

การบำบัดในเทรตในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยถังตีในทรีฟเคชั่น

นางสาวชลธิชา พลายชุม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NITRATE TREATMENT IN AQUACULTURE SYSTEMS
BY DENITRIFICATION TANK

Miss Cholticha Playchoom

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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดในเทรตในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วย ถังดีในทรีฟเคชั่น
โดย	นางสาวชลธิชา พลายชุม
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณะณ์ พึ่งรัมย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. สรวิศ เผ่าทองสุข

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณะณ์ พึ่งรัมย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. สรวิศ เผ่าทองสุข)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. เบญจพร บุญชยาอนันต์)

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

ชลธิชา พลายชุม : การบำบัดไนเตรตในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยถังดีไนทริฟิเคชัน.
(NITRATE TREATMENT IN AQUACULTURE SYSTEMS BY DENITRIFICATION
TANK) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์, อ. ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ร่วม : ดร. สรวิศ เผ่าทองสุข, 168 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการบำบัดไนเตรตในถังดีไนทริฟิเคชัน แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง โดยช่วงที่ 1 และ 2 ทำการทดลองแบบแบทช์ในถังกระจก ที่บรรจุวัสดุเป็นชั้นหนา 5 ซม. เติมน้ำจืดที่มีความเข้มข้นไนเตรต 100 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ปริมาตร 8 ลิตร และเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อเร่งอัตราดีไนทริฟิเคชัน ส่วนการทดลองช่วงที่ 3 เป็นการเดินระบบแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังดีไนทริฟิเคชันเพื่อบำบัดน้ำเสียจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็ก

ผลจากการทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุทดแทนดินธรรมชาติในถังดีไนทริฟิเคชัน ได้แก่ ดินธรรมชาติ (ชุดควบคุม) ทราาย หินพัมมิส และทรายเทียม เมื่อเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 พบว่าการใช้วัสดุทดแทนดินธรรมชาติมีอัตราดีไนทริฟิเคชันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อัตราดีไนทริฟิเคชันเฉลี่ยของดิน ทราาย และหินพัมมิส เท่ากับ $5,383.01 \pm 507$ $2,586.46 \pm 169$ และ $3,906.53 \pm 36$ มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.พื้นที่ผิวกันถึงต่อวัน ตามลำดับ ส่วนทรายเทียมไม่เกิดการบำบัดไนเตรต อย่างไรก็ตามการใช้ดินมักจะมีปัญหาการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำให้เกิดตะกอนแขวนลอย หินพัมมิสจึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นตัวกลางในถังดีไนทริฟิเคชัน การทดลองช่วงที่ 2 ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดไนเตรตในถังดีไนทริฟิเคชันที่บรรจุหินพัมมิส พบว่าเมทานอลมีความเหมาะสมในการเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนต่อการนำไปใช้งานมากกว่ากากน้ำตาล เนื่องจากไม่มีปัญหาในเรื่องสีของน้ำ แอมโมเนีย และความเสี่ยงต่อการขาดออกซิเจนในน้ำ จากการศึกษาอัตราส่วนซีโอดีของเมทานอลต่อไนเตรตไนโตรเจน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนจาก 3:1 เป็น 6:1 จะทำให้อัตราดีไนทริฟิเคชันเพิ่มขึ้นจาก 2,506 เป็น 7,301 มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.พื้นที่ผิวกันถึงต่อวัน โดยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับบำบัดไนเตรตคือ 5:1 เนื่องจากมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงแต่มีปริมาณเมทานอลคงเหลือในน้ำน้อยที่สุด และผลการศึกษาลักษณะการเติมเมทานอลลงในชั้นน้ำและชั้นหินพัมมิส พบว่าให้ผลไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงเลือกใช้ลักษณะการเติมเมทานอลในชั้นน้ำ เนื่องจากสะดวกต่อการใช้งาน สำหรับการทดลองช่วงที่ 3 ได้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตจากระบบเพาะเลี้ยงปลานิลของถังดีไนทริฟิเคชันที่เดินระบบการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1 และ 2 เมื่อเลี้ยงปลานิลที่ความหนาแน่นเริ่มต้น 0.3 กก.ต่อลบ.ม.เป็นเวลา 3 เดือน ในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่มีการบำบัดด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันและติดถังดีไนทริฟิเคชันโดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดระยะเวลาการทดลอง พบว่าถังดีไนทริฟิเคชันมีประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตมากกว่า 80% โดยมีอัตราดีไนทริฟิเคชันเฉลี่ยเท่ากับ $6,311.29 \pm 945.52$ มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.พื้นที่ผิวกันถึงต่อวัน

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา2553..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5170279821 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORDS : AQUACULTURE SYSTEM / DENITRIFICATION / NITRATE

CHOLTICHA PLAYCHOOM : NITRATE TREATMENT IN AQUACULTURE SYSTEMS

BY DENITRIFICATION TANK. ADVISOR : ASST. PROF. WIBOONLUK PUNGRASMI;

Ph.D., CO-ADVISOR : SORAWIT POWTONGSOOK, Ph.D., 168 pp.

This research aims to develop the denitrification tank for nitrate treatment in aquaculture systems. The experiments consisted of three phases. The first and second phases were performed in glass tanks containing 5 cm of packing materials and filled with 8 L of water. Nitrate concentration in artificial wastewater was 100 mg-N/L and organic carbon was added to accelerate denitrification rate. The final phase was an evaluation of denitrification tank for nitrate treatment in the recirculating aquaculture system under laboratory condition.

The first phase of this study was an evaluation of suitable packing materials in the denitrification tank. Four materials i.e. natural soil (control), sand, pumice rock and vermiculite were chosen as the packing material and methanol was used as the external carbon source at COD:Nitrate-N ratio of 5:1. The results showed that the maximum denitrification rates of soil, sand and pumice were $5,383.01 \pm 507$, $2,586.46 \pm 169$ and $3,906.53 \pm 36$ mg-N/m² of tank bottom area /day, respectively, while denitrification activity was not detected in vermiculite tanks. However, high hydrogen sulfide and suspended solid concentrations were found in the tank packing with soil. Pumice was therefore chosen as the most appropriate packing material for further study. The second phase was an optimization of denitrification process in the denitrification tank packed with pumice. Comparison between methanol and molasses as the external carbon sources revealed that methanol was the most suitable carbon. This was due to the problems regarding dark color, ammonia production and the risk of oxygen depletion when applying molasses into the denitrification tanks. Consequently, the study of COD:Nitrate-N ratio of methanol showed that increase of COD:N ratio from 3:1 to 6:1, denitrification rate was increased from 2,506 to 7,301 mg-N/m² of tank bottom area/day. However, due to the problem of methanol residue found in the denitrification tank with highest carbon addition (COD:N = 6:1), hence the 5:1 ratio was finally chosen. Comparison between methanol addition into the pumice layer and into the upper water layer showed that there was no significant in denitrification rate. Methanol addition in the water column was then chosen due to its convenient. The final phase was an application of denitrification tank for nitrate treatment in recirculating Tilapia culture tank with nitrification-denitrification treatments. The denitrification tank procedure was according to the optimized condition from the first and second phases. Initial fish density was 0.3 kg/m³ and culture duration was 3 months without external water exchange. It was found that the denitrification efficiency was more than 80% with the average denitrification rate of $6,311.29 \pm 945.52$ mg-N/m² tank bottom area/day.

Department: ..Environmental Engineering.

Student's Signature.....

Field of Study: Environmental Engineering.

Advisor's Signature.....

Academic Year: ..2010.....

Co-advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร. สรวิศ เผ่าทองสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจน อาจารย์ ดร. เบญจพร บุญชยาอนันต์ กรรมการ และอาจารย์ ดร. มะลิวัลย์ คุดทะโค กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยที่ได้กรุณาชี้แนะแก้ไขจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

ขอขอบพระคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่สำหรับทำการวิจัย และตลอดจนให้ความกรุณาสำหรับเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และตลอดจนคำแนะนำในการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ด้านต่างๆ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์บางส่วนจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษาประจำปี 2553 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และทุนวิจัยเพิ่มเติมจากโครงการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (รหัสโครงการ FW1017A) ที่ได้สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำวิจัย ตลอดจนจัดซื้อเครื่องมือและครุภัณฑ์ต่างๆ ที่จำเป็นจนทำให้การทดลองต่างๆ ของวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี

และสุดท้ายขอขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกันและกันในช่วงการทำวิจัยมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	5
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	8
2.2.1 แอมโมเนีย.....	9
2.2.2 ไนโตรต์	9
2.2.3 ไนเตรต	9
2.2.4 พีเอช.....	10
2.2.5 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ	10
2.2.6 อุณหภูมิ	11
2.3 ไนโตรเจนในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	11
2.3.1 วัฏจักรไนโตรเจนในน้ำ.....	11
2.3.2 การบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำ.....	14
2.3.2.1 ปฏิกริยาไนทริฟิเคชัน	14
2.3.2.2 ปฏิกริยาดีไนทริฟิเคชัน.....	17

2.4 ปลานิลและการเพาะเลี้ยงปลานิล	21
2.4.1 สรีรวิทยาและอนุกรมวิธานของปลานิล	21
2.4.2 การเพาะเลี้ยงปลานิล	22
2.5 ระบบบำบัดและหมุนเวียนน้ำแบบยัดเกาะกับตัวกรอง	24
2.6 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
2.5.1 การเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน	28
2.5.2 การใช้วัสดุตัวกลางเป็นตัวยัดเกาะของจุลินทรีย์และช่วยในการบำบัดในเทรต	32
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย	38
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี	43
3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง	43
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ	43
3.1.3 สารเคมี	44
3.2 การทดลอง	44
3.2.1 การเตรียมวัสดุดีไนทริฟิเคชัน	44
3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์	46
3.3.3 การเตรียมถังดีไนทริฟิเคชัน	46
การทดลองช่วงที่ 1 การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดในเทรตของดินธรรมชาติ	
เปรียบเทียบกับวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติในถังดีไนทริฟิเคชัน	47
การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติ	
ในถังดีไนทริฟิเคชัน	49
การทดลองที่ 2.1 ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมต่ออัตราดีไนทริฟิเคชัน	49
การทดลองที่ 2.2 อัตราส่วนซีโอดีต่อในเทรตไนโตรเจนของสารอินทรีย์คาร์บอน	
ที่เหมาะสม	50
การทดลองที่ 2.3 ลักษณะการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนลงในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชัน ...	51
การทดลองช่วงที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติที่	
เหมาะสมในการบำบัดคุณภาพน้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด	
ขนาดเล็กเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	54
3.3 การเตรียมถังในเทรตที่บรรจุตัวกรองชีวภาพ	55
3.4 การเตรียมถังดีไนทริฟิเคชันที่บรรจุวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติ	57

3.5 การเตรียมถังเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	58
3.6 การติดตั้งถังดีไนทริฟิเคชันเข้ากับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	59
3.7 การประเมินประสิทธิภาพระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	60
3.7.1 การประเมินอัตราการเติบโตของสัตว์น้ำ	60
3.7.2 การตรวจวัดคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงปลานิล	61
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	63
4.1 การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดในเทรตของดินธรรมชาติเปรียบเทียบกับวัสดุเพื่อ ทดแทนดินธรรมชาติในถังดีไนทริฟิเคชัน.....	63
4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติในถังดีไนทริฟิเคชัน	73
4.2.1 ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมต่ออัตราดีไนทริฟิเคชัน.....	73
4.2.2 อัตราส่วนซีโอไลท์ต่อในเทรตไนโตรเจนของสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสม.....	81
4.2.3 ลักษณะการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนลงในถังปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน	88
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติที่เหมาะสมในการ บำบัดคุณภาพน้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	92
4.3.1 การเตรียมถังไนทริฟิเคชันที่บรรจุตัวกรองชีวภาพและการประเมินประสิทธิภาพ ของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน	92
4.3.2 การเตรียมถังดีไนทริฟิเคชันที่บรรจุวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติและการ ประเมินประสิทธิภาพของวัสดุดีไนทริฟิเคชัน	94
4.3.3 การติดตั้งถังดีไนทริฟิเคชันเข้ากับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	94
4.3.4 การประเมินประสิทธิภาพระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	101
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	103
5.1 สรุปผลการวิจัย	103
5.2 ข้อเสนอแนะ	104
รายการอ้างอิง.....	106
ภาคผนวก	116
ภาคผนวก ก	117
ภาคผนวก ข	120
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	168

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของสสารและแร่ธาตุของหินพัมมิสเขาพนมฉัตร จังหวัดลพบุรี.....	26
2.2 พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนภายในหินพัมมิส.....	26
2.3 ส่วนประกอบของสสารและแร่ธาตุของทรายเทียม	27
2.4 อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน จากรายงานวิจัยต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าที่เหมาะสมจากทฤษฎีปริมาณสารสัมพันธ์....	31
2.5 ตัวอย่างงานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้วัสดุตัวกลางในกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน กับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	36
3.1 รายละเอียดการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติต่างๆ ของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง 4 ชนิด	45
3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 1	48
3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2.1	50
3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2.2	51
3.5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2.3	53
3.6 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 3	54
3.7 พารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างและวิธีการวิเคราะห์/ เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง.....	62
4.1 ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของดิน (ชุดควบคุม) ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม.....	63
4.2 อัตราดีไนทริฟิเคชันของดินและวัสดุเพื่อทดแทนดินในถังดีไนทริฟิเคชัน	65
4.3 พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำหลังบำบัดในถังดิน (ชุดควบคุม) และชุดทดลองตลอด	71
4.4 เปรียบเทียบชนิดและความแตกต่างของอัตราการบำบัดไนเตรตของวัสดุ แต่ละชนิดในระบบดีไนทริฟิเคชัน	73
4.5 ลักษณะสมบัติของเมทานอลและกากน้ำตาลที่ใช้เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อ เติมลงในถังดีไนทริฟิเคชันที่บรรจุหินพัมมิส	74
4.6 อัตราดีไนทริฟิเคชันและคุณภาพน้ำหลังการบำบัดไนเตรตของชุดที่เติมเมทานอลและ.. กากน้ำตาลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน ในช่วงวันที่ 20-57 ของการทดลอง.....	79
4.7 เปรียบเทียบราคาของเมทานอลกับกากน้ำตาล.....	80
4.8 เปรียบเทียบอัตราดีไนทริฟิเคชันเมื่อใช้สารอินทรีย์คาร์บอนชนิดต่างๆ	80

ตารางที่	หน้า
4.9 คุณภาพหลังบำบัดในเทรตของถังดีไนทริฟิเคชัน เมื่อเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วนซีไอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 3:1 4:1 5:1 และ 6:1 ตามลำดับ.....	87
4.10 เปรียบเทียบคุณภาพหลังการบำบัดในเทรตของถังดีไนทริฟิเคชัน เมื่อเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในชั้นน้ำและชั้นหินพื้มนิส.....	90
4.11 สภาวะที่เหมาะสมของถังดีไนทริฟิเคชัน จากการทดลองที่ 4.1 และ 4.2	92
4.12 ประสิทธิภาพการบำบัดในเทรตของถังดีไนทริฟิเคชันบรรจุหินพื้มนิส	97
4.13 เปรียบเทียบอัตราการบำบัดในเทรตกับระบบอื่น	100
4.14 อัตราการเติบโตและผลผลิตของปลานิล	102

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กลไกการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบการเพาะเลี้ยงแต่ละระบบ	8
2.2 วัฏจักรไนโตรเจนในแหล่งน้ำ	12
2.3 ตัวอย่างหินพัมมิสจากเขาพนมฉัตร จังหวัดลพบุรี (กำลังขยาย 70x)	25
2.4 ลักษณะรูปร่างของทรายเทียม	27
3.1 สรุปแนวทางการทดลองในงานวิจัยนี้	38
3.2 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 1	40
3.3 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 2	41
3.4 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 3	42
3.5 ลักษณะของดินธรรมชาติและวัสดุทดแทนดินธรรมชาติ 3 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง	45
3.6 แผนภาพและรูปถ่ายแสดงการติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับถังดีไนทริฟิเคชัน (แสดงรายละเอียดสำหรับ 1 ชุดการทดลอง)	46
3.7 ชุดการทดลองการบำบัดไนเตรตในถังดีไนทริฟิเคชันของดินธรรมชาติเปรียบเทียบกับวัสดุเพื่อทดแทนดิน 3 ชนิด ได้แก่ ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม	48
3.8 แผนภาพและรูปถ่ายแสดงการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับถังดีไนทริฟิเคชันในชุดทดลองที่ทำการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในชั้นวัสดุ	52
3.9 (ก) ลักษณะของตัวกรองชีวภาพในทรีฟิเคชัน (ข) ถังบ่มตัวกรองชีวภาพในทรีฟิเคชัน และ (ค) ชุดการทดลองสำหรับประเมินประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพในทรีฟิเคชัน	56
3.10 แผนภาพและรูปถ่ายของถังในทรีฟิเคชันที่ใช้กับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำขนาดเล็ก	57
3.11 แผนภาพและรูปถ่ายของถังดีไนทริฟิเคชันที่ใช้กับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำขนาดเล็ก	58
3.12 แผนผังแสดงระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ใช้ในการทดลอง	59
3.13 แผนผังแสดงการเชื่อมต่อถังดีไนทริฟิเคชันเข้ากับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ	59
4.1 ลักษณะของชั้นวัสดุทั้ง 4 ชนิดในถังดีไนทริฟิเคชัน	64
4.2 ปริมาณไนเตรตของถังดิน (ชุดควบคุม) ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม	65
4.3 ปริมาณไนไตรต์ของดิน (ชุดควบคุม) ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม	66
4.4 ปริมาณแอมโมเนียของดิน (ชุดควบคุม) ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม	67
4.5 การเปลี่ยนแปลงค่าไออาร์พีในชั้นน้ำและชั้นวัสดุ ในช่วงวันที่ 50-67	68
4.6 (ก) ฟองอากาศบนผิวชั้นดิน และ (ข) ฟองอากาศและตะกอนแขวนลอยบนผิวน้ำ	69

รูปที่	หน้า
4.7 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของดิน (ชุดควบคุม) ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม.....	69
4.8 ค่าสภาพต่างในช่วงวันที่ 29-67 ของดิน (ชุดควบคุม) ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม	70
4.9 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำหลังจากเติมเมทานอลในถังดิน ในช่วงการทดลองวันที่ 18-23	71
4.10 ลักษณะของ (ก) เมทานอลและ (ข) กากน้ำตาลที่ใช้ในงานวิจัย.....	74
4.11 การเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนเปรียบเทียบระหว่างชุดทดลองที่ เติมเมทานอล (ชุดควบคุม) และกากน้ำตาลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน.....	76
4.12 การเปลี่ยนแปลงค่าไออาร์พีในชั้นหินพัมมิสและชั้นน้ำของชุดที่เติมเมทานอล (ชุดควบคุม) และกากน้ำตาลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนและกากน้ำตาลเป็น สารอินทรีย์คาร์บอน	77
4.13 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชและสภาพต่างในถังบำบัดน้ำในทวีพีเคชั่นของ ชุดที่เติม เมทานอล (ชุดควบคุม) และกากน้ำตาลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน.....	78
4.14 ลักษณะและสีของน้ำหลังการบำบัดในเทรตจากชุดที่เติมเมทานอล (ชุดควบคุม) และกากน้ำตาลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน	79
4.15 การเปลี่ยนแปลงของไนเตรตในชุดการทดลองที่แปรค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรต ไนโตรเจนเท่ากับ 3:1-6:1.....	83
4.16 อัตราดีไนโตรจีเคชั่นจากการเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน โดยแปรผัน อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนที่ต่างกัน จากการทดลอง 3 ซ้ำ.....	83
4.17 การเปลี่ยนแปลงของไนไตรต์ในชุดการทดลองที่แปรค่าอัตราส่วนอัตราส่วนซีโอดีต่อ ไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 3:1-6:1	84
4.18 การเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนียในชุดการทดลองที่แปรค่าอัตราส่วนอัตราส่วน ซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 3:1-6:1	85
4.19 ไออาร์พีในชั้นหินพัมมิส และในชั้นน้ำ เมื่อเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์ คาร์บอนในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 3:1-6:1	86
4.20 พีเอชและค่าสภาพต่าง เมื่อเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วน ซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 3:1-6:1	86
4.21 สารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนเปรียบเทียบระหว่างการเติมเมทานอลในชั้นน้ำ และชั้นหินพัมมิส	89
4.22 เปรียบเทียบปริมาณซีโอดีระหว่างชุดเติมเมทานอลในชั้นน้ำและชั้นหินพัมมิส ช่วงการทดลองวันที่ 54-75	91

รูปที่	หน้า
4.23 การเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ของตัวกรองชีวภาพ ไนทริฟิเคชันในถังบ่มเชื้อ ระยะเวลาการทดลอง 50 วัน.....	93
4.24 การเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ระหว่างการทดสอบ ประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน (ทดลองซ้ำ 2 รอบของการบำบัด)	93
4.25 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนเตรต ไนไตรต์ และแอมโมเนีย เปรียบเทียบ ระหว่างถังเลี้ยงปลานิลกับถังดีไนทริฟิเคชัน ถังดีไนทริฟิเคชันแบ่งเป็น 2 ระยะ ได้แก่ ระยะบ่มเชื้อ (3 เดือน) และระยะบำบัดไนเตรตจากระบบเพาะเลี้ยงปลานิล.....	96
4.26 การเปลี่ยนแปลงของพีเอชและค่าสภาพต่าง เปรียบเทียบระหว่างระบบเพาะเลี้ยง ปลานิลและถังดีไนทริฟิเคชัน.....	98
4.27 ค่าไออาร์พีในถังดีไนทริฟิเคชันในระยะบ่มเชื้อและการบำบัดไนเตรตใน น้ำเสียจากระบบเพาะเลี้ยงปลานิล.....	99
4.28 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในถังเพาะเลี้ยงปลานิล	99
4.29 อัตราดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสในถังดีไนทริฟิเคชันในระยะบ่มเชื้อและการบำบัด ไนเตรตจากระบบเพาะเลี้ยงปลานิล.....	100
4.30 ปริมาณอาหารที่ให้และปริมาณอาหารที่สะสมภายในถังเลี้ยงปลานิล.....	102

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากปริมาณความต้องการด้านการบริโภคที่สูงขึ้นซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรโลก โดยระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ได้รับความนิยม คือ การเพาะเลี้ยงแบบพัฒนาหรือแบบยั่งยืน เนื่องจากเป็นระบบที่ให้ผลผลิตสูงกว่าระบบอื่นๆ และเป็นระบบการเพาะเลี้ยงแบบปิดที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นั่นคือ จะเป็นระบบการเพาะเลี้ยงที่มีการบำบัดและหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนี้การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบปิดยังมีข้อดี คือ สามารถเพิ่มปริมาณผลผลิตได้ ป้องกันการติดโรค และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยง แต่การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในรูปแบบนี้มักประสบปัญหาการสะสมของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนรูปต่างๆ ทั้งแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตในระดับความเข้มข้นสูง ซึ่งเกิดขึ้นจากเศษอาหารที่เหลือตกค้าง ของเสียสิ่งปฏิกูลจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำ และการย่อยสลายโปรตีนจากซากสัตว์น้ำที่ตายไป จึงมีการคิดค้นแนวทางเพื่อพัฒนาและนำเทคโนโลยีต่างๆ มาใช้เพื่อบำบัดสารประกอบไนโตรเจนเหล่านี้ในน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เช่น ระบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน (Matos และคณะ, 2009) ระบบจานหมุนชีวภาพ (Brazil, 2006) ระบบโปรยกรอง (Eding และคณะ, 2006) ระบบฟลูอิดไดซ์เบด (Shnel และคณะ, 2002) เป็นต้น โดยสำหรับไนเตรตซึ่งเป็นผลผลิตสุดท้ายที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน เมื่อสะสมอยู่ในระบบการเพาะเลี้ยงที่ระดับความเข้มข้นสูงจะก่อให้เกิดความเป็นพิษกับสัตว์น้ำ การบำบัดไนเตรตจากระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในบ่อดินโดยทั่วไปจะสามารถเกิดขึ้นได้เองตามกลไกทางธรรมชาติ ซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณชั้นดินก้นบ่อผ่านปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันทำให้สามารถลดปริมาณไนเตรตในน้ำลงได้ แต่สำหรับระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบพัฒนาซึ่งเป็นการใช้บ่อไร้อิน (บ่อปูนซีเมนต์หรือบ่อดินที่มีการปูพื้นทับด้วยผ้าพลาสติกหรือผ้าใบ) ทั้งระบบบ่อในโรงเรือนและกลางแจ้ง กระบวนการบำบัดไนเตรตตามธรรมชาติในชั้นดินจะไม่สามารถเกิดขึ้น ก่อให้เกิดปัญหาการสะสมไนเตรตตามมา การเปลี่ยนถ่ายน้ำจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่น่ามาใช้เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว แต่ผลเสียของการถ่ายเทน้ำซึ่งมีปริมาณความเข้มข้นของไนเตรตสูงลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศของแหล่งน้ำ สำหรับแนวทางในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้กระบวนการดีไนตริฟิเคชันซึ่งเป็นการบำบัดทางชีวภาพในสภาวะไร้อากาศมาผนวกเข้ากับระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อลดปัญหาการสะสมไนเตรต โดย

แนวทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจและมีความเป็นไปได้คือการประยุกต์ใช้ถังดินร่วมกับการเกิดปฏิกิริยาดีในทรีฟเคชันเมื่อมีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการใช้ถังดินเป็นการบำบัดที่เกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติ จึงมีราคาถูก ง่ายต่อการก่อสร้าง และดูแลรักษา โดยจากการศึกษาของเอกชัย มาลาพล และคณะ (2551) พบว่าการใช้ถังบรรจุดินตะกอนจากบ่อเลี้ยงกุ้งที่ทำการเติมเมทานอลและกลูโคสเป็นตัวเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีในทรีฟเคชัน เมื่อแปรผันสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N) เป็น 1:1 5:1 10:1 และ 20:1 สามารถเพิ่มอัตราการบำบัดในทรีฟเคชันได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยการใช้เมทานอลและกลูโคสจะให้ผลไม่แตกต่างกัน นั่นคือเมื่อเพิ่มอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจาก 1:1 เป็น 20:1 มีผลทำให้อัตราการบำบัดในทรีฟเคชันเพิ่มขึ้นจาก 516 เป็น 2,849 มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.ต่อวัน ตามลำดับ โดยอัตราดีในทรีฟเคชันเฉลี่ยของถังชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมคาร์บอนมีค่าเท่ากับ 386 มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.ต่อวัน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาต่อยอดจากงานวิจัยดังกล่าวเพื่อพัฒนาระบบการบำบัดในทรีฟเคชันในถังดีในทรีฟเคชัน โดยศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้วัสดุทดแทนดินธรรมชาติเพื่อให้ได้วัสดุที่มีความเหมาะสมที่จะบรรจุลงในถังปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นการลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้ดินธรรมชาติ เช่น การปนเปื้อนของเชื้อโรคที่ไม่พึงประสงค์จากดิน และความยุ่งยากต่อการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นต้น โดยให้ความสำคัญกับการศึกษาเพื่อหาสภาวะและชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีในทรีฟเคชัน ตลอดจนศึกษาลักษณะรูปแบบการเติมสารเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมเพื่อเป้าหมายในการพัฒนา และนำถังดีในทรีฟเคชันนี้ไปประยุกต์ใช้กับการปรับปรุงคุณภาพน้ำในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่มีการหมุนเวียนน้ำขนาดเล็กต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัดในทรีฟเคชันของดินธรรมชาติในถังดีในทรีฟเคชัน โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติเมื่อใช้เมทานอลเป็นสารเร่งปฏิกิริยา
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติในถังดีในทรีฟเคชันโดยเปรียบเทียบชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมและรูปแบบการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนที่แตกต่างกัน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของถังดีในทรีฟเคชันที่บรรจุวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติสำหรับบำบัดในทรีฟจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจำลองในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็ก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยในระดับทดลอง (Pilot scale) โดยใช้การทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous) ดำเนินการ ณ อุณหภูมิห้อง ที่ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีการกำหนดขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

- 1.3.1 วัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม ที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 1-3 มม. ส่วนดินธรรมชาติที่ใช้สำหรับชุดควบคุมเป็นตัวอย่าง ดินจากสระน้ำบริเวณห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 1.3.2 การทดลองในช่วงแรกจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นจากโพแทสเซียมไนเตรด โดยมีความเข้มข้นของไนเตรดเท่ากับ 100 มก./ไนโตรเจนต่อลิตร ส่วนการทดลองในช่วงหลังจะใช้น้ำเสียจริงที่เกิดขึ้นจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่จำลองสภาพการเลี้ยงด้วยระบบแบบปิดในโรงเรือน
- 1.3.3 สารอินทรีย์คาร์บอนที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในการทดลองได้แก่ เมทานอล และกากน้ำตาล โดยศึกษาอัตราส่วนซีไอดีต่อไนเตรดไนโตรเจนของ สารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสม 4 ค่า ได้แก่ 3:1 4:1 5:1 และ 6:1 และศึกษาลักษณะ การเติมสารอินทรีย์คาร์บอนที่แตกต่างกันลงในถังปฏิกรณ์ คือ การเติมในชั้นน้ำและชั้น วัสดุ
- 1.3.4 สัตว์น้ำที่ใช้ในระบบทดลอง คือ ปลานิล (*Oreochromis niloticus* Linnaeus) โดยทำการเพาะเลี้ยงในถังพลาสติกขนาด 500 ลิตร อัตราความหนาแน่นต่ำ คือน้ำหนักปลา 0.3 กก.ต่อ ลบ.ม.ของปริมาณน้ำจืดในถังเพาะเลี้ยง ภายใต้สภาวะจำลองของระบบ บ่อไร้อินในโรงเรือน ด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีขายตามท้องตลาด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้วัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติที่เหมาะสมที่จะบรรจุลงในถังดีไนทริฟิเคชันเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

- 1.4.2 เป็นการลดปัญหาและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปนเปื้อนสารอินทรีย์ในโตรเจนที่เกิดจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ด้วยกระบวนการบำบัดที่ดำเนินการง่าย มีราคาถูกลง และสามารถดำเนินการได้จริงในทางปฏิบัติ
- 1.4.3 เป็นทางเลือกหนึ่งที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ในการบำบัดสารอินทรีย์ในโตรเจนจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำเป็นผลผลิตทางการเกษตรจากการทำประมงที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากนำเข้าได้เข้าสู่ประเทศไทยในแต่ละปีเป็นมูลค่าหลายหมื่นล้านบาท และยังเป็นหนึ่งในสินค้าเกษตรของประเทศที่ถือว่ามีความศักยภาพในการส่งออก โดยเฉพาะกลุ่มปลาและกุ้ง ซึ่งจัดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ติดอันดับ 1 ใน 10 ของสินค้าเกษตรส่งออกที่สำคัญของไทย ในปี 2551 พบว่าปลาและผลิตภัณฑ์จากปลามีร้อยละการส่งออกเท่ากับ 9.96 ส่วนกุ้งและผลิตภัณฑ์จากกุ้งมีร้อยละการส่งออกเท่ากับ 7.31 โดยเพิ่มขึ้นจากปี 2550 ถึงร้อยละ 2.41 และ 0.06 ตามลำดับ (วิวรรณ แจ่มศิลป์ และคณะ, 2551) สำหรับประเทศคู่ค้าที่นำเข้าสินค้าเกษตรและผลิตภัณฑ์ที่สำคัญของไทย 3 อันดับแรกคือ สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และจีน แต่เนื่องจากในปัจจุบันประเทศที่ทำการผลิตและส่งออกสัตว์น้ำเช่นเดียวกับไทยมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้การแข่งขันในตลาดส่งออกเป็นไปอย่างรุนแรง และขณะเดียวกันประเทศผู้นำเข้าที่สำคัญซึ่งได้แก่ สหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น ต่างก็นำมาตรการกีดกันทางการค้าในรูปแบบต่างๆ เช่น การเข้มงวดตรวจสอบสารตกค้างในสัตว์น้ำ มาใช้กับประเทศผู้ส่งออก ทำให้การส่งออกไปยังประเทศเหล่านี้มีความยากลำบากมากขึ้น

จากความต้องการทางการตลาดโลกที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น รวมทั้งมาตรการกีดกันทางการค้าในรูปแบบต่างๆ ของประเทศคู่ค้าดังได้กล่าวมาแล้ว ส่งผลให้การผลิตสัตว์น้ำออกสู่ตลาดต้องมีมาตรการในการควบคุมคุณภาพเพิ่มมากขึ้น ด้วยการวางแนวทางเพื่อควบคุมผลผลิตเหล่านั้นให้มีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานที่ต่างประเทศกำหนด ทำให้เกษตรกร ภาครัฐ และเอกชนจำเป็นต้องปรับตัวและเร่งพัฒนาศักยภาพในการแข่งขัน เพื่อให้สอดคล้องกับสถานการณ์ทางการค้าที่เปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะในเรื่องของการลดต้นทุนการผลิต การพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ได้มาตรฐาน และปลอดภัยต่อผู้บริโภค รวมทั้งการลดมลพิษที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.1 ระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ในปัจจุบันระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบพัฒนา (Intensive system) เป็นระบบที่ได้รับความนิยมจากเกษตรกรเป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นการเลี้ยงสัตว์น้ำในระดับความหนาแน่นสูง มีการให้อาหารสำเร็จรูปประเภทโปรตีนสูงเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำที่มีขนาดใหญ่และตรงตามความต้องการของตลาด โดยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดซึ่งมีการบำบัดและหมุนเวียนน้ำอยู่ภายในฟาร์ม

ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบพัฒนา การเพาะเลี้ยงระบบนี้มีข้อดีคือ สามารถเพิ่มผลผลิต ป้องกันการติดโรค และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงได้ ถ้าการให้อาหารกับสัตว์น้ำคิดเป็น 100% จะมีเพียงประมาณ 25% ของอาหารเท่านั้นที่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นมวลของสัตว์น้ำได้ (Avnimelech และ Ritvo, 2003) ส่วนที่เหลือประมาณ 39% จะเป็นอาหารที่เหลือตกค้างในบ่อ (Piedrahita, 2003) และอีกประมาณ 36% จะกลายเป็นของเสียที่สัตว์น้ำขับถ่ายออกมา (Brune และคณะ, 2003) ซึ่งสิ่งที่ยังเหลืออยู่ในระบบดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ประเภทโปรตีน เมื่อสารอินทรีย์ดังกล่าวถูกย่อยสลายจะเกิดการสะสมแอมโมเนียภายในบ่อ แอมโมเนียนั้นจะมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำอย่างรุนแรง การใช้ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสามารถลดปัญหาจากแอมโมเนียได้ แต่เมื่อทำการเพาะเลี้ยงเป็นระยะเวลานาน แอมโมเนียที่ถูกออกซิไดซ์เกิดเป็นไนเตรตจะสะสมในระบบมากขึ้น ถึงแม้ว่าไนเตรตจะมีความเป็นพิษน้อยกว่าแอมโมเนีย แต่เมื่อมีการสะสมไนเตรตเป็นเวลานานและมีปริมาณเพิ่มขึ้นในระดับหนึ่ง (มากกว่า 50 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร) ก็สามารถส่งผลต่อสัตว์น้ำที่ทำการเพาะเลี้ยงได้เช่นกัน ดังนั้นการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงจำเป็นต้องมีระบบบำบัดไนเตรต เพื่อให้การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและลดการเปลี่ยนถ่ายน้ำได้เป็นเวลานาน อีกทั้งเป็นการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมเมื่อมีการปล่อยน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

โดยทั่วไประบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ (รุ่งนภา สุทธิศรี, 2549) ได้แก่

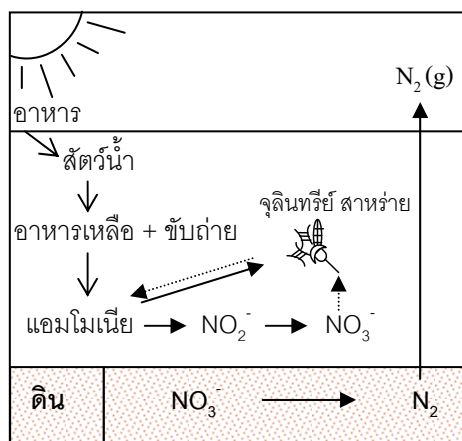
- 1) ระบบบ่อดินกลางแจ้ง (Outdoor earthen pond) ซึ่งเป็นรูปแบบที่พบได้ทั่วไป เนื่องจากสามารถก่อสร้างได้ง่ายและใช้ต้นทุนต่ำ โดยอาหารที่เหลือและของเสียจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำจะถูกบำบัดจากการเติมอากาศบริเวณผิวน้ำ และจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายในช่วงเวลากลางวัน ก๊าซออกซิเจนจะถูกใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์และในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารอนินทรีย์ขนาดเล็ก เช่น แอมโมเนีย ไนเตรต คาร์บอนไดออกไซด์ และฟอสเฟต ซึ่งสาหร่ายจะนำสารอนินทรีย์เหล่านี้มาใช้ในการเจริญเติบโต นอกจากนี้การบำบัดไนเตรตจะเกิดขึ้นได้ผ่านกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในบริเวณชั้นดินตะกอนก้นบ่อที่ปราศจากออกซิเจน ซึ่งจะให้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซไนโตรเจน แต่หากปริมาณไนเตรตในน้ำมีไม่เพียงพอผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารอื่น เช่น ก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) โดยทั่วไปกระบวนการชีวภาพเหล่านี้จะเกิดวนเวียนเป็นวัฏจักรซึ่งทำให้การบำบัดแอมโมเนียเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามความสามารถในการบำบัดของเสียในบ่อดินกลางแจ้งจะขึ้นกับอัตราการเติมก๊าซออกซิเจนคืนแก่ระบบโดยสาหร่าย รวมถึงประสิทธิภาพของไนตริฟายอิงและดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียในการเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนเตรตและก๊าซไนโตรเจน ตามลำดับ

(กษิตติศ หนูทอง, 2551) ส่วนข้อด้อยของการใช้ระบบบ่อดินกลางแจ้งคือ ไม่เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีปริมาณของเสียอินทรีย์ไนโตรเจนสูง มีประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนต่ำ และเกิดการสะสมสารประกอบไนโตรเจนภายในระบบ นอกจากนี้การก่อสร้างระบบบ่อดินจะต้องใช้พื้นที่เป็นจำนวนมากซึ่งเป็นข้อจำกัดสำหรับฟาร์มขนาด

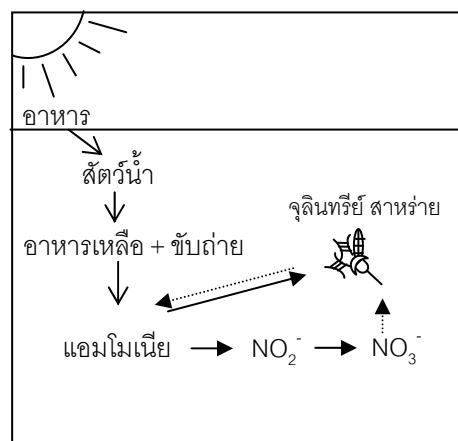
2) ระบบบ่อเลี้ยงในโรงเรือน (Indoor pond) เป็นการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำภายในโรงเรือนที่ใช้ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดเพื่อหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยการเลี้ยงภายในโรงเรือนจะเป็นระบบที่ได้รับแสงน้อยและใช้บ่อซีเมนต์หรือบ่อดินที่มีการปูพื้นด้วยพลาสติกทำให้ระบบแบบนี้ไม่มีตะกอนดินก้นบ่อ ซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้นกับระบบบ่อดินกลางแจ้ง เช่น ปัญหาสภาพดิน ปัญหาการปนเปื้อนของเชื้อโรคที่ไม่พึงประสงค์จากดิน และปัญหาการรั่วซึมของน้ำในบ่อ เป็นต้น ตลอดจนสามารถควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำภายในระบบได้ง่ายมากยิ่งขึ้น แต่ปัญหาที่พบมากในระบบบ่อไร้อินดังกล่าวก็คือ การสะสมตัวของไนเตรตในน้ำ อันเนื่องมาจากระบบนิเวศของจุลินทรีย์ภายในบ่อไม่เอื้ออำนวยให้เกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน ซึ่งเมื่อปริมาณความเข้มข้นของไนเตรตเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำได้ เช่น สัตว์น้ำเกิดความเครียดทำให้อัตราการบริโภคอาหารต่ำลง เจริญเติบโตช้า อ่อนแอ และตายในที่สุด

