาหารต่อวัน (ร้อยละ) x อัตราส่วนโปรตีนในอาหาร (ร้อยละ) x ปริมาณแร่ธาตุไนโตรเจนในโปรตีน (ก.-ไนโตรเจน/ก.-โปรตีน) x 10^6 มก./กก. (3.9)

ความยาวตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ต้องการในการติดตั้งภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ (ม.)

$$= \frac{\text{อัตราการเกิดของเสียในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/วัน)}}{\text{อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อความยาวไบโอคอร์ดต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน)}} \quad (3.10)$$

ทำการบรรจุน้ำจืดปริมาตร 200 ลิตร และติดตั้งตัวกรองชีวภาพตามความยาวที่คำนวณได้ลงในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยอาศัยการดัดตะแกรงเหล็กเป็นโครงคลุมสำหรับช่วยในการรักษาสภาพตัวกรองให้อยู่ในสภาวะแบบจมอยู่ในน้ำตลอดเวลาเพื่อกระตุ้นการสร้างชั้นฟิล์มชีวภาพและเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด [37] อีกทั้งยังสะดวกในการยกตัวกรองขึ้นมาล้างทำความสะอาดเมื่อเกิดการสะสมของตะกอนจุลชีพในปริมาณมากเกินไป [5] นอกจากนี้การติดตั้งตะแกรงเหล็กยังช่วยป้องกันการกระโดดของสัตว์น้ำระหว่างการทดลองโดยไม่มีความจำเป็นต้องใช้แผ่นพลาสติกปิดคลุมบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ ตะแกรงเหล็กที่ใช้ในการติดตั้งมีขนาดกว้างxยาว เท่ากับ 80x120 ตร.ซม. ดัดเป็นรูปตัวยู (U) ซึ่งมีความยาวจากปลายสองด้านเท่ากับ 40 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ก) จากนั้นพันตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อรอบตะแกรงเหล็กบริเวณปลายทั้งสองด้าน (ความสูงของตัวกรองจากปลายทั้งสองด้านประมาณ 25 ซม.) ติดตั้งเครื่องเติมอากาศแบบหัวฟู่โดยควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายให้มีค่ามากกว่า 4 มก.-ออกซิเจน/ล. เพื่อสร้างสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำและไนทริฟายอิงแบคทีเรีย และป้องกันการตกตะกอนซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดสภาวะไร้อากาศแบบแอนแอโรบิกบริเวณพื้นบ่อ สำหรับดีไนทริฟายเออร์สามารถทำงานภายใต้สภาวะแอนน็อกซิกภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพ นอกจากนี้ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียยังสามารถเจริญเติบโตได้ในบางบริเวณไม่มีการสัมผัสกับอากาศ เช่น บริเวณด้านในของตัวกรองที่พันติดอยู่กับตะแกรงเหล็ก และบริเวณด้านข้างทั้งสองฝั่งของตัวกรองที่แนบติดกับพื้นผิวของบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบของชุดทดลองที่มีการติดตั้งโครงตะแกรงเหล็กดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ข)

(ก) (ข)

รูปที่ 3.14 (ก) การพันตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดรอบโครงตะแกรงเหล็ก
และ (ข) การติดตั้งโครงตะแกรงเหล็กที่มีตัวกรองชีวภาพลงในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำสำหรับชุดทดลอง

- *การประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ*

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำผ่านกระบวนการร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด จะทำการเลี้ยงปลานิลด้วยระบบปิดภายใต้สภาวะจำลองของบ่อไร้ดินภายในโรงเรือนที่ความหนาแน่นเริ่มต้นและสิ้นสุดเท่ากับ 0.5 และ 2.0 กก./ลบ.ม. ของปริมาตรน้ำจืดในบ่อ ตามลำดับ (ทำการทดลอง 3 ซ้ำทั้งในชุดควบคุมและชุดทดลอง) ให้อาหารทุกวันด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปสำหรับปลากินพืชขนาดเล็กยี่ห้อซีพี สูตร 9932 ซึ่งมีปริมาณโปรตีนไม่น้อยกว่าร้อยละ 15 ปริมาณการให้อาหารคำนวณจากร้อยละ 3–5 ของน้ำหนักปลาทั้งหมดในบ่อต่อวัน ทั้งนี้ปริมาณอาหารจะปรับตามความสามารถในการกินอาหารเดินระบบการทดลองแบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 100 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดการทดลองยกเว้นการเติมน้ำจืดเพื่อชดเชยการระเหยของน้ำจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุม กับชุดทดลองซึ่งติดตั้งโครงตะแกรงเหล็กที่พันด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด และควบคุมสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบบำบัดร่วม ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนต่อไนโตรเจน วิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรอง และความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรอง จากการทดลองช่วงที่ 2.1 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ เก็บน้ำตัวอย่างภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำทุกวันเพื่อประเมินสมดุลอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบควบคู่กับการวัดพารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำ ทำการตรวจวัดค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำของชุดควบคุม สำหรับชุดทดลองจะทำการตรวจวัดค่าดังกล่าว 2 จุด นั่นคือภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ และภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพตามรายละเอียดของตัวแปรที่ทำการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.8 นอกจากนี้ทำการเก็บข้อมูลการเติบโตและอัตราการรอดตายของสัตว์น้ำด้วยการชั่งน้ำหนัก วัดความยาว และนับจำนวนปลานิลในบ่อก่อนและหลังการทดลองตามรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.8 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ	มีและไม่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

ตารางที่ 3.8 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ (ต่อ)

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ขนาดบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ	ปริมาตร 240 ลิตร
2. ระยะเวลาในการเดินระบบ	100 วัน
3. ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน	เมทานอล
4. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 2.1
5. วิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรอง	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 2.2
6. ความถี่ในการล้างทำความสะอาด	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 2.3
7. ชนิดของสัตว์น้ำ	ปลานิล
8. อาหารสัตว์น้ำ	อาหารเม็ดสำเร็จรูป
9. ความหนาแน่นเริ่มต้นของสัตว์น้ำ	0.5 กก./ลบ.ม. ของปริมาณน้ำจืดในถัง
10. ปริมาณการให้อาหารสัตว์น้ำ	ร้อยละ 3-5 ต่อวันของน้ำหนักปลาทั้งหมดในถัง
ตัวแปรตาม	**พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์**
1. ประสิทธิภาพการบำบัด (มก.ไนโตรเจน/ล./วัน)	พารามิเตอร์ทางคุณภาพ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต และสารอินทรีย์ไนโตรเจน
2. พารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำ	ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าความเป็นด่าง
3. ปริมาณอากาศในน้ำและตะกอนสะสมบนมัดเส้นใยของตัวกรอง	ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP)
4. ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน	ซีโอดี (วิเคราะห์เมื่อทำการเติมเมทานอลเข้าสู่ระบบ)
5. การเติบโต-รอดตายของสัตว์น้ำ	ชั่งน้ำหนัก วัดความยาว และนับจำนวนปลานิล

ตารางที่ 3.9 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

พารามิเตอร์	**วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์**	**จุดเก็บตัวอย่าง**	**ความถี่ในการวิเคราะห์**
1. พารามิเตอร์คุณภาพน้ำทางเคมี			
แอมโมเนีย (NH_4^+-N)	Salicylate – Hypochlorite method (ดัดแปลงจาก Bower และ Holm-Hansen, 1980) [52]	บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ	ทุกวัน
ไนไทรต์ (NO_2^--N)	Colorimetric and Spectrophotometric Method (ดัดแปลงจาก Strickland และ Parsons, 1972) [53]	บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ	ทุกวัน

ตารางที่ 3.9 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ (ต่อ)

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่าง	ความถี่ในการวิเคราะห์
ไนเทรต (NO_3^--N)	Ultraviolet Spectrophotometric Method [7]	บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ	ทุกวัน
2. พารามิเตอร์คุณภาพน้ำทางกายภาพ			
ออกซิเจนละลาย (DO)	DO Meter (HANNA, HI 9147)	บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ	ทุกวัน
พีเอช (pH)	pH Meter (HANNA, HI 9125)	บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ	ทุกวัน
อุณหภูมิ (Temperature)	Thermometer (HANNA, HI 9147)	บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ	ทุกวัน
ค่าโออาร์พี (ORP)	ORP Meter (HANNA, HI 213)	บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ	ทุกวัน
ความเป็นด่าง (Alkalinity)	Test kit (AQUA-VBC ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)	บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ	ทุกวัน
ซีโอดี (COD)	Closed Reflux [7]	บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ	ทุกสัปดาห์
ตะกอนแขวนลอย (TSS)	Total Suspended Solid Dried at 103-105°C [7]	บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ	ทุก 5 วัน
ไนโตรเจนทั้งหมด (TN)	Ultraviolet Spectrophotometric method (ดัดแปลงจาก Grassholf และคณะ, 1999) [54]	บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ	เริ่มต้น-สิ้นสุดการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.9 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ (ต่อ)

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่าง	ความถี่ในการวิเคราะห์
3. พารามิเตอร์ทางคุณภาพสัตว์น้ำ			
น้ำหนักปลา (Fish weight)	เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง	บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ	ทุกเดือน
ความยาวปลา (Fish length)	อุปกรณ์วัดความยาว	บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ	ทุกเดือน
อัตราการเติบโต (DWG)	เปรียบเทียบน้ำหนักปลากับระยะเวลาการเลี้ยง	บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ	ทุกเดือน
อัตราการรอดตาย (Survival rate)	เปรียบเทียบปริมาณปลาในวันเริ่มต้นและวันสุดท้าย	บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ	ทุกเดือน
อัตราการแลกเนื้อ (FCR)	เปรียบเทียบปริมาณอาหารที่ให้กับผลผลิตปลารวมทั้งหมด	บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ	ทุกเดือน

- *การประเมินประสิทธิภาพของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ*

การประเมินประสิทธิภาพของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำโดยการนับจำนวน ชั่งน้ำหนัก และวัดความยาว ดังแสดงในรูปที่ 3.15 (ก) และ (ข) ตามลำดับ เมื่อเริ่มต้นการทดลอง ระหว่างการทดลองทุกเดือน และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการคำนวณหาน้ำหนักและความยาวเฉลี่ยของสัตว์น้ำ อัตราการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำเฉลี่ยต่อวัน (Daily Weight Gain: DWG) อัตราการรอดตายของสัตว์น้ำ (Survival rate) และอัตราการแลกเนื้อของสัตว์น้ำ (Feed Conversion Ratio: FCR) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.11) ถึง (3.15) ดังนี้

น้ำหนักสัตว์น้ำเฉลี่ย (ก./ตัว)

$$= \frac{\text{น้ำหนักสัตว์น้ำทั้งหมด (ก./บ่อ)}}{\text{จำนวนสัตว์น้ำ (ตัว/บ่อ)}} \quad (3.11)$$

ความยาวสัตว์น้ำเฉลี่ย (ซม./ตัว)

$$= \frac{\text{ความยาวสัตว์น้ำทั้งหมด (ซม./บ่อ)}}{\text{จำนวนสัตว์น้ำ (ตัว/บ่อ)}} \quad (3.12)$$

อัตราการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำต่อวัน (ก./ตัว/วัน)

$$= \frac{\text{น้ำหนักสัตว์น้ำเฉลี่ยสิ้นสุด (ก./ตัว)} - \text{น้ำหนักสัตว์น้ำเฉลี่ยเริ่มต้น (ก./ตัว)}}{\text{จำนวนวันที่ทำการทดลอง (วัน)}} \quad (3.13)$$

อัตราการรอดตายของสัตว์น้ำ (ร้อยละ)

$$= \frac{\text{จำนวนสัตว์น้ำที่เหลือเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (ตัว/บ่อ)} \times 100}{\text{จำนวนสัตว์น้ำเมื่อเริ่มต้นการทดลอง (ตัว/บ่อ)}} \quad (3.14)$$

อัตราการแลกเนื้อ

$$= \frac{\text{น้ำหนักรวมของอาหารสัตว์น้ำที่ให้ในการทดลองทั้งหมด (ก.)}}{\text{น้ำหนักรวมของสัตว์น้ำที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด (ก.)}} \quad (3.15)$$

(ก)

(ข)

รูปที่ 3.15 (ก) การชั่งน้ำหนักสัตว์น้ำ และ (ข) การวัดความยาวสัตว์น้ำ
สำหรับประเมินประสิทธิภาพของระบบสัตว์น้ำ

- *การประเมินสมดุลไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ*

การประเมินสมดุลไนโตรเจนเป็นการประเมินปริมาณและสัดส่วนของสารประกอบไนโตรเจนทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนจากอาหารสัตว์น้ำ ภายในตัวสัตว์น้ำ (ปลานิล) และภายในน้ำจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำในวันแรกของการทดลองกับปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนภายในตัวสัตว์น้ำ ภายในน้ำ และตะกอนจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำในวันสุดท้ายของการทดลอง เพื่อประเมินประสิทธิภาพระหว่างชุดควบคุม และชุดทดลองที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

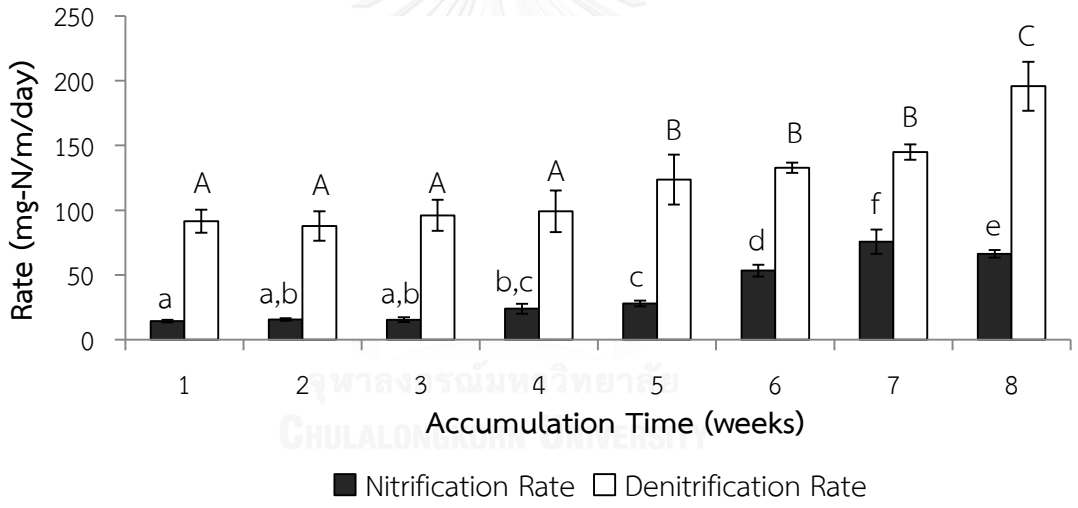
4.1 การศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดแบบจม

การทดลองช่วงนี้เป็นการศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดชนิดเส้นใยในสภาวะแบบจมอยู่ในน้ำ เพื่อให้ได้ข้อมูลอัตราการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตต่อหนึ่งหน่วยความยาวของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด (มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน) โดยผลการทดลองมีดังนี้

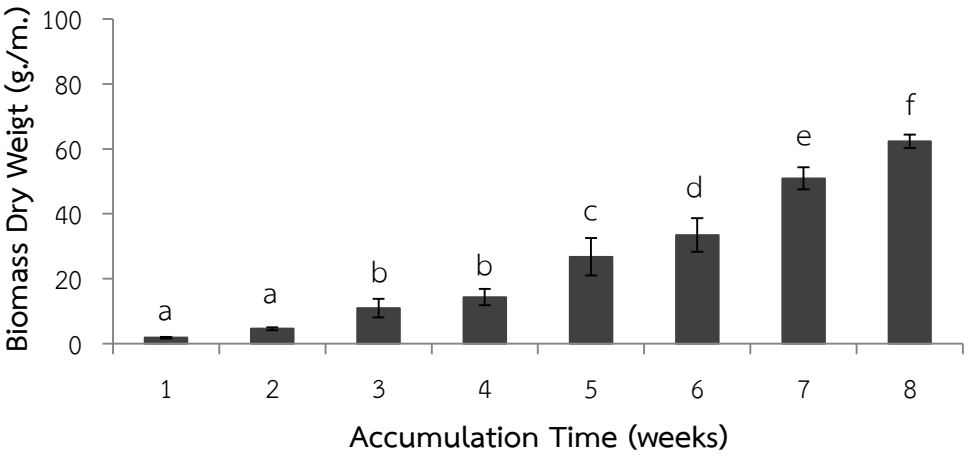
4.1.1 การประเมินอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดแบบจม

จากการประเมินประสิทธิภาพเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดระหว่างการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำทุกสัปดาห์ พบว่าเมื่อระยะเวลาในการปรับสภาพตัวกรองนานขึ้นส่งผลให้เกิดการเกาะติดของจุลชีพตามธรรมชาติมากขึ้นและทำให้อัตราการบำบัดสูงขึ้น โดยอัตราไนทริฟิเคชันเพิ่มขึ้นจากสัปดาห์ที่ 1 จนมีค่าสูงสุดในสัปดาห์ที่ 7 โดยมีค่าเท่ากับ 14.26±0.98 15.53±0.96 15.40±1.91 23.84±3.84 27.88±2.24 53.30±.61 และ 75.62±9.45 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน ตามลำดับ (รูปที่ 4.1) สอดคล้องกับผลการทดลองของ ธนทร ศรีสุข (2551) [38] เอกชัย มาลาพล (2551) [5] และ เพ็ญพิชญา พินิจธนภาคย์ (2556) [10] ซึ่งระบุว่าประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มเชื้อ โดยการบ่มเชื้อประมาณ 3–4 สัปดาห์ เพียงพอต่อการเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ จากนั้นอัตราไนทริฟิเคชันมีค่าค่อนข้างคงที่ในสัปดาห์ที่ 8 เท่ากับ 66.30±2.91 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน สามารถอธิบายได้ว่าระยะเวลาบ่มเชื้อที่ยาวนานเกินไปส่งผลให้ปริมาณตะกอนสะสมบนมัดเส้นใยมาก ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดสภาวะไร้อากาศและยับยั้งการเจริญเติบโตของไนทริฟายเออร์ [14] สำหรับการประเมินอัตราดีไนทริฟิเคชัน พบว่าสอดคล้องกับปริมาณตะกอนจุลชีพบนตัวกรองชีวภาพดังแสดงในรูปที่ 4.2 กล่าวคือการสะสมของตะกอนจุลชีพเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มเชื้อยาวนานขึ้น ส่งผลให้เกิดสภาวะกึ่งไร้อากาศหรือแอนน็อกซิกซึ่งเหมาะสมต่อการทำงานของดีไนทริฟายอิงแบคทีเรีย โดยอัตราดีไนทริฟิเคชันมีค่าเพิ่มขึ้นจากสัปดาห์ที่ 1 และสูงสุดในสัปดาห์ที่ 8 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 91.50±8.99 87.71±11.41 95.99±11.96 99.10±16.14 123.66±19.36 132.73±3.91 144.88±5.99 และ

195.93±18.82 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน ตามลำดับ และปริมาณตะกอนจุลชีพที่สะสมบนตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดมีค่าเพิ่มขึ้นจากสัปดาห์ที่ 1 และสูงสุดในสัปดาห์ที่ 8 เช่นเดียวกัน โดยมีค่าเท่ากับ 1.87±0.25 4.63±0.43 10.95±2.83 14.34±2.48 26.77±5.75 33.44±5.18 50.89 ±3.41 และ 62.35±2.08 กรัม/ม. ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราดีไนทริฟิเคชันมีค่าสูงกว่าอัตราไนทริฟิเคชันมาก เนื่องจากดีไนทริฟายเออร์เป็นแบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟที่อาศัยสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งพลังงานจึงมีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่าไนทริฟายเออร์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 7 สัปดาห์ ในการศึกษาอัตราไนทริฟิเคชัน ดีไนทริฟิเคชัน และในการทดลองช่วงที่ 2 และ 3 เนื่องจากเป็นช่วงเวลาการบ่มเชื้อที่มีอัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนียสูงสุด โดยมีอัตราไนทริฟิเคชัน 75.62±9.45 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน อัตราดีไนทริฟิเคชัน 144.88±5.99 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน และปริมาณตะกอนจุลชีพบนตัวกรองชีวภาพ 50.89±3.41 กรัม/ม.



รูปที่ 4.1 อัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพที่เวลาการบ่มเชื้อแต่ละสัปดาห์ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียและไนเทรตเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 10 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ โดยตัวอักษรที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)



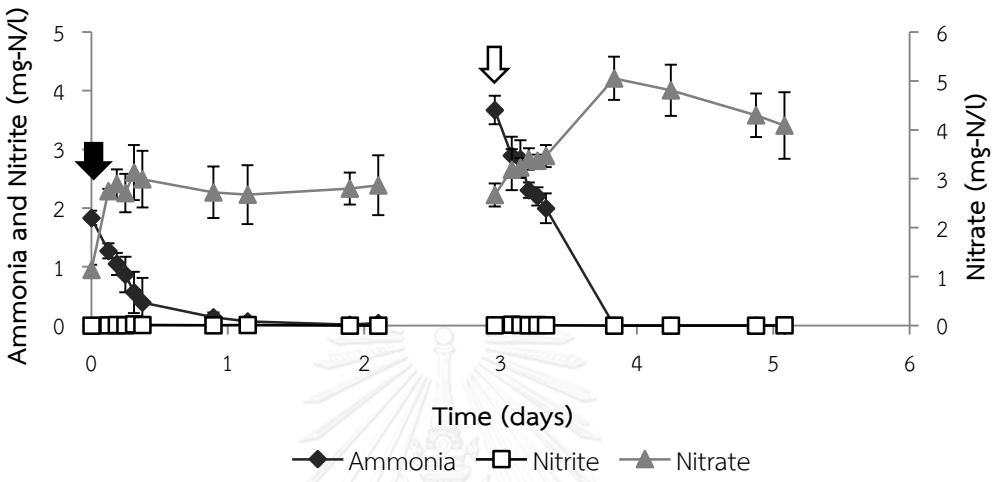
รูปที่ 4.2 ปริมาณจุลชีพและตะกอนชีวภาพที่สะสมบนมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำที่เวลาแต่ละสัปดาห์ โดยตัวอักษรที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

4.1.2 การศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

- *อัตราการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด*

การศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 7 สัปดาห์ พบว่าปริมาณแอมโมเนียภายในระบบลดลงอย่างต่อเนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นในวันแรกของการทดลองเท่ากับ 1.83±0.12 มก.-ไนโตรเจน/ล. จนมีค่าเท่ากับ 0.19± 0.10 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 0.38 ของการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยไม่มีการสะสมตัวของไนไทรต์ในระบบ และในส่วนของการวิเคราะห์ปริมาณไนเทรตพบว่าในวันแรกของการทดลองมีปริมาณไนเทรตเท่ากับ 1.13±0.11 มก.-ไนโตรเจน/ล. จะเห็นว่าไนเทรตเริ่มต้นมีค่าไม่เท่ากับ 0 มก.-ไนโตรเจน/ล. เนื่องจากอาจเกิดการสะสมของไนเทรตจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ จากนั้นปริมาณไนเทรตในระบบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องสอดคล้องกับการลดลงของแอมโมเนีย จนมีความเข้มข้นของไนเทรตสูงสุดในวันที่ 0.31 ของการทดลองเท่ากับ 3.13±0.56 มก.-ไนโตรเจน/ล. และเมื่อแอมโมเนียหมดลงส่งผลให้ปริมาณไนเทรตมีค่าค่อนข้างคงที่ไม่เกิน 2.99±0.58 มก.-ไนโตรเจน/ล. สำหรับการทดลองรอบที่ 2 พบว่าแอมโมเนียในระบบมีการลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นเดิมจากวันที่ 2.96 ของการทดลอง จนมีค่าต่ำสุดในวันที่ 3.83 ของการทดลอง เท่ากับ 3.67±0.24 และ 0 มก.-ไนโตรเจน/ล. และไนเทรตมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.67±0.24 มก.-ไนโตรเจน/ล. จนมีค่าเท่ากับ 5.05±0.44 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ หลังจากนั้นปริมาณไน

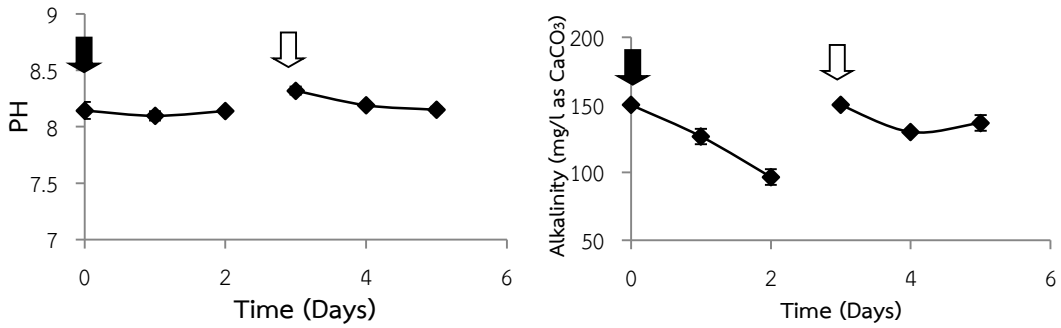
เทรตในระบบมีค่าลดลงในวันที่ 4.25 จนถึงวันสุดท้ายของการทดลอง โดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 4.09±0.68 มก.-ไนโตรเจน/ล. สามารถอธิบายได้ว่าไนเทรตที่เกิดจากกระบวนการไนทริฟิเคชันเป็นสารตั้งต้นในการเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันโดยดีไนทริฟายเออร์ซึ่งอาศัยสารอินทรีย์จากตะกอนภายในระบบเป็นแหล่งคาร์บอนภายใต้สภาวะแอนน็อกซิกในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพ



รูปที่ 4.3 ปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ระหว่างการศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 7 สัปดาห์ โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

- *การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำในการศึกษาอัตราไนทริฟิเคชัน*

ผลการตรวจวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ พบว่าค่าพีเอชและความเป็นด่างอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของไนทริฟายอิงแบคทีเรียดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 8.10±0.04 ถึง 8.32±0.04 และสภาพความเป็นด่างของระบบมีค่าอยู่ในช่วง 96.67±5.77 ถึง 150.00±0.00 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. สอดคล้องกับรายงานของ Hart และ O'sullivan (1993) [8] ที่ระบุว่าสภาพความเป็นด่างที่เหมาะสมต่อการทำงานของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันควรมีค่ามากกว่า 100 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. นอกจากนี้จากการทดลองพบว่าค่าความเป็นด่างของระบบลดลง เนื่องจากมีการปลดปล่อยไฮโดรเจนอิออนระหว่างกระบวนการออกซิไดซ์แอมโมเนีย ดังนั้นระบบจึงมีความต้องการค่าสภาพความเป็นด่างอย่างเพียงพอ [25]



รูปที่ 4.4 ค่าพีเอช และความเป็นด่าง ระหว่างการศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

ในส่วนของปริมาณออกซิเจนละลาย อุณหภูมิ และค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยปริมาณออกซิเจนละลายมีค่าคงที่เฉลี่ยเท่ากับ 7.71±0.69 มก.-ออกซิเจน/ล. และอุณหภูมิระหว่างทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 25.60±0.27 °ซ ซึ่งใกล้เคียงกับรายงานของ Hagopian และ Riley (1998) [6] ที่ระบุว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับไนทริฟายอิงแบคทีเรียมีค่าเท่ากับ 25 °ซ โดยอุณหภูมิมีผลต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของไนโตรแบคเทอร์มากกว่าไนโตรโซโมนัส สำหรับค่าโออาร์พีภายในถังปฏิกรณ์มีค่าเป็นบวกเฉลี่ย 179.13 ± 5.44 มิลลิโวลต์ สอดคล้องกับรายงานของธงชัย พรรณสวัสดิ์ (2554) [25] ที่ระบุว่าค่าโออาร์พีที่เหมาะสมสำหรับการเกิดกระบวนการออกซิไดซ์แอมโมเนียควรมีค่ามากกว่า +100 มิลลิโวลต์ สำหรับการวัดค่าโออาร์พีภายในมัดเส้นใยของไบโอคอร์ดด้วยการใช้หัวโพรบเสียบเข้าไปบริเวณที่มีการสะสมตัวของตะกอนจุลชีพ พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 63.38±8.78 มิลลิโวลต์ จะเห็นได้ว่าค่าโออาร์พีภายในมัดเส้นใยมีค่าเป็นบวกต่ำกว่าค่าที่วัดได้ในถังปฏิกรณ์ ทั้งนี้จากทฤษฎีรายงานว่าค่าโออาร์พีสำหรับกระบวนการแอนน็อกซิกมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง -200 หรือ 0 ถึง -300 มิลลิโวลต์ [11, 13] สำหรับสมมติฐานคาดว่าเนื่องจากด้านในของตัวกรองชีวภาพเป็นบริเวณที่มีปริมาณออกซิเจนละลายต่ำ และสามารถเกิดการรีดิวซ์ไนเทรตภายใต้สภาวะแอนน็อกซิกได้ อย่างไรก็ตามผลการตรวจวัดค่าโออาร์พีในบริเวณดังกล่าวมีค่าเป็นบวกอาจมีสาเหตุได้หลายประการ นั่นคือภายในถังปฏิกรณ์มีปริมาณออกซิเจนละลายสูงจึงส่งผลให้เกิดการแทรกตัวของออกซิเจนผ่านช่องว่างระหว่างมัดเส้นใย [10] ประกอบกับข้อจำกัดเรื่องขนาดของหัวโพรบโออาร์พีที่มีขนาดใหญ่ทำให้การตรวจวัดค่าโออาร์พีเพื่อให้ได้ค่าที่แน่นอนสามารถทำได้ยาก

ตารางที่ 4. 1 คุณภาพน้ำระหว่างการศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 7 สัปดาห์

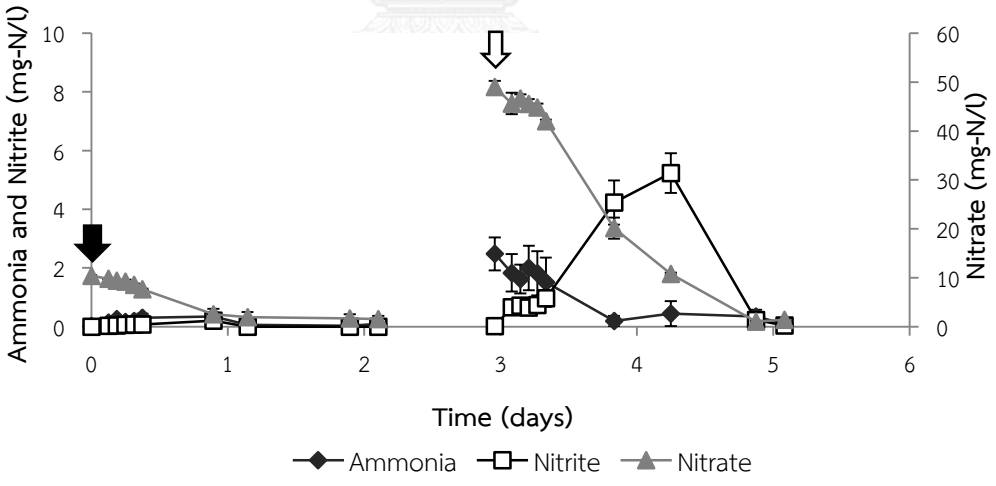
พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด–ค่าสูงสุด)
ออกซิเจนละลายน้ำ	7.71±0.69
(มก.-ออกซิเจน/ล.)	(6.70–8.50)
อุณหภูมิ	25.60±0.27
(°ซ)	(25.20–25.90)
ค่าโออาร์พีภายในถังปฏิกรณ์	179.14±5.45
(มิลลิโวลต์)	(173.77–187.90)
ค่าโออาร์พีภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพ	63.39±8.78
(มิลลิโวลต์)	(48.70–75.47)

4.1.3 การศึกษาอัตราดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

- *อัตราการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด*

การประเมินประสิทธิภาพอัตราดีไนทริฟิเคชัน พบว่าปริมาณไนเทรตลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10.37±0.15 มก.-ไนโตรเจน/ล. จนมีค่าเท่ากับ 2.53±0.08 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 0.90 ของการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยการลดลงของไนเทรตเกิดจากการเปลี่ยนสารประกอบไนเทรตให้อยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนโดยแบคทีเรียกลุ่มแฟคัลเททีฟที่มีการใช้สารอินทรีย์จากตะกอนชีวภาพและเมทานอลที่เติมเข้าสู่ระบบในสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 [11] สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียในระบบ พบว่าเกิดการสะสมตัวของแอมโมเนียเล็กน้อยเท่ากับ 0.30±0.14 และ 0.35±0.26 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 0.38 และ 0.90 ของการทดลอง ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการสร้างและสะสมตัวของแอมโมเนียที่เกินความจำเป็นจากกระบวนการเปลี่ยนไนเทรตเป็นแอมโมเนีย (Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonia; DNRA) [34] อย่างไรก็ตามในวันที่ 2.10 ของการทดลอง พบว่าแอมโมเนียสะสมถูกบำบัดผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันจนมีค่าเท่ากับ 0.10±0.07 มก.-ไนโตรเจน/ล. และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไนเทรตเริ่มต้น พบว่าไนเทรตมีการลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นเดิมจากวันที่ 2.96 ของการทดลองจนมีค่าต่ำสุดในวันที่ 4.88 ของการทดลอง เท่ากับ 49.03±1.24 และ 1.05±0.20 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ โดยในวันแรกของการทดลองมีแอมโมเนียในระดับความเข้มข้นสูงนั่นคือเท่ากับ

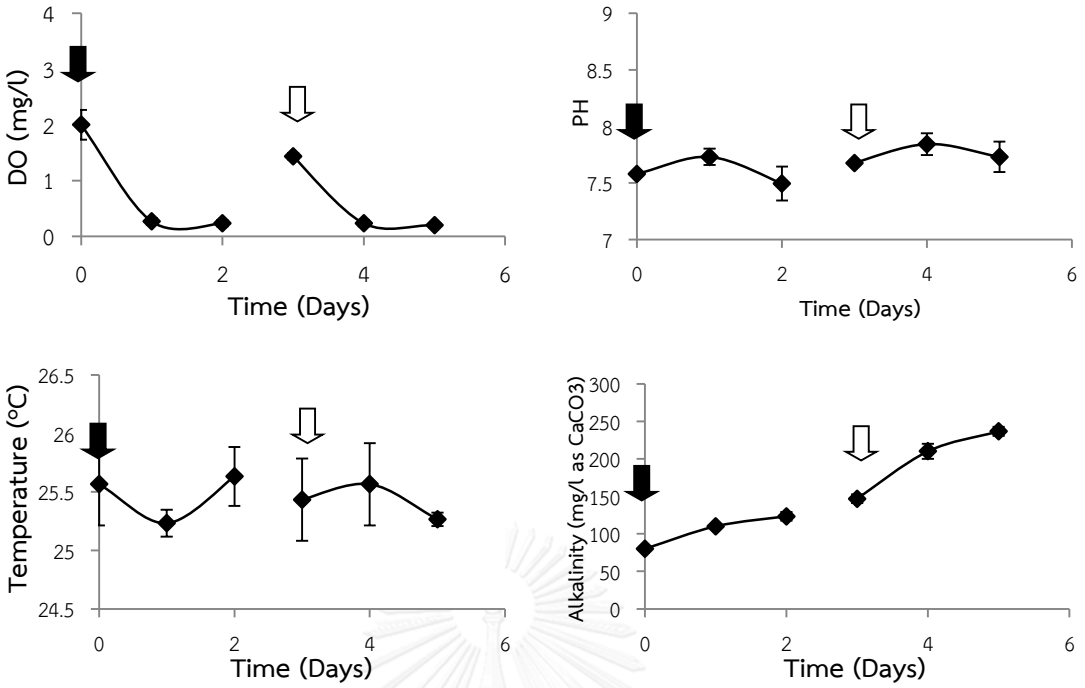
2.48±0.56 มก.-ไนโตรเจน/ล. ซึ่งมีสาเหตุมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจนจากตะกอนชีวภาพให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมอิออนผ่านกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน [27] ต่อมาเกิดการสะสมของแอมโมเนียในวันที่ 3.08 ถึง 3.33 ของการทดลอง หลังจากนั้นปริมาณแอมโมเนียในระบบลดลงจนมีค่าต่ำกว่า 0.45±0.42 มก.-ไนโตรเจน/ล. และจากการวิเคราะห์ปริมาณไนไทรต์พบว่าในวันที่ 3.83 และ 4.25 ของการทดลอง มีการสะสมของไนไทรต์ในระบบสูงถึง 4.23±0.75 และ 5.23±0.68 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ โดยในวันดังกล่าวตรวจพบการลดลงของไนเทรตอย่างรวดเร็วส่งผลให้การเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซไนโตรเจนเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ยังมีรายงานระบุว่าการสะสมตัวของไนไทรต์เกิดจากการขาดแหล่งคาร์บอนสำหรับดีไนทริฟายเออร์ [34] และสำหรับระบบที่มีสารอินทรีย์คาร์บอนเพียงพอ การสะสมตัวของไนไทรต์มีสาเหตุมาจากระยะเวลากักเก็บหรือระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไม่เพียงพอ อย่างไรก็ตามในช่วงวันที่ 4.88 และ 5.08 ของการทดลอง ปริมาณไนไทรต์ในระบบมีค่าลดลงเท่ากับ 0.23±0.04 และ 0.05±0.02 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งถือว่าในที่สุดไนไทรต์ในระบบถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ในช่วงวันสุดท้ายของการทดลอง พบการเกิดกลิ่นเหม็นขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งมีสาเหตุมาจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดจากการใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในกระบวนการซัลเฟตรีดักชันภายใต้สภาวะไร้อากาศหรือแอนน็อกซิก [10]



รูปที่ 4.5 ปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ระหว่างการศึกษาอัตราดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 7 สัปดาห์ โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมโซเดียมไนเทรตความเข้มข้น 10 และ 50 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

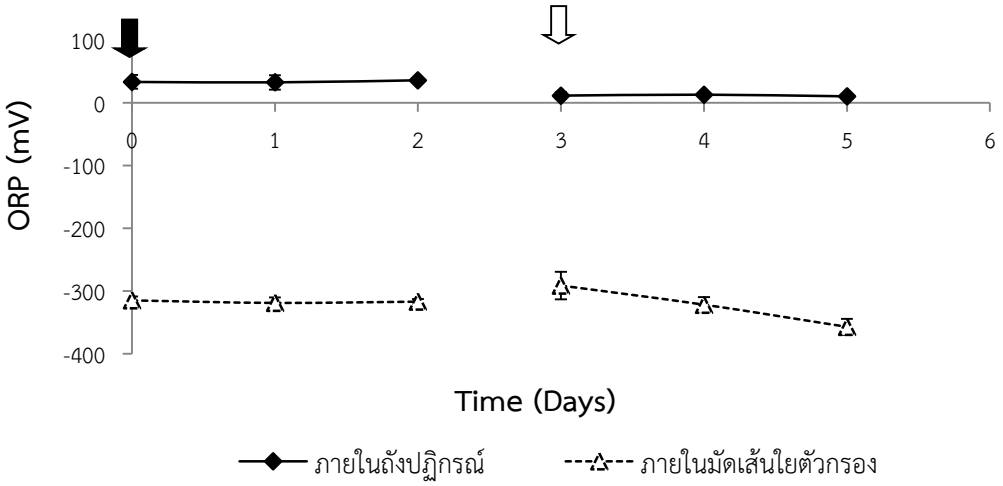
- *การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำในการศึกษาอัตราดีไนทริฟิเคชัน*

ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำสามารถแสดงดังรูปที่ 4.6 โดยในวันที่ 0 และ 3 ของการทดลอง ซึ่งเป็นวันแรกของการเติมสารละลายโซเดียมไนเทรตเข้าสู่ระบบพบว่า ปริมาณออกซิเจนละลายมีค่าเท่ากับ 2.00±0.26 และ 1.43±0.06 มก.-ออกซิเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ระบบบำบัดไนเทรตควรควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายให้มีค่าไม่เกิน 0.2 มก.-ออกซิเจน/ล. เนื่องจากออกซิเจนเป็นตัวรับอิเลคตรอนที่ให้พลังงานสูงกว่าไนเทรต หากในระบบมีปริมาณออกซิเจนสูงเกินไป จุลชีพจะเลือกใช้ออกซิเจนในกระบวนการย่อยสลายก่อน ทำให้สารอินทรีย์คาร์บอนในระบบเหลือไม่เพียงพอต่อกระบวนการรีดิวซ์ไนเทรต ส่งผลให้เกิดกระบวนการบำบัดดีไนทริฟิเคชันแบบไม่สมบูรณ์ [11] ทั้งนี้ปริมาณออกซิเจนละลายสูงมีสาเหตุมาจากการเตรียมสารละลายโซเดียมไนเทรตจากการใช้น้ำประปา ซึ่งปกตินำ้ประปาจะมีปริมาณออกซิเจนละลายประมาณ 5-7 มก.-ออกซิเจน/ล. นอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจากการเปิด-ปิดฝาถังปฏิกรณ์เป็นระยะในช่วงเวลาดังกล่าวเพื่อเติมสารละลาย ส่งผลให้เกิดการแพร่ของออกซิเจนจากอากาศเข้าสู่ระบบ อย่างไรก็ตามในวันต่อมาพบว่าปริมาณออกซิเจนละลายในระบบลดลงเนื่องมาจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบ จนมีค่าเหมาะสมต่อการทำงานของดีไนทริฟายเออร์อยู่ในช่วง 0.20±0.00 ถึง 0.27±0.06 มก.-ออกซิเจน/ล. สำหรับการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่างพบว่ามีค่าคงที่อยู่ในช่วง 7.49±0.15 ถึง 7.84±0.10 สอดคล้องกับผลการทดลองของ ธงชัย พรรณสวัสดิ์ (2544) [25] ที่ระบุว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียมีค่าอยู่ในช่วง 6.5–8.5 อย่างไรก็ตามกระบวนการดีไนทริฟิเคชันสามารถผลิตสภาพความเป็นด่างให้กับระบบได้ส่งผลให้ค่าพีเอชมีความเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก การตรวจวัดอุณหภูมิมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 25.45±0.17 °ซ สอดคล้องกับรายงานของ Rivett และคณะ (2008) [55] ที่ระบุว่าแบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟายเออร์สามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงอุณหภูมิประมาณ 25–35°ซ แต่กระบวนการรีดิวซ์ไนเทรตสามารถเกิดได้ในช่วงอุณหภูมิ 2–50°ซ และในส่วนของการตรวจวัดสภาพความเป็นด่าง พบว่าวันแรกของการทดลองระบบมีค่าความเป็นด่างเท่ากับ 80.00±0.00 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. และเมื่อปล่อยให้เกิดกระบวนการบำบัด พบว่าดีไนทริฟายเออร์สามารถปล่อยคาร์บอเนตออกมาเพิ่มความเป็นด่างให้กับระบบโดยมีค่าสูงสุดในวันที่ 5 ของการทดลองเท่ากับ 236.67±5.77 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.



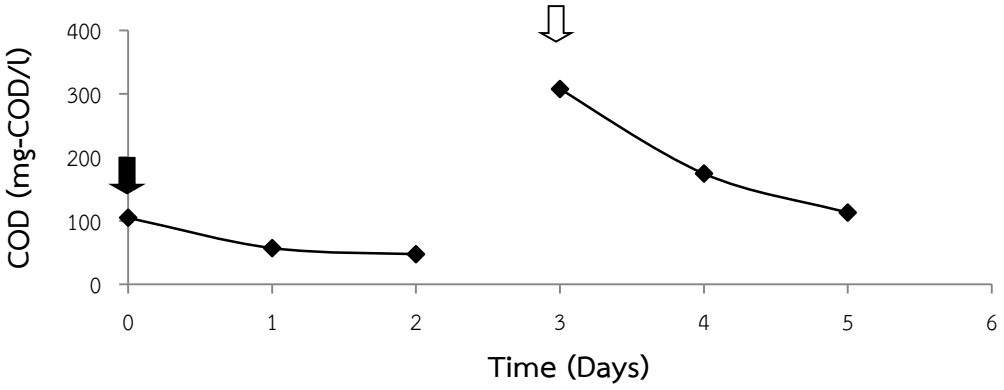
รูปที่ 4.6 ค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และความเป็นด่าง ระหว่างการศึกษาอัตราดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมโซเดียมไนเทรตความเข้มข้น 10 และ 50 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

การตรวจวัดค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันระหว่างการทดลอง พบว่าค่าโออาร์พีภายในถังปฏิกรณ์มีค่าคงที่เฉลี่ย 33.85±1.74 และ 11.53±1.31 มิลลิโวลต์ สำหรับการทดลองรอบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าค่าโออาร์พีภายในถังปฏิกรณ์มีค่าเป็นบวกซึ่งเกิดจากการแพร่ผ่านของออกซิเจนจากอากาศสู่ผิวน้ำในระหว่างการเปิด-ปิดฝาถังปฏิกรณ์ สำหรับค่าโออาร์พีภายในมัดเส้นใยของไบโอคอร์ด พบว่ามีค่าค่อนข้างคงที่เฉลี่ยเท่ากับ -320.10±21.15 มิลลิโวลต์ ซึ่งต่ำกว่ารายงานของธงชัย พรรรณสวัสดิ์ (2544) [25] และ ชลธิชา พลายชุม (2553) [11] ที่ระบุว่าค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันที่เหมาะสมสำหรับการเกิดกระบวนดีไนทริฟิเคชันควรมีค่าอยู่ในช่วง -50 ถึง -100 มิลลิโวลต์ หรือ -200 ถึง -300 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ โดยสาเหตุที่ตรวจพบค่าโออาร์พีภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพมีค่าต่ำกว่า -300 มิลลิโวลต์ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่ออกซิเจนไม่สามารถแพร่เข้าไปถึง ประกอบกับมีปริมาณตะกอนซึ่งเป็นสารอินทรีย์สะสมเป็นจำนวนมาก อาจก่อให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศหรือแอนแอโรบิกได้



รูปที่ 4.7 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ระหว่างการศึกษาอัตราไนทริฟิเคชัน ของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมโซเดียมไนเทรต ความเข้มข้น 10 และ 50 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

รูปที่ 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีระหว่างการทดลองศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด พบว่าวันที่ 0 ของการทดลอง มีปริมาณซีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 104.76±0.00 มก.-ซีโอดี/ล. ซึ่งเป็นซีโอดีที่เกิดจากตะกอนและสลัดจ์สะสมบนตัวกรองชีวภาพรวมถึงเมทานอลที่เติมเข้าสู่ระบบ จากนั้นพบว่าซีโอดีมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากถูกย่อยสลายผ่านกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยอาศัยการทำงานของจุลชีพภายในระบบและใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในช่วงแรกของการทดลอง หรือเรียกว่ากระบวนการกำจัดออกซิเจน (Deoxygeneration) และเมื่อปริมาณออกซิเจนละลายหมดลง ซีโอดีภายในระบบจะถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับแบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟายเออร์ในการรีดิวซ์ไนเทรตผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชันโดยมีปริมาณซีโอดีคงเหลือเท่ากับ 47.62±0.00 มก.-ซีโอดี/ล. และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไนเทรตและเมทานอลเริ่มต้นในการทดลองรอบที่ 2 พบว่าปริมาณซีโอดีมีค่าลดลงเช่นเดิม โดยคงเหลือเท่ากับ 307.69±0.00 และ 112.82±47.00 มก.-ซีโอดี/ล. ในวันที่ 3 และ 5 ของการทดลอง ตามลำดับ ทั้งนี้จะเห็นว่าการทดลองทั้งสองรอบมีปริมาณซีโอดีคงเหลือในวันสุดท้ายปริมาณหนึ่ง ซึ่งเป็นผลมาจากการเติมเมทานอลเข้าสู่ระบบในสัดส่วนที่มากเกินไป โดยเมทานอลคงเหลือดังกล่าวซึ่งเป็นสารอินทรีย์อาจก่อให้เกิดการย่อยสลายโดยจุลชีพกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟ เป็นผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลงจนระบบเข้าสู่สภาวะไร้อากาศ และเกิดการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟล์ซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ [10, 11]



รูปที่ 4.8 ปริมาณซีโอดี ระหว่างการศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมโซเดียมไนเทรตความเข้มข้น 10 และ 50 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไนโตรเจนด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

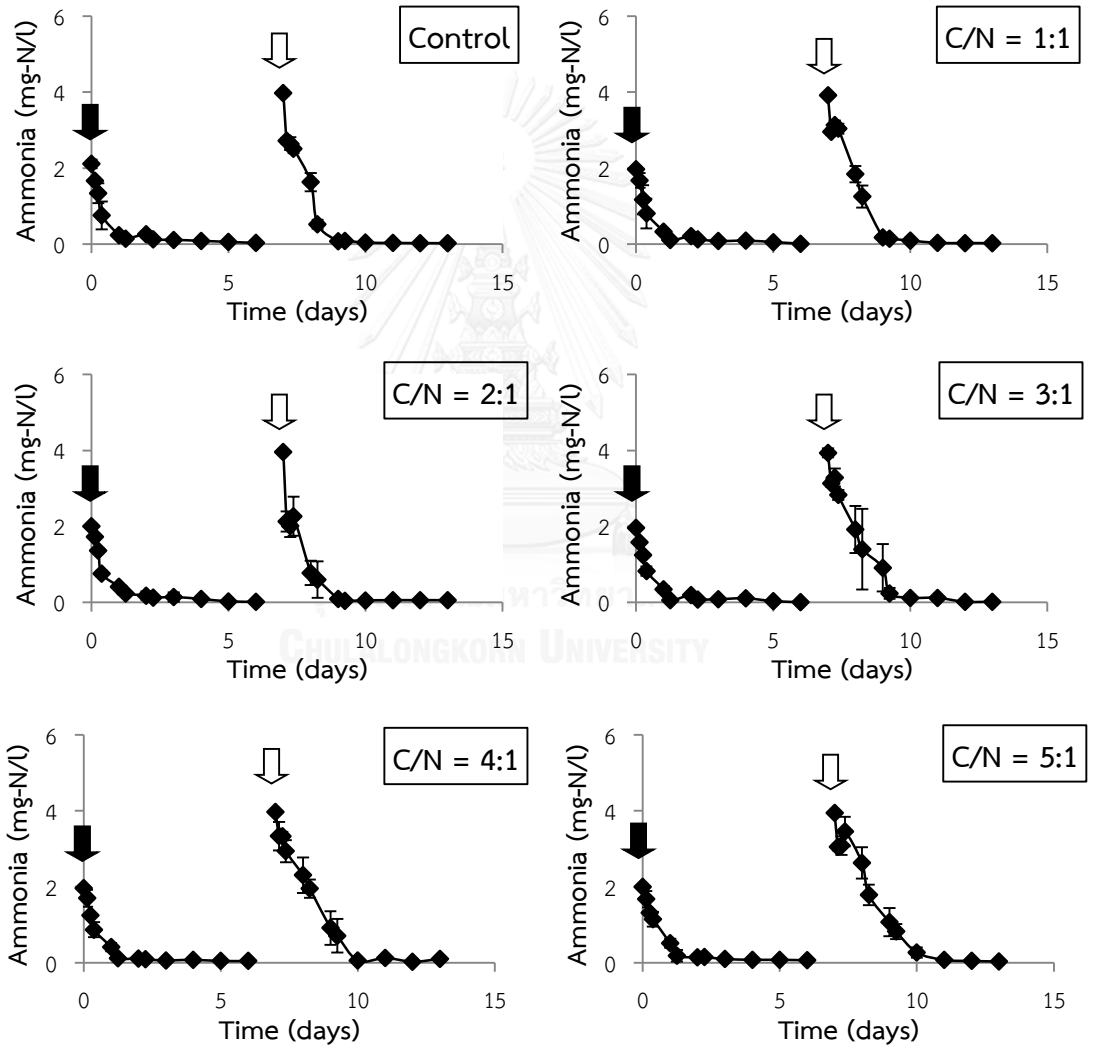
การทดลองช่วงนี้เป็นการหาข้อมูลสภาวะการเดินระบบบำบัดสารประกอบไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วมอย่างสมดุลและมีประสิทธิภาพภายในถังปฏิกรณ์เดียว โดยแบ่งผลการดำเนินงานออกเป็น 3 ส่วน นั่นคือการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน การศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ และการศึกษาความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ

- *อัตราการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดเมื่อแปรค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน*

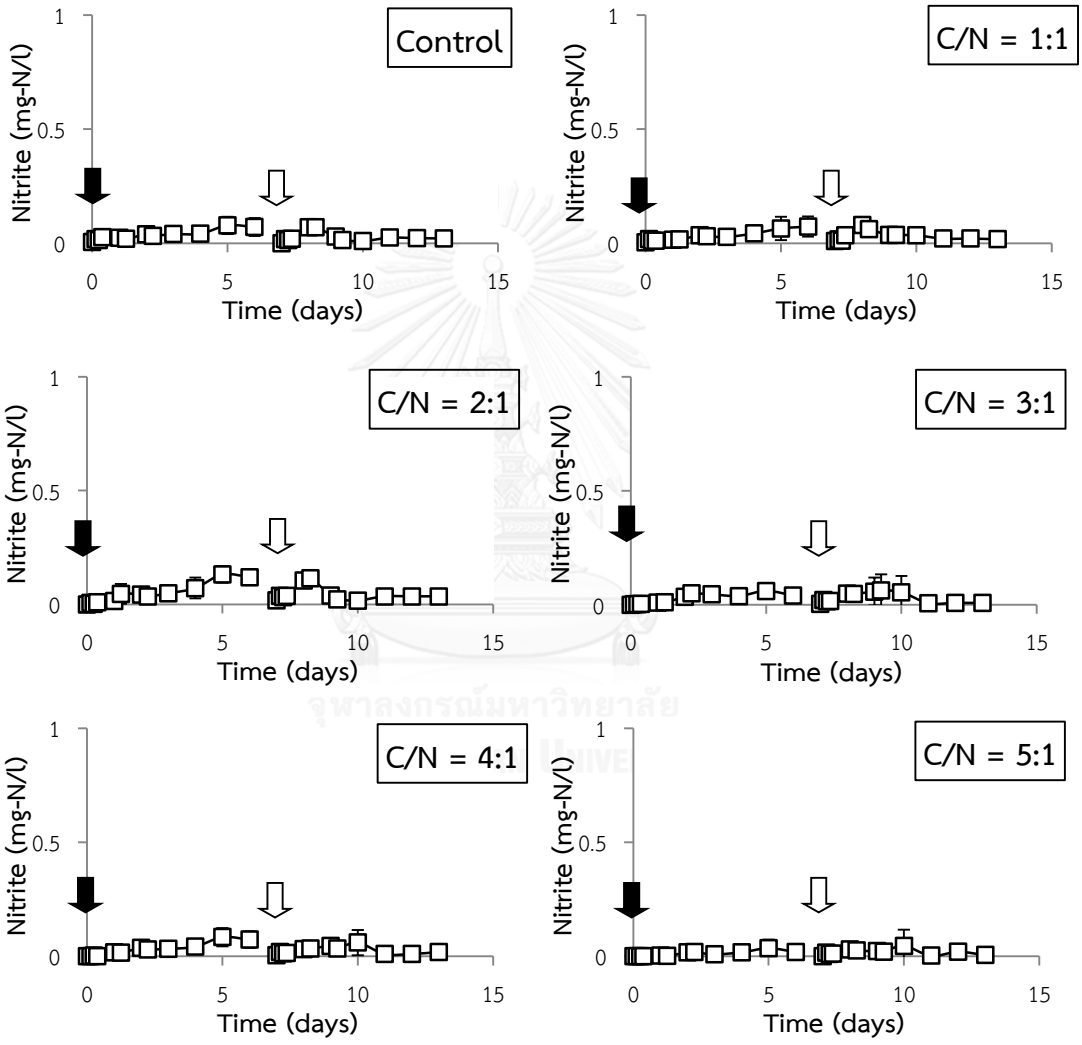
จากการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน พบว่าทุกชุดการทดลองสามารถบำบัดแอมโมเนียผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยในการทดลองรอบแรก ชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมคาร์บอนสามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียได้เร็วที่สุด โดยลดจากความเข้มข้นเริ่มต้นจนมีค่าเท่ากับ 0.23±0.06 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 1 ของการทดลอง สำหรับชุดทดลองที่มีการแปรค่าการเติมเมทานอลเข้าสู่ระบบในสัดส่วนเท่ากับ 1:1 2:1 3:1 และ 4:1 มีปริมาณแอมโมเนียคงเหลือค่อนข้างใกล้เคียงกันเท่ากับ 0.33±0.05 0.41±0.03 0.38±0.08 และ

0.40±0.10 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่เติมเมทานอลในสัดส่วน 5:1 พบว่ามีปริมาณแอมโมเนียคงเหลือมากที่สุดเท่ากับ 0.51±0.11 มก.-ไนโตรเจน/ล. และเมื่อทำการทดลองรอบที่ 2 โดยเพิ่มความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 7 ของการทดลอง พบว่าชุดควบคุมและชุดการทดลองที่แปรค่าสัดส่วนการเติมเมทานอลเท่ากับ 1:1 และ 2:1 มีปริมาณแอมโมเนียคงเหลือในวันที่ 9 ของการทดลอง ใกล้เคียงกันเท่ากับ 0.07±0.02 0.17±0.04 และ 0.09±0.06 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลองที่แปรค่าสัดส่วนเท่ากับ 3:1 4:1 และ 5:1 มีความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เหลือเท่ากับ 0.91±0.62 0.91±0.44 และ



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ระหว่างการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