3) ระบบบ่อไร้อินกลางแจ้ง (Outdoor lining pond) เป็นรูปแบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยบ่อซีเมนต์หรือบ่อดินที่ปูพื้นด้วยพลาสติกตั้งอยู่บริเวณกลางแจ้ง ระบบนี้จะไม่มีตะกอนดินก้นบ่อ ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาเช่นเดียวกันกับระบบบ่อเลี้ยงในโรงเรือน แต่จากการที่บ่อได้รับแสงตามธรรมชาติจะทำให้มีแพลงก์ตอนพืชเกิดขึ้นในบ่อ ซึ่งเป็นผลดีในแง่ของการช่วยบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนที่สะสมตัวอยู่ผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันและการดูดซึมเข้าสู่เซลล์ของพืช โดยในระบบนี้แอมโมเนียจะเป็นสารอาหารที่ทำให้สิ่งมีชีวิตเกิดการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณมากขึ้น แต่เมื่อแพลงก์ตอนพืชมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้เกิดการบดบังแสงกันเองและตายในที่สุด เกิดการย่อยสลายขึ้นภายในบ่อ ทำให้การดูแลรักษาทำได้ยาก

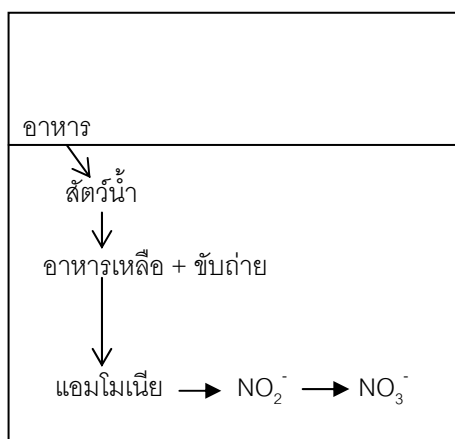
โดยระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทั้ง 3 รูปแบบดังกล่าวจะมีสภาวะแวดล้อมทางธรรมชาติและกลไกการบำบัดสารอินทรีย์ที่สะสมอยู่ในบ่อเพาะเลี้ยงแตกต่างกัน การมีหรือไม่มีชั้นดินตะกอนก้นบ่อจะมีผลอย่างมากต่อการหมุนเวียนสารในวัฏจักรไนโตรเจนที่เกิดขึ้นภายในบ่อ ปัญหาการสะสมตัวของสารประกอบไนโตรเจนประเภทต่างๆ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ในปริมาณที่ต่างกันก้นบ่อแต่ละรูปแบบจะส่งผลทำให้แนวทางการแก้ปัญหาที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงทั้งสามรูปแบบมีความแตกต่างกัน โดยรูปที่ 2.1 แสดงกลไกการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนที่เกิดขึ้นในระบบการเพาะเลี้ยงแต่ละรูปแบบ



(ก) ระบบบ่อดินกลางแจ้ง



(ข) ระบบบ่อไร้นดินกลางแจ้ง



(ค) ระบบบ่อไร้นดินในโรงเรือน

รูปที่ 2.1 กลไกการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบการเพาะเลี้ยงแต่ละระบบ

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

คุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อความเป็นอยู่และสุขภาพของสัตว์น้ำ เนื่องจากเป็นสิ่งแวดล้อมที่สัตว์น้ำอาศัยอยู่ การควบคุมปัจจัยเหล่านี้ให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ได้ผลผลิตของสัตว์น้ำที่ดีและมีคุณภาพ โดยปัจจัยหลักที่ควรนำมาพิจารณาในการควบคุมคุณภาพน้ำคือ สารประกอบไนโตรเจนรูปแบบต่างๆ (แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต) ฟิโอส ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ และอุณหภูมิ ดังมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 แอมโมเนีย

แอมโมเนียส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิตและกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในน้ำ โดยทั่วไปแอมโมเนียที่พบในน้ำมี 2 รูป คือ แอมโมเนีย (Un-ionized ammonia, NH_3) และแอมโมเนียมไอออน (Ammonium ion, NH_4^+) การเกิดแอมโมเนียทั้ง 2 รูปแบบขึ้นอยู่กับความสมดุลของอุณหภูมิกับค่าพีเอช โดยค่าพีเอชจะเป็นปัจจัยที่สำคัญกว่าอุณหภูมิ เมื่อค่าพีเอชของน้ำสูงขึ้น แอมโมเนียจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้น้ำในระบบมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมากขึ้น ความเป็นพิษของแอมโมเนียส่วนใหญ่จะมีผลในทางอ้อม เช่น ทำให้สัตว์น้ำไม่สามารถขับแอมโมเนียที่สะสมภายในร่างกายออกสู่ภายนอกได้ เนื่องจากแอมโมเนียในน้ำมีความเข้มข้นสูงกว่าแอมโมเนียภายในกระแสเลือดของสัตว์น้ำ เป็นผลทำให้พีเอชของเลือดมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อปฏิกิริยาชีวเคมีต่างๆ ในสัตว์น้ำ นอกจากนี้ แอมโมเนียยังสามารถทำลายเหงือกของสัตว์น้ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนออกซิเจนเข้าสู่ภายในร่างกายลดลง (ชลอ ลิมสุวรรณและพรเลิศ จันทรัชชกุล, 2547) โดยระดับความเข้มข้นสูงสุดของแอมโมเนียที่ยอมให้มีในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้คือ 0.025 มก./ลิตร (Neori และคณะ, 2004; Chen และคณะ, 2006)

2.2.2 ไนไตรต์

ไนไตรต์มีความเป็นพิษสูงกว่าไนเตรต โดยไนไตรต์จะรวมตัวกับฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) ในเลือดกลายเป็นเมทฮีโมโกลบิน (Methemoglobin) ซึ่งไม่สามารถขนถ่ายออกซิเจนไปสู่เซลล์และกล้ามเนื้อได้ สัตว์น้ำจึงมีเมทฮีโมโกลบินในกระแสเลือด โดยเฉพาะปลาจะสังเกตเห็นเลือดเป็นสีน้ำตาลได้อย่างชัดเจน ปลาที่มีอาการเช่นนี้จะไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้ เนื่องจากไม่สามารถแลกเปลี่ยนออกซิเจนสำหรับการหายใจได้ (มันสิน ตันทุลเวศม์และไพพรรณ พรประภา, 2539) โดยระดับความเป็นพิษของไนไตรต์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและค่าพีเอชลดลง ดังนั้นการป้องกันปัญหาความเป็นพิษของไนไตรต์สามารถทำได้โดยการควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 7.5-8.5 และการให้อาการอย่างเพียงพอ รวมถึงการเปลี่ยนถ่ายน้ำเพื่อลดปริมาณการสะสมของไนไตรต์ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

2.2.3 ไนเตรต

ไนเตรตจัดเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่มีความเสถียรที่สุด กล่าวคือ เมื่อเกิดไนเตรตขึ้นในแหล่งน้ำ ไนเตรตจะสะสมอยู่ในน้ำปริมาณสูงและคงอยู่ได้นาน ซึ่งจะทำให้เกิดผลกระทบในระยะยาวต่อสุขภาพสัตว์น้ำ ทำให้สัตว์น้ำเกิดความเครียด อัตราการบริโภคอาหารลดลง เจริญเติบโตช้า อัตราการเจริญพันธุ์ลดลง และอาจจะตายได้ และพบว่าปริมาณไนเตรตเข้มข้น 30 มล./ลิตร อาจจะทำให้เกิดโรคจุดขาวกับสัตว์น้ำได้ (Gutierrez-Wing และคณะ,

2006) สำหรับความเป็นพิษของไนเตรต (LC_{50}) มีค่าที่แตกต่างกันไปตามชนิดและระยะการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ เช่น ปลาตุ๊กมีค่าความเป็นพิษของไนเตรตเท่ากับ 6,200 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ที่ 96 ชม. ส่วนปลาคาร์พมีค่าความเป็นพิษของไนเตรตเท่ากับ 1,565 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ที่ 24 ชม. (Carmargo และคณะ, 2005) เป็นต้น โดยระดับความเข้มข้นสูงสุดของไนเตรตที่ยอมให้มีในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำได้คือ 50 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร หากสูงกว่านี้ควรมีการบำบัดหรือทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำในบ่อเพาะเลี้ยง อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนถ่ายน้ำที่มีไนเตรตปริมาณความเข้มข้นสูงลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้การเจริญเติบโตของสาหร่ายและพืชน้ำเป็นไปอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง เกิดปัญหาคุณภาพน้ำ รส กลิ่นของน้ำ การขาดออกซิเจน และเพิ่มความขุ่นของน้ำ ส่งผลให้สัตว์น้ำตายและเกิดปัญหาแหล่งน้ำเน่าเสียในที่สุด

2.2.4 พีเอช

พีเอชหรือความเป็นกรด-ด่าง เป็นดัชนีแสดงความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในน้ำ ในแหล่งน้ำกร่อยทั่วไปมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 7-8 แพลงก์ตอนพืชส่วนใหญ่เจริญได้ดีในน้ำที่มีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 8-8.2 สำหรับค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรอยู่ระหว่าง 7.5-8.5 ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำกลางแจ้งค่าพีเอชของน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นในเวลากลางวัน เนื่องจากการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืช ซึ่งจะทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำลดลง ส่งผลให้ความเป็นด่างสูงขึ้น และในเวลากลางคืนค่าพีเอชของน้ำจะลดลง เนื่องจากกระบวนการหายใจของสัตว์น้ำจะคายคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ทำให้น้ำมีความเป็นกรดมากขึ้น ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อสัตว์น้ำ เช่น ถ้าค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้พิษของแอมโมเนียเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่าพีเอชที่ลดต่ำลงจะทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ เป็นต้น

2.2.5 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ

ออกซิเจนเป็นปัจจัยที่นับว่ามีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำทุกชนิด เนื่องจากออกซิเจนมีความจำเป็นต่อกระบวนการต่างๆ ภายในร่างกายเพื่อการเจริญเติบโต โดยในทางปฏิบัติของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะพยายามควบคุมไม่ให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำกว่า 4 มก.ต่อลิตร (ชลอ ลัมสุวรรณและพรเลิศ จันทรีรัชกุล, 2547) ถ้าอุณหภูมิของน้ำสูงขึ้นหรือค่าความเค็มเพิ่มขึ้น ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจะมีค่าลดลง ซึ่งการลดลงของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจะส่งผลต่อสัตว์น้ำ เช่น เจริญเติบโตช้า อัตราการฟักไข่ต่ำ ตัวอ่อนไม่แข็งแรง เป็นต้น โดยปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ได้แก่ แสงแดด การ

ไหลเวียนของน้ำ แพลงก์ตอนพืชและสัตว์ ฟืชน้ำ ความโปร่งแสง ความลึกของบ่อ ชนิดและปริมาณ จุลินทรีย์ สิ่งขับถ่ายของสัตว์น้ำ รวมทั้งปริมาณอาหารที่เหลือจากการกินของสัตว์น้ำ เป็นต้น

2.2.6 อุณหภูมิ

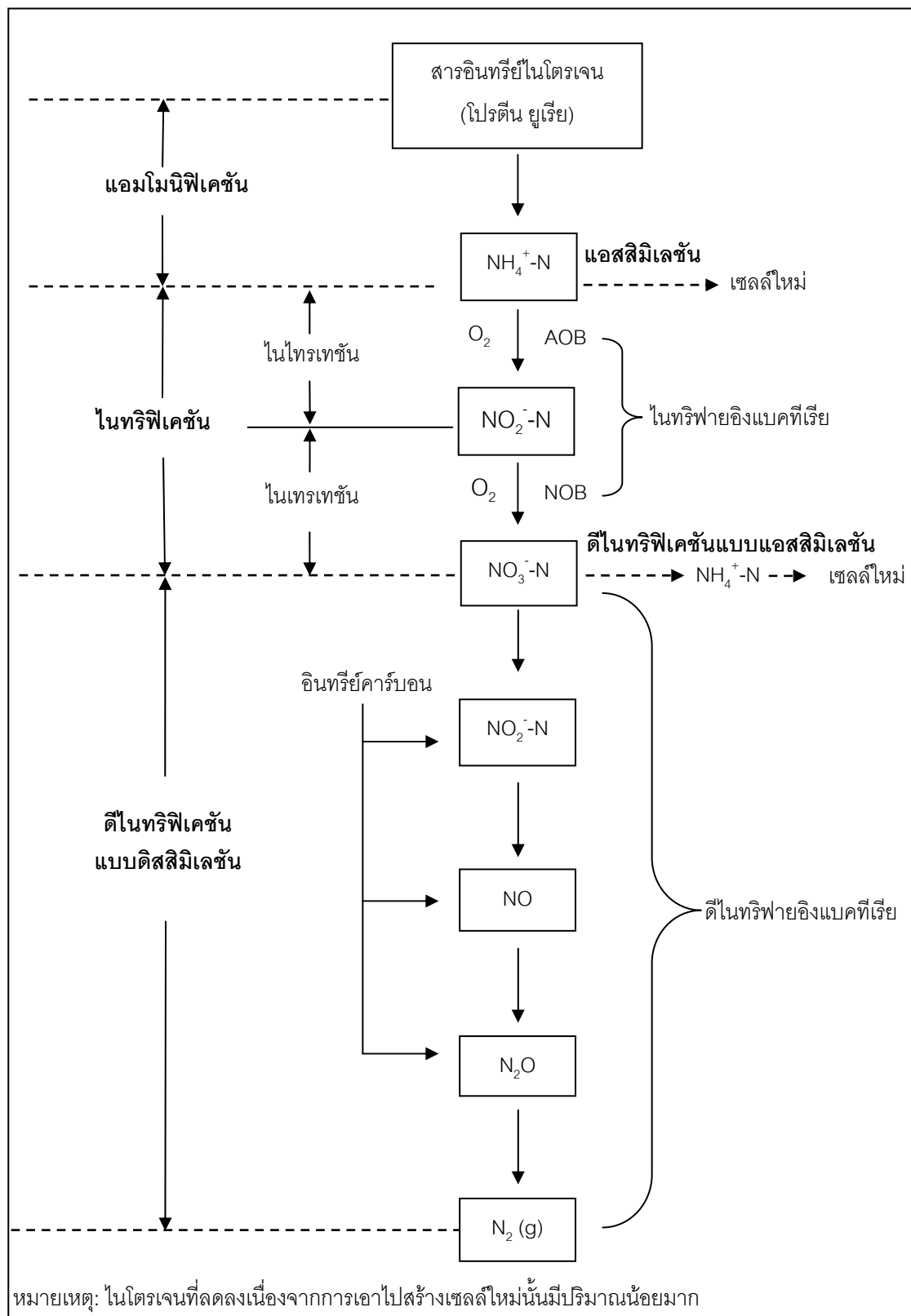
การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในน้ำมีผลทางตรงและทางอ้อมต่อสัตว์น้ำ โดยในทางตรง อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 1 °C จะทำให้กระบวนการเมตาบอลิซึมภายในร่างกายสัตว์น้ำเพิ่มขึ้น 10 เท่า ทำให้สัตว์น้ำมีความต้องการอาหารและออกซิเจนเพิ่มขึ้น ส่วนทางอ้อมมีผลต่อกิจกรรมการย่อยสลายอินทรีย์สารของจุลินทรีย์ จะส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลง และการละลายออกซิเจนในน้ำลดลงเช่นกัน ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำอย่างรวดเร็ว อาจทำให้สัตว์น้ำ เกิดอาการช็อคเกร็งและตายได้ นอกจากนี้อุณหภูมิของน้ำยังมีความสัมพันธ์กับลักษณะสมบัติอื่นๆ ของน้ำ เช่น เมื่ออุณหภูมิน้ำสูงขึ้น จะมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง เป็นต้น

2.3 ไนโตรเจนในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ไนโตรเจนเป็นสารอาหารที่มีความสำคัญในระบบนิเวศน์สัตว์น้ำ เนื่องจากเป็นองค์ประกอบสำคัญของโปรตีนและเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการให้อาหารสำเร็จรูป ไนโตรเจนจะอยู่ในรูปโปรตีนจากอาหารที่ให้และในรูปของเสียที่สัตว์น้ำขับถ่ายออกมา โดยไนโตรเจนจะส่งผลให้เกิดการสะสมของสารประกอบไนโตรเจน 3 ชนิด คือ แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ซึ่งการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนเหล่านี้สามารถอธิบายได้ด้วยวัฏจักรไนโตรเจน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.3.1 วัฏจักรของไนโตรเจนในน้ำ

กระบวนการสำคัญต่างๆ ที่ประกอบกันจนกลายเป็นวัฏจักรไนโตรเจนในแหล่งน้ำแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 โดยวัฏจักรไนโตรเจนในแหล่งน้ำสามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ กระบวนการสร้างแอมโมเนีย กระบวนการแอสสิมิเลชัน กระบวนการไนทริฟิเคชัน และกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 วัฏจักรไนโตรเจนในแหล่งน้ำ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

กระบวนการสร้างแอมโมเนีย (Ammonification)

กระบวนการสร้างแอมโมเนียเป็นปฏิกิริยาที่สารอินทรีย์ในโตรเจนที่อยู่ในรูปของ โปรตีน โพลีเปปไทด์ และกรดอะมิโน ถูกเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนียในโตรเจนที่ละลายน้ำใน ระยะเวลาไม่เกิน 1 ชั่วโมงจากการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งแอมโมเนียในโตรเจนที่เกิดขึ้นเนื่องจาก ปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันนี้จะถูกใช้โดยไนโตรไฟอิงแบคทีเรียในปฏิกิริยาไนโตรฟิเคชันต่อไป อัตรา การเกิดปฏิกิริยานี้ขึ้นอยู่กับปริมาณไนโตรเจนในสารอาหารและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนใน สารอาหาร โดยอัตราส่วนบีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทั่วไปคือ 100:5:1 ดังนั้นหากปริมาณไนโตรเจนในสารอาหารมีไม่เพียงพอต่อการสังเคราะห์เซลล์ก็ จะไม่เกิดปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน แต่หากปริมาณไนโตรเจนมีสูงกว่าที่ใช้ในการสังเคราะห์เซลล์ จะเกิดปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันขึ้น และทำให้มีปริมาณแอมโมเนียในระบบเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน

กระบวนการแอสสิมิเลชัน (Assimilation)

กระบวนการแอสสิมิเลชันเป็นการนำแอมโมเนียในโตรเจนในรูปสารอาหารมาใช้โดย จุลินทรีย์เพื่อการเจริญเติบโต โดยใช้ในการสร้างเซลล์และเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ เพื่อทำการย่อย สลายสารประกอบคาร์บอนอินทรีย์ต่อไป

กระบวนการไนโตรฟิเคชัน (Nitrification)

กระบวนการไนโตรฟิเคชันเป็นการออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนจาก แอมโมเนียให้เป็นไนไตรต์และไนเตรต โดยการทำงานของกลุ่มจุลินทรีย์ออโตโทรฟ (Autotroph) ชนิด *Nitrosomonas* และ *Nitrobacter* ในสภาวะที่มีออกซิเจน

กระบวนการดีไนโตรฟิเคชัน (Denitrification)

กระบวนการดีไนโตรฟิเคชันเป็นการเปลี่ยนไนเตรตเป็นไนไตรต์และก๊าซไนโตรเจน โดยไนเตรตจะถูกลดรูปหรือถูกบำบัดออกจากระบบได้ 2 วิธี คือ

1) วิธีแอสสิมิเลชัน (Assimilatory denitrification) เป็นการนำน้ำที่ของแบคทีเรียบาง ชนิดที่สามารถลดรูปไนเตรตไปเป็นแอมโมเนียและนำไปใช้สังเคราะห์โปรตีน จะเกิดขึ้นเมื่อใน ระบบไม่มีแอมโมเนียหรือมีไม่เพียงพอ ซึ่งมีสัดส่วนน้อยเมื่อเทียบกับวิธีดิสสิมิเลชัน

2) วิธีดิสสิมิเลชัน (Dissimilatory denitrification) แบคทีเรียดีไนโตรฟายอิงที่รับผิดชอบ ในกระบวนการนี้เป็นได้ทั้งกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ (Heterotrophs) และออโตโทรฟ (Autotrophs) แต่ กลุ่มเฮเทอโรโทรฟจะมีบทบาทมากกว่า ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้ต้องการสารอินทรีย์เพื่อเป็นแหล่ง คาร์บอนและใช้ในเทรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยไนเตรตจะถูกรีดิวซ์ให้

เป็นไนไตรต์ (NO_2^-) ไนตริกออกไซด์ (NO) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และก๊าซไนโตรเจน (N_2) ที่สามารถระเหยและปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศได้ (ธงชัย พรธนะสวัสดิ์, 2544)

3.4.3.2 การบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำ

การบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำสามารถเกิดขึ้นผ่าน 3 กระบวนการหลัก ได้แก่ (1) กระบวนการทางกายภาพ มักจะเป็นการกำจัดหรือแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ (ของแข็งแขวนลอย) ออกไป ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนละลายน้ำค่อนข้างต่ำ (2) กระบวนการทางเคมี เป็นการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนโดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมี เพื่อเปลี่ยนรูปสารประกอบไนโตรเจนให้อยู่ในรูปก๊าซไนโตรเจนหรือแอมโมเนียเพื่อปล่อยสู่บรรยากาศ และ (3) กระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดเพราะเป็นวิธีการที่ประหยัดและไม่ยุ่งยากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่น โดยจุดประสงค์หลักของกระบวนการทางชีวภาพ คือ การกำจัดหรือแปรเปลี่ยนสภาพของสารอินทรีย์ไนโตรเจนภายใต้สภาวะที่ใช้ ออกซิเจนและไร้ออกซิเจน โดยปฏิกิริยาหลักที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ได้แก่

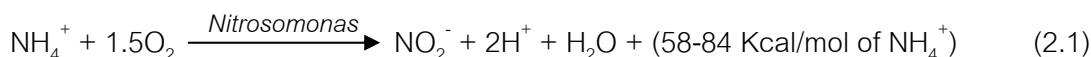
2.3.2.1 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน

แอมโมเนียเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ประเภทโปรตีน โดยทั่วไปจะมี 2 รูป คือแอมโมเนีย (NH_3) และแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) แอมโมเนียในน้ำจะอยู่ในรูปใดนั้นขึ้นกับพีเอช อุณหภูมิ และความเค็มของน้ำ ผลรวมของแอมโมเนียทั้งสองรูป (NH_3 และ NH_4^+) เรียกว่าแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (Total ammonia nitrogen, TAN) ในสภาวะที่มีออกซิเจนแอมโมเนียสามารถถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไนไตรต์และไนเตรตด้วยแบคทีเรียตามธรรมชาติ เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ไนตริฟิเคชัน (Timmons และคณะ, 2002)

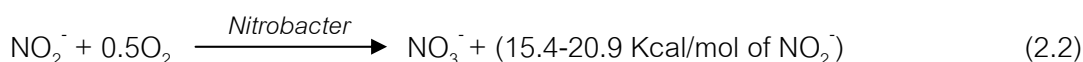
หลักการของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน

เป็นปฏิกิริยาการสร้างไนเตรตจากการที่แอมโมเนียมไอออนถูกออกซิไดซ์ให้มีเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้น (จาก -3 เป็น +3 และ +5) คือไนไตรต์และไนเตรต ผ่านไนไตรต์ที่เป็นสารระหว่างปฏิกิริยา (Intermediate) โดยการทำงานของแบคทีเรีย 2 กลุ่ม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียประเภทออโตโทรฟที่ใช้สารอนินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอน ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ หรือไบคาร์บอเนต และได้พลังงานจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน เมื่อใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน โดยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน 2 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

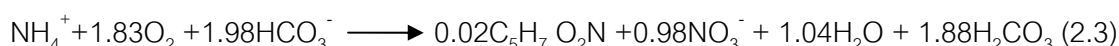
ก) ปฏิกริยาไนไตรเทชัน (Nitritation) เป็นการเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรต์ จากการทำงานของกลุ่มจุลินทรีย์ที่เรียกว่า Ammonia Oxidizing Bacteria หรือ AOB ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียชนิด *Nitrosomonas* ซึ่งแสดงการเกิดปฏิกริยาได้ดังนี้



ข) ปฏิกริยาไนเตรเทชัน (Nitrataion) เป็นการเปลี่ยนไนไตรต์เป็นไนเตรตที่มีความเสถียรที่สุด จากการทำงานของกลุ่มจุลินทรีย์ที่เรียกว่า Nitrite Oxidizing Bacteria หรือ NOB ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียชนิด *Nitrobacter* ซึ่งแสดงการเกิดปฏิกริยาได้ดังนี้



โดยถ้าให้ยิลด์ (Yield) ของ *Nitrosomonas* และ *Nitrobacter* มีค่าประมาณ 0.15 มก.ต่อ มก.แอมโมเนียในโตรเจน และ 0.02 มก.ต่อ มก.ไนไตรต์ในโตรเจน ตามลำดับ สามารถแสดงปฏิกริยาไนทรifikasi ซึ่งรวมการเจริญเติบโตได้ดังนี้



จากปฏิกริยาแสดงว่าการบำบัดแอมโมเนีย 1 มก.ในโตรเจนต่อลิตร จะต้องการออกซิเจนและค่าสภาพต่าง 4.19 และ 7.14 มก.ต่อลิตร ตามลำดับ แต่ถ้าคิดเฉพาะแอมโมเนียที่ถูกออกซิไดซ์เท่านั้นออกซิเจนและค่าสภาพต่างที่ต้องการจะมีค่าประมาณ 4.6 และ 7.07 มก.ต่อลิตรตามลำดับ นั่นคือจะเห็นได้ว่าปฏิกริยาชีวสังเคราะห์ที่ไม่มีผลกระทบเป็นนัยสำคัญต่อการบำบัดในโตรเจนประเภทนี้ (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542)

ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกริยาไนทรifikasi

การออกซิไดซ์แอมโมเนียและไนไตรต์นั้นเกิดขึ้นในสภาวะที่มีออกซิเจน โดยแบคทีเรียกลุ่ม AOB และ NOB ซึ่งมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้แก่

1) อุณหภูมิ

ที่อุณหภูมิสูงกว่า 25 °ซ แบคทีเรียกลุ่ม NOB จะมีจำนวนลดลง เนื่องจากเกิดการแข่งขันกับกลุ่ม AOB เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิไดซ์แอมโมเนียจะมีอัตราการเติบโตดีกว่าจุลินทรีย์ชนิดออกซิไดซ์ไนไตรต์ (Hellenga และคณะ, 1998) แต่โดยทั่วไปแล้วอัตราของปฏิกริยาจะเพิ่มตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ดังสมการของ Arrhenius ที่อุณหภูมิ 5-30 °ซ ดังนี้

$$\mu_m = 0.47 C^{0.098 (T-15)} \quad (2.4)$$

โดย μ_m คือ อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (ต่อวัน)

T คือ อุณหภูมิ (°ซ)

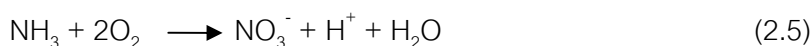
2) พีเอช

ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันมีความไวต่อพีเอชมาก เนื่องจากปฏิกิริยาของไฮโดรเจนไอออน (H^+) และไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) มีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตของไนทริฟายเออร์ อีกทั้งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะใช้สภาพต่างจากน้ำเสีย ทำให้ค่าพีเอชลดต่ำลง

ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมระดับพีเอชให้เหมาะสม โดยพีเอชที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 7.5-8.5 หากพีเอชเริ่มต่ำกว่า 7.0 ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะถูกยับยั้ง เนื่องจากเกิดก๊าซไนตริกออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ขึ้น (Ling และ Chen, 2005)

3) ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ

เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากต่อการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของแบคทีเรีย การเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์มักเกิดขึ้นเมื่อค่าออกซิเจนละลายน้ำไม่ต่ำกว่า 2 มก.ต่อลิตร แต่สามารถยอมรับได้ถึงค่า 1 มก.ต่อลิตร (Wetzel, 2001 อ้างถึงใน Camargo และคณะ, 2005) โดยจากสมการที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าการออกซิไดซ์แอมโมเนีย 1 โมล ต้องใช้ออกซิเจน 2 โมล



4) อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน

การทำงานของกลุ่มแบคทีเรียในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันจะถูกยับยั้งเมื่ออัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงขึ้น จากการศึกษาของ Satoh และคณะ (2000) พบว่าเมื่อปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่ให้กับระบบเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราไนตริฟิเคชันลดลง เนื่องจากแบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟจะเจริญเติบโตแข่งกับไนทริไฟอิงแบคทีเรีย และมีอัตราการเจริญเติบโตที่สูงกว่าไนทริไฟอิงแบคทีเรีย (Michaud และคณะ, 2006) นอกจากนี้แบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟยังมีค่าyieldมากกว่าไนทริไฟอิงแบคทีเรียถึง 5 เท่า (Ling และ Chen, 2005)

5) การยับยั้งจากสารที่เป็นพิษ

สารประกอบอินทรีย์บางชนิดเป็นตัวยับยั้งการเกิดไนตริฟิเคชันได้ เช่น thiourea, 8-hydroxyquinoline, phenol, skatol และ thiosemicarbazine เป็นต้น รวมถึงความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่สามารถยับยั้งอัตราการเกิดไนตริฟิเคชันได้ (Chen และคณะ, 1971 อ้างถึงใน ชฎารัตน์ อนันต์, 2540) นอกจากนี้ยังรวมถึงโลหะหนักบางตัว เช่นปรอท นิกเกิล โครเมียม ทองแดง สังกะสี เป็นต้น

6) พื้นที่ผิวสำหรับแบคทีเรีย

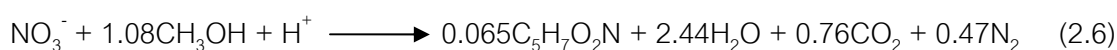
การเพิ่มที่ผิวในการยึดเกาะของแบคทีเรียสำหรับกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันและไนตริฟิเคชันเป็นการกระตุ้นให้เกิดการเพิ่มจำนวนและการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยผลของพื้นที่ผิวยึดเกาะของแบคทีเรียต่อการสลายสารอินทรีย์มีข้อดี 2 ประการ คือ เมื่อพื้นที่ผิวสำหรับยึดเกาะมากขึ้นทำให้ปริมาณแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น และแบคทีเรียที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มจำนวนมาก ยึดเกาะอยู่บนพื้นที่ผิวทำให้แบคทีเรียสามารถนำสารอินทรีย์มาใช้ได้มาก เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับสูง (Spotte, 1979 อ้างถึงใน รัชญา พันฤทธิ์ดำ, 2541)

2.3.2.2 ปฏิริยาดีไนตริฟิเคชัน

เป็นปฏิริยาการเปลี่ยนไนเตรต ไนไตรต์ ให้เป็นก๊าซไนโตรเจนหรือไนตรัสออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ โดยอาศัยดีไนตริฟิอิงแบคทีเรีย (Denitrifying bacteria) ซึ่งสามารถใช้ไนเตรต ไนไตรต์ ไนตริกออกไซด์ และซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนในสภาวะไร้ออกซิเจน

หลักการของปฏิริยาดีไนตริฟิเคชัน

ในระหว่างที่มีการหายใจโดยใช้ออกซิเจนเป็นสารสุดท้ายในการรับอิเล็กตรอน แบคทีเรียผลิตพลังงานได้ประมาณ 886 กิโลแคลอรีต่อโมลกลูโคส 1 โมลที่ใช้ไป แต่ถ้าใช้ไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน แบคทีเรียจะสามารถผลิตพลังงานได้เพียง 570 กิโลแคลอรีต่อโมลกลูโคส ด้วยเหตุนี้แบคทีเรียจึงเลือกที่จะใช้ออกซิเจนมากกว่าไนเตรตเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยปฏิริยาดีไนตริฟิเคชันควรเกิดอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจนเพื่อให้มั่นใจว่าแบคทีเรียต้องใช้ไนเตรตเป็นสารรับอิเล็กตรอนอย่างแน่นอน (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542) แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในปฏิริยาดีไนตริฟิเคชันส่วนใหญ่เป็นกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ เช่น *Pseudomonas*, *Alkaligenes* และ *Bacillus* เป็นต้น ปฏิริยาดีไนตริฟิเคชันที่ใช้เมทานอลเป็นแหล่งคาร์บอนหรือเป็นสารให้อิเล็กตรอนอาจแสดงได้ด้วยสมการเคมี (McCarty และคณะ, 1969) ดังนี้



แบคทีเรียจะใช้เมทานอลเพื่อเปลี่ยนไนเตรตเป็นก๊าซไนโตรเจนและใช้ในการสังเคราะห์เซลล์ โดยการรีดิวซ์ไนเตรต 1 มก. จะต้องใช้เมทานอล 2.47 มก. จากสมการ (2.6) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ($\text{CH}_3\text{OH}/\text{NO}_3^- - \text{N}$) ตามหลักปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry) มีค่าเท่ากับ 2.47

ส่วนการวิเคราะห์จลนศาสตร์ของดีไนริฟิเคชัน (มันลิน ตันกุลเวศม์, 2542) แสดงด้วยสมการโมโนด (Monod equation) ดังนี้

$$\mu_D = \frac{\mu_m (S)(NO_3^-)}{[(K_{NO_3^-} + NO_3^-)(K_S + S)]} \quad (2.7)$$

เนื่องจาก $K_{NO_3^-}$ ของระบบมีค่าประมาณ 0.16 มก.ไนเตรตไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งนับว่าต่ำมาก จลนศาสตร์ของดีไนริฟิเคชันจึงไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไนเตรต จนอาจกล่าวได้ว่าดีไนริฟิเคชันมีอัตราเร็วของปฏิกิริยาเป็นแบบลำดับศูนย์เมื่อเทียบกับไนเตรต ในเมื่อความเข้มข้นของไนเตรตสูงกว่า 1-2 มก.ต่อลิตรขึ้นไป ทำให้ได้สมการใหม่ดังนี้

$$\mu_D = \frac{\mu_m (S)}{(K_S + S)} \quad (2.8)$$

ระบบที่มีการเติมเมทานอลเป็นแหล่งคาร์บอนจะมีค่า K_S ประมาณ 0.15 มก.ต่อลิตร (วัดในทอมซีไอดี) โดยยิลด์ที่แท้จริง (Y_g) ของสภาวะแอน็อกซิก (Anoxic) จะมีค่าต่ำกว่าระบบเติมออกซิเจน เนื่องจากได้พลังงานจากการย่อยสลายอินทรีย์น้อยกว่า ในกรณีที่ใช้เมทานอลเป็นแหล่งคาร์บอนพบว่าค่ายิลด์ที่แท้จริงมีค่าประมาณ 0.16 มก.ต่อซีไอดีที่ย่อยหมดไป อัตราเร็วของปฏิกิริยาดีไนริฟิเคชัน (Q_D) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการเจริญเติบโตของดีไนริฟิอิงแบคทีเรียดังนี้

$$Q_D = \frac{\mu_D}{Y_g} \quad (2.9)$$

ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาดีไนริฟิเคชัน

เช่นเดียวกับในกรณีของปฏิกิริยาไนริฟิเคชัน ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมมีบทบาทสำคัญมากในการกำหนดอัตราการเจริญเติบโตของดีไนริฟิอิงแบคทีเรีย โดยมีปัจจัยหลักที่สำคัญดังต่อไปนี้

1) ชนิดของแหล่งคาร์บอน

แหล่งคาร์บอนสำหรับปฏิกิริยาดีไนริฟิเคชัน ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ซึ่งสามารถแบ่งปฏิกิริยาดีไนริฟิเคชันออกเป็น 2 ประเภท คือ

ก. Substrate Nitrate Denitrification เป็นการเจริญเติบโตของเซลล์แบบปกติที่ได้ออกซิเจนจากไนเตรต โดยใช้สารอินทรีย์คาร์บอนจากแหล่งใดก็ได้ที่ไม่ใช่คาร์บอนภายในเซลล์จุลินทรีย์ เช่น เมทานอล กรดอะซิติก กลูโคส กลีเซอรอล และกรดแลคติก เป็นต้น (Akunna และคณะ, 1993) ซึ่งแต่ละชนิดจะให้พลังงานแก่แบคทีเรียที่แตกต่างกัน ทำให้อัตราการเกิด

ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นไม่เท่ากันด้วย โดยการเติมแหล่งคาร์บอนให้กับระบบดีไนทริฟิเคชันเพื่อรีดิวซ์ไนเตรตเป็นก๊าซไนโตรเจนที่สมบูรณ์ มักจะใช้อัตราส่วนซีไอดีต่อไนเตรตไนโตรเจน (COD/NO₃⁻-N) ในช่วง 3.0-6.0 (Narcis และคณะ, 1979; Skinde และ Bhagat, 1982) นอกจากนี้ McCarty และคณะ (1969) (อ้างถึงใน Hamlin และคณะ, 2008) ได้เปรียบเทียบแหล่งคาร์บอนสำหรับปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน 5 ชนิด ได้แก่ เมทานอล เอทานอล กรดอะซิติก น้ำตาล และอะซิโตน ซึ่งสรุปว่าเมทานอลมีความเหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันมากที่สุดเนื่องจากมีราคาถูกที่สุด รวมถึงทำการขนส่ง การเก็บรักษา และการเติมให้กับระบบสามารถทำได้ง่าย โดยเมทานอลยังเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนที่คนทั่วไปนิยมเติมให้กับน้ำอีกด้วย (มันลิน ตันทุลเวศม์, 2542) และการเติมเมทานอลในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเพิ่มขึ้น 5-10 เท่า โดยไม่มีผลกระทบต่อสัตว์น้ำ (Delwiche, 1981 อ้างถึงใน รัญญา พันฤทธิ์ดำ, 2541) ซึ่งการเติมปริมาณเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในระบบดีไนทริฟิเคชัน (Wu และคณะ, 2007) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$C_m = 2.47N_0 + 1.53N + 0.87D \quad (2.8)$$

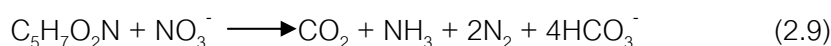
โดย C_m คือ ปริมาณของเมทานอลบริสุทธิ์ (ไม่เจือจาง) ที่เติมให้ระบบ (มก.ต่อลิตร)

N_0 คือ ความเข้มข้นของไนเตรต (มก.ต่อลิตร)

N คือ ความเข้มข้นของไนไตรต์ (มก.ต่อลิตร)

D คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำ (มก.ต่อลิตร)

ข. Endogenous Nitrate Denitrification เป็นปฏิกิริยาที่แสดงถึงการย่อยสลายตัวของจุลินทรีย์เอง เกิดขึ้นเมื่อในระบบที่ไม่มีแหล่งคาร์บอนภายนอก จึงต้องใช้แหล่งคาร์บอนภายในเซลล์จุลินทรีย์ ดังสมการ



เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาทั้งสองประเภทจะเห็นได้ว่า Substrate Nitrate Denitrification เป็นปฏิกิริยาการเจริญเติบโตของเซลล์แบบปกติที่ใช้ออกซิเจนจากไนเตรต โดยเมื่อแหล่งคาร์บอนในระบบลดน้อยลงจะต้องเติมสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อคงระบบให้เกิดกระบวนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพมากที่สุด (มันลิน ตันทุลเวศม์, 2542)

2) อุณหภูมิ

ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันอยู่ระหว่าง 35-50 °C โดยจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 30 °C และสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำช่วง

5-10 °ซ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอัตราดีไนทริฟิเคชันก็จะเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน โดย Carrera และคณะ (2003) รายงานว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 6 เป็น 20 °ซ อัตราดีไนทริฟิเคชันจะเพิ่มขึ้นถึง 9 เท่า และ Oleszkiewicz และ Berquist (1988) พบว่าเมื่อลดอุณหภูมิจาก 15 เป็น 2 °ซ อัตราดีไนทริฟิเคชันจะลดลง 7 เท่า

3) ออกซิเจนละลายน้ำ

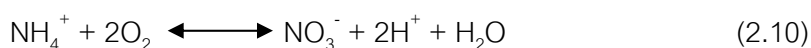
ในสภาวะที่มีออกซิเจนดีไนทริฟิอิงแบคทีเรียจะเลือกใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนไนเทรต เพราะพลังงานที่ได้จากการออกซิไดซ์แหล่งคาร์บอนด้วยไนเทรตจะมีค่าน้อยกว่าการออกซิไดซ์แหล่งคาร์บอนด้วยออกซิเจน ดังนั้นในสภาวะที่มีออกซิเจนประมาณ 0.1-0.2 มก.ต่อลิตร ดีไนทริฟิอิงแบคทีเรียจึงเลือกไนเทรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน หากปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้เอนไซม์ไนโตรเจนออกไซด์รีดักเตส (Nitrogen oxide reductase) ถูกยับยั้ง ส่งผลทำให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันชะงักหรือเกิดช้าลง (Payne, 1973)

4) พีเอช

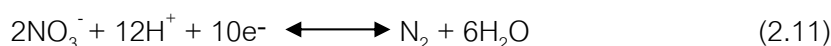
ช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันคือ 7.0-7.5 แต่ในกรณีที่ค่าพีเอชสูงกว่า 8.0 และต่ำกว่า 6.0 อัตราดีไนทริฟิเคชันจะเกิดได้ช้าลง

5) ค่าสภาพด่าง

ค่าสภาพด่างมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอชโดยตรง โดยน้ำที่จะเข้าสู่กระบวนการบำบัดไนเทรตจะพบว่ามีค่าสภาพด่างต่ำทำให้ค่าพีเอชลดลง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันที่เปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนเทรต ดังสมการที่ 2.10



โดยค่าสภาพด่างจะลดลง (Alkalinity loss) เท่ากับ 2 มล.อีควิวเลนต์ต่อโมลแอมโมเนีย หรือ 7.14 มก.แคลเซียมคาร์บอเนตต่อ มก.แอมโมเนียไนโตรเจน ตามธรรมชาติค่าสภาพด่างของน้ำในปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น เนื่องจากแบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟจะปลดปล่อยไฮดรอกซิลไอออนออกมา ซึ่งค่าความเป็นด่างที่ต้องการในปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันตามทฤษฎีจะมีค่าเท่ากับ 1 มล.อีควิวเลนต์ต่อโมลไนเทรต หรือ 3.57 มก.แคลเซียมคาร์บอเนตต่อ มก.ไนเทรตไนโตรเจน (Oh และคณะ, 2001; Kleerebezem และ Mendez, 2002)



หากสภาพด่างที่ต้องการในปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันมีค่าน้อย สามารถปรับความเป็นด่างให้เพิ่มสูงขึ้นด้วยวิธีการเติมสารเคมีชนิดต่างๆ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เป็นต้น

6) ตัวยับยั้ง

ตัวยับยั้งปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่สำคัญ ได้แก่

- ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันแบบไม่สมบูรณ์ โดยจะมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ (Lee และคณะ, 2000) ไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นสารยับยั้งเอนไซม์ไนตรัสออกไซด์รีดักเตส (Nitrous oxide reductase) ทำให้ปริมาณไนตริกออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ลดลง เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการสะสมซัลไฟด์ในดินตะกอน

- อะเซทิลีน (Acetylene) เป็นสารยับยั้งเอนไซม์ไนตรัสออกไซด์รีดักเตส เช่นเดียวกันกับซัลไฟด์

- ไฮยาไนด์ (Cyanide) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นสารยับยั้งปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ไนตรัสออกไซด์เป็นก๊าซไนโตรเจน (Knowles, 1982 อ้างถึงใน ธรรมนูญพันธุ์สัตว์น้ำ, 2541) เป็นต้น

2.4 ปลานิลและการเพาะเลี้ยงปลานิล

ปลานิลเป็นปลาเศรษฐกิจที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย เพราะเป็นปลาที่เพาะเลี้ยงง่ายและปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดี ปลานิลไม่ใช่ปลาพื้นเมืองของไทย แต่นำเข้ามาจากประเทศญี่ปุ่น โดยมีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปแอฟริกา ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 สรีรวิทยาและอนุกรมวิธานของปลานิล

ปลานิลเป็นปลาน้ำจืดชนิดหนึ่งในวงศ์ปลาหมอสี (Cichlidae) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Oreochromis niloticus* (ชื่อเดิมคือ *Tilapia nilotica*) รูปร่างของปลานิลคล้ายปลาหมอเทศ แตกต่างกันว่าปลานิลมีลายสีดำและจุดสีขาวสลับกันไป บริเวณครีบหลัง ครีบกัน และลำตัวมีสีเขียวปนน้ำตาล มีลายดำพาดขวางตามลำตัว มีความยาวประมาณ 10-30 ซม.

การจัดอันดับอนุกรมวิธานของปลานิลเป็นดังนี้

Kingdom: Animalia

Phylum: Chordata

Class: Teleostei

Order: Perciformes

Family: Cichlidae

Genus: *Oreochromis*

Species: *Oreochromis niloticus*

ปลานิลเป็นปลาประเภทกินพืชและสัตว์เป็นอาหาร รวมทั้งแบคทีเรียและพืชน้ำชนิดต่างๆ เช่น สาหร่ายแพลงก์ตอนพืชและแพลงก์ตอนสัตว์ ปกติปลานิลชอบอาศัยอยู่รวมกันเป็นฝูงอยู่ได้ทั้งแหล่งน้ำจืดและแหล่งน้ำกร่อย เนื่องจากมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ดี สามารถอาศัยอยู่ในแหล่งน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงกว้างมาก คือ 11-42 °C ปลานิลจะเริ่มตายในแหล่งน้ำที่มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5-5.5 นอกจากนี้ปลานิลยังมีความสามารถทนอยู่ได้ปกติในน้ำที่มีความเค็มสูงสุด 20 พีพีที

2.4.2 การเพาะเลี้ยงปลานิล

การเพาะเลี้ยงปลานิลจำแนกเป็น 3 ลักษณะ (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536) ได้แก่

1) การเลี้ยงแบบยังชีพ (Extensive method) เป็นการเลี้ยงเพื่อบริโภคในครัวเรือนเป็นหลัก โดยเลี้ยงปลาที่ความหนาแน่น 5,000-20,000 ตัวต่อเฮกเตอร์ (0.5-2 ตัวต่อตร.ม.) การเลี้ยงส่วนใหญ่ใช้วิธีการใส่ปุ๋ยไม่มีการให้อาหารเสริม

2) การเลี้ยงแบบกึ่งพัฒนา (Semi-intensive method) เป็นการเลี้ยงโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการบริโภคและจำหน่ายส่วนที่เหลือจากการบริโภค มีการใช้ปุ๋ยเพื่อเพิ่มอาหารธรรมชาติอย่างเดียวหรือร่วมกับอาหารเสริมบ้างเล็กน้อย โดยความหนาแน่นของปลา 20,000-40,000 ตัวต่อเฮกเตอร์ (2-4 ตัวต่อตร.ม.)

3) การเลี้ยงแบบพัฒนา (Intensive method) เป็นการเลี้ยงเพื่อการจำหน่ายเป็นหลัก ปลาที่ได้จะต้องมีขนาดใหญ่ตามความต้องการของตลาด โดยจะให้อาหารสำเร็จรูปโปรตีนสูงเป็นหลัก และปลานิลแปลงเพศเป็นปลาที่เหมาะสมในการนำมาเลี้ยงมากที่สุด ความหนาแน่นของปลา 40,000-10,000 ตัวต่อเฮกเตอร์ (4-10 ตัวต่อตร.ม.)

โดยปัจจัยที่มีผลต่อการกินอาหารของปลา (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536) ได้แก่

1) อุณหภูมิ ปลานิลจะกินอาหารได้ดีเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงกว่า 24 °C และจะหยุดกินเมื่ออาหารอุณหภูมิต่ำกว่า 15 °C และจะตายเมื่ออุณหภูมิเริ่มต่ำกว่า 8 °C

2) ขนาด ปลาที่มีขนาดเล็กจะกินอาหารมากกว่าปลาที่มีขนาดใหญ่ เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับน้ำหนักตัวแล้วในปลาชนิดเดียวกัน ดังนั้นปลาที่มีขนาดเล็กจะเจริญเติบโตและมีอัตราแลกเนื้อดีกว่าปลาขนาดใหญ่

3) ลักษณะสมบัติของน้ำ ในน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนละลายอยู่ในระดับสูงกว่า 3 มก. ต่อลิตร ปลาจะกินอาหารอย่างปกติ แต่หากปริมาณออกซิเจนลดลงการย่อยอาหารของปลาจะใช้เวลานานกว่าปกติ

4) จำนวนความถี่ในการให้อาหาร ปลาแต่ละชนิดหรือชนิดเดียวกันแต่มีอายุต่างกัน ปลาที่มีขนาดเล็กควรให้อาหารแต่ละครั้งในปริมาณน้อยแต่บ่อยครั้งกว่าปลาขนาดใหญ่

ลักษณะสมบัติของน้ำในการเลี้ยงปลานิล

1) พีเอช น้ำที่เหมาะสมแก่การเลี้ยงปลาไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชเกินกว่า 2 หน่วยในรอบวัน โดยพีเอชในช่วง 4-6 และ 9-11 ปลาจะเจริญเติบโตช้าและอ่อนแอ ปลานิลจะเจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอช 6.5-8.5

2) ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในบ่อเลี้ยงปลาที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 5 มก.ต่อลิตร จนถึงจุดอิ่มตัว ถ้าปริมาณออกซิเจนต่ำอยู่เป็นเวลานานจะทำให้อัตราการเจริญเติบโตไม่ดี และหากมีค่าต่ำกว่า 1 มก.ต่อลิตร สัตว์น้ำจะตายภายในไม่กี่ชั่วโมง โดยปลานิลสามารถทนต่อสภาพน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำได้ดีช่วง 0-0.4 มก.ต่อลิตร แต่ถ้าออกซิเจนต่ำกว่า 0.3 มก.ต่อลิตร ปลาจะว่ายขึ้นมาเพื่อมาใช้ออกซิเจนที่ผิวน้ำ ทำให้เกิดอาการเครียดและลดการเจริญเติบโต ดังนั้นปริมาณออกซิเจนที่ผิวน้ำไม่ควรต่ำกว่า 0.3 มก.ต่อลิตร

3) อุณหภูมิ ปลานิลทนต่ออุณหภูมิได้ในช่วงกว้างตั้งแต่ 11-42 °ซ แต่ถ้าอุณหภูมิ น้ำต่ำกว่า 10 °ซ หรือสูงกว่า 42 °ซ ปลาจะอยู่ได้ไม่นานและทำให้ปลาตายได้ ปลาจะไม่กินอาหาร และไม่เจริญเติบโตเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 15 °ซ และจะไม่วางไข่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 °ซ ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมในการวางไข่ของปลาอยู่ในช่วง 26-29 °ซ ในขณะที่อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตอยู่ในช่วง 19-28 °ซ

4) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน แบคทีเรียบางชนิดสามารถรีดิวซ์ซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์ได้ดังสมการที่ 2.12



ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นมีบทบาทเกี่ยวข้องกับสมดุลเคมีของไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งอยู่ในน้ำ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม อาจพบซัลไฟด์รูปต่างๆ ในน้ำ โดยระดับพีเอชจะเป็นตัวกำหนดชนิดและความเข้มข้น น้ำที่มีพีเอชต่ำจะพบไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีกลิ่นเหม็นมากที่สุด น้ำที่มีพีเอชเป็นกลางจะพบไฮโดรเจนซัลไฟด์ไอออน (HS^-) ไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่านั้นที่เป็นพิษต่อปลา ความเป็นพิษจะคล้ายคลึงกับการขาดออกซิเจน แต่ความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์จะรุนแรงกว่าการขาดออกซิเจน โดยจะไปสกัดกั้นการแพร่ของออกซิเจนในเซลล์ทำให้ปริมาณแลกเตท (Lactate) ในเลือดสูง ระดับความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทำให้ปลาตายได้จะอยู่ในช่วง 0.01-0.05 พีพีเอ็ม (ชโล ลิมสุวรรณและพรเลิศ จันทรัชชกุล, 2547)





5) ความกระด้าง ไม่ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำ แต่ความกระด้างของน้ำมีความสัมพันธ์กับค่าความเป็นด่างและพีเอช นอกจากนี้ความกระด้างของน้ำยังช่วยลดความเป็นพิษของโลหะหนัก ดังนั้นน้ำที่มีความกระด้างปานกลาง (75-150 มก.ต่อลิตร) หรือสูง (150-300 มก.ต่อลิตร) จึงมีความเหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ

6) ค่าสภาพด่าง น้ำที่ใช้ในการเลี้ยงปลาควรมีค่าสภาพด่างมากกว่า 20-40 มก.ต่อลิตร ของแคลเซียมคาร์บอเนต (มันลิน ดันทุลเวสท์และไพพรรณ พรประภา, 2539) หรือควรอยู่ระหว่าง 200-300 มก.ต่อลิตร ของแคลเซียมคาร์บอเนต ในกรณีที่เติมปุ๋ยในบ่อปลา (Wetzel, 2001 อ้างถึงใน Camargo และคณะ, 2005)

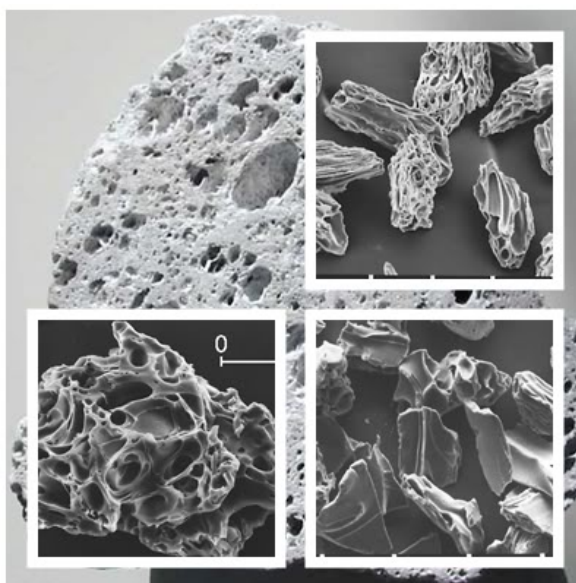
2.5 ระบบบำบัดและหมุนเวียนน้ำแบบยึดเกาะกับตัวกรอง (Attached-Growth System)

ระบบแบบยึดเกาะตัวกลางเป็นการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพโดยอาศัยจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตแบบยึดเกาะบนผิววัสดุตัวกลาง ซึ่งวัสดุตัวกลางที่ใช้อาจเป็นหิน พลาสติก หรือวัสดุอื่นๆ เช่น เชือก ไนลอน ตาข่าย เป็นต้น แต่วัสดุที่ใช้จะต้องมีลักษณะสมบัติเฉื่อย ไม่ทำปฏิกิริยา หรือมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ข้อดีของการใช้ระบบนี้คือ จุลินทรีย์ในระบบที่ยึดเกาะอยู่บนวัสดุตัวกลางอย่างแน่นหนาจะไม่หลุดออกนอกถังปฏิกรณ์ได้ง่ายเหมือนระบบจุลินทรีย์แขวนลอย นอกจากนี้ยังพบว่าระบบจุลินทรีย์ที่ยึดเกาะบนตัวกลางนี้สามารถ Re-startup หรือ Recovery ภายหลังจากที่ระบบล้มเหลวหรือหยุดการเดินระบบได้เร็วกว่าระบบจุลินทรีย์แขวนลอย อย่างไรก็ตามข้อเสียของระบบนี้ยังคงอยู่ที่ต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากค่าวัสดุตัวกลางที่ใช้ และการใช้วัสดุตัวกลางที่มีขนาดไม่สม่ำเสมออาจส่งผลให้เกิดปัญหาในเรื่องของการอุดตันได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้คัดเลือกวัสดุเพื่อนำมาใช้สำหรับการทดลอง 3 ประเภท ได้แก่ ทราช หินพัมมิส และทรายเทียม โดยมีรายละเอียดดังนี้

ทราย (sand) เป็นหินแข็งที่แตกแยกออกมาจากก้อนหินใหญ่ โดยทรายจะแยกตัวออกมาได้เองตามธรรมชาติ ทรายมีขนาดระหว่าง 1/12 นิ้วถึง 1/400 นิ้ว ถ้ามีขนาดเล็กกว่านี้จะมีสภาพเป็นฝุ่นทราย จะประกอบด้วยแร่ควอตซ์หรือหินปะชอลต์ ขนาดของทรายแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ ทรายหยาบ ทรายกลาง และทรายละเอียด ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั่วไปในงานการก่อสร้าง และอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การผลิตกระจก แก้ว เป็นต้น

หินพัมมิส (Pumice rock) คือ หินภูเขาไฟชนิดหนึ่งจัดอยู่ในประเภทหินอัคนี ลักษณะเป็นหินสีเทา สากเหมือนกระดาศทราย มีรูพรุนอยู่ภายในเป็นจำนวนมาก ดังรูปที่ 2.3 แสดงลักษณะ

ของหินพัมมิสและรูพรุนภายในหินซึ่งเป็นท่อขนาดเล็กที่เกิดจากฟองก๊าซและไอน้ำภายในหินถูกรีดตัวขณะเคลื่อนผ่านปล่องภูเขาไฟแล้วเย็นตัวแข็งเป็นหินอย่างรวดเร็ว การมีรูพรุนจึงทำให้หินลอยน้ำได้ในระยะหนึ่ง แต่เมื่อแช่น้ำไปนานก็จะจมลงเอง จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าลักษณะส่วนประกอบของหินพัมมิสนั้นจะมีความแตกต่างกันในแต่ละท้องถิ่นขึ้นอยู่กับวัตถุดิบกำเนิด ซึ่งก็คือลาวาภูเขาไฟ ส่วนประกอบปลีกย่อยจะมีความแตกต่างกันไป แต่ธาตุซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักจะมีลักษณะคล้ายกันคือ ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินา ซึ่งหินพัมมิสที่มีขนาดอนุภาคต่างกันจะมีพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนภายในแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.2 (นิคม จิ้งอยู่สุข, 2540)



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างรูพรุนในหินพัมมิสจากเขาพนมฉัตร จังหวัดลพบุรี (กำลังขยาย 70x)

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของสสารและแร่ธาตุของหินพัมมิสเขาพนมฉัตร จังหวัดลพบุรี (นิคม จ้างอยู่สุข, 2540)

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละโดยน.)	แร่ธาตุ	ปริมาณ (พิพิเอ็ม)
ซิลิกา (SiO ₂)	70.00	สารหนู (As)	5
อะลูมินา (Al ₂ O ₃)	13.66	ทองแดง (Cu)	33
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	1.26	แคดเมียม (Cd)	-
ฟอสฟอรัสเพนด็อกไซด์ (P ₂ O ₅)	0.017	ปรอท (Hg)	0.5
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	3.88	แมงกานีส (Mn)	294
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.20	โมลิบดีนัม (Mo)	-
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	1.33	ตะกั่ว (Pb)	15
โปแตสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	5.39	เซเลเนียม (Se)	-
ความชื้น (H ₂ O)	0.97	สังกะสี (Zn)	72
ส่วนที่หายไปหลังการเผา (Loss on Ignition)	5.75		

ตารางที่ 2.2 พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนภายในหินพัมมิส (นิคม จ้างอยู่สุข, 2540)

ขนาดของอนุภาค (เมช)	พื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม)	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)
40-60	7.3472	85.7188
60-80	12.8233	82.2165
80-100	13.0668	75.0666

หินพัมมิสต่างจากหินภูเขาไฟประเภทอื่น คือ เป็นหินที่มีลักษณะเบา สามารถนำมาใช้งานได้ง่าย ไม่ทำให้ลักษณะสมบัติของน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น ค่าพีเอช กลิ่น สี และมีแร่ธาตุเหล็กในปริมาณน้อยจึงเหมาะต่อการนำไปใช้ประโยชน์ เนื่องจากธาตุเหล็กจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและก่อให้เกิดสีที่ไม่พึงประสงค์ได้ ในประเทศไทยจะพบหินพัมมิสบริเวณชายทะเลทั่วไป โดยจังหวัดระยองเป็นจังหวัดที่มีปริมาณหินพัมมิสมากที่สุด แต่มีปริมาณไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้จึงต้องนำเข้าจากต่างประเทศ เช่น อินโดนีเซีย ญี่ปุ่น เป็นต้น หินพัมมิสสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น

1. อุตสาหกรรมฟอกเสื้อผ้าและกางเกงยีนส์ ปัจจุบันอุตสาหกรรมประเภทนี้ได้ใช้หินพัมมิสอย่างแพร่หลายในขั้นตอนการฟอก

2. อุตสาหกรรมเพาะปลูกไม้ดอกไม้ประดับ หินพัมมิสเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะกับการปลูกไม้ดอกไม้ประดับลงดินทุกประเภท สามารถอุ้มน้ำและปุ๋ยต่างๆ ได้ดี เก็บกักความชื้นไว้ได้

นาน ทำให้ไม่สูญเสียน้ำหรือปุ๋ย และไม่ต้องเปลี่ยนวัสดุตลอดอายุการใช้งานในกระถาง ซึ่งแตกต่างจากกาบมะพร้าว อิฐมอญ หรือวัสดุปลูกประเภทอื่นที่จะสูญเสียไปตามธรรมชาติ นอกจากนี้ความพรุนยังช่วยให้การถ่ายเทอากาศภายในดินดีขึ้น ช่วยปรับปรุงดินในพื้นที่ที่เป็นดินเหนียวจะช่วยให้ดินร่วนซุย รากพืชสามารถเจริญเติบโตได้ง่าย เป็นต้น

ทรายเทียม (Vermiculite) แปลว่า “Little Worm” ซึ่งมาจากลักษณะคล้ายตัวหนอน มีสีน้ำตาลหรือสีเทา ความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2.3-2.7 กรัมต่อลบ.ซม. มีองค์ประกอบที่สำคัญคือ แมกนีเซียม อะลูมิเนียม เหล็ก และซิลิกา (ดังตารางที่ 2.3) มีน้ำหนักเบาโดยปริมาตร 1 ลบ.ม. จะมีน้ำหนักเพียง 80 กก. ทรายเทียมสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในหลายๆ ด้าน เช่น ผสมในคอนกรีต ทำให้มีน้ำหนักเบาและเป็นฉนวนป้องกันความร้อน ทำวัสดุดูดซับเสียง เป็นต้น ทรายเทียมเป็นวัสดุที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ เช่น อินเดีย สหรัฐอเมริกา เป็นต้น



รูปที่ 2.4 ลักษณะรูปร่างของทรายเทียม

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบของสารและแร่ธาตุของทรายเทียม

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
อะลูมินา (Al_2O_3)	43.48
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	14.39
เฟอร์รัสออกไซด์ (FeO)	12.82
ซิลิกา (SiO_2)	11.92
ความชื้น (H_2O)	17.39

แหล่งที่มา : <http://webmineral.com/data/Vermiculite.shtml> [19 มกราคม 2553]

2.6 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดมาใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อลดปริมาณการใช้น้ำ และลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากการถ่ายน้ำเสียจากบ่อเพาะเลี้ยงลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดดังกล่าวจึงจำเป็นต้องมีระบบบำบัดคุณภาพน้ำเป็นส่วนประกอบสำคัญ โดยระบบบำบัดในเทรตด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันเป็นส่วนหนึ่งที่จะช่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อเปลี่ยนในเทรตเป็นก๊าซไนโตรเจนได้ ซึ่งตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดในเทรตในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ มีดังนี้

2.5.1 การเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน

การเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาและก่อให้เกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์ ทำให้ในเทรตเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซไนโตรเจนและระเหยออกจากแหล่งน้ำได้ โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันขึ้นกับชนิดของแหล่งคาร์บอนและชนิดของแบคทีเรีย (Payne, 1973)

Chiu และ Chung (2003) ทำการศึกษาอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเพื่อเปลี่ยนในเทรตเป็นก๊าซไนโตรเจนในกระบวนการดีไนทริฟิเคชันทางชีวภาพ โดยใช้วิธีการวัดศักยภาพของไนโตรเจนทางชีวเคมี (Biochemical nitrogen potential) เพื่อหาค่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสม เมื่อน้ำทิ้งหลังการบำบัดมีความเข้มข้นของไนโตรเจนน้อยกว่า 50 มก.ไนโตรเจนไนโตรเจนต่อลิตร โดยน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นจากสารละลายโพแทสเซียมไนเตรต มีความเข้มข้นของไนโตรเจนเริ่มต้นเท่ากับ 25 50 100 และ 200 มก.ไนโตรเจนไนโตรเจนต่อลิตร และเติมสารละลายโซเดียมอะซิติกเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน จากผลการทดลองพบว่า เมื่อไนเตรตมีความเข้มข้นเท่ากับ 25 50 100 และ 200 มก.ไนโตรเจนไนโตรเจนต่อลิตร จะมีค่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเป็น 5.3 4.7 3.9 และ 2.6 ตามลำดับ

Hamlin และคณะ (2008) ทำการศึกษากการบำบัดในเทรตในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ จัดแบบปิด โดยเปรียบเทียบการใช้สารอินทรีย์คาร์บอน 4 ชนิด ได้แก่ เมทานอล กรดอะซิติก กากน้ำตาล และแป้งที่ผ่านการย่อย (Hydrolyzed starch) ใช้น้ำเสียที่ผ่านถังไนทริฟิเคชันแล้วเข้าสู่ถังดีไนทริฟิเคชัน ปริมาตร 1.89 ลบ.ม. และบรรจุตัวกลางพลาสติกในถังดีไนทริฟิเคชันปริมาตร 1 ลบ.ม. โดยจะผ่านน้ำเสียเข้าทางด้านล่างของถังซึ่งมีอัตราไหลเท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที และ

ความเข้มข้นของไนเตรตเข้าสูงสุดเท่ากับ 50 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร จากการทดลองพบว่า สารอินทรีย์คาร์บอนทั้ง 4 ชนิด มีประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรตในน้ำเสียได้ไม่แตกต่างกันดังนี้ เมทานอล กรดอะซิติก และกากน้ำตาล มีอัตราดีไนทริฟิเคชันเท่ากับ 670 กรัมไนโตรเจนต่อลบ.ม.ต่อวัน แต่ใช้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมแตกต่างกันคือ 2:1 1.7:1 และ 2.5:1 ตามลำดับ ส่วนแบ่งที่ผ่านการย่อยมีอัตราดีไนทริฟิเคชันเท่ากับ 680 กรัมไนโตรเจนต่อ ลบ.ม.ต่อวัน เมื่อใช้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมเป็น 2.5:1 และเมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายพบว่า กากน้ำตาลมีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด จึงเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนที่น่าจะได้รับความสนใจในการศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

Martin และคณะ (2009) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตในน้ำเสียปนเปื้อนไนเตรต เมื่อใช้อะซิเตทและเอทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน โดยใช้คอลัมน์ที่บรรจุวัสดุตัวกลาง 3 ชนิดได้แก่ ตัวอย่างดินจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์บรรจุอยู่บริเวณส่วนบนของคอลัมน์ ทราโยอยู่บริเวณกลางคอลัมน์ และกรวดอยู่ด้านล่างสุดของคอลัมน์ ทำการผ่านน้ำเสียปนเปื้อนไนเตรตที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 100-200 มก.ต่อลิตร เข้าสู่บริเวณด้านบนของคอลัมน์ และเติมอะซิเตทหรือเอทานอลในชั้นดิน ที่อุณหภูมิ 6 ± 2 °C ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตในน้ำเสียจากการใช้อะซิเตทหรือเอทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนมีค่าสูงถึงร้อยละ 95-100 โดยเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่ในช่วง 6-9 แต่การเติมอะซิเตทเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนจะตรวจพบปริมาณความเข้มข้นของไนไตรต์สูงกว่าการเติมเอทานอล ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของไนไตรต์ดังกล่าวที่เกิดขึ้นในระบบ เนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์นั่นเอง

เอกชัย มาลาพล (2551) ศึกษาความเป็นไปได้ของการนำถังดินมาช่วยในการบำบัดไนเตรตจากกระบวนการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยใช้ถังบรรจุน้ำเค็มและมีชั้นดินที่กั้นถัง แบ่งเป็นถังชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน และชุดทดลองที่มีการเติมเมทานอลหรือกลูโคส โดยแปรผันค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเป็น 0.06:1 0.3:1 1.6:1 และ 3.3:1 ผลจากการศึกษาพบว่า การเติมสารอินทรีย์คาร์บอนสามารถเพิ่มอัตราการบำบัดไนเตรตของดินตะกอนได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยการใช้เมทานอลและกลูโคสให้ผลไม่แตกต่างกัน ในชุดควบคุมมีอัตราการบำบัดเฉลี่ย 386 มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.ต่อวัน แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจาก 0.06:1 เป็น 3.3:1 จะทำให้อัตราการบำบัดไนเตรตเพิ่มขึ้นจาก 516 เป็น 2,849 มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.ต่อวัน และเมื่อนำระบบถังดินมาบำบัดไนเตรตจากบ่อเลี้ยงกุ้งในโรงเรือน โดยนำน้ำที่มีไนเตรตสูงจากบ่อเลี้ยงกุ้งหลังจากทำการเลี้ยงได้ 60 วัน ออกมาบำบัดที่ลวดรอบ รวม 5 ครั้ง โดยใช้เมทานอลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า สามารถควบคุมปริมาณไนเตรตให้มีค่าเท่ากับ 72 มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.

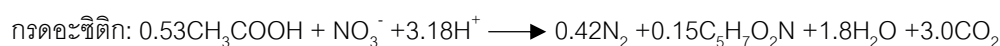
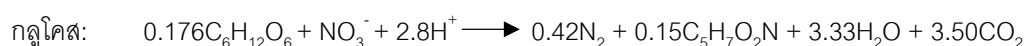
ต่อวัน ในวันสุดท้ายของการทดลอง ในขณะที่ปอดควบคุมมีความเข้มข้นของไนโตรตสูงถึง 159 มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.ต่อวัน

นอกจากนี้ยังมีตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการเปรียบเทียบอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน แสดงโดยสรุปดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน จากงานวิจัยต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าที่เหมาะสมจากทฤษฎีปริมาณสารสัมพันธ์ (ดัดแปลง จาก Chiu และ Chung, 2003)

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสม	แหล่งไนโตรเจน	แหล่งคาร์บอน	ระบบ	อ้างอิง
2.47*	NO_3^- -N	เมทานอล	-	ทฤษฎีปริมาณสารสัมพันธ์
2.26*	NO_3^- -N	กลูโคส	-	ทฤษฎีปริมาณสารสัมพันธ์
2.27*	NO_3^- -N	กรดอะซิติก	-	ทฤษฎีปริมาณสารสัมพันธ์
5.0	NO_x^- -N	กากน้ำตาล	แบบแบทช์	Cecen และ Gronenc (1992)
3.4	NO_x^- -N	อะซิเตท	ระบบเอโอ	Kuba และคณะ (1993)
2.6-5.5	NO_3^- -N	โซเดียมอะซิติก		
3.2	NO_x^- -N	โพลีไวนิล-แอลกอฮอล์	ระบบปฏิกิริยา	Bang และคณะ (1995)
2.88	NO_3^- -N	น้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์	แบบแบทช์	Bernet และคณะ (1996)
4.8	NO_3^- -N	กลูโคส	ถังบรรจุตัวกลาง	Dincer และ Kargi (2000)
3.40	NO_3^- -N	เมทานอล	ฟลูอิดไดซ์เบด	Alves และคณะ (2002)
3.0	NO_3^- -N	เมทานอล	แบบแบทช์	Foglar และ Briski (2003)
5.0 - 15.0	NO_3^- -N	เมทานอล	ถังบรรจุตัวกลางต่อเนื่อง	เอกชัย และคณะ (2551)
2.0 - 3.0	NO_3^- -N	เมทานอล	ฟลูอิดไดซ์เบด	Liu และคณะ (2009)

*หมายเหตุ สมการตามหลักปริมาณสารสัมพันธ์ (McCarty และคณะ, 1969) แสดงได้ดังนี้



2.5.2 การใช้วัสดุตัวกลางเป็นตัวยึดเกาะของจุลินทรีย์และช่วยในการบำบัดในเทรต

Boley และคณะ (2000) ศึกษาการบำบัดในเทรตในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยใช้ น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไนเทรตในช่วง 5-40 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ที่อุณหภูมิช่วง 20-25 °ซ เมื่อใช้เม็ดโพลีเมอร์ที่ย่อยสลายได้เป็นตัวกลาง 3 ชนิด ได้แก่ PHB ($[C_4H_6O_2]_n$), PCL ($[C_6H_{10}O_2]_n$) และ Bionolle ($[C_6H_8O_4]_n$) โพลีเมอร์แต่ละชนิดมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 1.49 0.87 และ 1.22 ตร.ม.ต่อลิตร ตามลำดับ โดยโพลีเมอร์จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางเพื่อก่อให้เกิดไบโอฟิล์มของกลุ่มแบคทีเรีย และเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนให้กับระบบ การศึกษานี้จึงไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนจากแหล่งภายนอก จากการศึกษพบว่า อัตราการบำบัดไนเทรตของ PCL มีอัตราการบำบัดสูงสุดคือ 20-160 มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.ต่อชม. ส่วนอัตราการบำบัดของ PHB และ Bionolle เท่ากับ 5-28 และ 10.5-67 มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.ต่อชม. ตามลำดับ แต่การใช้ PCL และ Bionolle เป็นตัวกลางจะต้องทำการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) เพื่อปรับพีเอชของระบบให้สูงขึ้น

Saliling และคณะ (2007) ศึกษาการใช้แผ่นไม้และฟางข้าวสาลีเพื่อเป็นทางเลือกอย่างง่ายและมีราคาถูกสำหรับเป็นวัสดุตัวกลางในกระบวนการดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดไนเทรตจากน้ำเสียที่มีปริมาณไนเทรตความเข้มข้นสูงเปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติกโพลีเอทิลีน โดยบรรจุวัสดุแต่ละชนิดลงในถังดีไนทริฟิเคชันสูง 40 ซม. และใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาณไนเทรตเข้มข้นเท่ากับ 50 120 และ 200 มก.ไนเทรตไนโตรเจนต่อลิตร จากการทดลองพบว่าแผ่นไม้ ฟางข้าวสาลี และเม็ดพลาสติก มีประสิทธิภาพการบำบัดไนเทรตสูงถึงร้อยละ 99 เมื่อปริมาณไนเทรตเข้มข้น 200 มก.ไนเทรตไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1,360 \pm 40$ $1,360 \pm 80$ และ $1,330 \pm 70$ กรัมไนโตรเจนต่อ ลบ.ม.ต่อวัน ตามลำดับ น้ำที่ผ่านการบำบัดจากถังปฏิกรณ์ทั้งหมดจะมีความเข้มข้นของแอมโมเนียต่ำมากและมีความเข้มข้นของไนไตรต์ประมาณ 2 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร หลังการทดลองในระยะเวลา 140 วัน พบว่าแผ่นไม้และฟางข้าวมีการสูญเสียมวลไปร้อยละ 16.2 และ 37.7 ตามลำดับ ลักษณะมีสีเข้มเป็นสีดำ และโครงสร้างของวัสดุมีขนาดเล็กลง ผลจากการศึกษาสรุปได้ว่าการใช้แผ่นไม้และฟางข้าวสาลีสามารถที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุตัวกลางในกระบวนการดีไนทริฟิเคชันได้ แต่จะต้องจำกัดระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด

Vassiliadou และคณะ (2009) ศึกษาการบำบัดไนเทรตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้กรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4.03 2.04 และ 1.75 มม. บรรจุลงในแต่ละคอลัมน์ 3 คอลัมน์ที่ต่ออนุกรมกัน ใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไนเทรตเท่ากับ 340 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 27 ± 2 °ซ และใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองพบว่าอัตราการบำบัด

ไนเตรตเท่ากับ 9.47 กรัมต่อ ตร.ม.ต่อวัน สามารถรองรับปริมาณไนเตรตที่เข้าสู่ระบบได้สูงกว่าการใช้คอลัมน์บรรจุกรวดขนาด 2.41 มม. เพียงอย่างเดียว ซึ่งจะรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไนเตรตสูงสุดได้เท่ากับ 40 มก.ต่อลิตร และมีอัตราการบำบัดไนเตรตสูงสุดเท่ากับ 1.93 กรัมต่อ ตร.ม.ต่อวัน นอกจากนี้การใช้คอลัมน์บรรจุกรวด 3 คอลัมน์ และต่ออนุกรมกันยังสามารถช่วยลดการการอุดตันของคอลัมน์ได้อีกด้วย

ัญญา พันธุ์ฤทธิ์ดำ (2541) ศึกษาการบำบัดไนเตรตในการเพาะเลี้ยงพ่อแม่พันธุ์กึ่งกุลาดำในโรงเรือน โดยใช้ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ บ่อเลี้ยง บ่อกรองชีวภาพสภาวะใช้ออกซิเจน และระบบตัวกรองชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน ผลการทดลองพบว่าสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนียและไนไตรต์ได้ในระดับ 0.5 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร และ 0.2 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ แต่ไม่สามารถบำบัดไนเตรตได้ ต่อมา Menasveta และคณะ (2001) ได้พัฒนาระบบจาก ัญญา พันธุ์ฤทธิ์ดำ (2541) โดยการใช้ถังบำบัดดีไนริฟิเคชันที่มีการพ่นก๊าซไนโตรเจน เพื่อไล่ออกซิเจนในน้ำและเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถบำบัดไนเตรตจาก 165 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร เหลือ 25 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ภายในระยะเวลา 9 สัปดาห์ แต่ข้อเสียจากการใช้ก๊าซไนโตรเจนในกระบวนการบำบัดไนเตรตคือมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง

อำเภอเทพิน สิงหะพันธุ์ (2543) ได้พัฒนาระบบบำบัดแบบท่อยาวที่ใช้กระบวนการดีไนริฟิเคชันในการบำบัดคุณภาพน้ำจากการเลี้ยงกุ้ง โดยแบคทีเรียในส่วนต้นของท่อทำหน้าที่ลดปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำโดยกระบวนการหายใจของเซลล์ และแบคทีเรียในส่วนปลายของท่อทำหน้าที่บำบัดไนเตรตด้วยปฏิกิริยาดีไนริฟิเคชัน ทำการทดลองโดยใช้เมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน ซึ่งวิธีนี้ทำให้ไม่ต้องใช้ก๊าซไนโตรเจนในการลดปริมาณออกซิเจนในน้ำ จากการศึกษาพบว่าสามารถบำบัดไนเตรตในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งที่มีปริมาณไนเตรตสูงได้ แต่ต้องมีการเติมเมทานอลให้กับระบบตลอดเวลา โดยประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตเมื่อไม่เติมเมทานอลคิดเป็นร้อยละ 2.96 หลังจากเติมเมทานอลในอัตราการไหล 4.5 มล.ต่อชม. จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 31.08 และเมื่อหยุดเติมเมทานอลประสิทธิภาพการบำบัดของระบบลดลงเหลือร้อยละ 6.61 โดยทั้งสามช่วงการทดลองเป็นการเกิดปฏิกิริยาดีไนริฟิเคชันแบบไม่สมบูรณ์ กล่าวคือ มีการตรวจพบปริมาณแอมโมเนียเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบปัญหาการสะสมของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งเป็นพิษต่อสัตว์น้ำในระหว่างการควบคุมระบบ

สุวิมล ตันทสุกิจวณิช (2545) ได้ศึกษาระบบบำบัดในเทรตแบบท่อยาวต่อจากอำไพเทพิน สิงห์พันธุ์ (2543) เพื่อหาความสัมพันธ์ของการบำบัดในเทรตในระบบท่อยาวกับค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) เพื่อใช้ในควบคุมการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบ โดยการกำหนดช่วงค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ระหว่าง -50 ถึง -200 มิลลิโวลต์ พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดในเทรตได้สูงถึงร้อยละ 84-97 โดยไม่เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

วิลาสินี ไตรยราช (2546) ได้พัฒนาระบบบำบัดในเทรตต่อจากสุวิมล ตันทสุกิจวณิช (2545) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดในเทรตในน้ำทะเลด้วยระบบบำบัดในเทรตแบบท่อยาวสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล โดยปรับระยะเวลาพักน้ำของระบบให้อยู่ในช่วงระหว่าง 2.3-3.5 ชม. และใช้เมทานอลเข้มข้น 5% ที่กำหนดอัตราการเติมเท่ากับ 10 มล.ต่อชม. เป็นสารอินทรีย์คาร์บอน ทำการปรับช่วงค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันระหว่าง -320 ถึง -300 มิลลิโวลต์ ผลการทดลองพบว่าสามารถบำบัดในเทรตได้มากกว่าร้อยละ 80 และไม่เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ศิริวรรณ ศิลาภากุล (2545) ได้ศึกษาการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกที่มีการไหลเวียนน้ำภายนอก สำหรับถังปฏิกรณ์จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ บริเวณเติมอากาศและบริเวณที่ไม่มีอากาศ ซึ่งมีการบรรจุไบโอบอลเป็นวัสดุตรึงแบคทีเรีย จากการศึกษาพบว่าถังปฏิกรณ์ชีวภาพสามารถบำบัดสารประกอบไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์ไม่มีการสะสมของสารประกอบไนโตรเจนในระบบ โดยปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้พร้อมกัน มีอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันอยู่ในช่วง 0.06-0.87 มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.ต่อวัน และ 0.01-0.08 มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.ต่อวัน ตามลำดับ