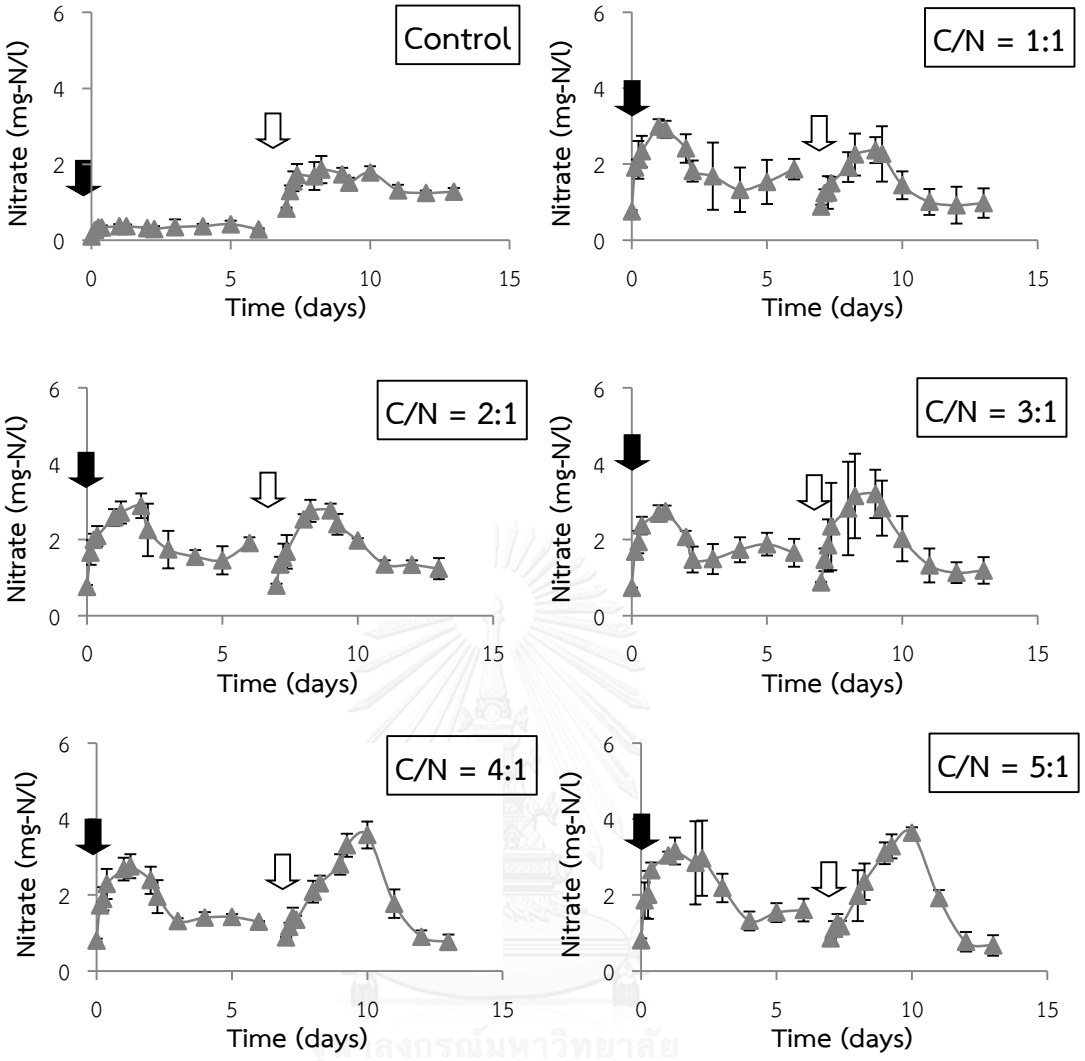
1.06±0.37 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ทั้งนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมเมทานอลเข้าสู่ระบบส่งผลกระตุ้นการเจริญเติบโตของดีไนทริฟายเออร์ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในกระบวนการรีดิวซ์ไนเทรต ส่งผลให้แบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟเจริญเติบโตได้ดีกว่าไนทริฟายเออร์ และเกิดการแย่งอาหาร ออกซิเจน และที่ว่างในกระบวนการสร้างไบโอฟิล์ม [31, 56] ทำให้อัตราการบำบัดแอมโมเนียในชุดทดลองที่มีการเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน มีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมซึ่งไม่มีการเติมเมทานอล



รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไทรต์ ระหว่างการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไทรต์ พบว่าทุกชุดการทดลองสามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันและรีดิวซ์ไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อได้อย่างสมบูรณ์ โดยไม่มีการสะสมตัวของไนไทรต์ในระบบดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งปริมาณไนไทรต์ในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 2:1 3:1 4:1 และ 5:1 มีค่าสูงสุดเพียง 0.07±0.03 0.07±0.04 0.13±0.03 0.06±0.07 0.08±0.04 และ 0.01±0.00 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานของ มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา (2538) [12] ที่ระบุว่าไนไทรต์ที่ตรวจพบจะมีปริมาณไม่สูงมากนักเนื่องจากเป็นรูปของไนโตรเจนที่ไม่คงตัวจึงเกิดการออกซิไดซ์ต่อจนอยู่ในรูปของไนเทรตได้

รูปที่ 4.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเทรตระหว่างการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไนเทรตที่เกิดขึ้นจากการออกซิไดซ์แอมโมเนียในชุดควบคุมสำหรับการทดลองรอบแรกมีความเข้มข้น 0.42±0.09 มก.-ไนโตรเจน/ล. ซึ่งแตกต่างจากชุดการทดลองอื่นที่มีการเพิ่มขึ้นแล้วลดลงของไนเทรตผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชันอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าการที่ความเข้มข้นของไนเทรตในชุดควบคุมมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แสดงว่ามีกระบวนการรีดิวซ์ไนเทรตเกิดขึ้น แต่เนื่องจากในชุดควบคุมไม่มีการเติมเมทานอล กระบวนการดีไนทริฟิเคชันจึงเกิดขึ้นได้โดยอาศัยสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบเป็นแหล่งคาร์บอนเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้กระบวนการเกิดขึ้นได้ช้า และเห็นการลดลงของไนเทรตไม่ชัดเจน สำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเทรตในชุดทดลองพบว่า ไนเทรตมีค่าเพิ่มขึ้นคล้ายคลึงกันในทุกสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน โดยปริมาณไนเทรตที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากกระบวนการไนทริฟิเคชัน โดยมีความเข้มข้นของไนเทรตสูงสุดสำหรับแต่ละชุดการทดลองที่มีการแปรค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 1:1 2:1 3:1 4:1 และ 5:1 เท่ากับ 2.99±0.18 2.89±0.32 2.74±0.14 2.75±0.31 และ 3.15±0.35 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากนั้นเมื่อแอมโมเนียในระบบเหลือน้อยลงหรือเริ่มหมดปริมาณไนเทรตจะมีค่าคงที่และเริ่มลดลงจากการเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน โดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.32±0.58 1.45±0.37 1.47±0.34 1.29±0.02 และ 1.31±0.24 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ และเมื่อทำการทดลองรอบที่ 2 โดยเพิ่มความเข้มข้นการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์เป็น 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับรอบแรก นั่นคือชุดควบคุมมีปริมาณไนเทรตเพิ่มขึ้นจากกระบวนการไนทริฟิเคชัน โดยมีค่าสูงสุดเพียง 1.86±0.36 มก.-ไนโตรเจน/ล. จากนั้นปริมาณไนเทรตในระบบค่อนข้างคงทีเช่นเดิม อย่างไรก็ตามปริมาณไนเทรตที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าการทดลองรอบแรก เป็นผลมาจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ที่เติมเข้าสู่ระบบเป็น 2 เท่า ส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเทรตในชุดทดลองที่มีการแปรค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 ถึง 5:1 มีการเพิ่มขึ้นของไนเทรตในช่วงวันที่ 7-10 ของการทดลอง โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.37±0.34 2.77±0.18 3.20±0.64



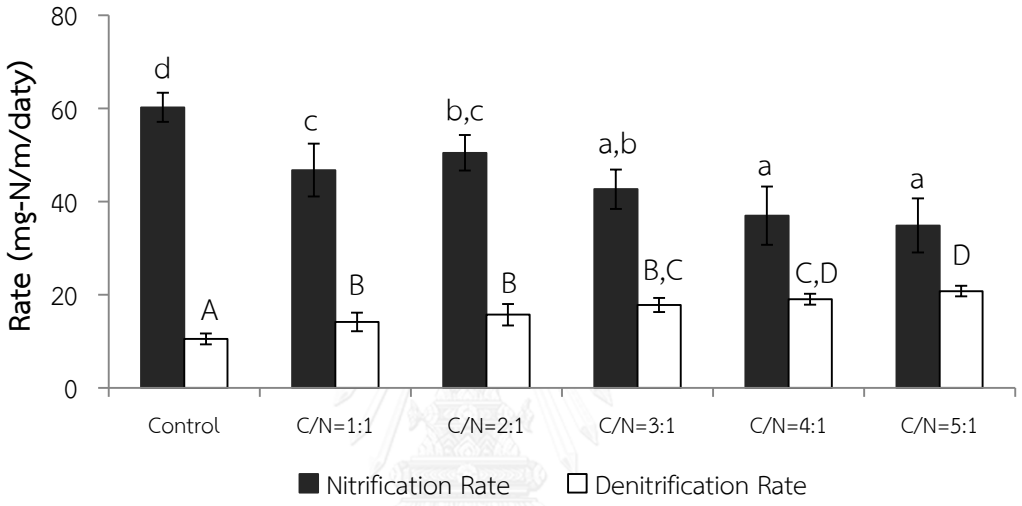
รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเทรต ระหว่างการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบโดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

3.58±0.35 และ 3.64±0.14 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากนั้นไนเทรตที่เกิดขึ้นจะถูกรีดิวซ์ต่อจนอยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจน และระเหยออกจากระบบ โดยมีปริมาณไนเทรตคงเหลือในวันสุดท้ายเท่ากับ 0.97±0.39 1.24±0.28 1.19±0.35 0.77±0.19 และ 0.67±0.27 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ทั้งนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมเมทานอลช่วยกระตุ้นการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟซึ่งมีบทบาทสำคัญในกระบวนการดีไนทริฟิชัน ส่งผลให้อัตราการรีดิวซ์ไนเทรตสูงขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนการเติมเมทานอลเข้าสู่ระบบ โดยรายงานของ Van Rjin และคณะ (2006) [34]

ระบุว่าควรควบคุมสัดส่วนซีโอดีต่อไนเทรตให้มีค่าอยู่ในช่วง 3.0–6.0 เพื่อให้ไนเทรตสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์

เมื่อนำอัตราการลดลงของแอมโมเนียและไนเทรตมาคำนวณอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดตามสมการที่ (3.1) ถึง (3.8) พบว่าได้ผลดังรูปที่ 4.12 โดยอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพมีค่าสูงสุดในชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมเมทานอล เท่ากับ 60.19±3.12 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน และมีค่าลดลงในชุดทดลองที่มีการแปรค่าสัดส่วนการเติมเมทานอลเข้าสู่ระบบ โดยมีค่าใกล้เคียงกันที่สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 2:1 และ 3:1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 46.71±5.66 50.43±3.82 และ 42.62±4.23 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน ตามลำดับ และมีค่าต่ำสุดในชุดทดลองที่เติมเมทานอลในสัดส่วน 4:1 และ 5:1 เท่ากับ 36.96±6.25 และ 34.85±5.81 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน ตามลำดับ แสดงว่าการเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในระบบส่งผลให้อัตราไนทริฟิเคชันลดลง ในทางกลับกันพบว่ากระบวนการดีไนทริฟิเคชันภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพในชุดควบคุมมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 10.50±1.17 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน เนื่องจากดีไนทริฟายเออร์เติบโตโดยอาศัยแหล่งอินทรีย์คาร์บอนจากสลัดจ์ และตะกอนภายในระบบเพียงอย่างเดียว จากนั้นอัตราการรีดิวซ์ไนเทรตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ โดยมีค่าใกล้เคียงกันที่สัดส่วน 1:1 2:1 และ 3:1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 14.11±1.99 15.69±2.28 และ 17.80±1.51 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน และไนเทรตถูกบำบัดได้ดีที่สัดส่วน 4:1 และ 5:1 โดยมีค่าเท่ากับ 19.02±1.15 และ 20.74±1.15 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน ตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานของวลัยภรณ์ วุฒิเมธา (2551) [47] ที่ระบุว่าที่สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในช่วง 5:1–8:1 มีประสิทธิภาพการบำบัดไนเทรตมากกว่าร้อยละ 90 และชลธิชา พลายชุม (2553) [11] ที่ระบุว่าเมทานอลเป็นสารที่มีกำลังรีดิวซ์สูงและให้ค่ายิลด์ต่ำ จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอนในกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน ทั้งนี้จากการคำนวณอัตราการบำบัดไนโตรเจนของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดพบว่า อัตราการรีดิวซ์ไนเทรตที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าต่ำกว่าอัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนีย ซึ่งสามารถเป็นไปได้ว่าไนทริฟายเออร์ที่มีค่ายีลด์ในการเจริญเติบโตต่ำแต่อาจมีอัตราการบำบัด (Activity) สูงกว่าแบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟที่บทบาทในกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน และอาจเป็นผลมาจากในระบบทำการจำลองสภาวะของบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำนั่นคือ มีการเป่าอากาศด้วยเครื่องเติมอากาศแบบหัวฟู่เพื่อป้องกันการตกตะกอนซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดสภาวะไร้อากาศแบบแอนแอโรบิกบริเวณพื้นบ่อ ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายในระบบมีค่ามากกว่า 4 มก.-ออกซิเจน/ล. ส่งผลให้ดีไนทริฟายเออร์สามารถเจริญเติบโตและทำงานได้เฉพาะภายใต้ชั้นไบโอฟิล์มบริเวณด้านในของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดเท่านั้น ทำให้อัตราการรีดิวซ์ไนเทรตในระบบมีค่าต่ำ สำหรับประเมินประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด พบว่าชุดทดลองที่มีการแปรค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 สามารถเกิดกระบวนการบำบัด

ไนทริฟิเคชัน และดีไนทริฟิเคชันในอัตราใกล้เคียงกัน นั่นคือเท่ากับ 34.85±5.81 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน และ 20.74±1.14 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่าในระบบจำลองของบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายมากกว่า 4 มก.-ออกซิเจน/ล. การเติมเมทานอลในสัดส่วนเท่ากับ 5:1 ส่งผลกระตุ้นการเจริญเติบโตของดีไนทริฟายเออร์ซึ่งสามารถทำงานภายใต้สภาวะแอนน็อกซิกด้านในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพเพียงอย่างเดียว จนมีอัตราดีไนทริฟิเคชันสูงใกล้เคียงกับอัตราไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์



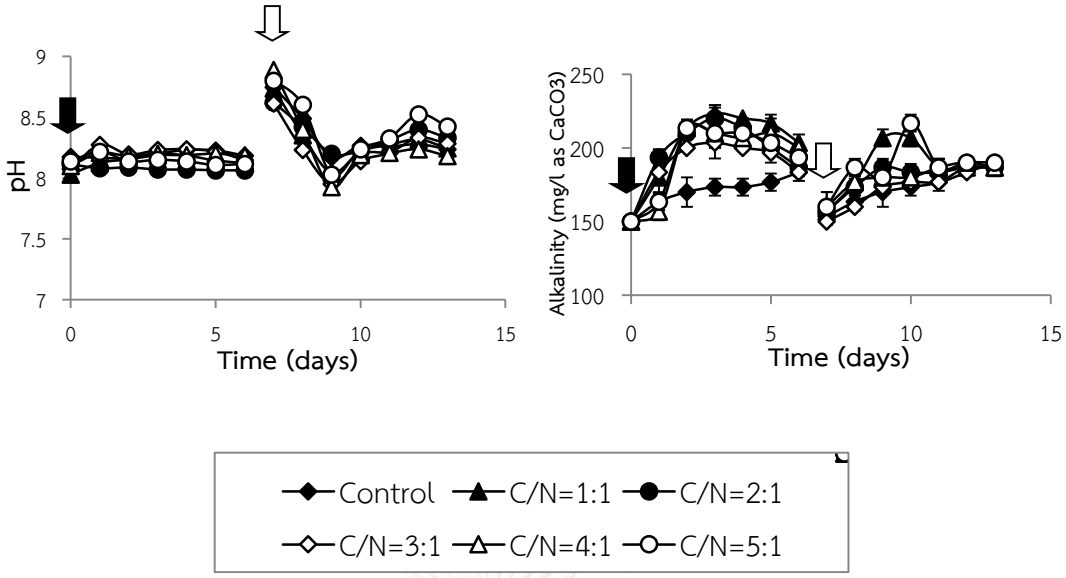
รูปที่ 4.12 อัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 มก.-ไนโตรเจน/ล. เมื่อมีการแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบแตกต่างกัน โดยตัวอักษรที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

แต่ทั้งนี้เนื่องจากงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการติดตั้งระบบบำบัดไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วมด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดไว้ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อลดพื้นที่ในการติดตั้งระบบบำบัด ดังนั้นการเดินระบบด้วยการเติมเมทานอลที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพและการดำรงชีพของสัตว์น้ำ อีกทั้งทำให้ค่าสภาพความเป็นด่างในน้ำลดลง และยังเป็นสาเหตุให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อีกด้วย [10] ซึ่งเมื่อนำหลายเหตุผลมาพิจารณาร่วมกัน ประกอบกับการสะสมของแอมโมเนียภายในระบบเป็นปัญหาหลักที่สำคัญมากกว่าการสะสมของไนเทรต [2] ดังนั้นการเดินระบบบำบัดร่วมไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่สภาวะควบคุมโดยไม่มีการเติมเมทานอล จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการทดลองช่วงต่อไป นั่นคือสามารถบำบัดแอมโมเนียผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ และไนเทรต

ที่เกิดขึ้นสามารถถูกรีดิวซ์ต่อจนอยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนได้บางส่วน โดยมีอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเท่ากับ 60.19±3.12 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน และ 10.50±1.17 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน ตามลำดับ

- *การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำในการศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน*

ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำแสดงดังรูปที่ 4.13 โดยการทดลองรอบแรก ค่าพีเอชของทุกชุดการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 7.93±0.10 ถึง 8.27±0.08 ซึ่งจัดเป็นระดับพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลชีพในระบบ สอดคล้องกับรายงานของธงชัย พรรณสวัสดิ์ (2544) [25] ที่ระบุว่าพีเอชในช่วง 7.2–8.8 7.2–9.0 และ 6.5–8.5 เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของไนโตรโซโมแนส ไนโตรแบคเทอร์ และดีไนทริฟายอิงแบคทีเรีย ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นแอมโมเนียมคลอไรด์ในรอบการทดลองที่สองเป็น 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. พบว่าค่าพีเอชของทุกชุดการทดลองมีค่าสูงสุดในวันที่ 7 ของการทดลอง เท่ากับ 8.89±0.35 อาจเป็นผลมาจากการใช้น้ำประปาในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากแอมโมเนียมคลอไรด์ ซึ่งปกติน้ำประปาจะมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5-8.5 จากนั้นกระบวนการออกซิไดซ์แอมโมเนียที่เกิดขึ้นในทุกชุดการทดลองมีการใช้ค่าสภาพเป็นด่างของไบคาร์บอเนต ส่งผลให้ค่าพีเอชในระบบลดลง [10] โดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 7.93±0.10 และเมื่อแอมโมเนียในระบบหมดลงในวันที่ 9 ของการทดลอง ไนเทรตที่เกิดขึ้นจะถูกรีดิวซ์ผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชันซึ่งสามารถผลิตค่าความเป็นด่างให้กับระบบได้ ส่งผลให้ค่าพีเอชของทุกชุดการทดลองมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องมาจากสภาพความเป็นด่างสามารถรักษาสมดุลพีเอชด้วยระบบบัฟเฟอร์ได้ สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นด่างในระบบ นั่นคือสภาพความเป็นด่างของทุกชุดการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นจากกระบวนการรีดิวซ์ไนเทรต โดยชุดควบคุมที่ไม่การเติมเมทานอลมีอัตราการรีดิวซ์ไนเทรตต่ำสุด ทำให้ค่าสภาพความเป็นด่างเพิ่มขึ้นไม่มากนัก โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากเริ่มต้นที่ 150.00±0.00 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. จนมีค่าเท่ากับ 183.33±5.77 และ 186.67±5.77 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ในวันสุดท้ายของการทดลองทั้ง 2 รอบ ตามลำดับ สำหรับชุดทดลองที่มีการแปรค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของสภาพความเป็นด่างในระบบอย่างเห็นได้ชัด โดยชุดทดลองที่มีการแปรค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ซึ่งมีอัตราดีไนทริฟิเคชันสูงสุด มีค่าความเป็นด่างเพิ่มสูงถึง 213.33±5.77 และ 216.67±5.77 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ในวันที่ 2 และ 10 ของการทดลอง ตามลำดับ



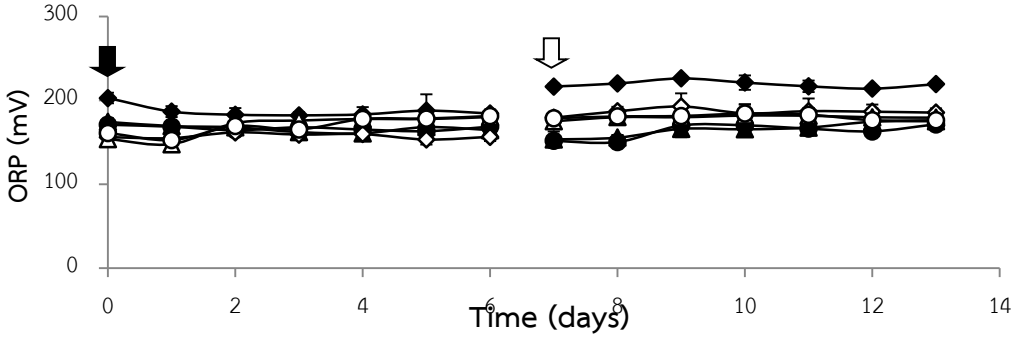
รูปที่ 4.13 ค่าพีเอช และความเป็นด่าง ระหว่างการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

สำหรับข้อมูลในตารางที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำระหว่างการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ เมื่อแปรค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 2:1 3:1 4:1 และ 5:1 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณออกซิเจนละลายในระบบมีค่าอยู่ในช่วง 5.00±1.22 ถึง 7.27±0.42 มก.-ออกซิเจน/ล. ซึ่งเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของไนทริฟายอิงแบคทีเรีย โดยระบบที่มีปริมาณออกซิเจนละลายสูงส่งผลให้อัตราไนทริฟิเคชันเกิดได้เร็วขึ้น ทั้งนี้ภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพซึ่งเป็นบริเวณที่ออกซิเจนแพร่ลงมาไม่ถึงจึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการรีดิวซ์ไนเทรตของแบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟ อย่างไรก็ตามไม่สามารถทราบค่าปริมาณออกซิเจนละลายของบริเวณดังกล่าวได้อย่างแน่ชัด เนื่องจากข้อจำกัดของหัวโพรบที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้ไม่สามารถทำการตรวจวัดปริมาณออกซิเจนในบริเวณดังกล่าวได้ ในส่วนของอุณหภูมิพบว่าไม่มีความแตกต่างกันในแต่ละระบบการทดลอง โดยมีค่าคงที่อยู่ในช่วง 25.00±0.10 ถึง 27.53±0.06 °ซ จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอยู่ในช่วงแคบ จึงไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการทางชีวภาพของจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้ต่ำกว่าในรายงานของสุนทรี อยู่สถาน (2550) [14] และ ชลธิชา พลายชุม (2553) [11] ที่ระบุว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไนทริฟิเคชัน และดีไนทริฟิเคชันมีค่าเท่ากับ 30–36 และ 30°ซ ตามลำดับ

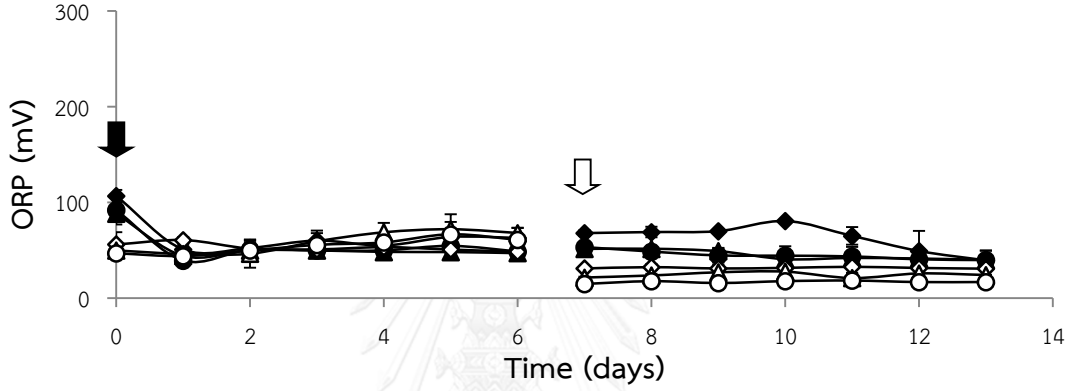
ตารางที่ 4.2 คุณภาพน้ำระหว่างการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 1:1 ถึง 5:1

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด–ค่าสูงสุด)		
	ชุดควบคุม	**C/N = 1:1**	**C/N = 2:1**
ออกซิเจนละลายน้ำ (มก.-ออกซิเจน/ล.)	6.01±0.51 (5.33–7.27)	5.98±0.50 (5.53–7.20)	5.93±0.27 (5.67–6.53)
อุณหภูมิ (°ซ)	26.49±0.31 (26.00–27.00)	26.70±0.57 (25.80–27.53)	26.51±0.42 (25.80–27.33)
	C/N = 3:1	**C/N = 4:1**	**C/N = 5:1**
ออกซิเจนละลายน้ำ (มก.-ออกซิเจน/ล.)	6.17±0.62 (5.00–7.13)	6.22±0.52 (5.03–7.10)	6.12±0.49 (5.47–7.10)
อุณหภูมิ (°ซ)	26.55±0.42 (25.77–27.27)	26.57±0.47 (25.50–27.33)	26.49±0.44 (25.70–27.40)

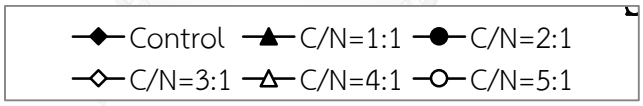
ค่าโออาร์พีภายในถังปฏิกรณ์สำหรับการทดลองรอบที่ 1 และ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 147.87±5.60 ถึง 202.90±6.22 และ 150.37±1.87 ถึง 226.20±2.82 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ก) โดยกระบวนการไนทริฟิเคชันภายในระบบส่งผลให้ค่าโออาร์พีมีค่าสูงกว่า 100 มิลลิโวลต์ [10] นอกจากนี้ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันสามารถบ่งบอกถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในระบบ กล่าวคือชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมเมทานอลมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงกว่าชุดทดลองที่เพิ่มสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ จึงตรวจพบค่าโออาร์พีสูงอันเนื่องมาจากกระบวนการออกซิเดชัน สำหรับภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพ พบว่าการทดลองทั้งสองรอบมีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง 39.33±5.65 ถึง 106.80±6.38 และ 15.83±2.22 ถึง 80.60±1.00 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ข) โดยภายในมัดเส้นใยที่มีปริมาณออกซิเจนละลายต่ำ ส่งผลให้มีแนวโน้มการเกิดกระบวนการรีดักชันมากขึ้น ทำให้ค่าโออาร์พีภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพมีค่าต่ำกว่าน้ำภายในถังปฏิกรณ์



(ก) ค่าโออาร์พีภายในถังปฏิกรณ์



(ข) ค่าโออาร์พีภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพ

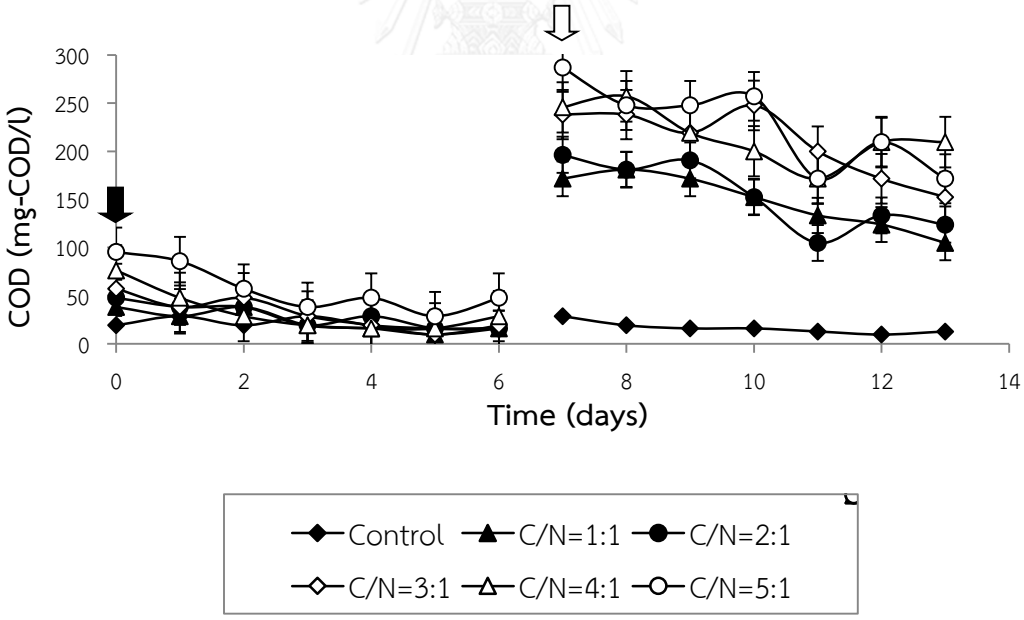


Chulalongkorn University

รูปที่ 4.14 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ระหว่างการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีระหว่างการทดลอง พบว่าชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมเมทานอลมีค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 20.86±5.45 และ 16.32±6.20 มก.-ซีโอดี/ล. สำหรับการทดลองทั้ง 2 รอบตามลำดับ โดยปริมาณซีโอดีที่พบมาจากสารอินทรีย์คาร์บอนภายในระบบซึ่งเกิดจากตะกอนสะสมบนตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดเพียงอย่างเดียว ทำให้ค่าซีโอดีของชุดควบคุมดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าในชุดทดลองอื่น นอกจากนี้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าปริมาณซีโอดีของชุดควบคุมมีค่าลดลงเนื่องจากถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับแบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟ แต่เนื่องจากภายในระบบมีปริมาณออกซิเจนละลายสูง ส่งผลให้กระบวนการรีดิวซ์ไนเทรตสามารถเกิดขึ้นภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพได้เพียงอย่างเดียว จึงสังเกตเห็นการลดลงของซีโอดีในระบบไม่มากนัก

สำหรับชุดทดลองที่มีการแปรค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 ถึง 5:1 พบการลดลงของซีโอดีอย่างเห็นได้ชัดจากวันแรกของการทดลองซึ่งมีค่าเท่ากับ 38.10±16.50 47.62±0.00 57.14±16.50 76.19±0.00 และ 95.24±16.50 มก.-ซีโอดี/ล. ตามลำดับ จนมีปริมาณซีโอดีคงเหลือในวันสุดท้ายของการทดลองรอบแรกเท่ากับ 15.87±5.50 15.87±5.50 19.05±0.00 28.57±16.50 และ 47.52±0.00 มก.-ซีโอดี/ล. ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์เข้าสู่ระบบในการทดลองรอบที่ 2 พบว่าสอดคล้องกับการทดลองรอบแรก นั่นคือมีการลดลงของซีโอดีในระบบเช่นเดิม จึงสามารถสรุปได้ว่าเมทานอลที่เติมเข้าสู่ระบบถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับดีไนทริฟายเออร์ในกระบวนการรีดิวซ์ไนเทรต สอดคล้องกับงานวิจัยของวิธู นันทิธัญญธาดา (2546) [57] ที่ระบุว่าแหล่งอินทรีย์คาร์บอนจากภายนอกที่เติมเข้าสู่ระบบสามารถสลายตัว และนำไปใช้ในกระบวนการรีดักชันได้ง่ายกว่าแหล่งอินทรีย์จากตะกอนจุลชีพภายในระบบ นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมเมทานอลในปริมาณที่มากเกินพอสำหรับกระบวนการดีไนทริฟิเคชันทำให้เกิดสารอินทรีย์คงเหลือในระบบ และส่งผลยับยั้งการเจริญเติบโตและการทำงานของไนทริฟายเออร์ จึงตรวจพบการลดลงของอัตราไนทริฟิเคชันในชุดทดลองที่มีการเติมเมทานอลในสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงๆ

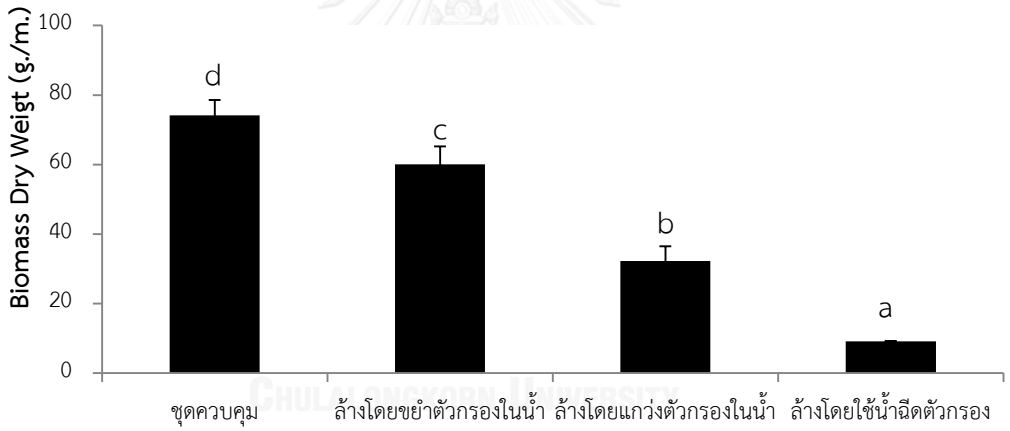


รูปที่ 4.15 ปริมาณซีโอดี ระหว่างการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ
โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์
ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

4.2.2 การศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

- *อัตราการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดเมื่อแปรเปลี่ยนวิธีการล้างทำความสะอาด*

การวิเคราะห์ปริมาณตะกอนจุลชีพสะสมบนตัวกรองชีวภาพสำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการทำความสะอาด และชุดทดลองที่ทำความสะอาดด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ การล้างโดยการขยำตัวกรองเบาๆในน้ำสะอาด การล้างโดยการแกว่งตัวกรองในน้ำสะอาด และการใช้น้ำสะอาดฉีดล้างตัวกรอง พบว่ามีปริมาณตะกอนคงเหลือในมัดเส้นใยหลังการล้าง เท่ากับ 74.12±4.45 60.06±5.11 32.21±4.30 และ 9.13±0.09 กรัม/ม. ตามลำดับ (รูปที่ 4.16) หรือปริมาณตะกอนที่ลดลงของชุดทดลองที่แปรเปลี่ยนวิธีการล้างทำความสะอาดทั้ง 3 วิธี คิดเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับชุดควบคุม เท่ากับร้อยละ 14.06±4.93 41.91±6.90 และ 66.94±4.03 ตามลำดับ

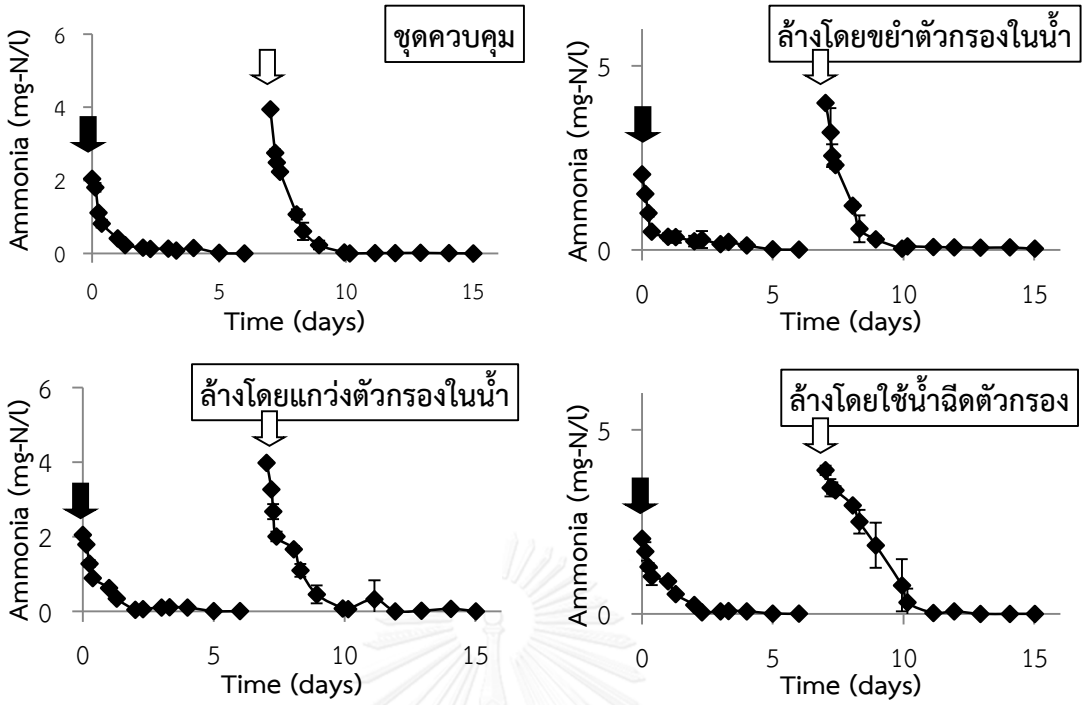


รูปที่ 4.16 ปริมาณจุลชีพและตะกอนชีวภาพคงเหลือบนมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดสำหรับชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรเปลี่ยนวิธีการล้างทำความสะอาดแตกต่างกัน 3 วิธี โดยตัวอักษรที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

จะเห็นว่าชุดควบคุมที่ไม่มีการทำความสะอาดตัวกรองพบการสะสมของตะกอนบนมัดเส้นใยในปริมาณสูงสุด โดยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.1.1 (เรื่องการประเมินอัตราไนทริฟิเคชัน และดีไนทริฟิเคชันเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด) พบว่าชุดควบคุมมีปริมาณตะกอนจุลชีพสะสมเทียบเท่ากับตัวกรองที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลามากกว่า 8 สัปดาห์ (มีค่ามากกว่า 62.35±2.08 กรัม/ม.) ในขณะที่ชุดทดลองที่ทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดด้วยการขยำตัวกรองในน้ำสามารถกำจัดตะกอนส่วนเกินที่เกาะติดบริเวณพื้นผิวของ

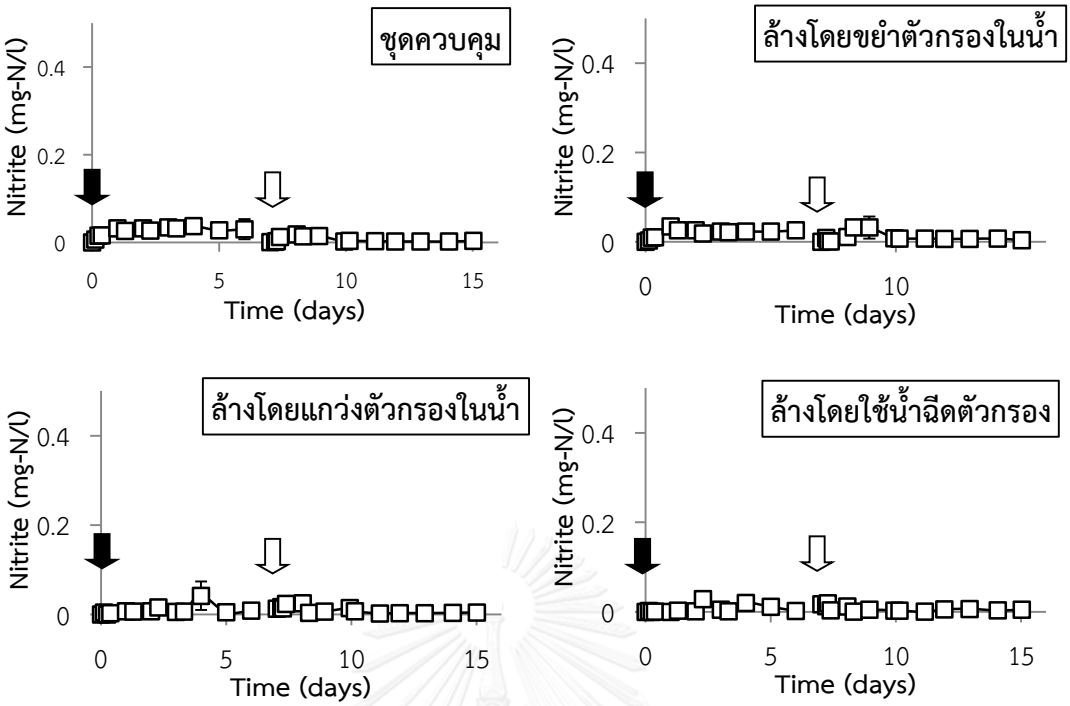
ตัวกรองชีวภาพแบบหลวมๆ ได้เล็กน้อย โดยมีปริมาณตะกอนคงเหลือหลังการล้างใกล้เคียงกับชุดควบคุม นั่นคือเทียบเท่าตัวกรองที่ผ่านการบ่มเป็นเวลา 7–8 สัปดาห์ (มีค่าอยู่ระหว่าง 50.89±3.41 ถึง 62.35±2.08 กรัม/ม.) ส่วนวิธีการแกว่งตัวกรองไปมาในน้ำสะอาด ทำให้เกิดการหลุดร่อนของตะกอนจุลชีพที่จับบนมัดเส้นใยมากขึ้น รวมถึงสามารถกำจัดเมือกไบโอฟิล์มออกได้บางส่วน ทำให้มีปริมาณตะกอนสะสมบนมัดเส้นใยหลังการทำความสะอาดเท่ากับตัวกรองที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 5–6 สัปดาห์ (มีค่าอยู่ระหว่าง 26.77±5.75 ถึง 33.44±5.18 กรัม/ม.) และสุดท้ายการใช้น้ำฉีดล้างทำความสะอาดสามารถขจัดปริมาณตะกอนจุลชีพออกจากตัวกรองชีวภาพได้มากที่สุด เนื่องจากความแรงของน้ำทำให้เกิดการชะล้างตะกอนและชั้นฟิล์มชีวภาพบริเวณมัดเส้นใยของตัวกรองไบโอคอร์ด โดยมีปริมาณตะกอนเหลือเท่ากับการบ่มเชื้อเพียง 2–3 สัปดาห์ (มีค่าอยู่ระหว่าง 4.63±0.43 ถึง 10.95±2.83 กรัม/ม.) เท่านั้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่ารูปแบบการความสะอาดตัวกรองชีวภาพด้วยวิธีที่แตกต่างกัน สามารถควบคุมปริมาณตะกอนจุลชีพสะสมบนมัดเส้นใยได้แตกต่างกัน

เมื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียระหว่างการแปรเปลี่ยนวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดแตกต่างกัน ผลการทดลองในรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าชุดควบคุมและชุดทดลองที่แปรเปลี่ยนวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ 3 วิธี มีปริมาณแอมโมเนียคงเหลือในวันที่ 1.00 ของการทดลองเท่ากับ 0.41±0.02 0.35±0.09 0.62±0.06 และ 0.88±0.07 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ นั่นคือ ชุดควบคุมและชุดทดลองที่ทำความสะอาดด้วยการขยำตัวกรองในน้ำซึ่งมีปริมาณตะกอนจุลชีพสะสมบนมัดเส้นใยใกล้เคียงกัน ทำให้เกิดกระบวนการออกซิไดซ์แอมโมเนียในอัตราที่ใกล้เคียงกัน โดยสามารถบำบัดแอมโมเนียได้เกือบหมดในวันที่ 1.00 ของการทดลอง สำหรับตัวกรองที่ผ่านการทำความสะอาดโดยการแกว่งไปมาในน้ำสะอาดจะเกิดการหลุดร่อนของตะกอนจุลชีพส่วนหนึ่งไปพร้อมกับน้ำ ทำให้แบคทีเรียที่ทำหน้าที่บำบัดแอมโมเนียบริเวณผิวของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดลดลง ส่งผลให้มีปริมาณแอมโมเนียคงเหลือในระบบมากกว่าชุดควบคุมเมื่อวิเคราะห์ที่วันเวลาเดียวกัน และสุดท้ายชุดทดลองที่ใช้น้ำฉีดล้างตัวกรองซึ่งเหลือปริมาณจุลินทรีย์บนมัดเส้นใยเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้เกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันช้าที่สุด และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ในการทดลองรอบที่ 2 พบว่าทุกชุดการทดลองสามารถบำบัดแอมโมเนียได้อย่างสมบูรณ์เช่นเดียวกับการทดลองรอบแรก โดยปริมาณแอมโมเนียคงเหลือสำหรับชุดควบคุมและชุดทดลองที่ทำการขยำตัวกรองชีวภาพมีค่าใกล้เคียงกัน นั่นคือเท่ากับ 0.23±0.11 และ 0.28±0.08 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ในวันที่ 8.94 ของการทดลอง ส่วนชุดทดลองที่ใช้การแกว่งและใช้น้ำสะอาดฉีดล้างตัวกรองสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ช้ากว่า เนื่องจากมีปริมาณแบคทีเรียสะสมคงเหลือบนตัวกรองชีวภาพน้อยกว่า โดยมีปริมาณแอมโมเนียเท่ากับ 0.45±0.23 และ 1.86±0.61 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ระหว่างการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

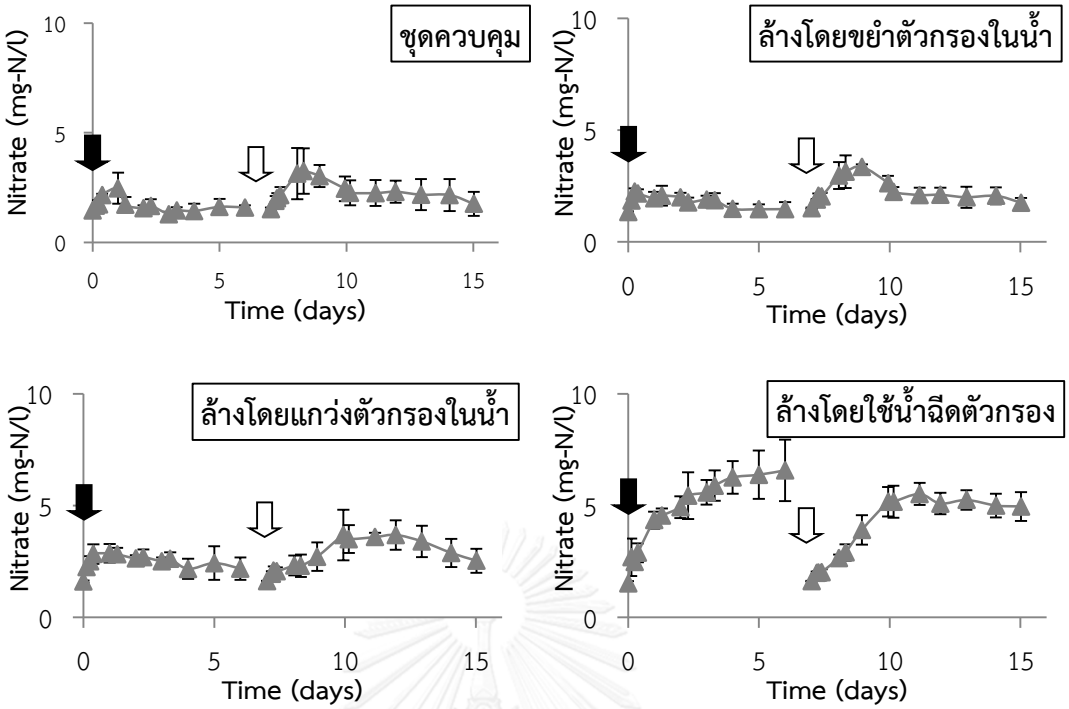
ในส่วนของการวิเคราะห์ปริมาณไนไทรต์ซึ่งเป็นสารตัวกลางที่สามารถพบได้ระหว่างกระบวนการออกซิไดซ์แอมโมเนียและรีดิวซ์ไนเทรต พบว่าไนไทรต์ที่เกิดขึ้นสามารถเปลี่ยนรูปเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่มีการสะสมตัวภายในระบบดังแสดงในรูปที่ 4.18 โดยความเข้มข้นของไนไทรต์สูงสุดสำหรับชุดควบคุมและชุดการทดลองที่มีการแปรเปลี่ยนวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพทั้ง 3 วิธี มีค่าน้อยมาก นั่นคือไม่เกิน 0.04±0.00 0.03±0.02 0.04±0.03 และ 0.02±0.02 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไทรต์ ระหว่างการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเทรตในระบบพบว่า ชุดควบคุมและชุดทดลองที่ทำความสะอาดตัวกรองด้วยการขยำและการแกว่งตัวกรองในน้ำสะอาด มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเทรตไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือไนเทรตที่เกิดขึ้นจากระบวนการไนทริฟิเคชันสามารถรีดิวซ์ต่อจนอยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์ภายใต้สภาวะกึ่งไร้อากาศที่บริเวณภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพ โดยพบการเพิ่มขึ้นของไนเทรตในช่วงแรกของการทดลอง ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.47±0.71 2.25±0.14 และ 2.87±0.42 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากนั้นปริมาณไนเทรตในระบบจะเริ่มลดลงและมีค่าคงที่เมื่อสิ้นสุดกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน โดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.29±0.11 1.47±0.31 และ 1.62±0.11 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 นั่นคือชุดควบคุมที่ไม่มีการทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพก่อให้เกิดการสะสมของตะกอนจุลชีพในปริมาณมาก โดยจุลชีพเหล่านี้จะทำให้เกิดการสร้างชั้นไบโอฟิล์มที่มีความหนาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดสภาวะกึ่งไร้อากาศซึ่งเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟ นอกจากการเกาะตัวของจุลชีพแล้วที่บริเวณมัดเส้นใยของไบโอคอร์ดยังมีการสะสมตัวของสลัดจ์และเศษตะกอนซึ่งเป็นสารอินทรีย์ในปริมาณมาก สารเหล่านี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มดังกล่าวโดยเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับกระบวนการดีไนทริฟิเคชันได้อีกด้วย

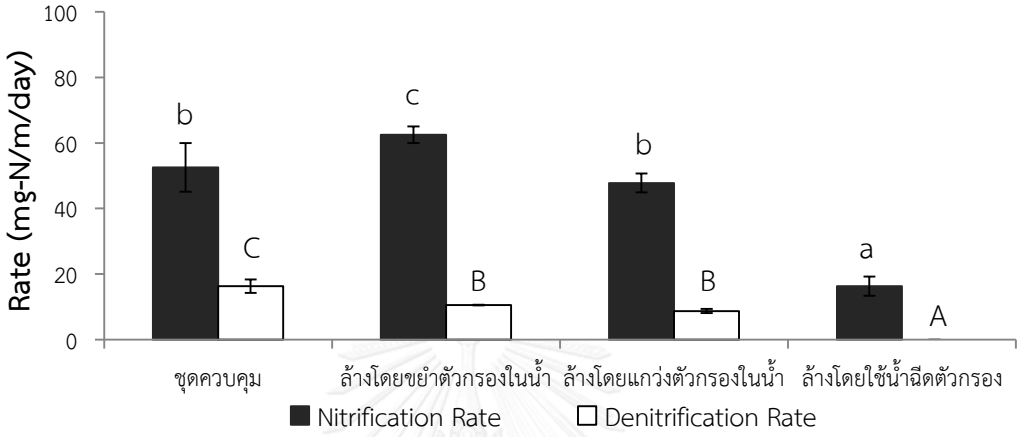
สำหรับชุดทดลองที่ใช้น้ำสะอาดฉีดล้างตัวกรอง พบว่าไนเทรตที่เกิดขึ้นไม่สามารถรีดิวซ์ต่อได้ โดยมีปริมาณไนเทรตสะสมสูงสุดถึง 6.58±1.38 มก.-ไนโตรเจน/ล. สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการฉีดล้างตัวกรองทำให้ตะกอนจุลชีพและเมือกไบโอฟิล์มถูกชะล้างออกไป ออกซิเจนจึงสามารถแพร่เข้าสู่ภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพได้ ทำให้ไม่สามารถเกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลชีพกลุ่มดีไนทริฟายเออร์ได้ อย่างไรก็ตามผลการทดลองในหัวข้อ 4.1.1 ระบุว่าตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 2–3 สัปดาห์ สามารถบำบัดไนเทรตได้บางส่วนโดยมีอัตราดีไนทริฟิเคชันอยู่ในช่วง 95.99±11.96 ถึง 99.10±16.14 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน ทั้งนี้สาเหตุที่ตัวกรองดังกล่าวสามารถรีดิวซ์ไนเทรตได้แม้ว่าจะมีปริมาณตะกอนจุลชีพสะสมใกล้เคียงกับตัวกรองที่ทำความสะอาดด้วยการฉีดน้ำ เนื่องจากการตรึงเชื้อบนตัวกรองตามธรรมชาติในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำก่อให้เกิดการสร้างสารไลโปโพลิแซ็กคาไรด์ซึ่งเป็นส่วนประกอบของชั้นไบโอฟิล์ม [6] ส่งผลให้เกิดสภาวะกึ่งไร้อากาศขึ้นภายในมัดเส้นใย แต่ทว่าความแรงของน้ำที่ใช้ในการทำความสะอาดทำให้เกิดการหลุดร่อนของเมือกเหล่านี้ ส่งผลให้แบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟไม่สามารถทำงานได้ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณตะกอนสะสมบนตัวกรองชีวภาพใกล้เคียงกันก็ตาม และเมื่อทำการทดลองซ้ำในรอบการทดลองที่สอง พบว่าชุดควบคุมและชุดทดลองที่ทำความสะอาดด้วยการขยำและการแกว่งในน้ำสะอาดมีปริมาณไนเทรตที่เกิดจากกระบวนการไนทริฟิเคชันสูงกว่าการทดลองรอบแรกนั่นคือเท่ากับ 3.03±0.50 3.36±0.11 และ 3.69±0.66 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ เนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียเริ่มต้นเป็น 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. อย่างไรก็ตามไนเทรตที่เกิดขึ้นสามารถเกิดการบำบัดต่อผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ สำหรับการทำความสะอาดตัวกรองด้วยการขยำและการแกว่งไปมาในน้ำสะอาดจะทำให้ตะกอนบางส่วนหลุดร่อนออกไปพร้อมกับน้ำ ส่งผลให้อัตราการบำบัดไนเทรตลดลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามตัวกรองที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยวิธีการทั้งสองนี้ยังสามารถรีดิวซ์ไนเทรตผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากบริเวณแอนน็อกซิกภายใต้ชั้นฟิล์มชีวภาพไม่ถูกทำลาย ในขณะที่การใช้น้ำสะอาดฉีดล้างตัวกรองเป็นวิธีที่ก่อให้เกิดการชะล้างปริมาณตะกอนจุลชีพออกมากจนเกินไป ประกอบกับความแรงของน้ำสามารถทำลายเมือกไบโอฟิล์ม ส่งผลให้ตัวกรองไม่สามารถเปลี่ยนรูปไนเทรตที่เกิดขึ้นให้อยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนได้ พบว่าไนเทรตมีปริมาณสะสมสูงถึง 5.52±0.49 มก.-ไนโตรเจน/ล.



รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเทรต ระหว่างการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

จากการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด ผลการทดลองดังรูปที่ 4.20 พบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของชุดควบคุมและชุดทดลองที่ทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี มีค่าเท่ากับ 52.54±7.46 62.52±2.53 47.80±2.88 และ 16.28±2.94 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน ตามลำดับ จะเห็นว่าชุดควบคุมมีอัตราไนทริฟิเคชันต่ำกว่าชุดทดลองที่ทำความสะอาดด้วยการขยำตัวกรองเล็กน้อย สอดคล้องกับรายงานของ Timmon และคณะ (2002) [58] ที่ระบุว่าตะกอนแขวนลอยสามารถสะสมและเกิดการอุดตัน ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่แพร่ผ่านไม่เพียงพอต่อการทำงานของไนทริฟายเออร์ ในทางกลับกันพบว่าการกำจัดตะกอนด้วยการแกว่งและใช้น้ำสะอาดฉีดล้างตัวกรองเป็นการลดจำนวนของแบคทีเรีย ส่งผลให้อัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนียลดลง สำหรับการประเมินอัตราดีไนทริฟิเคชัน พบว่ามีค่าสูงสุดในชุดควบคุมเท่ากับ 16.31±2.05 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน เนื่องจากภายในตะกอนแขวนลอยมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับดีไนทริฟายเออร์ [13] และเมื่อกำจัดตะกอนส่วนเกินด้วยการด้วยการขยำ และการแกว่งในน้ำสะอาดส่งผลให้อัตราการรีดิวซ์ไนเทรตลดลงเหลือ 10.53±0.09 และ 8.73±0.66 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./

วัน ตามลำดับ และสุดท้ายตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการใช้น้ำสะอาดฉีดล้างไม่สามารถบำบัดไนเทรตได้ เนื่องจากตะกอนจุลชีพและชั้นไบโอฟิล์มถูกทำลาย นั่นคือตัวกรองชีวภาพที่ทำความสะอาดด้วยการขยำมีอัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนียสูงสุดเท่ากับ 62.52±2.53 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน และชุดควบคุมมีอัตราดีไนทริฟิเคชันสูงสุดเท่ากับ 16.31±2.05 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน ตามลำดับ

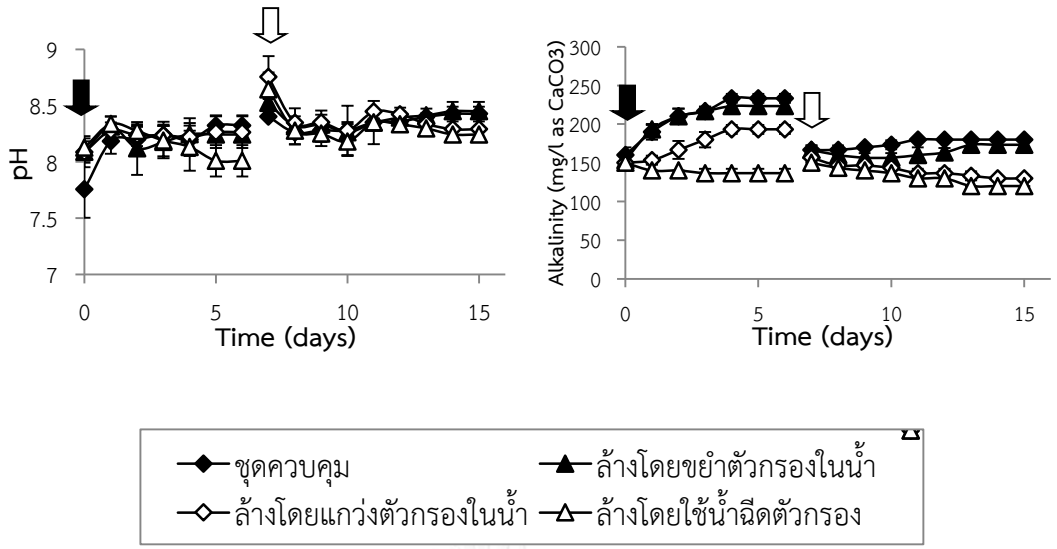


รูปที่ 4.20 อัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 มก.-ไนโตรเจน/ล. เมื่อแปรเปลี่ยนวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองแตกต่างกัน โดยตัวอักษรที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

อย่างไรก็ตามในด้านของการประยุกต์ใช้ตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดเพื่อบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนออกจากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำที่มุ่งเน้นการบำบัดแอมโมเนีย พบว่าการทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพด้วยการขยำเบาๆ และการแกว่งไปมาในน้ำเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ โดยตัวกรองชีวภาพภายหลังการทำความสะอาดยังคงสามารถบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตผ่านกระบวนการร่วมได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ทว่าเมื่อเปรียบเทียบกันพบว่าการแกว่งตัวกรองในน้ำสะอาดเป็นวิธีที่สะดวก ประหยัดเวลา และเหมาะสำหรับการใช้งานจริงมากกว่าการขยำในน้ำสะอาด โดยมีอัตราไนทริฟิเคชัน ดีไนทริฟิเคชัน และปริมาณตะกอนจุลชีพสะสม เท่ากับ 47.80±2.88 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน 8.73±0.66 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน และ 32.21±4.30 กรัม/ม. ตามลำดับ

- *การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำในการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด*

จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ ผลการทดลองดังรูปที่ 4.21 พบว่าค่าพีเอชของทุกชุดการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นในการทดลองรอบแรก เนื่องมาจากการปลดปล่อยไบคาร์บอเนตจากกระบวนการรีดิวซ์ไนเทรตภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพ [10] ยกเว้นชุดทดลองที่ทำความสะอาดโดยใช้น้ำฉีดมีค่าลดลงเล็กน้อยจาก 8.13±0.08 จนมีค่าเท่ากับ 8.01±0.14 ซึ่งการลดลงของค่าพีเอชเป็นผลมาจากการที่ภายในระบบเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันเพียงอย่างเดียวโดยปราศจากการสมดุลพีเอชด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน สำหรับการทดลองรอบที่ 2 พบว่าพีเอชของทุกชุดการทดลองมีค่าสูงกว่า 8.47±0.21 ในวันแรกของการทดลอง อาจมีสาเหตุมาจากการใช้น้ำประปาที่มีค่าพีเอชประมาณ 6.5-8.5 ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เติมเข้าสู่ระบบ หลังจากนั้นค่าพีเอชของชุดควบคุมและชุดการทดลองที่มีการขยำและการแกว่งตัวกรองในน้ำสะอาดเริ่มลดลงและมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่สำหรับชุดทดลองที่ใช้น้ำฉีดล้างตัวกรองตรวจพบการลดลงของพีเอชมากที่สุด สอดคล้องกับการตรวจวัดสภาพความเป็นด่าง ที่พบว่าชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการขยำและการแกว่งตัวกรองในน้ำสะอาดมีค่าสภาพความเป็นด่างเพิ่มขึ้นจากความเข้มข้นเริ่มต้นจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 233.33±5.77 233.33±5.77 และ 193.33±5.77 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการปลดปล่อยไฮดรอกซิลอิออนจากแบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟ [13] ในทางตรงข้าม พบว่าชุดทดลองที่ใช้น้ำฉีดล้างตัวกรองมีการใช้ไบคาร์บอเนตในกระบวนการออกซิไดซ์แอมโมเนียทำให้มีค่าลดลงเท่ากับ 136.67±5.77 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. สำหรับการทดลองรอบที่ 2 พบว่าสภาพความเป็นด่างของชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการขยำตัวกรองในน้ำสะอาดยังคงมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดิม แต่สำหรับชุดทดลองที่ใช้การแกว่งตัวกรองในน้ำสะอาดกลับมีค่าลดลงเท่ากับ 130.00±0.00 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. น่าจะเป็นผลมาจากการกำจัดตะกอนจุลชีพส่วนเกินทำให้ตัวกรองชีวภาพมีอัตราไนทริฟิเคชันสูงกว่าอัตราดีไนทริฟิเคชันเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียเริ่มต้นในระบบ



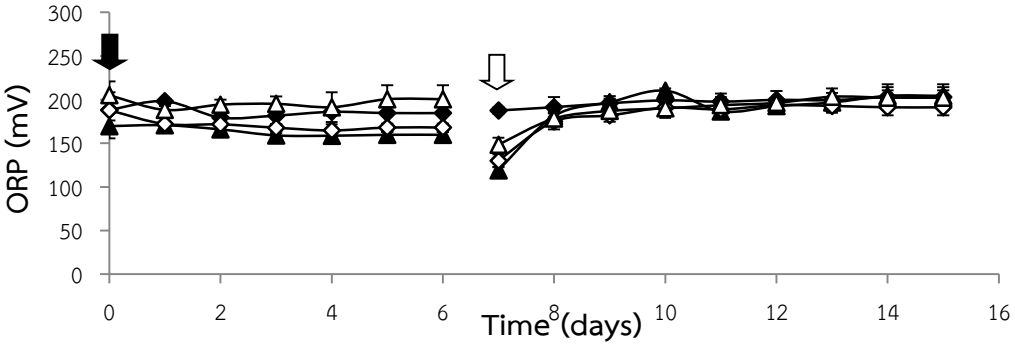
รูปที่ 4.21 ค่าพีเอช และความเป็นด่าง ระหว่างการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

การวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนละลายในระบบ พบว่าทุกชุดการทดลองมีค่าคงที่อยู่ในช่วง 5.20±1.20 ถึง 8.13±0.06 มก.-ออกซิเจน/ล. ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและทำงานของแบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายเออร์ และสำหรับการรีดิวซ์ไนเทรตยังคงสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะแอนน็อกซิกภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด โดยจากรายงานของ ชลธิชา พลายชุม (2553) [11] ระบุว่ากระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นเมื่อปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีค่าประมาณ 1 และไม่เกิน 0.2 มก.-ออกซิเจน/ล. ตามลำดับ และสุดท้ายการตรวจวัดอุณหภูมิระหว่างการทดลอง พบว่าทุกชุดการทดลองมีอุณหภูมิคงที่อยู่ในช่วง 25.00±0.10 ถึง 26.73±0.21 °ซ ซึ่งเหมาะสมต่อการเกิดกระบวนการทางชีวภาพของจุลินทรีย์ [10]

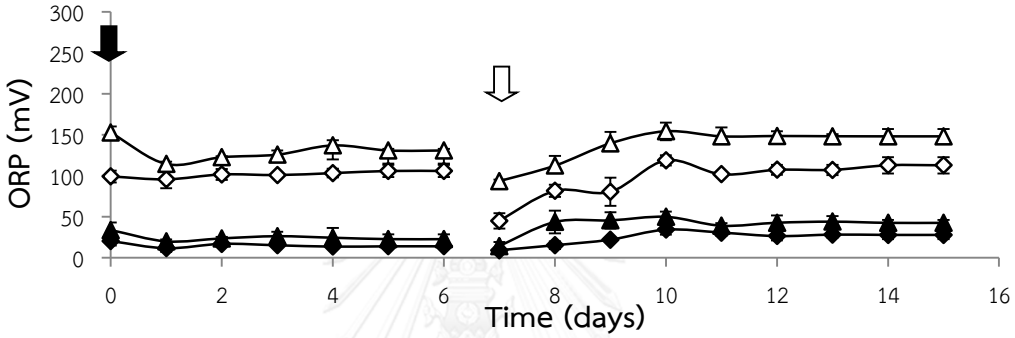
ตารางที่ 4.3 คุณภาพน้ำระหว่างการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรอง 3 วิธี

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด – ค่าสูงสุด)	
	ชุดควบคุม	**ล้างโดยขยำตัวกรองในน้ำ**
ออกซิเจนละลายน้ำ	6.76 ± 0.86	6.58 ± 0.59
(มก.-ออกซิเจน/ล.)	(5.20 – 8.47)	(5.50 – 7.93)
อุณหภูมิ	25.68 ± 0.51	25.60 ± 0.51
(°ซ)	(25.07 – 26.47)	(25.00 – 26.73)
	ล้างโดยแกว่งตัวกรองในน้ำ	**ล้างโดยใช้น้ำฉีดตัวกรอง**
ออกซิเจนละลายน้ำ	6.77 ± 0.96	6.83 ± 0.64
(มก.-ออกซิเจน/ล.)	(5.27 – 8.03)	(5.40 – 8.13)
อุณหภูมิ	25.64 ± 0.58	25.68 ± 0.55
(°ซ)	(25.13 – 26.73)	(25.10 – 26.63)

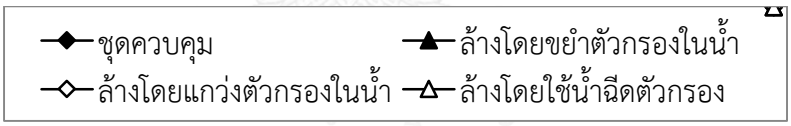
รูปที่ 4.22 แสดงการตรวจวัดค่าโออาร์พีภายในระบบ โดยรูปที่ 4.22 (ก) เป็นผลการตรวจวัดค่าโออาร์พีภายในถังปฏิกรณ์พบว่า มีค่าเหมาะสมสำหรับกระบวนการไนทริฟิเคชันซึ่งมีค่าเฉลี่ยสำหรับการทดลองทั้ง 2 รอบ เท่ากับ 179.34±14.32 และ 189.05±19.30 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ และเมื่อทำการตรวจวัดภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด ผลการทดลองในรูปที่ 4.22 (ข) พบว่ามีค่าเป็นบวกต่ำกว่าในถังปฏิกรณ์ โดยค่าโออาร์พีสามารถบ่งบอกถึงกระบวนการบำบัดที่เกิดภายในมัดเส้นใยได้ กล่าวคือ ชุดควบคุมและชุดทดลองที่ทำความสะอาดด้วยการขยำตัวกรองในน้ำสะอาดมีค่าโออาร์พีใกล้เคียงกันเฉลี่ยเท่ากับ 20.41±7.77 และ 33.55±11.33 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ซึ่งมีสาเหตุมาจากปริมาณตะกอนสะสมบนตัวกรองของทั้ง 2 ชุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้กระบวนการบำบัดที่เกิดขึ้นมีความคล้ายคลึงกัน นั่นคือมีอัตราการรีดิวซ์ไนเทรตสูงกว่าอัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนีย ส่วนชุดการทดลองที่ทำความสะอาดด้วยการแกว่งไปมาในน้ำสะอาดและการใช้น้ำฉีดล้างตัวกรอง พบว่ามีค่าโออาร์พีภายในมัดเส้นใยเฉลี่ยสูงกว่าชุดควบคุม เนื่องจากในระหว่างการกำจัดปริมาณตะกอนส่วนเกินนั้น ส่งผลให้โมเลกุลของออกซิเจนสามารถแพร่กระจายเข้าสู่มัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพได้อย่างทั่วถึง โดยมีค่าเท่ากับ 98.68±17.54 และ 134.60±17.33 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ



(ก) ค่าโออาร์พีภายในถังปฏิกรณ์



(ข) ค่าโออาร์พีภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพ

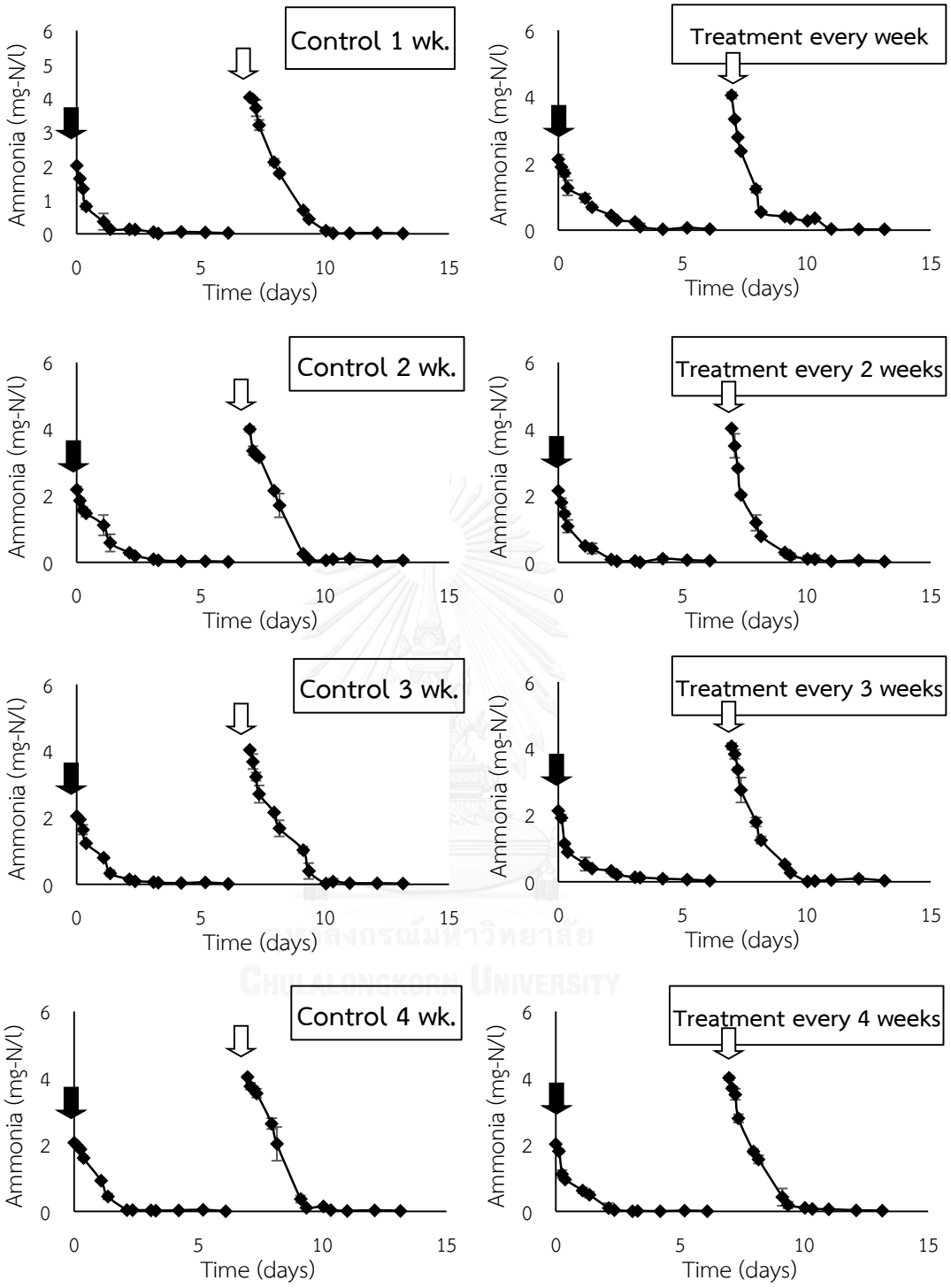


รูปที่ 4.22 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ระหว่างการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

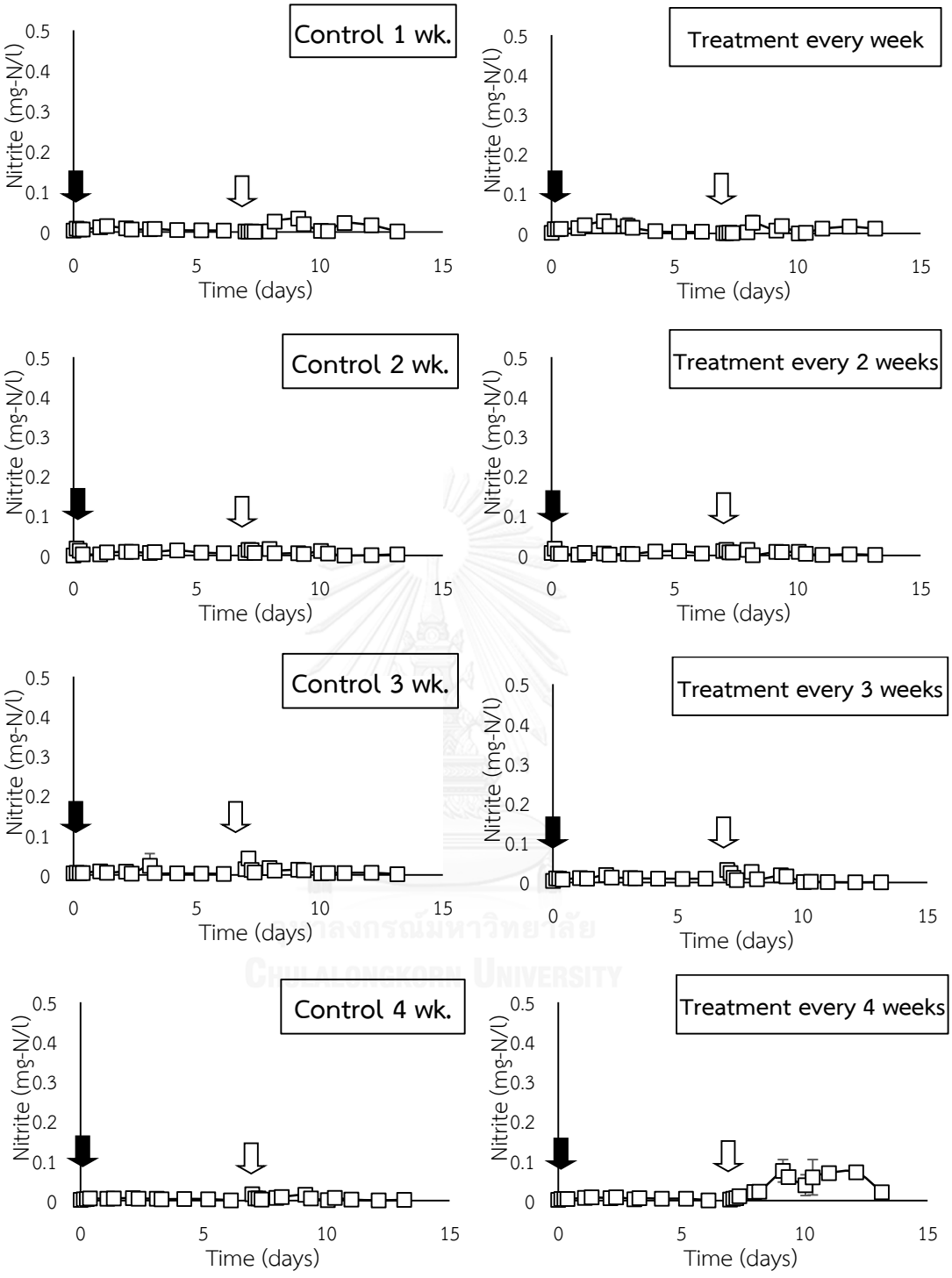
4.2.3 การศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

- *อัตราการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดเมื่อแปรค่าความถี่ในการล้างทำความสะอาด*

จากการเดินระบบบำบัดไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วมด้วยสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1 (ไม่มีการเติมเมทานอลเข้าสู่ระบบ) และการทดลองที่ 2.2 (ทำความสะอาดตัวกรองโดยการแกว่งในน้ำสะอาด) เมื่อแปรค่าความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด โดยเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการทำความสะอาดตัวกรองเป็นเวลา 7 14 21 และ 28 วัน กับชุดทดลองที่แปรค่าความถี่ในการทำความสะอาด 4 ค่า คือ 7 14 21 และ 28 วัน/ครั้ง พบว่าทุกชุดการทดลองสามารถบำบัดแอมโมเนียได้อย่างสมบูรณ์ โดยชุดควบคุมที่ไม่มีการทำความสะอาดตัวกรองเป็นเวลา 1 2 3 และ 4 สัปดาห์ มีปริมาณแอมโมเนียคงเหลือในวันที่ 1.08 ของการทดลองเท่ากับ 0.36±0.24 1.11±0.30 0.80±0.06 และ 0.93±0.04 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ และชุดทดลองที่ทำความสะอาดด้วยความถี่ 1 2 3 และ 4 สัปดาห์/ครั้ง มีความเข้มข้นของแอมโมเนียเท่ากับ 0.96±0.13 0.49±0.05 0.53±0.20 และ 0.63±0.09 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.23 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแอมโมเนียคงเหลือในชุดควบคุมและชุดทดลองที่ระยะเวลาเท่ากัน พบว่าการใช้งานตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการทำความสะอาดจะมีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์แอมโมเนียสูงกว่า เนื่องจากการสะสมของตะกอนและเซลล์จุลินทรีย์บนมัดเส้นใยส่งผลให้ระบบมีความต้องการออกซิเจนเพิ่มขึ้น [21] นอกจากนี้การเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มชีวภาพยังก่อให้เกิดสภาวะไร้อากาศซึ่งส่งผลยับยั้งการทำงานของจุลชีพกลุ่มไนทริฟายเออร์ โดยความถี่ในการทำความสะอาดที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดอัตราไนทริฟิเคชันสูงสุดอยู่ในช่วง 2–3 สัปดาห์/ครั้ง ในทางตรงข้ามพบว่าตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการใช้งานเพียง 1 สัปดาห์ ยังมีจำนวนจุลชีพและตะกอนชีวภาพสะสมในปริมาณไม่มาก ดังนั้นเมื่อนำมาทำความสะอาดจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียลดลงเล็กน้อย และเมื่อทำการทดลองซ้ำโดยเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียเริ่มต้นเป็น 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับรอบแรก นั่นคือทุกชุดการทดลองสามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียให้อยู่ในรูปของไนเทรตได้อย่างสมบูรณ์ โดยปริมาณแอมโมเนียคงเหลือของชุดควบคุมในวันที่ 8.17 ของการทดลองที่ไม่มีการทำความสะอาดตัวกรองเป็นเวลา 7 14 21 และ 28 วัน เท่ากับ 1.78±0.06 1.71±0.36 1.68±0.24 และ 2.03±0.51 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ และความเข้มข้นแอมโมเนียในชุดทดลองที่แปรค่าความถี่ในการทำความสะอาด 4 ค่า คือ 7 14 21 และ 28 วัน/ครั้ง เท่ากับ 0.54±0.03 0.78±0.02 1.25±0.10 และ 1.56±0.12 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ



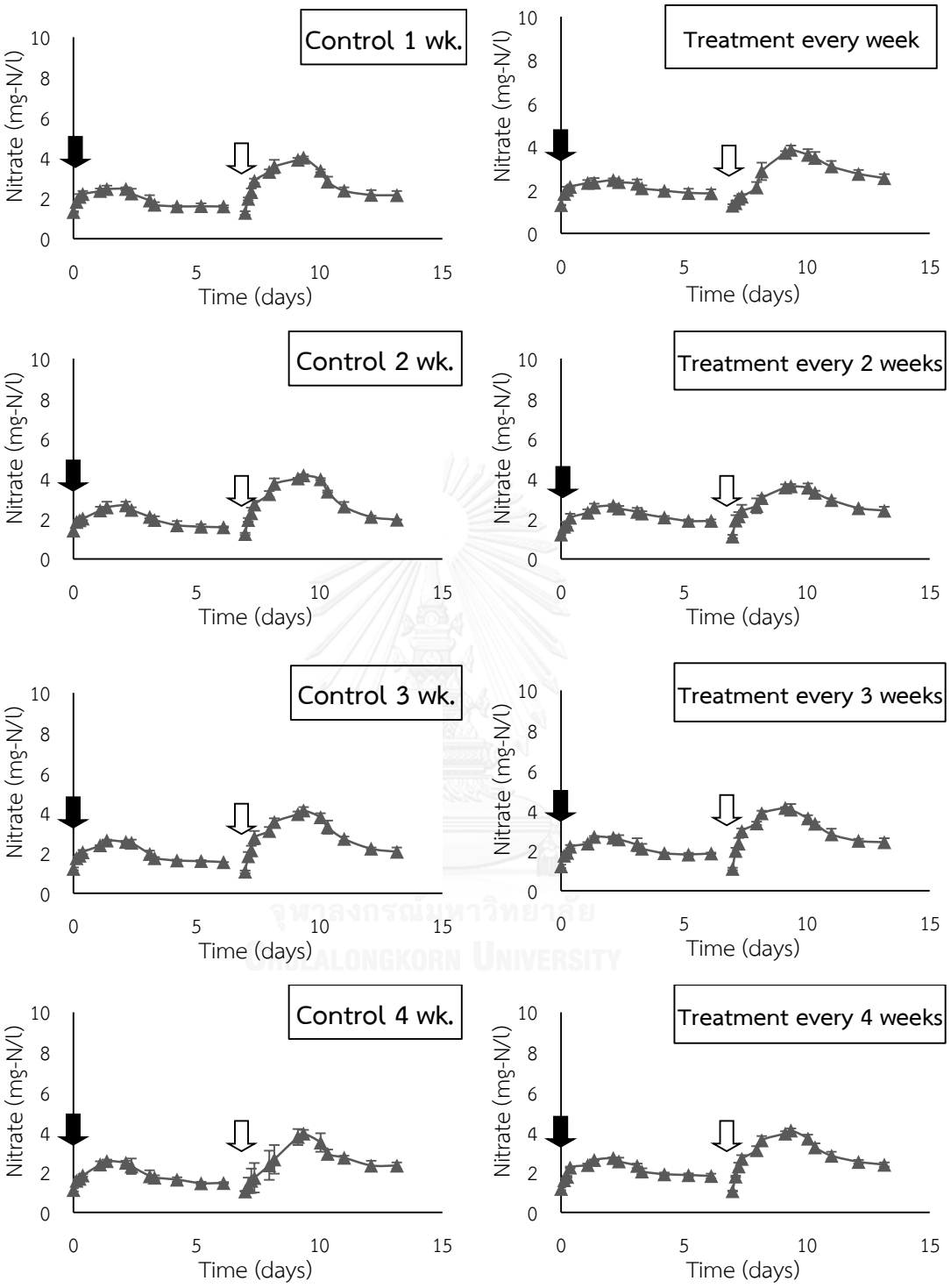
รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ระหว่างการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ



รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไทรต์ ระหว่างการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

สำหรับไนไทรต์ที่เกิดจากการออกซิไดซ์แอมโมเนียและการรีดิวซ์ไนเทรตสามารถเปลี่ยนรูปเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่มีการสะสมตัวในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.24 โดยชุดควบคุมที่ไม่มีการทำความสะอาดตัวกรองเป็นเวลา 1 2 3 และ 4 สัปดาห์ มีความเข้มข้นของไนไทรต์สูงสุดเพียง 0.03±0.01 0.02±0.00 0.04±0.00 และ 0.02±0.01 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับชุดทดลองที่ล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพด้วยความถี่ 1 2 3 และ 4 สัปดาห์/ครั้ง ซึ่งมีความเข้มข้นของไนไทรต์สูงสุดเท่ากับ 0.03±0.02 0.02±0.01 0.03±0.01 และ 0.07±0.01 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในการทดลองรอบที่ 2 พบว่าชุดทดลองที่ทำความสะอาดตัวกรองด้วยความถี่ 4 สัปดาห์/ครั้ง เกิดการสะสมตัวของไนไทรต์ซึ่งเป็นรูปของไนโตรเจนที่สามารถพบได้ระหว่างกระบวนการบำบัดที่ความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 0.08 ±0.03 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 9.13 ถึง 12.10 ของการทดลอง ทั้งนี้ไนไทรต์ที่เกิดขึ้นในระบบสามารถเปลี่ยนรูปเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้อย่างสมบูรณ์ในวันสุดท้ายของการทดลอง

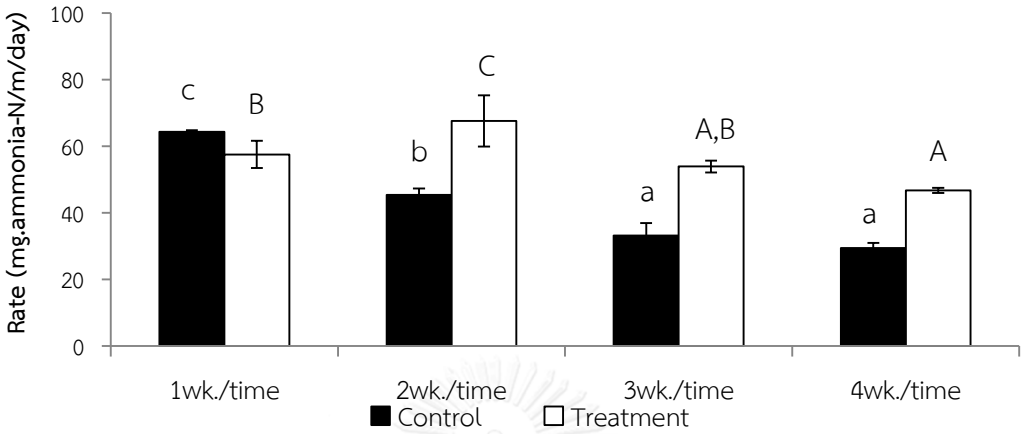
ผลการวิเคราะห์ปริมาณไนเทรตดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่าทุกชุดการทดลองสามารถบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ โดยในช่วงวันที่ 1.35–2.13 ของการทดลอง ตรวจพบการเพิ่มขึ้นของไนเทรตในชุดควบคุมที่ไม่มีการทำความสะอาดเป็นเวลา 1 2 3 และ 4 สัปดาห์ เท่ากับ 2.47±0.08 2.68±0.18 2.64±0.04 และ 2.57±0.06 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ และในชุดทดลองที่ทำความสะอาดด้วยความถี่ 1 2 3 และ 4 สัปดาห์/ครั้ง เท่ากับ 2.46±0.08 2.67±0.08 2.69±0.05 และ 2.72±0.03 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากนั้นไนเทรตที่เกิดขึ้นจะถูกรีดิวซ์ต่อผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชันจึงตรวจพบการลดลงของไนเทรตจนมีความต่ำสุดในช่วงวันที่ 5.19–6.10 ของการทดลอง เท่ากับ 1.59±0.05 1.59±0.03 1.56±0.00 1.46±0.07 1.84±0.19 1.90±0.08 1.81±0.08 และ 1.82±0.12 มก.-ไนโตรเจน/ล. สำหรับชุดควบคุมและชุดทดลองตามลำดับ และเมื่อทำการทดลองซ้ำในการทดลองรอบที่สองโดยเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียเริ่มต้นเป็น 2 เท่า พบว่าปริมาณไนเทรตที่เกิดขึ้นในแต่ละชุดการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 4.03±0.06 4.17±0.06 4.13±0.18 3.94±0.18 3.85±0.20 3.63±0.10 4.14±0.04 และ 4.10±0.09 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ และถูกบำบัดภายใต้สภาวะแอนน็อกซิกอย่างสมบูรณ์จนมีค่าต่ำกว่า 2.55±0.18 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในวันสุดท้ายของการทดลอง อย่างไรก็ตามผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ตัวกรองชีวภาพชุดควบคุมที่ไม่มีการทำความสะอาดสามารถบำบัดไนเทรตจนมีปริมาณคงเหลือในระบบน้อยกว่าชุดทดลองเมื่อเปรียบเทียบในวันเวลาเดียวกัน โดยการสะสมของตะกอนและสลัดจ์ภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดช่วยเร่งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มรีดิวซ์ไนเทรตได้อย่างมีประสิทธิภาพ



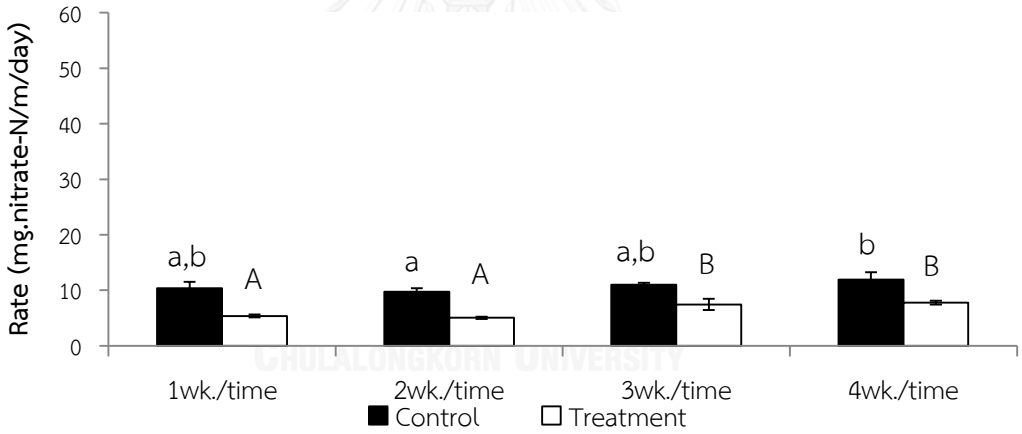
รูปที่ 4.25 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเทรต ระหว่างการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

จากการคำนวณอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด (รูปที่ 4.26 (ก)) พบว่าประสิทธิภาพการออกซิไดซ์แอมโมเนียของตัวกรองที่ไม่มีการทำความสะอาดเป็นเวลา 1 สัปดาห์ และตัวกรองที่ทำความสะอาดด้วยความถี่ 1 สัปดาห์/ครั้ง มีค่าใกล้เคียงกันเท่ากับ 64.30±0.53 และ 57.53±4.06 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่าที่ช่วงเวลาดังกล่าวยังไม่มีความจำเป็นในการทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับสัปดาห์ถัดไปพบว่าตัวกรองในชุดควบคุมมีการสะสมตัวของตะกอน อีกทั้งยังมีการเพิ่มความหนาของชั้นไบโอฟิล์มบนมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่แพร่ผ่านเข้าสู่ชั้นฟิล์มไม่เพียงพอต่อกิจกรรมของไนทริฟายเออร์จนอาจเกิดสภาวะขาดอาหารและอากาศ ส่งผลให้เกิดการตายและหลุดร่อนของจุลชีพ และประสิทธิภาพการบำบัดไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดลดลง โดยชุดควบคุมที่ไม่มีการทำความสะอาดเป็นเวลา 2 3 และ 4 สัปดาห์ มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับ 45.35±1.93 33.22±3.72 และ 29.45±1.56 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน ตามลำดับ ทั้งนี้การกำจัดตะกอนส่วนเกินโดยการแกว่งในน้ำสะอาดด้วยความถี่ 2 3 และ 4 สัปดาห์/ครั้ง สามารถเพิ่มอัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนียภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอได้ โดยมีอัตราการบำบัดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 67.61±7.69 53.90±1.81 และ 46.71±0.76 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน ตามลำดับ ซึ่งการทำความสะอาดตัวกรองด้วยความถี่ 2 สัปดาห์/ครั้ง เป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดอัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนียสูงสุด สอดคล้องกับงานวิจัยของธนทร ศรีสุข (2551) [38] ที่ระบุว่าตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่มีการล้างทำความสะอาดทุกสองสัปดาห์มีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียได้อย่างสมบูรณ์ โดยสามารถลดปริมาณตะกอนส่วนเกินและเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกับออกซิเจนของจุลชีพกลุ่มไนทริฟายเออร์ได้อย่างทั่วถึง อีกทั้งสามารถป้องกันไม่ให้เกิดการผลิตแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จากสภาวะแอนแอโรบิกภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพ ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพสัตว์น้ำ โดยยับยั้งการเจริญเติบโตและขัดขวางการขนส่งออกซิเจนภายในเซลล์ [13] ในส่วนของการประเมินอัตราการบำบัดไนเทรต พบว่าชุดควบคุมมีประสิทธิภาพการรีดิวซ์ไนเทรตสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาในการใช้งานนานขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ข) โดยอัตราดีไนทริฟิเคชันของชุดควบคุมที่ไม่ทำความสะอาดเป็นเวลา 1 2 3 และ 4 สัปดาห์ มีค่าเท่ากับ 10.40 ±1.10 9.73±0.65 11.03±0.31 และ 11.95±1.32 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวกรองชีวภาพที่ไม่มีการทำความสะอาดเป็นเวลา 4 สัปดาห์ มีประสิทธิภาพการบำบัดไนเทรตสูงสุด เนื่องจากการรวมกลุ่มกันของจุลชีพก่อให้เกิดการสร้างชั้นฟิล์มที่มีความหนาเพื่อปกป้องเซลล์จากสิ่งแวดล้อมภายนอก [6] ส่งผลให้ภายใต้ชั้นฟิล์มดังกล่าวเกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ไนเทรต ในทางกลับกันพบว่าการทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพด้วยความถี่ 1 2 3 และ 4 สัปดาห์/ครั้ง เป็นการทำลายเมือกไบโอฟิล์มส่งผลให้อัตราการรีดิวซ์

ไนเทรตลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 5.37±0.26 5.07±0.20 7.46±0.98 และ 7.78±0.33 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน ตามลำดับ



(ก) อัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด



(ข) อัตราดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

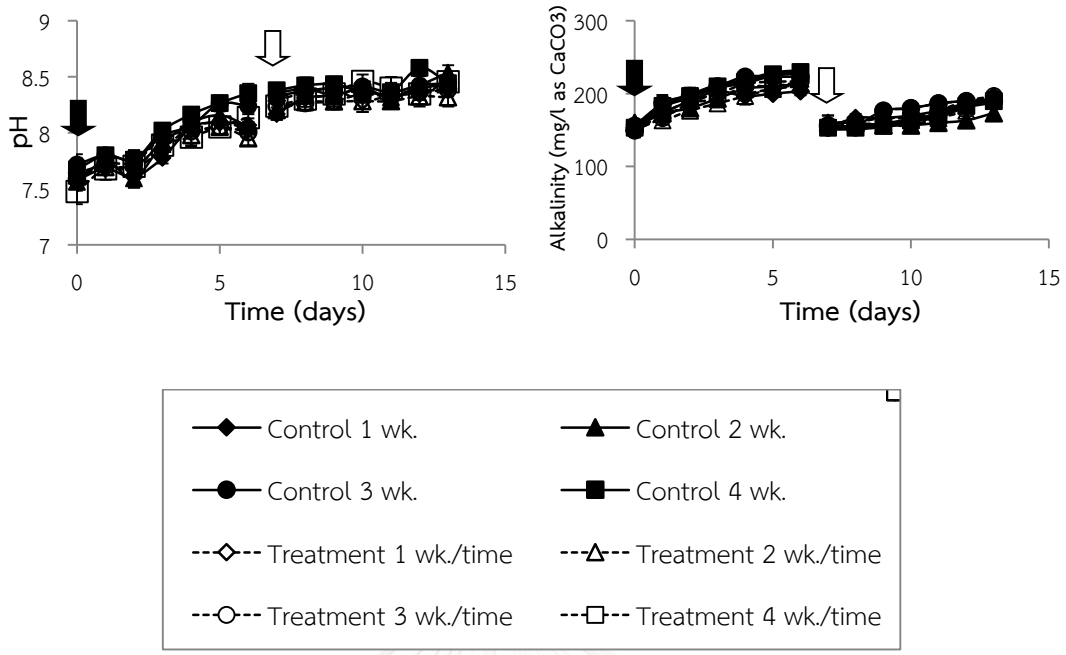
รูปที่ 4.26 อัตราการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 มก.-ไนโตรเจน/ล. เมื่อแปรค่าความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองแตกต่างกัน โดยตัวอักษรที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

จากผลการทดลองสามารถระบุได้ว่าการทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพโดยการแกว่งในน้ำสะอาดด้วยความถี่ 2 สัปดาห์/ครั้ง เป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย

สูงสุดและสามารถรีดิวซ์ไนเทรตที่เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ โดยมีอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน เท่ากับ 67.61±7.69 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน และ 5.07±0.20 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน ตามลำดับ แต่ทว่าเมื่อคำนึงถึงแนวทางสำหรับการทดลองช่วงที่ 3 ที่ต้องทำการยกโครงเหล็กที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพขึ้นจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อทำความสะอาดทุก 2 สัปดาห์ ในการทดลองจริงสามารถทำได้ยาก เนื่องจากตัวกรองที่เปียกน้ำมีน้ำหนักมาก ประกอบกับในการทดลองช่วงที่ 3 มีการตรวจวัดอัตราการเจริญเติบโตของปลานิลทุกเดือนด้วยการนับจำนวน ชั่งน้ำหนัก และวัดความยาว ดังนั้นการรบกวนบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำมากเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อการดำชีวิตของปลาทดลอง งานวิจัยนี้จึงเลือกให้ช่วงเวลาในการทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและการจับสัตว์น้ำเพื่อตรวจวัดอัตราการเจริญเติบโตให้อยู่ในช่วงเวลาเดียวกัน นั่นคือ ทำความสะอาดตัวกรองด้วยความถี่ 4 สัปดาห์/ครั้ง (ประมาณเดือนละหนึ่งครั้ง) ซึ่งตัวกรองที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยความถี่ดังกล่าวยังคงมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจน โดยมีอัตราไนทริฟิเคชัน เท่ากับ 46.71±0.76 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน และอัตราดีไนทรฟิเคชัน เท่ากับ 7.78±0.33 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน ตามลำดับ

- *การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด*

ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำระหว่างการทดลอง พบว่าค่าพีเอชของทุกชุดการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 7.61±0.07 จนมีค่าสูงสุดเมื่อสิ้นสุดการทดลอง เท่ากับ 8.43±0.06 (รูปที่ 4.27) ซึ่งเป็นผลมาจากการสมดุลพีเอชด้วยระบบบัฟเฟอร์จากกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน โดยพีเอชที่ตรวจวัดได้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรีย สอดคล้องกับรายงานของวิชัย ลาภจตุพร และอรทัย เดี่ยววาณิชย์ (2535) [19] ที่ระบุว่าที่พีเอชต่ำกว่า 7.0 หรือสูงกว่า 8.5 สามารถส่งผลยับยั้งการทำงานของจุลชีพกลุ่มไนทริฟายเออร์ และก่อให้เกิดการสะสมตัวของแอมโมเนียและไนไทรต์ในระบบได้ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของพีเอชยังสอดคล้องกับการผลิตค่าสภาพความเป็นด่าง นั่นคือค่าความเป็นด่างของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้นจนมีค่าเฉลี่ยสูงสุดในการทดลองทั้ง 2 รอบ เท่ากับ 215.83±8.12 และ 191.25±7.75 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ตามลำดับ ส่วนปริมาณออกซิเจนละลายของทุกชุดการทดลองมีค่าเหมาะสมต่อการทำงานของตัวกรองไนทริฟิเคชันเฉลี่ยเท่ากับ 6.89±0.45 มก.-ออกซิเจน/ล. ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และด้านในของชั้นฟิล์มชีวภาพซึ่งเป็นบริเวณที่ออกซิเจนแพร่ผ่านชั้น Stagnant layer ลงมาไม่ถึงก่อให้เกิดสภาวะกึ่งไร้อากาศหรือแอนน็อกซิก โดยแบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟายเออร์สามารถรีดิวซ์ไนเทรตผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ ภายใต้อุณหภูมิระหว่างการทดลองในช่วง 25.10±0.17 ถึง 26.73±0.06 °ซ



รูปที่ 4.27 ค่าพีเอช และความเป็นด่าง ระหว่างการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

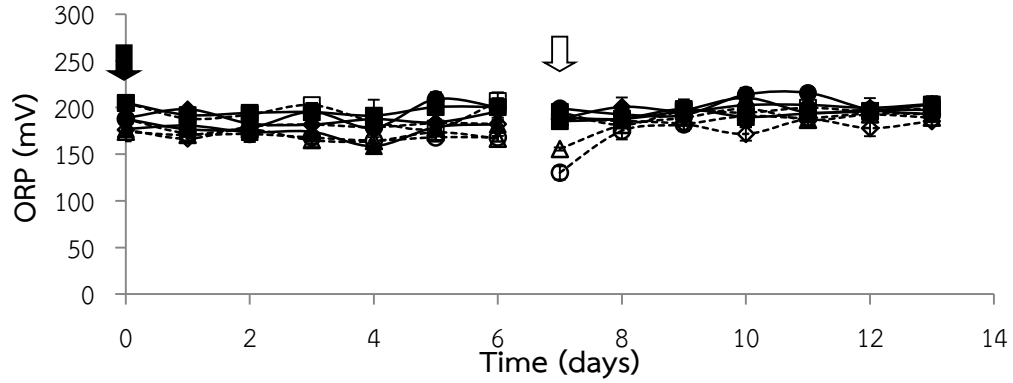
ตารางที่ 4. 4 คุณภาพน้ำระหว่างการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดควบคุมและชุดทดลองที่ทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพด้วยความถี่ 1 2 3 และ 4 สัปดาห์/ครั้ง

พารามิเตอร์	**ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด–ค่าสูงสุด)**	
	ชุดควบคุม (1 สัปดาห์)	**ชุดทดลอง (1 สัปดาห์/ครั้ง)**
ออกซิเจนละลายน้ำ	6.95±0.50	6.89±0.47
(มก.-ออกซิเจน/ล.)	(6.20–7.63)	(6.27–7.43)
อุณหภูมิ	25.87±0.51	25.84±0.48
(°ซ)	(25.27–26.50)	(25.33–26.50)

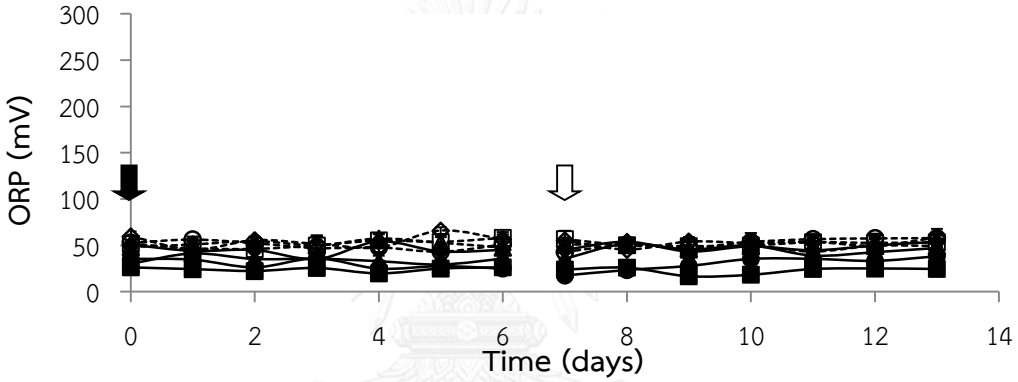
ตารางที่ 4.4 คุณภาพน้ำระหว่างการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดควบคุมและชุดทดลองที่ทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพด้วยความถี่ 1 2 3 และ 4 สัปดาห์/ครั้ง (ต่อ)

	ชุดควบคุม (2 สัปดาห์)	**ชุดทดลอง (2 สัปดาห์/ครั้ง)**
ออกซิเจนละลายน้ำ	6.81±0.42	6.89±0.40
(มก.-ออกซิเจน/ล.)	(6.27–7.57)	(6.20–7.47)
อุณหภูมิ	25.82±0.62	25.91±0.59
(°ซ)	(25.10–26.73)	(25.10–26.67)
	ชุดควบคุม (3 สัปดาห์)	**ชุดทดลอง (3 สัปดาห์/ครั้ง)**
ออกซิเจนละลายน้ำ	6.93±0.37	6.94±0.46
(มก.-ออกซิเจน/ล.)	(6.07–7.37)	(6.47–7.67)
อุณหภูมิ	25.90±0.56	25.94±0.57
(°ซ)	(25.17–26.63)	(25.20–26.73)
	ชุดควบคุม (4 สัปดาห์)	**ชุดทดลอง (4 สัปดาห์/ครั้ง)**
ออกซิเจนละลายน้ำ	6.80±0.64	6.96±0.41
(มก.-ออกซิเจน/ล.)	(5.77–7.70)	(6.10–7.43)
อุณหภูมิ	25.74±0.55	25.80±0.63
(°ซ)	(25.10–26.67)	(25.17–26.67)

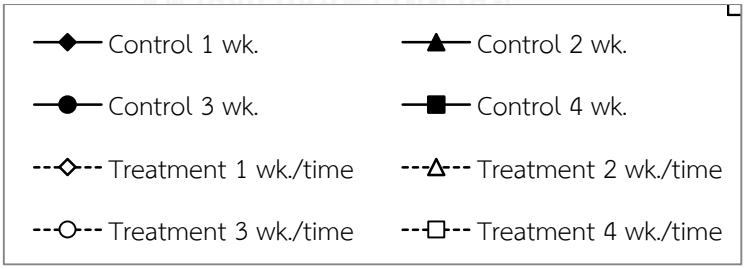
การวิเคราะห์ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันภายในถังปฏิกรณ์ พบว่าทุกชุดการทดลองมีค่าโออาร์พีเป็นบวกอยู่ในช่วงเหมาะสมสำหรับกระบวนการออกซิไดซ์แอมโมเนีย นั่นคือ 130.10±7.04 ถึง 215.67±5.97 มิลลิโวลต์ (รูปที่ 4.28 (ก)) ส่วนค่าโออาร์พีภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพมีค่าเป็นบวกต่ำกว่าในถังปฏิกรณ์อยู่ในช่วง 17.50±2.17 ถึง 59.67±5.49 มิลลิโวลต์ ดังรูปที่ 4.28 (ข) โดยชุดควบคุมที่ไม่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองมีค่าโออาร์พีต่ำกว่าชุดทดลอง เนื่องจากการสะสมของตะกอนจุลชีพส่วนเกินก่อให้เกิดการสร้างชั้นฟิล์มที่มีความหนา ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนสามารถแพร่เข้าสู่ด้านในของตัวกรองชีวภาพได้น้อยลง



(ก) ค่าโออาร์พีภายในถังปฏิกรณ์



(ข) ค่าโออาร์พีภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพ



รูปที่ 4.28 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ระหว่างการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

4.3 การประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

- *การประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ*

การทดลองช่วงนี้เป็นประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดภายในโรงเรือนของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำความหนาแน่นสูงเป็นเวลา 7 สัปดาห์ (จากการทดลองช่วงที่ 1) และอาศัยข้อมูลสภาวะการเดินระบบบำบัดร่วมที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 2 ซึ่งเน้นการออกซิไดซ์แอมโมเนียที่มีความเป็นพิษสูงต่อสัตว์น้ำ และสามารถบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นได้บางส่วนโดยไม่มีการเติมเมทานอล (จากการทดลองช่วงที่ 2.1) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของสัตว์น้ำ และป้องกันการยับยั้งการทำงานของไนทริฟายอิงแบคทีเรีย โดยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันยังคงสามารถเกิดขึ้นได้โดยอาศัยสารอินทรีย์คาร์บอนจากสลัดจ์และตะกอนชีวภาพตามธรรมชาติภายในระบบ ในการทดลองช่วงนี้จะทำการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพด้วยการแกว่งในน้ำสะอาด (จากการทดลองช่วงที่ 2.2) เพื่อกำจัดปริมาณตะกอนส่วนเกินซึ่งเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดสภาวะไร้อากาศภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพซึ่งมีผลยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟด้วยความถี่ 4 สัปดาห์/ครั้ง (จากการทดลองช่วงที่ 2.3) นอกจากนี้ยังอาศัยข้อมูลอัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนียและรีดิวซ์ไนเทรตต่อหนึ่งหน่วยความยาวของตัวกรองชีวภาพผ่านกระบวนการบำบัดร่วม (มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน) ที่ได้จากการทดลองช่วงที่ 2.3 ซึ่งเป็นค่าสุดท้ายจากการเดินระบบการทดลองผ่านกระบวนการบำบัดร่วมโดยมีอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเท่ากับ 46.71±0.76 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน และ 7.78±0.33 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน ตามลำดับ เพื่อใช้ในการคำนวณออกแบบความยาวของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ติดตั้งภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำสำหรับชุดทดลองตามสมการที่ (3.9) และ (3.10)

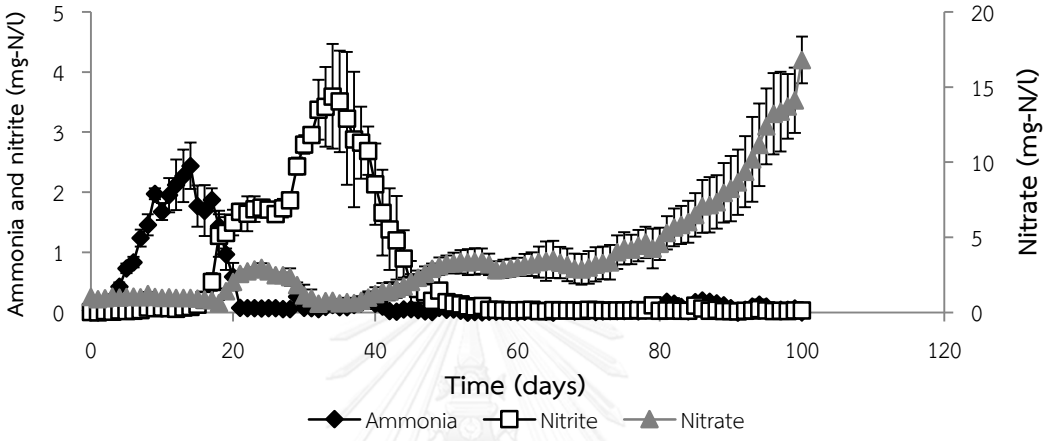
จากการคำนวณ (ภาคผนวก จ) พบว่าตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดความยาว 15 ม. สามารถรองรับการบำบัดของเสียจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำความหนาแน่น 2 กก./ลบ.ม. ของปริมาตรน้ำจืดในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำปริมาตร 200 ล. ได้อย่างเพียงพอ ติดตั้งเครื่องเติมอากาศแบบหัวฟู่โดยควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายให้มีค่ามากกว่า 4 มก.-ออกซิเจน/ล. เพื่อป้องกันการตกตะกอนซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดสภาวะไร้อากาศแบบแอนแอโรบิกบริเวณพื้นบ่อ เดินระบบการทดลองแบบต่อเนื่องโดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำเป็นเวลา 100 วัน เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งตัวระบบบำบัดกับชุดทดลองซึ่งติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน พบว่าช่วงแรกของการทดลอง (วันที่ 7–18 ของการทดลอง) ชุดควบคุมมีแอมโมเนียที่เกิดจากการเปลี่ยนโปรตีนจากเศษอาหารและสิ่งขับถ่ายของสัตว์น้ำซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ให้อยู่ในรูปของอนินทรีย์ไนโตรเจนหรือแอมโมเนียผ่านกระบวนการไนโตรเจนมิเนอรัลไลเซชัน โดยอาศัยการทำงานของแอมโมนิฟายอิงแบคทีเรียและแบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟที่แขวนลอยอยู่ในระบบ โดยปริมาณแอมโมเนียที่ตรวจพบมีระดับความเข้มข้นสูงกว่า 1.00 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. นั่นคือมีค่าสูงสุดในวันที่ 14 ของการทดลอง เท่ากับ 2.44±0.39 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. (รูปที่ 4.29 (ก)) อย่างไรก็ตามเนื่องจากมีการควรคุมระดับพีเอชในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำให้มีค่าอยู่ในช่วง 6.85±0.05 ถึง 7.85±0.01ทำให้แอมโมเนียที่เกิดขึ้นดังกล่าวอยู่ในรูปของแอมโมเนียมอิออนซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อปลาทดลอง ทั้งนี้ถ้าระดับพีเอชสูงขึ้นอาจส่งผลให้สมดุลย้อนกลับโดยแอมโมเนียจะถูกเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปที่ไม่แตกตัวหรือแอมโมเนียอิสระซึ่งมีความเป็นพิษสูงต่อสัตว์น้ำ จากงานวิจัยของ Liao และ Mayo (1972) [59] ระบุว่าแอมโมเนียอิสระสามารถส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 0.5 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ในขณะที่มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา (2538) [12] รายงานว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียเพียง 0.025 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. สามารถส่งผลกระทบต่อการอัตราการเติบโตและการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ จากนั้นแอมโมเนียที่เกิดขึ้นถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของไนไทรต์ผ่านกระบวนการไนไทรทริฟิเคชันโดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มแอมโมเนียมออกซิไดซ์ซิง จึงตรวจพบการเพิ่มขึ้นของไนไทรตในระบบสูงกว่า 1.00 มก.ไนไทรต์-ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 18–43 ของการทดลอง และมีค่าสูงสุดในวันที่ 34 ของการทดลอง เท่ากับ 3.60±0.87 มก.ไนไทรต์-ไนโตรเจน/ล. และสุดท้ายไนไทรต์ที่เกิดขึ้นถูกออกซิไดซ์ต่อจนอยู่ในรูปของไนเทรตซึ่งมีความเสถียรมากกว่าโดยอาศัยการทำงานของไนไทรต์ออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย จึงตรวจพบการเพิ่มขึ้นของไนเทรตในช่วงวันที่ 19–30 ของการทดลอง ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 2.98±0.29 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. จากนั้นไนเทรตที่เกิดขึ้นเริ่มลดลงและตรวจพบการเพิ่มขึ้นของไนไทรต์แทน ซึ่งเป็นผลมาจากการรีดิวซ์ไนเทรตผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชันแบบไม่สมบูรณ์ โดยอาจมีสาเหตุมาจากแหล่งอินทรีย์คาร์บอนตามธรรมชาติภายในระบบไม่เพียงพอสำหรับแบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟายเออร์ [5] อย่างไรก็ตามกระบวนการบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นในบ่อควบคุมสามารถเกิดขึ้นได้น้อยมากเมื่อเทียบกับกระบวนการบำบัดแอมโมเนีย เนื่องจากภายในบ่อไม่มีบริเวณที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มเฮทเทอโรโทรฟ ส่งผลให้ไนเทรตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 4.01±1.12 ในวันที่ 74 ของการทดลอง จนมีค่าสูงสุดในวันสุดท้ายของการทดลองเท่ากับ 16.81±1.56 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. ทั้งนี้เนื่องจากไนเทรตเป็นสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนที่มีความเสถียรและมีความเป็นพิษน้อยที่สุด โดยปริมาณไนเทรตที่เกิดขึ้นยังอยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อปลาทดลอง จากรายงานของกษิดิศ หนูทอง (2551) [3] ระบุว่าความเข้มข้นของไนเทรต