รุ่งนภา สุทธิศรี (2549) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับการเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบหนาแน่นสูงในโรงเรือน โดยระบบจะมีส่วนประกอบหลัก 5 ส่วน ได้แก่ (1) บ่อเลี้ยง ความจุน้ำ 3,000 ลิตร (2) ระบบกรองตะกอนด้วยไส้กรองขนาด 5 ไมครอน (3) ระบบแยกตะกอนโปรตีนและไขมัน (4) บ่อบำบัดไนทริฟิเคชันที่บรรจุใยกรอง BiopolymerTM และ (5) ระบบบำบัดในเทรตแบบท่อยาวที่ทำจากท่อพีวีซีภายในบรรจุพลาสติกทรงกลม (Bioball) สำหรับช่วงตอนต้นของท่อยาวจะมีการเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนให้กับดีไนทริฟายอิงแบคทีเรีย และใช้หัวตรวจวัดค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันควบคุมสภาพดีไนทริฟิเคชัน ทำการเพาะเลี้ยงลูกกุ้งที่ความหนาแน่นสูง 150 ตัวต่อตร.ม. เป็นระยะเวลา 132 วัน ในน้ำทะเลความเค็ม 25 พีเอสยู พบว่าการใช้ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสามารถควบคุมคุณภาพน้ำให้อยู่ในสภาพดีได้

ตลอดการเลี้ยง โดยไม่จำเป็นต้องทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำ และน้ำภายหลังการเลี้ยงสามารถนำกลับมาใช้ใหม่สำหรับการเลี้ยงกุ้งในรอบต่อไปได้

เอกชัย มาลาพล (2551) ศึกษาการใช้ถังดินบำบัดในเทรตจากบ่อเลี้ยงกุ้งในโรงเรือน โดยบรรจุดินตะกอนจากบ่อเลี้ยงกุ้งลงในถังพลาสติกหนา 8 ซม. มีพื้นที่ผิวของดินเท่ากับ 0.50 ตร.ม. ภายในถังมีเครื่องสูบน้ำเพื่อให้ น้ำมีการผสมกันและมีการให้อากาศผ่านหัวทรายที่ระดับความลึก 20 ซม.จากผิวน้ำ ใช้น้ำเสียที่มีในเทรตความเข้มข้นสูงจากบ่อเลี้ยงกุ้งหลังจากทำการเลี้ยงได้ 60 วัน และเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของเมทานอลความเข้มข้น 0.8 มล.ต่อลิตร คิดเป็นสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 จากผลการทดลองพบว่าสามารถควบคุมปริมาณไนโตรเจนให้มีค่าเท่ากับ 72 มก.ไนโตรเจนต่อลิตรในครั้งสุดท้ายของการทดลอง ในขณะที่บ่อชุดควบคุมมีไนโตรเจนเท่ากับ 159 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร

นอกจากนี้ยังมีตัวอย่างงานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้กระบวนการดีไนทริฟิเคชันกับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำประเภทน้ำจืดและน้ำเค็มที่เกี่ยวข้องกับการใช้วัสดุตัวกลางเป็นตัวยึดเกาะของจุลินทรีย์และช่วยในการบำบัดไนโตรเจน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างงานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้วัสดุตัวกลางในกระบวนการดีไนทริฟิเคชันกับการเพาะเลี้ยงสตรว์น้ำ (ดัดแปลงจาก van Rijn และคณะ, 2006)

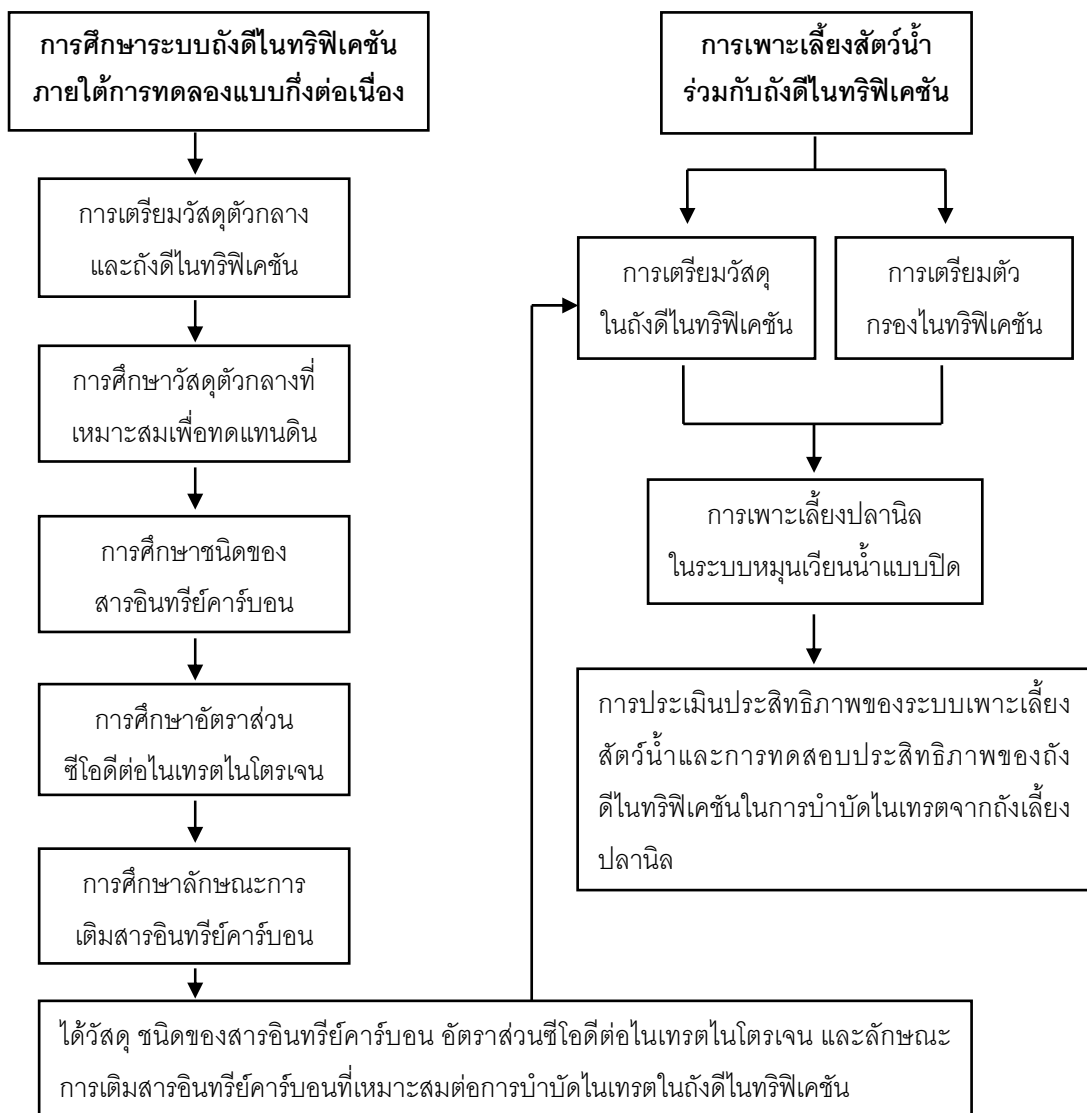
วัสดุตัวกลาง	สารอินทรีย์คาร์บอน	อัตราการบำบัด (มก.ไนโตรเจน/ลิตร/ชม.)	ระบบบำบัดไนเตรต	อ้างอิง
<u>น้ำจืด</u>				
ตัวกลางพลาสติก	กลูโคส	1.7	คอลัมน์ (ปลาลิ้นหมา)	Honda และคณะ (1993)
ทราย	สารอินทรีย์ละลายน้ำ	36	ฟลูอิดไดซ์เบด (ปลานิล)	Arbiv และ van Rijn (1995)
ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย	สารอินทรีย์ละลายน้ำ	5.9	คอลัมน์	Shnel และคณะ (2002)
ทราย	สารอินทรีย์ละลายน้ำ	55.4	ฟลูอิดไดซ์เบด	Shnel และคณะ (2002)
ทราย	สารอินทรีย์ละลายน้ำ	43.3	ฟลูอิดไดซ์เบด	Gelfand และคณะ (2003)
โพลีเอทิลีน	เมทานอล	1.8	คอลัมน์ (ปลาไหล)	Suzuki และคณะ (2003)
Alginate beads	น้ำแป้ง	26.0	คอลัมน์	Tal และคณะ (2003)
ตัวกลางพลาสติก	เมทานอล	670 (ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน)	ถังบรรจุตัวกลาง	Hamlin และคณะ (2008)
<u>น้ำทะเล</u>				
ตัวกลางพลาสติก	กลูโคส	1.7	คอลัมน์	Honda และคณะ (1993)
เศษอิฐ	เอทานอล	100	คอลัมน์	Sauthier และคณะ (1998)
ตัวกลางมีรูพรุน	เมทานอล	7.3-8.4	คอลัมน์	Grguric และคณะ (2000)
บอลพลาสติก	เอทานอล	6.6	ถังบรรจุตัวกลาง	Menasveta และคณะ (2001)
/ เปลือกหอย	/ เมทานอล			
โพลีไวนิล-แอลกอฮอล์	กลูโคส	1.4	คอลัมน์	Park และคณะ (2001)
ทราย	สารอินทรีย์ละลายน้ำ	72.6	ฟลูอิดไดซ์เบด	Gelfand และคณะ (2003)
ตัวกลางพลาสติก	สารอินทรีย์ละลายน้ำ	24.0	บรรจุตัวกลางเคลื่อนที่	Tal และ Schreier (2004)

จากตัวอย่างงานวิจัยดังกล่าวสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้ (1) การเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในกระบวนการดีไนทริฟิเคชันจะขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้ในการบำบัดในเทรต ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย และชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน โดยเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนที่นิยมใช้ เนื่องจากหาได้ง่ายและใช้งานสะดวก และ (2) การใช้วัสดุตัวกลางในระบบดีไนทริฟิเคชันเพื่อเป็นตัวยึดเกาะสำหรับจุลินทรีย์และเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดในเทรต มักเลือกใช้ตัวกลางที่ค่อนข้างหาได้ง่าย ปริมาณมากพอต่อการใช้งาน สะดวกต่อการใช้งาน และมีขนาดเล็กเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวยึดเกาะให้กับจุลินทรีย์

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการออกแบบและประเมินประสิทธิภาพการบำบัดในเทรตในถังดีไนทริฟิเคชัน โดยในช่วงแรกจะทำการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง จากนั้นจะนำระบบที่ออกแบบไว้ไปใช้ร่วมกับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำขนาดเล็ก ซึ่งเป็นระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่อาศัยการบำบัดผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชันร่วมกับไนทริฟิเคชัน ซึ่งแนวทางการวิจัยทั้งหมดที่ทำการทดลองสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.1



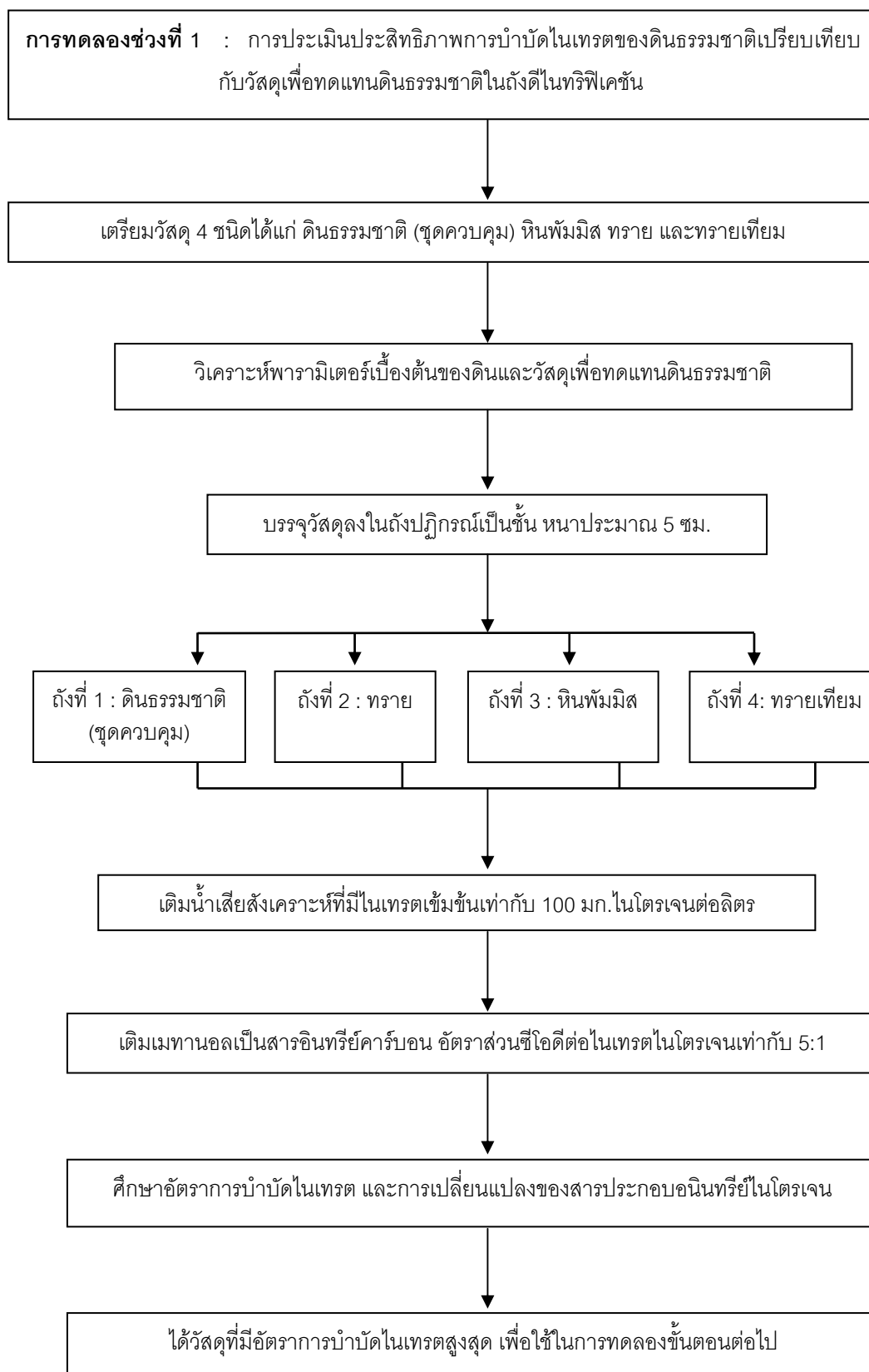
รูปที่ 3.1 สรุปแนวทางการทดลองในงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดลองที่ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

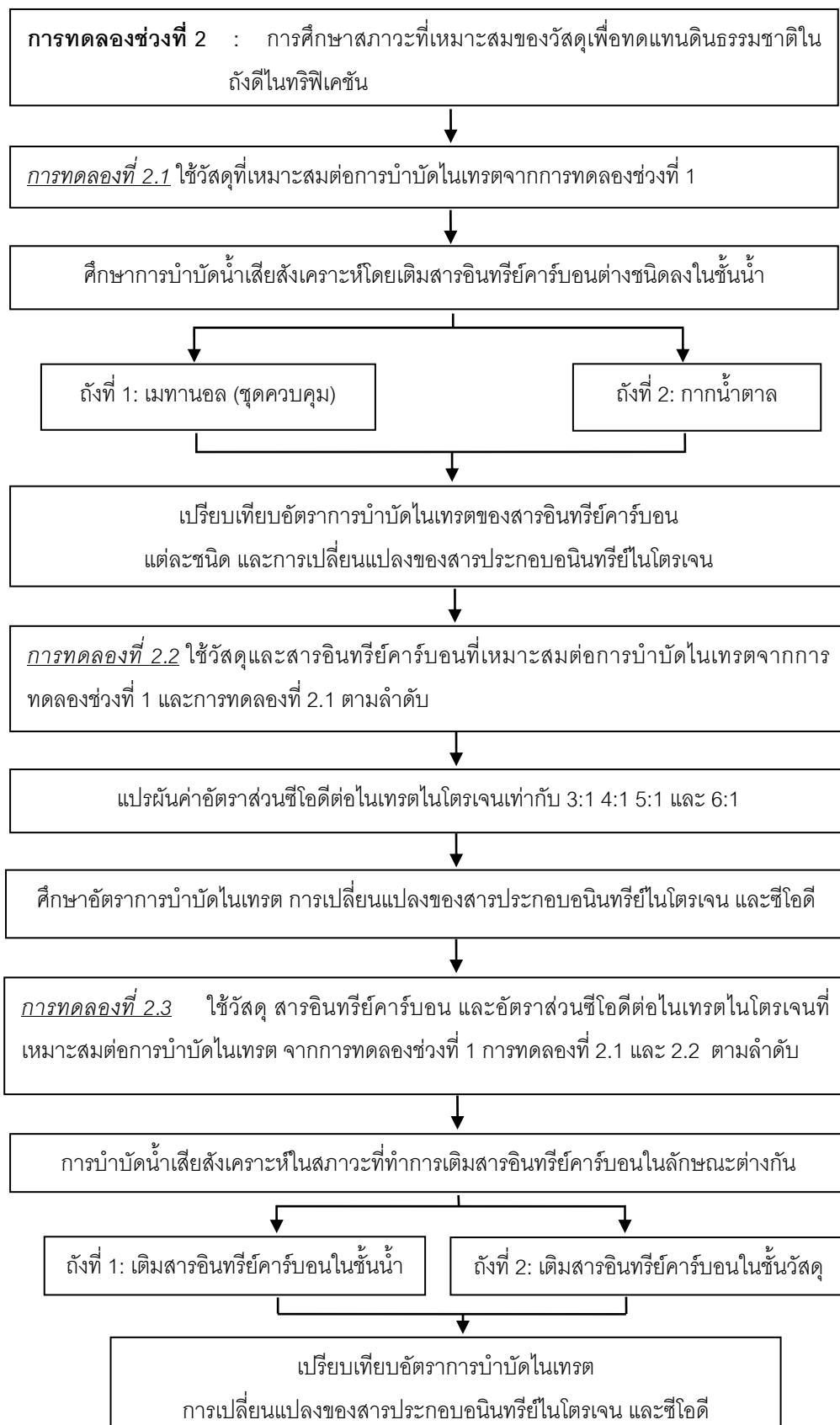
การทดลองช่วงที่ 1 เป็นการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดในเทรตในถังดีไนทริฟิเคชันของดินธรรมชาติเปรียบเทียบกับวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติ 3 ชนิด ได้แก่ ทราบ หินพัมมิส และทรายเทียม โดยทำการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง ดังมีรายละเอียดแสดงด้วยแผนภาพรูปที่ 3.2

การทดลองช่วงที่ 2 เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดในเทรตในถังดีไนทริฟิเคชันของวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1 โดยทำการเดินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง และแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ได้แก่ การศึกษาชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอนที่มีผลต่ออัตราดีไนทริฟิเคชัน การศึกษาอัตราส่วนซีโอต์ต่อในเทรตในโตรเจนของสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสม และการศึกษาลักษณะการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนลงในถังดีไนทริฟิเคชัน ดังมีรายละเอียดแสดงด้วยแผนภาพรูปที่ 3.3

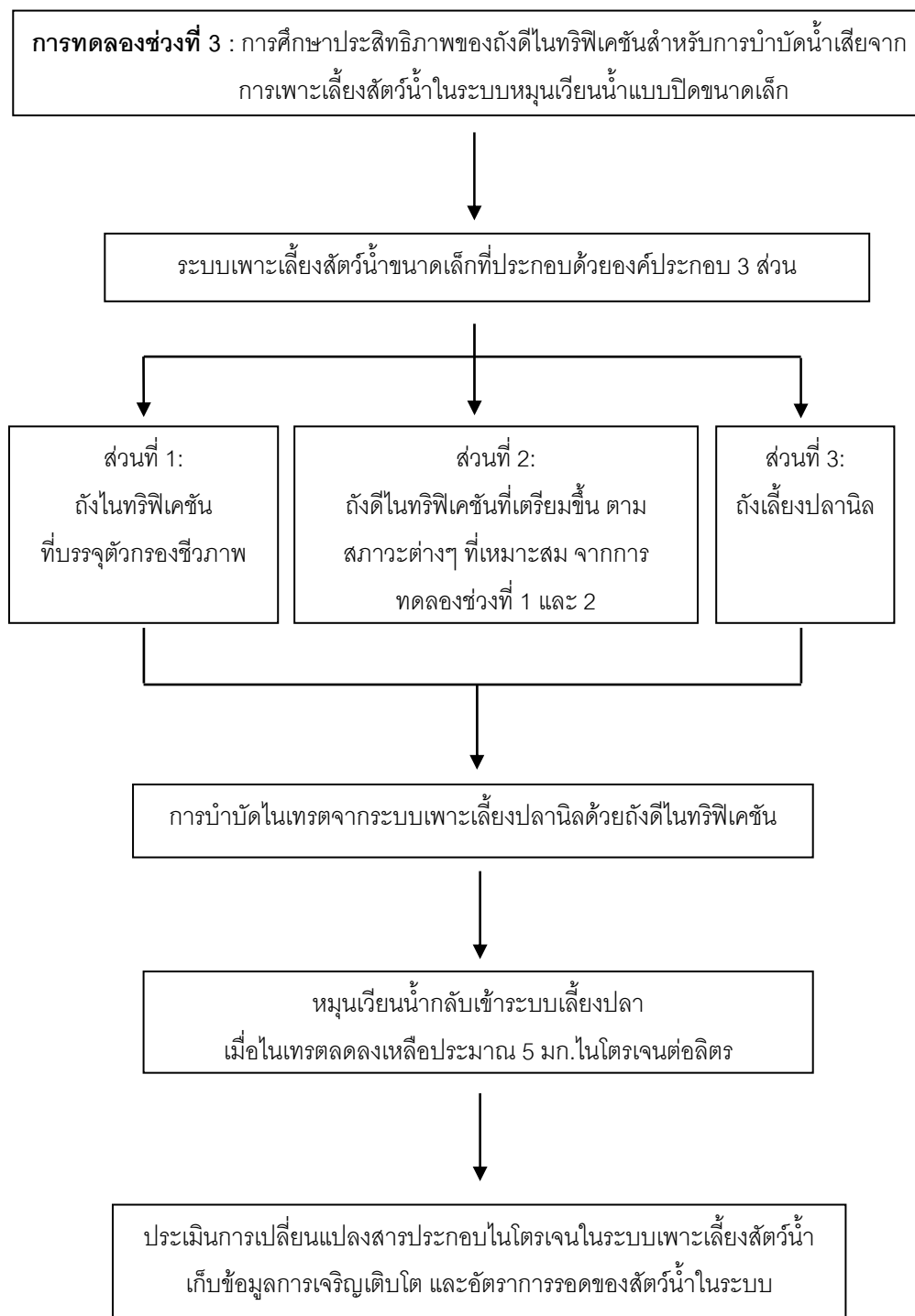
การทดลองช่วงที่ 3 เป็นการประยุกต์ใช้ถังดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจาลองในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็ก เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดในเทรตของวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1 ภายใต้สภาวะการบำบัดในเทรตที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 2 โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง ดังมีรายละเอียดแสดงด้วยแผนภาพรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.2 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 1



รูปที่ 3.3 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 2



รูปที่ 3.4 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 3

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

- ตู้กระจกปริมาตร 14 ลิตร
- หัวทรายเติมอากาศ
- เครื่องเติมอากาศ
- ถังพลาสติก ปริมาตร 500 200 และ 100 ลิตร
- ป้อนน้ำขนาดเล็ก ยี่ห้อ RESUN รุ่น SP-500
- ตะแกรงร่อนคัดขนาด No. 7 และ No. 18
- สายออกซิเจนชนิดบางและหนา
- ปากน้ำตาล
- หินพัมมิส
- ทราย
- ทรายเทียม
- ท่อพีวีซีและข้อต่อ
- เทอร์โมมิเตอร์ดิจิตอล ยี่ห้อ WEIPRO รุ่น MT-10 และเทอร์โมมิเตอร์แบบกระเปาะแก้ว
- แผ่นโฟมและพาราฟิล์ม
- กระบอกลและเข็มฉีดยา
- ผ้ากรองละเอียด (Plankton net) ขนาดรู 104 ไมโครเมตร
- เครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP3100s BP210s และ PT 1200

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

- กระดาษกรอง (Whatman GF/C)
- เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Milton Roy รุ่น Spectronic Genesys 5 และ 10 UV scanning
- เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI98240
- เครื่องวัดค่าการละลายออกซิเจน (DO meter) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI964400
- เครื่องวัดศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP meter) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI3010
- เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity meter) ยี่ห้อ HACH รุ่น 2001A
- เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2010

- ชุดทดสอบแอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต และคลอรีน ของศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ไมโครปิเปตขนาดต่างๆ
- เครื่องแก้วต่างๆ เช่น ปิเปต ปีกเกอร์ ขวดรูปชมพู่ ฯลฯ

3.1.3 สารเคมี

- Phenol solution
- Sodium nitroprusside solution ($\text{Na}_2\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- Ammonium molybdate
- Sodium citrate
- Ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
- Sodium nitrate (NaNO_3)
- Potassium nitrite (KNO_2)
- Potassium nitrate (KNO_3)
- Sulphanilamide
- NNED solution (N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride)
- Sulfuric acid (H_2SO_4)
- Methanol (CH_3OH)
- Sodium hydroxide (NaOH)
- Hydrochloric acid (HCl)

3.2 การทดลอง

3.2.1 การเตรียมวัสดุดีในทริฟิเคชัน

วัสดุทดลองที่ใช้บรรจุในถังดีในทริฟิเคชันแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ดินธรรมชาติและวัสดุทดแทนดินธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 มีรายละเอียดดังนี้

- ดินธรรมชาติ เป็นตัวอย่างดินจากบ่อน้ำบริเวณใกล้ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยนำมาตากแห้งและร่อนเพื่อแยกสิ่งปนเปื้อนออกจากดิน ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ทางกายภาพและเคมีเบื้องต้นของดินที่นำมาศึกษา ดังรายละเอียดแสดงในตารางที่ 3.1

- วัสดุทดแทนดินธรรมชาติ 3 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม ซึ่งคัดให้มีขนาดสม่ำเสมอด้วยตะแกรงร่อน โดยกำหนดให้มีขนาดอยู่ในช่วง 1-3 มม. ล้างน้ำเพื่อทำความสะอาด ตากแห้ง และวัดค่าพีเอชของวัสดุแต่ละชนิด ดังตารางที่ 3.1



(ก) ดินธรรมชาติ (Soil)



(ข) ทราย (Sand)



(ค) หินพัมมิส (Pumice rock)



(ง) ทรายเทียม (Vermiculite)

รูปที่ 3.5 ลักษณะของดินธรรมชาติและวัสดุทดแทนดินธรรมชาติ 3 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติต่างๆ ของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง 4 ชนิด

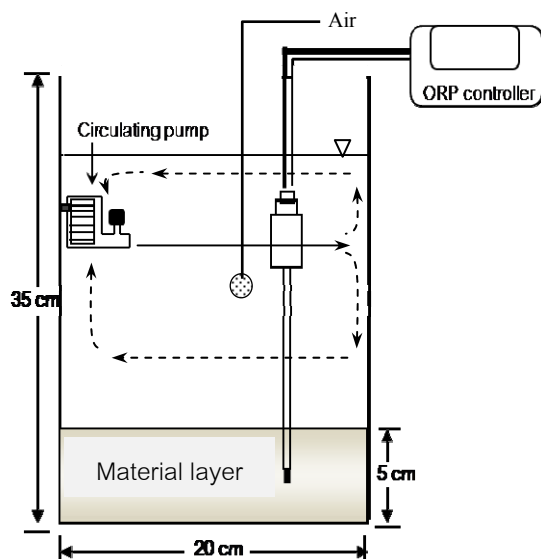
วัสดุ	พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	อ้างอิงวิธีวิเคราะห์
ดินธรรมชาติ	- ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน	เผาที่อุณหภูมิ 440 ± 22 °ซ	ASTM D2974 (2008)
	- พีเอช	pH meter method	ASTM D4972 (2008)
พัมมิส			
ทราย	- ขนาดอนุภาค	ตะแกรงร่อน	ASTM D6913 (2008)
ทรายเทียม	- พีเอช	pH meter method	ASTM D4972 (2008)

3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองช่วงที่ 1 และ 2 เตรียมจากน้ำประปา โดยเติมสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด (KNO_3) เพื่อให้มีความเข้มข้นไนเตรดเท่ากับ 100 มก./ไนโตรเจนต่อลิตร

3.2.3 การเตรียมถังดีไนทริฟิเคชัน

ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ทำจากกระจกใสทรงสี่เหลี่ยม ขนาดกว้าง 20 ซม. ยาว 20 ซม. สูง 35 ซม. ปริมาตรรวมเท่ากับ 14 ลิตร พื้นที่ถังเท่ากับ 0.04 ตร.ม. บรรจุวัสดุทดลองแต่ละชนิดลงไปเป็นชั้นหนาประมาณ 5 ซม. เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์และเลี้ยงสภาวะไร้ออกซิเจนที่อาจก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำได้ และเติมน้ำเสียสังเคราะห์ลงในถังปฏิกรณ์เหนือชั้นวัสดุทดลองปริมาตร 8 ลิตร ติดตั้งชุดอุปกรณ์ควบคุมค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันหรือโออาร์พี เพื่อใช้ตรวจสอบการเกิดสภาวะดีไนทริฟิเคชัน โดยจุ่มโพรบลงในชั้นวัสดุลึกประมาณ 2.5 ซม. ที่บริเวณด้านบนของถังปฏิกรณ์มีการติดตั้งปั้มน้ำขนาดเล็ก โดยมีวาล์วเพื่อช่วยควบคุมให้น้ำที่ออกมาเกิดการไหลวนในถังอย่างช้าๆ และไม่รบกวนชั้นวัสดุที่กั้นถึง ในกรณีที่น้ำส่วนบนของถังมีค่าออกซิเจนละลายน้ำต่ำ จะทำการเติมออกซิเจนด้วยหัวฟู่เติมอากาศเพื่อป้องกันการเน่าเสียของน้ำและลดความเสี่ยงต่อการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ระบบล้มเหลวได้ โดยแสดงการติดตั้งถังปฏิกรณ์และชุดอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลองดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนภาพและรูปถ่ายแสดงการติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับถังดีไนทริฟิเคชัน (แสดงรายละเอียดสำหรับ 1 ชุดการทดลอง)

การทดลองช่วงที่ 1 การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตของดินธรรมชาติเปรียบเทียบกับวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติในถังดีไนทริฟิเคชัน

การทดลองส่วนนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบการบำบัดไนเตรตด้วยดินธรรมชาติและวัสดุทดแทนดิน โดยมุ่งเน้นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตในถังดีไนทริฟิเคชัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ระบบสามารถบำบัดไนเตรตได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่เกิดการสะสมไนไตรต์และไม่เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ดังมีรายละเอียดตัวแปรที่ทำการศึกษาตามตารางที่ 3.1 มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

ทำการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตในถังดีไนทริฟิเคชันระหว่างดินธรรมชาติเปรียบเทียบกับวัสดุเพื่อทดแทนดิน 3 ชนิด ได้แก่ ททราย หินพัมมิส และทรายเทียม โดยชุดถังปฏิกรณ์จะแบ่งออกเป็น 4 ชุด (ชุดการทดลองละ 3 ถัง) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ทำการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์ที่บรรจุวัสดุสำหรับการทดลองเป็นชั้นหนา 5 ซม. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 8 ลิตร และเติมเมทานอลปริมาตร 3.4 มล.ต่อถัง ลงในชั้นน้ำเสียสังเคราะห์ เพื่อเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ทำการเดินระบบโดยจะถ่ายน้ำออกและเปลี่ยนน้ำใหม่ เมื่อความเข้มข้นไนเตรตในน้ำลดลงต่ำกว่า 5 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร เก็บตัวอย่างน้ำจากถังปฏิกรณ์ทุกวัน เพื่อศึกษาอัตราการบำบัดไนเตรต และการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ ได้แก่ แอมโมเนียไนไตรต์ ไนเตรต ไออาร์พี อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช ค่าสภาพต่าง และความขุ่น

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 1

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ประเภทของวัสดุที่บรรจุในถังปฏิกรณ์	- ดินธรรมชาติ ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความเข้มข้นไนเตรต	- 100 มก. ไนโตรเจนต่อลิตร
2. ระยะเวลาในการเดินระบบ	- 67 วัน
3. ความหนาของชั้นวัสดุ	- 5 ซม.
4. ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน	- เมทานอล
5. อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจน	- 5:1
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
1. ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตของวัสดุ (อัตรา ดีไนทริฟิเคชันเทียบกับพื้นที่ของถังต่อ หน่วยเวลา; มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.ต่อวัน)	- แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต
2. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ	- อุณหภูมิ พีเอช ไออาร์พี ค่าสภาพต่าง ปริมาณ ออกซิเจนละลายน้ำ และความขุ่น



รูปที่ 3.7 ชุดการทดลองการบำบัดไนเตรตในถังดีไนทริฟิเคชันของดินธรรมชาติเปรียบเทียบกับวัสดุเพื่อทดแทนดิน 3 ชนิด ได้แก่ ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม

การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติในถังดีไนริฟิเคชัน

โดยการนำวัสดุที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1 มาใช้ในการทดลอง และแบ่งการทดลองในช่วงนี้ออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย โดยมีรายละเอียดการทดลองดังนี้

การทดลองที่ 2.1 ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมต่ออัตราดีไนริฟิเคชัน

บรรจุวัสดุทดแทนดินที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1 ลงในถังปฏิกรณ์ 2 ชุดทดลอง (ชุดการทดลองละ 3 ถัง) ทำการเลี้ยงเชื้อด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ และเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 เป็นระยะเวลา 20 วัน ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนียไนไตรต์ และไนเตรต เมื่อปริมาณไนเตรตถูกบำบัดอย่างสมบูรณ์ (ความเข้มข้นไนเตรตต่ำกว่า 5 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร และไม่มีการสะสมของไนไตรต์) จึงเติมสารอินทรีย์คาร์บอนต่างชนิดกันลงในชั้นน้ำในแต่ละชุดการทดลองด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ดังนี้

- ถังปฏิกรณ์ชุดที่ 1 เติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน (ชุดควบคุม) โดยทำการเติมเมทานอลตามสัดส่วนทฤษฎีปริมาณสารสัมพันธ์เท่ากับ 1.5 กรัมซีโอดีต่อกรัมเมทานอล คิดเป็นปริมาตร 3.4 มล.ต่อถัง (ต่อปริมาตรน้ำ 8 ลิตร)
- ถังปฏิกรณ์ชุดที่ 2 เติมกากน้ำตาลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน โดยกากน้ำตาลที่ใช้ในการทดลองเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาล ซึ่งผ่านการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ สี พีเอช ซีโอดี และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) ก่อนการใช้งาน โดยปริมาณการเติมกากน้ำตาลจะคำนวณจากค่าซีโอดีที่ทำให้สัดส่วนปริมาณซีโอดีต่อไนโตรเจนไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 คิดเป็น 5.61 กรัมต่อถัง (ต่อปริมาตรน้ำ 8 ลิตร)

เดินระบบการทดลองต่อเนื่องจากการบ่มเชื้ออีกเป็นระยะเวลา 37 วัน เก็บตัวอย่างน้ำทุกวันเพื่อศึกษาอัตราการบำบัดไนเตรต ปริมาณซีโอดีคงเหลือในน้ำหลังการบำบัด การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ ปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต และค่าพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำอื่นๆ ได้แก่ ไออาร์พี อุณหภูมิ พีเอช ค่าสภาพต่าง และซีโอดี โดยเมื่อปริมาณความเข้มข้นไนเตรตในน้ำลดลงต่ำกว่า 5 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร จะทำการถ่ายน้ำออกจากถังและเปลี่ยนน้ำพร้อมกับเติมสารอินทรีย์คาร์บอนใหม่ มีรายละเอียดตัวแปรที่ทำการศึกษาสำหรับการทดลองในช่วงนี้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2.1

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน	- เมทานอล และกากน้ำตาล
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. วัสดุที่บรรจุในถังปฏิกรณ์	- วัสดุที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1
2. ความเข้มข้นไนเตรตไนโตรเจนต่อลิตร	- 100 มก.
3. ระยะเวลาในการเดินระบบ	- 57 วัน
4. ความหนาของชั้นวัสดุ	- 5 ซม.
5. อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจน	- 5:1
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
1. อัตราการบำบัดไนเตรต และการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน	- แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต
2. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ	- อุณหภูมิ พีเอช ไออาร์พี ค่าสภาพต่าง และซีโอดี

การทดลองที่ 2.2 อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนของสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสม

ทำการศึกษ้อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนของสารอินทรีย์คาร์บอนในถังดีไนทริฟิเคชันที่บรรจุวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติจากการทดลองช่วงที่ 1 และชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 2.1 โดยแบ่งถังปฏิกรณ์เป็น 5 ชุดการทดลอง (ชุดทดลองละ 3 ถัง) เพื่อแปรผันค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนของสารอินทรีย์คาร์บอนแตกต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ 3:1 4:1 5:1 และ 6:1 โดยทำการบ่มเชื้อเป็นระยะเวลา 63 วัน และทำการทดลองต่อเป็นระยะเวลา 21 วัน ในระยะการทดลองทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกวันเพื่อวิเคราะห์อัตราการบำบัดไนเตรต การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ ปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต และค่าพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำอื่นๆ ได้แก่ ไออาร์พี อุณหภูมิ พีเอช และค่าสภาพต่าง นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์คงเหลือในน้ำด้วยการตรวจวัดปริมาณซีโอดีของน้ำหลังการบำบัด โดยมีรายละเอียดของตัวแปรที่ทำการศึกษสำหรับการทดลองในช่วงนี้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2.2

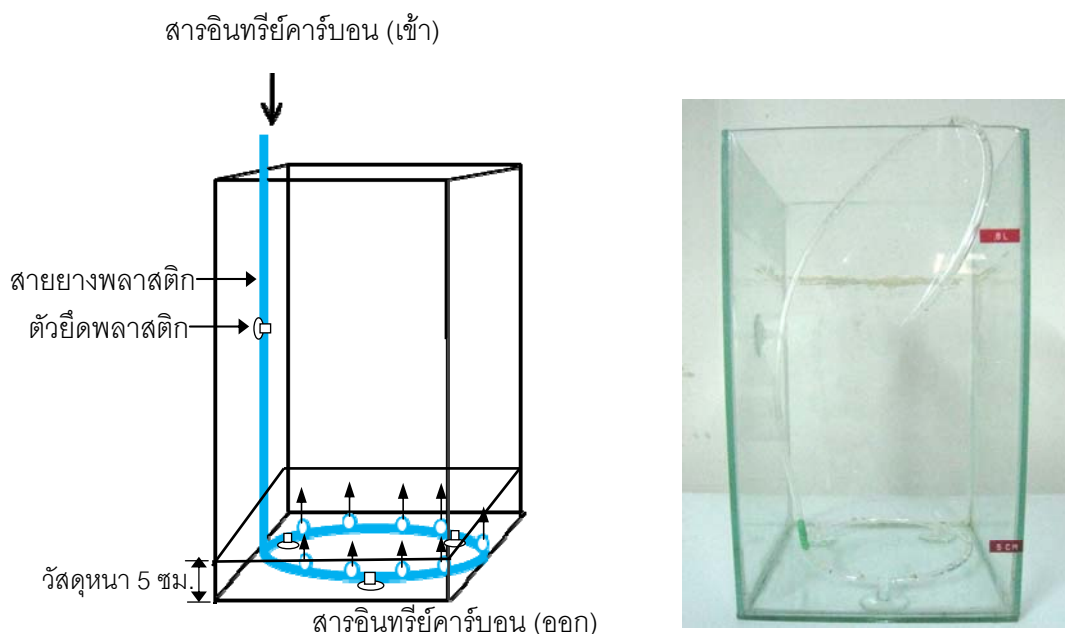
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	- 3:1 4:1 5:1 และ 6:1
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. วัสดุที่บรรจุในถังปฏิกรณ์	- วัสดุที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1
2. ความเข้มข้นไนเตรตไนโตรเจนต่อลิตร	- 100 มก.
3. ระยะเวลาในการเดินระบบ	- 84 วัน
4. ความหนาของชั้นวัสดุ	- 5 ซม.
5. ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน	- สารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
1. อัตราการบำบัดไนเตรต และการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน	- แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต
2. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ	- อุณหภูมิ พีเอช ไออาร์พี ค่าสภาพต่าง และซีไอดี