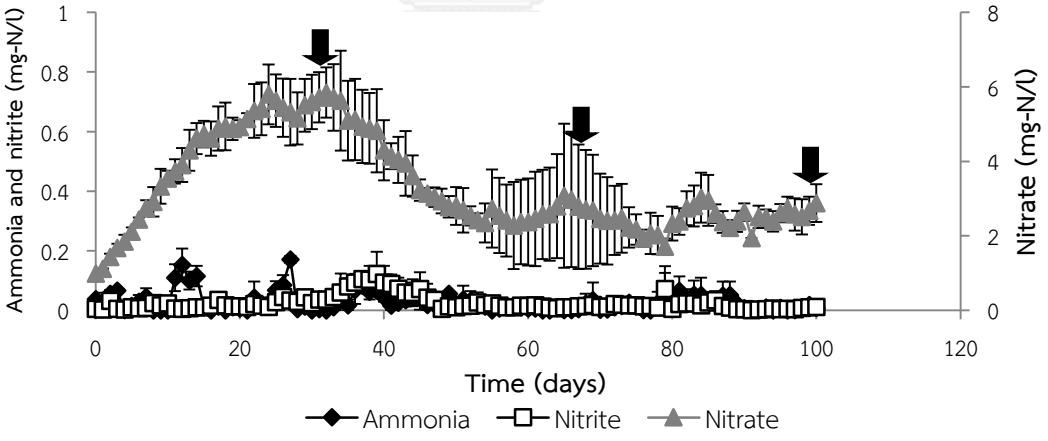
ที่เหมาะสมในการเลี้ยงสัตว์น้ำในทางปฏิบัติควรมีค่าไม่เกิน 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. สำหรับชุดทดลองที่มีการติดตั้งระบบบำบัดอนินทรีย์ไนโตรเจนด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ พบว่าตัวกรองมีประสิทธิภาพในการควบคุมปริมาณแอมโมเนียและไนไทรต์ให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sesuk และคณะ (2009) [4] เอกชัย มาลาพล (2551) [5] และทยากร สุวรรณรัตน์ (2552) [20] โดยมีค่าต่ำกว่า 0.17±0.01 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. และ 0.12±0.07 มก.ไนไทรต์-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ (รูปที่ 4.29 (ข)) ส่วนไนเทรตที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิไดซ์สามารถรีดิวซ์ต่อโดยอาศัยสารอินทรีย์คาร์บอนตามธรรมชาติภายในระบบเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับแบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟ ภายใต้สภาวะแอนน็อกซิกในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด นอกจากนี้ดีไนทริฟายเออร์ยังสามารถเจริญเติบโตและทำงานได้ในบางบริเวณไม่มีการสัมผัสกับอากาศ ตัวอย่างเช่น บริเวณด้านในของตัวกรองที่พันติดอยู่กับตะแกรงเหล็กเป็นต้น จากการวิเคราะห์ปริมาณไนเทรตพบว่าตัวกรองชีวภาพสามารถควบคุมปริมาณความเข้มข้นของไนเทรตในระบบให้มีค่าต่ำกว่า 5.85±0.68 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. สอดคล้องกับรายงานของ Suhr and Pedersen (2010) [37] ที่ระบุว่าการเดินระบบบำบัดแบบต่อเนื่องด้วยตัวกรองชีวภาพแบบตัวกลางไม่เคลื่อนที่ส่งผลให้เกิดอัตราการบำบัดสูง เนื่องจากแบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตและสร้างชั้นไบโอฟิล์มบนตัวกลางได้ดีกว่าตัวกรองแบบเคลื่อนที่ นอกจากนี้การล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพระหว่างการทดลองโดยแกว่งตัวกรองในน้ำสะอาดด้วยความถี่ 4 สัปดาห์/ครั้ง สามารถควบคุมปริมาณตะกอนจุลชีพสะสมและช่วยรักษาสมดุลระหว่างสภาวะที่มีอากาศกับสภาวะกึ่งไร้อากาศให้เหมาะสมสำหรับการเกิดกระบวนการบำบัดร่วม อีกทั้งสามารถป้องกันการเกิดกลิ่นเหม็นจากสภาวะไร้อากาศหรือแอนแอโรบิก และยับยั้งการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟล์ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพสัตว์น้ำและการทำงานของจุลชีพภายในระบบ [25]

ผลการวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบ พบว่าชุดควบคุมมีปริมาณของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นจาก 24.00±2.00 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. ในวันแรกของการทดลอง จนมีค่าสูงสุดในวันสุดท้ายของการทดลองเท่ากับ 581.56±116.70 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. (รูปที่ 4.30) จากรายงานของปกฉัตร ชูติวิศุทธิ์ (2552) [21] ระบุว่าของแข็งแขวนลอยเกิดจากอาหารสัตว์น้ำส่วนที่เหลือจากบริโภคและถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์แขวนลอยภายในระบบ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 25 ของปริมาณอาหารที่ให้ทั้งหมด สำหรับชุดทดลองที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดสามารถควบคุมปริมาณตะกอนแขวนลอยในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นผลมาจากตัวกรองมีพื้นที่ผิวจำเพาะในการยึดเกาะของจุลชีพสูง รวมถึงการขดพันกันเป็นเกลียวของไบโอคอร์ดยังมีส่วนช่วยเพิ่มความสามารถในการกักเก็บตะกอนแขวนลอยภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพ [5, 20, 38] ส่งผลให้น้ำในบ่อทดลองมีความใสมากกว่าบ่อควบคุมดังแสดงในรูปที่ 4.31 โดยปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ตรวจวัดได้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อปลาทดลอง เท่ากับ 4.22±0.96 ถึง

86.67±2.33 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. สอดคล้องกับงานวิจัยของ Timmons และคณะ (2002) [58] ที่ระบุว่าควรควบคุมปริมาณของแข็งแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำให้มีค่าต่ำกว่า 80 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการบดบังการหาอาหารและการอุดตันบริเวณเหงือกของสัตว์น้ำ นอกจากนี้อนุภาคของแข็งแขวนลอยซึ่งเป็นสารอินทรีย์สามารถเกิดการย่อยสลายตามธรรมชาติจึงเป็นสาเหตุให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในระบบลดลง

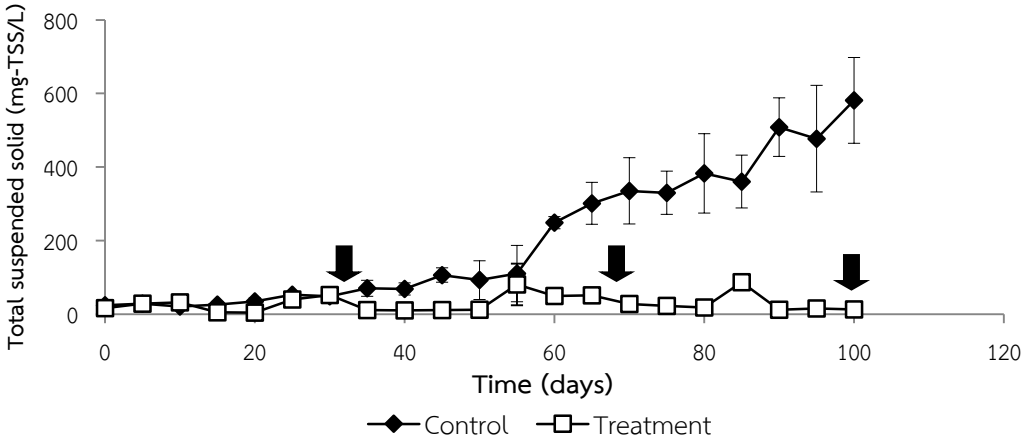


(ก) ชุดควบคุม (ไม่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ)



(ข) ชุดทดลอง (มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ)

รูปที่ 4.29 ปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ระหว่างการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ โดย ⬇ แสดงการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพสำหรับชุดทดลอง

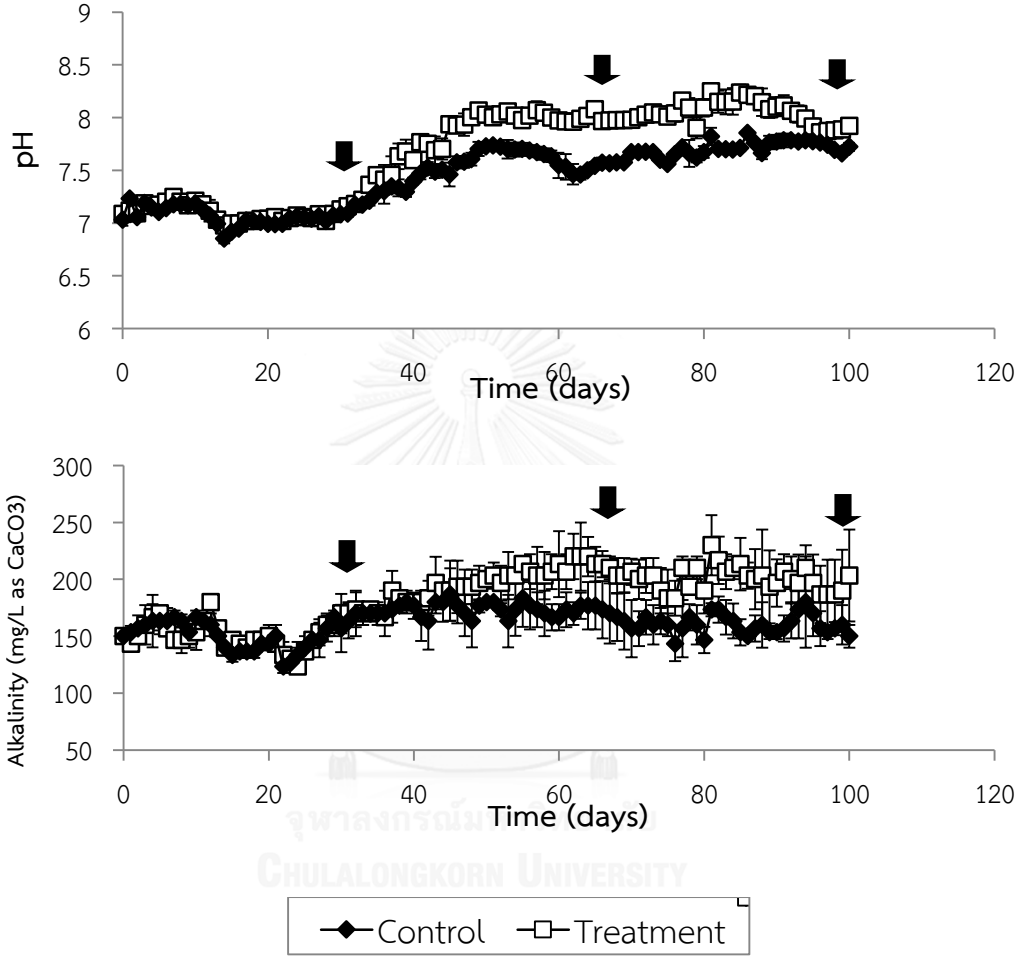


รูปที่ 4.30 ปริมาณตะกอนแขวนลอยในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ ระหว่างการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ โดย ⬇ แสดงการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพสำหรับชุดทดลอง

รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำระหว่างชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในวันที่ 10 ของการทดลอง

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำระหว่างการทดลอง พบว่าค่าพีเอชของบ่อควบคุมมีค่าคงที่อยู่ในช่วง 6.85±0.05 ถึง 7.85±0.01 เนื่องจากสภาพความเป็นด่างจากกระบวนการดีไนทริฟิเคชันที่เกิดขึ้นบริเวณตะกอนก้นบ่อสามารถรักษาสมดุลพีเอชในระบบได้บางส่วน สำหรับชุดทดลองที่มีการติดตั้งโครงตะแกรงเหล็กที่พันด้วยตัวกรองชีวภาพภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งมีบริเวณที่ออกซิเจนแพร่เข้าไปไม่ถึงและเกิดสภาวะแอนน็อกซิกเป็นจำนวนมาก จึงมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้น

จากวันแรกของการทดลองเท่ากับ 6.98±0.04 จนมีค่าเท่ากับ 8.25±0.05 ในวันสุดท้ายของการทดลอง (รูปที่ 4.32) ทั้งนี้ค่าพีเอชที่ตรวจวัดได้ระหว่างการทดลองยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต



รูปที่ 4.32 ค่าพีเอช และความเป็นด่าง ระหว่างการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ โดย ⬇ แสดงการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพสำหรับชุดทดลอง

สำหรับความเป็นด่างของบ่อควบคุมมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้น-ลงอยู่ในช่วง 123.33±5.77 ถึง 186.67±23.09 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. จากสภาพความเป็นด่างเริ่มต้นเท่ากับ 150.00±0.00 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ซึ่งการลดลงของค่าความเป็นด่างเป็นผลมาจากกระบวนการออกซิไดซ์แอมโมเนียโดยจุลชีพแขวนลอยภายในระบบ และการเพิ่มขึ้นของสภาพความเป็นด่างเกิดจากกระบวนการดีไนทริฟิเคชันบริเวณตะกอนก้นบ่อ อย่างไรก็ตามค่าที่ตรวจวัดได้ยังมีค่าน้อย

เมื่อเปรียบเทียบกับรายงานของมั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา (2538) [12] ที่ระบุว่าสภาพความเป็นด่างในน้ำที่ใช้เลี้ยงปลานิลควรมีค่าอยู่ในช่วง 200–300 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. เนื่องจากภายในบ่อควบคุมมีบริเวณที่เกิดสภาวะกึ่งไร้อากาศหรือแอนน็อกซิกจำนวนไม่มาก ประกอบกับระบบบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำในโรงเรือนเป็นระบบที่ไม่มีดินตะกอนก้นบ่อ ทำให้การผลิตไบคาร์บอเนตจากกระบวนการบำบัดไนเทรตเกิดขึ้นได้น้อย ส่วนบ่อทดลองมีการเพิ่มขึ้นของสภาพความเป็นด่างจากความเข้มข้นเริ่มต้น 150.00±0.00 จนมีค่าสูงสุด 220.00±30.00 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. โดยทั่วไปกระบวนการไนทริฟิเคชันภายในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำส่งผลให้ค่าความเป็นด่างลดลง แต่เนื่องจากชุดทดลองมีบริเวณที่เกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันเป็นจำนวนมาก ซึ่งได้แก่ ภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด รวมถึงบริเวณด้านข้างทั้งสองฝั่งของตัวกรองที่แนบติดกับพื้นผิวของบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ ส่งผลให้สภาพความเป็นด่างในระบบเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

นอกจากนี้ตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าปริมาณออกซิเจนละลายของบ่อควบคุมและบ่อทดลองมีค่าคงที่เฉลี่ยเท่ากับ 7.59±0.51 และ 7.39±0.55 มก.-ออกซิเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำและการทำงานของไนทริฟายอิงแบคทีเรีย สอดคล้องกับรายงานมานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ (2536) [17] ที่ระบุว่าปริมาณออกซิเจนที่เหมาะสมในการเลี้ยงปลานิลควรอยู่ระหว่าง 5 มก.-ออกซิเจน/ล. จนถึงจุดอิ่มตัว สำหรับอุณหภูมิของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำในโรงเรือนมีค่าอยู่ในช่วง 26.10±0.10 ถึง 31.77±0.72 °ซ ซึ่งเหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต สอดคล้องกับรายงานของมานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ (2536) [17] ที่ระบุว่าปลานิลสามารถทนอุณหภูมิได้ในช่วงกว้างเท่ากับ 10–42 °ซ และธงชัย พรรณสวัสดิ์ (2554) [25] ที่ระบุว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทางชีวภาพควรมีค่าประมาณ 30–36 °ซ ส่วนค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันภายในบ่อควบคุมและบ่อทดลองมีค่าเป็นบวกคงที่เฉลี่ยเท่ากับ 148.62±22.00 และ 164.23±23.31 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าโออาร์พีเป็นตัวบ่งบอกถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นในระบบ นั่นคือแบคทีเรียแขวนลอยรวมถึงตะกอนจุลชีพบนมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดสามารถอาศัยปริมาณออกซิเจนละลายในระบบเป็นตัวรับอิเล็คตรอนในกระบวนการออกซิไดซ์แอมโมเนียที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงสัตว์น้ำผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน ส่วนภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพที่ติดตั้งในบ่อทดลอง พบว่ามีค่าโออาร์พีเป็นบวกต่ำกว่าภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำซึ่งเป็นผลมาจากการกระบวนการรีดิวซ์ไนเทรตของจุลินทรีย์กลุ่มดีไนทริฟายเออร์ โดยมีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง 44.57±6.34 ถึง 113.33±7.80 มิลลิโวลต์

ตารางที่ 4.5 คุณภาพน้ำระหว่างการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ สำหรับชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในบ่อ

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด–ค่าสูงสุด)	
	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
ออกซิเจนละลายน้ำ	7.59±0.51	7.39±0.55
(มก.-ออกซิเจน/ล.)	(6.57–9.23)	(6.43–9.10)
อุณหภูมิ	28.27±1.20	27.88±0.97
(°ซ)	(26.13–31.77)	(26.10–31.77)
ค่าโออาร์พีภายในถังปฏิกรณ์	148.62±22.00	164.23±23.31
(มิลลิโวลต์)	(102.21–191.63)	(109.73–204.37)
ค่าโออาร์พีภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพ	-	73.02±14.45
(มิลลิโวลต์)		(38.33–113.33)

- *การประเมินประสิทธิภาพของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ*

ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำที่ทำการศึกษาประกอบด้วยบ่อควบคุม (จำนวน 3 บ่อ) และบ่อทดลองที่ทำการติดตั้งตัวกรองชีวภาพในบ่อเลี้ยง (จำนวน 3 บ่อ) โดยทำการเลี้ยงปลานิลบ่อละ 6 ตัว ที่น้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 18.15±0.76 และ 18.48±0.31 กก./ตัว ตามลำดับ และความยาวเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 10.81±0.29 และ 10.92±0.22 ซม./ตัว หรือคิดเป็นความหนาแน่นเริ่มต้นเท่ากับ 0.54±0.02 และ 0.55±0.01 กก./ลบ.ม. ของปริมาตรน้ำจืดในบ่อ ตามลำดับ ให้อาหารทุกวันด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูป โดยในวันที่ 1–15 ของการทดลอง ทำการให้อาหารปลาในอัตราร้อยละ 5 ของน้ำหนักปลาทั้งหมดในบ่อต่อวัน แต่พบว่าปลาทดลองกินอาหารไม่หมดจึงลดปริมาณอาหารลงเหลือร้อยละ 4 จากนั้นทำการเพิ่มปริมาณอาหารอีกครั้งตั้งแต่วันที่ 33 ถึงวันสุดท้ายของการทดลอง ทำการเลี้ยงปลานิลด้วยระบบปิดภายใต้สภาวะจำลองของระบบบ่อไร้ดินภายในโรงเรือนเป็นระยะเวลา 100 วัน เก็บข้อมูลการเติบโตและอัตราการรอดตายของสัตว์น้ำด้วยการชั่งน้ำหนัก วัดความยาว และนับจำนวนปลาก่อนการทดลอง และระหว่างการทดลองทุก 30 วัน

จากการตรวจวัดการเจริญเติบโตของปลานิลในบ่อควบคุม (ตารางที่ 4.6) พบว่าปลาส่วนใหญ่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ โดยพบการตายของปลาบางส่วนซึ่งคาดว่าน่าจะมีสาเหตุมาจากปริมาณแอมโมเนียในระบบมีค่าสูงกว่า 0.025 มก.-ไนโตรเจน/ล. [12] โดยในวันที่ 11 และ 13 ของการทดลอง ตรวจพบระดับแอมโมเนียเท่ากับ 1.95±0.29 และ 2.27±0.44 มก.-ไนโตรเจน/ล.

นอกจากนี้ยังพบการตายของปลาในวันที่ 65 69 และ 93 ของการทดลอง ซึ่งคาดว่ามีสาเหตุมาจากระบบมีปริมาณตะกอนแขวนลอยสูงกว่า 80 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. [58] ตรวจพบปริมาณตะกอนแขวนลอย เท่ากับ 301.22±57.08 335.22±89.87 และ 477.111±44.98 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. ในส่วนของบ่อทดลอง พบว่ามีคุณภาพน้ำเหมาะสมสำหรับการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ โดยสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตราย แต่ทว่าเนื่องจากไบโอคอร์ดมีประสิทธิภาพในการกักเก็บตะกอนแขวนลอยสูงทำให้น้ำในชุดทดลองมีความใสมากจนสามารถมองเห็นปลานิลในบ่อ และพบว่าปลาสามารถมองเห็นกันได้จึงมีการกัดกัน โดยปลาตัวใหญ่จะแย่งอาหารและกัดปลาตัวเล็ก ทำให้เกิดบาดแผลบริเวณผิวหนังและครีบ ปลาตัวเล็กจึงเข้าไปหลบซ่อนบริเวณช่องว่างระหว่างตะแกรงเหล็กที่มีการพันตัวกรองชีวภาพ ทำให้ไม่สามารถออกมาได้และตายในที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าปลาบางตัวมีอาการเซื่องซึม โดยว่ายน้ำแบบเชื่องช้าบริเวณผิวน้ำ มีการตกเลือดบริเวณครีบ และตาขุ่นหรือบวมออกมา ซึ่งเมื่อสอบถามข้อมูลจากศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าเป็นอาการของโรคที่เกิดจากเชื้อแบคทีเรีย จึงมีการแยกปลาออกมาและเลี้ยงในน้ำจืดที่ผสมด้วย Oxytetracycline Hydrochloride เพื่อป้องกันการติดโรคของปลาตัวอื่นภายในบ่อทดลอง อย่างไรก็ตามเมื่อพบปลาตายจะทำการใส่ปลาตัวใหม่ที่มีน้ำหนักและความยาวใกล้เคียงตัวเดิมเพื่อคงระดับความหนาแน่นในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำให้มีค่าเท่าเดิม จากการประเมินประสิทธิภาพของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ พบว่าในวันสุดท้ายของการทดลอง บ่อควบคุมและบ่อทดลองมีอัตราการเจริญเติบโตของปลานิล เท่ากับ 1.03 และ 0.93 ก./วัน อัตราการรอดเท่ากับร้อยละ 72.22±25.45 และ 66.67±0.00 และอัตราการแลกเนื้อเท่ากับ 2.58±0.20 และ 2.62±0.27 ตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นที่เลี้ยงปลานิลด้วยระบบปิดภายใต้สภาวะจำลองของระบบบ่อไร้ดินภายในโรงเรือนดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่างานวิจัยนี้มีอัตราการเจริญเติบโตค่อนข้างสูง แต่ทว่าอัตราการรอดตายมีค่าต่ำ โดยการตายของสัตว์น้ำเป็นผลมาจากการเกิดโรคและติดเชื้อภายในระบบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.6 การเจริญเติบโตของปลานิลระหว่างการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ สำหรับชดควบคมที่ไม่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในบ่อ

วันที่	อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (ก./วัน)	น้ำหนักเฉลี่ย (ก./ตัว)	ความยาวเฉลี่ย (ซม./ตัว)	อัตราการรอด (%)	อัตราการแลกเนื้อ	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)
1		18.15 ± 0.76	10.81 ± 0.29			0.54 ± 0.02
1-33	0.31	28.39 ± 1.40	12.39 ± 0.05	88.89 ± 9.62		0.85 ± 0.04
33-66	0.50	45.04 ± 2.00	14.08 ± 0.22	83.33 ± 16.67		1.35 ± 0.06
66-100	1.03	76.98 ± 3.25	16.17 ± 0.38	72.22 ± 25.45	2.61 ± 0.20	2.31 ± 0.10

ตารางที่ 4.7 การเจริญเติบโตของปลานิลระหว่างการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ สำหรับชุดทดลองที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในบ่อ

วันที่	อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (ก./วัน)	น้ำหนักเฉลี่ย (ก./ตัว)	ความยาวเฉลี่ย (ซม./ตัว)	อัตราการรอด (%)	อัตราการแลกเนื้อ	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)
1		18.48 ± 0.31	10.92 ± 0.22			0.55 ± 0.01
1-33	0.30	28.33 ± 1.55	12.42 ± 0.29	83.33 ± 23.57		0.85 ± 0.05
33-66	0.50	44.75 ± 4.30	13.25 ± 0.58	83.33 ± 23.57		1.34 ± 0.13
66-100	0.93	76.40 ± 2.85	16.50 ± 0.33	66.67 ± 0.00	2.66 ± 0.28	2.29 ± 0.09

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของปลานิลภายใต้สภาวะจำลองของระบบบ่อไร้ดินภายในโรงเรือนระหว่างการทดลองของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น (ค่าเฉลี่ยของชุดควบคุมและชุดทดลอง)

พารามิเตอร์	งานวิจัยอ้างอิง			งานวิจัยนี้
	เพ็ญพิชญา (2556)	รัชฎาพร (2556)	เศรษฐศักดิ์ (2556)	
ความหนาแน่นเริ่มต้น (กก./ลบ.ม.)	1.20	1.01	1.00	0.55
ความหนาแน่นสุดท้าย (กก./ลบ.ม.)	10.68	2.00	1.77	2.29
น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น (ก./ตัว)	11.06	64.38	24.55	18.48
น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย (ก./ตัว)	97.06	128.71	42.60	76.40
อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (ก./วัน)	0.71	1.02	0.45	0.93
อัตราการรอด (%)	100.00	100.00	100.00	66.67
อัตราการแลกเนื้อ	1.45	3.34	2.66	2.66
ระยะเวลาการเลี้ยง (วัน)	121	63	40	100

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- *การประเมินสมดุลไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ*

จากการประเมินประสิทธิภาพการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำระหว่างบ่อควบคุมและบ่อทดลอง และทำการประเมินสมดุลไนโตรเจนโดยเปรียบเทียบระหว่างไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบทั้งหมดกับไนโตรเจนคงเหลือในวันสุดท้ายของการทดลองโดยอาศัยผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ด้วยเครื่อง CHNOS/O ANALYZER (PE2400 Series II) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในอาหารเม็ดสำเร็จรูปและตะกอน ที่อ้างอิงจากงานวิจัยของรัชฎาพร ไชยศรี (2556) [13] และปริมาณไนโตรเจนในตัวปลานิลจากงานวิจัยของเพ็ญพิชญา พินิจธนภาคย์ (2556) [10] (ตารางที่ 4.9) พบว่าไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบในบ่อควบคุมและบ่อทดลองส่วนใหญ่มากจากอาหารปลานิลในสัดส่วนร้อยละ 97.88 และ 97.42 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.10) จากนั้นไนโตรเจนจากอาหารปลาจะเกิดการเปลี่ยนแปลง

ถ่ายโอนมวลมาสะสมอยู่ในตัวปลานิลในวันสุดท้ายของการทดลองเท่ากับร้อยละ 19.47 และ 19.07 ตามลำดับ ในส่วนของการเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนในน้ำทั้งหมด (Total Nitrogen; TN) ระหว่างบ่อควบคุมและบ่อทดลองมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนเท่ากับร้อยละ 25.43 และ 2.23 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์สามารถอธิบายได้ว่า แอมโมเนียจากเศษอาหารและสิ่งขับถ่ายของสัตว์น้ำในบ่อควบคุมเกิดการเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปของไนเทรตผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันโดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มไนทริฟายเออร์ที่แขวนลอยในระบบเพียงอย่างเดียว จึงพบการสะสมตัวของไนโตรเจนในรูปไนเทรตในระดับความเข้มข้นสูง ในขณะที่บ่อทดลองที่มีการติดตั้งระบบบำบัดด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด พบว่าระบบมีความสามารถในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วมไนทรฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน นั่นคือกระบวนการออกซิไดซ์แอมโมเนียสามารถเกิดขึ้นภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำโดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรียแขวนลอยในระบบคล้ายคลึงกับบ่อควบคุม นอกจากนี้จุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพยังมีส่วนช่วยในการบำบัดแอมโมเนียได้อีกด้วย จากนั้นไนเทรตที่เกิดขึ้นจะถูกรีดิวซ์ต่อโดยอาศัยการทำงานของจุลชีพกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟภายใต้สภาวะกึ่งไร้อากาศแบบแอนน็อกซิกภายในมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดจนอยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนและเกิดการระเหยออกจากระบบ ทำให้ปริมาณไนโตรเจนคงเหลือในระบบมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับบ่อควบคุม นอกจากนี้บ่อควบคุมยังมีปริมาณไนโตรเจนสะสมในตะกอนเท่ากับร้อยละ 13.34 เนื่องจากไม่มีการถ่ายตะกอนออกจากระบบ ในขณะที่การล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพในบ่อทดลองโดยการแกว่งในน้ำสะอาดด้วยความถี่ 4 สัปดาห์/ครั้ง มีส่วนช่วยในการกำจัดตะกอนส่วนเกินบนมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพ ส่งผลให้ตรวจพบปริมาณไนโตรเจนในตะกอนน้อยกว่าบ่อควบคุมเท่ากับร้อยละ 0.31 และสุดท้ายปริมาณไนโตรเจนที่ไม่สามารถระบุได้ในบ่อควบคุมมีค่าเท่ากับร้อยละ 16.13 คาดว่าเกิดจากการสะสมภายในตัวปลานิลที่ตาย รวมถึงถูกนำไปใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ภายในระบบ สำหรับไนโตรเจนในบ่อทดลองถูกปลดปล่อยในรูปของก๊าซไนโตรเจนผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน รวมถึงถูกกำจัดผ่านการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 76.16

ตารางที่ 4.9 ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนในอาหารปลา ตะกอนในบ่อเลี้ยง และปลานิลเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHNS/O ANALYZER

ตัวอย่าง	ร้อยละ		
	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน
อาหารปลาที่มีโปรตีนร้อยละ 15	38.72	7.46	2.71
ตะกอน	35.46	5.34	2.97
ปลานิล (นน.เปียก 86.55 ก. และ นน.แห้ง 19.17 ก.)	53.48	9.55	6.35

ตารางที่ 4.10 ปริมาณและสัดส่วนไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบทั้งหมดกับไนโตรเจนคงเหลือในวันสุดท้ายของการทดลองระหว่างการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

องค์ประกอบไนโตรเจน	ไนโตรเจน (ก.)		ไนโตรเจน (%)	
	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
ไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบ				
อาหารปลานิล	24.94	24.93	97.88	97.42
ไนโตรเจนในน้ำทั้งหมด (TN=TDN+PN)	0.20	0.28	0.78	1.09
ไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมด (TDN)	0.17	0.27	0.67	1.06
ไนโตรเจนไม่ละลายน้ำทั้งหมด (PN)	0.03	0.01	0.12	0.04
ตะกอน	0.14	0.10	0.55	0.39
รวม	25.48	25.59	100	100
ไนโตรเจนคงเหลือในวันสุดท้ายของการทดลอง				
ปลานิล	4.96	4.88	19.47	19.07
ไนโตรเจนในน้ำทั้งหมด (TN=TDN+PN)	6.48	0.57	25.43	2.23
ไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมด (TDN)	3.57	0.56	14.01	2.19
ไนโตรเจนไม่ละลายน้ำทั้งหมด (PN)	2.91	0.01	11.42	0.04
ตะกอน	3.45	0.08	13.54	0.31
ส่วนที่ไม่สามารถระบุได้	4.11	19.49	16.13	76.16
รวม	25.48	25.59	100	100

หมายเหตุ : TN = Total Nitrogen

TDN = Total Dissolved Nitrogen

PN = Particulate Nitrogen

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดภายใต้สภาวะจำลองของระบบบ่อไร้ดินในโรงเรือนผ่านกระบวนการบำบัดร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดชนิดเส้นใย เพื่อประหยัดค่าใช้จ่าย และลดพื้นที่ในส่วนของการติดตั้งระบบบำบัดโดยเหมาะสำหรับฟาร์มที่มีพื้นที่จำกัด ในช่วงแรกของการทดลองเป็นการประเมินอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพที่เวลาการบ่มเชื้อแต่ละสัปดาห์ เพื่อให้ได้ช่วงเวลาที่ทำให้เกิดอัตราการบำบัดสูงสุด จากนั้นหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบบำบัดร่วมอย่างสมดุลและต่อเนื่อง โดยเน้นการบำบัดแอมโมเนียซึ่งมีความเป็นพิษสูงต่อสัตว์น้ำและสามารถรีดิวซ์ไนเทรตที่เกิดขึ้นได้บางส่วน เมื่อแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ วิธีการทำความสะอาดตัวกรอง และความถี่ในการทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ และสุดท้ายเป็นการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำความหนาแน่นต่ำ ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

การศึกษาอัตราการบำบัดไนโตรเจนของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่เวลาการบ่มเชื้อ 1–8 สัปดาห์ เพื่อให้เกิดการเกาะติดของจุลชีพตามธรรมชาติภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยทำการประเมินอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันในถังปฏิกรณ์ที่บรรจุสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์และโซเดียมไนเทรตความเข้มข้น 2 และ 10 มก.-ไนโตรเจน ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของไบโอคอร์ดจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มเชื้อ โดยตัวกรองที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 7 สัปดาห์ สามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียและรีดิวซ์ไนเทรตที่เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่มีการสะสมตัวของไนไทรต์ในระบบ โดยมีอัตราไนทริฟิเคชัน 75.62±9.45 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน อัตราดีไนทริฟิเคชัน 144.88±5.99 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน และปริมาณตะกอนจุลชีพสะสมบนมัดเส้นใย 50.89±3.41 กรัม/ม. ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนเทรตเริ่มต้นในระบบเท่ากับ 4 และ 50 มก.-ไนโตรเจน ตามลำดับ

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตผ่านกระบวนการร่วมภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่บรรจุสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์และเติมอากาศอย่างเพียงพอ เมื่อแปรค่าสัดส่วนการเติมเมทานอลเข้าสู่ระบบในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 ถึง 5:1 จากการทดลองพบว่าการเติมเมทานอลเข้าสู่ระบบส่งผลยับยั้งการทำงานของไนทริฟายเออร์และกระตุ้นการเจริญเติบโตของดีไนทริฟายเออร์ โดยชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมเมทานอลมีอัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนียสูงสุดเท่ากับ 60.19±3.12 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน และชุดทดลองที่แปรค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ 5:1 มีอัตราดีไนทรฟิเคชันสูงสุดเท่ากับ 20.74±1.14 มก.ไนเทรต-

ไนโตรเจน/ม./วัน นอกจากนี้ยังพบว่าระบบที่มีการเติมเมทานอลในอัตราส่วน 5:1 สามารถเกิดกระบวนการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันในอัตราใกล้เคียงกัน นั่นคือเท่ากับ 34.85±5.81 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน และ 20.74±1.14 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน ตามลำดับ แต่ทั้งนี้เนื่องจากงานวิจัยมีวัตถุประสงค์ในการติดตั้งระบบบำบัดไว้ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำและการเติมเมทานอลส่งผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพของสัตว์น้ำ ดังนั้นการเดินระบบบำบัดด้วยชุดควบคุมที่ไม่เติมเมทานอลจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ โดยเน้นการบำบัดแอมโมเนียและสามารถรีดิวซ์ไนเทรตที่เกิดขึ้นโดยอาศัยตะกอนและสลัดจ์ภายในระบบเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอนสำหรับแบคทีเรียกลุ่มเฮทเทอโรโทรฟ โดยมีอัตราดีไนทริฟิเคชันเท่ากับ 10.50±1.17 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วมเมื่อแปรเปลี่ยนวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ การขยำตัวกรองในน้ำสะอาด การแกว่งตัวกรองในน้ำสะอาด และการใช้น้ำสะอาดฉีดล้างตัวกรอง จากการทดลองพบว่าการทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพสามารถลดปริมาณตะกอนส่วนเกินซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดสภาวะไร้อากาศแบบแอนแอโรบิกและการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีปริมาณตะกอนสะสมคงเหลือบนมัดเส้นใยสำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการทำความสะอาดและชุดทดลองเท่ากับ 74.12±4.45 60.06±5.11 32.21±4.30 และ 9.13±0.09 กรัม/ม. ตามลำดับ จากการประเมินประสิทธิภาพการบำบัด พบว่าตัวกรองที่ผ่านการทำความสะอาดโดยการฉีดน้ำมีอัตราไนทริฟิเคชันลดลง เนื่องจากแบคทีเรียที่มีบทบาทในกระบวนการบำบัดเกิดการหลุดร่อนออกไปพร้อมกับน้ำ อีกทั้งความแรงของน้ำส่งผลทำลายเมือกไบโอฟิล์ม ทำให้ตัวกรองไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัดไนเทรตผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน สำหรับการขยำและการแกว่งตัวกรองในน้ำสะอาดสามารถกำจัดสิ่งอุดตันได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งตัวกรองที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยวิธีดังกล่าวยังมีความสามารถในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตในอัตราที่ใกล้เคียงกัน แต่ทว่าการแกว่งตัวกรองในน้ำเป็นวิธีที่สะดวก ประหยัดเวลา และเหมาะในการใช้งานจริงมากกว่า โดยมีอัตราไนทริฟิเคชัน 47.80±2.88 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วันและดีไนทริฟิเคชัน 8.73±0.66 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน ตามลำดับ

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วมเมื่อแปรค่าความถี่ในการทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพแตกต่างกัน จากการทดลองพบว่าตัวกรองที่ผ่านการใช้งานเป็นเวลา 1 สัปดาห์ ไม่มีความจำเป็นต้องทำความสะอาด เนื่องจากตะกอนจุลชีพสะสมบนเส้นใยยังมีปริมาณไม่มาก ในส่วนของการทำความสะอาดไบโอคอร์ดด้วยความถี่ 2 3 และ 4 สัปดาห์/ครั้ง สามารถเพิ่มอัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนียภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอได้ โดยมีอัตราไนทริฟิเคชันเท่ากับ 67.61±7.69 53.90±1.81 และ 46.71±0.76 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ม./วัน ตามลำดับ โดยที่ความถี่ 2 สัปดาห์/ครั้ง เป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำความสะอาดตัวกรองและทำให้ตัวกรองชีวภาพมีอัตราไนทริฟิเคชันสูงสุด แต่เนื่องจากการยกโครงเหล็กที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพออกจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อทำความสะอาดในการทดลองจริงสามารถทำได้ยาก ประกอบกับในการทดลองช่วงต่อไปมีการจับปลาเพื่อตรวจวัดอัตราการเจริญเติบโตทุกเดือน ดังนั้นการรบกวนบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำมากเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อการดำชีวิตของปลาทดลอง งานวิจัยนี้จึงเลือกเวลาในการทำ

ความสะอาดตัวกรองชีวภาพที่ความถี่ 4 สัปดาห์/ครั้ง (ประมาณเดือนละครั้ง) เพื่อให้เป็นช่วงเวลาเดียวกับกับการวัดการเจริญเติบโตของปลานิล โดยสามารถบำบัดแอมโมเนียได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีอัตราการบำบัดไนเทรต เท่ากับ 7.78±0.33 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ม./วัน

การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดอนินทรีย์ไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดภายใต้สภาวะจำลองของระบบบ่อไร้ดินในโรงเรือนด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดแบบจม เป็นเวลา 100 วัน ที่ความหนาแน่นสัตว์น้ำเริ่มต้น 0.5 กก./ลบ.ม. โดยเปรียบเทียบระหว่างบ่อควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งระบบบำบัด กับบ่อทดลองซึ่งติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 7 สัปดาห์ โดยไม่มีการเติมเมทานอลเข้าสู่ระบบ และทำความสะอาดตัวกรองโดยการแกว่งในน้ำสะอาดด้วยความถี่ประมาณเดือนละครั้ง จากการทดลองพบว่าไบโอคอร์ดสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ผ่านกระบวนการบำบัดร่วมให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ โดยมีค่าเท่ากับ 0.17±0.01 0.12±0.07 และ 5.85±0.68 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการกักเก็บตะกอนภายในมัดเส้นใยเนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะของแบคทีเรียสูง โดยสามารถควบคุมปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำให้มีค่าไม่เกิน 86.67±2.33 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. ในขณะที่ชุดควบคุมพบการสะสมของแอมโมเนีย และไนไทรต์ ในระดับที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของปลานิลโดยมีความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 2.44±0.39 และ 3.60±0.87 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ อย่างไรก็ตามจุลชีพแขวนลอยในระบบสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนียโดยออกซิไดซ์ผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันจึงพบการลดลงของแอมโมเนียและไนไทรต์ และมีการเพิ่มขึ้นของไนเทรตแทน โดยมีความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 16.81±1.56 มก.-ไนโตรเจน/ล. แต่ทว่าไนเทรตที่เกิดขึ้นไม่สามารถรีดิวซ์ต่อให้อยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนได้เนื่องจากในระบบมีบริเวณที่เกิดสภาวะกึ่งไร้อากาศแบบแอนน็อกซิกไม่เพียงพอ นอกจากนี้บ่อควบคุมยังพบปัญหาเรื่องการสะสมของตะกอนแขวนลอยสูงถึง 581.56±116.70 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ พบว่าบ่อควบคุมและบ่อทดลองมีอัตราการเจริญเติบโตของปลานิลเท่ากับ 1.03 และ 0.93 ก./วัน อัตราการรอดเท่ากับ ร้อยละ 72.22±25.45 และ 66.67±0.00 และอัตราการแลกเนื้อเท่ากับ 2.58±0.20 และ 2.62±0.27 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการบำบัดอนินทรีย์ไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดชนิดเส้นใยที่สามารถบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตผ่านกระบวนการบำบัดร่วมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถควบคุมปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายได้ และจากการประมวลผลการทดลองสามารถนำเสนอแนวทางในการพัฒนาการบำบัดไนโตรเจนของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นได้ดังนี้

5.2.1 ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน และควบคุมปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำความหนาแน่นสูง ซึ่งมีอัตราการผลิตของเสียในรูปของแอมโมเนีย ไนเทรต และไฮโดรเจนซัลไฟล์เพิ่มขึ้น เพื่อสามารถตอบโจทย์การใช้งานจริงให้กับกลุ่มเกษตรกรได้

5.2.2 ควรศึกษาพัฒนาเพิ่มเติมเกี่ยวกับรูปแบบการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดภายในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำโดยจัดแบ่งส่วนของระบบบำบัดภายในบ่ออย่างชัดเจน อาทิเช่น การติดตั้งตาข่ายที่มีความถี่เพื่อป้องกันการติดโรคบริเวณบาดแผลของสัตว์น้ำเมื่อเกิดการสัมผัสกับจุลชีพบนตัวกรองชีวภาพโดยตรง หรืออาจทำการจำลองการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดให้คล้ายคลึงกับการเจริญเติบโตของพืชน้ำซึ่งเป็นที่หลบภัยของสัตว์น้ำตามธรรมชาติ นั่นคือตัดตัวกรองให้มีความยาวพอเหมาะ ทำการถ่วงน้ำหนักที่ปลายด้านหนึ่งแล้วติดตั้งตัวกรองในแนวตั้งแบบกระจายให้ทั่วบ่อภายใต้สภาวะแบบจมอยู่ในน้ำ จะสามารถลดการตายของสัตว์น้ำโดยไม่จำเป็นจากการเข้าไปอาศัยและติดอยู่บริเวณช่องว่างระหว่างตะแกรงเหล็ก

5.2.3 ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับโรคที่เกิดขึ้นในสัตว์น้ำ โดยการกักสัตว์น้ำในบ่อพักเพื่อสังเกตอาการและการเกิดโรคระบาดก่อนเริ่มการทดลองเป็นระยะเวลาหนึ่ง หากพบว่าสัตว์น้ำมีอาการป่วยควรแยกออกมาและส่งศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ เพื่อให้ได้ข้อมูลอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการรอดตายของสัตว์น้ำที่ถูกต้องระหว่างการทดลอง

5.2.4 ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับกลุ่มชนิดของประชากรจุลชีพบนมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด เพื่อสามารถควบคุมสภาวะที่เหมาะสมในการเจริญเติบโต และการบำบัดไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมถึงทำให้ทราบชนิดของจุลชีพที่ก่อให้เกิดโรคและการติดเชื้อในสัตว์น้ำ เพื่อหาแนวทางป้องกันหรือควบคุมสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมเพื่อให้เกิดคัดเลือกสายพันธุ์ของแบคทีเรียที่มีประโยชน์ในระบบ

5.2.5 ควรวิเคราะห์เพิ่มเติมเกี่ยวกับปริมาณตะกอนจุลชีพบนตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในบ่อทดลองที่ถูกกำจัดออกไปผ่านการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพโดยการแกว่งในน้ำสะอาด เพื่อสามารถระบุข้อมูลการประเมินสมดุลไนโตรเจนในวันสุดท้ายของการทดลองได้อย่างชัดเจนว่าปริมาณไนโตรเจนส่วนที่ไม่สามารถระบุได้ในบ่อทดลองร้อยละ 76.16 คิดเป็นส่วนถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศในรูปของก๊าซไนโตรเจนผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน และถูกกำจัดผ่านการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดเท่ากับร้อยละเท่าใดตามลำดับ

รายการอ้างอิง

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

[2] วิลาสินี ไตรยราช. 2546. สภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดไนเทรตในน้ำทะเลด้วยระบบบำบัดไนเทรตแบบท่อสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[3] กษิดิศ หนูทอง. 2551. การบำบัดไนโตรเจนในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง 16 (เมษายน): 11-12.

[4] Sesuk, T., Powtongsook, S. and Nootong, K. 2009. Inorganic nitrogen control in a novel zero-water exchanged aquaculture system integrated with airlift-submerged fibrous nitrifying biofilters. Bioresource Technology. 100(6): 2088-2094

[5] เอกชัย มาลาพล. 2551.การบำบัดไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้งโดยตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[6] Hagopain, D.S. and Riley, J.G. 1998. A Closer Look at the Bacteriology of Nitrification. Aquacultural Engineering. 18: 223-244.

[7] APHA, AWWA and WPCF. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st ed. Washington DC: American Public Health Association.

[8] O'Sullivan, E.A., Duggal, M.S., Bailey, C.C., Curzon, M.E.J. and Hart, P. 1993. Changes in the oral microflora during cytotoxic chemotherapy in children being treated for acute leukemia. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology. 76(2): 161-168

[9] มนวิกานต์ ขจรบุญ, วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี, ตะวัน ลิมปิยากร และ สรวิศ เผ่าทองศุข. 2551. การคัดแยกหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียและการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเค็ม. ในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่

7, หน้า 1-9. 14-16 มีนาคม 2551 ณ สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย กรุงเทพมหานคร.

[10] เพ็ญพิชญา พินิจธนภาคย์. 2556. การพัฒนาถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันเพื่อบำบัดไนโตรเจนจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[11] ชลธิชา พลายชุม. 2553. การบำบัดไนเทรตในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยถังดีไนทริฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[12] มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา. 2538. การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ. เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[13] รัชฎาพร ไชยศรี. 2556. คอลัมน์ร่วมย่อยตะกอน-ดีไนทริฟิเคชันสำหรับระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[14] สุนทรี อยู่สถาน. 2550. ผลของแหล่งคาร์บอนต่อการลดไนโตรเจนในน้ำเสียโดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

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

[16] ไมตรี ดวงสวัสดิ์ และจารุวรรณ สมศิริ. 2528. คุณสมบัติน้ำและวิธีการวิเคราะห์สำหรับการวิจัยทางการประมง. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

[17] มานพ ตั้งตรงไพโรจน์, ภานุ เทวรัตน์มณีกุล, พรรณศรี จริโมภาส, สุจินต์ หนูขวัญ, กำชัย ลาวัณยวุฒิ, วีระ วัชรกรโยธิน และกมล จันทรโรทัย. 2536. การพัฒนาการเพาะเลี้ยงปลานิล. สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด. กรมประมง: 133 หน้า.

[18] วิรัช จิ๋วแหยม. 2544. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคุณภาพน้ำและการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[19] วิชัย ลาภจตุพร และอรทัย เดี่ยววาณิชย์. 2535. พีเอช. กรุงเทพมหานคร: แลปอินเตอร์.

[20] ทยากร สุวรรณรัตน์. 2552. การพัฒนาระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดความหนาแน่นสูงโดยผสมผสานตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[21] ปกฉัตร ชูติวิศุทธิ์. 2552.ประสิทธิภาพของระบบกรองแบบแบ่งส่วนในการแยกจุลสาหร่ายและอนุภาคสารแขวนลอยเพื่อควบคุมคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[22] เศรษฐศักดิ์ ติวะนันทกร. 2556. การกรองตะกอนแขวนลอยในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยแผ่นกรองชนิดวางเอียง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[23] เอกนรินทร์ ธนะกิจไพรินท์. 2554. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยถังบรรจุเม็ดดินเผาและผักกวางตุ้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[24] ควบคุมมลพิษ, กรม. 2554. มาตรฐานน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้าจืด [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html#s13 [2558, เมษายน 16]

[25] ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 703 หน้า

[26] Kim, C., Koopman, B. and Bitton, G. 1994. INT-dehydrogenase activity test for assessing chlorine and hydrogen peroxide inhibition of filamentous pure cultures and activated sludge. Water Research. 28(5): 1117-1121

[27] ชะลอ ลิ้มสุวรรณ. 2535. คัมภีร์การเลี้ยงกุ้งกุลาดำ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: ฐานเศรษฐกิจ

[28] 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

[29] ธีระ เกรอต. 2539. วิศวกรรมน้ำเสีย: การบำบัดทางชีวภาพ. เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

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

[31] Sharma, B. and Ahlert, R.C. 1977. Nitrification and nitrogen removal. Water Research. 11(10): 897-925

[32] Lekang, O.I. and Kleppe, H. 2000. Efficiency of nitrification in trickling filters using different filter media. Aquacultural Engineering. 21(3): 181-199

[33] Seo, J.K., Jung, I.H., Kim, M.R., Kim, B.J., Nam, S.W., Kim, S.K. 2001. Nitrification Performance of Nitrifiers Immobilized in PVA (Polyvinyl alcohol) for a Marine Recirculating Aquarium System. Aquacultural Engineering. 24: 181-194.

[34] Van Rijn. J., Tal, Y. and Schreier, H.J. 2006. Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. Aquacultural Engineering. 34(3): 364-376.

[35] เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2543. วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย. เล่มที่ 4. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี

[36] อำไพเทพิน สิงหะพันธุ. 2543.ระบบบำบัดไนเตรทเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[37] 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: 31 - 37.

[38] ธนทร ศรีสุข. 2551.การบำบัดไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงปลานิลระบบปิดโดยตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชั่นแบบจม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[39] Fukui North American. 2013. Biocord water treatment [Online]. Reference: http://www.fukuina.com/other_products/biocord.htm [2015, June 18]

[40] Sakairi, M.A.C., Yasuda, K., Matsumura, M. 1996. Nitrogen Removal in Seawater Using Nitrifying and Denitrifying Bacteria Immobilized in Porous Cellulose Carrier. Water Science and Technology. 34 (7-8): 267-274.

[41] delos Reyes J.r., A.A. and Lawson TB. 1996. Combination of a bead filter and rotating biological contactor in a recirculating fish culture system. Aquacultural Engineering. 15(1): 27-39.

[42] Al - Hafedh, Y. S., Alam, A. and Alam, M. A. 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.

[43] มะลิวัลย์ คุตะโค. 2551. องค์ประกอบและบทบาทของจุลินทรีย์ต่อวัฏจักรไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) คณะวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

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

[45] Saliling, W. J. B., Westerman, P. W. and Losordo, T. M. 2007. Wood chips and wheat straw as alternative biofilter media for denitrification reactors treating aquaculture and other wastewaters with high nitrate concentrations. Aquacultural Engineering 37: 222 - 233.

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

[47] วลัยภรณ์ วุฒิเมธา. 2551. บทบาทของอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตต่อความหลากหลายของประชากรจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[48] ธัญญา พันธุ์ฤทธิ์ดำ. 2541. ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่มีระบบดีไนตริฟิเคชันสำหรับการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*). วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[49] ศิริวรรณ ศิลาภากุล. 2545. การกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้งโดยถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกที่มีการไหลวนแบบภายนอก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

[50] นฤภู จูประจักษ์. 2547.ประสิทธิภาพของการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกสำหรับถังเลี้ยงกุ้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[51] รุ่งนภา สุทธิศรี. 2549. ประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับการเลี้ยงกุ้งความหนาแน่นสูงในโรงเรือน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[52] Bower, C. E. and Holm - Hansen, T. 1980. A Salicylate - Hypochlorite Method for Determining Ammonia in Seawater. Can. J. Fish Aquat. Sci. 37: 794 - 798.

[53] Strickland, J. D. H. and Parsons, T. R. 1972. A Practical Handbook of Seawater Analysis. 2nd ed. Ottawa: Fisheries research board of Canada.

[54] Grassholf, K., Kremling, K. and Ehrhaedt, M. 1999. Methods of Seawater Analysis. 3rd ed. Weinheim: Wiley - vch.

[55] Rivett, M. O., Buss, S. R., Morgan, P., Smith, J. W. N. and Bemment, C. D. 2008. Nitrate attenuation in groundwater: A review of biogeochemical controlling processes. WATER RESEARCH. 42: 4215 - 4232.

[56] Michaud, L., Blancheton, J. P., Bruni, V. and Piedrahita, R. 2006. Effect of particulate organic carbon on heterotrophic bacterial populations and nitrification efficiency in biological filters. Aquacultural Engineering 34: 224 - 233.

[57] วิธู นันทิธัญญธาดา. 2546. การกำจัดไนเตรทในตู้เลี้ยงปลาโดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[58] Timmons, M. B., Ebeling, J. M., Wheaton, F. W., Summerfelt, S. T. and Vinci, B. J. 2002. Recirculating Aquaculture Systems. 2nd ed. Ithaca. New York: Cayaga Aqua Ventures.

[59] Liao P.B. and Mayo R.D. 1972. Salmonid hatchery water reuse systems. Aquaculture. 1(0): 317 - 35.

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ก.1 วิธีวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนีย

การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำดัดแปลงมาจากวิธีของ Bower และ Holm-Hansen (1980) [52] โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารเคมีและกระบวนการวิเคราะห์ดังนี้

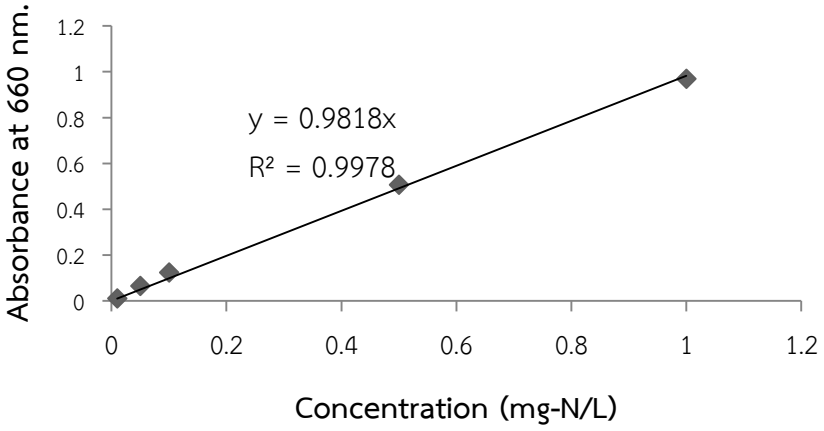
- *การเตรียมสารเคมี*

1. สารละลายซาลิไซเลตคะตะลิสต์ (Salicylate-catalyst solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายโซเดียมซาลิไซเลต (Sodium salicylate; $C_6H_4(OH)COONa$) ปริมาณ 440 ก. และโซเดียมไนโตรพลัสไซด์ (Sodium nitroprusside dehydrate; $Na_2Fe(CN)_5NO.2H_2O$) ปริมาณ 0.28 ก. ลงในน้ำ D.I. (De-ionized water) และปรับปริมาตรสารละลายซาลิไซเลตคะตะลิสต์ให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ล. โดยการเก็บสารละลายควรเก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5°ซ และควรเตรียมสารละลายใหม่ทุก 3 เดือน
2. สารละลายอัลคาไลน์ซิเทรต (Alkaline-citrate solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH) ปริมาณ 18.5 ก. และโซเดียมซิเตรต (Sodium citrate dehydrate; $Na_3C_6H_5O_7.2H_2O$) ปริมาณ 100 ก. ลงในน้ำ D.I. และปรับปริมาตรสารละลายอัลคาไลน์ซิเทรตให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ล. โดยการเก็บสารละลายควรเก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5°ซ
3. สารละลายโซเดียมไฮโปรคลอไรด์ (Sodium hypochlorite solution) สามารถใช้สารละลายไฮโปรคลอไรด์ทางการค้าความเข้มข้น 1.5 นอร์มอล
4. สารละลายอัลคาไลน์ไฮโปรคลอไรด์ (Alkaline-hypochlorite solution) สามารถเตรียมได้โดยการผสมสารละลายโซเดียมไฮโปรคลอไรด์และสารละลายอัลคาไลน์ซิเทรตในอัตราส่วน 1:9 ซึ่งเมื่อผสมสารละลายทั้งสองเข้าด้วยกันควรใช้สารละลายอัลคาไลน์ไฮโปรคลอไรด์ในกระบวนการวิเคราะห์ภายใน 1 ชม.