การทดลองที่ 2.3 ลักษณะการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนลงในถังปฏิกรณ์ไนโตรฟิเคชัน

ทำการศึกษาลักษณะการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนลงในถังปฏิกรณ์ไนโตรฟิเคชันที่มีผลทำให้เกิดประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตสูงสุด โดยใช้ถังดีไนโตรฟิเคชันที่บรรจุวัสดุทดแทนดินธรรมชาติที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1 และเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วนซีไอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 2 สำหรับการทดลองนี้จะทำการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนใน 2 ลักษณะที่แตกต่างกันลงในถังปฏิกรณ์ 2 ชุดการทดลอง (ชุดทดลองละ 3 ถัง) มีรายละเอียดดังนี้

- ถังปฏิกรณ์ชุดที่ 1 เติมสารอินทรีย์คาร์บอนลงในชั้นน้ำเสียสังเคราะห์

- ถังปฏิกรณ์ชุดที่ 2 เติมสารอินทรีย์คาร์บอนในชั้นวัสดุผ่านทางสายยางพลาสติกแบบหนาเจาะรูที่ติดตั้งไว้บริเวณด้านล่างของถังปฏิกรณ์และเติมวัสดุหนา 5 ซม. ดังรูปที่ 3.8 โดยปลายเปิดด้านบนของสายยางจะปิดด้วยพาราฟิล์มเพื่อป้องกันการระเหยของเมทานอล ในการเติมเมทานอลจะใช้เข็มฉีดยาขนาดเล็กเจาะผ่านพาราฟิล์มและค่อยๆ ปล่อยเมทานอลจนหมด ทำการล้างเมทานอลที่อาจจะตกค้างอยู่ภายในสายยางด้วยน้ำจากถังทดลองเดียวกัน ประมาณ 2-3 รอบ



รูปที่ 3.8 แผนภาพและรูปถ่ายแสดงการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับถังดีไนทริฟิเคชันในชุดทดลองที่ทำ
การเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในชั้นวัสดุ

เริ่มต้นเดินระบบด้วยการบ่มเชื้อดีไนทริฟิเคชันในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชุดที่บรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไนโตรเจนเข้มข้น 100 มก./ไนโตรเจนต่อลิตร และเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนไนโตรเจนที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 2.1-2.2) โดยในช่วงแรกจะทำการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนลงในชั้นน้ำเสียสังเคราะห์ของทุกถังทดลองเพื่อเพิ่มปริมาณเชื้อดีไนทริฟิเคชันเป็นระยะเวลา 42 วัน ทำการตรวจวัดอัตราการบำบัดไนโตรเจนกระทั่งพบว่าถังดีไนทริฟิเคชันทุกถังสามารถบำบัดไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์จึงเริ่มการทดลองในวันที่ 43 โดยเติมสารอินทรีย์คาร์บอนลงในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชุด ในลักษณะที่แตกต่างกันคือ เติมลงในชั้นน้ำและชั้นวัสดุทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนของถังดีไนทริฟิเคชัน โดยเก็บตัวอย่างน้ำทุกวันตลอดระยะเวลาการทดลองอย่างน้อย 1 เดือน เพื่อวิเคราะห์อัตราการบำบัดไนโตรเจน การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ ปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต และวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ไออาร์พี อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช ค่าสภาพต่าง ซีไอดี และปริมาณเมทานอลคงเหลือในน้ำหลังการบำบัดโดยรายละเอียดของตัวแปรต่างๆ ที่ทำการศึกษาสำหรับการทดลองในช่วงนี้แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2.3

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชั้นของการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน	- ชั้นน้ำและชั้นวัสดุ
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. วัสดุที่บรรจุในถังปฏิกรณ์	- วัสดุที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1
2. ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน	- สารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1
3. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	- ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.2
4. ความเข้มข้นไนเตรตไนโตรเจนต่อลิตร	- 100 มก.
5. ระยะเวลาในการเดินระบบ	- 2 เดือน
6. ความหนาของชั้นวัสดุ	- 5 ซม.
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
1. อัตราการบำบัดไนเตรต และการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน	- แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต
2. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ	- อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และค่าสภาพต่าง
3. ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในระบบ	- ค่าซีโอดี และปริมาณความเข้มข้นของเมทานอล

การทดลองช่วงที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติที่เหมาะสมในการบำบัดคุณภาพน้ำจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

โดยทดลองนำถังดีไนทริฟิเคชันมาใช้ในการบำบัดในเขตความเข้มข้นสูงที่เกิดขึ้นจากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำจำลอง ซึ่งมีตัวแปรที่ทำการศึกษาดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 3

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. คุณภาพน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงปลา	- น้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลานิล
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความเข้มข้นในเขตในน้ำเสีย	- 50 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร
2. ถังดีไนทริฟิเคชัน	- เตรียมขึ้นโดยใช้วัสดุและสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1 และ 2
3. ชนิดของสัตว์น้ำ	- ปลานิล
4. ความหนาแน่นเริ่มต้นของสัตว์น้ำ	- 0.3 กก.ต่อลบ.ม.
5. อาหารสัตว์น้ำ	- อาหารเม็ดสำเร็จรูปที่ขายทั่วไป
6. ปริมาณการให้อาหาร	- ร้อยละ 5 ของน้ำหนักตัวสัตว์น้ำต่อวัน
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
1. ประสิทธิภาพการบำบัด และการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน	- แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต
2. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ	- อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ค่าพีเอช และค่า สภาพต่าง
3. ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนตกค้างในระบบเพาะเลี้ยงปลานิล	- ความเข้มข้นของสารอินทรีย์คาร์บอน
4. การเจริญเติบโตและการรอดของสัตว์น้ำ	- ชั่งน้ำหนัก วัดความยาว และนับจำนวนของสัตว์น้ำ

การทดลองในช่วงนี้จะทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาอย่างน้อย 3 เดือน โดยระบบการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่

(1) ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งประกอบไปด้วยถังเลี้ยงปลานิลและถังบำบัดไนทริฟิเคชัน ซึ่งจะเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน โดยถังไนทริฟิเคชันจะทำหน้าที่บำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนีย และไนไตรต์ ที่เกิดขึ้นให้เป็นไนเตรตอย่างต่อเนื่องภายในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

(2) ถังดีไนทรีฟิเคชัน เป็นถังทดลองที่เตรียมขึ้นตามสภาวะต่างๆ ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 และ 2 ซึ่งจะทำหน้าที่บำบัดในเทรตความเข้มข้นสูงจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและหมุนเวียนน้ำกลับเข้าสู่ระบบเพาะเลี้ยงอีกครั้งหลังการบำบัดในเทรต

โดยรายละเอียดของการเตรียมสภาพตัวกรองชีวภาพในถังไนทรีฟิเคชัน การเตรียมถังดีไนทรีฟิเคชัน และถังเลี้ยงปลาชนิด มีดังนี้

3.3 การเตรียมถังไนทรีฟิเคชันที่บรรจุตัวกรองชีวภาพ

ตัวกรองที่ใช้บรรจุในถังไนทรีฟิเคชันมีชื่อทางการค้าว่า Biocord™ (รูปที่ 3.9ก) มีลักษณะเป็นมัดของเส้นใยสีขาวผลิตจากโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 2.8 ตร.ม.ต่อม. ทำการเตรียมสภาพตัวกรองชีวภาพในถังไนทรีฟิเคชันโดยเพิ่มปริมาณไนโตรไฟอิงแบคทีเรียให้ยึดเกาะกับพื้นผิวของตัวกรองเพื่อให้เกิดกระบวนการไนทรีฟิเคชันที่สมบูรณ์ โดยการนำตัวกรองที่ผ่านการใช้งานแล้วผูกติดกับท่อพีวีซีเพื่อถ่วงให้จมน้ำ ความยาวประมาณ 1.5 เมตร และล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา นำไปป้อนในถังพลาสติกที่บรรจุน้ำปริมาตร 70 ลิตร มีแอมโมเนียความเข้มข้น 2 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร และเติมอาหารกึ่งบดละเอียด (โปรตีน 35%) ประมาณ 2.5 กรัม (ความเข้มข้น 2 มก.แอมโมเนียไนโตรเจนต่อลิตร) วันเว้นวัน เพื่อเพิ่มสารอาหารและวิตามินให้กับจุลินทรีย์ เติมหากาตลงในถังพลาสติกด้วยหัวทรายตลอดเวลาเพื่อให้มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอ (รูปที่ 3.9ข) โดยเมื่อปริมาณแอมโมเนียในน้ำหมดลงจะทำการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ลงไป 0.55 กรัม เพื่อให้มีแอมโมเนียความเข้มข้น 2 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร และในระหว่างการทดลองตลอดระยะเวลาประมาณ 50 วัน จะทำการปรับค่าสภาพด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตให้อยู่ในช่วง 100-150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร เก็บตัวอย่างน้ำในถังทุกวันเพื่อตรวจวัดปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเทรต

ทำการประเมินประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพด้วยการตรวจวัดอัตราไนทรีฟิเคชัน โดยการสุ่มตัวอย่างใยกรองจากถังบ่มเชื้อภายหลังการปรับสภาพไว้เป็นระยะเวลาประมาณ 2 เดือน ตัดให้มี ความยาวประมาณ 10 ซม. บรรจุลงในขวดพลาสติกใส (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) ที่บรรจุน้ำปริมาตร 1.5 ลิตร มีแอมโมเนียความเข้มข้น 6 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร และมีการเติมหากาตตลอดเวลา (รูปที่ 3.9ค) โดยในระหว่างการทดลองจะทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเทรตในน้ำทุกวัน เมื่อปริมาณแอมโมเนียหมดลงจะทำการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ให้มีความเข้มข้น 6 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร เพื่อทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง



(ก)



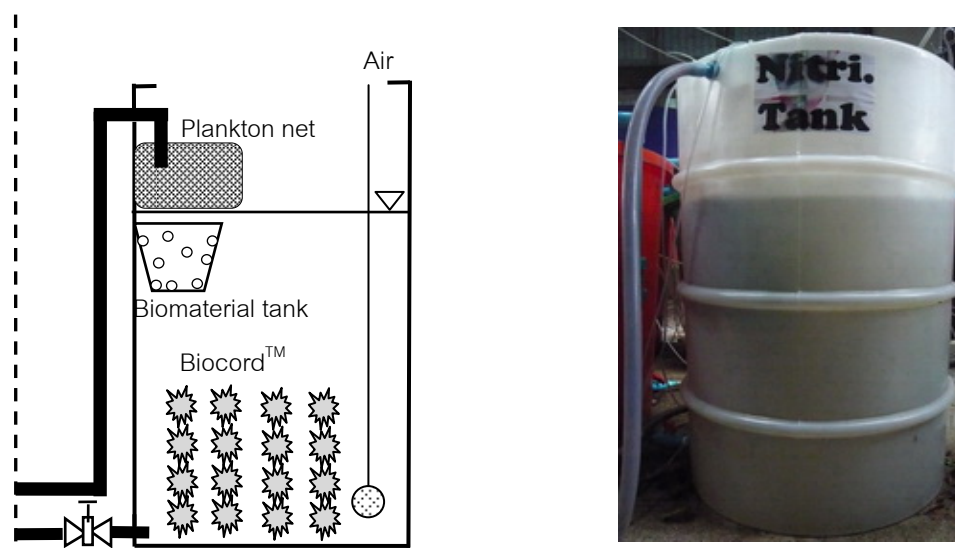
(ข)



(ค)

รูปที่ 3.9 (ก) ลักษณะของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน (ข) ถังบ่มตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน และ (ค) ชุดการทดลองสำหรับประเมินประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน

บรรจุตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นและตรวจวัดอัตราไนทริฟิเคชันแล้วลงในถังพลาสติกขนาด 200 ลิตร จำนวน 1 ถัง เติมน้ำปริมาตร 160 ลิตร โดยบริเวณด้านบนของถังติดตั้งผ้ากรองละเอียดหรือตะข่ายละเอียด (Plankton net) ขนาดรู 104 ไมโครเมตร เพื่อช่วยดักและคัดแยกสิ่งสกปรกและตะกอนไม่ให้เข้าสู่ถังไนทริฟิเคชัน ส่วนบริเวณด้านล่างของผ้ากรองละเอียดจะติดตั้งถังพลาสติกขนาดเล็กภายในบรรจุเปลือกหอยและใยกรองโพลิเมอร์ด้านบนเพื่อช่วยเพิ่มเชื้อไนทริฟิเคชันให้กับระบบ และจะเวียนน้ำกลับเข้าสู่ถังเลี้ยงปลานิลบริเวณก้นถังไนทริฟิเคชันด้วยวิธีการกักน้ำอย่างต่อเนื่องดังรูปที่ 3.10

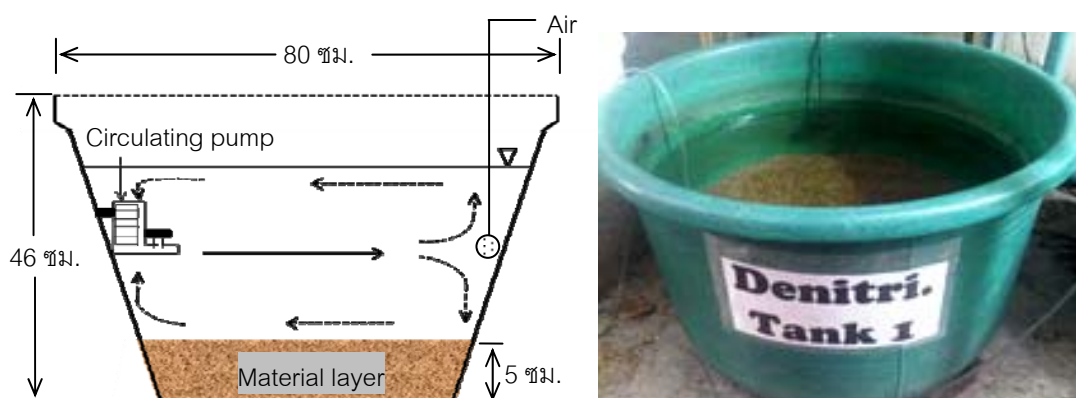


รูปที่ 3.10 แผนภาพและรูปถ่ายของถังไนตริฟิเคชันที่ใช้กับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำขนาดเล็ก

3.4 การเตรียมถังไนตริฟิเคชันที่บรรจุวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติ

เตรียมถังไนตริฟิเคชันที่จะใช้กับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยบรรจุวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1 ลงในถังพลาสติกปริมาตร 100 ลิตร ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 ซม. สูง 46 ซม. ลงไปเป็นชั้นหนา 5 ซม. (จำนวน 2 ถัง) ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งคิดเป็นพื้นที่ผิวกันถึงเท่ากับ 0.5 ตร.ม. และปริมาตรของวัสดุเท่ากับ 0.025 ลบ.ม. เติมน้ำที่มีปริมาณไนเตรตความเข้มข้น 100 มก./ไนโตรเจนต่อลิตร ปริมาตร 80 ลิตร และเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 2 โดยภายในถังไนตริฟิเคชันจะติดตั้งปั๊มน้ำและหัวทรายพ่นอากาศในอัตราความเร็ว 2.5 ลิตรต่อนาที เพื่อคงให้ค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำไม่ต่ำกว่า 2 มก.ต่อลิตร ตลอดระยะเวลาการทดลอง เก็บตัวอย่างน้ำในถังทุกวันเพื่อตรวจวัดปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต และตรวจวัดพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิ ค่าพีเอช โออาร์พี และค่าสภาพต่าง โดยเมื่อปริมาณไนเตรตลดต่ำกว่า 5 มก./ไนโตรเจนต่อลิตร จะถ่ายน้ำออกและเติมน้ำใหม่เดินระบบเช่นเดิมตลอดระยะเวลาการทดลองประมาณ 3 เดือน

ทำการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตของถังไนตริฟิเคชัน โดยการตรวจวัดอัตราไนตริฟิเคชัน และติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตในน้ำ หากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์จะพบการลดลงของไนเตรต โดยควรตรวจพบปริมาณแอมโมเนียและไนไตรต์น้อยมากในน้ำตัวอย่าง

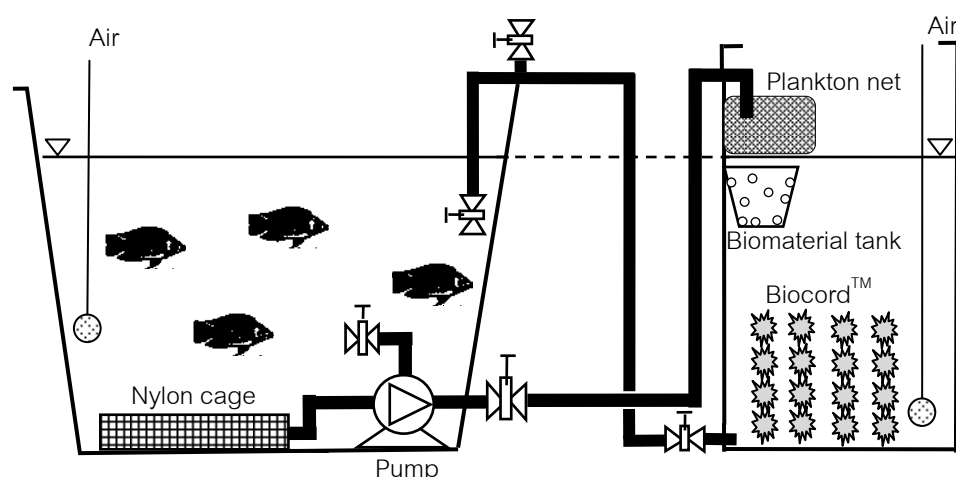


รูปที่ 3.11 แผนภาพและรูปถ่ายของถังดีไนทริฟิเคชันที่ใช้กับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำขนาดเล็ก

3.5 การเตรียมถังเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นถังพลาสติกขนาด 500 ลิตร จำนวน 1 ถัง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ม. สูง 1 ม. เติมน้ำจืดปริมาตร 450 ลิตร ภายใต้สภาวะจำลองของระบบบ่อไร้อินในโรงเรือนที่มีการเติมอากาศตลอดเวลา โดยบริเวณก้นถังติดตั้งปั๊มน้ำต่อกับท่อพีวีซีสำหรับสูบน้ำจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำไปยังถังไนทริฟิเคชัน ซึ่งส่วนปลายของท่อพีวีซีจะถูกห่อด้วยตะข่ายไนลอนเพื่อป้องกันไม่ให้ปลาหนีหลุดเข้าไปในถังไนทริฟิเคชัน ทำการเชื่อมต่อถังเพาะเลี้ยงเข้ากับถังไนทริฟิเคชันที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้งานดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยน้ำจากถังเพาะเลี้ยงจะถูกถ่ายเข้า-ออกถังไนทริฟิเคชันตลอดเวลา ทำการคัดเลือกปลานิลที่มีขนาดและน้ำหนักใกล้เคียงกันเพื่อเลี้ยงในถังพลาสติก โดยกำหนดความหนาแน่นปลาเริ่มต้นเท่ากับ 0.3 กก. ต่อลบ.ม. จำนวน 306 ตัว น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น 0.44 ± 0.13 กรัมต่อตัว และให้อาหารปลาทุกวันด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่ขายตามท้องตลาดในอัตราร้อยละ 5 ของน้ำหนักปลาต่อวัน

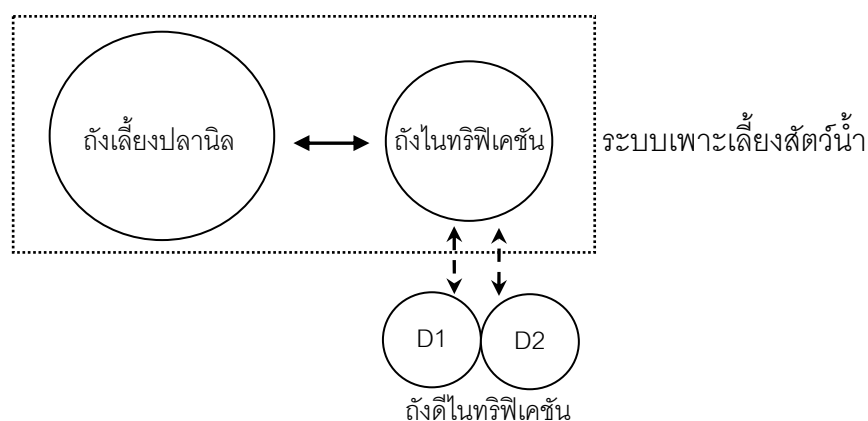
ก่อนการทดลองจะทำการปรับสภาพปลานิลให้คุ้นชินกับสภาพแวดล้อมภายในระบบการเลี้ยงและอาหารเม็ด โดยเมื่อปลานิลปรับตัวเข้ากับสิ่งแวดล้อมได้แล้วจึงเริ่มทำการทดลองเป็นระยะเวลา 3 เดือน เก็บตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงปลาทุกวันเพื่อตรวจวัดปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ทำการปรับค่าสภาพต่างด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตให้อยู่ในช่วง 100-150 มก. แคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ตรวจวัดค่าพีเอช อุณหภูมิ ค่าสภาพต่าง และปริมาณออกซิเจนละลายน้ำตลอดระยะเวลาการทดลอง



รูปที่ 3.12 แผนผังแสดงระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ใช้ในการทดลอง

3.6 การติดตั้งถังดีไนทริฟิเคชันเข้ากับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ทำการติดตั้งถังดีไนทริฟิเคชันเข้ากับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ประกอบไปด้วยถังเลี้ยงปลานิล และถังบำบัดไนทริฟิเคชัน ดังแผนผังการติดตั้งแสดงในรูปที่ 3.13 มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.13 แผนผังแสดงการเชื่อมต่อถังดีไนทริฟิเคชันเข้ากับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

น้ำจากถังเลี้ยงปลานิลจะถูกถ่ายเข้าสู่ถังไนทริฟิเคชันด้วยอัตราการไหล 74.20 ลิตรต่อชม. โดยกรองผ่านผ้ากรองละเอียดเพื่อกำจัดของเสียจากปลา เศษอาหารที่เหลือจากการบริโภค รวมถึงสิ่งสกปรกอื่นๆ และหมุนเวียนน้ำกลับเข้าสู่ถังเลี้ยงปลานิลด้วยวิธีการกลั่นน้ำอย่างต่อเนื่อง ทำการเพาะเลี้ยงปลานิลต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 3 เดือน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ยกเว้นการเติมน้ำเข้าระบบเพื่อทดแทนน้ำที่เกิดจากการเก็บตัวอย่างและการระเหยของน้ำ โดยเมื่อปริมาณไนโตรเจนใน

ระบบเลี้ยงปลาที่มีความเข้มข้นสูงประมาณ 50 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร จะทำการถ่ายน้ำเสียจากถังไนทริฟิเคชันปริมาตร 160 ลิตร เข้าสู่ถังดีไนทริฟิเคชันที่บรรจุวัสดุทดแทนดินธรรมชาติที่เหมาะสมจำนวน 2 ถัง (ถังละ 80 ลิตร) พร้อมกัน จนกระทั่งเมื่อปริมาณไนเตรตในน้ำลดลงต่ำกว่า 5 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร จึงหมุนเวียนน้ำกลับเข้าสู่ถังไนทริฟิเคชัน ทำเช่นนี้จนกระทั่งปริมาณไนเตรตในระบบเพาะเลี้ยงปลามีความเข้มข้นลดลงเหลือประมาณ 25 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ในครั้งแรกของการถ่ายน้ำเข้าสู่ถังดีไนทริฟิเคชันปริมาตรน้ำในระบบเพาะเลี้ยงจะลดลง จึงเติมน้ำทดแทนเข้าสู่ระบบเพาะเลี้ยงปริมาตร 160 ลิตร สำหรับการบำบัดไนเตรตครั้งถัดไปจะถ่ายน้ำจากถังไนทริฟิเคชันเข้าสู่ถังพักน้ำไว้ก่อนแล้วจึงถ่ายน้ำจากถังดีไนทริฟิเคชันเข้าสู่ถังไนทริฟิเคชัน จากนั้นจึงจะถ่ายน้ำจากถังพักน้ำเข้าสู่ถังดีไนทริฟิเคชัน ตามลำดับ โดยระหว่างการทดลองจะทำความสะอาดตู้กรองละเอียดทุกวัน และล้างตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันอย่างน้อยเดือนละ 1 ครั้ง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกรองและการบำบัดแอมโมเนียอีกด้วย ทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากถังดีไนทริฟิเคชันทั้งสองถังเพื่อตรวจวัดปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต และพารามิเตอร์คุณภาพน้ำอื่นๆ ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ ค่าสภาพต่าง และไออาร์พีตลอดระยะเวลาการบำบัดไนเตรต

3.7 การประเมินประสิทธิภาพระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

3.7.1 การประเมินอัตราการเติบโตของสัตว์น้ำ

ทำการประเมินอัตราการเติบโตของปลานิลในระบบเพาะเลี้ยง โดยการชั่งน้ำหนักและวัดความยาวของปลาด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง และอุปกรณ์วัดความยาว ก่อนการทดลอง ระหว่างการทดลองเดือนละครั้ง และวันสุดท้ายของการทดลอง เพื่อใช้คำนวณน้ำหนักและความยาวเฉลี่ยของปลานิลในระบบเพาะเลี้ยง ตลอดจนใช้ในการคำนวณอัตราการเติบโตของปลานิลต่อวัน (Daily Weight Gain: DWG) เปอร์เซ็นต์อัตราการรอดของปลานิล (Survival rate) และอัตราการแลกเนื้อ (Feed conversion ratio: FCR) จากสูตรต่างๆ ดังต่อไปนี้

$$\text{อัตราการเติบโต (กรัมต่อวัน)} = \frac{\text{น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย (กรัม)} - \text{น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น (กรัม)}}{\text{จำนวนวันที่ทำการทดลอง (วัน)}}$$

$$\text{อัตราการรอด (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{\text{จำนวนปลานิล}}{\text{จำนวนปลาที่ปล่อยทั้งหมด}} \times 100$$

$$\text{อัตราการแลกน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักอาหารรวมทั้งหมดต่อถัง (กรัม)}}{\text{น้ำหนักผลผลิตปลารวมทั้งหมดต่อถัง (กรัม)}}$$

ทำการตรวจวัดการเติบโตของปลาด้วยการชั่งน้ำหนักและวัดความยาว โดยสุ่มตัวอย่างปลา 90 ตัว เพื่อชั่งน้ำหนักและวัดความยาวแบบความยาวทั้งหมด (Total length) ซึ่งวัดจากปากถึงปลายหางของปลา โดยในวันสุดท้ายของการทดลองจะทำการชั่งน้ำหนักและวัดความยาวของปลาทุกตัวในถังเลี้ยง

3.7.2 การตรวจวัดคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงปลานิล

ทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงปลานิลเป็นระยะๆ ตามรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.7 ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต ค่าสภาพต่าง อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช ปริมาณเมทานอลในน้ำ น้ำหนักปลา ความยาวปลา อัตราการแลกน้ำ อัตราการเติบโตต่อวัน และอัตราการรอดของปลานิล

ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำที่ทำการเก็บตัวอย่างและวิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์ / เครื่องมือวิเคราะห์
แอมโมเนีย ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)	Strickland และ Parson (1972)
ไนไตรต์ ($\text{NO}_2^-\text{-N}$)	Strickland และ Parson (1972)
ไนเตรด ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)	Spectrophotometric method (APHA, 2005)
ค่าสภาพด่าง (Alkalinity)	Titrimetric method (APHA, 2005) Test Kit (ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
อุณหภูมิ	Thermometer
ออกซิเจนละลายน้ำ	DO meter
พีเอช	pH meter
ความขุ่น (Turbidity)	Turbidity meter
ปริมาณเมทานอลในน้ำ	Gas chromatography
น้ำหนัปลา	เครื่องชั่งตวงวัด 2 ตำแหน่ง
ความยาวปลา	วัดจากปากถึงปลายหางด้วยไม้บรรทัด
อัตราการแลกเนื้อ	เปรียบเทียบปริมาณอาหารที่ให้กับน้ำหนักผลผลิตปลารวมทั้งหมด
อัตราการเติบโตต่อวัน	เปรียบเทียบน้ำหนักปลากับระยะเวลาการเลี้ยง
อัตราการรอดตาย	เปรียบเทียบปริมาณปลาในวันเริ่มต้นและวันสุดท้าย

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดในเทรตของดินธรรมชาติเปรียบเทียบกับวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติในถังดีไนทริฟิเคชัน

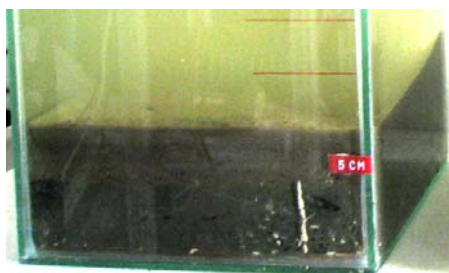
การศึกษานี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดในเทรตของดินธรรมชาติเปรียบเทียบกับวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติในถังดีไนทริฟิเคชัน โดยศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นของดินเป็นชุดควบคุม ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม ก่อนทำการบรรจุวัสดุทั้ง 4 ชนิด ลงในถังดีไนทริฟิเคชัน หน้า 5 ซม. มีพื้นที่ผิวก้นถัง 0.04 ตร.ม

- ลักษณะสมบัติของดินธรรมชาติและวัสดุเพื่อทดแทนดิน

ผลการศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นของดิน ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า ดินมีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นองค์ประกอบ 33.69 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแห้งของวัสดุแต่ละชนิดที่มีขนาดอนุภาคเท่ากันจะมีความแตกต่างกัน เมื่อเรียงลำดับวัสดุที่มีน้ำหนักเบาไปหาหนัก คือ ทรายเทียม หินพัมมิส ดิน และทราย ตามลำดับ สำหรับค่าพีเอชของวัสดุทุกชนิด พบว่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันและมีค่าเป็นกลาง โดยรูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของตัวกลาง 4 ชนิด เมื่อบรรจุในถังดีไนทริฟิเคชัน พบว่าดิน ทราย และหินพัมมิสจะอัดแน่นเป็นชั้น แต่ทรายเทียมจะมีลักษณะเป็นชั้นหลวมๆ เนื่องจากทรายเทียมมีลักษณะเบาทำให้เกิดการลอยตัว

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของดิน (ชุดควบคุม) ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม

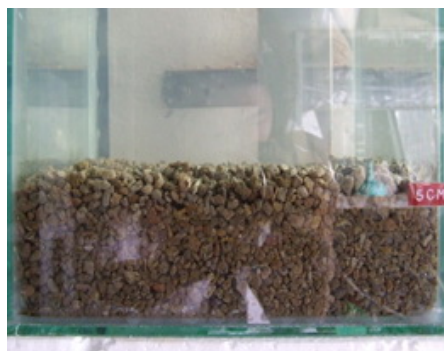
วัสดุ	ขนาดอนุภาค (มม.)	น้ำหนักแห้ง (กก.)	พีเอช	ปริมาณสารอินทรีย์ คาร์บอน (เปอร์เซ็นต์)
ดิน (ชุดควบคุม)	-	2.8	7.80	33.69
ทราย	1-3	3.5	7.17	-
หินพัมมิส	1-3	1.0	7.76	-
ทรายเทียม	1-3	0.5	6.79	-



(ก) ถังดิน (ชุดควบคุม)



(ข) ถังทราย



(ค) ถังหินพัมมิส



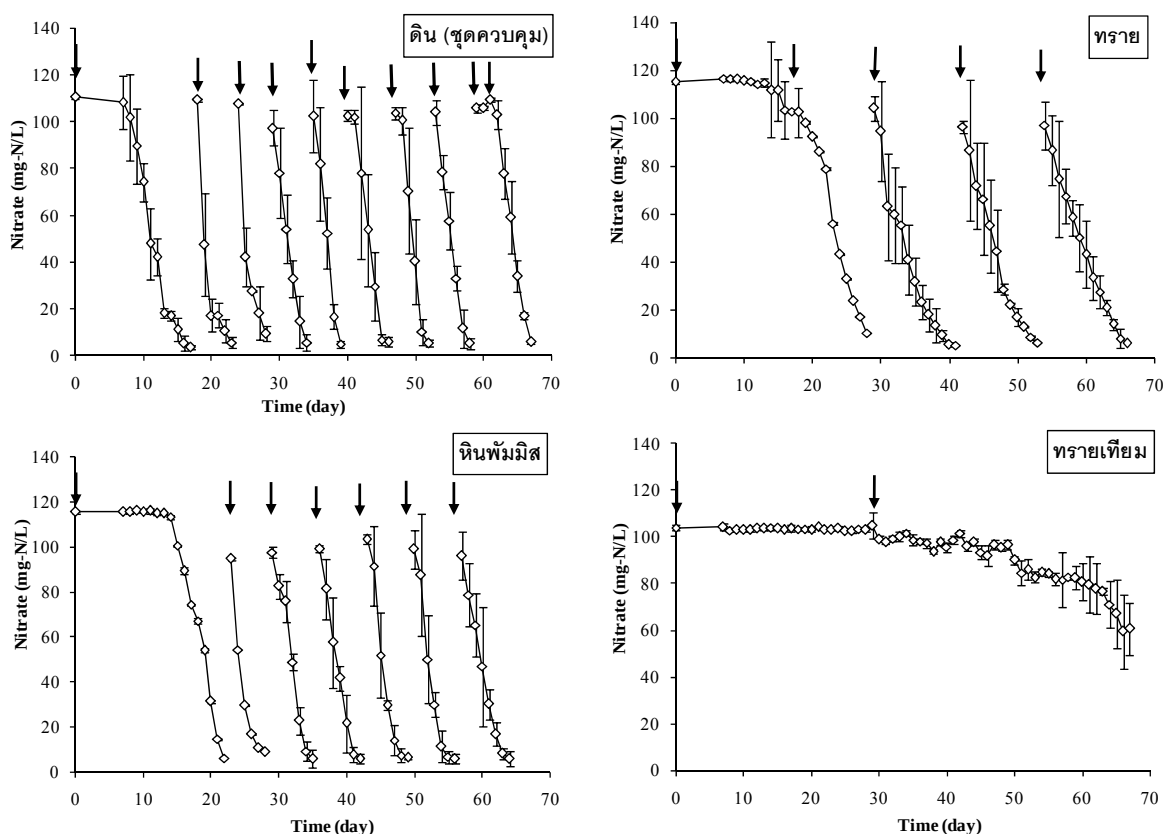
(ง) ถังทรายเทียม

รูปที่ 4.1 ลักษณะของชั้นวัสดุทั้ง 4 ชนิด ในถังดีไนทริฟิเคชัน

- การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน

ภายหลังการปรับสภาพของวัสดุแต่ละชนิดภายในถังดีไนทริฟิเคชันที่บรรจุน้ำปริมาตร 8 ลิตร ไนเตรตเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร เติมนีโอเจนเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนปริมาตร 3.40 มล.ในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และตรวจวัดสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันด้วยโพรบไฮอาร์พี พบว่าหลังจากบ่มเชื้อในระยะเวลา 17 วัน ถังดิน (ชุดควบคุม) สามารถบำบัดไนเตรตได้ โดยไนเตรตจะถูกบำบัดให้ลดลงต่ำกว่า 5 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งแตกต่างจากถังบรรจุวัสดุอีก 3 ชนิด ได้แก่ ทราย หินพัมมิส และทรายเทียมที่ไม่เกิดการบำบัดไนเตรต เนื่องจากในดินธรรมชาติมักจะมีเชื้อจุลินทรีย์อยู่โดยทั่วไปทำให้ไนเตรตสามารถถูกบำบัดได้ทันทีด้วยจุลินทรีย์ดังกล่าว แต่หลังจากทำการทดสอบการบำบัดไนเตรตนาน 67 วัน พบว่าถังดิน ทราย และหินพัมมิสสามารถบำบัดไนเตรตให้ลดลงต่ำกว่า 5 มก.ไนโตรเจนต่อลิตรได้ด้วยระยะเวลาการบำบัดที่แตกต่างกัน คือ 4.8 ± 0.5 12.7 ± 0.58 และ 5.0 ± 0.82 วัน ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.2 จากข้อมูลดังกล่าวสามารถคำนวณอัตราดีไนทริฟิเคชัน (Denitrification Rate) ของแต่ละวัสดุจากการไคเนติกส์ของมิเคลลิส-เมนเทน (Michaelis – Menten) ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถสูงสุดของระบบที่จะใช้บำบัดไนเตรต พบว่าอัตราดีไนทริฟิเคชันของดิน ทราย และหินพัมมิสแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) คือ มีค่าเท่ากับ $5,383.1 \pm 507.6$ $2,586.5 \pm 169.0$ และ $3,905.7 \pm 95.5$ มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.พื้นที่ผิวกันถึงต่อวัน ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.2 นั่นคือ

ถึงบรรจุดินธรรมชาติมีอัตราดีในทรีพีเคชั่นสูงกว่าวัสดุอีก 3 ชนิด เนื่องจากดินมีปริมาณคาร์บอนเริ่มต้นสูงถึง 33.69% ทำให้มีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนสูงกว่าถึงดีในทรีพีเคชั่นที่บรรจุตัวกลางอื่นๆ ส่วนทรายเทียมไม่สามารถวิเคราะห์หาอัตราดีในทรีพีเคชั่นได้ เนื่องจากทรายเทียมมีลักษณะเบาจึงเกิดการลอยตัวไม่อัดแน่นเป็นชั้น เกิดเป็นช่องว่างทำให้ออกซิเจนสามารถละลายลงสู่ล่างได้ ลักษณะเช่นนี้จึงไม่เหมาะต่อการเกิดปฏิกิริยาดีในทรีพีเคชั่น



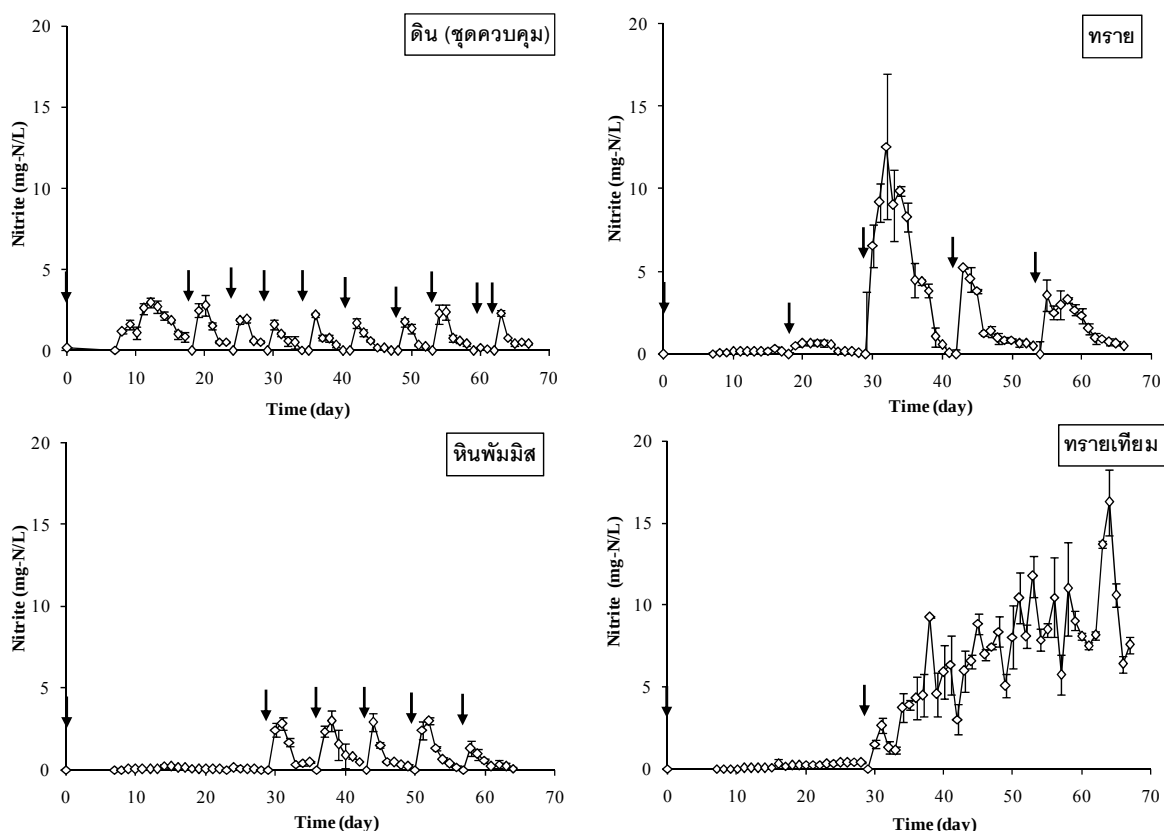
รูปที่ 4.2 ปริมาณไนเตรตของถังดิน (ชุดควบคุม) ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม โดย (↓) แสดงการเติมไนเตรตและเมทานอลลงในถัง เมื่อไนเตรตถูกบำบัดจนมีค่าต่ำกว่า 5 มก.ต่อลิตร ยกเว้นถังทรายเทียมในการทดลองวันที่ 29