- *กระบวนการวิเคราะห์*

สำหรับการเก็บน้ำตัวอย่างควรเก็บใส่ขวดพลาสติกปริมาตร 30 มล. ทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C จากนั้นควรทำการวิเคราะห์ทันที หากไม่สามารถทำได้ควรเก็บน้ำตัวอย่างแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า -15°ซ

กระบวนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มล. ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลายซาลิไซเลตคะตะลิสต์ปริมาตร 0.6 มล. และสารละลายอัลคาไลน์ไฮโปรคลอไรด์ปริมาตร 1.0 มล. ตามลำดับ (ทั้งนี้สามารถปรับเพิ่มลดปริมาตรน้ำตัวอย่างและสารละลายที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ได้โดยคงอัตราส่วนให้มีค่าเท่าเดิม) เขย่าสารให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 1 ชม. แต่ไม่ควรเกิน 3 ชม. สำหรับการวิเคราะห์แบลงค์ (Blank) สามารถทำได้โดยใช้น้ำ D.I. ที่มีการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่างและใช้กระบวนการวิเคราะห์เช่นเดิม จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 660 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายแอมโมเนียมาตรฐาน (Standard ammonia solution) ที่ความเข้มข้น 0.01 0.05 0.1 0.5 และ 1 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งเตรียมจากสารละลายสต็อกแอมโมเนีย (Stock ammonia solution) ความเข้มข้น 100 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ดังกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์แอมโมเนียในรูปที่ ก-1



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน

ก.2 วิธีวิเคราะห์ปริมาณไนไทรต์

การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไนไทรต์ไนโตรเจนในน้ำดัดแปลงมาจากวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Strickland and Parsons (1972) [53] โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารเคมีและกระบวนการวิเคราะห์ดังนี้

- *การเตรียมสารเคมี*

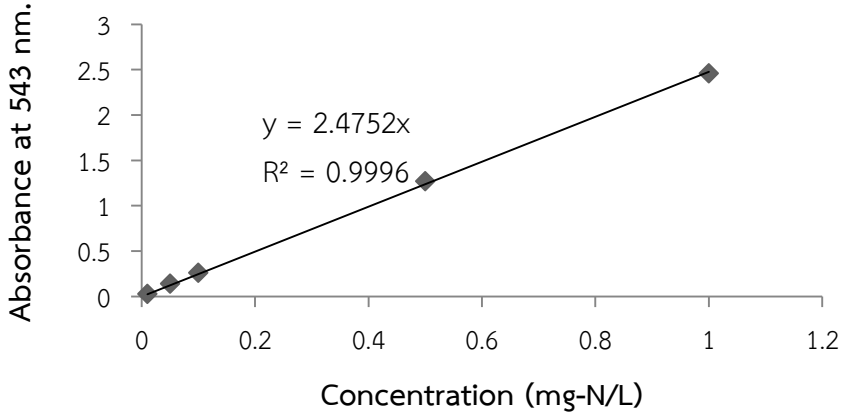
1. สารละลายซัลฟานิลาไมด์ (Sulfanilamide solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายซัลฟานิลาไมด์ (Sulphanilamide; $C_6H_8N_2O_2S$) ปริมาณ 5 ก. ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Hydrochloric acid; HCl) ปริมาตร 50 มล. และปรับปริมาตรสารละลายซัลฟานิลาไมด์ให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ล. โดยการเก็บสารละลายควรเก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5°ซ
2. สารละลายเอ็นเอ็นอีดี (Naphthylethylenediamine solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายเอ็นเอ็นอีดี (NNED; N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride) ปริมาณ 0.5 ก. ในน้ำ D.I. และปรับปริมาตรสารละลายเอ็นเอ็นอีดีให้มีปริมาตรเท่ากับ 500 มล. โดยการเก็บสารละลายควรเก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5°ซ และควรเตรียมสารละลายใหม่ทุกเดือน

- *กระบวนการวิเคราะห์*

สำหรับการเก็บน้ำตัวอย่างควรเก็บใส่ขวดพลาสติกปริมาตร 30 มล. ทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C จากนั้นควรทำการวิเคราะห์ทันที หากไม่สามารถทำได้ควรเก็บน้ำตัวอย่างแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า -15°ซ

กระบวนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มล. ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลายซัลฟานิลาไมด์ปริมาตร 0.1 มล. เขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาประมาณ 2 นาที แต่ไม่ควรเกิน 10 นาที จากนั้นเติมสารละลายเอ็นเอ็นอีดีปริมาตร 0.1 มล. เขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 30 นาที แต่ไม่ควรเกิน 2 ชม. (ทั้งนี้สามารถปรับเพิ่มลดปริมาตรน้ำตัวอย่างและสารละลายที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ได้โดยคงอัตราส่วนให้มีค่าเท่าเดิม) สำหรับการวิเคราะห์แบลงค์สามารถทำได้โดยใช้น้ำ D.I. ที่มีการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่างและใช้กระบวนการวิเคราะห์เช่นเดิม จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 543 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไนไทรต์มาตรฐาน (Standard nitrite solution) ที่ความเข้มข้น 0.01 0.05 0.1 0.5 และ 1 มก.ไนไทรต์-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งเตรียมจาก

สารละลายสต็อกไนไทรต์ (Stock nitrite solution) ความเข้มข้น 100 มก.ไนไทรต์-ไนโตรเจน/ล. ดังกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ไนไทรต์ในรูปที่ ก-2



รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณไนไทรต์ไนโตรเจน

ก.3 วิธีวิเคราะห์ปริมาณไนเทรต

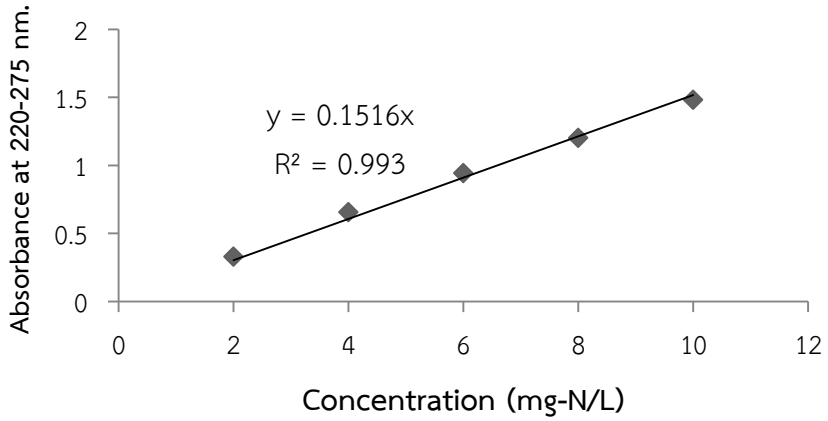
การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไนเทรตไนโตรเจนในน้ำดัดแปลงมาจากวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Standard Method (2005) [7] โดยมีกระบวนการวิเคราะห์ดังนี้

- *กระบวนการวิเคราะห์*

สำหรับการเก็บน้ำตัวอย่างควรเก็บใส่ขวดพลาสติกปริมาตร 30 มล. ทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C จากนั้นควรทำการวิเคราะห์ทันที หากไม่สามารถทำได้ควรเก็บน้ำตัวอย่างแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า -15°ซ

กระบวนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มล. ใส่ในหลอดทดลองโดยไม่มีการเติมสารเคมีลงไป สำหรับการวิเคราะห์แบลงค์สามารถทำได้โดยใช้น้ำ D.I. ที่ไม่มีการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 220 และ 275 นาโนเมตร นำผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นทั้งสองมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณไนเทรตไนโตรเจนในน้ำโดยค่าที่คำนวณได้จะต้องทำการหักลบกับปริมาณไนไตรต์ที่วิเคราะห์ได้จากตัวอย่างเดียวกันเนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ไนเทรตตาม Standard Method (2005) จะมีปริมาณไนไทรต์รวมอยู่ด้วย เปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไนเทรตมาตรฐาน (Standard nitrate solution) ที่ความเข้มข้น 2 4 6 8 และ 10 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งเตรียมจากสารละลายสต็อกไนเทรต (Stock nitrate

solution) ความเข้มข้น 100 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. ดังกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ไนเทรตในรูปที่ ก-3



รูปที่ ก-3 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณไนเทรตไนโตรเจน

ก.4 วิธีวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำดัดแปลงมาจากวิธีของ Grossholf และคณะ (1999) [54] โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารเคมีและกระบวนการวิเคราะห์ดังนี้

- *การเตรียมสารเคมี*

1. สารละลายออกซิไดซ์ (Oxidize solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (Potassium persulfate; $K_2O_8S_2$) ปริมาณ 5 ก. โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 0.75 ก. และกรดบอริก (Boric acid; H_3BO_3) ปริมาณ 6 ก. ลงในน้ำ D.I. และปรับปริมาตรสารละลายออกซิไดซ์ให้มีปริมาตรเท่ากับ 250 มล.
2. สารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ (Borate buffer solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายกรดบอริกปริมาณ 15.45 ก. และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 ก. ลงในน้ำ D.I. และปรับปริมาตรสารละลายออกซิไดซ์ให้มีปริมาตรเท่ากับ 250 มล.

- *กระบวนการวิเคราะห์*

สำหรับการเก็บน้ำตัวอย่างควรเก็บใส่ขวดพลาสติกโดยแบ่งเป็นน้ำตัวอย่างที่ผ่านและไม่ผ่านการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C อย่างละ 30 มล. จากนั้นควรทำการวิเคราะห์ทันที หากไม่สามารถทำได้ควรเก็บน้ำตัวอย่างแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า -15°ซ

กระบวนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการปิเปตน้ำตัวอย่างที่ผ่านและไม่ผ่านการกรองปริมาตร 5 มล. ใส่ในหลอดทดลอง โดยน้ำตัวอย่างที่ผ่านและไม่ผ่านการกรองเป็นตัวแทนของปริมาณไนโตรเจนละลายน้ำและประมาณไนโตรเจนทั้งหมดตามลำดับ เติมสารละลายออกซิไดซ์ปริมาตร 2.5 มล. เขย่าให้เข้ากัน ใช้สำลีอุดปากหลอดและนำตัวอย่างไปผ่านกระบวนการย่อยด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 121°ซ ความดัน 15 ปอนด์/ตร.นิ้ว เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเติมสารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ปริมาตร 0.5 มล. (ทั้งนี้สามารถปรับเพิ่มลดปริมาตรน้ำตัวอย่างและสารละลายที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ได้โดยคงอัตราส่วนให้มีค่าเท่าเดิม) เขย่าให้เข้ากันและนำตัวอย่างไปผ่านการกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) เป็นเวลา 15 นาที สำหรับการวิเคราะห์แบลงค์สามารถทำได้โดยใช้น้ำ D.I. ที่มีการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่างและใช้กระบวนการวิเคราะห์เช่นเดิม นำตัวอย่างส่วนที่เป็นน้ำใสด้านบนไปวิเคราะห์หาปริมาณไนเทรตไนโตรเจนตามวิธีที่ระบุในภาคผนวก ก.4 เปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไนเทรตมาตรฐานที่ความเข้มข้น 2 4 6 8 และ 10 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ดังกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ไนเทรตในรูปที่ ก-3

ก.5 วิธีวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำอาศัยวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Standard Method (2005) โดยกระบวนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการอบกระดาษกรอง Whatman GF/C ขนาด 47 มม. ที่อุณหภูมิ 103 – 105 °ซ เป็นเวลา 24 ชม. และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง เพื่อเก็บข้อมูลน้ำหนักแห้งของกระดาษกรอง จากนั้นกรองน้ำตัวอย่างด้วยปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ทำการอบและชั่งน้ำหนักกระดาษกรองที่ผ่านการกรองน้ำตัวอย่างเช่นเดิมเพื่อนำผลต่างของน้ำหนักกระดาษกรองที่เพิ่มขึ้นมาคำนวณหาปริมาณของตะกอนแขวนลอยทั้งหมดดังสมการที่ ก-1

ปริมาณความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยทั้งหมด (มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล.)

$$= \frac{[\text{ นน.กระดาษกรองหลังกรองน้ำตัวอย่าง} - \text{นน.กระดาษกรองก่อนกรองน้ำตัวอย่าง (ก.) }] \times 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการกรอง (มล.)}} \quad \text{(ก-1)}$$

ก.6 วิธีวิเคราะห์ซีโอดี

การวิเคราะห์ซีโอดีในน้ำอาศัยวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Standard Method (2005) โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารเคมีและกระบวนการวิเคราะห์ดังนี้

- *การเตรียมสารเคมี*

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต (Standard Potassium Dichromate Solution) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล สามารถเตรียมได้โดยการละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตไดโครเมต (Potassium Dichromate; $K_2Cr_2O_7$) ปริมาณ 4.913 ก. ลงในน้ำ D.I. ปริมาตร 500 มล. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Sulfuric Acid; H_2SO_4) ปริมาตร 167 มล. และเมอร์คิวรีซัลเฟต (Mercury (II) Sulphate; $HgSO_4$) ปริมาณ 33.3 ก. คนให้ละลายและตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วทำการปรับปริมาตรสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ล.
2. กรดซัลฟิวริกและซิลเวอร์ซัลเฟต (Conc. Sulfuric Acid with Silver Sulfate) สามารถเตรียมได้โดยการละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver sulfate; $AgSO_4$) ปริมาณ 22 ก. ลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตร 2.5 ล. ตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการละลายของซิลเวอร์ซัลเฟตประมาณ 1-2 วัน
3. สารละลายมาตรฐานเฟอรัสแอมโมเนียซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulfate; FAS) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล สามารถเตรียมได้โดยการละลายเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต (Ferrous Ammonium Hexahydrate; $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2.6H_2O$) ปริมาณ 39 ก. ลงในน้ำ D.I. ปริมาตร 500 มล. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตร 20 มล. คนให้ละลายและตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วทำการปรับปริมาตรสารละลายมาตรฐานเฟอรัสแอมโมเนียซัลเฟตให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ล.
4. สารละลายเฟอโรอิน อินดิเคเตอร์ (Ferroin Indicator) สามารถเตรียมได้โดยการละลาย 1,10-ฟีแนนทาลีนโมโนไฮเดรต (1,10-Phenanthroline monohydrate; $C_{12}H_8N_2.H_2O$) ปริมาณ 1.485 ก. และ เฟอร์รัสซัลเฟต (Ferrous Sulfate; $FeSO_4.7H_2O$) ปริมาณ 0.695 ก. ลงในน้ำ D.I. และปรับปริมาตรสารละลายเฟอโรอิน อินดิเคเตอร์ให้มีปริมาตรเท่ากับ 100 มล.

- *กระบวนการวิเคราะห์*

สำหรับการเก็บน้ำตัวอย่างควรเก็บใส่ขวดพลาสติกปริมาตร 30 มล. จากนั้นควรทำการวิเคราะห์ทันที หากไม่สามารถทำได้ควรเก็บน้ำตัวอย่างแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°ซ

กระบวนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มล. ใส่ในหลอดย่อยสลาย (Digestion Tubes) ขนาด 20 x 150 มม. เติมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ปริมาตร 3 มล. และกรดซัลฟิวริกและซิลเวอร์ซัลเฟตปริมาตร 7 มล. ตามลำดับ

ปิดฝาหลอดด้วยจุกเกลียว เขย่าให้เข้ากันและนำตัวอย่างไปเข้าเครื่องอบอุณหภูมิสูง (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 150 °ซ เป็นเวลา 2 ชม. จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วเติมสารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ ปริมาตร 2-3 หยด ทำการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานเฟอรัสแอมโมเนียซัลเฟต (FAS) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล โดยจุดยุติจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง สำหรับการวิเคราะห์แบลงค์สามารถทำได้โดยใช้น้ำ D.I. ที่มีการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่างและใช้กระบวนการไทเทรตเช่นเดิม โดยข้อมูลปริมาตรสารละลาย FAS ที่ใช้ในการไทเทรตนำมาคำนวณหาปริมาณซีโอดีในน้ำดังสมการที่ ก-2

$$\textit{ซีโอดี (มก./ล.)} = \frac{(A - B) \times N \times 8{,}000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มล.)}} \qquad \text{(ก-2)}$$

โดย A = ปริมาตรสารละลายเฟอรัสแอมโมเนียซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตแบลงค์ (มก.)

B = ปริมาตรสารละลายเฟอรัสแอมโมเนียซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตน้ำตัวอย่าง (มก.)

N = นอร์มัลลิตี้ของสารละลายมาตรฐานเฟอรัสแอมโมเนียซัลเฟต (Normality; N)

เนื่องจาก FAS มีความเข้มข้นลดลงจึงจำเป็นต้องหาความเข้มข้นในหน่วยนอร์มัลลิตี้ของสารละลายที่แน่นอนก่อนการใช้งานทุกครั้งซึ่งสามารถทำได้โดยตวงน้ำกลั่นปริมาตร 50 มล. ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล. ปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ปริมาตร 5 มล. และกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตร 15 มล. ตามลำดับ เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วใช้กระบวนการไทเทรตเช่นเดิม ข้อมูลปริมาตรสารละลาย FAS ที่ใช้ในการไทเทรตนำมาคำนวณหาความเข้มข้นของ FAS ในหน่วยนอร์มัลลิตี้ ดังสมการที่ ก-3

$$\textit{ความเข้มข้นของ FAS (N)} = \frac{\text{ปริมาตร } K_2Cr_2O_7 \text{ (มล.)} \times 0.1}{\text{ปริมาตร FAS (มล.)}} \qquad \text{(ก-3)}$$

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพน้ำสำหรับการทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดแบบจม

ตารางที่ ข-1 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการทดสอบอัตราไนทริฟิเคชันเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 1 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
03/07/2556 10:30 น.	0.00	2.28	0.16	0.00	0.00	0.71	0.12
03/07/2556 13:30 น.	0.13	2.29	0.12	0.00	0.00	1.62	0.03
03/07/2556 16:30 น.	0.25	2.21	0.11	0.00	0.00	1.54	0.08
03/07/2556 19:30 น.	0.38	2.42	0.05	0.00	0.00	1.64	0.08
04/07/2556 08:30 น.	0.92	2.08	0.38	0.00	0.00	1.89	0.09
04/07/2556 19:30 น.	1.38	2.03	0.27	0.02	0.00	2.26	0.12
05/07/2556 13:30 น.	2.13	1.29	0.39	0.14	0.04	3.39	0.22
05/07/2556 19:30 น.	2.38	0.72	0.17	0.18	0.08	3.96	0.33
06/07/2556 19:30 น.	3.38	0.22	0.11	0.01	0.00	4.37	1.17
07/07/2556 14:30 น.	4.17	0.12	0.09	0.01	0.00	4.85	1.21

ตารางที่ ข-2 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการทดสอบอัตราไนทริฟิเคชันเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 2 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
10/07/2556 10:00 น.	0.00	2.17	0.08	0.00	0.00	1.00	0.03
10/07/2556 13:00 น.	0.13	1.83	0.11	0.01	0.01	2.74	0.10
10/07/2556 14:30 น.	0.19	1.67	0.08	0.02	0.01	2.88	0.20
10/07/2556 16:00 น.	0.25	1.43	0.09	0.03	0.00	3.09	0.16
10/07/2556 17:30 น.	0.31	1.36	0.17	0.04	0.01	2.68	0.15
10/07/2556 19:00 น.	0.38	1.20	0.26	0.06	0.01	3.30	0.36
11/07/2556 13:00 น.	1.13	0.78	0.23	0.04	0.01	4.39	0.13
11/07/2556 20:00 น.	1.42	0.52	0.06	0.26	0.05	5.38	0.10
12/07/2556 13:00 น.	2.13	0.13	0.03	0.46	0.05	6.66	0.08
12/07/2556 20:00 น.	2.42	0.11	0.07	0.18	0.15	7.23	0.13

ตารางที่ ข-3 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการทดสอบอัตราไนทริฟิเคชันเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 3 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
17/07/2556 10:30 น.	0.00	2.23	0.04	0.00	0.00	0.63	0.01
17/07/2556 13:30 น.	0.13	2.16	0.07	0.01	0.01	1.57	0.18
17/07/2556 16:30 น.	0.25	2.07	0.31	0.00	0.00	1.70	0.08
17/07/2556 18:00 น.	0.31	2.02	0.26	0.00	0.00	1.89	0.12
17/07/2556 19:30 น.	0.38	1.83	0.20	0.01	0.00	1.95	0.22
18/07/2556 8:30 น.	0.92	1.43	0.14	0.03	0.01	3.06	0.52
18/07/2556 19:30 น.	1.38	0.85	0.09	0.05	0.02	4.51	0.83
19/07/2556 13:00 น.	2.13	0.16	0.03	0.06	0.07	7.22	0.74
19/07/2556 19:30 น.	2.38	0.15	0.08	0.08	0.11	7.54	1.28
20/07/2556 19:30 น.	3.38	0.05	0.01	0.01	0.00	9.59	0.63

ตารางที่ ข-4 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการทดสอบอัตราไนทริฟิเคชันเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 4 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
24/07/2556 10:00 น.	0.00	1.96	0.08	0.00	0.00	1.49	0.20
24/07/2556 13:00 น.	0.13	1.80	0.10	0.06	0.01	2.53	0.10
24/07/2556 14:30 น.	0.19	1.73	0.08	0.11	0.08	2.48	0.40
24/07/2556 16:00 น.	0.25	1.67	0.03	0.10	0.01	2.39	0.49
24/07/2556 17:30 น.	0.31	1.64	0.03	0.11	0.02	2.51	0.14
24/07/2556 19:00 น.	0.38	1.58	0.03	0.14	0.03	2.64	0.07
25/07/2556 12:00 น.	1.08	0.36	0.19	0.93	0.24	3.36	0.26
25/07/2556 20:00 น.	1.42	0.08	0.09	1.12	0.13	3.21	0.20
26/07/2556 10:00 น.	2.00	0.13	0.03	0.80	0.24	3.71	0.29
27/07/2556 19:00 น.	3.38	0.03	0.03	0.02	0.01	4.69	0.24

ตารางที่ ข-5 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการทดสอบอัตราไนทริฟิเคชันเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 5 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
31/07/2556 10:00 น.	0.00	1.82	0.11	0.00	0.00	0.71	0.01
31/07/2556 13:00 น.	0.13	1.53	0.26	0.04	0.01	3.42	0.34
31/07/2556 14:30 น.	0.19	1.72	0.07	0.03	0.01	3.55	0.40
31/07/2556 16:00 น.	0.25	1.57	0.13	0.03	0.00	3.72	0.45
31/07/2556 17:30 น.	0.31	1.45	0.17	0.03	0.01	3.91	0.45
31/07/2556 19:00 น.	0.38	1.22	0.24	0.03	0.01	3.94	0.82

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
01/08/2556 10:00 น.	1.00	0.16	0.04	0.03	0.02	6.32	1.18
01/08/2556 15:00 น.	1.21	0.20	0.07	0.01	0.01	6.56	1.40
02/08/2556 10:00 น.	2.00	0.09	0.03	0.02	0.01	7.69	2.08
02/08/2556 16:00 น.	2.25	0.01	0.02	0.04	0.01	7.60	2.09

ตารางที่ ข-6 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการทดสอบอัตราไนทริฟิเคชันเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 6 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
07/08/2556 10:00 น.	0.00	1.97	0.08	0.00	0.00	0.84	0.08
07/08/2556 13:00 น.	0.13	0.98	0.08	0.02	0.00	2.46	0.06
07/08/2556 14:30 น.	0.19	1.09	0.14	0.02	0.01	2.60	0.12
07/08/2556 16:00 น.	0.25	1.02	0.10	0.03	0.01	2.82	0.17
07/08/2556 17:30 น.	0.31	0.77	0.09	0.02	0.01	3.17	0.26
07/08/2556 19:00 น.	0.38	0.52	0.12	0.03	0.01	3.23	0.15
08/08/2556 12:00 น.	1.08	0.00	0.00	0.06	0.01	5.13	0.46
08/08/2556 20:00 น.	1.42	0.08	0.08	0.02	0.01	5.60	0.70
09/08/2556 10:00 น.	2.00	0.29	0.12	0.02	0.00	6.09	0.95
10/08/2556 19:00 น.	3.38	0.11	0.05	0.03	0.02	7.34	1.08

ตารางที่ ข-7 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการทดสอบอัตราไนทริฟิเคชันเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 7 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
14/08/2556 11:00 น.	0.00	2.03	0.03	0.00	0.00	1.11	0.12
14/08/2556 14:00 น.	0.13	1.34	0.07	0.01	0.00	2.75	0.04
14/08/2556 15:30 น.	0.19	1.05	0.19	0.01	0.01	2.99	0.20
14/08/2556 17:00 น.	0.25	0.76	0.12	0.01	0.00	2.71	0.39
14/08/2556 18:30 น.	0.31	0.46	0.17	0.02	0.01	3.20	0.64
14/08/2556 20:00 น.	0.38	0.25	0.18	0.01	0.00	3.01	0.54
15/08/2556 08:30 น.	0.90	0.14	0.09	0.00	0.00	2.77	0.57
15/08/2556 14:30 น.	1.15	0.07	0.02	0.01	0.01	2.68	0.59
16/08/2556 08:30 น.	1.90	0.02	0.01	0.00	0.00	2.80	0.33
16/08/2556 13:30 น.	2.10	0.04	0.04	0.00	0.00	2.87	0.61

ตารางที่ ข-8 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการทดสอบอัตราไนทริฟิเคชันเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 8 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
21/08/2556 11:00 น.	0.00	1.93	0.03	0.04	0.01	0.93	0.03
21/08/2556 14:00 น.	0.13	1.50	0.27	0.48	0.26	2.61	0.99
21/08/2556 15:30 น.	0.19	0.97	0.20	0.49	0.14	2.71	0.88
21/08/2556 17:00 น.	0.25	0.58	0.15	0.82	0.17	2.32	0.83
21/08/2556 18:30 น.	0.31	0.39	0.11	0.51	0.09	2.65	0.61
21/08/2556 20:00 น.	0.38	0.33	0.04	0.40	0.25	2.59	0.98
22/08/2556 08:30 น.	0.90	0.19	0.08	0.50	0.46	2.03	0.59
22/08/2556 16:30 น.	1.23	0.10	0.01	0.27	0.18	2.08	0.38
23/08/2556 11:00 น.	2.00	0.09	0.01	0.21	0.15	2.11	0.49
23/08/2556 16:00 น.	2.21	0.04	0.01	0.01	0.01	2.41	0.37

ตารางที่ ข-9 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการทดสอบอัตราดีไนทริฟิเคชันเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 1 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นไนเทรตเริ่มต้นเท่ากับ 10 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
03/07/2556 10:30 น.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.25	0.09
03/07/2556 13:30 น.	0.13	0.00	0.00	0.12	0.10	10.05	0.20
03/07/2556 15:00 น.	0.19	0.00	0.00	0.15	0.12	9.85	0.09
03/07/2556 16:30 น.	0.25	0.00	0.00	0.31	0.31	9.52	0.29
03/07/2556 19:30 น.	0.38	0.00	0.00	0.52	0.03	8.42	0.42
04/07/2556 19:30 น.	1.38	0.68	0.04	0.83	0.50	2.53	0.58
05/07/2556 13:30 น.	2.13	0.73	0.04	0.07	0.02	1.38	0.18
06/07/2556 08:30 น.	3.38	0.73	0.28	0.00	0.00	1.27	0.33
07/07/2556 14:30 น.	4.17	0.97	0.40	0.00	0.00	1.23	0.12
10/07/2556 08:30 น.	6.92	0.29	0.28	0.00	0.00	0.59	0.09

ตารางที่ ข-10 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการทดสอบอัตราดีไนทริฟิเคชันเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 2 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นไนเทรตเริ่มต้นเท่ากับ 10 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
10/07/2556 10:00 น.	0.00	0.34	0.09	0.00	0.00	9.86	0.15
10/07/2556 13:00 น.	0.13	0.39	0.06	0.07	0.01	10.23	0.25
10/07/2556 14:30 น.	0.19	0.81	0.28	0.07	0.02	10.17	0.19
10/07/2556 16:00 น.	0.25	0.29	0.04	0.05	0.02	10.22	0.07
10/07/2556 17:30 น.	0.31	0.45	0.04	0.06	0.01	9.54	1.08
10/07/2556 19:00 น.	0.38	0.65	0.28	0.07	0.01	10.39	0.54

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
11/07/2556 13:00 น.	1.13	0.25	0.02	0.02	0.01	5.11	0.17
11/07/2556 20:00 น.	1.42	0.08	0.03	0.01	0.00	3.27	0.27
12/07/2556 13:00 น.	2.13	0.74	0.29	0.01	0.01	3.03	0.36
12/07/2556 20:00 น.	2.42	0.13	0.10	0.00	0.00	0.93	0.42

ตารางที่ ข-11 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการทดสอบอัตราดีไนทริฟิเคชันเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 3 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นไนเทรตเริ่มต้นเท่ากับ 10 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
17/07/2556 10:30 น.	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	10.33	0.18
17/07/2556 15:0 น.	0.19	0.23	0.05	0.06	0.01	11.00	0.04
17/07/2556 16:30 น.	0.25	0.39	0.12	0.07	0.03	10.92	0.06
17/07/2556 19:30 น.	0.38	0.55	0.04	0.09	0.06	10.08	0.27
18/07/2556 8:30 น.	0.92	0.44	0.16	2.03	0.87	6.95	0.88
18/07/2556 19:30 น.	1.38	0.35	0.02	0.09	0.03	3.51	0.77
19/07/2556 13:30 น.	2.13	0.33	0.17	0.05	0.04	2.60	0.39
20/07/2556 19:30 น.	3.38	0.46	0.18	0.01	0.00	2.87	0.25
21/07/2556 14:30 น.	4.17	0.55	0.51	0.01	0.01	2.54	0.66
23/07/2556 8:30 น.	5.92	2.23	1.08	0.00	0.00	0.87	0.15

ตารางที่ ข-12 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการทดสอบอัตราดีไนทริฟิเคชันเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 4 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นไนเทรตเริ่มต้นเท่ากับ 10 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
24/07/2556 10:00 น.	0.00	0.05	0.07	0.00	0.01	9.66	0.06
24/07/2556 13:00 น.	0.13	0.08	0.04	0.01	0.01	11.02	0.30
24/07/2556 14:30 น.	0.19	0.03	0.07	0.00	0.00	10.85	0.27
24/07/2556 16:00 น.	0.25	0.06	0.10	0.02	0.00	10.74	0.17
24/07/2556 17:30 น.	0.31	0.00	0.00	0.03	0.01	10.55	0.11
24/07/2556 19:00 น.	0.38	0.00	0.00	0.08	0.07	10.31	0.18
25/07/2556 12:00 น.	1.08	0.00	0.00	0.89	0.72	5.20	0.72
25/07/2556 20:00 น.	1.42	0.16	0.11	0.06	0.02	4.49	0.60
26/07/2556 10:00 น.	2.00	0.18	0.02	0.10	0.03	4.11	0.63
27/07/2556 19:00 น.	3.38	0.37	0.08	0.08	0.05	1.35	0.02

ตารางที่ ข-13 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการทดสอบอัตราดีไนทริฟิเคชันเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 5 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นไนเทรตเริ่มต้นเท่ากับ 10 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
31/07/2556 10:00 น.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.78	0.02
31/07/2556 13:00 น.	0.13	0.03	0.05	0.07	0.04	12.26	0.23
31/07/2556 14:30 น.	0.19	0.43	0.12	0.12	0.08	9.90	0.44
31/07/2556 16:00 น.	0.25	0.57	0.15	0.17	0.09	8.94	0.38
31/07/2556 17:30 น.	0.31	0.92	0.09	0.18	0.10	9.42	0.82
31/07/2556 19:00 น.	0.38	0.24	0.05	0.17	0.10	9.17	0.63
01/08/2556 15:00 น.	1.21	0.35	0.16	0.80	1.22	1.57	1.15
02/08/2556 16:00 น.	2.25	1.25	1.13	0.04	0.05	1.04	0.76
03/08/2556 18:00 น.	3.33	1.97	1.28	0.09	0.03	1.16	0.29
04/08/2556 14:00 น.	4.17	3.56	1.97	0.10	0.03	1.30	0.42

ตารางที่ ข-14 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการทดสอบอัตราดีไนทริฟิเคชันเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 6 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นไนเทรตเริ่มต้นเท่ากับ 10 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
07/08/2556 10:00 น.	0.00	0.18	0.10	0.00	0.00	10.13	0.12
07/08/2556 13:00 น.	0.13	0.19	0.08	0.01	0.01	10.21	0.15
07/08/2556 14:30 น.	0.19	0.52	0.17	0.04	0.01	10.43	0.37
07/08/2556 16:00 น.	0.25	0.17	0.02	0.05	0.01	9.77	0.09
07/08/2556 17:30 น.	0.31	0.26	0.04	0.26	0.13	9.47	0.12
07/08/2556 19:00 น.	0.38	0.43	0.06	0.09	0.01	7.74	0.92
08/08/2556 12:00 น.	1.08	0.78	0.19	0.17	0.07	2.37	0.16
08/08/2556 20:00 น.	1.42	0.84	0.10	0.10	0.05	1.57	0.40
09/08/2556 10:00 น.	2.00	0.85	0.10	0.02	0.03	2.59	0.26
09/08/2556 19:00 น.	2.38	1.12	0.26	0.00	0.00	0.95	0.19

ตารางที่ ข-15 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการทดสอบอัตราดีไนทริฟิเคชันเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 7 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นไนเทรตเริ่มต้นเท่ากับ 10 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
14/08/2556 11:00 น.	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	10.38	0.10
14/08/2556 14:00 น.	0.13	0.15	0.09	0.03	0.01	9.83	0.01
14/08/2556 15:30 น.	0.19	0.26	0.09	0.04	0.01	9.39	0.05
14/08/2556 17:00 น.	0.25	0.15	0.05	0.06	0.02	9.12	0.36
14/08/2556 18:30 น.	0.31	0.19	0.05	0.07	0.01	8.55	0.26
14/08/2556 20:00 น.	0.38	0.31	0.13	0.06	0.01	7.63	0.12

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
15/08/2556 08:00 น.	0.92	0.35	0.26	0.20	0.02	2.53	0.08
15/08/2556 17:00 น.	1.29	0.07	0.04	0.01	0.01	1.79	0.79
16/08/2556 08:00 น.	1.92	0.03	0.05	0.01	0.01	1.26	0.13
16/08/2556 17:00 น.	2.29	0.10	0.07	0.01	0.01	1.05	0.20

ตารางที่ ข-16 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการทดสอบอัตราดีไนทริฟิเคชันเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 8 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นไนเทรตเริ่มต้นเท่ากับ 10 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
21/08/2556 11:00 น.	0.00	0.09	0.04	0.09	0.05	10.43	0.10
21/08/2556 14:00 น.	0.13	0.20	0.03	0.21	0.12	10.15	0.20
21/08/2556 15:30 น.	0.19	0.12	0.03	0.21	0.13	10.21	0.35
21/08/2556 17:00 น.	0.25	0.16	0.03	0.69	0.22	9.30	0.28
21/08/2556 18:30 น.	0.31	0.50	0.12	1.66	1.22	6.71	2.80
21/08/2556 20:00 น.	0.38	0.58	0.14	2.17	1.55	3.65	1.70
22/08/2556 08:30 น.	0.90	0.65	0.10	2.43	0.66	0.31	0.54
22/08/2556 16:30 น.	1.23	0.77	0.08	1.17	1.85	0.82	0.71
23/08/2556 11:00 น.	2.00	0.73	0.05	0.12	0.08	1.23	0.12
23/08/2556 16:00 น.	2.21	0.62	0.03	0.05	0.04	1.36	0.12

ตารางที่ ข-17 ปริมาณตะกอนจุลชีพที่สะสมบนมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด ในการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนเบื้องต้นของตัวกรองชีวภาพที่เวลาการบ่มเชื้อแต่ละสัปดาห์ ชุดการทดลองละ 3 ตัวอย่าง (วิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ)

ระยะเวลาในการบ่มเชื้อ (สัปดาห์)	ปริมาณตะกอนจุลชีพ (ก./ม.)	
	ค่าเฉลี่ย	SD
1	1.87	0.25
2	4.63	0.43
3	10.95	2.83
4	14.34	2.48
5	26.77	5.75
6	33.44	5.18
7	50.89	3.41
8	62.35	2.08

ตารางที่ ข-18 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 7 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
11/09/2556 11:00 น.	0	1.83	0.12	0.00	0.00	1.13	0.11
11/09/2556 14:00 น.	0.13	1.27	0.13	0.01	0.00	2.75	0.05
11/09/2556 15:30 น.	0.19	1.05	0.19	0.01	0.01	2.89	0.30
11/09/2556 17:00 น.	0.25	0.67	0.08	0.01	0.00	2.71	0.39
11/09/2556 18:30 น.	0.31	0.36	0.01	0.02	0.01	3.13	0.56
11/09/2556 20:00 น.	0.38	0.19	0.10	0.01	0.00	2.99	0.58
12/09/2556 08:30 น.	0.90	0.14	0.09	0.00	0.00	2.72	0.53
12/09/2556 14:30 น.	1.15	0.07	0.02	0.01	0.01	2.67	0.60
13/09/2556 08:30 น.	1.90	0.02	0.01	0.00	0.00	2.80	0.33
13/09/2556 13:30 น.	2.10	0.04	0.04	0.00	0.00	2.87	0.61
14/09/2556 10:00 น.	2.96	3.67	0.24	0.00	0.00	2.67	0.24
14/09/2556 13:00 น.	3.08	2.90	0.32	0.02	0.02	3.18	0.42
14/09/2556 14:30 น.	3.15	2.83	0.32	0.01	0.01	3.23	0.19
14/09/2556 16:00 น.	3.21	2.31	0.13	0.01	0.01	3.41	0.22

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
14/09/2556 17:30 น.	3.27	2.20	0.15	0.01	0.00	3.37	0.13
14/09/2556 19:00 น.	3.33	2.00	0.25	0.00	0.00	3.47	0.23
15/09/2556 07:00 น.	3.83	0.00	0.00	0.00	0.00	5.05	0.44
15/09/2556 17:00 น.	4.25	0.00	0.00	0.00	0.00	4.81	0.52
16/09/2556 08:00 น.	4.88	0.00	0.00	0.00	0.00	4.30	0.45
16/09/2556 13:00 น.	5.08	0.00	0.00	0.01	0.00	4.09	0.68

ตารางที่ ข-19 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการศึกษาอัตราดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 7 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นไนเทรตเริ่มต้นเท่ากับ 10 และ 50 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
11/09/2556 11:00 น.	0	0.02	0.03	0.00	0.00	10.37	0.15
11/09/2556 14:00 น.	0.13	0.14	0.09	0.03	0.01	9.83	0.01
11/09/2556 15:30 น.	0.19	0.26	0.09	0.04	0.01	9.38	0.08
11/09/2556 17:00 น.	0.25	0.16	0.05	0.06	0.02	9.23	0.39
11/09/2556 18:30 น.	0.31	0.19	0.05	0.07	0.01	8.55	0.26
11/09/2556 20:00 น.	0.38	0.30	0.14	0.07	0.02	7.63	0.12
12/09/2556 08:30 น.	0.90	0.35	0.26	0.20	0.02	2.53	0.08
12/09/2556 14:30 น.	1.15	0.06	0.04	0.00	0.00	1.95	1.07
13/09/2556 08:30 น.	1.90	0.03	0.05	0.00	0.00	1.67	0.84
13/09/2556 13:30 น.	2.10	0.10	0.07	0.00	0.00	1.54	0.66
14/09/2556 10:00 น.	2.96	2.48	0.56	0.02	0.02	49.03	1.24
14/09/2556 13:00 น.	3.08	1.83	0.64	0.66	0.20	45.63	2.20
14/09/2556 14:30 น.	3.15	1.62	0.49	0.71	0.10	46.64	0.85
14/09/2556 16:00 น.	3.21	2.00	0.76	0.65	0.07	45.53	1.01
14/09/2556 17:30 น.	3.27	1.82	0.75	0.74	0.06	44.83	0.78
14/09/2556 19:00 น.	3.33	1.52	0.84	0.97	0.07	42.03	0.32

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
15/09/2556 07:00 น.	3.83	0.19	0.18	4.23	0.75	20.12	2.17
15/09/2556 17:00 น.	4.25	0.45	0.42	5.23	0.68	10.81	0.21
16/09/2556 08:00 น.	4.88	0.35	0.23	0.23	0.04	1.05	0.20
16/09/2556 13:00 น.	5.08	0.10	0.03	0.05	0.02	1.44	0.19

ตารางที่ ข-20 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 7 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
11/09/2556 11:00 น.	0	150.00	0.00	7.30	0.78	8.14	0.08	25.50	0.26
12/09/2556 11:00 น.	1.00	126.67	5.77	7.40	0.53	8.10	0.04	25.43	0.32
13/09/2556 11:00 น.	2.00	96.67	5.77	6.70	0.95	8.14	0.02	25.20	0.20
14/09/2556 11:00 น.	3.00	150.00	0.00	8.33	0.25	8.32	0.04	25.87	0.25
15/09/2556 11:00 น.	4.00	130.00	0.00	8.03	0.15	8.19	0.01	25.90	0.30
16/09/2556 11:00 น.	5.00	136.67	5.77	8.50	0.30	8.15	0.03	25.70	0.17

ตารางที่ ข-21 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการศึกษาอัตราดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 7 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นไนเทรตเริ่มต้นเท่ากับ 10 และ 50 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)		วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
			ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
11/09/2556	11:00 น.	0	80.00	0.00	2.00	0.26	7.58	0.02	25.57	0.35
12/09/2556	11:00 น.	1.00	110.00	0.00	0.27	0.06	7.73	0.07	25.23	0.12
13/09/2556	11:00 น.	2.00	123.33	5.77	0.23	0.06	7.49	0.15	25.63	0.25
14/09/2556	11:00 น.	3.00	146.67	5.77	1.43	0.06	7.68	0.01	25.43	0.35
15/09/2556	11:00 น.	4.00	210.00	10.00	0.23	0.06	7.84	0.10	25.57	0.35
16/09/2556	11:00 น.	5.00	236.67	5.77	0.20	0.00	7.73	0.13	25.27	0.06

ตารางที่ ข-22 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในการศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 7 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)		วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
			ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
			ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
11/09/2556	11:00 น.	0	183.33	6.40	65.23	5.12
12/09/2556	11:00 น.	1.00	187.90	1.37	75.47	6.80
13/09/2556	11:00 น.	2.00	173.77	4.60	48.70	5.16
14/09/2556	11:00 น.	3.00	177.60	0.82	67.20	4.03
15/09/2556	11:00 น.	4.00	174.63	2.68	61.07	3.82
16/09/2556	11:00 น.	5.00	177.60	0.82	62.67	4.12

ตารางที่ ข-23 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในการศึกษาอัตราดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 7 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นไนเทรตเริ่มต้นเท่ากับ 10 และ 50 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
11/09/2556 11:00 น.	0	33.20	10.96	-314.90	6.51
12/09/2556 11:00 น.	1.00	32.53	11.43	-318.87	8.69
13/09/2556 11:00 น.	2.00	35.83	3.51	-316.87	4.28
14/09/2556 11:00 น.	3.00	11.43	5.15	-291.27	22.08
15/09/2556 11:00 น.	4.00	12.90	1.28	-321.67	12.11
16/09/2556 11:00 น.	5.00	10.27	2.27	-357.03	12.99

ตารางที่ ข-24 ค่าซีโอดี ในการศึกษาอัตราดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการบ่มเชื้อในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 7 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นไนเทรตเริ่มต้นเท่ากับ 10 และ 50 มก.ไนเทรต-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ซีโอดี (มก.-ซีโอดี/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD
11/09/2556 11:00 น.	0	104.76	0.00
12/09/2556 11:00 น.	1.00	57.14	16.50
13/09/2556 11:00 น.	2.00	47.62	0.00
14/09/2556 11:00 น.	3.00	307.69	0.00
15/09/2556 11:00 น.	4.00	174.36	17.76
16/09/2556 11:00 น.	5.00	112.82	47.00

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพน้ำสำหรับการทดลองช่วงที่ 2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไนโตรเจนด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด

ตารางที่ ค-1 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนจากภายนอก ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556 10:30 น.	0	2.11	0.11	0.00	0.00	0.10	0.02
16/10/2556 13:30 น.	0.13	1.67	0.08	0.02	0.00	0.27	0.02
16/10/2556 16:30 น.	0.25	1.34	0.26	0.01	0.00	0.34	0.04
16/10/2556 19:30 น.	0.38	0.76	0.36	0.03	0.00	0.34	0.05
17/10/2556 10:30 น.	1.00	0.24	0.06	0.02	0.01	0.37	0.06
17/10/2556 16:30 น.	1.25	0.14	0.06	0.02	0.01	0.37	0.04
18/10/2556 10:30 น.	2.00	0.26	0.08	0.04	0.02	0.32	0.02
18/10/2556 16:30 น.	2.25	0.12	0.06	0.03	0.01	0.30	0.07
19/10/2556 10:30 น.	3.00	0.11	0.04	0.04	0.02	0.35	0.20
20/10/2556 10:30 น.	4.00	0.09	0.03	0.04	0.03	0.37	0.06
21/10/2556 10:30 น.	5.00	0.06	0.01	0.08	0.04	0.43	0.09
22/10/2556 10:30 น.	6.00	0.03	0.00	0.07	0.04	0.29	0.03
23/10/2556 10:30 น.	7.00	3.98	0.08	0.00	0.00	0.84	0.03
23/10/2556 13:30 น.	7.13	2.72	0.08	0.02	0.00	1.30	0.14
23/10/2556 16:30 น.	7.25	2.64	0.17	0.01	0.00	1.55	0.26
23/10/2556 19:30 น.	7.38	2.51	0.12	0.02	0.01	1.72	0.29
24/10/2556 10:30 น.	8.00	1.63	0.24	0.07	0.02	1.69	0.37
24/10/2556 16:30 น.	8.25	0.52	0.12	0.07	0.03	1.86	0.36
25/10/2556 10:30 น.	9.00	0.08	0.03	0.03	0.03	1.74	0.16
25/10/2556 16:30 น.	9.25	0.09	0.05	0.01	0.01	1.52	0.13

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
26/10/2556 10:30 น.	10.00	0.04	0.01	0.01	0.01	1.79	0.16
27/10/2556 10:30 น.	11.00	0.03	0.02	0.02	0.01	1.31	0.14
28/10/2556 10:30 น.	12.00	0.03	0.01	0.02	0.01	1.25	0.06
29/10/2556 10:30 น.	13.00	0.02	0.01	0.02	0.01	1.28	0.10

ตารางที่ ค-2 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดการทดลองที่ 1 ที่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนโดยใช้เมทานอลในสัดส่วน C:N = 1:1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556 10:30 น.	0	1.97	0.07	0.00	0.00	0.76	0.03
16/10/2556 13:30 น.	0.13	1.68	0.19	0.02	0.01	1.91	0.22
16/10/2556 16:30 น.	0.25	1.17	0.38	0.01	0.00	2.12	0.50
16/10/2556 19:30 น.	0.38	0.81	0.39	0.01	0.00	2.34	0.41
17/10/2556 10:30 น.	1.00	0.33	0.06	0.01	0.00	2.99	0.19
17/10/2556 16:30 น.	1.25	0.11	0.02	0.02	0.01	2.91	0.23
18/10/2556 10:30 น.	2.00	0.21	0.05	0.03	0.02	2.41	0.37
18/10/2556 16:30 น.	2.25	0.13	0.05	0.03	0.01	1.82	0.28
19/10/2556 10:30 น.	3.00	0.08	0.05	0.03	0.02	1.68	0.88
20/10/2556 10:30 น.	4.00	0.09	0.03	0.04	0.03	1.32	0.59
21/10/2556 10:30 น.	5.00	0.05	0.03	0.06	0.05	1.53	0.58
22/10/2556 10:30 น.	6.00	0.01	0.00	0.07	0.04	1.87	0.27
23/10/2556 10:30 น.	7.00	3.92	0.06	0.01	0.00	0.88	0.06
23/10/2556 13:30 น.	7.13	2.96	0.08	0.02	0.01	1.24	0.11
23/10/2556 16:30 น.	7.25	3.13	0.12	0.01	0.01	1.25	0.43
23/10/2556 19:30 น.	7.38	3.04	0.13	0.03	0.01	1.50	0.17

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
24/10/2556 10:30 น.	8.00	1.84	0.21	0.08	0.01	1.93	0.39
24/10/2556 16:30 น.	8.25	1.25	0.29	0.06	0.00	2.25	0.55
25/10/2556 10:30 น.	9.00	0.18	0.04	0.04	0.02	2.37	0.34
25/10/2556 16:30 น.	9.25	0.14	0.04	0.04	0.02	2.27	0.73
26/10/2556 10:30 น.	10.00	0.09	0.08	0.03	0.03	1.45	0.37
27/10/2556 10:30 น.	11.00	0.03	0.01	0.02	0.01	1.01	0.34
28/10/2556 10:30 น.	12.00	0.03	0.01	0.02	0.01	0.92	0.49
29/10/2556 10:30 น.	13.00	0.02	0.01	0.02	0.01	0.98	0.39

ตารางที่ ค-3 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดการทดลองที่ 2 ที่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนโดยใช้เมทานอลในสัดส่วน C:N = 2:1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556 10:30 น.	0	2.01	0.07	0.00	0.00	0.76	0.05
16/10/2556 13:30 น.	0.13	1.73	0.06	0.01	0.01	1.66	0.32
16/10/2556 16:30 น.	0.25	1.37	0.06	0.00	0.00	2.00	0.16
16/10/2556 19:30 น.	0.38	0.76	0.08	0.01	0.01	2.09	0.26
17/10/2556 10:30 น.	1.00	0.41	0.03	0.02	0.02	2.58	0.22
17/10/2556 16:30 น.	1.25	0.24	0.01	0.05	0.04	2.71	0.29
18/10/2556 10:30 น.	2.00	0.18	0.11	0.04	0.00	2.89	0.32
18/10/2556 16:30 น.	2.25	0.13	0.05	0.03	0.01	2.26	0.69
19/10/2556 10:30 น.	3.00	0.14	0.12	0.05	0.02	1.74	0.49
20/10/2556 10:30 น.	4.00	0.09	0.06	0.07	0.05	1.55	0.17
21/10/2556 10:30 น.	5.00	0.03	0.01	0.13	0.04	1.46	0.37
22/10/2556 10:30 น.	6.00	0.02	0.02	0.12	0.01	1.91	0.15

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
23/10/2556 10:30 น.	7.00	3.96	0.01	0.02	0.00	0.79	0.05
23/10/2556 13:30 น.	7.13	2.13	0.27	0.04	0.00	1.35	0.20
23/10/2556 16:30 น.	7.25	2.01	0.29	0.03	0.01	1.52	0.38
23/10/2556 19:30 น.	7.38	2.26	0.51	0.04	0.02	1.68	0.44
24/10/2556 10:30 น.	8.00	0.78	0.32	0.11	0.01	2.53	0.13
24/10/2556 16:30 น.	8.25	0.60	0.48	0.12	0.01	2.76	0.29
25/10/2556 10:30 น.	9.00	0.09	0.07	0.04	0.01	2.77	0.18
25/10/2556 16:30 น.	9.25	0.05	0.02	0.02	0.01	2.40	0.27
26/10/2556 10:30 น.	10.00	0.05	0.00	0.02	0.01	1.98	0.06
27/10/2556 10:30 น.	11.00	0.06	0.05	0.04	0.00	1.35	0.11
28/10/2556 10:30 น.	12.00	0.06	0.05	0.04	0.00	1.34	0.12
29/10/2556 10:30 น.	13.00	0.06	0.05	0.04	0.00	1.24	0.28

ตารางที่ ค-4 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดการทดลองที่ 3 ที่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนโดยใช้เมทานอลในสัดส่วน C:N = 3:1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556 10:30 น.	0	1.97	0.06	0.00	0.00	0.73	0.01
16/10/2556 13:30 น.	0.13	1.59	0.03	0.00	0.00	1.69	0.11
16/10/2556 16:30 น.	0.25	1.25	0.02	0.00	0.00	1.94	0.30
16/10/2556 19:30 น.	0.38	0.82	0.12	0.00	0.00	2.37	0.23
17/10/2556 10:30 น.	1.00	0.35	0.09	0.01	0.00	2.69	0.21
17/10/2556 16:30 น.	1.25	0.06	0.03	0.01	0.00	2.75	0.15
18/10/2556 10:30 น.	2.00	0.20	0.06	0.03	0.00	2.07	0.16
18/10/2556 16:30 น.	2.25	0.08	0.06	0.05	0.00	1.48	0.34

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
19/10/2556 10:30 น.	3.00	0.08	0.04	0.05	0.01	1.49	0.40
20/10/2556 10:30 น.	4.00	0.11	0.08	0.04	0.01	1.73	0.33
21/10/2556 10:30 น.	5.00	0.03	0.03	0.06	0.02	1.88	0.30
22/10/2556 10:30 น.	6.00	0.01	0.01	0.04	0.01	1.65	0.37
23/10/2556 10:30 น.	7.00	3.94	0.12	0.00	0.00	0.88	0.02
23/10/2556 13:30 น.	7.13	3.14	0.11	0.02	0.00	1.47	0.30
23/10/2556 16:30 น.	7.25	3.29	0.24	0.01	0.01	1.85	0.69
23/10/2556 19:30 น.	7.38	2.83	0.13	0.02	0.00	2.35	1.15
24/10/2556 10:30 น.	8.00	1.92	0.62	0.05	0.02	2.82	1.23
24/10/2556 16:30 น.	8.25	1.40	1.06	0.05	0.02	3.15	1.11
25/10/2556 10:30 น.	9.00	0.91	0.62	0.06	0.06	3.20	0.64
25/10/2556 16:30 น.	9.25	0.24	0.14	0.06	0.07	2.83	0.73
26/10/2556 10:30 น.	10.00	0.12	0.06	0.06	0.07	2.02	0.59
27/10/2556 10:30 น.	11.00	0.12	0.01	0.01	0.01	1.32	0.45
28/10/2556 10:30 น.	12.00	0.02	0.02	0.01	0.01	1.13	0.27
29/10/2556 10:30 น.	13.00	0.02	0.02	0.01	0.01	1.19	0.35

ตารางที่ ค-5 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดการทดลองที่ 4 ที่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนโดยใช้เมทานอลในสัดส่วน C:N = 4:1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556 10:30 น.	0	1.96	0.06	0.00	0.00	0.80	0.05
16/10/2556 13:30 น.	0.13	1.70	0.22	0.00	0.00	1.73	0.09
16/10/2556 16:30 น.	0.25	1.25	0.03	0.00	0.01	1.90	0.30
16/10/2556 19:30 น.	0.38	0.87	0.20	0.00	0.00	2.29	0.40

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
17/10/2556 10:30 น.	1.00	0.41	0.11	0.02	0.01	2.68	0.30
17/10/2556 16:30 น.	1.25	0.12	0.04	0.02	0.01	2.76	0.31
18/10/2556 10:30 น.	2.00	0.11	0.03	0.04	0.01	2.39	0.36
18/10/2556 16:30 น.	2.25	0.09	0.00	0.03	0.01	1.96	0.44
19/10/2556 10:30 น.	3.00	0.06	0.04	0.03	0.01	1.31	0.07
20/10/2556 10:30 น.	4.00	0.08	0.03	0.04	0.02	1.41	0.14
21/10/2556 10:30 น.	5.00	0.04	0.02	0.08	0.04	1.42	0.07
22/10/2556 10:30 น.	6.00	0.05	0.04	0.07	0.04	1.30	0.02
23/10/2556 10:30 น.	7.00	3.97	0.04	0.01	0.00	0.88	0.01
23/10/2556 13:30 น.	7.13	3.33	0.37	0.02	0.00	1.16	0.11
23/10/2556 16:30 น.	7.25	3.33	0.11	0.01	0.00	1.42	0.25
23/10/2556 19:30 น.	7.38	2.94	0.29	0.01	0.00	1.34	0.11
24/10/2556 10:30 น.	8.00	2.30	0.47	0.03	0.01	2.09	0.29
24/10/2556 16:30 น.	8.25	1.95	0.24	0.03	0.01	2.31	0.20
25/10/2556 10:30 น.	9.00	0.92	0.44	0.05	0.02	2.80	0.27
25/10/2556 16:30 น.	9.25	0.71	0.44	0.03	0.02	3.31	0.30
26/10/2556 10:30 น.	10.00	0.05	0.02	0.06	0.06	3.58	0.35
27/10/2556 10:30 น.	11.00	0.12	0.03	0.01	0.01	1.77	0.37
28/10/2556 10:30 น.	12.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.90	0.17
29/10/2556 10:30 น.	13.00	0.10	0.06	0.02	0.01	0.77	0.19

ตารางที่ ค-6 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดการทดลองที่ 5 ที่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนโดยใช้เมทานอลในสัดส่วน C:N = 5:1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556 10:30 น.	0	1.99	0.01	0.00	0.00	0.80	0.05
16/10/2556 13:30 น.	0.13	1.67	0.21	0.00	0.00	1.86	0.47
16/10/2556 16:30 น.	0.25	1.31	0.06	0.00	0.00	2.00	0.63
16/10/2556 19:30 น.	0.38	1.14	0.19	0.00	0.00	2.65	0.20
17/10/2556 10:30 น.	1.00	0.51	0.12	0.00	0.01	3.04	0.10
17/10/2556 16:30 น.	1.25	0.18	0.15	0.00	0.00	3.16	0.36
18/10/2556 10:30 น.	2.00	0.14	0.04	0.02	0.01	2.84	1.10
18/10/2556 16:30 น.	2.25	0.15	0.05	0.02	0.01	2.97	0.99
19/10/2556 10:30 น.	3.00	0.10	0.03	0.01	0.01	2.19	0.37
20/10/2556 10:30 น.	4.00	0.08	0.03	0.02	0.01	1.32	0.25
21/10/2556 10:30 น.	5.00	0.08	0.00	0.04	0.04	1.54	0.25
22/10/2556 10:30 น.	6.00	0.06	0.03	0.02	0.02	1.60	0.30
23/10/2556 10:30 น.	7.00	3.94	0.02	0.00	0.00	0.86	0.02
23/10/2556 13:30 น.	7.13	3.05	0.09	0.02	0.00	1.11	0.20
23/10/2556 16:30 น.	7.25	3.08	0.25	0.01	0.00	1.25	0.25
23/10/2556 19:30 น.	7.38	3.45	0.39	0.01	0.00	1.18	0.14
24/10/2556 10:30 น.	8.00	2.63	0.41	0.03	0.00	1.98	0.67
24/10/2556 16:30 น.	8.25	1.78	0.27	0.03	0.00	2.35	0.48
25/10/2556 10:30 น.	9.00	1.07	0.37	0.02	0.03	3.10	0.29
25/10/2556 16:30 น.	9.25	0.82	0.20	0.02	0.03	3.28	0.32
26/10/2556 10:30 น.	10.00	0.27	0.13	0.05	0.07	3.64	0.14
27/10/2556 10:30 น.	11.00	0.07	0.03	0.00	0.00	1.92	0.21
28/10/2556 10:30 น.	12.00	0.05	0.01	0.02	0.00	0.77	0.26
29/10/2556 10:30 น.	13.00	0.03	0.02	0.01	0.00	0.67	0.27