ตารางที่ 4.2 อัตราดีในทรีพีเคชั่นของดินและวัสดุเพื่อทดแทนดินในถังดีในทรีพีเคชั่น

อัตราดีในทรีพีเคชั่น	ดิน (ควบคุม)	ทราย	หินพัมมิส	ทรายเทียม
มก.ไนโตรเจน/ตร.ม. ¹ /วัน	5,383.1±506.6	2,586.5±169.0	3,905.7±95.5	-
มก.ไนโตรเจน/ลิตรของวัสดุ/วัน	107.7±10.1	51.7±3.4	78.1±1.9	-

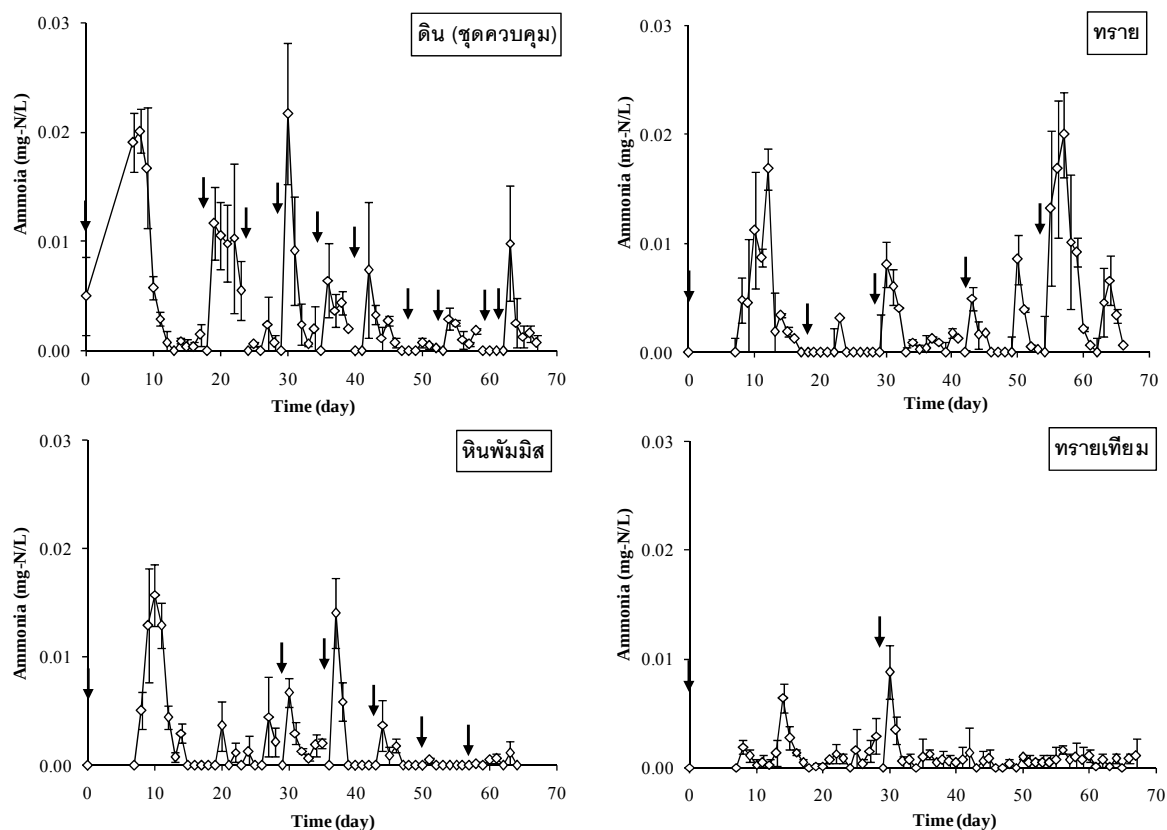
¹หมายเหตุ: คัดจากพื้นที่ผิวกันถัง

ผลการตรวจวัดปริมาณไนไตรต์ ดังรูปที่ 4.3 พบว่าปริมาณไนไตรต์ที่พบในน้ำของถังดินทราย และหินพัมมิส มีความเข้มข้นน้อยกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งมีความเข้มข้นต่ำกว่าเมื่อเทียบกับไนเตรต แสดงว่าปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดโดยสมบูรณ์จึงไม่มีการสะสมของไนไตรต์ที่เป็นสารตัวกลางในปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ส่วนปริมาณไนไตรต์ในถังทรายเทียมเกิดการสะสมเพิ่มปริมาณสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนในวันสุดท้ายของการทดลองพบว่าปริมาณไนไตรต์สูงถึง 7.12 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ทั้งนี้จากรายงานการวิจัยพบว่าไนไตรต์มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ เนื่องจากไนไตรต์จะทำปฏิกิริยากับฮีโมโกลบินเปลี่ยนเป็นเมทฮีโมโกลบินยับยั้งการขนถ่ายออกซิเจนภายในเซลล์เม็ดเลือด (Tomasso และคณะ, 1979; Huey และคณะ, 1980; Rodrigues และคณะ, 2007) ดังนั้นในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีปริมาณไนไตรต์อยู่ระหว่าง 0.08-0.35 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร (Camargo และ Alonso, 2007)



รูปที่ 4.3 ปริมาณไนไตรต์ของดิน (ชุดควบคุม) ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม โดย (↓) แสดงการเติมไนเตรตและเมทานอลเพิ่มลงในถังเมื่อไนเตรตถูกบำบัดจนมีค่าต่ำกว่า 5 มก.ต่อลิตร ยกเว้นถังทรายเทียมในการทดลองวันที่ 29

และจากการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียในทุกชุดการทดลองพบว่ามีค่าน้อยกว่า 0.03 มก. ไนโตรเจนต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.4

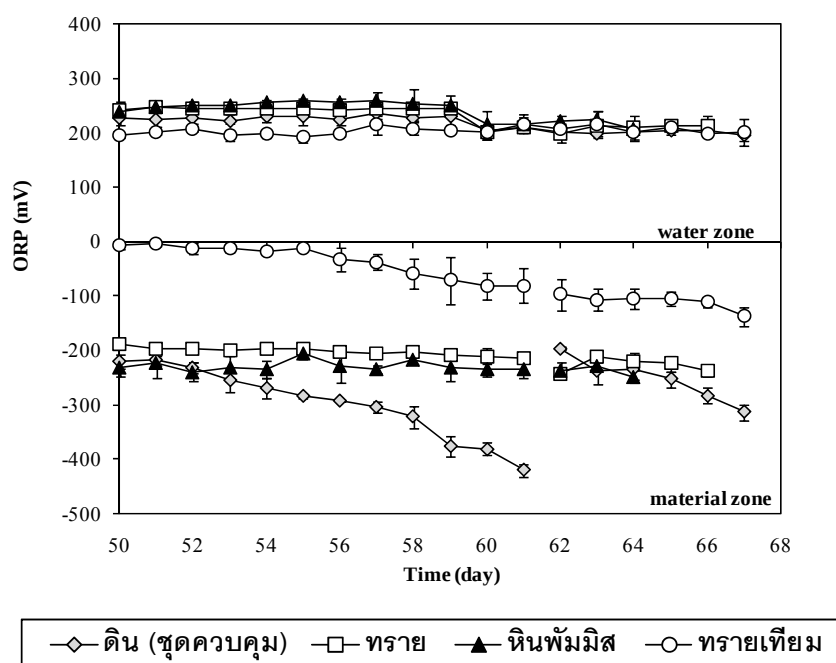


รูปที่ 4.4 ปริมาณแอมโมเนียของดิน (ชุดควบคุม) ทราย หินพั้มมิส และทรายเทียม โดย (↓) แสดงการเติมไนเตรตและเมทานอลเพิ่มลงในถังเมื่อไนเตรตถูกบำบัดจนมีค่าต่ำกว่า 5 มก.ต่อลิตร ยกเว้นถังทรายเทียมในการทดลองวันที่ 29

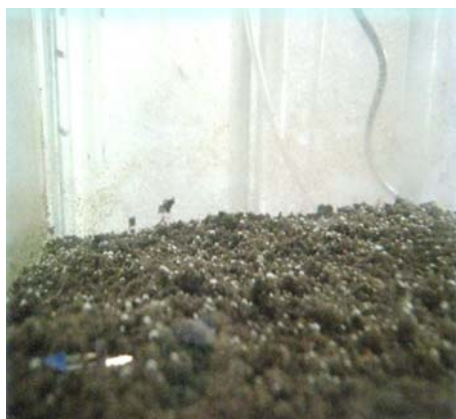
- ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน

การเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ในถังทรายเทียมสอดคล้องกับค่าโออาร์พีที่ตรวจวัดได้ในชั้นวัสดุที่มีค่าโออาร์พีเฉลี่ยเท่ากับ -60.70 มิลลิโวลต์ ดังรูปที่ 4.5 โดยมีรายงานว่า การเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์จะมีค่าโออาร์พีน้อยกว่า -200 มิลลิโวลต์ และจะเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากกระบวนการซัลเฟตรีดักชันเมื่อค่าโออาร์พีมีค่าน้อยกว่า -400 มิลลิโวลต์ (Sillen, 1965; Hamlin และคณะ, 2008) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในชุดควบคุมของวันที่ 59-61 ที่ตรวจพบการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยสังเกตได้จากการมีฟองอากาศเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของชั้นดินดังรูปที่ 4.6 และค่าโออาร์พีมีแนวโน้มลดลงและมีค่าระหว่าง -420.3 ถึง -375.0

มิลลิโวลท์ ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากการอัดแน่นของชั้นดินที่เป็นอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้เกิดสภาวะขาดออกซิเจนได้ง่าย โดยจุลินทรีย์หลากหลายชนิดทั้งดีในทวีไฟอิงแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรป และออโตโทรปที่อาศัยอยู่ร่วมกันในดินตะกอน (Brinkhoff และคณะ, 1998) จะเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะไร้ออกซิเจนโดยใช้สารอินทรีย์ที่อยู่ในดินเป็นแหล่งอาหารและใช้ออกซิเจนจากปฏิกิริยารีดักชันของซัลเฟตเป็นผลให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ และหากซัลไฟด์เหล่านั้นทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนในน้ำจะเกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขึ้น (Di toro และคณะ, 1996) โดยมีรายงานว่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ปริมาณเพียงเล็กน้อยก็สามารถก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำและทำให้ระบบล้มเหลวได้ ในระหว่างการทดลองจึงต้องหยุดการเติมเมทานอล และรอจนกระทั่งโออาร์พีมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า -250 มิลลิโวลท์ จึงทำการเดินระบบต่อไป นอกจากนี้การเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ยังส่งผลให้ค่าพีเอชและความเป็นด่างของน้ำมีค่าลดลง โดยค่าพีเอชจะอยู่ในช่วง 7.6-8.7 และค่าสภาพด่างอยู่ในช่วง 100-480 มก.แคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ ยกเว้นถึงดินในช่วงการทดลองวันที่ 59-61 และถึงทรายเทียมที่ไม่เกิดการบำบัดในเทรต ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวแตกต่างจากสภาวะการเกิดปฏิกิริยาดีในทวีไฟเคชันโดยทั่วไปที่ค่าพีเอชและสภาพความเป็นด่างจะมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากผลิตผลที่สำคัญของปฏิกิริยานี้คือ ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544; Vives, 2004)



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงค่าโออาร์พีในชั้นน้ำและชั้นวัสดุ ในช่วงวันที่ 50-67

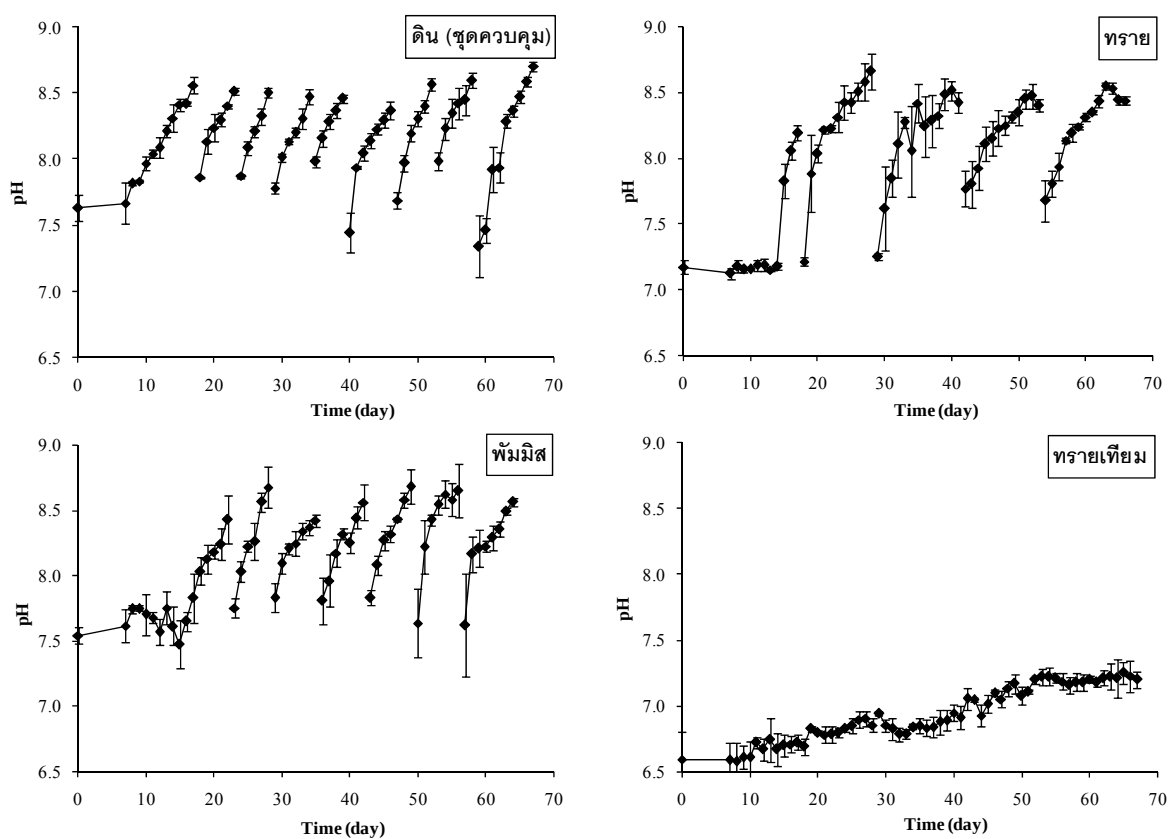


(ก)

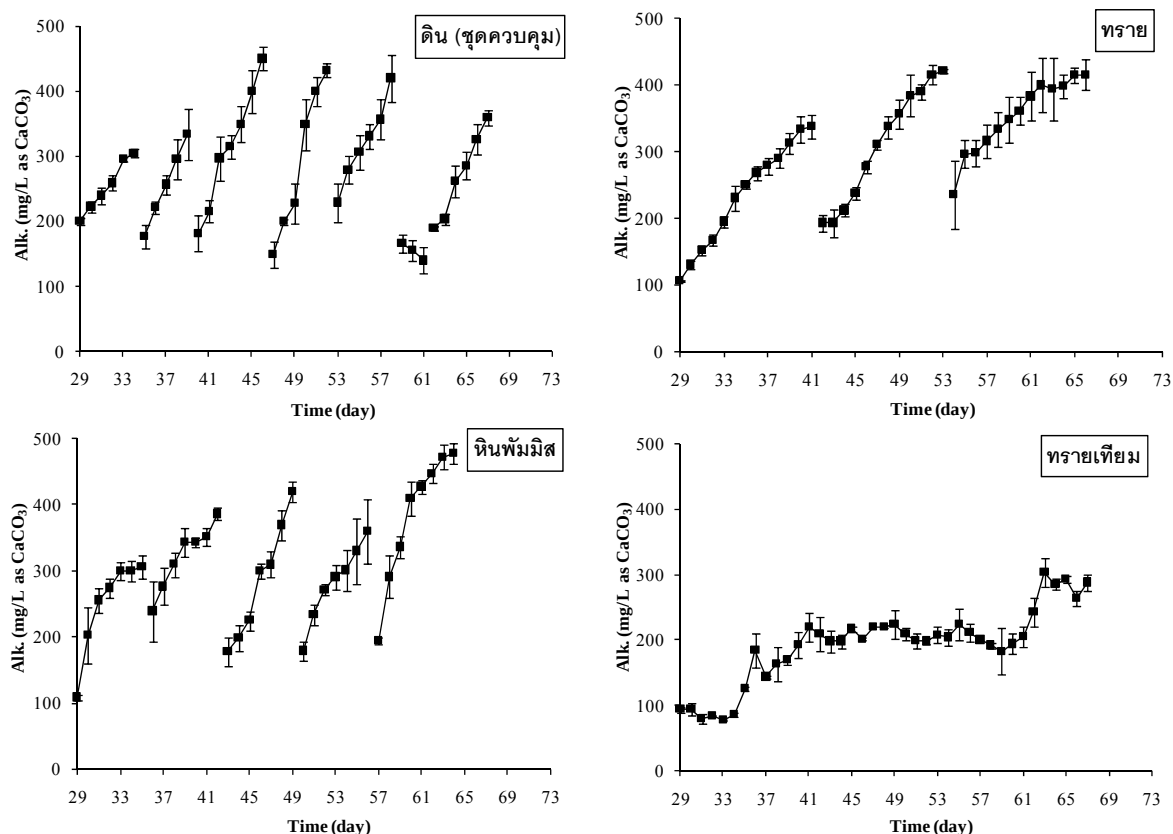


(ข)

รูปที่ 4.6 (ก) ฟองอากาศบนผิวชั้นดิน และ (ข) ฟองอากาศและตะกอนแขวนลอยบนผิวน้ำของถัง
บรรจุดิน



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของดิน (ชุดควบคุม) ทราาย หินพัมมิส และทราายเทียม

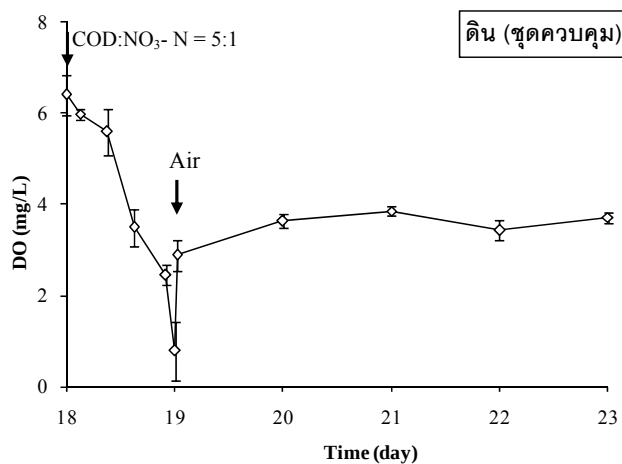


รูปที่ 4.8 ค่าสภาพต่างในช่วงวันที่ 29-67 ของดิน (ชุดควบคุม) ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม

การเติมเมทานอลลงในชั้นน้ำเพื่อเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนจะส่งผลทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงอย่างชัดเจนดังรูปที่ 4.9 โดยจะลดลงจนมีค่าต่ำกว่า 1.0 มก.ต่อลิตร ในถังดินและเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันกับทุกชุดทดลอง (ตารางที่ 4.3) ยกเว้นถังทรายเทียมที่มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำมากจนเสี่ยงต่อการเกิดสภาวะไร้ออกซิเจนที่จะทำให้เกิดน้ำเน่าเสียและระบบล้มเหลวในที่สุด แต่จากการติดตั้งปั้มน้ำขนาดเล็กเพื่อช่วยหมุนเวียนน้ำและการเติมออกซิเจนภายในถังทดลอง ทำให้สามารถป้องกันไม่ให้เกิดปริมาณออกซิเจนในน้ำลดต่ำลงมากจนเกินไป สภาวะของถังทดลองในงานวิจัยนี้จึงคงสภาวะของชั้นน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนละลายประมาณ 2.0 มก.ต่อลิตร และค่าไออาร์พียังคงเป็นค่าบวก ในขณะที่ในชั้นวัสดุทดลองปริมาณออกซิเจนละลายมีค่าเป็นศูนย์และไออาร์พีติดลบ ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมของการเกิดกระบวนการดีไนโตรฟิเคชันที่กั้นถัง (Kutako และคณะ, 2005)

จากการพิจารณาพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำหลังการบำบัดในถังดิน (ชุดควบคุม) และชุดทดลองตลอดระยะเวลา 67 วัน ดังตารางที่ 4.3 พบว่าค่าสภาพต่างและพีเอชของน้ำไม่แตกต่างกัน แต่พารามิเตอร์ที่แสดงถึงความขุ่นของน้ำในถังทดลองกลับมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน นั่นคือความขุ่นของน้ำในถังดินมีค่าความขุ่นสูง เนื่องจากมีตะกอนแขวนลอยในน้ำมากกว่าเมื่อ

เปรียบเทียบกับถังบรรจุวัสดุอีก 3 ชนิด และตรวจพบปริมาณตะกอนแขวนลอยเพิ่มสูงขึ้นอีกเมื่อเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบ โดยฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะลอยตัวและนำเอาตะกอนดินบริเวณด้านล่างลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ทำให้มีตะกอนดินแขวนลอยอยู่ในชั้นน้ำมากขึ้น (ดังรูปที่ 4.6ข)



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำหลังจากเติมเมทานอลในถังดิน (ชุดควบคุม) โดย (↓) แสดงการเติมเมทานอลในวันที่ 18 และเติมอากาศวันที่ 19

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำหลังบำบัดในถังดิน (ชุดควบคุม) และชุดทดลองตลอดระยะเวลาการทดลอง 67 วัน

	ดิน (ควบคุม)	ทราย	หินพัมมิส	ทรายเทียม
แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	0.00	0.00	0.00	0.00
ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	0.28±0.15	0.35±0.23	0.29±0.19	7.57±0.50
ค่าไออาร์พีชั้นน้ำ (มิลลิโวลท์) เฉลี่ยวันที่ 50-67	215.99±13.60	228.83±18.86	240.06 ±18.11	203.11 ±7.27
ไออาร์พีชั้นวัสดุ (มิลลิโวลท์) เฉลี่ยวันที่ 50-67	-283.56±61.65	-209.27±14.58	-203.74b ±9.44	-60.70 ±43.75
ค่าสภาพต่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร)	383.18±58.95	391.40 ±46.75	389.85 ±64.44	288.17±13.13
พีเอช	8.53±0.12	8.42 ±0.02	8.58 ±0.10	7.20±0.06
ความขุ่น (เอ็นทียู)	7.45±0.91	1.02 ±0.51	1.22 ± 0.23	1.18±0.03

- อัตราบำบัดดีในทรีพีเคชั่นของดินและวัสดุเพื่อทดแทนดิน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอัตราการบำบัดในเทอร์ตของดินและวัสดุเพื่อทดแทนดินจากงานวิจัยนี้และงานวิจัยอื่นๆ ที่เคยมีรายงาน ดังตารางที่ 4.4 พบว่าอัตราบำบัดดีในทรีพีเคชั่นของงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วงปานกลาง โดยประสิทธิภาพของการบำบัดด้วยกระบวนการดีในทรีพีเคชั่นนั้นจะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยหลักที่สำคัญ ปัจจัยแรกคือปริมาณของดีในทรีพีอิงแบคที่เรียในระบบ ซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางในถังทดลอง เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดมีพื้นที่ผิวให้แบคทีเรียยึดเกาะแตกต่างกัน สำหรับงานวิจัยนี้พบว่าดินธรรมชาติมีอัตราการบำบัดในเทอร์ตสูงกว่าหินพัมมิส และทราย โดยมีค่าเท่ากับ 5.38 3.91 และ 2.59 ก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม. พื้นที่ผิวก้นถังต่อวัน ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาในแง่การนำไปประยุกต์ใช้งานกลับพบว่าการใช้ดินธรรมชาติจะส่งผลให้เกิดปัญหาต่างๆ มากมาย ทั้งในแง่การควบคุมสภาวะการเดินระบบและเสถียรภาพด้านประสิทธิภาพการบำบัด โดยหินพัมมิสจะง่ายต่อการนำไปใช้งาน การดูแลรักษา และการนำกลับมาใช้ใหม่เมื่อเปรียบเทียบกับดินธรรมชาติ นอกจากนี้หินพัมมิสยังมีลักษณะเป็นรูปวงรีจึงมีพื้นที่ผิวมาก โดยหินพัมมิสขนาด 1 กรัม อาจมีพื้นที่ผิวได้ถึง 13 ตร.ม. (นิคม จึงอยู่สุข, 2540) ส่วนอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการดีในทรีพีเคชั่น คือระยะเวลาในการบ่มเชื้อดีในทรีพีอิงแบคที่เรียเพื่อให้ยึดเกาะและเติบโตเพิ่มจำนวนบนพื้นผิวของวัสดุ โดยจากการทดลองพบว่าถังดีในทรีพีเคชั่นที่บรรจุหินพัมมิสจะใช้เวลาในการบำบัดในเทอร์ตภายใต้สภาวะของระบบที่เหมาะสมได้อย่างสมบูรณ์ภายในช่วงเวลา 3-4 สัปดาห์ โดยไม่ต้องมีการเติมหัวเชื้อลงไป ซึ่งเป็นแนวทางที่เหมาะสมที่จะหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนเชื้อโรคที่ไม่พึงประสงค์สำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้ ซึ่งจากจากข้อมูลต่างๆ และเหตุผลดังกล่าวข้างต้นทำให้งานวิจัยนี้เลือกใช้ หินพัมมิสเพื่อบรรจุในถังดีในทรีพีเคชั่นสำหรับการทดลองในช่วงต่อไป

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบชนิดและความแตกต่างของอัตราการบำบัดไนโตรเจนของวัสดุแต่ละชนิดในระบบดีไนทริฟิเคชัน

วัสดุ	ลักษณะ	อัตราดีไนทริฟิเคชัน		เอกสารอ้างอิง
		ก.ไนโตรเจน/ ตร.ม./วัน	ก.ไนโตรเจน/ ลิตร/วัน	
PHB ($[C_4H_6O_2]_n$)	1.49 ตร.ม./ลิตร	0.12-0.67	-	Boley และคณะ (2000)
PCL ($[C_6H_{10}O_2]_n$)	0.87 ตร.ม./ลิตร	0.48-3.84	-	
Bionolle ($[C_6H_8O_4]_n$)	1.22 ตร.ม./ลิตร	0.25-1.61	-	
เมมเบรน	ขนาดอนุภาค 3-8 ไมโครเมตร	6.58	-	Terada และคณะ (2006)
เศษไม้	หนา 2-15 มม.	-	0.33	Saliling และคณะ (2007)
ฟางข้าว	ขนาด 20-35 มม.	-	0.33	
กรวด	ขนาด 2.41 / 1.75-4.03 มม.	2.04-2.48 / 9.47	-	Vasiliadou และคณะ (2009)
เศษไม้	1,320 ลบ.ม.	-	0.01	Warneke และคณะ (2011)
ดินธรรมชาติ	-	5.38 ¹	0.11	งานวิจัยนี้
ทราย	ขนาด 1-3 มม.	2.59 ¹	0.05	งานวิจัยนี้
หินพัมมิส	ขนาด 1-3 มม.	3.91 ¹	0.08	งานวิจัยนี้

¹ หมายเหตุ: คัดจากพื้นที่ผิวทั้งหมด

4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติในถังดีไนทริฟิเคชัน

4.2.1 ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมต่ออัตราดีไนทริฟิเคชัน

การทดลองนี้เป็นการศึกษาชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมเพื่อเร่งปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในถังบรรจุหินพัมมิสซึ่งเป็นวัสดุที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.1 โดยใช้สารอินทรีย์คาร์บอน 2 ชนิด ได้แก่ เมทานอล (ชุดควบคุม) และกากน้ำตาล ในอัตราส่วนซีไอดีต่อไนโตรเจนไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 โดยลักษณะสมบัติของเมทานอลและกากน้ำตาลที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ลักษณะสมบัติของเมทานอลและกากน้ำตาลที่ใช้เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน เพื่อเติมลงในถังดีไนทริฟิเคชันที่บรรจุหินพัมมิส

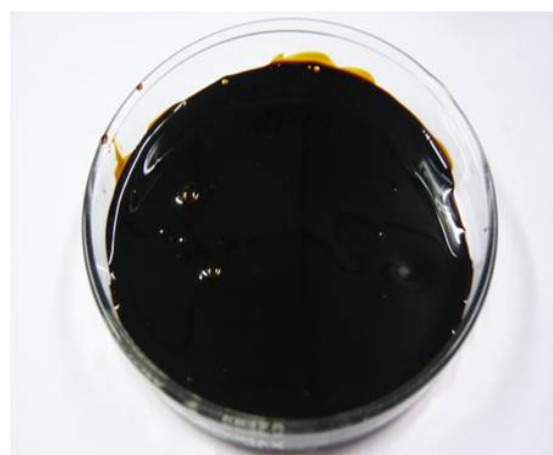
พารามิเตอร์	เมทานอล	กากน้ำตาล
ลักษณะสมบัติทางกายภาพ	ไม่มีสี	สีน้ำตาลดำ ของเหลวข้นเหนียว
ซีไอดี (ก./ลิตร)	1.50 กรัมซีไอดี/ กรัมเมทานอล ¹	993.55±3.58
ทีเคเอ็น (ก./ลิตร)	-	11.46±0.42
พีเอช	6.84	6.70
ปริมาตรที่ใช้เติมในถัง เพื่อให้มีอัตราส่วน ซีไอดีต่อไนโตรเจนในโตรเจน = 5:1 (ต่อถัง)	3.40 มล.	5.61 กรัม

¹ หมายเหตุ: คำนวณตามทฤษฎีของเมทานอลสำหรับการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน

โดยกากน้ำตาลหรือโมลาส (molasses) ที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นของเหลวข้นเหนียว สีน้ำตาลดำ ดังรูปที่ 4.10 มีปริมาณคาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) และ ไฮโดรเจน (H) เท่ากับ 31.26 7.03 และ 0.87% (โดยน้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ ซึ่งจากรายงานการวิจัยของ Najafpour และ Shan (2003) พบว่าในกากน้ำตาลมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบถึง 48-50% ส่วนใหญ่เป็นซูโครส กลูโคส และฟรักโตส มีน้ำประมาณ 17-25% และโพสเซียมคาร์บอเนต (เดกซ์ตริน เพนโทแซน และกรดยูโรนิก) ประมาณ 2-5%



(ก) เมทานอล

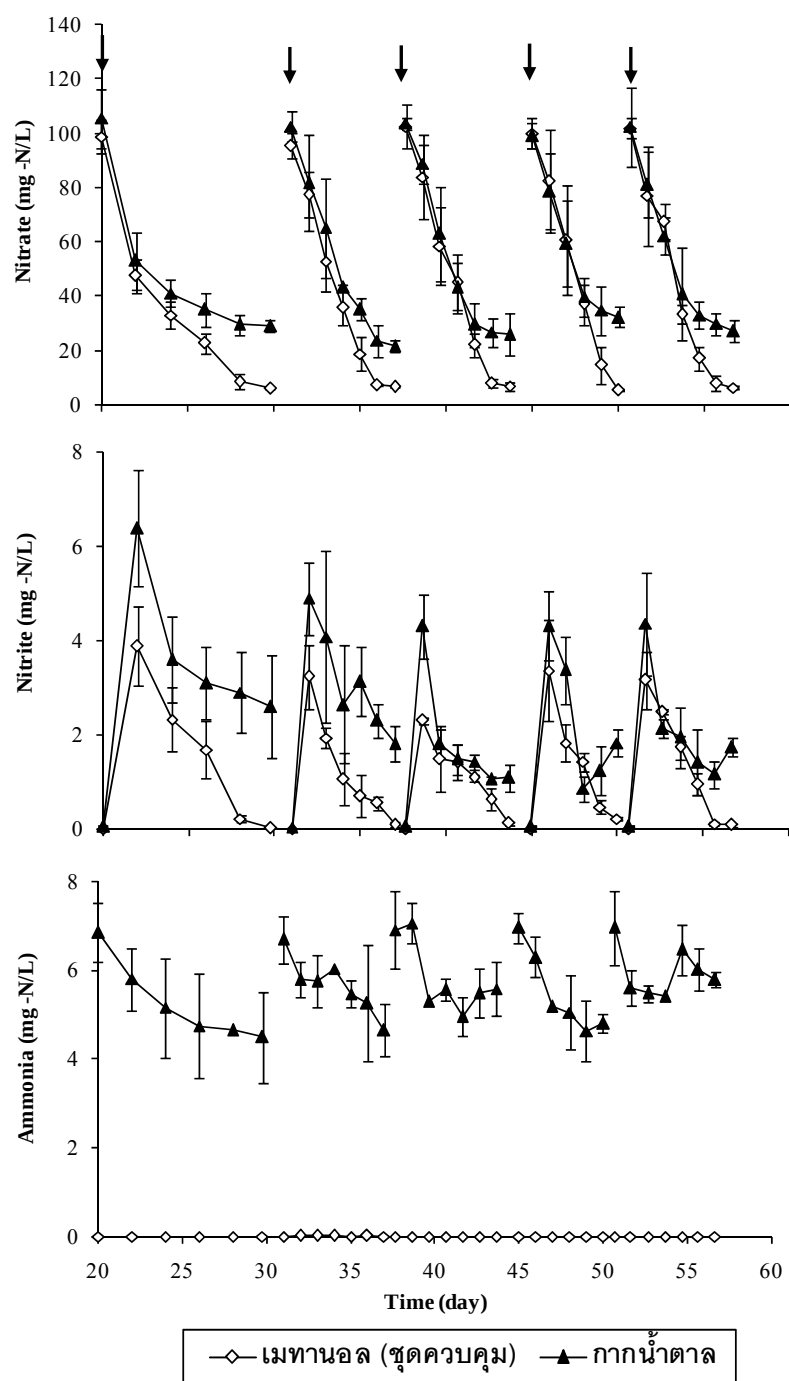


(ข) กากน้ำตาล

รูปที่ 4.10 ลักษณะของเมทานอลและกากน้ำตาลที่ใช้ในงานวิจัย

- การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจน

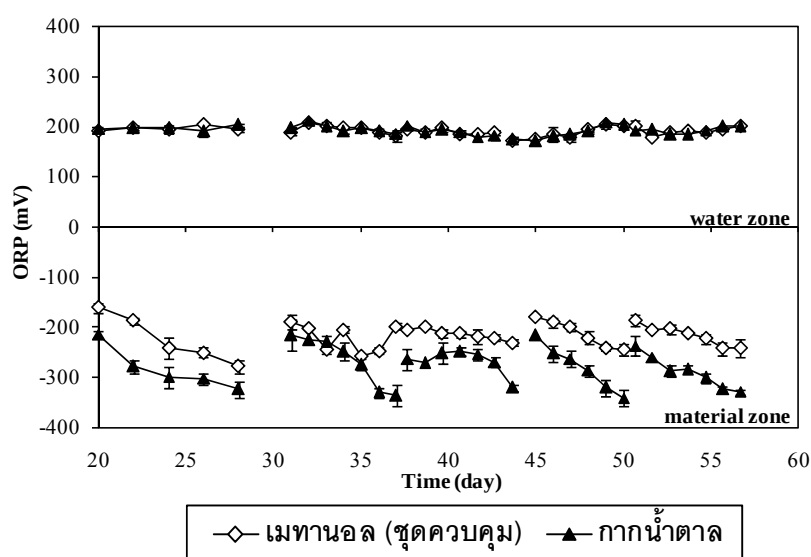
การทดลองในขณะนี้แบ่งย่อยออกเป็น 2 ชุดการทดลองคือ ชุดเติมเมทานอล (ชุดควบคุม) และชุดเติมกากน้ำตาลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในถังดีไนทริฟิเคชัน โดยใช้หินพัมมิสที่ผ่านการบ่มเชื้อและล้างทำความสะอาดแล้วผสมกับหินพัมมิสใหม่เพื่อนำไปบรรจุในถังปฏิกรณ์ ทำการเลี้ยงเชื้อดีไนทริฟิเคชันแบบที่เรียกว่าโฟแทสซีเอ็มไนเทรตเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร และใช้เมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน เป็นระยะเวลา 19 วัน พบว่าปริมาณไนเทรตถูกบำบัดอย่างสมบูรณ์ (ความเข้มข้นไนเทรตต่ำกว่า 5 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร และไม่มีการสะสมของไนไทรต์) ในทุกถังการทดลอง ในวันที่ 20 จึงทำการเติมกากน้ำตาลในชุดทดลองปริมาณ 5.61 กรัม เพื่อเปรียบเทียบกับชุดเติมเมทานอลซึ่งเป็นชุดควบคุม ผลการทดลองดังรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าในช่วงระยะเวลาการทดลองที่เท่ากัน สารอินทรีย์คาร์บอนทั้ง 2 ชนิดมีความสามารถในการบำบัดไนเทรตได้แตกต่างกัน โดยเมทานอลสามารถบำบัดไนเทรตได้จนมีค่าต่ำกว่า 5 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ส่วนกากน้ำตาลยังคงมีปริมาณไนเทรตคงเหลือในน้ำหลังการบำบัดไนเทรตเฉลี่ยเท่ากับ 28 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ส่วนผลการตรวจวัดปริมาณไนไทรต์ พบว่าปริมาณไนไทรต์ที่พบในน้ำหลังการบำบัดไนเทรตของถังที่เติมกากน้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอนมีปริมาณมากที่สุด คือ 1.8 ± 0.5 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ส่วนถังเติมเมทานอลมีค่าไนไทรต์เพียงเล็กน้อยเท่ากับ 0.1 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร อย่างไรก็ตามอาจกล่าวได้ว่าปริมาณไนไทรต์ที่เกิดขึ้นในชุดทดลองมีความเข้มข้นต่ำ (0.1-1.8 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร) เมื่อเทียบกับปริมาณไนเทรตในทุกชุดการทดลอง แสดงว่าปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้โดยสมบูรณ์จึงไม่มีไนไทรต์สะสม สำหรับปริมาณแอมโมเนียในน้ำหลังการบำบัดไนเทรตของชุดการทดลองทั้งสองพบว่า ในชุดที่เติมกากน้ำตาลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนมีปริมาณแอมโมเนียสูงกว่าชุดที่เติมเมทานอล ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.1 ± 0.6 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร โดยปริมาณแอมโมเนียที่ตรวจวัดได้เป็นผลมาจากแอมโมเนียในกากน้ำตาลเนื่องจากกากน้ำตาลมีค่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดสูงถึง 11.46 ± 0.42 กรัมต่อลิตร (ดังตารางที่ 4.5) และเมื่อพิจารณาพร้อมกับรายงานของ van Rijn และ Rivera (1990) ที่พบว่าระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ปลอดภัยสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีค่าไม่เกิน 1 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร จึงทำให้สรุปได้ว่ากากน้ำตาลหรือโมลาสไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อเติมลงในถังดีไนทริฟิเคชัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อเร่งอัตราดีไนทริฟิเคชันในถังทดลองเพื่อบำบัดไนเทรตในการทดลองช่วงต่อไป