ตารางที่ ค-7 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนจากภายนอก ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556 10:00 น.	0	150.00	0.00	6.73	0.21	8.17	0.03	26.40	0.21
17/10/2556 10:00 น.	1.00	166.67	5.77	7.27	0.42	8.17	0.20	26.80	0.15
18/10/2556 10:00 น.	2.00	210.00	10.00	6.10	0.61	8.16	0.14	26.90	0.06
19/10/2556 10:00 น.	3.00	226.67	5.77	5.70	0.72	8.20	0.12	27.00	0.10
20/10/2556 10:00 น.	4.00	230.00	10.00	5.77	0.35	8.23	0.16	26.40	0.15
21/10/2556 10:00 น.	5.00	223.33	11.55	6.07	0.49	8.23	0.17	26.30	0.25
22/10/2556 10:00 น.	6.00	213.33	5.77	6.07	0.59	8.18	0.20	26.90	0.21
23/10/2556 10:00 น.	7.00	153.33	5.77	6.33	0.06	8.75	0.30	26.00	0.10
24/10/2556 10:00 น.	8.00	176.67	5.77	6.07	0.51	8.49	0.23	26.17	0.15
25/10/2556 10:00 น.	9.00	183.33	5.77	5.90	0.75	8.17	0.12	26.53	0.06
26/10/2556 10:00 น.	10.00	186.67	5.77	5.90	0.61	8.27	0.13	26.13	0.06
27/10/2556 10:00 น.	11.00	190.00	0.00	5.60	0.36	8.26	0.10	26.40	0.06
28/10/2556 10:00 น.	12.00	200.00	0.00	5.33	0.21	8.28	0.06	26.27	0.06
29/10/2556 10:00 น.	13.00	200.00	0.00	5.37	0.55	8.24	0.08	26.60	0.10

ตารางที่ ค-8 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดการทดลองที่ 1 ที่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนโดยใช้เมทานอลในสัดส่วน C:N = 1:1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556 10:00 น.	0	150.00	0.00	6.70	0.26	8.03	0.10	26.60	0.10
17/10/2556 10:00 น.	1.00	180.00	10.00	7.20	0.36	8.12	0.07	26.10	0.26
18/10/2556 10:00 น.	2.00	213.33	5.77	5.87	0.35	8.15	0.09	26.90	0.20
19/10/2556 10:00 น.	3.00	223.33	5.77	5.80	0.50	8.19	0.06	26.83	0.06

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)		วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
			ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
20/10/2556	10:00 น.	4.00	220.00	0.00	5.63	0.45	8.18	0.03	27.33	0.25
21/10/2556	10:00 น.	5.00	216.67	5.77	5.60	0.56	8.14	0.12	26.17	0.31
22/10/2556	10:00 น.	6.00	203.33	5.77	5.57	0.47	8.12	0.10	26.50	0.15
23/10/2556	10:00 น.	7.00	156.67	5.77	6.60	0.10	8.74	0.25	25.80	0.10
24/10/2556	10:00 น.	8.00	176.67	5.77	5.97	0.42	8.35	0.22	26.13	0.06
25/10/2556	10:00 น.	9.00	206.67	5.77	5.57	0.60	8.04	0.30	27.27	0.06
26/10/2556	10:00 น.	10.00	206.67	5.77	5.53	0.42	8.22	0.19	27.27	0.12
27/10/2556	10:00 น.	11.00	186.67	5.77	5.73	0.42	8.27	0.08	27.23	0.06
28/10/2556	10:00 น.	12.00	186.67	5.77	6.03	0.23	8.32	0.04	26.10	0.10
29/10/2556	10:00 น.	13.00	186.67	5.77	5.97	0.21	8.24	0.02	27.53	0.06

ตารางที่ ค-9 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดการทดลองที่ 2 ที่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนโดยใช้เมทานอลในสัดส่วน C:N = 2:1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)		วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
			ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556	10:00 น.	0	150.00	0.00	6.53	1.08	8.11	0.12	26.10	0.20
17/10/2556	10:00 น.	1.00	193.33	5.77	6.43	0.45	8.08	0.30	26.13	0.60
18/10/2556	10:00 น.	2.00	210.00	0.00	5.80	0.87	8.09	0.18	26.47	0.35
19/10/2556	10:00 น.	3.00	220.00	0.00	5.73	0.46	8.07	0.16	27.07	0.15
20/10/2556	10:00 น.	4.00	213.33	5.77	5.70	0.36	8.07	0.11	26.40	0.12
21/10/2556	10:00 น.	5.00	200.00	10.00	5.77	0.38	8.06	0.06	26.30	0.25
22/10/2556	10:00 น.	6.00	186.67	5.77	5.67	0.38	8.06	0.05	26.70	0.21
23/10/2556	10:00 น.	7.00	156.67	5.77	6.13	0.21	8.62	0.28	25.80	0.10

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
24/10/2556 10:00 น.	8.00	173.33	5.77	6.03	0.21	8.42	0.13	26.30	0.10
25/10/2556 10:00 น.	9.00	186.67	5.77	5.93	0.12	8.20	0.07	26.67	0.15
26/10/2556 10:00 น.	10.00	183.33	5.77	5.67	0.21	8.22	0.17	27.03	0.15
27/10/2556 10:00 น.	11.00	183.33	5.77	5.77	0.15	8.31	0.09	26.20	0.06
28/10/2556 10:00 น.	12.00	186.67	5.77	5.97	0.29	8.40	0.08	27.33	0.06
29/10/2556 10:00 น.	13.00	186.67	5.77	5.93	0.32	8.33	0.05	26.60	0.06

ตารางที่ ค-10 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดการทดลองที่ 3 ที่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนโดยใช้เมทานอลในสัดส่วน C:N = 3:1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556 10:00 น.	0	150.00	0.00	6.90	0.40	8.07	0.11	26.57	0.12
17/10/2556 10:00 น.	1.00	183.33	5.77	7.13	0.32	8.27	0.08	26.03	0.25
18/10/2556 10:00 น.	2.00	200.00	10.00	6.53	0.84	8.19	0.13	27.07	0.21
19/10/2556 10:00 น.	3.00	203.33	5.77	6.43	0.40	8.23	0.13	26.87	0.06
20/10/2556 10:00 น.	4.00	200.00	10.00	6.27	0.21	8.24	0.10	26.37	0.38
21/10/2556 10:00 น.	5.00	196.67	5.77	6.33	0.12	8.22	0.11	26.33	0.15
22/10/2556 10:00 น.	6.00	183.33	5.77	6.27	0.15	8.15	0.06	27.27	0.21
23/10/2556 10:00 น.	7.00	150.00	0.00	6.70	0.40	8.61	0.35	25.77	0.06
24/10/2556 10:00 น.	8.00	160.00	0.00	6.03	0.57	8.23	0.36	26.20	0.10
25/10/2556 10:00 น.	9.00	173.33	5.77	5.03	1.02	7.95	0.17	26.40	0.10
26/10/2556 10:00 น.	10.00	176.67	5.77	5.00	1.22	8.14	0.26	26.67	0.06
27/10/2556 10:00 น.	11.00	176.67	5.77	5.67	0.70	8.21	0.24	26.50	0.10

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)		วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
			ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
28/10/2556	10:00 น.	12.00	183.33	5.77	6.03	0.55	8.33	0.21	27.10	0.10
29/10/2556	10:00 น.	13.00	190.00	0.00	6.10	0.53	8.28	0.15	26.57	0.06

ตารางที่ ค-11 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดการทดลองที่ 4 ที่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนโดยใช้เมทานอลในสัดส่วน C:N = 4:1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)		วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
			ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556	10:00 น.	0	150.00	0.00	6.80	0.40	8.10	0.07	26.27	0.15
17/10/2556	10:00 น.	1.00	156.67	5.77	7.10	0.46	8.21	0.08	26.50	0.20
18/10/2556	10:00 น.	2.00	213.33	5.77	6.57	0.49	8.18	0.06	26.27	0.21
19/10/2556	10:00 น.	3.00	210.00	10.00	6.50	0.50	8.20	0.08	26.83	0.15
20/10/2556	10:00 น.	4.00	206.67	5.77	6.43	0.65	8.19	0.12	27.33	0.06
21/10/2556	10:00 น.	5.00	210.00	10.00	6.47	0.67	8.20	0.12	26.90	0.15
22/10/2556	10:00 น.	6.00	200.00	0.00	6.43	0.68	8.19	0.12	26.57	0.31
23/10/2556	10:00 น.	7.00	160.00	10.00	6.10	0.44	8.89	0.35	25.50	0.10
24/10/2556	10:00 น.	8.00	170.00	10.00	5.50	0.56	8.40	0.31	26.40	0.10
25/10/2556	10:00 น.	9.00	170.00	0.00	5.03	0.83	7.93	0.10	26.20	0.10
26/10/2556	10:00 น.	10.00	170.00	0.00	6.10	0.56	8.19	0.18	26.80	0.10
27/10/2556	10:00 น.	11.00	170.00	0.00	6.07	0.59	8.21	0.17	27.27	0.15
28/10/2556	10:00 น.	12.00	170.00	0.00	6.07	0.76	8.24	0.16	26.40	0.10
29/10/2556	10:00 น.	13.00	173.33	5.77	5.97	0.58	8.18	0.18	26.70	0.10

ตารางที่ ค-12 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดการทดลองที่ 5 ที่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนโดยใช้เมทานอลในสัดส่วน C:N = 5:1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556 10:00 น.	0	150.00	0.00	6.87	0.06	8.14	0.02	26.43	0.12
17/10/2556 10:00 น.	1.00	163.33	5.77	7.10	0.10	8.22	0.06	25.90	0.10
18/10/2556 10:00 น.	2.00	213.33	5.77	6.70	0.89	8.14	0.11	26.47	0.12
19/10/2556 10:00 น.	3.00	210.00	17.32	6.20	0.80	8.15	0.16	26.93	0.15
20/10/2556 10:00 น.	4.00	210.00	10.00	5.87	0.81	8.14	0.22	27.40	0.36
21/10/2556 10:00 น.	5.00	203.33	5.77	5.53	0.75	8.11	0.24	26.07	0.21
22/10/2556 10:00 น.	6.00	193.33	5.77	5.63	0.75	8.12	0.21	26.50	0.40
23/10/2556 10:00 น.	7.00	160.00	10.00	6.00	0.00	8.80	0.33	25.70	0.10
24/10/2556 10:00 น.	8.00	186.67	5.77	5.87	0.45	8.60	0.24	26.53	0.15
25/10/2556 10:00 น.	9.00	180.00	0.00	5.47	1.23	8.03	0.26	26.23	0.25
26/10/2556 10:00 น.	10.00	216.67	5.77	5.83	1.33	8.24	0.39	26.77	0.06
27/10/2556 10:00 น.	11.00	186.67	5.77	6.27	0.55	8.33	0.30	26.40	0.15
28/10/2556 10:00 น.	12.00	190.00	0.00	6.33	0.91	8.52	0.04	26.60	0.10
29/10/2556 10:00 น.	13.00	190.00	0.00	6.03	0.65	8.42	0.07	26.87	0.06

ตารางที่ ค-13 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนจากภายนอก ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556 10:00 น.	0	202.90	6.22	106.80	6.38
17/10/2556 10:00 น.	1.00	186.70	6.36	50.83	5.15
18/10/2556 10:00 น.	2.00	182.97	7.73	52.53	8.26
19/10/2556 10:00 น.	3.00	182.23	3.49	60.17	10.61
20/10/2556 10:00 น.	4.00	183.30	8.80	55.10	5.84
21/10/2556 10:00 น.	5.00	187.80	19.59	64.00	4.68
22/10/2556 10:00 น.	6.00	184.37	4.47	62.90	2.81
23/10/2556 10:00 น.	7.00	216.60	3.32	67.97	2.93
24/10/2556 10:00 น.	8.00	220.17	1.30	69.10	5.49
25/10/2556 10:00 น.	9.00	226.20	2.82	70.03	1.57
26/10/2556 10:00 น.	10.00	221.23	8.72	80.60	1.00
27/10/2556 10:00 น.	11.00	216.80	7.02	65.07	9.12
28/10/2556 10:00 น.	12.00	214.07	2.15	49.27	20.90
29/10/2556 10:00 น.	13.00	219.37	3.04	39.43	9.95

ตารางที่ ค-14 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดการทดลองที่ 1 ที่มีการเติมเมทานอลในสัดส่วน C:N = 1:1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556 10:00 น.	0	174.33	4.33	88.23	11.17
17/10/2556 10:00 น.	1.00	169.43	0.68	44.17	0.81
18/10/2556 10:00 น.	2.00	167.83	5.01	50.03	4.78
19/10/2556 10:00 น.	3.00	162.20	5.12	49.90	5.17
20/10/2556 10:00 น.	4.00	160.80	1.22	48.33	3.61
21/10/2556 10:00 น.	5.00	168.17	3.47	48.17	3.81

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
22/10/2556 10:00 น.	6.00	164.57	6.56	47.03	4.80
23/10/2556 10:00 น.	7.00	153.50	9.55	51.47	2.32
24/10/2556 10:00 น.	8.00	155.57	3.33	51.63	2.12
25/10/2556 10:00 น.	9.00	166.10	9.85	49.13	3.55
26/10/2556 10:00 น.	10.00	165.53	6.96	40.77	1.02
27/10/2556 10:00 น.	11.00	167.60	6.96	42.03	1.20
28/10/2556 10:00 น.	12.00	174.57	2.59	41.40	9.53
29/10/2556 10:00 น.	13.00	175.27	5.95	39.97	9.90

ตารางที่ ค-15 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดการทดลองที่ 2 ที่มีการเติมเมทานอลในสัดส่วน C:N = 2:1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556 10:00 น.	0	171.03	6.84	92.03	1.22
17/10/2556 10:00 น.	1.00	168.63	15.76	39.33	5.65
18/10/2556 10:00 น.	2.00	164.43	4.23	50.83	7.43
19/10/2556 10:00 น.	3.00	167.93	7.67	49.83	1.63
20/10/2556 10:00 น.	4.00	165.27	11.55	49.93	9.31
21/10/2556 10:00 น.	5.00	163.30	11.36	54.67	4.31
22/10/2556 10:00 น.	6.00	168.77	10.90	48.70	6.53
23/10/2556 10:00 น.	7.00	151.90	4.45	53.37	4.95
24/10/2556 10:00 น.	8.00	150.37	1.89	48.67	0.50
25/10/2556 10:00 น.	9.00	170.10	13.00	44.67	7.09
26/10/2556 10:00 น.	10.00	170.30	5.47	44.37	9.99
27/10/2556 10:00 น.	11.00	166.33	5.67	43.60	9.88

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
28/10/2556 10:00 น.	12.00	163.13	6.07	40.60	4.56
29/10/2556 10:00 น.	13.00	171.53	2.10	39.77	4.71

ตารางที่ ค-16 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดการทดลองที่ 3 ที่มีการเติมเมทานอลในสัดส่วน C:N = 3:1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556 10:00 น.	0	156.20	5.86	56.07	13.03
17/10/2556 10:00 น.	1.00	155.03	5.04	60.73	3.06
18/10/2556 10:00 น.	2.00	161.90	0.98	51.73	5.85
19/10/2556 10:00 น.	3.00	159.30	1.14	50.97	3.65
20/10/2556 10:00 น.	4.00	159.83	2.14	53.30	6.68
21/10/2556 10:00 น.	5.00	153.37	5.84	50.77	3.40
22/10/2556 10:00 น.	6.00	156.60	5.01	48.40	2.21
23/10/2556 10:00 น.	7.00	179.33	2.78	31.03	1.60
24/10/2556 10:00 น.	8.00	187.00	5.35	32.40	3.08
25/10/2556 10:00 น.	9.00	192.77	15.81	31.03	4.20
26/10/2556 10:00 น.	10.00	184.57	10.78	31.63	9.33
27/10/2556 10:00 น.	11.00	187.20	15.01	32.77	6.46
28/10/2556 10:00 น.	12.00	186.57	8.57	31.53	3.52
29/10/2556 10:00 น.	13.00	185.43	5.08	30.80	2.21

ตารางที่ ค-17 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดการทดลองที่ 4 ที่มีการเติมเมทานอลในสัดส่วน C:N = 4:1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556 10:00 น.	0	153.93	6.79	49.83	4.90
17/10/2556 10:00 น.	1.00	147.87	5.60	46.17	4.64
18/10/2556 10:00 น.	2.00	172.93	6.74	46.43	14.72
19/10/2556 10:00 น.	3.00	176.00	7.04	59.40	8.45
20/10/2556 10:00 น.	4.00	177.83	4.86	68.83	9.68
21/10/2556 10:00 น.	5.00	177.80	3.49	72.03	15.53
22/10/2556 10:00 น.	6.00	180.23	2.37	68.10	5.05
23/10/2556 10:00 น.	7.00	175.13	5.35	21.53	0.87
24/10/2556 10:00 น.	8.00	180.00	4.08	23.70	1.87
25/10/2556 10:00 น.	9.00	179.97	0.60	27.00	3.90
26/10/2556 10:00 น.	10.00	181.93	2.45	27.67	7.16
27/10/2556 10:00 น.	11.00	181.73	6.64	21.00	3.90
28/10/2556 10:00 น.	12.00	179.87	10.46	25.80	3.86
29/10/2556 10:00 น.	13.00	179.43	8.33	24.20	0.17

ตารางที่ ค-18 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดการทดลองที่ 5 ที่มีการเติมเมทานอลในสัดส่วน C:N = 5:1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556 10:00 น.	0	161.23	2.49	46.90	3.82
17/10/2556 10:00 น.	1.00	152.70	1.77	44.00	5.27
18/10/2556 10:00 น.	2.00	169.43	7.40	49.80	10.13
19/10/2556 10:00 น.	3.00	165.43	8.77	55.67	1.50
20/10/2556 10:00 น.	4.00	177.77	5.86	58.23	8.05
21/10/2556 10:00 น.	5.00	178.37	2.54	66.77	12.89
22/10/2556 10:00 น.	6.00	181.47	3.61	60.87	12.85
23/10/2556 10:00 น.	7.00	178.83	3.02	14.80	2.21
24/10/2556 10:00 น.	8.00	180.87	3.48	17.73	1.72
25/10/2556 10:00 น.	9.00	181.47	6.30	15.83	2.22
26/10/2556 10:00 น.	10.00	184.27	10.87	17.77	4.75
27/10/2556 10:00 น.	11.00	183.00	7.73	18.40	6.76
28/10/2556 10:00 น.	12.00	176.40	2.31	16.80	1.44
29/10/2556 10:00 น.	13.00	176.27	1.42	16.87	0.91

ตารางที่ ค-19 ค่าซีโอดี ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนจากภายนอก ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ซีโอดี (มก.-ซีโอดี/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556 10:00 น.	0	19.05	0.00
17/10/2556 10:00 น.	1.00	28.57	16.50
18/10/2556 10:00 น.	2.00	19.05	0.00
19/10/2556 10:00 น.	3.00	28.57	16.50
20/10/2556 10:00 น.	4.00	19.05	0.00
21/10/2556 10:00 น.	5.00	15.87	5.50
22/10/2556 10:00 น.	6.00	15.87	5.50
23/10/2556 10:00 น.	7.00	28.57	16.50

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ซีโอดี (มก.-ซีโอดี/ล.)	
		ค่าเฉลีย	SD
24/10/2556 10:00 น.	8.00	19.05	0.00
25/10/2556 10:00 น.	9.00	15.87	5.50
26/10/2556 10:00 น.	10.00	15.87	5.50
27/10/2556 10:00 น.	11.00	12.68	5.51
28/10/2556 10:00 น.	12.00	9.50	0.00
29/10/2556 10:00 น.	13.00	12.68	5.51

ตารางที่ ค-20 ค่าซีโอดี ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดการทดลองที่ 1 ที่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนโดยใช้เมทานอลในสัดส่วน C:N = 1:1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ซีโอดี (มก.-ซีโอดี/ล.)	
		ค่าเฉลีย	SD
16/10/2556 10:00 น.	0	38.10	16.50
17/10/2556 10:00 น.	1.00	28.57	16.50
18/10/2556 10:00 น.	2.00	38.10	16.50
19/10/2556 10:00 น.	3.00	19.05	0.00
20/10/2556 10:00 น.	4.00	15.87	5.50
21/10/2556 10:00 น.	5.00	9.50	0.00
22/10/2556 10:00 น.	6.00	15.87	5.50
23/10/2556 10:00 น.	7.00	171.43	16.50
24/10/2556 10:00 น.	8.00	180.95	16.50
25/10/2556 10:00 น.	9.00	171.43	16.50
26/10/2556 10:00 น.	10.00	152.38	16.50
27/10/2556 10:00 น.	11.00	133.33	0.00
28/10/2556 10:00 น.	12.00	123.80	16.50
29/10/2556 10:00 น.	13.00	104.76	0.00

ตารางที่ ค-21 ค่าซีโอดี ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดการทดลองที่ 2 ที่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนโดยใช้เมทานอลในสัดส่วน C:N = 2:1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ซีโอดี (มก.-ซีโอดี/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556 10:00 น.	0	47.62	0.00
17/10/2556 10:00 น.	1.00	38.10	16.50
18/10/2556 10:00 น.	2.00	38.10	16.50
19/10/2556 10:00 น.	3.00	19.05	0.00
20/10/2556 10:00 น.	4.00	28.57	16.50
21/10/2556 10:00 น.	5.00	15.87	5.50
22/10/2556 10:00 น.	6.00	15.87	5.50
23/10/2556 10:00 น.	7.00	196.27	5.77
24/10/2556 10:00 น.	8.00	180.95	32.99
25/10/2556 10:00 น.	9.00	190.48	28.57
26/10/2556 10:00 น.	10.00	152.38	16.50
27/10/2556 10:00 น.	11.00	104.76	0.00
28/10/2556 10:00 น.	12.00	133.33	0.00
29/10/2556 10:00 น.	13.00	123.81	16.50

ตารางที่ ค-22 ค่าซีโอดี ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดการทดลองที่ 3 ที่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนโดยใช้เมทานอลในสัดส่วน C:N = 3:1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ซีโอดี (มก.-ซีโอดี/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556 10:00 น.	0	57.14	16.50
17/10/2556 10:00 น.	1.00	38.10	16.50
18/10/2556 10:00 น.	2.00	47.62	0.00
19/10/2556 10:00 น.	3.00	28.57	16.50

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ซีโอดี (มก.-ซีโอดี/ล.)	
		ค่าเฉลีย	SD
20/10/2556 10:00 น.	4.00	19.05	0.00
21/10/2556 10:00 น.	5.00	9.50	0.00
22/10/2556 10:00 น.	6.00	19.05	0.00
23/10/2556 10:00 น.	7.00	238.10	16.50
24/10/2556 10:00 น.	8.00	238.10	16.50
25/10/2556 10:00 น.	9.00	219.05	0.00
26/10/2556 10:00 น.	10.00	247.62	28.57
27/10/2556 10:00 น.	11.00	200.00	32.99
28/10/2556 10:00 น.	12.00	171.43	43.64
29/10/2556 10:00 น.	13.00	152.38	16.50

ตารางที่ ค-23 ค่าซีโอดี ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดการทดลองที่ 4 ที่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนโดยใช้เมทานอลในสัดส่วน C:N = 4:1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ซีโอดี (มก.-ซีโอดี/ล.)	
		ค่าเฉลีย	SD
16/10/2556 10:00 น.	0	76.19	0.00
17/10/2556 10:00 น.	1.00	47.62	0.00
18/10/2556 10:00 น.	2.00	28.57	16.50
19/10/2556 10:00 น.	3.00	19.05	0.00
20/10/2556 10:00 น.	4.00	15.87	5.50
21/10/2556 10:00 น.	5.00	15.87	5.50
22/10/2556 10:00 น.	6.00	28.57	16.50
23/10/2556 10:00 น.	7.00	245.64	5.77
24/10/2556 10:00 น.	8.00	257.14	32.99
25/10/2556 10:00 น.	9.00	219.05	0.00
26/10/2556 10:00 น.	10.00	200.00	32.99
27/10/2556 10:00 น.	11.00	171.43	43.64
28/10/2556 10:00 น.	12.00	209.52	43.64
29/10/2556 10:00 น.	13.00	209.52	43.64

ตารางที่ ค-24 ค่าซีโอดี ในการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบ สำหรับชุดการทดลองที่ 5 ที่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนโดยใช้เมทานอลในสัดส่วน C:N = 5:1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ซีโอดี (มก.-ซีโอดี/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2556 10:00 น.	0	95.24	16.50
17/10/2556 10:00 น.	1.00	85.71	16.50
18/10/2556 10:00 น.	2.00	57.14	16.50
19/10/2556 10:00 น.	3.00	38.10	16.50
20/10/2556 10:00 น.	4.00	47.62	0.00
21/10/2556 10:00 น.	5.00	28.57	16.50
22/10/2556 10:00 น.	6.00	47.62	0.00
23/10/2556 10:00 น.	7.00	287.18	17.76
24/10/2556 10:00 น.	8.00	247.62	28.57
25/10/2556 10:00 น.	9.00	247.62	28.57
26/10/2556 10:00 น.	10.00	257.14	32.99
27/10/2556 10:00 น.	11.00	171.43	43.64
28/10/2556 10:00 น.	12.00	209.52	43.64
29/10/2556 10:00 น.	13.00	171.43	43.64

ตารางที่ ค-25 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/12/2556 11:30 น.	0	2.04	0.05	0.00	0.00	1.46	0.06
4/12/2556 14:30 น.	0.13	1.81	0.12	0.01	0.00	1.68	0.25

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/12/2556 17:30 น.	0.25	1.11	0.08	0.02	0.00	1.74	0.16
4/12/2556 20:30 น.	0.38	0.82	0.10	0.02	0.00	2.16	0.06
5/12/2556 11:30 น.	1.00	0.41	0.02	0.03	0.01	2.47	0.71
5/12/2556 18:30 น.	1.29	0.23	0.03	0.03	0.01	1.73	0.35
6/12/2556 11:30 น.	2.00	0.16	0.04	0.03	0.00	1.56	0.13
6/12/2556 18:30 น.	2.29	0.12	0.03	0.03	0.00	1.67	0.30
7/12/2556 11:30 น.	3.00	0.13	0.02	0.03	0.01	1.29	0.11
7/12/2556 19:00 น.	3.31	0.08	0.06	0.03	0.01	1.46	0.15
8/12/2556 11:30 น.	4.00	0.15	0.01	0.04	0.00	1.44	0.33
9/12/2556 11:30 น.	5.00	0.02	0.02	0.03	0.01	1.62	0.37
10/12/2556 11:30 น.	6.00	0.00	0.00	0.03	0.02	1.60	0.10
11/12/2556 12:00 น.	7.02	3.94	0.02	0.00	0.00	1.52	0.07
11/12/2556 13:30 น.	7.21	2.75	0.09	0.00	0.00	1.89	0.22
11/12/2556 18:00 น.	7.27	2.49	0.02	0.00	0.00	2.01	0.24
11/12/2556 21:00 น.	7.40	2.23	0.08	0.01	0.00	2.16	0.37
12/12/2556 13:00 น.	8.06	1.07	0.14	0.02	0.01	3.14	1.16
12/12/2556 19:00 น.	8.31	0.61	0.23	0.01	0.01	3.26	1.04
13/12/2556 10:00 น.	8.94	0.23	0.12	0.01	0.02	3.03	0.50
14/12/2556 10:00 น.	9.94	0.03	0.03	0.00	0.00	2.45	0.56
14/12/2556 15:00 น.	10.15	0.00	0.01	0.00	0.00	2.26	0.57
15/12/2556 15:00 น.	11.15	0.01	0.01	0.00	0.00	2.25	0.59
16/12/2556 10:00 น.	11.94	0.01	0.01	0.00	0.00	2.31	0.51
17/12/2556 10:00 น.	12.94	0.02	0.01	0.00	0.00	2.18	0.71
18/12/2556 13:00 น.	14.06	0.01	0.00	0.00	0.00	2.16	0.73
19/12/2556 12:00 น.	15.02	0.00	0.00	0.00	0.00	1.76	0.55

ตารางที่ ค-26 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการทดลองที่ 1 ที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองโดยการขยำเบาๆในน้ำสะอาด ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถัง ปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/12/2556 11:30 น.	0	2.05	0.03	0.00	0.00	1.34	0.02
4/12/2556 14:30 น.	0.13	1.52	0.07	0.00	0.00	1.85	0.11
4/12/2556 17:30 น.	0.25	0.99	0.09	0.01	0.00	2.25	0.14
4/12/2556 20:30 น.	0.38	0.49	0.05	0.01	0.00	2.16	0.19
5/12/2556 11:30 น.	1.00	0.35	0.10	0.03	0.01	1.95	0.29
5/12/2556 18:30 น.	1.29	0.35	0.16	0.03	0.00	2.07	0.44
6/12/2556 11:30 น.	2.00	0.24	0.15	0.03	0.01	2.00	0.20
6/12/2556 18:30 น.	2.29	0.28	0.23	0.02	0.01	1.77	0.21
7/12/2556 11:30 น.	3.00	0.15	0.02	0.02	0.00	1.90	0.17
7/12/2556 19:00 น.	3.31	0.21	0.07	0.02	0.01	1.87	0.32
8/12/2556 11:30 น.	4.00	0.11	0.10	0.02	0.01	1.48	0.22
9/12/2556 11:30 น.	5.00	0.01	0.02	0.02	0.01	1.46	0.21
10/12/2556 11:30 น.	6.00	0.00	0.00	0.03	0.01	1.47	0.31
11/12/2556 12:00 น.	7.02	3.99	0.04	0.00	0.00	1.51	0.03
11/12/2556 13:30 น.	7.21	3.19	0.65	0.01	0.02	1.90	0.03
11/12/2556 18:00 น.	7.27	2.56	0.31	0.00	0.00	2.07	0.11
11/12/2556 21:00 น.	7.40	2.30	0.09	0.00	0.00	2.03	0.16
12/12/2556 13:00 น.	8.06	1.20	0.08	0.01	0.01	2.97	0.60
12/12/2556 19:00 น.	8.31	0.57	0.37	0.03	0.01	3.14	0.73
13/12/2556 10:00 น.	8.94	0.29	0.09	0.03	0.02	3.36	0.11
14/12/2556 10:00 น.	9.94	0.03	0.04	0.01	0.00	2.63	0.32
14/12/2556 15:00 น.	10.15	0.09	0.03	0.01	0.00	2.24	0.22
15/12/2556 15:00 น.	11.15	0.07	0.02	0.01	0.00	2.10	0.33
16/12/2556 10:00 น.	11.94	0.07	0.02	0.01	0.00	2.10	0.32
17/12/2556 10:00 น.	12.94	0.06	0.04	0.01	0.00	2.00	0.47
18/12/2556 13:00 น.	14.06	0.06	0.03	0.01	0.00	2.06	0.38
19/12/2556 12:00 น.	15.02	0.03	0.03	0.00	0.01	1.75	0.22

ตารางที่ ค-27 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการทดลองที่ 2 ที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองโดยการแกว่งในน้ำสะอาด ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้น

เท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/12/2556 11:30 น.	0	2.05	0.03	0.00	0.00	1.60	0.05
4/12/2556 14:30 น.	0.13	1.79	0.06	0.00	0.01	2.25	0.02
4/12/2556 17:30 น.	0.25	1.28	0.09	0.00	0.00	2.51	0.22
4/12/2556 20:30 น.	0.38	0.89	0.03	0.00	0.00	2.83	0.43
5/12/2556 11:30 น.	1.00	0.62	0.06	0.01	0.01	2.87	0.42
5/12/2556 18:30 น.	1.29	0.34	0.07	0.01	0.00	2.82	0.29
6/12/2556 11:30 น.	2.00	0.03	0.02	0.01	0.01	2.63	0.15
6/12/2556 18:30 น.	2.29	0.06	0.03	0.02	0.01	2.70	0.34
7/12/2556 11:30 น.	3.00	0.10	0.01	0.01	0.00	2.51	0.17
7/12/2556 19:00 น.	3.31	0.11	0.04	0.01	0.01	2.62	0.29
8/12/2556 11:30 น.	4.00	0.10	0.06	0.04	0.03	2.17	0.45
9/12/2556 11:30 น.	5.00	0.00	0.00	0.01	0.01	2.43	0.75
10/12/2556 11:30 น.	6.00	0.00	0.00	0.01	0.01	2.18	0.51
11/12/2556 12:00 น.	7.02	3.98	0.07	0.01	0.00	1.62	0.01
11/12/2556 13:30 น.	7.21	3.27	0.06	0.02	0.00	1.95	0.12
11/12/2556 18:00 น.	7.27	2.68	0.20	0.01	0.01	2.09	0.19
11/12/2556 21:00 น.	7.40	2.00	0.13	0.02	0.01	2.06	0.17
12/12/2556 13:00 น.	8.06	1.67	0.08	0.03	0.00	2.32	0.44
12/12/2556 19:00 น.	8.31	1.10	0.17	0.00	0.00	2.31	0.50
13/12/2556 10:00 น.	8.94	0.45	0.24	0.01	0.00	2.72	0.64
14/12/2556 10:00 น.	9.94	0.08	0.03	0.01	0.02	3.68	1.14
14/12/2556 15:00 น.	10.15	0.06	0.03	0.01	0.01	3.50	0.63
15/12/2556 15:00 น.	11.15	0.32	0.51	0.00	0.00	3.59	0.19
16/12/2556 10:00 น.	11.94	0.00	0.00	0.00	0.00	3.69	0.66
17/12/2556 10:00 น.	12.94	0.01	0.01	0.00	0.00	3.40	0.70
18/12/2556 13:00 น.	14.06	0.06	0.00	0.00	0.00	2.88	0.63
19/12/2556 12:00 น.	15.02	0.00	0.00	0.00	0.00	2.54	0.54

ตารางที่ ค-28 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการทดลองที่ 3 ที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองโดยการใช้น้ำสะอาดฉีดล้าง ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/12/2556 11:30 น.	0	2.04	0.06	0.00	0.00	1.53	0.09
4/12/2556 14:30 น.	0.13	1.69	0.25	0.00	0.00	2.69	0.84
4/12/2556 17:30 น.	0.25	1.28	0.11	0.00	0.00	2.49	0.30
4/12/2556 20:30 น.	0.38	1.02	0.24	0.00	0.00	2.89	0.42
5/12/2556 11:30 น.	1.00	0.88	0.08	0.00	0.00	4.35	0.37
5/12/2556 18:30 น.	1.29	0.53	0.02	0.00	0.00	4.55	0.32
6/12/2556 11:30 น.	2.00	0.25	0.04	0.00	0.00	4.93	0.49
6/12/2556 18:30 น.	2.29	0.04	0.01	0.03	0.00	5.44	1.05
7/12/2556 11:30 น.	3.00	0.07	0.01	0.00	0.01	5.59	0.55
7/12/2556 19:00 น.	3.31	0.08	0.02	0.00	0.00	5.89	0.68
8/12/2556 11:30 น.	4.00	0.07	0.02	0.02	0.02	6.26	0.72
9/12/2556 11:30 น.	5.00	0.01	0.00	0.01	0.01	6.38	1.08
10/12/2556 11:30 น.	6.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.58	1.38
11/12/2556 12:00 น.	7.02	3.90	0.13	0.02	0.00	1.62	0.02
11/12/2556 13:30 น.	7.21	3.42	0.24	0.01	0.01	1.99	0.06
11/12/2556 18:00 น.	7.27	3.42	0.16	0.02	0.01	2.01	0.05
11/12/2556 21:00 น.	7.40	3.35	0.12	0.00	0.00	2.02	0.13
12/12/2556 13:00 น.	8.06	2.94	0.02	0.01	0.01	2.66	0.16
12/12/2556 19:00 น.	8.31	2.50	0.32	0.00	0.00	2.91	0.37
13/12/2556 10:00 น.	8.94	1.86	0.62	0.00	0.00	3.91	0.66
14/12/2556 10:00 น.	9.94	0.77	0.71	0.00	0.00	5.17	0.66
14/12/2556 15:00 น.	10.15	0.31	0.38	0.00	0.00	5.18	0.72
15/12/2556 15:00 น.	11.15	0.03	0.01	0.00	0.00	5.52	0.49
16/12/2556 10:00 น.	11.94	0.07	0.03	0.01	0.00	5.09	0.48
17/12/2556 10:00 น.	12.94	0.00	0.00	0.01	0.00	5.25	0.43

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
18/12/2556 13:00 น.	14.06	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00	0.53
19/12/2556 12:00 น.	15.02	0.00	0.00	0.00	0.00	4.96	0.65

ตารางที่ ค-29 ปริมาณตะกอนจุลชีพที่สะสมบนมัดเส้นใยของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด ในการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด ชุดการทดลองละ 3 ตัวอย่าง (วิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ)

ชุดการทดลอง	ปริมาณตะกอนจุลชีพ (ก./ม.)	
	ค่าเฉลี่ย	SD
ชุดควบคุม ไม่มีการทำความสะอาดตัวกรอง	74.12	4.45
ชุดการทดลองที่ 1 ทำความสะอาดโดยขยำตัวกรองในน้ำ	60.06	5.11
ชุดการทดลองที่ 2 ทำความสะอาดโดยแกว่งตัวกรองในน้ำ	32.21	4.30
ชุดการทดลองที่ 3 ทำความสะอาดโดยใช้น้ำฉีดตัวกรอง	9.13	0.09

ตารางที่ ค-30 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/12/2556 17:00 น.	0	160.00	10.00	5.20	1.20	7.76	0.25	25.70	0.10

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/12/2556 17:00 น.	1.00	190.00	10.00	5.27	0.80	8.18	0.11	25.27	0.12
6/12/2556 17:00 น.	2.00	210.00	10.00	6.47	0.45	8.20	0.11	25.73	0.06
7/12/2556 17:00 น.	3.00	216.67	5.77	6.63	0.29	8.24	0.08	26.10	0.10
8/12/2556 17:00 น.	4.00	233.33	5.77	7.50	0.10	8.20	0.13	26.33	0.06
9/12/2556 17:00 น.	5.00	233.33	5.77	7.10	0.26	8.32	0.09	26.40	0.10
10/12/2556 17:00 น.	6.00	233.33	5.77	7.10	0.26	8.32	0.09	26.40	0.10
11/12/2556 17:00 น.	7.00	166.67	5.77	8.47	0.21	8.40	0.02	26.47	0.31
12/12/2556 17:00 น.	8.00	166.67	5.77	7.93	0.40	8.26	0.11	25.27	0.21
13/12/2556 17:00 น.	9.00	170.00	0.00	7.27	0.68	8.28	0.14	25.33	0.15
14/12/2556 17:00 น.	10.00	173.33	5.77	7.10	0.44	8.28	0.22	25.60	0.10
15/12/2556 17:00 น.	11.00	180.00	0.00	6.90	0.87	8.35	0.19	25.33	0.32
16/12/2556 17:00 น.	12.00	180.00	0.00	6.37	0.51	8.36	0.09	25.60	0.26
17/12/2556 17:00 น.	13.00	180.00	0.00	6.30	0.46	8.40	0.07	25.07	0.12
18/12/2556 17:00 น.	14.00	180.00	0.00	6.30	0.44	8.43	0.11	25.13	0.15
19/12/2556 17:00 น.	15.00	180.00	0.00	6.30	0.44	8.43	0.11	25.13	0.15

ตารางที่ ค-31 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการทดลองที่ 1 ที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองโดยการขยำเบาๆในน้ำสะอาด ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/12/2556 17:00 น.	0	153.33	5.77	5.50	0.26	8.09	0.14	25.27	0.06
5/12/2556 17:00 น.	1.00	193.33	5.77	5.77	0.12	8.31	0.09	25.00	0.10
6/12/2556 17:00 น.	2.00	210.00	10.00	6.03	0.31	8.12	0.23	25.50	0.10
7/12/2556 17:00 น.	3.00	216.67	5.77	6.57	0.21	8.18	0.14	26.30	0.10

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
8/12/2556 17:00 น.	4.00	223.33	5.77	6.87	0.76	8.25	0.03	25.53	0.12
9/12/2556 17:00 น.	5.00	223.33	5.77	6.53	0.32	8.24	0.04	25.47	0.40
10/12/2556 17:00 น.	6.00	223.33	5.77	6.53	0.32	8.24	0.04	26.73	0.06
11/12/2556 17:00 น.	7.00	166.67	5.77	7.93	0.21	8.52	0.04	26.63	0.06
12/12/2556 17:00 น.	8.00	160.00	0.00	7.10	0.66	8.32	0.16	25.57	0.12
13/12/2556 17:00 น.	9.00	156.67	5.77	7.23	0.31	8.33	0.13	25.50	0.20
14/12/2556 17:00 น.	10.00	156.67	5.77	7.03	0.12	8.26	0.09	25.60	0.26
15/12/2556 17:00 น.	11.00	160.00	10.00	6.57	0.35	8.35	0.02	25.20	0.20
16/12/2556 17:00 น.	12.00	163.33	5.77	6.70	0.17	8.39	0.03	25.60	0.10
17/12/2556 17:00 น.	13.00	173.33	5.77	6.37	0.42	8.41	0.02	25.17	0.12
18/12/2556 17:00 น.	14.00	173.33	5.77	6.23	0.45	8.45	0.04	25.30	0.00
19/12/2556 17:00 น.	15.00	173.33	5.77	6.23	0.45	8.45	0.04	25.30	0.00

ตารางที่ ค-32 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการทดลองที่ 2 ที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองโดยการแกว่งในน้ำสะอาด ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/12/2556 17:00 น.	0	150.00	10.00	5.30	0.20	8.09	0.10	25.17	0.15
5/12/2556 17:00 น.	1.00	153.33	5.77	5.27	0.32	8.28	0.08	25.60	0.10
6/12/2556 17:00 น.	2.00	166.67	11.55	6.80	0.10	8.24	0.10	25.27	0.15
7/12/2556 17:00 น.	3.00	180.00	10.00	6.80	0.10	8.24	0.12	26.17	0.06
8/12/2556 17:00 น.	4.00	193.33	5.77	7.10	0.30	8.22	0.17	25.33	0.15

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
9/12/2556 17:00 น.	5.00	193.33	5.77	7.07	0.21	8.26	0.14	26.73	0.21
10/12/2556 17:00 น.	6.00	193.33	5.77	7.07	0.21	8.26	0.14	26.73	0.21
11/12/2556 17:00 น.	7.00	156.67	5.77	8.03	0.21	8.75	0.19	26.60	0.10
12/12/2556 17:00 น.	8.00	146.67	5.77	7.40	0.26	8.35	0.06	25.40	0.26
13/12/2556 17:00 น.	9.00	146.67	5.77	7.37	0.06	8.35	0.01	25.40	0.10
14/12/2556 17:00 น.	10.00	143.33	11.55	7.03	0.29	8.28	0.06	25.60	0.26
15/12/2556 17:00 น.	11.00	136.67	5.77	6.57	0.23	8.45	0.01	25.20	0.20
16/12/2556 17:00 น.	12.00	136.67	5.77	6.73	0.21	8.42	0.06	25.63	0.15
17/12/2556 17:00 น.	13.00	133.33	5.77	6.63	0.12	8.34	0.05	25.20	0.10
18/12/2556 17:00 น.	14.00	130.00	0.00	6.60	0.26	8.29	0.07	25.13	0.15
19/12/2556 17:00 น.	15.00	130.00	0.00	6.60	0.26	8.29	0.07	25.13	0.15

ตารางที่ ค-33 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการทดลองที่ 3 ที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองโดยการใช้น้ำสะอาดฉีดล้าง ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/12/2556 17:00 น.	0	150.00	0.00	5.40	0.40	8.13	0.08	25.17	0.15
5/12/2556 17:00 น.	1.00	140.00	0.00	5.63	0.15	8.34	0.07	25.60	0.10
6/12/2556 17:00 น.	2.00	140.00	0.00	6.60	0.10	8.27	0.05	25.17	0.15
7/12/2556 17:00 น.	3.00	136.67	5.77	6.80	0.10	8.19	0.14	26.13	0.06
8/12/2556 17:00 น.	4.00	136.67	5.77	7.30	0.69	8.13	0.21	26.30	0.44
9/12/2556 17:00 น.	5.00	136.67	5.77	6.87	0.12	8.01	0.14	26.53	0.15
10/12/2556 17:00 น.	6.00	136.67	5.77	6.87	0.12	8.01	0.14	26.53	0.15

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
11/12/2556 17:00 น.	7.00	150.00	0.00	8.13	0.06	8.64	0.15	26.63	0.15
12/12/2556 17:00 น.	8.00	143.33	5.77	7.43	0.38	8.28	0.02	25.33	0.15
13/12/2556 17:00 น.	9.00	140.00	0.00	7.23	0.29	8.25	0.07	25.53	0.06
14/12/2556 17:00 น.	10.00	136.67	5.77	7.13	0.35	8.18	0.13	25.53	0.15
15/12/2556 17:00 น.	11.00	130.00	0.00	6.87	0.15	8.35	0.03	25.27	0.06
16/12/2556 17:00 น.	12.00	130.00	0.00	6.73	0.21	8.33	0.02	25.60	0.26
17/12/2556 17:00 น.	13.00	120.00	0.00	6.70	0.17	8.30	0.02	25.10	0.10
18/12/2556 17:00 น.	14.00	120.00	0.00	6.77	0.06	8.24	0.06	25.23	0.12
19/12/2556 17:00 น.	15.00	120.00	0.00	6.77	0.06	8.24	0.06	25.23	0.12

ตารางที่ ค-34 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/12/2556 17:00 น.	0	188.33	32.71	20.30	5.38
5/12/2556 17:00 น.	1.00	198.17	1.95	11.53	4.60
6/12/2556 17:00 น.	2.00	179.50	0.96	16.93	3.01
7/12/2556 17:00 น.	3.00	181.73	1.93	15.17	2.03
8/12/2556 17:00 น.	4.00	186.03	4.12	13.50	1.85
9/12/2556 17:00 น.	5.00	184.63	1.67	13.90	1.40
10/12/2556 17:00 น.	6.00	184.63	1.67	13.90	1.40
11/12/2556 17:00 น.	7.00	187.57	3.56	9.17	2.03
12/12/2556 17:00 น.	8.00	191.37	11.48	15.23	4.55
13/12/2556 17:00 น.	9.00	195.87	8.28	22.03	0.99

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
14/12/2556 17:00 น.	10.00	199.17	8.84	34.23	6.11
15/12/2556 17:00 น.	11.00	197.73	9.43	30.63	3.73
16/12/2556 17:00 น.	12.00	199.70	10.39	26.37	5.12
17/12/2556 17:00 น.	13.00	199.43	13.28	28.17	3.76
18/12/2556 17:00 น.	14.00	202.93	11.21	27.80	5.04
19/12/2556 17:00 น.	15.00	202.93	11.21	27.80	5.04

ตารางที่ ค-35 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการทดลองที่ 1 ที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองโดยการขยำเบาๆในน้ำสะอาด ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/12/2556 17:00 น.	0	169.70	6.33	33.73	9.35
5/12/2556 17:00 น.	1.00	170.70	1.57	19.93	2.41
6/12/2556 17:00 น.	2.00	165.90	3.52	23.57	1.76
7/12/2556 17:00 น.	3.00	159.03	2.32	26.23	5.28
8/12/2556 17:00 น.	4.00	158.67	3.18	24.37	11.84
9/12/2556 17:00 น.	5.00	159.73	3.33	22.63	5.98
10/12/2556 17:00 น.	6.00	159.73	3.33	22.63	5.98
11/12/2556 17:00 น.	7.00	119.00	3.58	14.17	4.98
12/12/2556 17:00 น.	8.00	181.23	3.84	43.60	13.76
13/12/2556 17:00 น.	9.00	197.00	4.13	45.53	10.10
14/12/2556 17:00 น.	10.00	210.33	2.55	49.83	6.21
15/12/2556 17:00 น.	11.00	186.60	2.51	39.00	2.98
16/12/2556 17:00 น.	12.00	192.53	3.62	42.67	8.95

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
17/12/2556 17:00 น.	13.00	196.77	4.52	43.97	6.60
18/12/2556 17:00 น.	14.00	204.37	13.27	42.50	3.53
19/12/2556 17:00 น.	15.00	204.37	13.27	42.50	3.53

ตารางที่ ค-36 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการทดลองที่ 2 ที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองโดยการแกว่งในน้ำสะอาด ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/12/2556 17:00 น.	0	187.80	1.37	99.17	7.22
5/12/2556 17:00 น.	1.00	172.03	2.48	95.57	10.73
6/12/2556 17:00 น.	2.00	171.67	3.41	101.57	6.57
7/12/2556 17:00 น.	3.00	167.87	4.27	100.80	2.21
8/12/2556 17:00 น.	4.00	164.67	7.19	103.17	5.35
9/12/2556 17:00 น.	5.00	168.03	4.65	105.77	7.28
10/12/2556 17:00 น.	6.00	168.03	4.65	105.77	7.28
11/12/2556 17:00 น.	7.00	130.10	7.04	44.87	9.35
12/12/2556 17:00 น.	8.00	174.97	9.21	81.53	7.46
13/12/2556 17:00 น.	9.00	181.90	7.04	80.43	17.35
14/12/2556 17:00 น.	10.00	190.87	4.67	118.73	6.16
15/12/2556 17:00 น.	11.00	188.77	7.93	101.73	1.07
16/12/2556 17:00 น.	12.00	193.63	7.15	107.23	5.98
17/12/2556 17:00 น.	13.00	192.83	7.84	107.10	6.24
18/12/2556 17:00 น.	14.00	191.20	9.11	112.73	9.91
19/12/2556 17:00 น.	15.00	191.20	9.11	112.73	9.91

ตารางที่ ค-37 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในการศึกษาผลของวิธีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการทดลองที่ 3 ที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองโดยการใช้น้ำสะอาดฉีดล้าง ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/12/2556 17:00 น.	0	205.03	3.27	152.57	7.49
5/12/2556 17:00 น.	1.00	188.23	4.26	114.30	2.91
6/12/2556 17:00 น.	2.00	194.27	5.83	122.57	1.17
7/12/2556 17:00 น.	3.00	195.17	8.60	125.70	5.14
8/12/2556 17:00 น.	4.00	191.37	16.97	136.93	6.43
9/12/2556 17:00 น.	5.00	200.50	15.91	130.77	2.12
10/12/2556 17:00 น.	6.00	200.50	15.91	130.77	2.12
11/12/2556 17:00 น.	7.00	148.37	7.97	93.47	1.91
12/12/2556 17:00 น.	8.00	178.30	7.69	112.27	11.71
13/12/2556 17:00 น.	9.00	187.07	9.24	139.47	14.16
14/12/2556 17:00 น.	10.00	190.00	10.88	154.23	10.60
15/12/2556 17:00 น.	11.00	193.63	9.30	148.03	11.02
16/12/2556 17:00 น.	12.00	196.27	5.27	148.43	5.67
17/12/2556 17:00 น.	13.00	203.33	4.54	148.13	2.45
18/12/2556 17:00 น.	14.00	202.27	8.33	148.00	8.91
19/12/2556 17:00 น.	15.00	202.27	8.33	148.00	8.91

ตารางที่ ค-38 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ เมื่อตรวจวัดการใช้งานที่ 1 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/2/2557 9:30 น.	0	2.02	0.01	0.00	0.00	1.32	0.05
5/2/2557 12:30 น.	0.13	1.63	0.05	0.01	0.00	1.83	0.03
5/2/2557 15:30 น.	0.25	1.33	0.03	0.01	0.00	2.07	0.14
5/2/2557 18:30 น.	0.38	0.81	0.09	0.01	0.00	2.21	0.15
6/2/2557 11:30 น.	1.08	0.36	0.24	0.01	0.00	2.36	0.13
6/2/2557 18:00 น.	1.35	0.13	0.01	0.01	0.00	2.46	0.18
7/2/2557 12:30 น.	2.13	0.13	0.01	0.01	0.00	2.47	0.08
7/2/2557 18:00 น.	2.35	0.12	0.02	0.01	0.00	2.24	0.23
8/2/2557 11:45 น.	3.09	0.06	0.02	0.01	0.00	1.89	0.26
8/2/2557 16:30 น.	3.29	0.01	0.01	0.01	0.00	1.68	0.12
9/2/2557 14:30 น.	4.21	0.06	0.01	0.00	0.00	1.60	0.05
10/2/2557 14:30 น.	5.19	0.04	0.02	0.00	0.00	1.61	0.15
11/2/2557 12:00 น.	6.10	0.02	0.01	0.00	0.00	1.59	0.05
12/2/2557 9:00 น.	6.98	4.03	0.02	0.00	0.00	1.27	0.09
12/2/2557 12:00 น.	7.10	3.97	0.03	0.00	0.00	1.97	0.06
12/2/2557 15:00 น.	7.23	3.71	0.24	0.00	0.00	2.31	0.18
12/2/2557 18:00 น.	7.35	3.21	0.15	0.00	0.00	2.87	0.11
13/2/2557 8:30 น.	7.96	2.11	0.10	0.00	0.00	3.31	0.12
13/2/2557 13:30 น.	8.17	1.78	0.06	0.03	0.01	3.58	0.34
14/2/2557 12:30 น.	9.13	0.69	0.04	0.03	0.01	3.91	0.10
14/2/2557 18:00 น.	9.35	0.43	0.04	0.02	0.01	4.03	0.06
15/2/2557 10:30 น.	10.04	0.09	0.11	0.00	0.00	3.36	0.07
15/2/2557 17:30 น.	10.33	0.02	0.01	0.00	0.00	2.83	0.25
16/2/2557 9:30 น.	11.00	0.02	0.02	0.02	0.01	2.38	0.17
17/2/2557 12:00 น.	12.10	0.03	0.01	0.02	0.00	2.17	0.24
18/2/2557 13:00 น.	13.15	0.01	0.00	0.00	0.00	2.15	0.21

ตารางที่ ค-39 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ เมื่อตรวจวัดการใช้งานที่ 2 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้น

แอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
12/2/2557 9:30 น.	0	2.19	0.09	0.00	0.00	1.41	0.23
12/2/2557 12:30 น.	0.13	1.85	0.08	0.02	0.00	1.85	0.09
12/2/2557 15:30 น.	0.25	1.57	0.09	0.01	0.00	1.94	0.06
12/2/2557 18:30 น.	0.38	1.47	0.10	0.00	0.00	2.01	0.08
13/2/2557 11:30 น.	1.08	1.11	0.30	0.00	0.00	2.42	0.19
13/2/2557 18:00 น.	1.35	0.58	0.26	0.01	0.00	2.58	0.28
14/2/2557 12:30 น.	2.13	0.29	0.07	0.01	0.00	2.68	0.18
14/2/2557 18:00 น.	2.35	0.19	0.02	0.01	0.01	2.46	0.12
15/2/2557 11:45 น.	3.09	0.09	0.03	0.01	0.00	2.10	0.07
15/2/2557 16:30 น.	3.29	0.06	0.03	0.01	0.00	1.95	0.18
16/2/2557 14:30 น.	4.21	0.03	0.02	0.01	0.01	1.69	0.21
17/2/2557 14:30 น.	5.19	0.03	0.01	0.01	0.00	1.61	0.13
18/2/2557 12:00 น.	6.10	0.02	0.02	0.01	0.00	1.59	0.03
19/2/2557 9:00 น.	6.98	3.99	0.08	0.01	0.00	1.24	0.06
19/2/2557 12:00 น.	7.10	3.35	0.13	0.01	0.00	1.95	0.09
19/2/2557 15:00 น.	7.23	3.21	0.06	0.01	0.01	2.28	0.29
19/2/2557 18:00 น.	7.35	3.15	0.07	0.01	0.00	2.72	0.18
20/2/2557 8:30 น.	7.96	2.15	0.04	0.02	0.00	3.24	0.15
20/2/2557 13:30 น.	8.17	1.71	0.36	0.01	0.00	3.75	0.27
21/2/2557 12:30 น.	9.13	0.25	0.02	0.01	0.01	4.02	0.03
21/2/2557 18:00 น.	9.35	0.07	0.02	0.00	0.00	4.17	0.06
22/2/2557 10:30 น.	10.04	0.06	0.01	0.01	0.00	3.98	0.05
22/2/2557 17:30 น.	10.33	0.09	0.04	0.00	0.01	3.37	0.05
23/2/2557 9:30 น.	11.00	0.11	0.07	0.00	0.00	2.61	0.24
24/2/2557 12:00 น.	12.10	0.03	0.01	0.00	0.00	2.10	0.06
25/2/2557 13:00 น.	13.15	0.06	0.04	0.00	0.00	1.96	0.01

ตารางที่ ค-40 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ เมื่อตรวจวัดการใช้งานที่ 3 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
19/2/2557 9:30 น.	0	2.05	0.01	0.00	0.00	1.22	0.07
19/2/2557 12:30 น.	0.13	1.95	0.04	0.01	0.00	1.76	0.08
19/2/2557 15:30 น.	0.25	1.64	0.14	0.01	0.00	1.88	0.05
19/2/2557 18:30 น.	0.38	1.23	0.05	0.01	0.00	2.05	0.11
20/2/2557 11:30 น.	1.08	0.80	0.06	0.01	0.00	2.39	0.01
20/2/2557 18:00 น.	1.35	0.34	0.09	0.01	0.00	2.64	0.04
21/2/2557 12:30 น.	2.13	0.15	0.07	0.01	0.00	2.56	0.06
21/2/2557 18:00 น.	2.35	0.10	0.03	0.00	0.00	2.52	0.15
22/2/2557 11:45 น.	3.09	0.07	0.01	0.02	0.03	1.96	0.18
22/2/2557 16:30 น.	3.29	0.05	0.02	0.01	0.00	1.75	0.05
23/2/2557 14:30 น.	4.21	0.04	0.02	0.00	0.00	1.63	0.05
24/2/2557 14:30 น.	5.19	0.06	0.04	0.00	0.00	1.61	0.05
25/2/2557 12:00 น.	6.10	0.02	0.01	0.00	0.00	1.56	0.00
26/2/2557 9:00 น.	6.98	4.04	0.03	0.02	0.00	1.07	0.06
26/2/2557 12:00 น.	7.10	3.68	0.22	0.04	0.00	1.84	0.22
26/2/2557 15:00 น.	7.23	3.23	0.13	0.01	0.01	2.14	0.23
26/2/2557 18:00 น.	7.35	2.71	0.26	0.01	0.00	2.78	0.34
27/2/2557 8:30 น.	7.96	2.16	0.04	0.02	0.01	3.10	0.21
27/2/2557 13:30 น.	8.17	1.68	0.24	0.01	0.01	3.56	0.19
28/2/2557 12:30 น.	9.13	1.03	0.10	0.01	0.00	3.95	0.12
28/2/2557 18:00 น.	9.35	0.40	0.24	0.01	0.00	4.13	0.18
1/3/2557 10:30 น.	10.04	0.02	0.00	0.00	0.00	3.79	0.20
1/3/2557 17:30 น.	10.33	0.09	0.08	0.01	0.00	3.30	0.33
2/3/2557 9:30 น.	11.00	0.04	0.01	0.01	0.00	2.72	0.12

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
3/3/2557 12:00 น.	12.10	0.04	0.01	0.01	0.00	2.22	0.06
4/3/2557 13:00 น.	13.15	0.02	0.00	0.00	0.00	2.07	0.21

ตารางที่ ค-41 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ เมื่อตรวจวัดการใช้งานที่ 4 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
26/2/2557 9:30 น.	0	2.07	0.04	0.00	0.00	1.13	0.08
26/2/2557 12:30 น.	0.13	1.97	0.03	0.00	0.00	1.59	0.06
26/2/2557 15:30 น.	0.25	1.87	0.03	0.00	0.00	1.68	0.12
26/2/2557 18:30 น.	0.38	1.60	0.07	0.01	0.00	1.85	0.06
27/2/2557 11:30 น.	1.08	0.93	0.04	0.00	0.00	2.39	0.17
27/2/2557 18:00 น.	1.35	0.45	0.09	0.01	0.00	2.57	0.06
28/2/2557 12:30 น.	2.13	0.05	0.01	0.01	0.00	2.48	0.10
28/2/2557 18:00 น.	2.35	0.04	0.02	0.01	0.00	2.31	0.38
1/3/2557 11:45 น.	3.09	0.04	0.01	0.00	0.00	1.81	0.29
1/3/2557 16:30 น.	3.29	0.03	0.02	0.00	0.00	1.74	0.12
2/3/2557 14:30 น.	4.21	0.04	0.02	0.00	0.00	1.64	0.11
3/3/2557 14:30 น.	5.19	0.05	0.03	0.00	0.00	1.46	0.07
4/3/2557 12:00 น.	6.10	0.01	0.01	0.00	0.00	1.48	0.04
5/3/2557 9:00 น.	6.98	4.04	0.05	0.02	0.00	1.06	0.02
5/3/2557 12:00 น.	7.10	3.75	0.10	0.01	0.00	1.35	0.39
5/3/2557 15:00 น.	7.23	3.68	0.08	0.01	0.00	1.58	0.60
5/3/2557 18:00 น.	7.35	3.55	0.13	0.00	0.00	1.73	0.74
6/3/2557 8:30 น.	7.96	2.64	0.16	0.01	0.00	2.36	0.73

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
6/3/2557 13:30 น.	8.17	2.03	0.51	0.01	0.00	2.65	0.72
7/3/2557 12:30 น.	9.13	0.37	0.10	0.02	0.01	3.77	0.40
7/3/2557 18:00 น.	9.35	0.11	0.01	0.01	0.00	3.94	0.18
8/3/2557 10:30 น.	10.04	0.15	0.01	0.00	0.00	3.49	0.47
8/3/2557 17:30 น.	10.33	0.05	0.01	0.01	0.00	2.93	0.22
9/3/2557 9:30 น.	11.00	0.02	0.00	0.00	0.00	2.74	0.10
10/3/2557 12:00 น.	12.10	0.04	0.01	0.00	0.00	2.35	0.24
11/3/2557 13:00 น.	13.15	0.02	0.01	0.00	0.00	2.34	0.16

ตารางที่ ค-42 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการทดลองที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองด้วยความถี่ 1 สัปดาห์/ครั้ง ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/2/2557 9:30 น.	0	2.12	0.15	0.00	0.00	1.30	0.02
5/2/2557 12:30 น.	0.13	1.90	0.03	0.01	0.00	1.82	0.06
5/2/2557 15:30 น.	0.25	1.71	0.11	0.01	0.00	2.00	0.14
5/2/2557 18:30 น.	0.38	1.27	0.23	0.01	0.00	2.15	0.05
6/2/2557 11:30 น.	1.08	0.96	0.13	0.01	0.00	2.32	0.13
6/2/2557 18:00 น.	1.35	0.69	0.08	0.02	0.00	2.35	0.20
7/2/2557 12:30 น.	2.13	0.44	0.03	0.03	0.01	2.46	0.08
7/2/2557 18:00 น.	2.35	0.29	0.02	0.02	0.01	2.37	0.07
8/2/2557 11:45 น.	3.09	0.25	0.06	0.02	0.02	2.29	0.19
8/2/2557 16:30 น.	3.29	0.10	0.11	0.01	0.02	2.08	0.13
9/2/2557 14:30 น.	4.21	0.03	0.01	0.01	0.00	1.97	0.06
10/2/2557 14:30 น.	5.19	0.07	0.03	0.00	0.00	1.87	0.19

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
11/2/2557 12:00 น.	6.10	0.03	0.01	0.00	0.00	1.84	0.19
12/2/2557 9:00 น.	6.98	4.04	0.10	0.00	0.00	1.28	0.07
12/2/2557 12:00 น.	7.10	3.33	0.05	0.00	0.00	1.40	0.11
12/2/2557 15:00 น.	7.23	2.78	0.05	0.00	0.00	1.60	0.13
12/2/2557 18:00 น.	7.35	2.36	0.04	0.00	0.00	1.69	0.11
13/2/2557 8:30 น.	7.96	1.23	0.10	0.00	0.00	2.12	0.25
13/2/2557 13:30 น.	8.17	0.54	0.03	0.03	0.02	2.86	0.40
14/2/2557 12:30 น.	9.13	0.41	0.04	0.01	0.00	3.72	0.07
14/2/2557 18:00 น.	9.35	0.35	0.04	0.02	0.01	3.85	0.20
15/2/2557 10:30 น.	10.04	0.28	0.03	0.00	0.00	3.63	0.25
15/2/2557 17:30 น.	10.33	0.35	0.01	0.00	0.00	3.48	0.27
16/2/2557 9:30 น.	11.00	0.03	0.01	0.01	0.00	3.09	0.26
17/2/2557 12:00 น.	12.10	0.02	0.01	0.02	0.01	2.75	0.18
18/2/2557 13:00 น.	13.15	0.02	0.00	0.01	0.01	2.55	0.18

ตารางที่ ค-43 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการทดลองที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองด้วยความถี่ 2 สัปดาห์/ครั้ง ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
12/2/2557 9:30 น.	0	2.15	0.04	0.01	0.00	1.22	0.04
12/2/2557 12:30 น.	0.13	1.79	0.13	0.02	0.01	1.61	0.24
12/2/2557 15:30 น.	0.25	1.45	0.08	0.00	0.00	1.71	0.11
12/2/2557 18:30 น.	0.38	1.08	0.19	0.00	0.00	2.06	0.19
13/2/2557 11:30 น.	1.08	0.49	0.05	0.00	0.00	2.31	0.17
13/2/2557 18:00 น.	1.35	0.41	0.15	0.01	0.00	2.58	0.18

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
14/2/2557 12:30 น.	2.13	0.08	0.07	0.00	0.00	2.67	0.08
14/2/2557 18:00 น.	2.35	0.03	0.05	0.00	0.00	2.53	0.12
15/2/2557 11:45 น.	3.09	0.04	0.06	0.00	0.00	2.36	0.19
15/2/2557 16:30 น.	3.29	0.00	0.00	0.00	0.00	2.27	0.11
16/2/2557 14:30 น.	4.21	0.11	0.06	0.01	0.00	2.07	0.07
17/2/2557 14:30 น.	5.19	0.07	0.02	0.01	0.00	1.90	0.07
18/2/2557 12:00 น.	6.10	0.05	0.04	0.00	0.00	1.90	0.08
19/2/2557 9:00 น.	6.98	4.02	0.01	0.01	0.00	1.12	0.08
19/2/2557 12:00 น.	7.10	3.49	0.36	0.01	0.00	1.91	0.27
19/2/2557 15:00 น.	7.23	2.82	0.06	0.01	0.00	2.13	0.20
19/2/2557 18:00 น.	7.35	2.02	0.06	0.01	0.01	2.40	0.31
20/2/2557 8:30 น.	7.96	1.18	0.23	0.01	0.00	2.65	0.37
20/2/2557 13:30 น.	8.17	0.78	0.02	0.00	0.00	3.04	0.13
21/2/2557 12:30 น.	9.13	0.30	0.08	0.01	0.00	3.57	0.16
21/2/2557 18:00 น.	9.35	0.18	0.09	0.01	0.00	3.63	0.10
22/2/2557 10:30 น.	10.04	0.10	0.10	0.01	0.00	3.56	0.21
22/2/2557 17:30 น.	10.33	0.09	0.13	0.00	0.00	3.31	0.10
23/2/2557 9:30 น.	11.00	0.03	0.03	0.00	0.00	2.94	0.09
24/2/2557 12:00 น.	12.10	0.06	0.05	0.00	0.01	2.54	0.04
25/2/2557 13:00 น.	13.15	0.03	0.02	0.00	0.00	2.42	0.18

ตารางที่ ค-44 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการทดลองที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองด้วยความถี่ 3 สัปดาห์/ครั้ง ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
19/2/2557 9:30 น.	0	2.13	0.05	0.00	0.00	1.22	0.08
19/2/2557 12:30 น.	0.13	1.92	0.09	0.01	0.00	1.75	0.11
19/2/2557 15:30 น.	0.25	1.15	0.05	0.01	0.00	1.89	0.06
19/2/2557 18:30 น.	0.38	0.89	0.04	0.01	0.00	2.20	0.08
20/2/2557 11:30 น.	1.08	0.53	0.20	0.01	0.00	2.36	0.06
20/2/2557 18:00 น.	1.35	0.40	0.05	0.01	0.00	2.69	0.05
21/2/2557 12:30 น.	2.13	0.33	0.07	0.02	0.00	2.65	0.07
21/2/2557 18:00 น.	2.35	0.21	0.09	0.01	0.00	2.57	0.20
22/2/2557 11:45 น.	3.09	0.14	0.05	0.01	0.00	2.30	0.32
22/2/2557 16:30 น.	3.29	0.13	0.04	0.01	0.00	2.10	0.23
23/2/2557 14:30 น.	4.21	0.09	0.07	0.01	0.00	1.87	0.03
24/2/2557 14:30 น.	5.19	0.07	0.05	0.01	0.00	1.81	0.08
25/2/2557 12:00 น.	6.10	0.03	0.01	0.01	0.00	1.87	0.04
26/2/2557 9:00 น.	6.98	4.07	0.10	0.03	0.01	1.09	0.06
26/2/2557 12:00 น.	7.10	3.83	0.14	0.02	0.02	1.99	0.16
26/2/2557 15:00 น.	7.23	3.37	0.07	0.01	0.01	2.35	0.28
26/2/2557 18:00 น.	7.35	2.76	0.37	0.01	0.00	2.97	0.15
27/2/2557 8:30 น.	7.96	1.79	0.14	0.03	0.01	3.36	0.08
27/2/2557 13:30 น.	8.17	1.25	0.10	0.01	0.00	3.87	0.12
28/2/2557 12:30 น.	9.13	0.53	0.04	0.02	0.01	4.14	0.04
28/2/2557 18:00 น.	9.35	0.27	0.03	0.02	0.01	4.06	0.27
1/3/2557 10:30 น.	10.04	0.01	0.00	0.00	0.00	3.61	0.16
1/3/2557 17:30 น.	10.33	0.03	0.00	0.00	0.00	3.34	0.10
2/3/2557 9:30 น.	11.00	0.05	0.01	0.00	0.00	2.81	0.28
3/3/2557 12:00 น.	12.10	0.09	0.07	0.00	0.00	2.49	0.11
4/3/2557 13:00 น.	13.15	0.04	0.01	0.00	0.00	2.42	0.20

ตารางที่ ค-45 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการทดลองที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองด้วยความถี่ 4 สัปดาห์/ครั้ง ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้น

เท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
26/2/2557 9:30 น.	0	2.03	0.03	0.00	0.00	1.18	0.07
26/2/2557 12:30 น.	0.13	1.81	0.06	0.00	0.00	1.61	0.10
26/2/2557 15:30 น.	0.25	1.12	0.12	0.00	0.00	1.79	0.04
26/2/2557 18:30 น.	0.38	0.96	0.04	0.00	0.00	2.24	0.04
27/2/2557 11:30 น.	1.08	0.63	0.09	0.01	0.00	2.37	0.07
27/2/2557 18:00 น.	1.35	0.50	0.09	0.01	0.00	2.62	0.03
28/2/2557 12:30 น.	2.13	0.10	0.14	0.01	0.00	2.72	0.03
28/2/2557 18:00 น.	2.35	0.05	0.01	0.01	0.00	2.55	0.19
1/3/2557 11:45 น.	3.09	0.01	0.02	0.00	0.00	2.33	0.11
1/3/2557 16:30 น.	3.29	0.02	0.00	0.01	0.00	2.06	0.15
2/3/2557 14:30 น.	4.21	0.01	0.01	0.00	0.00	1.91	0.08
3/3/2557 14:30 น.	5.19	0.03	0.02	0.01	0.00	1.87	0.08
4/3/2557 12:00 น.	6.10	0.01	0.01	0.00	0.00	1.82	0.12
5/3/2557 9:00 น.	6.98	4.01	0.06	0.00	0.00	1.07	0.02
5/3/2557 12:00 น.	7.10	3.70	0.06	0.00	0.00	1.80	0.04
5/3/2557 15:00 น.	7.23	3.51	0.17	0.01	0.00	2.30	0.19
5/3/2557 18:00 น.	7.35	2.80	0.12	0.01	0.01	2.67	0.19
6/3/2557 8:30 น.	7.96	1.80	0.08	0.02	0.01	3.11	0.20
6/3/2557 13:30 น.	8.17	1.56	0.12	0.02	0.01	3.61	0.20
7/3/2557 12:30 น.	9.13	0.43	0.26	0.08	0.03	3.95	0.11
7/3/2557 18:00 น.	9.35	0.19	0.10	0.06	0.01	4.10	0.09
8/3/2557 10:30 น.	10.04	0.11	0.03	0.04	0.03	3.69	0.19
8/3/2557 17:30 น.	10.33	0.08	0.02	0.06	0.04	3.26	0.19
9/3/2557 9:30 น.	11.00	0.07	0.04	0.07	0.01	2.84	0.19
10/3/2557 12:00 น.	12.10	0.04	0.00	0.07	0.01	2.53	0.09

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
11/3/2557 13:00 น.	13.15	0.03	0.01	0.02	0.00	2.39	0.11

ตารางที่ ค-46 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ เมื่อตรวจวัดการใช้งานที่ 1 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/2/2557 10:00 น.	0	153.33	5.77	6.50	0.30	7.58	0.07	25.43	0.15
6/2/2557 10:00 น.	1.00	173.33	5.77	6.20	0.10	7.68	0.02	25.27	0.06
7/2/2557 10:00 น.	2.00	190.00	10.00	7.60	0.26	7.61	0.08	25.70	0.10
8/2/2557 10:00 น.	3.00	203.33	5.77	6.57	0.57	7.78	0.05	25.43	0.42
9/2/2557 10:00 น.	4.00	196.67	5.77	6.90	0.10	8.05	0.01	26.50	0.10
10/2/2557 10:00 น.	5.00	200.00	0.00	6.50	0.26	8.09	0.01	26.30	0.10
11/2/2557 10:00 น.	6.00	203.33	5.77	7.10	0.26	8.07	0.06	26.40	0.10
12/2/2557 10:00 น.	7.00	153.33	5.77	7.47	0.21	8.17	0.06	26.50	0.30
13/2/2557 10:00 น.	8.00	166.67	5.77	7.43	0.51	8.31	0.05	25.33	0.25
14/2/2557 10:00 น.	9.00	166.67	5.77	7.63	0.15	8.33	0.06	25.53	0.40
15/2/2557 10:00 น.	10.00	170.00	10.00	7.43	0.29	8.39	0.01	25.60	0.20
16/2/2557 10:00 น.	11.00	176.67	5.77	6.90	0.87	8.32	0.08	25.33	0.32
17/2/2557 10:00 น.	12.00	186.67	11.55	6.70	0.17	8.39	0.07	26.43	0.06
18/2/2557 10:00 น.	13.00	193.33	5.77	6.33	0.42	8.45	0.05	26.40	0.35

ตารางที่ ค-47 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ เมื่อตรวจวัดการใช้งานที่ 2 สัปดาห์

ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
12/2/2557 10:00 น.	0	160.00	0.00	6.47	0.15	7.56	0.04	25.33	0.06
13/2/2557 10:00 น.	1.00	173.33	5.77	6.33	0.31	7.74	0.06	25.23	0.32
14/2/2557 10:00 น.	2.00	180.00	10.00	7.07	0.15	7.59	0.08	25.50	0.10
15/2/2557 10:00 น.	3.00	193.33	5.77	6.57	0.21	7.90	0.09	25.37	0.25
16/2/2557 10:00 น.	4.00	206.67	5.77	6.27	0.25	8.09	0.05	26.27	0.25
17/2/2557 10:00 น.	5.00	210.00	10.00	6.53	0.32	8.16	0.04	26.73	0.06
18/2/2557 10:00 น.	6.00	213.33	5.77	7.30	0.20	8.06	0.04	26.60	0.26
19/2/2557 10:00 น.	7.00	160.00	10.00	6.57	0.55	8.36	0.05	26.63	0.06
20/2/2557 10:00 น.	8.00	160.00	0.00	7.23	0.32	8.39	0.03	25.17	0.12
21/2/2557 10:00 น.	9.00	156.67	5.77	7.57	0.31	8.34	0.07	25.10	0.17
22/2/2557 10:00 น.	10.00	156.67	5.77	7.17	0.12	8.39	0.01	25.67	0.12
23/2/2557 10:00 น.	11.00	160.00	10.00	6.83	0.21	8.32	0.08	25.30	0.10
24/2/2557 10:00 น.	12.00	163.33	5.77	7.10	0.10	8.42	0.08	26.50	0.26
25/2/2557 10:00 น.	13.00	173.33	5.77	6.37	0.42	8.54	0.07	26.10	0.10

ตารางที่ ค-48 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ เมื่อตรวจวัดการใช้งานที่ 3 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
19/2/2557 10:00 น.	0	150.00	10.00	6.73	0.21	7.72	0.09	25.17	0.15

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
20/2/2557 10:00 น.	1.00	186.67	11.55	6.07	0.12	7.80	0.02	25.43	0.38
21/2/2557 10:00 น.	2.00	196.67	11.55	7.13	0.32	7.76	0.03	25.17	0.12
22/2/2557 10:00 น.	3.00	210.00	10.00	6.80	0.10	7.97	0.05	25.70	0.26
23/2/2557 10:00 น.	4.00	223.33	5.77	7.03	0.87	8.06	0.03	26.43	0.32
24/2/2557 10:00 น.	5.00	223.33	5.77	6.67	0.49	8.26	0.03	26.63	0.23
25/2/2557 10:00 น.	6.00	223.33	5.77	7.07	0.21	8.24	0.08	26.57	0.21
26/2/2557 10:00 น.	7.00	156.67	5.77	7.27	0.31	8.33	0.05	26.43	0.31
27/2/2557 10:00 น.	8.00	156.67	5.77	7.23	0.32	8.37	0.03	26.30	0.44
28/2/2557 10:00 น.	9.00	176.67	5.77	7.37	0.06	8.40	0.05	25.40	0.26
1/3/2557 10:00 น.	10.00	180.00	0.00	7.13	0.12	8.41	0.03	25.40	0.26
2/3/2557 10:00 น.	11.00	186.67	5.77	6.57	0.23	8.36	0.14	25.40	0.30
3/3/2557 10:00 น.	12.00	190.00	0.00	7.30	0.26	8.42	0.08	26.27	0.21
4/3/2557 10:00 น.	13.00	190.00	0.00	6.60	0.17	8.44	0.05	26.23	0.59

ตารางที่ ค-49 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ เมื่อตรวจวัดการใช้งานที่ 4 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
26/2/2557 10:00 น.	0	153.33	5.77	6.60	0.26	7.67	0.10	25.10	0.10
27/2/2557 10:00 น.	1.00	183.33	5.77	5.77	0.68	7.80	0.02	25.43	0.15
28/2/2557 10:00 น.	2.00	196.67	5.77	7.70	0.26	7.76	0.03	25.33	0.42
1/3/2557 10:00 น.	3.00	210.00	0.00	6.80	0.10	8.02	0.02	25.40	0.20
2/3/2557 10:00 น.	4.00	216.67	5.77	6.03	0.90	8.16	0.03	26.20	0.26

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
3/3/2557 10:00 น.	5.00	226.67	5.77	6.03	0.93	8.27	0.04	26.07	0.21
4/3/2557 10:00 น.	6.00	230.00	0.00	7.57	0.21	8.35	0.08	26.67	0.15
5/3/2557 10:00 น.	7.00	153.33	5.77	7.33	0.12	8.38	0.04	26.50	0.10
6/3/2557 10:00 น.	8.00	153.33	5.77	7.00	0.87	8.42	0.07	25.23	0.21
7/3/2557 10:00 น.	9.00	156.67	5.77	7.17	0.21	8.43	0.07	25.27	0.15
8/3/2557 10:00 น.	10.00	163.33	5.77	7.27	0.21	8.37	0.10	25.40	0.36
9/3/2557 10:00 น.	11.00	170.00	0.00	6.20	1.04	8.36	0.14	25.20	0.17
10/3/2557 10:00 น.	12.00	183.33	5.77	7.37	0.47	8.58	0.02	26.17	0.21
11/3/2557 10:00 น.	13.00	190.00	10.00	6.30	0.20	8.44	0.05	26.37	0.47

ตารางที่ ค-50 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการทดลองที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองด้วยความถี่ 1 สัปดาห์/ครั้ง ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/2/2557 10:00 น.	0	153.33	5.77	6.40	0.10	7.64	0.04	25.47	0.32
6/2/2557 10:00 น.	1.00	166.67	5.77	6.27	0.06	7.71	0.02	25.33	0.12
7/2/2557 10:00 น.	2.00	186.67	5.77	7.37	0.25	7.68	0.02	25.70	0.10
8/2/2557 10:00 น.	3.00	200.00	10.00	6.30	0.10	7.86	0.03	25.53	0.12
9/2/2557 10:00 น.	4.00	200.00	0.00	6.33	0.12	8.05	0.01	26.43	0.45
10/2/2557 10:00 น.	5.00	206.67	5.77	6.60	0.20	8.09	0.01	26.50	0.20
11/2/2557 10:00 น.	6.00	210.00	10.00	7.20	0.10	8.03	0.03	26.40	0.10
12/2/2557 10:00 น.	7.00	153.33	5.77	7.23	0.21	8.29	0.03	26.33	0.12
13/2/2557 10:00 น.	8.00	160.00	0.00	7.23	0.21	8.36	0.04	25.50	0.10

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
14/2/2557 10:00 น.	9.00	166.67	5.77	7.43	0.40	8.39	0.06	25.67	0.12
15/2/2557 10:00 น.	10.00	166.67	5.77	7.37	0.23	8.28	0.10	25.33	0.31
16/2/2557 10:00 น.	11.00	176.67	5.77	6.60	0.26	8.33	0.09	25.33	0.32
17/2/2557 10:00 น.	12.00	190.00	10.00	7.30	0.26	8.35	0.12	26.33	0.49
18/2/2557 10:00 น.	13.00	196.67	5.77	6.37	0.38	8.39	0.07	26.17	0.15

ตารางที่ ค-51 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการทดลองที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองด้วยความถี่ 2 สัปดาห์/ครั้ง ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
12/2/2557 10:00 น.	0	160.00	0.00	6.60	0.26	7.62	0.08	25.40	0.10
13/2/2557 10:00 น.	1.00	163.33	5.77	6.50	0.44	7.69	0.02	25.23	0.32
14/2/2557 10:00 น.	2.00	176.67	5.77	7.03	0.06	7.68	0.02	25.63	0.15
15/2/2557 10:00 น.	3.00	186.67	5.77	6.57	0.21	7.92	0.07	25.43	0.15
16/2/2557 10:00 น.	4.00	196.67	11.55	6.20	0.20	7.98	0.10	26.43	0.35
17/2/2557 10:00 น.	5.00	206.67	11.55	6.53	0.32	8.05	0.06	26.63	0.21
18/2/2557 10:00 น.	6.00	213.33	5.77	7.43	0.29	7.95	0.06	26.67	0.15
19/2/2557 10:00 น.	7.00	160.00	10.00	7.07	0.06	8.20	0.08	26.60	0.10
20/2/2557 10:00 น.	8.00	160.00	0.00	7.40	0.26	8.27	0.08	25.57	0.21
21/2/2557 10:00 น.	9.00	156.67	5.77	7.47	0.15	8.28	0.07	25.50	0.36
22/2/2557 10:00 น.	10.00	156.67	5.77	7.03	0.12	8.28	0.10	25.63	0.29
23/2/2557 10:00 น.	11.00	166.67	5.77	6.67	0.40	8.28	0.07	25.10	0.10
24/2/2557 10:00 น.	12.00	176.67	15.28	7.23	0.25	8.33	0.04	26.63	0.15

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
25/2/2557 10:00 น.	13.00	196.67	5.77	6.70	0.20	8.32	0.08	26.23	0.21

ตารางที่ ค-52 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการทดลองที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองด้วยความถี่ 3 สัปดาห์/ครั้ง ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
19/2/2557 10:00 น.	0	150.00	10.00	6.50	0.40	7.59	0.11	25.27	0.25
20/2/2557 10:00 น.	1.00	166.67	5.77	6.50	0.10	7.72	0.05	25.47	0.15
21/2/2557 10:00 น.	2.00	186.67	5.77	7.27	0.31	7.74	0.11	25.33	0.21
22/2/2557 10:00 น.	3.00	193.33	11.55	6.80	0.10	7.96	0.06	25.57	0.35
23/2/2557 10:00 น.	4.00	210.00	10.00	6.47	0.35	8.01	0.05	26.57	0.12
24/2/2557 10:00 น.	5.00	210.00	10.00	6.63	0.25	8.05	0.06	26.50	0.40
25/2/2557 10:00 น.	6.00	216.67	5.77	7.47	0.47	8.01	0.02	26.50	0.30
26/2/2557 10:00 น.	7.00	156.67	5.77	7.67	0.45	8.24	0.06	26.57	0.15
27/2/2557 10:00 น.	8.00	156.67	5.77	7.50	0.50	8.27	0.06	26.23	0.25
28/2/2557 10:00 น.	9.00	176.67	5.77	7.37	0.06	8.28	0.07	25.50	0.10
1/3/2557 10:00 น.	10.00	180.00	0.00	7.27	0.12	8.35	0.08	25.57	0.06
2/3/2557 10:00 น.	11.00	186.67	5.77	6.57	0.23	8.33	0.09	25.20	0.20
3/3/2557 10:00 น.	12.00	190.00	0.00	6.47	1.29	8.37	0.05	26.10	0.10
4/3/2557 10:00 น.	13.00	193.33	5.77	6.63	0.12	8.39	0.06	26.73	0.64

ตารางที่ ค-53 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการ

ทดลองที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองด้วยความถี่ 4 สัปดาห์/ครั้ง ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
26/2/2557 10:00 น.	0	156.67	5.77	6.60	0.26	7.48	0.12	25.17	0.15
27/2/2557 10:00 น.	1.00	173.33	5.77	6.43	0.15	7.68	0.10	25.50	0.26
28/2/2557 10:00 น.	2.00	190.00	10.00	7.43	0.35	7.70	0.08	25.23	0.25
1/3/2557 10:00 น.	3.00	200.00	10.00	6.80	0.10	7.89	0.13	25.23	0.21
2/3/2557 10:00 น.	4.00	213.33	5.77	7.30	0.69	7.96	0.08	25.27	0.46
3/3/2557 10:00 น.	5.00	216.67	5.77	7.27	0.64	8.05	0.06	26.63	0.21
4/3/2557 10:00 น.	6.00	216.67	5.77	6.87	0.12	8.14	0.05	26.67	0.15
5/3/2557 10:00 น.	7.00	153.33	5.77	7.13	0.06	8.24	0.06	26.63	0.15
6/3/2557 10:00 น.	8.00	153.33	5.77	7.17	0.21	8.30	0.07	26.47	0.06
7/3/2557 10:00 น.	9.00	156.67	5.77	7.23	0.29	8.35	0.12	25.20	0.20
8/3/2557 10:00 น.	10.00	163.33	5.77	7.40	0.26	8.46	0.06	25.63	0.29
9/3/2557 10:00 น.	11.00	170.00	0.00	6.53	0.47	8.40	0.05	25.20	0.17
10/3/2557 10:00 น.	12.00	186.67	5.77	7.20	0.10	8.35	0.02	26.37	0.40
11/3/2557 10:00 น.	13.00	196.67	5.77	6.10	0.96	8.46	0.04	26.00	0.00

ตารางที่ ค-54 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ เมื่อตรวจวัดการใช้งานที่ 1 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/2/2557 10:00 น.	0	188.73	12.56	50.77	5.02
6/2/2557 10:00 น.	1.00	198.17	1.95	44.07	10.93
7/2/2557 10:00 น.	2.00	182.90	4.94	45.07	8.91
8/2/2557 10:00 น.	3.00	181.73	1.93	35.27	1.18
9/2/2557 10:00 น.	4.00	187.57	2.02	54.23	1.87
10/2/2557 10:00 น.	5.00	184.13	1.45	43.47	2.15
11/2/2557 10:00 น.	6.00	195.77	8.82	45.23	3.00
12/2/2557 10:00 น.	7.00	187.57	3.56	45.03	9.85
13/2/2557 10:00 น.	8.00	200.67	10.10	53.93	1.42
14/2/2557 10:00 น.	9.00	195.87	8.28	43.47	10.02
15/2/2557 10:00 น.	10.00	202.60	7.08	49.00	10.70
16/2/2557 10:00 น.	11.00	202.80	5.89	44.69	10.32
17/2/2557 10:00 น.	12.00	199.70	10.39	49.97	6.41
18/2/2557 10:00 น.	13.00	203.87	8.12	53.80	1.93

ตารางที่ ค-55 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ เมื่อตรวจวัดการใช้งานที่ 2 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
12/2/2557 10:00 น.	0	176.97	6.45	30.30	4.25
13/2/2557 10:00 น.	1.00	180.67	7.70	41.23	6.63
14/2/2557 10:00 น.	2.00	173.57	10.62	35.30	1.61
15/2/2557 10:00 น.	3.00	174.03	16.41	35.70	3.48
16/2/2557 10:00 น.	4.00	158.67	3.18	32.93	0.58

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
17/2/2557 10:00 น.	5.00	178.93	13.63	29.37	0.51
18/2/2557 10:00 น.	6.00	181.87	7.17	35.73	1.08
19/2/2557 10:00 น.	7.00	189.60	4.58	35.43	1.19
20/2/2557 10:00 น.	8.00	187.73	7.55	51.87	6.46
21/2/2557 10:00 น.	9.00	197.00	4.13	45.53	10.10
22/2/2557 10:00 น.	10.00	210.33	2.55	49.83	6.21
23/2/2557 10:00 น.	11.00	194.77	14.53	39.00	2.98
24/2/2557 10:00 น.	12.00	197.60	6.52	42.67	8.95
25/2/2557 10:00 น.	13.00	197.40	5.03	47.23	9.42

ตารางที่ ค-56 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ เมื่อตรวจวัดการใช้งานที่ 3 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
19/2/2557 10:00 น.	0	187.80	1.37	35.53	0.49
20/2/2557 10:00 น.	1.00	176.70	7.82	34.63	1.25
21/2/2557 10:00 น.	2.00	177.90	9.66	26.37	2.04
22/2/2557 10:00 น.	3.00	195.30	9.29	35.97	2.35
23/2/2557 10:00 น.	4.00	178.17	19.83	24.93	3.45
24/2/2557 10:00 น.	5.00	208.97	6.87	27.63	1.90
25/2/2557 10:00 น.	6.00	199.93	2.75	24.90	0.61
26/2/2557 10:00 น.	7.00	199.17	0.76	17.50	2.17
27/2/2557 10:00 น.	8.00	192.70	3.37	23.43	1.93
28/2/2557 10:00 น.	9.00	191.90	9.84	27.83	2.07

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1/3/2557 10:00 น.	10.00	213.80	7.42	35.40	2.40
2/3/2557 10:00 น.	11.00	215.67	5.97	35.50	1.18
3/3/2557 10:00 น.	12.00	197.73	3.72	33.30	2.46
4/3/2557 10:00 น.	13.00	192.83	7.84	38.23	1.55

ตารางที่ ค-57 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพ เมื่อตรวจวัดการใช้งานที่ 4 สัปดาห์ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
26/2/2557 10:00 น.	0	205.03	3.27	26.27	1.15
27/2/2557 10:00 น.	1.00	192.07	3.36	24.40	2.82
28/2/2557 10:00 น.	2.00	194.27	5.83	22.40	2.82
1/3/2557 10:00 น.	3.00	195.17	8.60	25.60	3.30
2/3/2557 10:00 น.	4.00	191.37	16.97	19.77	4.85
3/3/2557 10:00 น.	5.00	200.50	15.91	25.03	3.22
4/3/2557 10:00 น.	6.00	200.50	15.91	26.33	3.01
5/3/2557 10:00 น.	7.00	185.37	5.69	23.80	1.95
6/3/2557 10:00 น.	8.00	188.00	9.23	25.97	2.90
7/3/2557 10:00 น.	9.00	198.37	10.34	16.67	2.11
8/3/2557 10:00 น.	10.00	190.00	10.88	18.30	0.85
9/3/2557 10:00 น.	11.00	193.63	9.30	24.50	3.38
10/3/2557 10:00 น.	12.00	196.27	5.27	25.10	3.48
11/3/2557 10:00 น.	13.00	203.33	4.54	24.57	4.07

ตารางที่ ค-58 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการทดลองที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองด้วยความถี่ 1 สัปดาห์/ครั้ง ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/2/2557 10:00 น.	0	176.30	12.46	59.67	5.49
6/2/2557 10:00 น.	1.00	166.83	2.22	45.30	3.48
7/2/2557 10:00 น.	2.00	179.50	0.96	55.53	3.36
8/2/2557 10:00 น.	3.00	181.73	1.93	51.50	8.22
9/2/2557 10:00 น.	4.00	178.97	10.75	47.73	4.66
10/2/2557 10:00 น.	5.00	183.27	4.04	65.90	3.81
11/2/2557 10:00 น.	6.00	182.30	3.52	56.37	8.11
12/2/2557 10:00 น.	7.00	187.57	3.56	55.33	0.81
13/2/2557 10:00 น.	8.00	185.63	4.27	45.50	3.45
14/2/2557 10:00 น.	9.00	182.37	6.31	54.00	5.00
15/2/2557 10:00 น.	10.00	171.77	7.22	52.47	3.92
16/2/2557 10:00 น.	11.00	187.07	2.20	53.70	4.59
17/2/2557 10:00 น.	12.00	177.97	8.83	49.57	9.22
18/2/2557 10:00 น.	13.00	185.37	4.84	58.30	9.66

ตารางที่ ค-59 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการทดลองที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองด้วยความถี่ 2 สัปดาห์/ครั้ง ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
12/2/2557 10:00 น.	0	174.07	1.72	48.37	4.76
13/2/2557 10:00 น.	1.00	170.70	1.57	50.97	6.21
14/2/2557 10:00 น.	2.00	176.57	1.76	54.53	4.32
15/2/2557 10:00 น.	3.00	165.03	3.55	50.20	4.70
16/2/2557 10:00 น.	4.00	163.97	10.53	57.27	4.74
17/2/2557 10:00 น.	5.00	173.53	8.78	52.83	6.19
18/2/2557 10:00 น.	6.00	166.67	2.83	47.70	8.36
19/2/2557 10:00 น.	7.00	155.53	1.79	50.80	7.37
20/2/2557 10:00 น.	8.00	181.23	3.84	50.93	4.66
21/2/2557 10:00 น.	9.00	189.00	3.03	46.70	11.89
22/2/2557 10:00 น.	10.00	198.83	0.21	49.30	5.40
23/2/2557 10:00 น.	11.00	186.60	2.51	43.47	10.11
24/2/2557 10:00 น.	12.00	192.53	3.62	49.57	7.48
25/2/2557 10:00 น.	13.00	189.20	2.62	49.47	4.01

ตารางที่ ค-60 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการทดลองที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองด้วยความถี่ 3 สัปดาห์/ครั้ง ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
19/2/2557 10:00 น.	0	187.80	1.37	52.87	0.98
20/2/2557 10:00 น.	1.00	172.03	2.48	56.43	3.11
21/2/2557 10:00 น.	2.00	171.67	3.41	52.43	0.75
22/2/2557 10:00 น.	3.00	167.87	4.27	47.17	13.90
23/2/2557 10:00 น.	4.00	164.67	7.19	48.00	9.17

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
24/2/2557 10:00 น.	5.00	168.03	4.65	43.17	7.36
25/2/2557 10:00 น.	6.00	168.03	4.65	51.13	6.77
26/2/2557 10:00 น.	7.00	130.10	7.04	42.83	7.26
27/2/2557 10:00 น.	8.00	174.97	9.21	50.77	2.40
28/2/2557 10:00 น.	9.00	181.90	7.04	47.53	6.71
1/3/2557 10:00 น.	10.00	190.87	4.67	53.83	9.57
2/3/2557 10:00 น.	11.00	188.77	7.93	56.83	5.30
3/3/2557 10:00 น.	12.00	193.63	7.15	57.67	5.03
4/3/2557 10:00 น.	13.00	192.83	7.84	58.00	4.36

ตารางที่ ค-61 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในการศึกษาผลของความถี่ในการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด สำหรับชุดการทดลองที่มีการล้างทำความสะอาดตัวกรองด้วยความถี่ 4 สัปดาห์/ครั้ง ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
26/2/2557 10:00 น.	0	205.03	3.27	51.77	6.49
27/2/2557 10:00 น.	1.00	188.23	4.26	46.77	12.56
28/2/2557 10:00 น.	2.00	192.53	3.00	46.20	2.08
1/3/2557 10:00 น.	3.00	202.60	2.29	49.90	8.90
2/3/2557 10:00 น.	4.00	184.73	7.83	55.30	7.50
3/3/2557 10:00 น.	5.00	177.53	0.50	53.83	6.74
4/3/2557 10:00 น.	6.00	206.90	3.24	58.27	3.76
5/3/2557 10:00 น.	7.00	195.43	6.57	56.80	9.01
6/3/2557 10:00 น.	8.00	181.33	2.57	50.30	1.47
7/3/2557 10:00 น.	9.00	196.07	6.35	49.20	5.38

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
8/3/2557 10:00 น.	10.00	194.43	12.33	50.00	3.61
9/3/2557 10:00 น.	11.00	199.70	1.28	53.40	6.79
10/3/2557 10:00 น.	12.00	196.00	4.98	52.73	6.74
11/3/2557 10:00 น.	13.00	199.43	1.62	53.30	7.69

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพน้ำสำหรับการทดลองช่วงที่ 3 การประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

ตารางที่ ง-1 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งระบบบำบัด จำนวน 3 บ่อ (วิเคราะห์บ่อละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
13/5/2557 10:00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.01	1.02	0.04
14/5/2557 10:00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.88	0.01
15/5/2557 10:00	2.00	0.03	0.01	0.03	0.02	0.94	0.02
16/5/2557 10:00	3.00	0.22	0.03	0.01	0.01	1.05	0.04
17/5/2557 10:00	4.00	0.43	0.07	0.03	0.03	0.98	0.06
18/5/2557 10:00	5.00	0.73	0.08	0.02	0.00	1.03	0.02
19/5/2557 10:00	6.00	0.83	0.09	0.03	0.00	1.06	0.03
20/5/2557 10:00	7.00	1.24	0.14	0.04	0.01	1.02	0.06
21/5/2557 10:00	8.00	1.46	0.18	0.08	0.02	1.23	0.14
22/5/2557 10:00	9.00	1.97	0.09	0.07	0.01	1.03	0.08
23/5/2557 10:00	10.00	1.68	0.14	0.08	0.01	0.98	0.08
24/5/2557 10:00	11.00	1.95	0.29	0.07	0.00	1.00	0.06
25/5/2557 10:00	12.00	2.12	0.42	0.06	0.00	0.97	0.05
26/5/2557 10:00	13.00	2.27	0.44	0.08	0.00	0.98	0.05
27/5/2557 10:00	14.00	2.44	0.39	0.09	0.00	0.97	0.11
28/5/2557 10:00	15.00	1.77	0.34	0.13	0.02	0.92	0.07
29/5/2557 10:00	16.00	1.69	0.42	0.21	0.06	0.86	0.02
30/5/2557 10:00	17.00	1.87	0.19	0.51	0.15	0.82	0.06
31/5/2557 10:00	18.00	1.44	0.25	1.28	0.35	0.64	0.17
1/6/2557 10:00	19.00	0.97	0.26	1.32	0.26	1.42	0.16
2/6/2557 10:00	20.00	0.60	0.23	1.49	0.21	2.03	0.18

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
3/6/2557 10:00	21.00	0.08	0.03	1.67	0.13	2.57	0.19
4/6/2557 10:00	22.00	0.07	0.03	1.64	0.29	2.74	0.09
5/6/2557 10:00	23.00	0.07	0.02	1.72	0.21	2.87	0.13
6/6/2557 10:00	24.00	0.07	0.01	1.74	0.13	2.98	0.29
7/6/2557 10:00	25.00	0.07	0.02	1.72	0.07	2.73	0.05
8/6/2557 10:00	26.00	0.07	0.03	1.64	0.04	2.49	0.04
9/6/2557 10:00	27.00	0.05	0.01	1.73	0.15	2.49	0.16
10/6/2557 10:00	28.00	0.05	0.01	1.87	0.08	2.35	0.57
11/6/2557 10:00	29.00	0.26	0.02	2.43	0.14	1.81	0.17
12/6/2557 10:00	30.00	0.08	0.01	2.80	0.15	1.14	0.70
13/6/2557 10:00	31.00	0.07	0.02	2.96	0.03	0.95	0.58
14/6/2557 10:00	32.00	0.05	0.02	3.37	0.50	0.59	0.08
15/6/2557 10:00	33.00	0.09	0.05	3.42	0.66	0.76	0.07
16/6/2557 10:00	34.00	0.13	0.06	3.60	0.87	0.78	0.10
17/6/2557 10:00	35.00	0.09	0.04	3.51	0.84	0.61	0.10
18/6/2557 10:00	36.00	0.09	0.02	3.23	1.11	0.70	0.26
19/6/2557 10:00	37.00	0.12	0.00	2.88	1.13	0.63	0.29
20/6/2557 10:00	38.00	0.15	0.08	2.83	0.60	0.78	0.29
21/6/2557 10:00	39.00	0.22	0.13	2.69	0.40	0.98	0.32
22/6/2557 10:00	40.00	0.15	0.09	2.13	0.68	1.23	0.45
23/6/2557 10:00	41.00	0.10	0.07	1.66	0.71	1.40	0.56
24/6/2557 10:00	42.00	0.03	0.03	1.38	0.68	1.40	0.61
25/6/2557 10:00	43.00	0.01	0.02	1.20	0.73	1.58	0.60
26/6/2557 10:00	44.00	0.05	0.03	0.90	0.47	1.74	0.57
27/6/2557 10:00	45.00	0.06	0.03	0.46	0.39	2.04	0.49
28/6/2557 10:00	46.00	0.04	0.02	0.39	0.23	2.30	0.48
29/6/2557 10:00	47.00	0.02	0.02	0.34	0.18	2.60	0.46
30/6/2557 10:00	48.00	0.01	0.01	0.20	0.23	2.90	0.35
1/7/2557 10:00	49.00	0.08	0.02	0.37	0.27	3.07	0.59
2/7/2557 10:00	50.00	0.05	0.03	0.18	0.07	3.25	0.52
3/7/2557 10:00	51.00	0.05	0.02	0.15	0.01	3.28	0.69

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/7/2557 10:00	52.00	0.03	0.02	0.13	0.10	3.37	0.78
5/7/2557 10:00	53.00	0.00	0.00	0.10	0.02	3.35	0.86
6/7/2557 10:00	54.00	0.01	0.01	0.09	0.02	3.39	0.88
7/7/2557 10:00	55.00	0.00	0.00	0.11	0.04	3.41	0.85
8/7/2557 10:00	56.00	0.01	0.00	0.04	0.01	3.20	0.71
9/7/2557 10:00	57.00	0.01	0.00	0.05	0.02	2.83	0.56
10/7/2557 10:00	58.00	0.02	0.01	0.04	0.02	2.90	0.60
11/7/2557 10:00	59.00	0.02	0.00	0.03	0.02	2.98	0.60
12/7/2557 10:00	60.00	0.01	0.00	0.04	0.02	3.04	0.60
13/7/2557 10:00	61.00	0.01	0.00	0.04	0.02	3.15	0.74
14/7/2557 10:00	62.00	0.02	0.01	0.05	0.02	3.21	0.78
15/7/2557 10:00	63.00	0.04	0.01	0.03	0.01	3.35	1.03
16/7/2557 10:00	64.00	0.01	0.02	0.02	0.01	3.41	1.30
17/7/2557 10:00	65.00	0.00	0.00	0.04	0.02	3.53	1.23
18/7/2557 10:00	66.00	0.04	0.03	0.04	0.02	3.32	1.04
19/7/2557 10:00	67.00	0.04	0.01	0.03	0.02	3.17	1.08
20/7/2557 10:00	68.00	0.02	0.01	0.03	0.01	2.92	0.99
21/7/2557 10:00	69.00	0.03	0.03	0.03	0.01	2.87	1.02
22/7/2557 10:00	70.00	0.03	0.02	0.05	0.02	2.99	1.09
23/7/2557 10:00	71.00	0.01	0.01	0.04	0.02	3.19	1.14
24/7/2557 10:00	72.00	0.02	0.02	0.03	0.01	3.30	1.09
25/7/2557 10:00	73.00	0.02	0.04	0.03	0.01	3.33	1.15
26/7/2557 10:00	74.00	0.03	0.02	0.03	0.01	4.01	1.12
27/7/2557 10:00	75.00	0.02	0.02	0.03	0.01	4.27	1.07
28/7/2557 10:00	76.00	0.06	0.01	0.04	0.02	4.19	0.98
29/7/2557 10:00	77.00	0.02	0.01	0.04	0.02	4.44	1.04
30/7/2557 10:00	78.00	0.03	0.02	0.04	0.01	4.67	1.04
31/7/2557 10:00	79.00	0.05	0.02	0.12	0.04	4.24	1.32
1/8/2557 10:00	80.00	0.06	0.08	0.03	0.01	4.56	1.08
2/8/2557 10:00	81.00	0.18	0.05	0.03	0.01	5.30	1.12
3/8/2557 10:00	82.00	0.15	0.09	0.03	0.00	5.65	1.26

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/8/2557 10:00	83.00	0.09	0.07	0.03	0.00	5.82	1.27
5/8/2557 10:00	84.00	0.02	0.02	0.03	0.01	6.03	1.40
6/8/2557 10:00	85.00	0.17	0.05	0.11	0.00	6.49	1.46
7/8/2557 10:00	86.00	0.20	0.03	0.07	0.02	7.06	1.76
8/8/2557 10:00	87.00	0.18	0.03	0.03	0.01	7.15	1.84
9/8/2557 10:00	88.00	0.15	0.04	0.04	0.02	7.35	1.77
10/8/2557 10:00	89.00	0.12	0.05	0.03	0.01	7.96	1.99
11/8/2557 10:00	90.00	0.07	0.04	0.02	0.01	8.24	2.18
12/8/2557 10:00	91.00	0.00	0.00	0.02	0.01	8.67	2.18
13/8/2557 10:00	92.00	0.04	0.03	0.03	0.01	9.36	2.37
14/8/2557 10:00	93.00	0.10	0.06	0.04	0.01	10.19	2.82
15/8/2557 10:00	94.00	0.13	0.09	0.06	0.04	11.16	2.74
16/8/2557 10:00	95.00	0.10	0.07	0.04	0.01	12.39	2.53
17/8/2557 10:00	96.00	0.03	0.02	0.02	0.01	13.23	2.71
18/8/2557 10:00	97.00	0.05	0.04	0.03	0.00	13.37	2.65
19/8/2557 10:00	98.00	0.05	0.01	0.03	0.00	13.71	2.15
20/8/2557 10:00	99.00	0.07	0.01	0.04	0.00	14.13	2.17
21/8/2557 10:00	100.00	0.00	0.01	0.03	0.01	16.81	1.56

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ง-2 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ สำหรับชุดทดลองที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในบ่อ จำนวน 3 บ่อ (วิเคราะห์บ่อละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
13/5/2557 10:00	0.00	0.04	0.02	0.01	0.00	0.99	0.04
14/5/2557 10:00	1.00	0.00	0.01	0.00	0.00	1.12	0.01
15/5/2557 10:00	2.00	0.06	0.01	0.03	0.01	1.44	0.09

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/5/2557 10:00	3.00	0.07	0.01	0.01	0.00	1.68	0.11
17/5/2557 10:00	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.85	0.19
18/5/2557 10:00	5.00	0.02	0.00	0.01	0.00	2.11	0.12
19/5/2557 10:00	6.00	0.03	0.02	0.01	0.00	2.44	0.05
20/5/2557 10:00	7.00	0.05	0.03	0.01	0.00	2.74	0.22
21/5/2557 10:00	8.00	0.00	0.00	0.02	0.03	2.92	0.40
22/5/2557 10:00	9.00	0.00	0.00	0.02	0.01	3.33	0.47
23/5/2557 10:00	10.00	0.00	0.00	0.02	0.01	3.55	0.20
24/5/2557 10:00	11.00	0.11	0.04	0.01	0.00	3.73	0.33
25/5/2557 10:00	12.00	0.15	0.05	0.01	0.00	3.90	0.46
26/5/2557 10:00	13.00	0.10	0.03	0.01	0.00	4.30	0.55
27/5/2557 10:00	14.00	0.12	0.03	0.01	0.00	4.61	0.41
28/5/2557 10:00	15.00	0.01	0.02	0.01	0.00	4.73	0.36
29/5/2557 10:00	16.00	0.00	0.00	0.02	0.01	4.61	0.46
30/5/2557 10:00	17.00	0.01	0.01	0.04	0.01	4.88	0.59
31/5/2557 10:00	18.00	0.00	0.00	0.02	0.00	4.94	0.64
1/6/2557 10:00	19.00	0.01	0.01	0.01	0.01	4.88	0.30
2/6/2557 10:00	20.00	0.01	0.01	0.01	0.01	4.93	0.18
3/6/2557 10:00	21.00	0.00	0.00	0.01	0.00	5.14	0.15
4/6/2557 10:00	22.00	0.04	0.05	0.02	0.01	5.36	0.72
5/6/2557 10:00	23.00	0.02	0.01	0.02	0.00	5.41	0.71
6/6/2557 10:00	24.00	0.02	0.02	0.01	0.00	5.80	0.80
7/6/2557 10:00	25.00	0.07	0.03	0.03	0.01	5.63	0.71
8/6/2557 10:00	26.00	0.08	0.03	0.05	0.01	5.44	0.78
9/6/2557 10:00	27.00	0.17	0.01	0.03	0.01	5.32	0.89
10/6/2557 10:00	28.00	0.00	0.01	0.03	0.00	5.15	0.70
11/6/2557 10:00	29.00	0.01	0.01	0.04	0.02	5.51	0.71
12/6/2557 10:00	30.00	0.00	0.00	0.03	0.00	5.59	0.73
13/6/2557 10:00	31.00	0.00	0.01	0.04	0.00	5.72	0.67
14/6/2557 10:00	32.00	0.00	0.00	0.04	0.02	5.85	0.68
15/6/2557 10:00	33.00	0.01	0.01	0.05	0.01	5.71	0.89

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/6/2557 10:00	34.00	0.05	0.08	0.06	0.03	5.63	1.34
17/6/2557 10:00	35.00	0.02	0.02	0.08	0.02	5.10	1.07
18/6/2557 10:00	36.00	0.07	0.05	0.09	0.03	5.12	1.09
19/6/2557 10:00	37.00	0.08	0.02	0.11	0.01	4.94	0.98
20/6/2557 10:00	38.00	0.06	0.03	0.10	0.05	4.89	0.95
21/6/2557 10:00	39.00	0.07	0.01	0.12	0.07	4.82	1.12
22/6/2557 10:00	40.00	0.04	0.02	0.09	0.06	4.30	0.81
23/6/2557 10:00	41.00	0.02	0.01	0.09	0.03	4.14	0.35
24/6/2557 10:00	42.00	0.03	0.01	0.07	0.04	4.04	0.62
25/6/2557 10:00	43.00	0.03	0.02	0.06	0.03	3.95	0.87
26/6/2557 10:00	44.00	0.04	0.02	0.06	0.05	3.61	0.55
27/6/2557 10:00	45.00	0.05	0.04	0.07	0.06	3.23	0.29
28/6/2557 10:00	46.00	0.02	0.02	0.04	0.05	3.14	0.15
29/6/2557 10:00	47.00	0.02	0.01	0.04	0.03	3.04	0.26
30/6/2557 10:00	48.00	0.01	0.02	0.01	0.01	2.93	0.33
1/7/2557 10:00	49.00	0.06	0.01	0.01	0.00	2.78	0.29
2/7/2557 10:00	50.00	0.02	0.01	0.01	0.00	2.80	0.51
3/7/2557 10:00	51.00	0.04	0.05	0.02	0.00	2.69	0.60
4/7/2557 10:00	52.00	0.03	0.03	0.02	0.01	2.54	0.26
5/7/2557 10:00	53.00	0.02	0.04	0.03	0.02	2.42	0.18
6/7/2557 10:00	54.00	0.01	0.02	0.02	0.01	2.35	0.52
7/7/2557 10:00	55.00	0.00	0.00	0.02	0.02	2.73	1.05
8/7/2557 10:00	56.00	0.01	0.01	0.02	0.01	2.55	1.01
9/7/2557 10:00	57.00	0.02	0.02	0.01	0.01	2.41	0.97
10/7/2557 10:00	58.00	0.01	0.00	0.01	0.01	2.28	1.17
11/7/2557 10:00	59.00	0.01	0.00	0.02	0.01	2.37	1.13
12/7/2557 10:00	60.00	0.01	0.01	0.02	0.01	2.37	1.17
13/7/2557 10:00	61.00	0.01	0.01	0.02	0.01	2.46	1.27
14/7/2557 10:00	62.00	0.00	0.00	0.01	0.01	2.58	1.20
15/7/2557 10:00	63.00	0.00	0.00	0.01	0.01	2.58	1.25
16/7/2557 10:00	64.00	0.01	0.01	0.01	0.00	2.80	1.39

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
7/7/2557 10:00	65.00	0.00	0.00	0.01	0.00	3.08	1.93
18/7/2557 10:00	66.00	0.00	0.00	0.01	0.00	2.98	1.82
19/7/2557 10:00	67.00	0.00	0.00	0.01	0.01	2.78	1.67
20/7/2557 10:00	68.00	0.02	0.03	0.02	0.02	2.71	1.59
21/7/2557 10:00	69.00	0.04	0.06	0.02	0.02	2.68	1.49
22/7/2557 10:00	70.00	0.00	0.00	0.01	0.01	2.46	1.21
23/7/2557 10:00	71.00	0.00	0.00	0.01	0.01	2.40	1.17
24/7/2557 10:00	72.00	0.01	0.02	0.02	0.02	2.41	0.93
25/7/2557 10:00	73.00	0.02	0.01	0.02	0.02	2.47	0.92
26/7/2557 10:00	74.00	0.03	0.01	0.02	0.02	2.23	0.54
27/7/2557 10:00	75.00	0.01	0.01	0.02	0.01	2.17	0.41
28/7/2557 10:00	76.00	0.00	0.00	0.01	0.01	1.94	0.23
29/7/2557 10:00	77.00	0.00	0.00	0.02	0.00	2.07	0.56
30/7/2557 10:00	78.00	0.02	0.04	0.01	0.00	2.02	0.52
31/7/2557 10:00	79.00	0.05	0.08	0.07	0.08	1.71	0.21
1/8/2557 10:00	80.00	0.01	0.00	0.01	0.01	2.33	0.46
2/8/2557 10:00	81.00	0.07	0.05	0.02	0.02	2.39	0.36
3/8/2557 10:00	82.00	0.03	0.04	0.02	0.02	2.75	0.46
4/8/2557 10:00	83.00	0.05	0.05	0.02	0.02	2.80	0.55
5/8/2557 10:00	84.00	0.05	0.06	0.02	0.01	3.03	0.67
6/8/2557 10:00	85.00	0.03	0.03	0.03	0.04	2.95	0.68
7/8/2557 10:00	86.00	0.02	0.01	0.03	0.03	2.60	0.25
8/8/2557 10:00	87.00	0.05	0.05	0.02	0.01	2.37	0.29
9/8/2557 10:00	88.00	0.05	0.04	0.01	0.00	2.22	0.21
10/8/2557 10:00	89.00	0.02	0.01	0.00	0.01	2.39	0.29
11/8/2557 10:00	90.00	0.01	0.00	0.00	0.00	2.64	0.24
12/8/2557 10:00	91.00	0.00	0.01	0.00	0.00	1.95	0.00
13/8/2557 10:00	92.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.51	0.30
14/8/2557 10:00	93.00	0.01	0.01	0.00	0.00	2.49	0.22
15/8/2557 10:00	94.00	0.00	0.00	0.01	0.00	2.39	0.28
16/8/2557 10:00	95.00	0.01	0.01	0.00	0.00	2.61	0.24