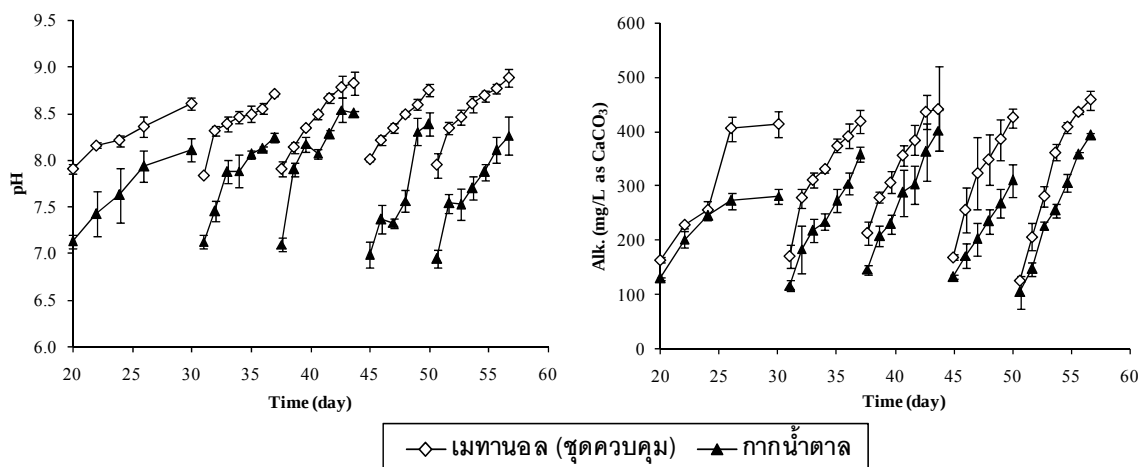
รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนเปรียบเทียบระหว่างชุดทดลองที่เติมเมทานอล (ชุดควบคุม) และกากน้ำตาลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน โดย (↓) แสดงการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนลงในถังหมักในชุดควบคุมถูกบำบัดจนมีค่าต่ำกว่า 5 มก.ต่อลิตร

- ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีในทรีพีเคชัน

ผลการตรวจวัดปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่เป็นตัวบ่งชี้ปฏิกิริยาดีในทรีพีเคชัน แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าค่าโออาร์พีในชั้นหินฟัสมิสของชุดที่เดิมเมทานอล (ชุดควบคุม) และชุดที่เดิมกากน้ำตาล มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -217.9 ± 26.3 และ -274.3 ± 37.4 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ซึ่งผลจากการตรวจวัดตลอดระยะเวลาการทดลองพบว่า ชุดเดิมกากน้ำตาลมีค่าโออาร์พีลดลงต่ำสุดเท่ากับ -342.4 มิลลิโวลต์ ซึ่งเสี่ยงต่อการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ง่าย สอดคล้องกับรายงานของ Hamlin และคณะ (2008) ที่กล่าวว่า จะเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากกระบวนการซัลเฟตรีดักชันเมื่อค่าโออาร์พีมีค่าน้อยกว่า -400 มิลลิโวลต์ ในขณะที่เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชและสภาพต่างของทุกชุดการทดลองพบว่า มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยจากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่า ค่าสภาพต่างของชุดควบคุมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นกว่าชุดทดลองอย่างชัดเจน แสดงถึงอัตราดีในทรีพีเคชันที่เพิ่มสูงขึ้นในชุดควบคุมมากกว่าชุดทดลองเช่นกัน



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงค่าโออาร์พีในชั้นหินฟัสมิสและชั้นน้ำของชุดที่เดิมเมทานอล (ชุดควบคุม) และกากน้ำตาลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนและกากน้ำตาลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน



รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชและสภาพต่างในถังบำบัดดีไนทริฟิเคชันของชุดที่เติมเมทานอล (ชุดควบคุม) และกากน้ำตาลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน

นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีของน้ำหลังการบำบัดในเทรตในทุกชุดการทดลองด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด (Closed Reflux method) พบว่าชุดการทดลองที่เติมกากน้ำตาลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนมีปริมาณซีโอดีสูงกว่าชุดควบคุมมาก โดยมีค่าเท่ากับ 129.34 ± 5.56 มก. ต่อลิตร ในขณะที่ชุดควบคุมไม่สามารถวิเคราะห์หาค่าซีโอดีได้ เนื่องจากปริมาณซีโอดีในน้ำมีค่าน้อยมาก การใช้วิธีฟลักซ์แบบปิดจึงไม่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์หาปริมาณซีโอดีในน้ำของชุดที่เติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน และเมื่อสังเกตลักษณะและสีของน้ำในชุดทดลองภายหลังการบำบัดในเทรต จะพบว่าน้ำมีสีน้ำตาลเหลืองซึ่งแตกต่างจากชุดควบคุมที่ไม่มีสีอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปในที่ 4.14

ตารางที่ 4.6 อัตราดีไนโตรฟิเคชันและคุณภาพน้ำหลังการบำบัดไนเตรตของชุดที่เดิมเมทานอลและกากน้ำตาลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน ในช่วงวันที่ 20-57 ของการทดลอง

	เมทานอล (ชุดควบคุม)	กากน้ำตาล
<i>อัตราดีไนโตรฟิเคชัน</i>		
- มก.ไนโตรเจน/ตร.ม. ¹ /วัน	4,531.3±186.1	4,094.8±254.4
- มก.ไนโตรเจน/ลิตรของวัสดุ/วัน	90.6±3.7	81.9±5.1
<i>คุณภาพน้ำ</i>		
- ซีไอดี (มก./ลิตร)	ND.	129.3±5.6
- แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	0.0	5.1±0.6
- ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	0.1±0.0	1.8±0.5
- ไนเตรต ((มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	6.2±0.6	28.8±4.1
- ค่าสภาพต่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร)	328.2±92.8	249.7±84.5
- พีเอช	8.4±0.3	7.82±0.5
- ค่าไออาร์พี (มิลลิโวลท์) ช่วงวันที่ 20-57		
: ชั้นน้ำ	190.6±9.0	191.5±9.2
: ชั้นหินพัมมิส	-217.9±26.3	-274.3±37.4

¹ หมายเหตุ: คัดจากพื้นที่ผิวกันถัง และ ND. ไม่สามารถวิเคราะห์หาค่าได้



รูปที่ 4.14 ลักษณะและสีของน้ำหลังการบำบัดไนเตรตจากชุดที่เดิมเมทานอล (ชุดควบคุม) และกากน้ำตาลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบราคาของเมทานอลกับกากน้ำตาล

	เมทานอล (96%)	กากน้ำตาล
ปริมาณคาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนักเปียก)	42.0	0.102
ราคาขาย (บาท/กก.)	12	7
ราคาต่อคาร์บอน (บาท/กรัมคาร์บอน)	0.03	0.07

หมายเหตุ : ราคาขายเฉลี่ย วันที่ 28 ธันวาคม 2010

- อัตราบำบัดในทรีฟิเคชันของการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน

จากผลการทดลองพบว่าอัตราดีในทรีฟิเคชันของชุดควบคุมมีค่าเท่ากับ $4,531.3 \pm 186.1$ มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.พื้นที่ผิวกันถึงต่อวัน โดยมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับชุดทดลองซึ่งมีค่าเท่ากับ $4,094.8 \pm 254.4$ มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.พื้นที่ผิวกันถึงต่อวัน แต่เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่าอัตราดีในทรีฟิเคชันในชุดการทดลองทั้งสองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) และสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองนี้กับรายงานวิจัยอื่นๆ ที่ทำการเร่งปฏิกิริยาดีในทรีฟิเคชันด้วยสารอินทรีย์คาร์บอนชนิดต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบอัตราดีในทรีฟิเคชันเมื่อใช้สารอินทรีย์คาร์บอนชนิดต่างๆ

สารอินทรีย์คาร์บอน	อัตราการบำบัดในเทรต (มก.ไนโตรเจน/ลิตร/ชม.)	ระบบบำบัด ในเทรต	ผู้วิจัย
กลูโคส	1.7	คอลัมน์	Honda และคณะ (1993)
สารอินทรีย์ละลายน้ำ	5.9 / 55.4	คอลัมน์	Shnel และคณะ (2002)
สารอินทรีย์ละลายน้ำ	43.3	ฟลูอิดไดซ์เบด	Gelfand และคณะ (2003)
เมทานอล	1.8	คอลัมน์	Suzuki และคณะ (2003)
น้ำแป้ง	26.0	คอลัมน์	Tal และคณะ (2003)
เมทานอล/กรดอะซิติก	27.9 / 65	ถังบรรจุตัวกลาง พลาสติก	Hamlin และคณะ (2008)
เมทานอล/กลูโคส	1.3 / 1.8	ถังบรรจุดินตะกอน	เอกชัย มาลาพล (2551)
เซลลูโลสจากไม้	2.6	ถังบรรจุเศษไม้	Yamashita และคณะ (2011)
เมทานอล/กากน้ำตาล	3.8 / 3.4	ถังบรรจุหินพัมมิส	งานวิจัยนี้

การเติมสารอินทรีย์คาร์บอนจากภายนอกเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับแบคทีเรียในระบบดีไนทริฟิเคชันจะช่วยให้แบคทีเรียเติบโตเพิ่มจำนวนขึ้นในระยะเวลาอันสั้น (Crab และคณะ, 2007) ซึ่งหากมีอัตราการบำบัดสูงจะช่วยให้สามารถออกแบบระบบบำบัดให้มีขนาดเล็กลงและลดระยะเวลาการบำบัดได้อีกด้วย โดยแหล่งคาร์บอนที่นิยมใช้กันมากได้แก่ เมทานอล เอทานอล กลูโคส อะซิเตด และกลีเซอรอล (Her และ Huang, 1995; Tal และคณะ, 2003; Murray และคณะ, 2004; Bernat และ Wojnowska-Baryla, 2007) โดยเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน เนื่องจากเป็นสารที่มีกำลังรีดิวซ์สูงเพราะมีสถานะออกซิเดชันต่ำ และใช้งานง่าย แต่การใช้เมทานอลสำหรับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะต้องคำนึงถึงความเป็นพิษของเมทานอล เนื่องจากเมทานอลที่ตกค้างในน้ำสามารถก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำได้ อาจทำให้สัตว์น้ำเกิดโรคและตายในที่สุด (Kaviraj และคณะ, 2004) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในแง่ค่าใช้จ่าย การเลือกใช้สารอินทรีย์คาร์บอนชนิดอื่นที่มีราคาถูกอาจจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดและลดความเป็นพิษอันเนื่องมาจากการใช้เมทานอลที่มากเกินไป

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า เมทานอลมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้สำหรับการทดลองขั้นต่อไป เพื่อหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนของแอมโมเนีย การเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสภาวะที่ขาดออกซิเจน และสิ่งที่ไม่พึงไม่ประสงค์ที่จะเกิดขึ้นในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้

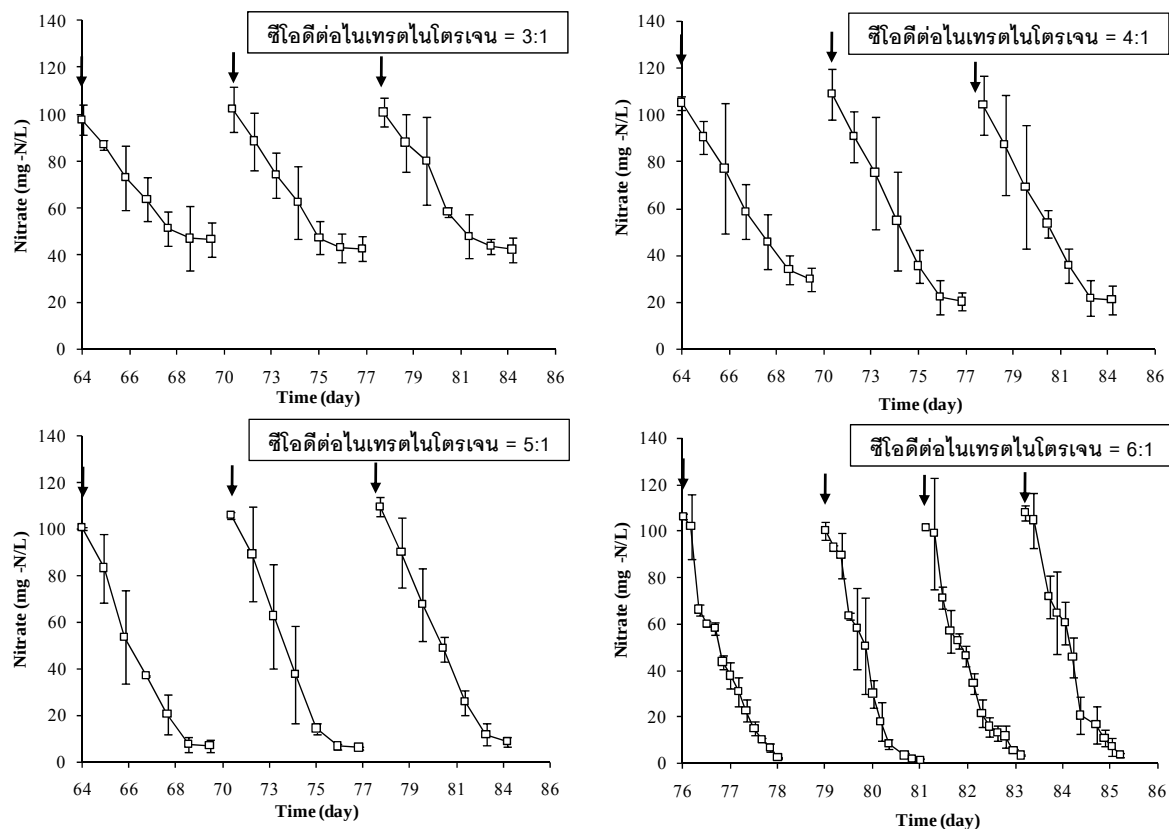
4.2.2 อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนของสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสม

การทดลองในช่วงนี้เป็นการศึกษาอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนของเมทานอลที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนเตรตด้วยถังดีไนทริฟิเคชันที่บรรจุหินพัมมิส และใช้เมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน โดยทำการแปรผันอัตราส่วนในรูปของซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเป็น 4 ระดับ ได้แก่ 3:1 4:1 5:1 และ 6:1 โดยทำการบ่มเชื้อในช่วงวันที่ 0-63 และเริ่มทำการทดลองในวันที่ 64

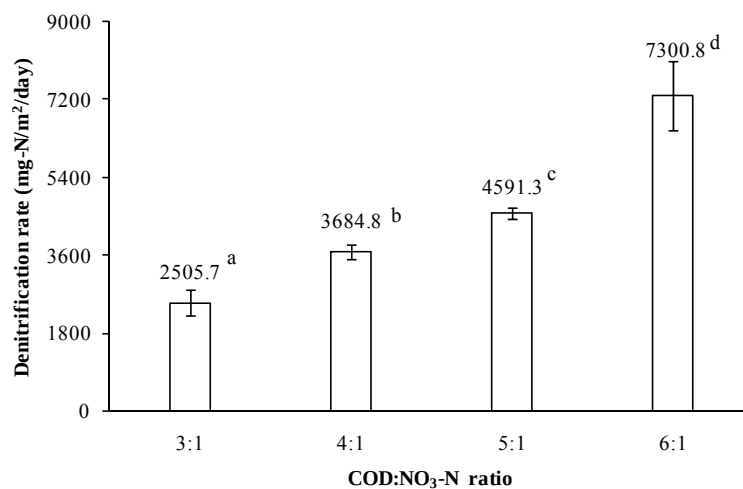
- การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน

ผลการทดลองดังรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าการเติมเมทานอลในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนที่ต่างกันลงในถังดีไนทริฟิเคชันจะส่งผลให้เกิดการบำบัดไนเตรตแตกต่างกัน โดยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 3:1 สามารถบำบัดไนเตรตด้วยอัตราดีไนทริฟิเคชันเท่ากับ $2,505.7 \pm 300.3$ มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.พื้นที่ผิวกันถังต่อวัน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซีโอดีขึ้นเป็น 4 เท่า (ซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 4:1) อัตราดีไนทริฟิเคชันของถังทดลองจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและยังเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนซีโอดีเป็น 5 และ 6 เท่า (ซีโอดีต่อไนเตรต

ไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1) ตามลำดับ โดยการเพิ่มสัดส่วนของซีโอดีขึ้น 3-6 เท่า จะทำให้มีประสิทธิผลการบำบัดไนเตรตเท่ากับ 56 76 93 และ 97.36% ตามลำดับ และส่งผลให้อัตราดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ระหว่างแต่ละชุดการทดลอง ดังรูปที่ 4.16 จากรายงานของ Her และ Huang (1995) พบว่าอัตราส่วนของสารอินทรีย์คาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ต่างกันในปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันจะเกิดผลดังนี้ ถ้าอัตราส่วนของสารอินทรีย์คาร์บอนต่อไนโตรเจนน้อยกว่าค่าต่ำสุดที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาจะทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ หากอัตราส่วนคาร์บอนมีปริมาณเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ และมีประสิทธิผลการบำบัดไนเตรตสูงถึง 100% โดยแบคทีเรียจะใช้สารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อบำบัดไนเตรต แต่สารอินทรีย์คาร์บอนส่วนที่เหลือจะตกค้างในระบบก่อให้เกิดการยับยั้งและเป็นพิษต่อเชื้อดีไนทริฟิอิงแบคทีเรียได้ นอกจากนี้การเติมสารอินทรีย์คาร์บอนยังสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันทำให้ระยะเวลาบำบัดไนเตรตน้อยลง จากผลการทดลองจะเห็นได้ชัดเจนว่าที่อัตราส่วนคาร์บอน 6 เท่า มีระยะเวลาบำบัดไนเตรตประมาณ 3 วัน ในขณะที่อัตราส่วนคาร์บอน 3 4 และ 5 เท่า จะใช้เวลาประมาณ 5-7 วัน

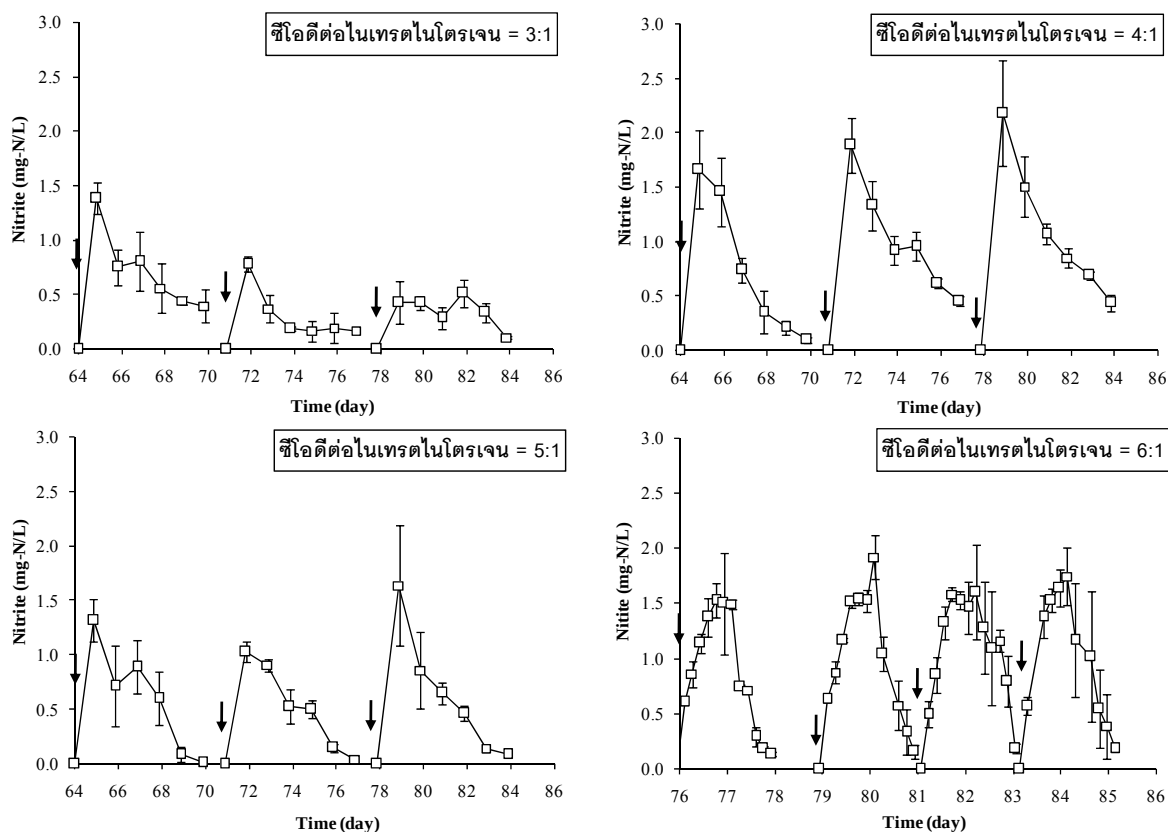


รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงของไนเตรตในชุดการทดลองที่แปรค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 3:1-6:1 โดย (↓) แสดงการเติมไนเตรตและสารอินทรีย์คาร์บอน

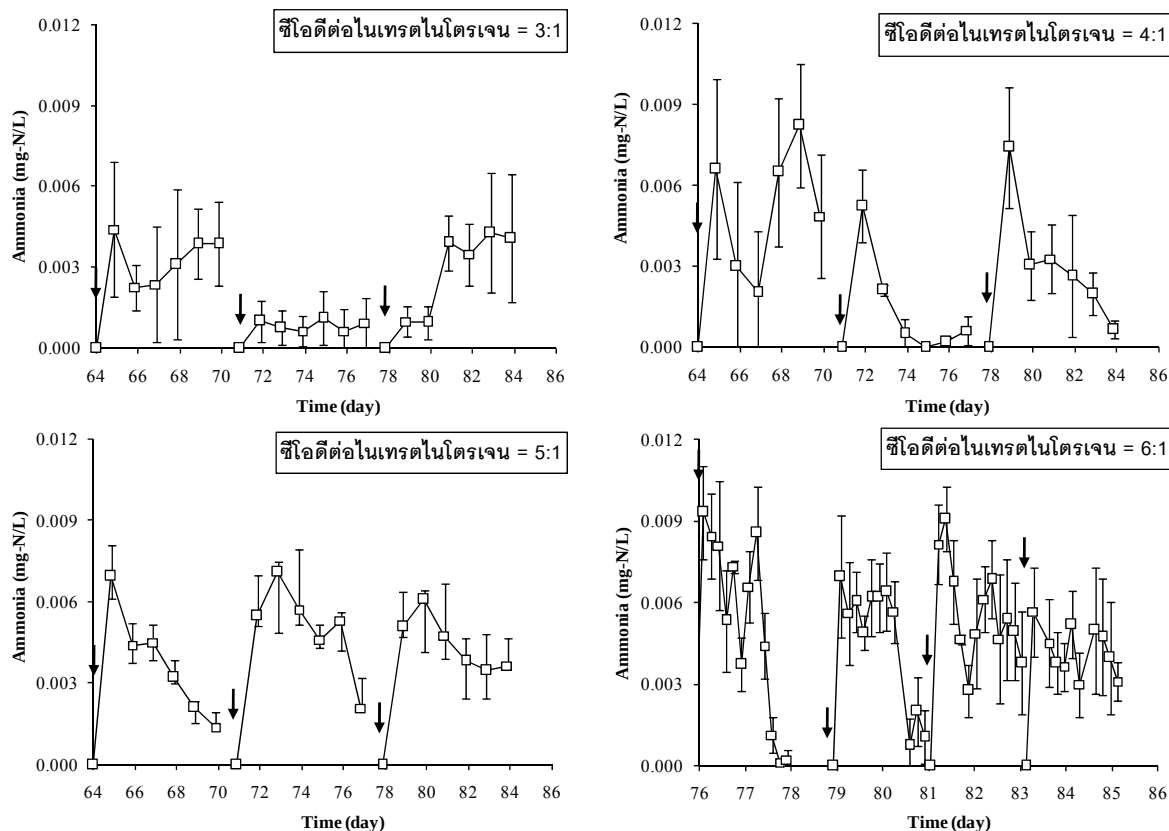


รูปที่ 4.16 อัตราดีไนทริฟิเคชันจากการเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน โดยแปรผันอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนที่ต่างกัน จากการทดลอง 3 ซ้ำ (โดยตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$))

โดยผลการตรวจวัดปริมาณไนไตรต์ในรูปที่ 4.17 พบว่าปริมาณไนไตรต์ของทุกชุดการทดลองมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับไนเตรต แสดงว่าปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยสมบูรณ์จึงไม่มีการสะสมของไนไตรต์ในระบบ ส่วนปริมาณแอมโมเนียเฉลี่ยดังรูปที่ 4.18 ตลอดจนการทดลองของทุกชุดทดลองมีค่าต่ำมาก คือ น้อยกว่า 0.01 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร



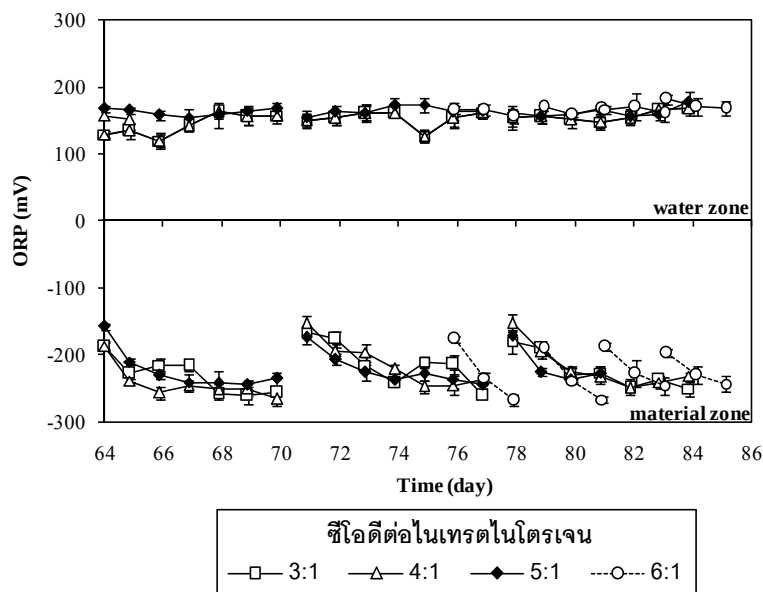
รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงของไนไตรต์ในชุดการทดลองที่แปรค่าอัตราส่วนอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 3:1-6:1 โดย (↓) แสดงการเติมไนเตรตและสารอินทรีย์คาร์บอนลงในถัง



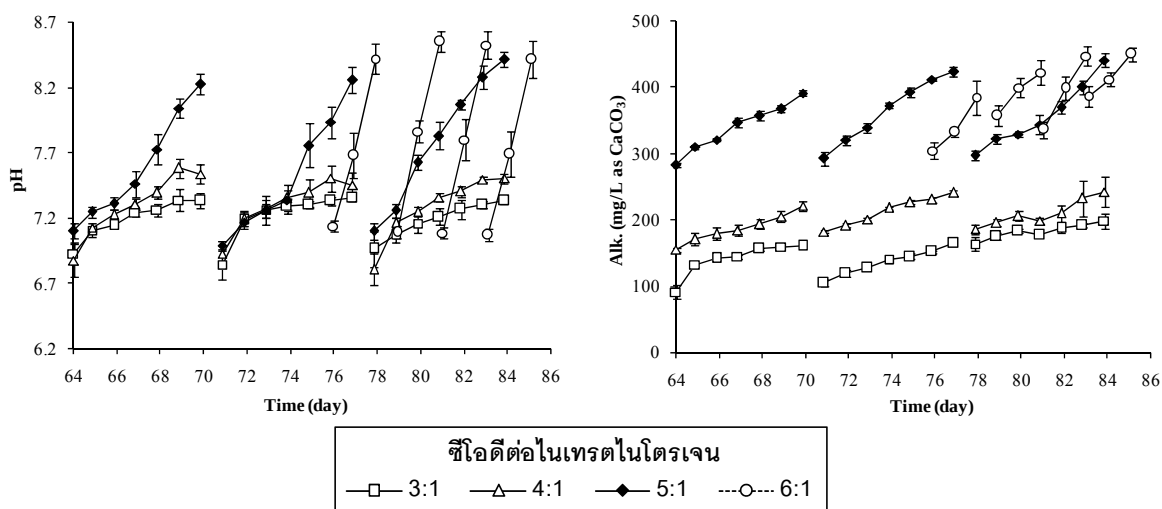
รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนียในชุดการทดลองที่แปรค่าอัตราส่วนอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 3:1-6:1 โดย (↓) แสดงการเติมไนเตรตและสารอินทรีย์คาร์บอนลงในถัง

- ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน

ผลการตรวจวัดปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมในระหว่างการเดินระบบการทดลอง ได้แก่ โออาร์พีพีเอช และค่าสภาพต่าง พบว่าค่าโออาร์พีในชั้นหินพัมมิสของทุกชุดทดลองมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง -250 ถึง -200 มิลลิโวลท์ (รูปที่ 4.19) ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์ โดยในแต่ละช่วงของการบำบัดไนเตรตมีแนวโน้มของพีเอชและค่าสภาพต่างเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเพิ่มสูงขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.20 โดยมีคุณภาพน้ำหลังการบำบัดไนเตรตสรุปดังตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.19 โออาร์พีในชั้นหินพื้ผสม และในชั้นน้ำ เมื่อเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรดไนโตรเจนเท่ากับ 3:1-6:1



รูปที่ 4.20 พีเอชและค่าสภาพต่าง เมื่อเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรดไนโตรเจนเท่ากับ 3:1-6:1

ตารางที่ 4.9 คุณภาพหลังการบำบัดไนเตรตของถังดีไนทริฟิเคชัน เมื่อเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 3:1 4:1 5:1 และ 6:1

พารามิเตอร์	อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจน			
	3:1	4:1	5:1	6:1
ซีโอดี (มก./ลิตร)	ND.	ND.	ND.	63.0±15.6
แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	0.003	0.002	0.002	0.002
ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	0.22±0.15	0.33±0.20	0.05±0.04	0.16±0.02
ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	44.05±2.39	23.69±5.29	7.19±1.39	2.64±1.11
ค่าสภาพต่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร)	174.93±20.71	235.12±11.94	418.71±24.99	426.36±30.14
พีเอช	7.34±0.01	7.50±0.04	8.30±0.10	8.48±0.07
ค่าไออาร์พี (มิลลิโวลท์) เฉลี่ยตลอด การทดลอง				
- ขั้นน้ำ	150.67±13.30	156.04±9.20	162.77±6.16	166.49±6.58
- ขั้นหินพัมมิส	-222.69±29.49	-224.69±32.45	-222.64±25.19	-225.66±30.74

หมายเหตุ: ND. ไม่สามารถวิเคราะห์หาปริมาณซีโอดีได้ด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด

เมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนเตรตด้วยถังดีไนทริฟิเคชันบรรจุหินพัมมิส การใช้เมทานอลจะต้องคำนึงถึงปริมาณการใช้ที่เหมาะสม ปริมาณสารอินทรีย์น้อยเกินไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ (Grommen และคณะ, 2006; van Rijn และคณะ, 2006) หากใช้ในปริมาณมากเกินไปทำให้เปลืองสารเคมีและเกิดผลกระทบกับสัตว์น้ำในทางตรงและทางอ้อม ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณเมทานอลคงเหลือในน้ำหลังบำบัดไนเตรตในรูปของซีโอดี พบว่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 6:1 มีปริมาณซีโอดีสูงถึง 63.0 มก.ต่อลิตร ทั้งนี้ Kaviraj และคณะ (2004) ได้รายงานความเป็นพิษแบบเรื้อรังของเมทานอลที่มีผลกับสัตว์น้ำจืดโดยตรง พบว่าระบบเพาะเลี้ยงแบบปิดกลางแจ้งที่มีระดับเมทานอลเข้มข้นมากกว่า 47.49 มก.ต่อลิตร จะส่งผลต่อการเจริญเติบโตและการวางไข่ของสัตว์น้ำ เมื่อความเข้มข้นสูงถึง 1,527.60 มก.ต่อลิตร เมทานอลจะทำลายเนื้อเยื่อในตัวปลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของจอตา (Retina) ทำให้ปลาตาบอด และทำลายเหงือกปลาทำให้ปลาดายในที่สุด ส่วนผลกระทบทางอ้อมคือ เมทานอลคงเหลือในน้ำจะเป็นสาเหตุให้ระบบเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และทำให้ค่าสภาพต่างในน้ำลดลง (Spotte, 1979) อีกทั้งยังยับยั้งการทำงานของระบบไนทริฟิเคชัน

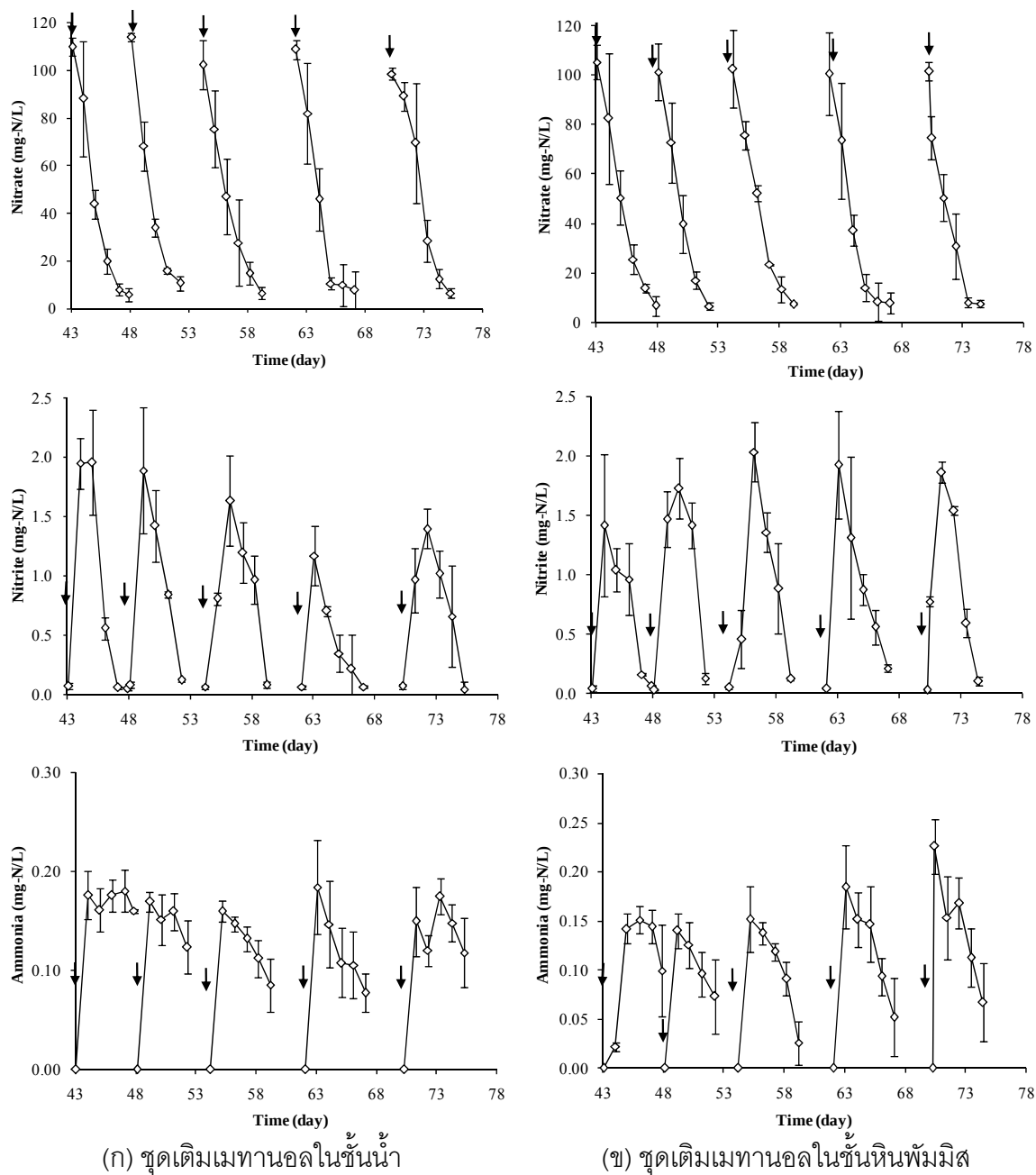
จากรายงานของ Zhu และ Chen (2001) พบว่าปฏิกิริยาไนทรีฟิเคชันจะลดลงถึง 70% เมื่ออัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเป็น 1 หรือ 2 เท่า เช่นเดียวกับ Ling และ Chen (2005) รายงานว่าการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจะทำให้ปฏิกิริยาไนทรีฟิเคชันลดลงประมาณ 60-70% ดังนั้นปริมาณเมทานอลที่เหมาะสมจะมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทรีฟิเคชัน จากงานวิจัยที่ผ่านมาอัตราส่วนของสารอินทรีย์คาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทรีฟิเคชันค่อนข้างหลากหลายแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับระบบการบำบัด ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย และชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน ผลจากการทดลองนี้สรุปว่า อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนที่เหมาะสมของเมทานอลเพื่อใช้เป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในการบำบัดไนเตรตด้วยถังดีไนทรีฟิเคชันที่บรรจุหินพัมมิสเท่ากับ 5:1 เมื่อไนเตรตเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร และสามารถบำบัดไนเตรตได้ต่ำกว่า 5 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ด้วยปฏิกิริยาดีไนทรีฟิเคชันที่สมบูรณ์ และมีปริมาณเมทานอลคงเหลือในน้ำหลังบำบัดน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 6:1

4.2.3 ลักษณะการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนลงในถังปฏิกิริยาดีไนทรีฟิเคชัน

การศึกษาลักษณะการเติมเมทานอลที่แตกต่างกัน คือ การเติมในชั้นน้ำและชั้นหินพัมมิส โดยใช้ถังดีไนทรีฟิเคชันภายใต้สภาวะที่เหมาะสมคือ การใช้หินพัมมิสบรรจุในถังดีไนทรีฟิเคชัน และเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ในวันที่ 0-42 จะเติมสารอินทรีย์คาร์บอนลงในชั้นน้ำของทุกถังทดลองเพื่อบ่มเชื้อดีไนทรีฟิอิงแบคทีเรีย จากนั้นจึงเริ่มทำการทดลองในวันที่ 43

- การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน

การทดสอบลักษณะการเติมเมทานอลที่แตกต่างกัน คือ การเติมในชั้นน้ำและชั้นหินพัมมิส พบว่าถังดีไนทรีฟิเคชันสามารถบำบัดไนเตรตได้อย่างสมบูรณ์ด้วยระยะเวลาเฉลี่ยประมาณ 5 วัน ผลจากการตรวจวัดปริมาณสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำหลังจากการบำบัดไนเตรตแสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่าปริมาณไนเตรต ไนไตรต์ และแอมโมเนียในน้ำหลังการบำบัดไนเตรตของทั้งสองชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.21 สารประกอบไนโตรเจนในโตรเจนเปรียบเทียบระหว่างการเติมเมทานอลในชั้นน้ำและชั้นหินฟอสฟอรัส โดย (↓) แสดงการเติมไนเตรตและสารอินทรีย์คาร์บอนลงในถังเมื่อไนเตรตถูกบำบัดจนมีค่าต่ำกว่า 5 มก.ต่อลิตร

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบคุณภาพหลังการบำบัดไนเตรตของถังดีไนทริฟิเคชัน เมื่อเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในชั้นน้ำและชั้นหินพื้มีส

พารามิเตอร์	ลักษณะการเติมเมทานอล อัตราส่วนซีไอดี/ไนเตรตไนโตรเจน = 5:1	
	ชั้นน้ำ	ชั้นหินพื้มีส
อัตราดีไนทริฟิเคชัน (มก.ไนโตรเจน/ตร.ม. ¹ /วัน)	5,001.78±120.65	5,495.78±44.63
แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	0.11±0.03	0.06±0.03
ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	0.07±0.03	0.13±0.05
ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	7.52±1.90	7.22±0.57

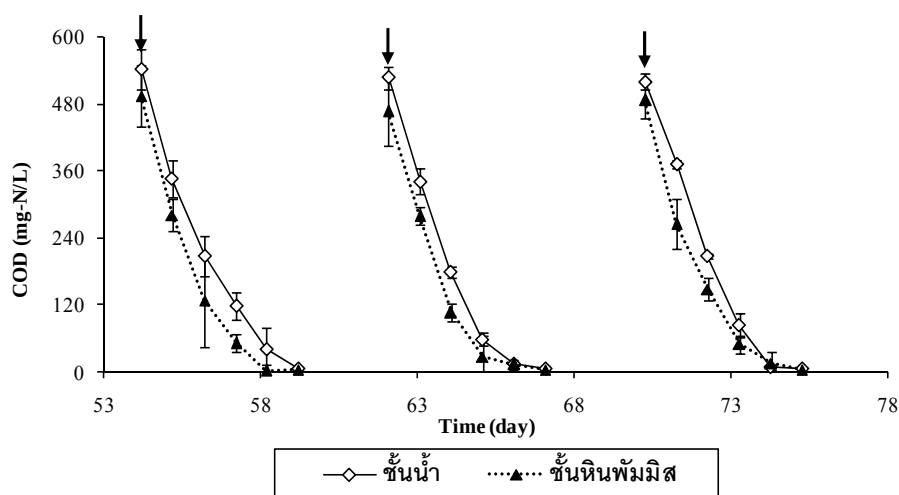
¹หมายเหตุ: คัดจากพื้นที่ผิวกันถัง

- ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน

ผลการตรวจวัดปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม พบว่าทุกชุดการทดลองมีค่าไออาร์พีในชั้นหินพื้มีสเฉลี่ยอยู่ในช่วง -270 ถึง -200 มิลลิโวลต์ พีเอชอยู่ในช่วง 7.5-8.0 และค่าสภาพด่างอยู่ในช่วง 300-400 มก.แคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร สภาวะดังกล่าวทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์โดยไม่มีการสะสมไนไตรต์ในระบบ