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
17/8/2557 10:00	96.00	0.00	0.00	0.01	0.00	2.75	0.30
18/8/2557 10:00	97.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.57	0.43
19/8/2557 10:00	98.00	0.01	0.01	0.01	0.01	2.51	0.48
20/8/2557 10:00	99.00	0.02	0.00	0.01	0.00	2.67	0.38
21/8/2557 10:00	100.00	0.01	0.00	0.01	0.00	2.88	0.50

ตารางที่ ง-3 ปริมาณตะกอนแขวนลอยในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำของชุดควบคุม (ไม่มีการติดตั้งระบบบำบัด) และชุดทดลอง (มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในบ่อ) ในการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ ชุดการทดลองละ 3 บ่อ (วิเคราะห์บ่อละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ปริมาณตะกอนแขวนลอย (มก./ล.)			
		ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
15/5/2557 10:00	0	24.00	2.00	16.33	2.91
20/5/2557 10:00	5.00	28.22	6.87	28.78	5.87
25/5/2557 10:00	10.00	21.11	3.79	31.67	3.21
30/5/2557 10:00	15.00	25.78	9.02	4.88	0.53
4/6/2557 10:00	20.00	34.89	8.95	4.22	0.96
9/6/2557 10:00	25.00	53.11	2.36	40.11	4.11
14/6/2557 10:00	30.00	48.22	12.00	51.89	4.14
19/6/2557 10:00	35.00	70.00	21.85	10.89	1.83
24/6/2557 10:00	40.00	68.44	16.48	10.22	1.07
29/6/2557 10:00	45.00	106.00	19.60	11.22	3.34
4/7/2557 10:00	50.00	92.67	52.69	12.11	0.84
9/7/2557 10:00	55.00	110.22	76.50	80.44	56.69
14/7/2557 10:00	60.00	249.00	16.59	49.22	12.09
19/7/2557 10:00	65.00	301.22	57.08	51.56	1.39
24/7/2557 10:00	70.00	335.22	89.87	27.67	9.26
29/7/2557 10:00	75.00	330.00	58.62	22.67	7.27

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ปริมาณตะกอนแขวนลอย (มก./ล.)			
		ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
3/8/2557 10:00	80.00	382.78	108.14	18.00	6.76
8/8/2557 10:00	85.00	360.45	72.00	86.67	2.33
13/8/2557 10:00	90.00	508.45	79.57	12.22	3.56
18/8/255710:00	95.00	477.11	144.98	15.89	5.39
23/8/2557 10:00	100.00	581.56	116.70	12.78	7.17

ตารางที่ ง-4 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งระบบบำบัด จำนวน 3 บ่อ (วิเคราะห์บ่อละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
13/5/2557 10:00	0.00	150.00	0.00	7.83	0.06	7.03	0.06	29.70	0.17
14/5/2557 10:00	1.00	153.33	5.77	7.83	0.06	7.23	0.03	30.03	0.51
15/5/2557 10:00	2.00	156.67	11.55	8.63	0.15	7.06	0.04	30.40	0.44
16/5/2557 10:00	3.00	160.00	17.32	7.90	0.20	7.19	0.03	31.77	0.72
17/5/2557 10:00	4.00	173.33	20.82	7.87	0.21	7.15	0.02	30.77	0.25
18/5/2557 10:00	5.00	163.33	11.55	7.87	0.21	7.10	0.01	30.33	0.31
19/5/2557 10:00	6.00	163.33	11.55	8.03	0.06	7.14	0.02	30.23	0.06
20/5/2557 10:00	7.00	166.67	5.77	8.13	0.06	7.18	0.03	28.80	0.36
21/5/2557 10:00	8.00	163.33	5.77	6.60	0.17	7.18	0.03	30.00	0.35
22/5/2557 10:00	9.00	153.33	5.77	7.73	0.06	7.17	0.01	30.07	0.50
23/5/2557 10:00	10.00	166.67	5.77	7.63	0.06	7.19	0.03	29.30	0.10
24/5/2557 10:00	11.00	163.33	5.77	7.53	0.06	7.13	0.02	28.67	0.06
25/5/2557 10:00	12.00	160.00	10.00	7.50	0.20	7.07	0.05	29.70	0.17
26/5/2557 10:00	13.00	150.00	0.00	7.50	0.00	6.99	0.04	29.33	0.12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
27/5/2557 10:00	14.00	140.00	0.00	7.40	0.00	6.85	0.05	30.27	0.31
28/5/2557 10:00	15.00	133.33	5.77	8.10	0.10	6.92	0.01	30.17	0.70
29/5/2557 10:00	16.00	136.67	5.77	7.73	0.06	6.95	0.01	30.23	0.46
30/5/2557 10:00	17.00	136.67	5.77	6.93	0.06	7.02	0.01	29.70	0.36
31/5/2557 10:00	18.00	136.67	5.77	7.00	0.00	7.02	0.00	29.50	0.10
1/6/2557 10:00	19.00	143.33	5.77	7.13	0.06	7.01	0.02	29.53	0.06
2/6/2557 10:00	20.00	143.33	5.77	7.23	0.06	6.99	0.01	29.57	0.06
3/6/2557 10:00	21.00	150.00	10.00	7.13	0.06	6.99	0.02	31.17	0.65
4/6/2557 10:00	22.00	123.33	5.77	7.33	0.06	6.99	0.01	30.30	0.50
5/6/2557 10:00	23.00	126.67	5.77	7.10	0.10	7.04	0.01	30.07	0.06
6/6/2557 10:00	24.00	133.33	11.55	7.13	0.21	7.06	0.01	28.80	0.20
7/6/2557 10:00	25.00	140.00	10.00	7.53	0.15	7.05	0.01	28.47	0.45
8/6/2557 10:00	26.00	146.67	5.77	7.80	0.00	7.04	0.00	28.30	0.10
9/6/2557 10:00	27.00	146.67	15.28	6.60	0.00	7.07	0.01	29.40	0.17
10/6/2557 10:00	28.00	156.67	11.55	6.97	0.06	7.02	0.00	30.07	0.40
11/6/2557 10:00	29.00	166.67	5.77	6.80	0.10	7.07	0.03	29.43	0.12
12/6/2557 10:00	30.00	156.67	20.82	6.80	0.10	7.08	0.04	28.93	0.15
13/6/2557 10:00	31.00	163.33	15.28	7.20	0.10	7.09	0.03	28.53	0.06
14/6/2557 10:00	32.00	170.00	20.00	7.33	0.06	7.17	0.04	28.13	0.12
15/6/2557 10:00	33.00	170.00	10.00	7.23	0.25	7.17	0.02	27.37	0.12
16/6/2557 10:00	34.00	170.00	0.00	7.30	0.10	7.21	0.05	27.40	0.10
17/6/2557 10:00	35.00	170.00	10.00	7.77	0.15	7.29	0.03	27.47	0.06
18/6/2557 10:00	36.00	170.00	20.00	7.67	0.15	7.30	0.12	27.53	0.31
19/6/2557 10:00	37.00	173.33	11.55	7.67	0.06	7.35	0.05	28.40	0.10
20/6/2557 10:00	38.00	176.67	5.77	7.60	0.17	7.33	0.08	28.20	0.17
21/6/2557 10:00	39.00	180.00	10.00	7.47	0.15	7.30	0.05	28.47	0.06
22/6/2557 10:00	40.00	176.67	11.55	7.47	0.06	7.40	0.03	28.50	0.20
23/6/2557 10:00	41.00	166.67	20.82	7.60	0.10	7.47	0.06	27.20	0.10
24/6/2557 10:00	42.00	163.33	25.17	7.63	0.15	7.53	0.05	27.97	0.25
25/6/2557 10:00	43.00	180.00	10.00	7.80	0.10	7.49	0.06	27.77	0.15

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
26/6/2557 10:00	44.00	180.00	17.32	7.93	0.12	7.51	0.02	28.33	0.25
27/6/2557 10:00	45.00	186.67	23.09	7.73	0.15	7.46	0.11	27.70	0.10
28/6/2557 10:00	46.00	176.67	15.28	7.83	0.15	7.58	0.06	27.47	0.06
29/6/2557 10:00	47.00	170.00	20.00	7.40	0.10	7.58	0.06	28.43	0.06
30/6/2557 10:00	48.00	163.33	23.09	7.27	0.06	7.61	0.06	27.63	0.15
1/7/2557 10:00	49.00	176.67	5.77	6.57	0.06	7.70	0.07	27.90	0.17
2/7/2557 10:00	50.00	180.00	0.00	6.90	0.10	7.73	0.04	28.17	0.15
3/7/2557 10:00	51.00	180.00	0.00	7.23	0.40	7.74	0.03	28.07	0.12
4/7/2557 10:00	52.00	173.33	5.77	7.13	0.15	7.72	0.04	28.00	0.00
5/7/2557 10:00	53.00	163.33	23.09	7.13	0.06	7.70	0.09	28.33	0.12
6/7/2557 10:00	54.00	173.33	23.09	7.00	0.10	7.70	0.07	28.67	0.21
7/7/2557 10:00	55.00	183.33	25.17	6.87	0.12	7.70	0.06	28.40	0.10
8/7/2557 10:00	56.00	176.67	20.82	7.37	0.15	7.69	0.05	27.93	0.12
9/7/2557 10:00	57.00	173.33	15.28	7.63	0.06	7.67	0.05	27.73	0.25
10/7/2557 10:00	58.00	170.00	20.00	7.53	0.15	7.65	0.06	28.27	0.06
11/7/2557 10:00	59.00	166.67	11.55	7.73	0.06	7.63	0.06	28.37	0.12
12/7/2557 10:00	60.00	166.67	11.55	7.50	0.10	7.55	0.12	27.73	0.12
13/7/2557 10:00	61.00	173.33	15.28	7.27	0.23	7.53	0.12	28.00	0.17
14/7/2557 10:00	62.00	170.00	10.00	7.27	0.15	7.46	0.10	27.23	0.06
15/7/2557 10:00	63.00	176.67	11.55	7.97	0.06	7.46	0.05	28.03	0.31
16/7/2557 10:00	64.00	176.67	20.82	7.73	0.21	7.50	0.03	27.27	0.06
17/7/2557 10:00	65.00	176.67	20.82	6.90	0.10	7.54	0.04	27.10	0.10
18/7/2557 10:00	66.00	173.33	25.17	7.10	0.10	7.57	0.05	27.60	0.17
19/7/2557 10:00	67.00	170.00	26.46	7.27	0.06	7.57	0.02	27.77	0.06
20/7/2557 10:00	68.00	166.67	20.82	7.50	0.10	7.58	0.03	27.73	0.12
21/7/2557 10:00	69.00	163.33	25.17	7.60	0.10	7.58	0.02	27.67	0.06
22/7/2557 10:00	70.00	156.67	25.17	7.33	0.25	7.67	0.02	27.50	0.10
23/7/2557 10:00	71.00	156.67	15.28	7.57	0.12	7.67	0.01	27.67	0.23
24/7/2557 10:00	72.00	166.67	15.28	7.40	0.10	7.68	0.02	27.43	0.12
25/7/2557 10:00	73.00	160.00	17.32	7.43	0.12	7.67	0.02	27.87	0.31

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
26/7/2557 10:00	74.00	163.33	11.55	7.33	0.15	7.60	0.01	27.87	0.12
27/7/2557 10:00	75.00	160.00	10.00	7.57	0.21	7.56	0.01	27.30	0.17
28/7/2557 10:00	76.00	143.33	15.28	7.40	0.10	7.65	0.02	26.50	0.17
29/7/2557 10:00	77.00	156.67	25.17	8.10	0.00	7.72	0.02	26.37	0.06
30/7/2557 10:00	78.00	166.67	11.55	7.07	0.06	7.66	0.13	28.03	0.25
31/7/2557 10:00	79.00	160.00	17.32	7.03	0.06	7.62	0.04	27.37	0.15
1/8/2557 10:00	80.00	146.67	11.55	7.27	0.06	7.67	0.06	27.20	0.17
2/8/2557 10:00	81.00	173.33	5.77	7.50	0.00	7.82	0.08	26.83	0.06
3/8/2557 10:00	82.00	173.33	11.55	7.80	0.00	7.70	0.03	27.20	0.17
4/8/2557 10:00	83.00	166.67	15.28	8.70	0.20	7.70	0.04	27.43	0.12
5/8/2557 10:00	84.00	163.33	15.28	8.90	0.00	7.70	0.04	27.33	0.15
6/8/2557 10:00	85.00	153.33	11.55	8.60	0.10	7.71	0.03	26.13	0.12
7/8/2557 10:00	86.00	150.00	0.00	8.17	0.15	7.85	0.01	27.13	0.15
8/8/2557 10:00	87.00	156.67	11.55	8.07	0.12	7.76	0.02	26.90	0.10
9/8/2557 10:00	88.00	160.00	20.00	8.13	0.06	7.66	0.06	26.63	0.06
10/8/2557 10:00	89.00	153.33	5.77	8.73	0.12	7.76	0.06	26.83	0.15
11/8/2557 10:00	90.00	153.33	5.77	8.23	0.21	7.77	0.06	26.83	0.06
12/8/2557 10:00	91.00	156.67	11.55	8.43	0.06	7.78	0.06	26.37	0.21
13/8/2557 10:00	92.00	163.33	15.28	8.17	0.06	7.78	0.05	26.73	0.06
14/8/2557 10:00	93.00	173.33	25.17	8.03	0.15	7.77	0.05	27.43	0.12
15/8/2557 10:00	94.00	180.00	40.00	7.90	0.10	7.78	0.04	27.67	0.12
16/8/2557 10:00	95.00	170.00	20.00	7.93	0.21	7.78	0.02	28.13	0.12
17/8/2557 10:00	96.00	156.67	15.28	7.70	0.10	7.76	0.01	28.20	0.10
18/8/2557 10:00	97.00	153.33	5.77	7.90	0.10	7.74	0.02	28.27	0.25
19/8/2557 10:00	98.00	156.67	5.77	7.97	0.25	7.69	0.02	27.23	0.06
20/8/2557 10:00	99.00	160.00	17.32	8.60	0.00	7.66	0.03	27.03	0.06
21/8/2557 10:00	100.00	150.00	10.00	9.23	0.21	7.72	0.04	26.27	0.06

ตารางที่ ง-5 ค่าสภาพความเป็นด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ในการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากบ่อ

เลี้ยงสัตว์น้ำ สำหรับชุดทดลองที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในบ่อ จำนวน 3 ถัง ปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
13/5/2557 10:00	0.00	150.00	0.00	8.00	0.10	7.09	0.03	29.37	0.15
14/5/2557 10:00	1.00	143.33	5.77	8.03	0.06	7.12	0.04	29.00	0.20
15/5/2557 10:00	2.00	150.00	0.00	8.27	0.06	7.09	0.03	29.47	0.31
16/5/2557 10:00	3.00	160.00	0.00	7.50	0.20	7.19	0.01	30.00	0.26
17/5/2557 10:00	4.00	166.67	11.55	7.60	0.10	7.16	0.02	30.17	0.12
18/5/2557 10:00	5.00	170.00	0.00	7.77	0.06	7.17	0.04	29.40	0.17
19/5/2557 10:00	6.00	156.67	5.77	7.93	0.06	7.20	0.05	29.90	0.10
20/5/2557 10:00	7.00	146.67	5.77	8.13	0.06	7.25	0.05	27.97	0.15
21/5/2557 10:00	8.00	146.67	11.55	6.80	0.20	7.20	0.03	28.67	0.21
22/5/2557 10:00	9.00	150.00	10.00	7.57	0.15	7.17	0.03	28.93	0.12
23/5/2557 10:00	10.00	153.33	15.28	7.43	0.21	7.21	0.03	29.07	0.15
24/5/2557 10:00	11.00	163.33	5.77	7.40	0.10	7.18	0.07	28.43	0.12
25/5/2557 10:00	12.00	180.00	0.00	7.40	0.10	7.12	0.10	29.13	0.15
26/5/2557 10:00	13.00	156.67	5.77	7.30	0.10	7.03	0.05	29.17	0.15
27/5/2557 10:00	14.00	140.00	0.00	7.27	0.06	6.98	0.04	29.53	0.15
28/5/2557 10:00	15.00	146.67	5.77	8.27	0.06	7.00	0.04	28.87	0.12
29/5/2557 10:00	16.00	143.33	5.77	7.57	0.15	7.00	0.05	28.80	0.10
30/5/2557 10:00	17.00	140.00	0.00	7.10	0.10	7.02	0.00	28.80	0.17
31/5/2557 10:00	18.00	146.67	5.77	7.23	0.15	7.02	0.00	29.33	0.15
1/6/2557 10:00	19.00	146.67	5.77	7.27	0.06	7.04	0.01	29.33	0.25
2/6/2557 10:00	20.00	150.00	10.00	7.33	0.06	7.04	0.03	29.17	0.15
3/6/2557 10:00	21.00	143.33	5.77	7.23	0.06	7.06	0.02	29.57	0.12
4/6/2557 10:00	22.00	133.33	11.55	6.97	0.06	7.02	0.02	29.33	0.15
5/6/2557 10:00	23.00	130.00	10.00	6.97	0.12	7.05	0.02	29.37	0.23
6/6/2557 10:00	24.00	123.33	5.77	6.93	0.12	7.07	0.02	28.43	0.15
7/6/2557 10:00	25.00	136.67	5.77	7.53	0.06	7.06	0.03	28.23	0.06

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
8/6/2557 10:00	26.00	146.67	5.77	7.73	0.12	7.05	0.02	28.33	0.15
9/6/2557 10:00	27.00	153.33	11.55	6.70	0.10	7.08	0.02	28.97	0.21
10/6/2557 10:00	28.00	160.00	10.00	7.07	0.21	7.02	0.00	29.37	0.12
11/6/2557 10:00	29.00	160.00	10.00	7.03	0.21	7.09	0.05	29.10	0.10
12/6/2557 10:00	30.00	170.00	17.32	6.77	0.15	7.13	0.08	28.67	0.15
13/6/2557 10:00	31.00	170.00	10.00	6.90	0.10	7.16	0.06	28.17	0.15
14/6/2557 10:00	32.00	173.33	15.28	7.03	0.15	7.18	0.04	27.73	0.21
15/6/2557 10:00	33.00	170.00	10.00	6.90	0.10	7.22	0.05	27.17	0.06
16/6/2557 10:00	34.00	173.33	5.77	7.17	0.06	7.36	0.06	27.17	0.29
17/6/2557 10:00	35.00	170.00	0.00	7.40	0.10	7.45	0.06	27.27	0.06
18/6/2557 10:00	36.00	166.67	5.77	7.27	0.12	7.41	0.14	27.23	0.21
19/6/2557 10:00	37.00	190.00	17.32	7.33	0.06	7.46	0.18	28.30	0.20
20/6/2557 10:00	38.00	183.33	5.77	7.33	0.06	7.63	0.12	27.90	0.10
21/6/2557 10:00	39.00	180.00	0.00	7.23	0.06	7.68	0.11	28.17	0.12
22/6/2557 10:00	40.00	180.00	0.00	7.17	0.15	7.60	0.03	28.00	0.17
23/6/2557 10:00	41.00	180.00	10.00	7.33	0.15	7.77	0.05	27.00	0.00
24/6/2557 10:00	42.00	183.33	15.28	7.33	0.06	7.75	0.07	27.67	0.21
25/6/2557 10:00	43.00	196.67	23.09	7.57	0.06	7.69	0.13	27.20	0.10
26/6/2557 10:00	44.00	190.00	0.00	7.70	0.10	7.70	0.10	28.00	0.00
27/6/2557 10:00	45.00	190.00	26.46	7.47	0.06	7.94	0.05	27.53	0.06
28/6/2557 10:00	46.00	193.33	23.09	7.93	0.06	7.92	0.03	27.40	0.10
29/6/2557 10:00	47.00	193.33	15.28	7.20	0.10	7.93	0.11	28.17	0.06
30/6/2557 10:00	48.00	193.33	15.28	7.00	0.10	8.00	0.02	27.70	0.17
1/7/2557 10:00	49.00	196.67	15.28	6.60	0.17	8.07	0.02	27.47	0.15
2/7/2557 10:00	50.00	200.00	0.00	6.57	0.21	8.03	0.02	27.47	0.15
3/7/2557 10:00	51.00	203.33	11.55	6.77	0.06	8.00	0.02	27.67	0.21
4/7/2557 10:00	52.00	196.67	15.28	6.57	0.12	8.03	0.01	27.73	0.23
5/7/2557 10:00	53.00	203.33	20.82	6.73	0.38	8.06	0.02	28.17	0.21
6/7/2557 10:00	54.00	203.33	5.77	6.80	0.10	8.02	0.04	28.27	0.06
7/7/2557 10:00	55.00	213.33	5.77	6.43	0.21	7.98	0.05	28.13	0.15

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
8/7/2557 10:00	56.00	206.67	15.28	7.03	0.15	8.02	0.06	27.57	0.06
9/7/2557 10:00	57.00	203.33	25.17	7.30	0.10	8.07	0.09	27.30	0.10
10/7/2557 10:00	58.00	203.33	20.82	6.93	0.15	8.05	0.07	27.97	0.06
11/7/2557 10:00	59.00	206.67	15.28	7.33	0.15	8.00	0.04	28.23	0.21
12/7/2557 10:00	60.00	213.33	28.87	7.17	0.06	7.97	0.04	27.33	0.15
13/7/2557 10:00	61.00	206.67	15.28	6.93	0.06	7.96	0.03	27.87	0.06
14/7/2557 10:00	62.00	220.00	20.00	6.60	0.10	7.96	0.03	27.23	0.15
15/7/2557 10:00	63.00	220.00	30.00	7.20	0.36	7.99	0.02	27.37	0.06
16/7/2557 10:00	64.00	220.00	17.32	7.60	0.10	8.02	0.03	26.80	0.17
17/7/2557 10:00	65.00	213.33	15.28	7.00	0.53	8.08	0.01	26.90	0.17
18/7/2557 10:00	66.00	213.33	11.55	7.13	0.15	7.97	0.02	27.13	0.06
19/7/2557 10:00	67.00	210.00	10.00	7.07	0.15	7.97	0.02	27.37	0.12
20/7/2557 10:00	68.00	203.33	15.28	7.07	0.12	7.98	0.02	27.40	0.10
21/7/2557 10:00	69.00	203.33	15.28	6.67	0.15	7.98	0.01	27.50	0.10
22/7/2557 10:00	70.00	206.67	11.55	6.73	0.25	7.98	0.03	27.40	0.17
23/7/2557 10:00	71.00	200.00	17.32	6.70	0.20	8.00	0.04	27.43	0.12
24/7/2557 10:00	72.00	203.33	15.28	6.77	0.15	8.03	0.06	27.10	0.10
25/7/2557 10:00	73.00	203.33	15.28	6.87	0.21	8.05	0.06	27.40	0.10
26/7/2557 10:00	74.00	190.00	20.00	6.67	0.15	8.03	0.05	27.43	0.12
27/7/2557 10:00	75.00	183.33	25.17	6.43	0.15	8.01	0.05	27.43	0.15
28/7/2557 10:00	76.00	183.33	15.28	7.30	0.10	8.04	0.08	26.47	0.12
29/7/2557 10:00	77.00	210.00	10.00	7.53	0.06	7.83	0.60	26.37	0.12
30/7/2557 10:00	78.00	193.33	5.77	7.03	0.06	8.09	0.09	27.57	0.12
31/7/2557 10:00	79.00	210.00	10.00	7.47	0.25	7.90	0.10	27.07	0.21
1/8/2557 10:00	80.00	190.00	20.00	7.30	0.10	8.09	0.08	26.90	0.10
2/8/2557 10:00	81.00	230.00	26.46	7.47	0.12	8.25	0.05	26.77	0.15
3/8/2557 10:00	82.00	216.67	20.82	7.77	0.21	8.15	0.10	27.27	0.12
4/8/2557 10:00	83.00	206.67	15.28	8.23	0.06	8.15	0.12	27.13	0.12
5/8/2557 10:00	84.00	210.00	10.00	8.77	0.06	8.15	0.13	27.07	0.12
6/8/2557 10:00	85.00	213.33	23.09	8.23	0.06	8.24	0.08	26.10	0.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
7/8/2557 10:00	86.00	203.33	11.55	8.00	0.10	8.22	0.07	26.87	0.12
8/8/2557 10:00	87.00	200.00	26.46	7.83	0.06	8.20	0.08	26.73	0.12
9/8/2557 10:00	88.00	203.33	40.41	8.03	0.12	8.15	0.13	26.50	0.10
10/8/2557 10:00	89.00	193.33	32.15	8.50	0.10	8.08	0.08	26.87	0.21
11/8/2557 10:00	90.00	196.67	20.82	8.00	0.10	8.10	0.09	26.63	0.23
12/8/2557 10:00	91.00	206.67	15.28	8.17	0.15	8.12	0.10	26.53	0.23
13/8/2557 10:00	92.00	200.00	20.00	8.10	0.10	8.06	0.07	26.40	0.10
14/8/2557 10:00	93.00	196.67	25.17	7.87	0.06	8.03	0.08	27.10	0.10
15/8/2557 10:00	94.00	210.00	20.00	8.13	0.15	7.99	0.01	27.17	0.06
16/8/2557 10:00	95.00	196.67	25.17	7.93	0.06	7.92	0.07	27.63	0.23
17/8/2557 10:00	96.00	186.67	25.17	7.77	0.06	7.86	0.05	28.07	0.06
18/8/2557 10:00	97.00	186.67	30.55	7.80	0.10	7.87	0.05	27.77	0.15
19/8/2557 10:00	98.00	186.67	30.55	8.10	0.10	7.88	0.04	27.03	0.06
20/8/2557 10:00	99.00	190.00	36.06	8.60	0.10	7.89	0.05	26.90	0.10
21/8/2557 10:00	100.00	203.33	40.41	9.10	0.10	7.92	0.03	26.10	0.10

ตารางที่ ง-6 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ของชุดควบคุม (ไม่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในบ่อ) และชุดทดลอง (มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในบ่อ) ในการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ ชุดการทดลองละ 3 บ่อ (วิเคราะห์บ่อละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)					
		ชุดควบคุม		ชุดทดลอง			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
13/5/2557 10:00	0.00	133.30	2.00	147.50	0.96	113.33	7.80
14/5/2557 10:00	1.00	134.03	1.14	142.37	8.08	107.37	10.63
15/5/2557 10:00	2.00	159.67	1.21	170.87	10.15	107.60	18.69

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)					
		ชุดควบคุม		ชุดทดลอง			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/5/2557 10:00	3.00	163.27	5.48	161.17	14.12	112.93	9.04
17/5/2557 10:00	4.00	159.40	2.78	160.03	5.77	109.60	9.54
18/5/2557 10:00	5.00	157.17	2.80	161.23	1.27	103.40	7.37
19/5/2557 10:00	6.00	155.10	8.75	148.53	3.96	93.93	5.03
20/5/2557 10:00	7.00	142.60	3.44	129.97	7.79	85.83	8.62
21/5/2557 10:00	8.00	130.67	4.27	123.80	6.27	78.77	9.96
22/5/2557 10:00	9.00	102.27	1.77	109.73	7.15	86.20	11.95
23/5/2557 10:00	10.00	120.33	2.12	115.73	8.05	83.87	0.90
24/5/2557 10:00	11.00	125.60	4.66	120.87	4.52	80.90	3.24
25/5/2557 10:00	12.00	126.80	3.05	126.90	13.39	75.70	9.54
26/5/2557 10:00	13.00	128.97	3.61	128.10	5.84	68.87	3.42
27/5/2557 10:00	14.00	124.03	1.21	130.53	3.45	80.53	10.66
28/5/2557 10:00	15.00	145.07	1.72	146.77	3.11	78.30	8.05
29/5/2557 10:00	16.00	118.37	1.70	129.40	3.10	76.07	11.18
30/5/2557 10:00	17.00	131.77	1.85	134.50	2.96	73.60	16.27
31/5/2557 10:00	18.00	134.83	1.45	146.67	2.49	63.80	4.64
1/6/2557 10:00	19.00	131.37	1.63	151.13	2.75	57.30	2.35
2/6/2557 10:00	20.00	124.00	4.88	131.47	4.64	66.73	1.91
3/6/2557 10:00	21.00	118.20	1.35	133.13	1.98	71.80	8.23
4/6/2557 10:00	22.00	122.33	0.72	130.60	2.36	73.60	9.79
5/6/2557 10:00	23.00	121.77	2.15	126.67	1.01	69.50	4.58
6/6/2557 10:00	24.00	115.73	2.10	122.43	0.95	66.53	9.05
7/6/2557 10:00	25.00	120.60	1.05	138.13	1.50	58.83	2.56
8/6/2557 10:00	26.00	128.83	0.45	138.00	5.34	69.43	9.77
9/6/2557 10:00	27.00	130.07	1.22	138.70	2.10	92.07	4.38
10/6/2557 10:00	28.00	136.03	1.01	145.37	3.07	65.40	7.80
11/6/2557 10:00	29.00	126.67	3.73	136.70	1.65	67.67	1.61
12/6/2557 10:00	30.00	121.70	1.11	130.87	4.86	70.90	11.11
13/6/2557 10:00	31.00	123.53	1.25	147.60	1.73	70.50	4.68

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)					
		ชุดควบคุม		ชุดทดลอง			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
14/6/2557 10:00	32.00	138.30	2.75	155.03	3.23	79.00	6.30
15/6/2557 10:00	33.00	142.03	1.27	158.37	1.33	67.13	2.59
16/6/2557 10:00	34.00	136.43	2.17	165.70	0.17	62.27	5.92
17/6/2557 10:00	35.00	151.10	1.11	167.00	2.19	62.70	5.26
18/6/2557 10:00	36.00	146.00	5.06	158.30	1.18	55.60	6.11
19/6/2557 10:00	37.00	139.20	5.15	156.90	2.62	68.57	0.95
20/6/2557 10:00	38.00	151.70	1.93	165.27	3.00	66.77	3.21
21/6/2557 10:00	39.00	148.53	2.83	168.47	0.75	66.07	2.73
22/6/2557 10:00	40.00	140.10	2.00	158.30	0.98	57.93	0.58
23/6/2557 10:00	41.00	138.87	2.71	158.50	0.85	59.00	0.78
24/6/2557 10:00	42.00	152.63	1.43	166.93	2.06	67.27	2.67
25/6/2557 10:00	43.00	135.87	14.00	174.43	2.72	73.30	2.17
26/6/2557 10:00	44.00	145.20	6.22	168.30	0.85	72.47	3.56
27/6/2557 10:00	45.00	131.20	9.27	174.93	3.77	67.33	2.65
28/6/2557 10:00	46.00	137.47	7.29	168.40	1.21	65.97	1.66
29/6/2557 10:00	47.00	129.23	1.88	155.87	1.12	54.40	3.50
30/6/2557 10:00	48.00	130.43	4.78	169.00	0.53	55.20	1.73
1/7/2557 10:00	49.00	131.57	0.64	169.47	8.52	62.83	11.94
2/7/2557 10:00	50.00	124.53	5.12	187.33	2.35	77.87	1.18
3/7/2557 10:00	51.00	105.93	1.42	200.70	2.08	81.70	8.93
4/7/2557 10:00	52.00	146.57	7.22	189.83	6.90	69.73	5.24
5/7/2557 10:00	53.00	159.10	4.40	174.67	4.73	63.80	4.29
6/7/2557 10:00	54.00	161.33	0.40	185.23	6.20	76.20	4.36
7/7/2557 10:00	55.00	146.57	11.01	167.67	3.55	91.23	3.34
8/7/2557 10:00	56.00	154.50	3.76	166.03	4.72	71.23	1.85
9/7/2557 10:00	57.00	147.10	1.80	151.70	0.79	101.67	2.89
10/7/2557 10:00	58.00	149.53	2.44	170.53	7.24	86.23	2.83
11/7/2557 10:00	59.00	151.10	1.31	174.73	11.06	76.00	2.51
12/7/2557 10:00	60.00	154.73	3.40	175.80	4.51	76.47	2.01

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)					
		ชุดควบคุม		ชุดทดลอง			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
13/7/2557 10:00	61.00	151.63	2.97	172.93	7.37	68.00	1.45
14/7/2557 10:00	62.00	154.50	1.35	164.57	3.11	90.03	11.99
15/7/2557 10:00	63.00	118.10	5.05	144.20	1.90	90.13	15.65
16/7/2557 10:00	64.00	123.03	1.00	157.67	1.33	85.93	2.31
17/7/2557 10:00	65.00	136.33	3.96	157.10	3.18	74.90	3.06
18/7/2557 10:00	66.00	155.10	1.22	165.40	1.74	79.10	15.47
19/7/2557 10:00	67.00	147.93	1.80	155.97	3.50	75.57	3.71
20/7/2557 10:00	68.00	150.77	1.19	165.27	2.90	65.43	2.82
21/7/2557 10:00	69.00	151.83	2.24	164.80	3.66	56.23	1.65
22/7/2557 10:00	70.00	144.53	2.70	160.97	2.60	53.43	9.47
23/7/2557 10:00	71.00	151.17	1.70	168.30	7.51	66.33	3.59
24/7/2557 10:00	72.00	152.10	2.38	177.83	1.52	75.67	3.39
25/7/2557 10:00	73.00	162.23	7.41	181.67	4.80	52.13	17.49
26/7/2557 10:00	74.00	153.43	3.23	185.50	3.73	70.97	4.90
27/7/2557 10:00	75.00	144.50	2.08	168.37	3.99	67.47	4.27
28/7/2557 10:00	76.00	161.73	3.72	176.43	4.63	38.33	13.39
29/7/2557 10:00	77.00	147.93	10.08	180.97	4.45	56.20	3.99
30/7/2557 10:00	78.00	185.33	4.96	204.37	6.38	59.97	5.65
31/7/2557 10:00	79.00	163.57	6.14	184.57	6.72	44.57	6.34
1/8/2557 10:00	80.00	170.43	9.60	189.10	4.77	58.87	3.04
2/8/2557 10:00	81.00	170.93	7.01	190.20	2.95	72.73	14.00
3/8/2557 10:00	82.00	174.77	5.15	187.80	3.72	56.60	4.00
4/8/2557 10:00	83.00	178.43	2.65	188.20	1.04	56.43	4.19
5/8/2557 10:00	84.00	175.50	3.50	184.40	1.15	55.63	7.83
6/8/2557 10:00	85.00	177.57	7.61	193.20	2.66	57.90	1.35
7/8/2557 10:00	86.00	170.90	5.15	180.40	3.52	65.40	5.09
8/8/2557 10:00	87.00	172.90	3.03	187.40	1.92	66.80	7.46
9/8/2557 10:00	88.00	173.57	2.35	184.69	0.72	71.00	1.41
10/8/2557 10:00	89.00	178.10	1.35	190.73	4.30	85.57	11.37

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พี (มิลลิโวลต์)					
		ชุดควบคุม		ชุดทดลอง			
		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในถังปฏิกรณ์		ภายในมัดเส้นใยตัวกรอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
11/8/2557 10:00	90.00	181.53	3.31	191.63	5.97	66.40	4.26
12/8/2557 10:00	91.00	185.93	3.72	197.57	3.25	72.97	10.45
13/8/2557 10:00	92.00	186.53	3.28	202.23	0.90	70.53	1.24
14/8/2557 10:00	93.00	189.30	1.54	195.10	6.50	72.27	8.23
15/8/2557 10:00	94.00	191.83	3.46	193.47	5.08	62.23	9.48
16/8/2557 10:00	95.00	189.37	6.21	199.37	1.21	73.23	5.42
17/8/2557 10:00	96.00	189.70	2.65	201.40	2.86	81.80	2.71
18/8/2557 10:00	97.00	190.13	3.07	197.17	0.67	76.50	6.74
19/8/2557 10:00	98.00	191.10	2.38	197.30	1.61	85.93	2.31
20/8/2557 10:00	99.00	191.63	0.96	196.10	2.96	99.73	1.57
21/8/2557 10:00	100.00	183.50	0.52	193.70	6.24	79.50	5.25

ตารางที่ ง-7 ข้อมูลการเจริญเติบโตของปลานิลในการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในบ่อ

เริ่มการทดลอง								
บ่อควบคุม 1			บ่อควบคุม 2			บ่อควบคุม 3		
ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)
1	15.89	10.50	1	12.37	9.00	1	13.17	10.00
2	16.36	10.50	2	17.95	12.00	2	14.2	9.50
3	18.15	10.50	3	19.07	12.00	3	16.49	11.00
4	18.42	11.50	4	19.13	11.00	4	19.36	11.00
5	20.02	11.00	5	19.95	11.00	5	20.15	10.50
6	22.46	11.00	6	23.23	11.50	6	20.29	11.00
วันที่ 33 ของการทดลอง								
บ่อควบคุม 1			บ่อควบคุม 2			บ่อควบคุม 3		
ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)
1	19.86	11.10	1	17.25	10.50	1	18.69	11.00
2	24.65	12.00	2	27.83	12.00	2	19.91	11.00

วันที่ 33 ของการทดลอง								
	บ่อควบคุม 1			บ่อควบคุม 2			บ่อควบคุม 3	
ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)
3	29.38	12.50	3	28.18	13.00	3	30.12	12.50
4	30.33	12.50	4	28.39	12.50	4	30.39	13.00
5	34.81	13.00	5	30.86	13.00	5	31.36	13.00
6	40.88	13.50	6	34.48	13.50	6	33.65	13.50
วันที่ 66 ของการทดลอง								
	บ่อควบคุม 1			บ่อควบคุม 2			บ่อควบคุม 3	
ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)
1	16.88	11.00	1	20.43	12.00	1	31.81	13.50
2	22.04	12.00	2	43.26	14.00	2	35.87	13.00
3	49.10	14.50	3	47.82	14.50	3	50.63	15.00
4	55.50	15.00	4	48.18	14.00	4	52.54	15.00
5	60.59	15.50	5	48.70	14.50	5	54.88	14.50
6	63.22	15.50	6	51.60	15.00	6	57.67	15.00
สิ้นสุดการทดลอง								
	บ่อควบคุม 1			บ่อควบคุม 2			บ่อควบคุม 3	
ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)
1	29.44	11.50	1	52.41	15.00	1	52.38	16.00
2	42.19	13.50	2	66.54	16.00	2	60.66	16.50
3	60.70	16.00	3	73.45	17.00	3	79.40	17.00
4	81.60	17.00	4	81.14	17.00	4	82.30	12.50
5	99.30	18.50	5	86.03	16.50	5	83.65	16.00
6	126.17	18.50	6	113.7	18.00	6	114.59	18.50

ตารางที่ ง-8 ข้อมูลการเจริญเติบโตของปลานิลในการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดไนโตรเจนจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ สำหรับชุดทดลองที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในบ่อ

เริ่มการทดลอง								
	บ่อทดลอง 1			บ่อทดลอง 2			บ่อทดลอง 3	
ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)
1	14.58	11.00	1	13.15	9.50	1	11.93	9.00
2	15.88	10.00	2	14.75	9.50	2	16.47	10.50
3	17.95	11.00	3	19.50	11.00	3	18.20	11.00
4	18.45	10.50	4	20.23	10.50	4	20.11	12.00

เริ่มการทดลอง								
	บ่อทดลอง 1			บ่อทดลอง 2			บ่อทดลอง 3	
ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)
5	21.56	11.50	5	22.22	11.50	5	20.81	12.00
6	23.02	12.00	6	22.59	12.00	6	21.32	12.00
วันที่ 33 ของการทดลอง								
	บ่อทดลอง 1			บ่อทดลอง 2			บ่อทดลอง 3	
ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)
1	16.7	10.50	1	13.72	9.50	1	15.97	10.50
2	20.82	11.00	2	18.59	11.00	2	22.18	11.00
3	21.61	11.50	3	28.07	13.00	3	24.37	12.00
4	31.95	13.50	4	30.61	13.00	4	30.86	13.00
5	39.15	14.00	5	34.95	14.00	5	30.92	13.00
6	44.94	15.00	6	49.53	15.00	6	34.93	13.00
วันที่ 66 ของการทดลอง								
	บ่อทดลอง 1			บ่อทดลอง 2			บ่อทดลอง 3	
ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)
1	20.25	11.00	1	22.76	10.50	1	27.71	12.00
2	22.94	10.50	2	33.62	12.00	2	29.92	12.50
3	23.25	10.00	3	46.40	13.00	3	37.40	12.50
4	45.92	13.00	4	48.40	14.00	4	40.98	14.00
5	56.77	14.00	5	62.67	15.00	5	53.45	15.00
6	78.41	17.00	6	83.45	17.00	6	71.28	15.50
สิ้นสุดการทดลอง								
	บ่อทดลอง 1			บ่อทดลอง 2			บ่อทดลอง 3	
ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)	ตัวที่	น้ำหนัก (ก.)	ความยาว (ซม.)
1	45.18	15.50	1	43.36	15.00	1	47.64	14.00
2	57.39	16.00	2	51.58	15.50	2	55.25	15.00
3	69.36	16.00	3	52.26	15.50	3	60.76	15.50
4	72.13	16.00	4	66.36	16.00	4	62.37	16.00
5	76.28	16.50	5	77.79	17.00	5	88.69	16.50
6	156.01	21.00	6	151.01	20.00	6	141.85	20.00

ภาคผนวก จ

ตัวอย่างรายการคำนวณ

การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดแบบจม

1.1 การศึกษาอัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดแบบจม (คำนวณจากตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 7 สัปดาห์)

อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/วัน)

(คำนวณจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ในระบบกับเวลา)

= ความชันของกราฟ (มก.-ไนโตรเจน/ล./วัน) x ปริมาตรสารละลาย (ล.)

= (5.04 มก.-ไนโตรเจน/ล./วัน) x (1.5 ล.)

= 7.56 มก.-ไนโตรเจน/วัน

อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อความยาวตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน)

$$= \frac{\text{อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/วัน)}}{\text{ความยาวไบโอคอร์ดที่ใช้ในการทดลอง (ม.)}}$$

= (7.56 มก.-ไนโตรเจน/วัน) / (0.1 ม.)

= 75.60 มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน

อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อพื้นที่ผิวตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน)

$$= \frac{\text{อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อความยาวไบโอคอร์ดต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน)}}{\text{พื้นที่ผิวจำเพาะของไบโอคอร์ด (ตร.ม./ม.ไบโอคอร์ด)}}$$

= (75.60 มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน) / (2.8 ตร.ม./ม.)

= 27.00 มก.-ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน

1.2 การศึกษาอัตราดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดแบบจม (คำนวณจากตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 7 สัปดาห์)

อัตราการบำบัดไนเทรตต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/วัน)

(คำนวณจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารละลายโซเดียมไนเทรตในระบบกับเวลา)

= ความชันของกราฟ (มก.-ไนโตรเจน/ล./วัน) x ปริมาตรสารละลาย (ล.)

= (9.66 มก.-ไนโตรเจน/ล./วัน) x (1.5 ล.)

= 14.49 มก.-ไนโตรเจน/วัน

อัตราการบำบัดไนเทรตต่อความยาวตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน)

$$= \frac{\text{อัตราการบำบัด}\textit{ไนเทรต}\text{ต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/วัน)}}{\text{ความยาวไบโอคอร์ดที่ใช้ในการทดลอง (ม.)}}$$

= (14.49 มก.-ไนโตรเจน/วัน) / (0.1 ม.)

= 144.90 มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อัตราการบำบัดไนเทรตต่อพื้นที่ผิวตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน)

$$= \frac{\text{อัตราการบำบัด}\textit{ไนเทรต}\text{ต่อความยาวไบโอคอร์ดต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน)}}{\text{พื้นที่ผิวจำเพาะของไบโอคอร์ด (ตร.ม./ม.ไบโอคอร์ด)}}$$

= (144.90 มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน) / (2.8 ตร.ม./ม.)

= 51.75 มก.-ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน

การทดลองช่วงที่ 3 การประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

อัตราการเกิดของเสียในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/วัน)

= น้ำหนักรวมของสัตว์น้ำ (กก.) x อัตราการให้อาหารต่อวัน (ร้อยละ) x อัตราส่วนโปรตีนในอาหาร (ร้อยละ) x ปริมาณแร่ธาตุไนโตรเจนในโปรตีน (ก.-ไนโตรเจน/ก.-โปรตีน) x 10^6 มก./กก.

= (0.4 กก.) x (0.05) x (0.15) x (0.16 ก.-ไนโตรเจน/ก.-โปรตีน) x 10^6 มก./กก.

= 480 มก.-ไนโตรเจน/วัน

ความยาวตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ต้องการในการติดตั้งภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ (ม.)

$$= \frac{\text{อัตราการเกิดของเสียในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/วัน)}}{\text{อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อความยาวไบโอคอร์ดต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน)}}$$

อาศัยค่าสุดท้ายจากการทดลองช่วงที่ 2.3

= (480 มก.-ไนโตรเจน/วัน) / (46.71 มก.-ไนโตรเจน/ม./วัน)

= (10.28 ม.) x (Safety Factor = 1.5)

= 15.41 ม.

น้ำหนักสัตว์น้ำเฉลี่ย (ก./ตัว) (คำนวณจากชุดควบคุม)

$$= \frac{\text{น้ำหนักสัตว์น้ำทั้งหมด (ก./บ่อ)}}{\text{จำนวนสัตว์น้ำ (ตัว/บ่อ)}}$$

= (108.89 ก./บ่อ) / (6 ตัว/บ่อ)

= 18.15 ก./ตัว

ความยาวสัตว์น้ำเฉลี่ย (ซม./ตัว) (คำนวณจากชุดควบคุม)

$$= \frac{\text{ความยาวสัตว์น้ำทั้งหมด (ซม./บ่อ)}}{\text{จำนวนสัตว์น้ำ (ตัว/บ่อ)}}$$

= (64.83 ซม./บ่อ) / (6 ตัว/บ่อ)

= 10.81 ซม./ตัว

อัตราการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำต่อวัน (ก./ตัว/วัน)

$$= \frac{\text{น้ำหนักสัตว์น้ำเฉลี่ยสิ้นสุด (ก./ตัว)} - \text{น้ำหนักสัตว์น้ำเฉลี่ยเริ่มต้น (ก./ตัว)}}{\text{จำนวนวันที่ทำการทดลอง (วัน)}}$$

= [(28.39 ก./ตัว) – (18.15 ก./ตัว)] / (33 วัน)

= 0.31 ก./ตัว/วัน

อัตราการรอดตายของสัตว์น้ำ (ร้อยละ)

$$= \frac{\text{จำนวนสัตว์น้ำที่เหลือเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (ตัว/บ่อ)} \times 100}{\text{จำนวนสัตว์น้ำเมื่อเริ่มต้นการทดลอง (ตัว/บ่อ)}}$$

= [(ตัว/บ่อ) x 100] / (6 ตัว/บ่อ)

= ร้อยละ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อัตราการแลกเนื้อ

$$= \frac{\text{น้ำหนักรวมของอาหารสัตว์น้ำที่ให้ในการทดลองทั้งหมด (ก.)}}{\text{น้ำหนักรวมของสัตว์น้ำที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด (ก.)}}$$

= (920.13 ก.) / (353.00 ก.)

= 2.61

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ฉ

ฉ.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับการทดลองช่วงที่ 1

```
GET
  FILE='H:\Thesis\SPSS\Ex1 NR DNR data.sav'.
DATASET NAME DataSet1 WINDOW=FRONT.
ONEWAY NR DNR BY Condition
  /MISSING ANALYSIS
  /POSTHOC=DUNCAN ALPHA(0.05).
```

Oneway

Notes

Output Created		13-FEB-2015 15:25:34
Comments		
Input	Data	H:\Thesis\SPSS\Ex1 NR DNR data.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	24
Missing Value Handling	Definition of Missing	User-defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on cases with no missing data for any variable in the analysis.
Syntax		ONEWAY NR DNR BY Condition /MISSING ANALYSIS /POSTHOC=DUNCAN ALPHA(0.05).
Resources	Processor Time	00:00:00.22
	Elapsed Time	00:00:00.24

[DataSet1] H:\Thesis\SPSS\Ex1 NR DNR data.sav

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F
NR	Between Groups	13056.412	7	1865.202	104.385
	Within Groups	285.896	16	17.869	
	Total	13342.308	23		
DNR	Between Groups	28161.184	7	4023.026	23.080
	Within Groups	2788.921	16	174.308	
	Total	30950.104	23		

ANOVA

		Sig.
NR	Between Groups	.000
	Within Groups	
	Total	
DNR	Between Groups	.000
	Within Groups	
	Total	

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

NR

Duncan[a]

Condition	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
1.00	3	14.2700					
3.00	3	15.4033	15.4033				
2.00	3	15.5133	15.5133				
4.00	3		22.4533	22.4533			
5.00	3			27.9067			
6.00	3				53.3033		
8.00	3					66.3033	
7.00	3						75.6267
Sig.		.738	.069	.134	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

DNR

Duncan[a]

Condition	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
2.00	3	87.7133		
1.00	3	91.5067		
3.00	3	95.9933		
4.00	3	99.1100		
5.00	3		123.6633	
6.00	3		132.7367	
7.00	3		144.8900	
8.00	3			195.7700
Sig.		.345	.079	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

```
ONEWAY Biomass BY Condition
  /MISSING ANALYSIS
  /POSTHOC=DUNCAN ALPHA(0.05).
```

Oneway

Notes

Output Created		12-JUN-2015 16:12:26
Comments		
Input	Data	C:\Users\USER\Desktop\Master's Degree\SPSS\Ex1 Biomass data.sav
	Active Dataset	DataSet0
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	48
Missing Value Handling	Definition of Missing	User-defined missing values are treated as missing.

	Cases Used	Statistics for each analysis are based on cases with no missing data for any variable in the analysis.
Syntax		ONEWAY Biomass BY Condition /MISSING ANALYSIS /POSTHOC=DUNCAN ALPHA(0.05).
Resources	Processor Time	00:00:00.09
	Elapsed Time	00:00:00.14

[DataSet0] C:\Users\USER\Desktop\Master's Degree\SPSS\Ex1 Biomass data.sav

ANOVA

Biomass

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	20383.639	7	2911.948	257.404	.000
Within Groups	452.511	40	11.313		
Total	20836.150	47			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

Biomass

Duncan[a]

Condition	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
1.00	6	1.8730					
2.00	6	4.6400					
3.00	6		10.9550				
4.00	6		14.3500				
5.00	6			26.7733			
6.00	6				33.4500		
7.00	6					50.8967	
8.00	6						62.3567
Sig.		.162	.088	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 6.000.

ฉ.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับการทดลองช่วงที่ 2.1

```
GET
  FILE='H:\Thesis\SPSS\Ex21 NR DNR data.sav'.
DATASET NAME DataSet2 WINDOW=FRONT.
ONEWAY NR DNR BY Condition
  /MISSING ANALYSIS
  /POSTHOC=DUNCAN ALPHA(0.05).
```

Oneway

Notes

Output Created		13-FEB-2015 15:28:32
Comments		
Input	Data	H:\Thesis\SPSS\Ex21 NR DNR data.sav
	Active Dataset	DataSet2
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	18
Missing Value Handling	Definition of Missing	User-defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on cases with no missing data for any variable in the analysis.
Syntax		ONEWAY NR DNR BY Condition /MISSING ANALYSIS /POSTHOC=DUNCAN ALPHA(0.05).
Resources	Processor Time	00:00:00.09
	Elapsed Time	00:00:00.10

[DataSet2] H:\Thesis\SPSS\Ex21 NR DNR data.sav

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F
NR	Between Groups	1282.805	5	256.561	9.654
	Within Groups	318.893	12	26.574	
	Total	1601.697	17		
DNR	Between Groups	204.419	5	40.884	15.783
	Within Groups	31.085	12	2.590	
	Total	235.504	17		

ANOVA

		Sig.
NR	Between Groups	.001
	Within Groups	
	Total	
DNR	Between Groups	.000
	Within Groups	
	Total	

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

NR

Duncan[a]

Condition	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
6.00	3	34.8533			
5.00	3	36.9583	36.9583		
4.00	3		45.2700	45.2700	
2.00	3			46.7133	
3.00	3			50.4400	
1.00	3				60.1867
Sig.		.626	.072	.265	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

DNR

Duncan[a]

Condition	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
1.00	3	10.5100			
2.00	3		14.1133		
3.00	3		15.6933	15.6933	
4.00	3			17.8033	17.8033
5.00	3				19.0267
6.00	3				20.7467
Sig.		1.000	.252	.134	.054

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ฉ.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับการทดลองช่วงที่ 2.2

```
GET
  FILE="C:\Users\USER\Desktop\Master's Degree\SPSS\Ex22 NR DNR data.sav".
DATASET NAME DataSet1 WINDOW=FRONT.
ONEWAY NR DNR Biomass BY Condition
  /MISSING ANALYSIS
  /POSTHOC=DUNCAN ALPHA(0.05).
```

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Oneway

Notes

Output Created		12-JUN-2015 16:22:38
Comments		
Input	Data	C:\Users\USER\Desktop\Master's Degree\SPSS\Ex22 NR DNR data.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	12

Missing Value Handling	Definition of Missing	User-defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on cases with no missing data for any variable in the analysis.
Syntax		ONEWAY NR DNR Biomass BY Condition /MISSING ANALYSIS /POSTHOC=DUNCAN ALPHA(0.05).
Resources	Processor Time	00:00:00.05
	Elapsed Time	00:00:00.09

[DataSet1] C:\Users\USER\Desktop\Master's Degree\SPSS\Ex22 NR DNR data.sav

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
NR	Between Groups	3589.717	3	1196.572	63.544	.000
	Within Groups	150.644	8	18.831		
	Total	3740.361	11			
DNR	Between Groups	410.951	3	136.984	121.031	.000
	Within Groups	9.054	8	1.132		
	Total	420.006	11			
Biomass	Between Groups	7579.938	3	2526.646	156.383	.000
	Within Groups	129.254	8	16.157		
	Total	7709.192	11			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

NR

Duncan[a]

Condition	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
4.00	3	16.2800		
3.00	3		47.8067	
1.00	3		52.5400	
2.00	3			62.5267
Sig.		1.000	.218	1.000

DNR

Duncan[a]

Condition	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
4.00	3	.0000		
3.00	3		8.7333	
2.00	3		10.5400	
1.00	3			16.3200
Sig.		1.000	.071	1.000

Biomass

Duncan[a]

Condition	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
4.00	3	9.0433			
3.00	3		32.2167		
2.00	3			60.0713	
1.00	3				74.1267
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ฉ.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับการทดลองช่วงที่ 2.3

```
ONEWAY NRcontrol NRtreatment DNRcontrol DNRtreatment BY Condition
  /MISSING ANALYSIS
  /POSTHOC=DUNCAN ALPHA(0.05).
```

Oneway

Notes

Output Created		15-JUN-2015 13:36:12
Comments		
Input	Active Dataset	DataSet2
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	12
Missing Value Handling	Definition of Missing	User-defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each analysis are based on cases with no missing data for any variable in the analysis.
Syntax		ONEWAY NRcontrol NRtreatment DNRcontrol DNRtreatment BY Condition /MISSING ANALYSIS /POSTHOC=DUNCAN ALPHA(0.05).
Resources	Processor Time	00:00:00.06
	Elapsed Time	00:00:00.10

[DataSet2]

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
NRcontrol	Between Groups	2421.047	3	807.016	5.357	.026
	Within Groups	1205.267	8	150.658		
	Total	3626.314	11			
NRtreatment	Between Groups	1317.272	3	439.091	2.019	.190
	Within Groups	1739.469	8	217.434		
	Total	3056.741	11			
DNRcontrol	Between Groups	8.054	3	2.685	3.090	.090
	Within Groups	6.951	8	.869		
	Total	15.005	11			
DNRtreatment	Between Groups	17.609	3	5.870	19.793	.000
	Within Groups	2.372	8	.297		
	Total	19.981	11			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

NRcontrol

Duncan[a]

Condition	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
4.00	3	29.4480	
2.00	3	32.2794	
3.00	3	33.2207	
1.00	3		64.2950
Sig.		.727	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

NRtreatment

Duncan[a]

Condition	N	Subset for alpha = 0.05
		1
1.00	3	39.1957
4.00	3	46.7125
3.00	3	53.8975
2.00	3	67.6098
Sig.		.058

DNRcontrol

Duncan[a]

Condition	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
2.00	3	9.7280	
1.00	3	10.4010	10.4010
3.00	3	11.0333	11.0333
4.00	3		11.9505
Sig.		.139	.087

DNRtreatment

Duncan[a]

Condition	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
2.00	3	5.0655	
1.00	3	5.3715	
3.00	3		7.4597
4.00	3		7.7818
Sig.		.511	.489

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเพ็ญพิชา สท้านวัตร เกิดเมื่อวันที่ 22 ธันวาคม พ.ศ.2532 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร ปัจจุบันอายุ 25 ปี จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนศึกษานารี จังหวัดกรุงเทพมหานคร และสำเร็จการศึกษาได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

ผลงานที่ได้รับการเผยแพร่

(1) Penpicha Satanwat, Wiboonluk Pungrasmi and Sorawit Powtongsook. 2013. Effect of acclimation time on Nitrification and Denitrification rates of BiocordTM biofilter from Recirculating Aquaculture System. The 6 th ASEAN Civil Engineering Conference (ACEC) and The 6 th ASEAN Environmental Engineering Conference (AEEC), November 21-22, 2013 at Pathumwan Princess Hotel, Bangkok, Thailand. (Oral presentation)

(2) เพ็ญพิชา สท้านวัตร, วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี, เอกชัย มาลาพล และสรวิศ เผ่าทองศุข. 2557. ผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ออัตราไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพชนิดเส้นใยในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 13, 26-28 มีนาคม 2557, จัดโดยสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, โรงแรมเดอะทวินทาวเวอร์ กรุงเทพมหานคร. (นำเสนอผลงานแบบบรรยายมีเรื่องเต็ม)