ผลการวิเคราะห์ปริมาณซีไอดีในน้ำ พบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณซีไอดีมีความแตกต่างกันอย่างมากดังรูปที่ 4.22 โดยการเติมเมทานอลในชั้นหินพื้มีสจะมีปริมาณซีไอดีเริ่มต้นน้อยกว่าการเติมในชั้นน้ำ อาจเนื่องมาจากการตกค้างของเมทานอลภายในสายยางหรือเมทานอลส่วนหนึ่งถูกกักไว้บริเวณชั้นหินพื้มีสทำให้ปริมาณซีไอดีที่วัดได้มีปริมาณน้อย ในช่วงระหว่างการบำบัดไนเตรตปริมาณซีไอดีทุกชุดการทดลองจะลดลงอย่างต่อเนื่อง และมีปริมาณซีไอดีต่ำมากในน้ำหลังจากการบำบัดไนเตรตซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์หาปริมาณซีไอดีได้ จึงวิเคราะห์หาปริมาณเมทานอลด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่าการเติมเมทานอลในชั้นน้ำและชั้นหินพื้มีสไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยมีความเข้มข้นของเมทานอลเท่ากับ 7.2 ± 1.8 และ 4.71 ± 0.0 มก.ต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของเมทานอลที่ถูกบำบัดจริงกับเมทานอลที่ถูกบำบัดตามหลักทฤษฎีปริมาณสารสัมพันธ์ของปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน (เมทานอลต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 2.47:1) พบว่าเมทานอลที่ถูกบำบัดจริงของทั้ง 2 ชุดการทดลองมีค่ามากกว่าเมทานอลที่ถูกบำบัดตามหลักปริมาณสารสัมพันธ์ร้อยละ 20 แสดงว่าเมทานอลในถังดีไนทริฟิเคชันไม่ได้เป็นสารอินทรีย์คาร์บอนให้กับกลุ่มดีไนทริไฟอิงแบคทีเรียเท่านั้น แต่ยังมีแบคทีเรียที่เจริญเติบโตในสภาวะที่มีออกซิเจนบริเวณผิวหน้าของหินพื้มีสสามารถนำเมทานอล

ไปใช้ทำให้ความเข้มข้นของเมทานอลที่ตรวจวัดได้จริงมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบตามหลักทฤษฎีปริมาณสารสัมพันธ์



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบปริมาณชีโอดีระหว่างชุดเดิมเมทานอลในชั้นน้ำและชั้นหินฟัมมิส ช่วงการทดลองวันที่ 54-75 โดย (↓) แสดงการเติมไนโตรเจนและเมทานอลลงในถัง เมื่อไนโตรเจนถูกบำบัดจนมีค่าต่ำกว่า 5 มก.ต่อลิตร

ผลการทดลองสรุปได้ว่า การเติมเมทานอลในชั้นน้ำและชั้นหินฟัมมิสไม่มีความแตกต่างกัน เนื่องจากการเรียงตัวของอนุภาคของหินฟัมมิสมีลักษณะเป็นช่องว่าง ซึ่งสามารถทำให้เมทานอลบริเวณชั้นหินลอยขึ้นสู่ชั้นน้ำด้านบนได้ และจากลักษณะสมบัติของเมทานอลที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ (0.792 กรัมต่อลบ.ซม.) ทำให้สามารถสังเกตเห็นเมทานอลลักษณะเป็นของเหลวใสคล้ายน้ำเชื่อมลอยขึ้นสู่ชั้นน้ำด้านบนได้อย่างชัดเจน แม้ว่าในช่วงเริ่มต้นของการเติมคาร์บอนจะมีปริมาณเมทานอลเข้มข้นต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การเติมในชั้นน้ำ แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป สักพักเมทานอลจะลอยขึ้นสู่ชั้นน้ำด้านบนของถังทดลองและถูกผสมเข้ากับน้ำในถังปฏิกรณ์ เช่นเดียวกับการเติมในชั้นน้ำ

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติที่เหมาะสมในการบำบัดคุณภาพน้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

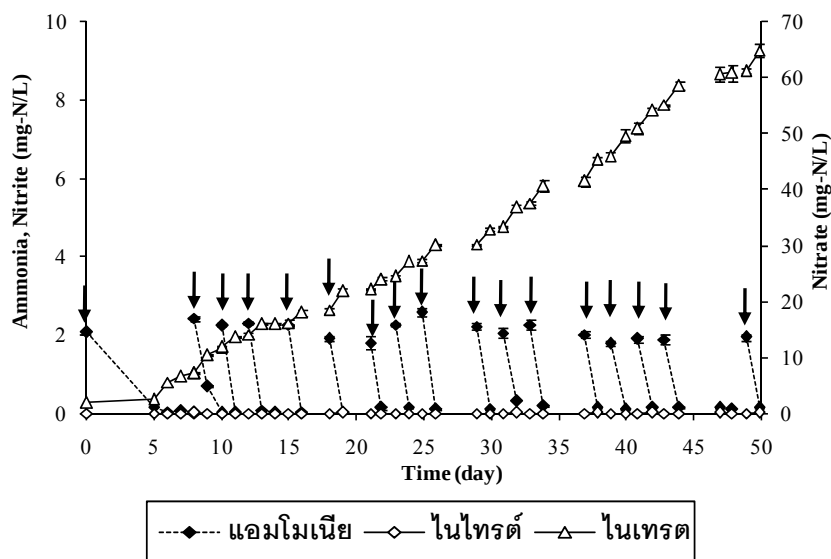
การประยุกต์ใช้ถังดีไนทริฟิเคชันที่บรรจุหินพัมมิสเพื่อบำบัดไนเตรตในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำขนาดเล็กภายใต้สภาวะที่เหมาะสมดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 สภาวะที่เหมาะสมของถังดีไนทริฟิเคชัน จากการทดลองที่ 4.1 และ 4.2

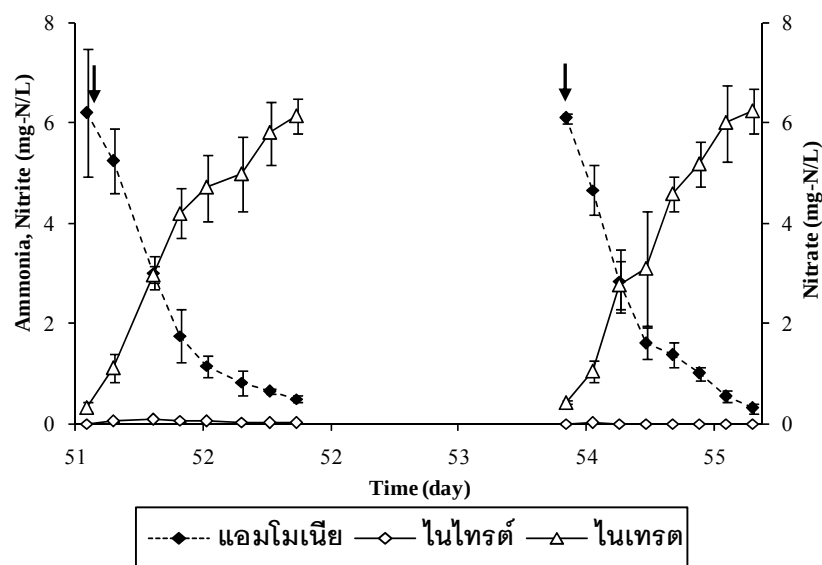
พารามิเตอร์	สภาวะที่เหมาะสม
ชนิดของวัสดุ	หินพัมมิส
ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน	เมทานอล
อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจน	5:1
ลักษณะการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน	เติมในชั้นน้ำ

4.3.1 การเตรียมถังไนทริฟิเคชันที่บรรจุตัวกรองชีวภาพและการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพในทรีฟิเคชัน

การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพในทรีฟิเคชัน โดยทำการบ่มตัวกรองชีวภาพ (ที่ผ่านการใช้งานแล้ว) ในถังบรรจุน้ำจืดขนาด 100 ลิตร มีแอมโมเนียเข้มข้น 2 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ให้อากาศตลอดเวลาพร้อมกับให้อาหารกุ้ง 2.5 กรัม เพื่อเพิ่มสารอาหารและวิตามินให้จุลินทรีย์ เมื่อปริมาณแอมโมเนียหมดลงจะทำการเติมแอมโมเนียคลอไรด์ 0.55 กรัม เพื่อให้มีแอมโมเนียความเข้มข้น 2 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร บ่มเชื้อเป็นเวลา 50 วัน โดยมีการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนดังรูปที่ 4.23 ซึ่งเกิดการบำบัดแอมโมเนียได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากแอมโมเนียถูกบำบัดจนหมดโดยไม่มีการสะสมของไนไตรต์ในถังบ่มเชื้อ จึงตัดตัวกรองความยาว 10 ซม. มาทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย พบว่าหลังจากเติมแอมโมเนียคลอไรด์ความเข้มข้นเริ่มต้น 6 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ลงในขวดทดสอบแอมโมเนียจะถูกบำบัดลดลงต่ำกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ภายในระยะเวลา 2 วัน แสดงดังรูปที่ 4.24 โดยมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ย 46.97 ± 7.64 มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.มต่อวัน ซึ่งมีค่าสูงแม้ว่าตัวกรองชีวภาพจะผ่านการใช้งานมาแล้วก็ตาม จากรายงานของเอกชัย มาลาพล (2551) พบว่าตัวกรองชีวภาพ BiocordTM มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียในระหว่าง 48-106 มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.ต่อวัน โดยอัตราการบำบัดของตัวกรองจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ทำการบ่มเชื้อ



รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ของตัวกรองชีวภาพไนทริไฟเคชันในถังบ่มเชื้อ โดย (↓) แสดงการเติมแอมโมเนียในถังเมื่อแอมโมเนียถูกบำบัดจนหมด



รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ระหว่างการทดสอบประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไนทริไฟเคชัน (ทดลองซ้ำ 2 รอบของการบำบัด)

4.3.2 การเตรียมถังดีไนทริไฟเคชันที่บรรจุวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติและการประเมินประสิทธิภาพของวัสดุดีไนทริไฟเคชัน

การเตรียมถังดีไนทริไฟเคชัน โดยบรรจุหินพัมมิสในถังพลาสติกขนาด 100 ลิตร เป็นชั้นหนา 5 ซม. เพื่อบ่มเชื้อดีไนทริไฟอิงแบคทีเรียด้วยน้ำจืดที่มีไนโตรเจนความเข้มข้น 100 มก./ไนโตรเจนต่อลิตร และเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในชั้นน้ำ อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนในโตรเจนเท่ากับ 5:1 ทำการบ่มเชื้อนาน 91 วัน พบว่ามีอัตราดีไนทริไฟเคชันเฉลี่ยเท่ากับ $5,078.21 \pm 442.03$ มก./ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.พื้นที่ผิวกันถึงต่อวัน

4.3.3 การติดตั้งถังดีไนทริไฟเคชันเข้ากับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

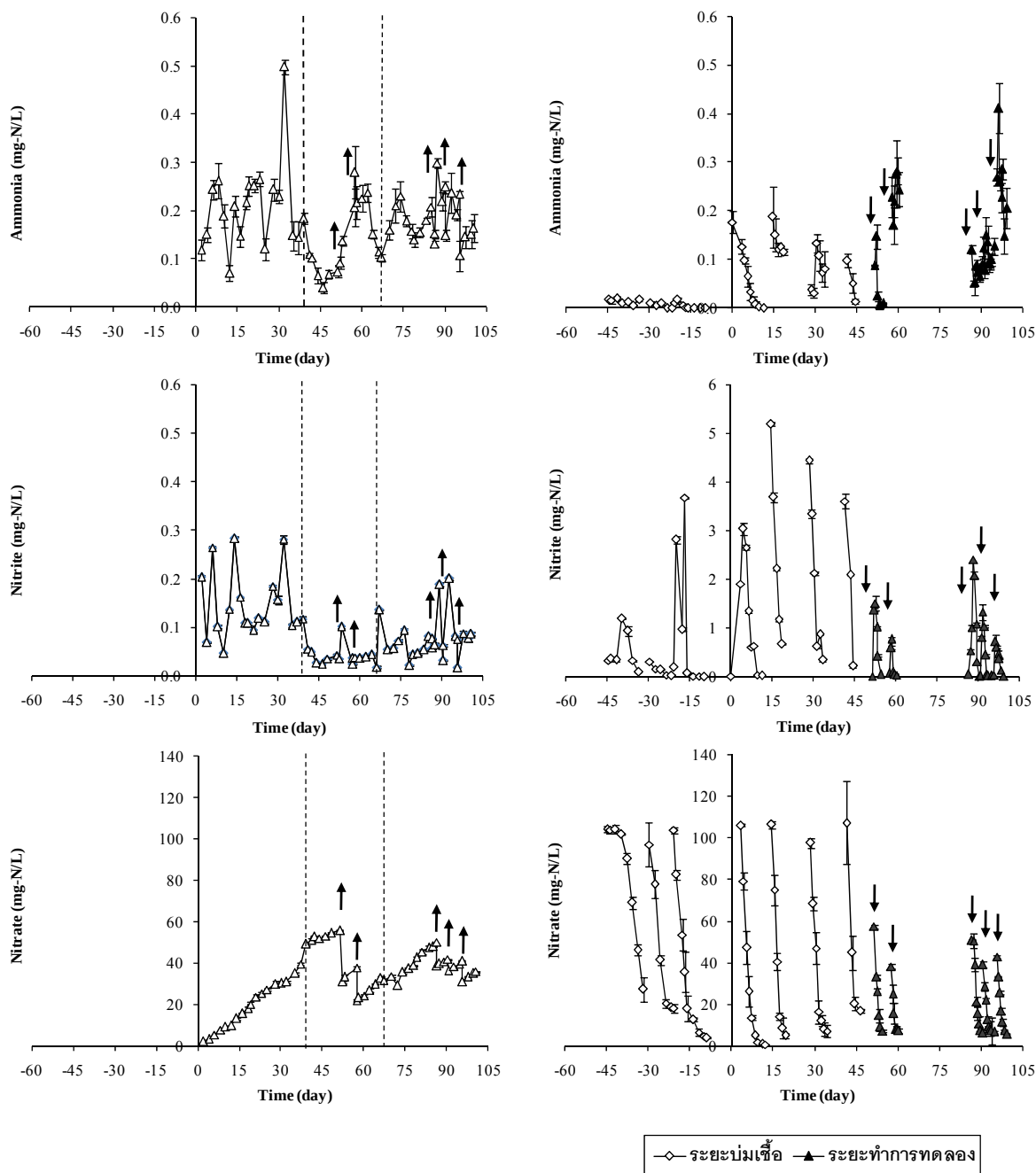
ไนเตรตที่เกิดขึ้นในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์ปลานิลเป็นผลผลิตจากกระบวนการไนทริไฟเคชันของตัวกรอง Biocord™ ที่ถูกติดตั้งภายในถังไนทริไฟเคชันและต่อเข้ากับถังเลี้ยงปลานิลที่มีความหนาแน่นเริ่มต้น 0.3 กก./ต่อลบ.ม. ทำการเลี้ยงเป็นระยะเวลา 3 เดือน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมดังนี้

- การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบเพาะเลี้ยงปลานิลและถังดีไนทริไฟเคชัน

ผลจากการตรวจวัดแอมโมเนียในระบบเพาะเลี้ยงปลาก่อนเข้าสู่ถังดีไนทริไฟเคชัน พบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทดลองเท่ากับ 0.20 ± 0.07 มก./ไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งเป็นผลจากการใช้ตัวกรองชีวภาพไนทริไฟเคชันเพื่อบำบัดแอมโมเนียเปลี่ยนไปเป็นไนเตรตด้วยปฏิกิริยาไนทริไฟเคชันที่สมบูรณ์ แต่ในวันที่ 32 ของการเพาะเลี้ยงปลานิล พบว่ามีแอมโมเนียความเข้มข้นสูงกว่าปกติคือ 0.5 มก./ไนโตรเจนต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.25 ซึ่งเกี่ยวข้องกับปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมโดยจะอธิบายในหัวข้อถัดไป ในระหว่างทำการทดลองจะทำการชักล้างตัวกรองชีวภาพ 2 ครั้งคือในวันที่ 40 และ 67 การชักล้างตัวกรองชีวภาพจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียได้ เนื่องจากเป็นการชักล้างสิ่งสกปรกจำพวกของเสียจากการขับถ่ายของปลาออกไปช่วยเพิ่มพื้นที่การยึดเกาะของแบคทีเรียมากขึ้น นอกจากนี้การใช้ตัวกรองชีวภาพฮาติเปลือกหอย ไบโอบอล และการกรองตะกอนออกจากระบบยังช่วยลดแอมโมเนียและเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียได้อีกด้วย (เอกชัย มาลาพล, 2551; ทยากร สุวรรณรัตน์, 2552) และเมื่อตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียในน้ำหลังจากการบำบัดไนเตรตด้วยถังดีไนทริไฟเคชัน พบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของแอมโมเนียขาเข้า ซึ่งมี

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.14 ± 0.09 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร อาจเนื่องมาจากบริเวณชั้นบนของหินพัมมิสอยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจนทำให้กลุ่มแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนเจริญเติบโตและสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ และผลจากการตรวจวิเคราะห์ปริมาณไนไตรต์ พบว่าความเข้มข้นของไนไตรต์เฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทดลองของระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเท่ากับ 0.09 ± 0.06 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ในขณะที่ความเข้มข้นของไนไตรต์ในน้ำหลังจากการบำบัดไนเตรตด้วยถังดีไนทริฟิเคชันมีค่าน้อยกว่า 0.02 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์ทำให้ไม่มีการสะสมของไนไตรต์ในระบบ

ปริมาณไนเตรตในระบบเพาะเลี้ยงปลาจะสะสมและเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 4.25) จนกระทั่งในวันที่ 51 ของการเพาะเลี้ยงปลานิล มีความเข้มข้นของไนเตรตมากกว่า 50 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร จึงสูบน้ำออกจากถังไนทริฟิเคชันปริมาตรรวม 160 ลิตร เข้าสู่ถังดีไนทริฟิเคชันจำนวน 2 ถัง (ถังละ 80 ลิตร) เพื่อบำบัดไนเตรต การถ่ายน้ำออกไปบำบัดไนเตรตครั้งแรกทำให้ปริมาณน้ำในระบบเพาะเลี้ยงลดลง จึงเติมน้ำจืดเข้าสู่ถังเลี้ยงปลาเพื่อคงปริมาณน้ำให้คงที่ส่งผลให้สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบลดลงด้วยเช่นกัน เมื่อปริมาณไนเตรตในถังดีไนทริฟิเคชันถูกบำบัดและลดลงต่ำกว่า 5 มก.ไนโตรเจนต่อลิตรจึงถ่ายน้ำเข้าสู่ถังไนทริฟิเคชัน ทำเช่นนั้นจนกระทั่งค่าไนเตรตในระบบเพาะเลี้ยงปลามีค่าต่ำกว่า 25 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ดังตารางที่ 4.12 แสดงเวลาการสูบน้ำเข้าสู่ถังดีไนทริฟิเคชันรวมทั้งหมด 5 ครั้ง โดยในวันสุดท้ายของการทดลองจะพบปริมาณไนเตรตในระบบเพาะเลี้ยงปลาเท่ากับ 36.06 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร จากรายงานของ Gutierrez-Wing และ Malone (2006) พบว่า ปริมาณไนเตรตเข้มข้นมากกว่า 75 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ส่งผลให้อัตราการผสมพันธุ์ลดลง ปริมาณไข่ลดลง ระยะเวลาการฟักไข่ช้ามากขึ้น และการเติบโตของสัตว์น้ำลดลง เกษตรกรส่วนใหญ่จึงใช้วิธีการเปลี่ยนถ่ายน้ำประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาณน้ำทั้งหมดเพื่อลดปริมาณไนเตรตเมื่อน้ำมีไนเตรตเข้มข้นมากกว่า 50 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร



(ก) สารประกอบไนโตรเจนในโตรเจน
ในระบบเพาะเลี้ยงปลา

(ข) สารประกอบไนโตรเจนในโตรเจน
ในถังดีไนทริฟิเคชัน

รูปที่ 4.25 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรด ไนไตรต์ และแอมโมเนีย เปรียบเทียบระหว่างถังเลี้ยงปลากับถังดีไนทริฟิเคชัน ถังดีไนทริฟิเคชันแบ่งเป็น 2 ระยะ ได้แก่ ระยะบ่มเชื้อ (3 เดือน) และระยะบำบัดไนโตรดจากระบบเพาะเลี้ยงปลา โดย (↑) แสดงการถ่ายน้ำออกจากกระบบเพาะเลี้ยงปลา (↓) แสดงการถ่ายน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงปลาเข้าถังดีไนทริฟิเคชัน และ (---) แสดงการชักล้างตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน

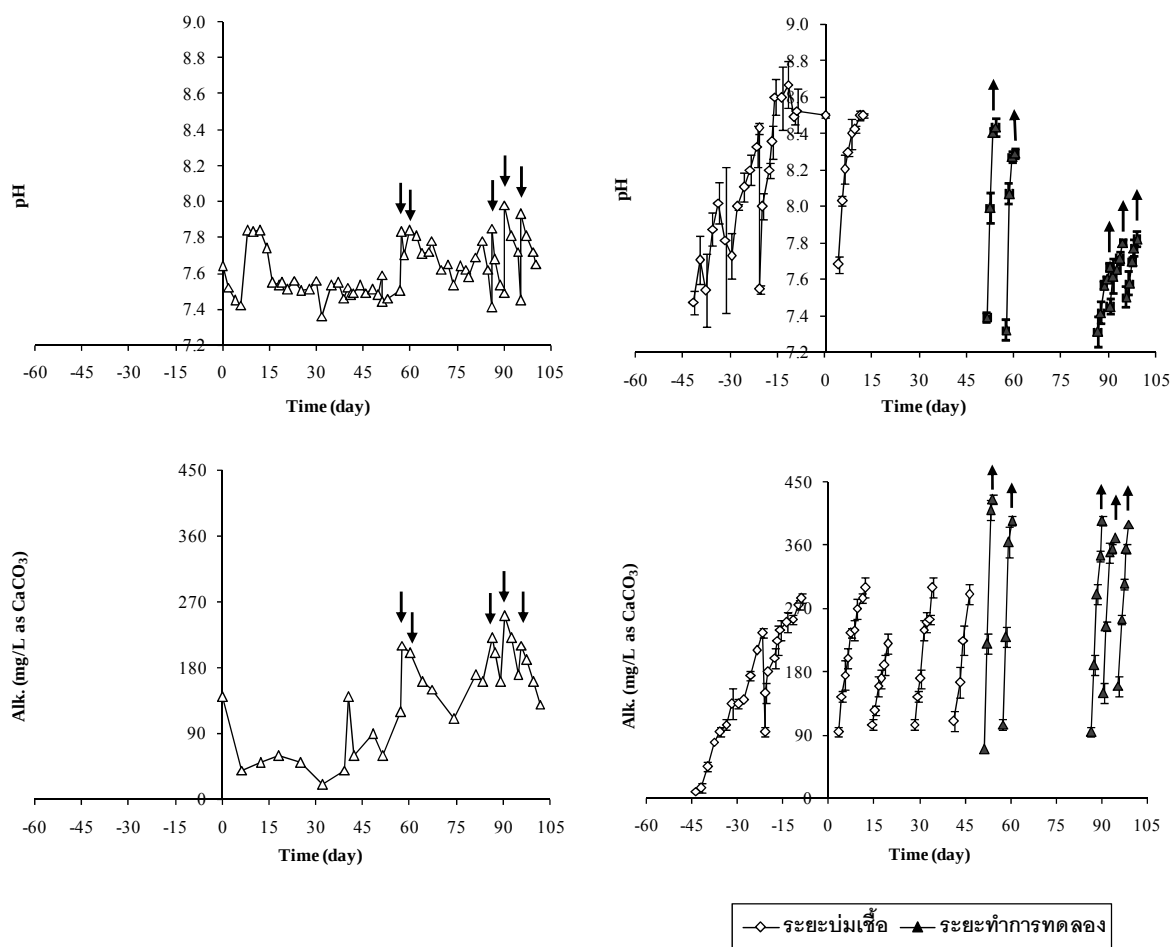
ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพการบำบัดในเทรตของถังดีไนทริฟิเคชันบรรจุหินพัมมิส

วันที่ ทดลอง	ปริมาณในเทรต (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)		ประสิทธิภาพการบำบัด ในเทรต (%)
	ก่อนการบำบัด	หลังการบำบัด	
51-54	57.64	7.25	87.42
57-60	38.24	7.33	80.83
87-90	50.97	6.15	87.93
91-95	39.09	6.67	82.94
96-99	42.90	5.69	86.74
ค่าเฉลี่ย	45.77±8.33	6.62±0.71	85.17±3.12

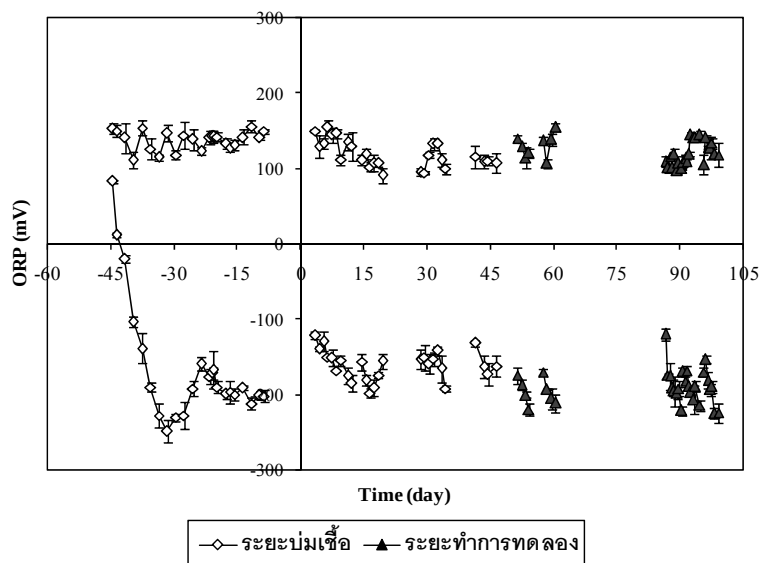
- ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมต่อระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน

ผลจากการตรวจวัดพีเอชและค่าสภาพต่างในระบบเพาะเลี้ยงปลาแสดงดังรูปที่ 4.26 พบว่าในวันที่ 32 ของเพาะเลี้ยงปลานิล มีพีเอชเท่ากับ 7.36 และค่าสภาพต่างในน้ำลดลงเหลือ 20 มก. แคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ส่งผลให้ปริมาณแอมโมเนียและไนไตรต์สูงกว่าระดับปกติคือ 0.5 และ 0.3 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ การเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์จะต้องมีปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมในสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกลุ่มไนโตรไฟอิงแบคทีเรีย ได้แก่ พีเอชในช่วง 7.5-8.5 ค่าสภาพต่างอย่างน้อย 80-100 มก.แคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร อุณหภูมิที่สามารถบำบัดแอมโมเนียได้สูงสุดอยู่ในช่วง 30-35 °C และออกซิเจนละลายน้ำในช่วง 3.5-4.5 มก.ต่อลิตร (Abril และ Frankignoulle, 2001; Suthersan และ Ganczarcczyk, 1986; Ruiz และคณะ, 2003; Li และ Irvin, 2007) ดังนั้นในช่วงระยะเวลาวันที่ 1-56 ของการเพาะเลี้ยง (ถ่ายน้ำจากถังดีไนทริฟิเคชันเข้าสู่ระบบเพาะเลี้ยงครั้งแรกในวันที่ 57) จะต้องทำการปรับค่าสภาพต่างด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตให้อยู่ในช่วง 100-150 มก. แคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร สำหรับการแก้ไขด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตจะช่วยเพิ่มค่าสภาพต่างในน้ำได้แต่จะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี แต่เมื่อติดตั้งระบบดีไนทริฟิเคชันเข้ากับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะช่วยเพิ่มค่าสภาพต่างและรักษาค่าพีเอชในระบบให้คงที่ได้ (van Rijn, 1996; Ghafari และคณะ, 2010) ซึ่งจะช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีได้อีกด้วย โดยผลจากการตรวจวัดพีเอชและค่าสภาพต่างของน้ำหลังการบำบัดในเทรตด้วยถังดีไนทริฟิเคชัน พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.00 ± 0.34 และ 395.00 ± 13.69 มก.แคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ตามลำดับ และมีค่าไออาร์พีในชั้นหินพัมมิสอยู่ในช่วงระหว่าง -260 ถึง -150 มิลลิโวลท์ ดังรูปที่ 4.27 จากปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่ตรวจวัดได้ดังกล่าวในถังดีไนทริฟิเคชันแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์

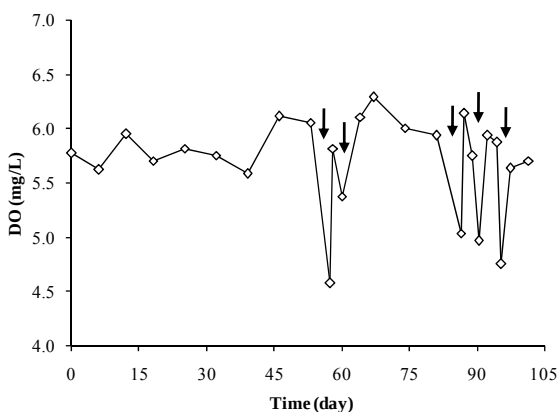
นอกจากนี้วิธีการถ่ายน้ำออกจากถังดีไนทริฟิเคชันเข้าสู่ถังไนทริฟิเคชัน พบว่าช่วยลดความเสี่ยงต่อสภาวะการลดลงของออกซิเจนอย่างฉับพลันในถังเพาะเลี้ยงปลา ดังรูปที่ 4.28 จะเห็นว่าเมื่อน้ำจากถังดีไนทริฟิเคชันเข้าสู่ถังไนทริฟิเคชัน ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำภายในถังเพาะเลี้ยงปลาจะลดลงต่ำกว่า 4.8 มก.ต่อลิตร ซึ่งลดลงมากกว่า 17% ของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในสภาวะปกติ



รูปที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลงของพีเอชและค่าสภาพด่าง เปรียบเทียบระหว่างระบบเพาะเลี้ยงปลานิล และถังดีไนทริฟิเคชัน (↓) แสดงถึงการสูบน้ำเข้าระบบเพาะเลี้ยงปลา (↑) แสดงถึงการสูบน้ำจากถังดีไนทริฟิเคชันเข้าสู่ระบบเพาะเลี้ยงปลา



รูปที่ 4.27 ค่าโออาร์พีในถังดีไนทริฟิเคชันในระยะบ่มเชื้อและระยะที่ทำการบำบัดไนเตรตในน้ำเสียจากระบบเพาะเลี้ยงปลานิล

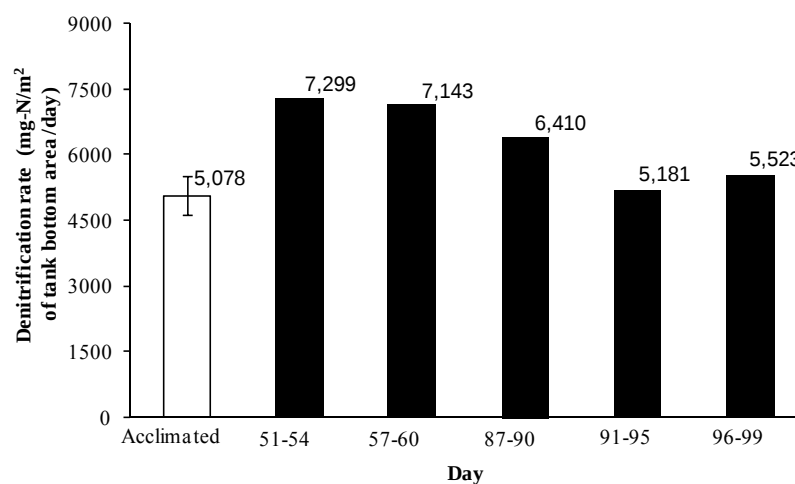


รูปที่ 4.28 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในถังเพาะเลี้ยงปลานิล (↓) แสดงการสูบน้ำจากถังดีไนทริฟิเคชันเข้าระบบเพาะเลี้ยง

- อัตราบำบัดดีไนทริฟิเคชันของการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน

ผลจากการคำนวณอัตราดีไนทริฟิเคชันจากการบำบัดไนเตรตมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $6,311.29 \pm 945.52$ มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.พื้นที่ผิวก้นถังต่อวัน หรือ 126.23 กรัมต่อ ลบ.ม.ของ หินพัมมิสต์ต่อวัน ดังรูปที่ 4.29 พบว่าอัตราดีไนทริฟิเคชันมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของไนเตรตก่อนการบำบัดมีค่าลดลง เป็นผลมาจากการติดตั้งถังดีไนทริฟิเคชันที่สามารถลดการสะสมไนเตรตในระบบเพาะเลี้ยงได้ และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการบำบัดกับงานวิจัยอื่นๆ พบว่า

อัตราการบำบัดไนโตรเจนด้วยถังดีไนทริฟิเคชันที่บรรจุหินพัมมิสอยู่ในเกณฑ์ปานกลางแสดงดังตารางที่ 4.13



รูปที่ 4.29 อัตราดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสในถังดีไนทริฟิเคชันในระยะบ่มเชื้อและการบำบัดไนโตรเจนจากระบบเพาะเลี้ยงปลานิล

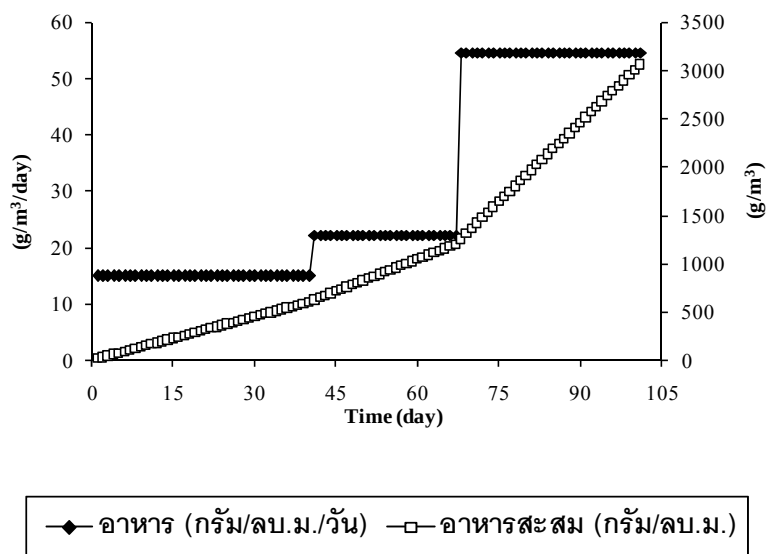
ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบอัตราการบำบัดไนโตรเจนกับงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้

ประเภทของน้ำเสีย	แหล่งคาร์บอน	ปริมาณไนโตรเจนในระบบ (มก. ไนโตรเจน/ลิตร)	อัตราดีไนทริฟิเคชัน (ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน)	ผู้วิจัย
น้ำใต้ดิน	ซูโครส	22	240-480	Gomez และคณะ (2000)
น้ำใต้ดิน	น้ำแป้ง	13-17	460	Kim และคณะ (2002)
ปลาหมอ	น้ำแป้ง	14	62	Tal และคณะ (2003)
ปลาทอง	น้ำแป้ง	70	624	Tal และคณะ (2003)
เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด	เมทานอล	50.0	670	Hamlin และคณะ (2008)
กุ้งขาว	เมทานอล	65.6	56	เอกชัย มาลาพล (2551)
โรงปลูกพืชไม้ใช้ดิน	เศษไม้	>100	7.6	Warneke และคณะ (2011)
ปลานิล	เมทานอล	45.8	126	งานวิจัยนี้

4.3.4 การประเมินประสิทธิภาพระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

หลังจากปล่อยลูกปลานิลที่มีน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 0.44 กรัม ความหนาแน่นเริ่มต้น 0.3 กก. ต่อลบ.ม. (จำนวน 306 ตัว) โดยให้อาหาร 5% ของน้ำหนักปลาต่อวัน ตลอดระยะเวลาการทดลอง 101 วัน ซึ่งจะมีการปรับปริมาณอาหารดังรูปที่ 4.30 เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า อัตราการเจริญเติบโตของปลานิลนั้นมีการเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา และผลจากการสุ่มตัวอย่างปลาในวันที่ 40 67 และ 101 ของการทดลอง เพื่อชั่งน้ำหนักและวัดความยาว สามารถหาอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 0.05 กรัมต่อวัน อัตราการรอดในวันสุดท้ายของการทดลองมีค่าเท่ากับ 89.5% น้ำหนักเฉลี่ย 5.86 ± 2.91 กรัมต่อตัว มีความหนาแน่น 3.57 ก.ก.ต่อลบ.ม. และอัตราแลกเนื้อหรืออัตราการเปลี่ยนอาหารไปเป็นเนื้อของปลานิลในวันสุดท้ายของการทดลองเท่ากับ 0.85 (ตารางที่ 4.14) ผลการตรวจวัดปริมาณเมทานอลคงเหลือในระบบเพาะเลี้ยงในวันสุดท้ายของการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.25 ± 0.17 มก.ต่อลิตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าที่ Kaviraj และคณะ (2004) ได้รายงานไว้ถึงความเป็นพิษแบบเรื้อรังของเมทานอลที่มีผลกับสัตว์น้ำจืด (มากกว่า 47.49 มก.ต่อลิตร)

การใช้ถังดีไนทริฟิเคชันบรรจุหินพัมมิส และเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ควบคู่กับระบบเพาะเลี้ยงปลานิล พบว่าถังดีไนทริฟิเคชันมีประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนถึง 85% สามารถควบคุมปริมาณไนโตรเจนในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำให้ต่ำกว่า 50 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ภายในระยะเวลาการเพาะเลี้ยง 3 เดือน ไม่พบการสะสมไนไตรต์ในระบบแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันโดยสมบูรณ์ และมีปริมาณเมทานอลคงเหลือในน้ำต่ำกว่า 5.5 มก.ต่อลิตร ประสิทธิภาพของถังดีไนทริฟิเคชันจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของวัสดุเพื่อให้เชื้อยีสต์เกาะ ชนิดและปริมาณสารอินทรีย์ที่เหมาะสมเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนและช่วยเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ รวมทั้งปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม อาทิ ค่าไออาร์พี ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ค่าสภาพต่าง พีเอช และการอาศัยระบบไนทริฟิเคชันเพื่อเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนเตรตที่สมบูรณ์



รูปที่ 4.30 ปริมาณอาหารที่ให้และปริมาณอาหารที่สะสมภายในถังเพาะเลี้ยงปลานิล

ตารางที่ 4.14 อัตราการเติบโตและผลผลิตของปลานิล

เวลา (วัน)	DWG (กรัม/วัน)	น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม/ตัว)	ความยาวเฉลี่ย (ซม./ตัว)	อัตราการรอด (%)	อัตรา แลกเนื้อ	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)
1		0.44±0.13	2.54±0.44	100		0.30
1-40	0.01±0.00	0.68±0.21	3.69±0.39			
41-67	0.04±0.02	1.74±0.65	4.18±0.76			
68-101	0.12±0.07	5.86±2.91	7.01±1.69	89.54	0.85	3.57

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การทดสอบวัสดุที่เหมาะสมสำหรับบรรจุในถังดีในทรีฟเคชั่นเพื่อทดแทนดินธรรมชาติ ได้แก่ หวาย หินพัมมิส และทรายเทียม พบว่า หินพัมมิสมีความเหมาะสมสำหรับการบำบัดในเทรตในถังดีในทรีฟเคชั่น โดยมีอัตราดีในทรีฟเคชั่นเท่ากับ 3,906 มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.พื้นที่ผิวก้นถังต่อวัน ซึ่งมีอัตราการบำบัดในเทรตน้อยกว่าเมื่อเทียบถึงบรรจุดิน (5,383 มก.ไนโตรเจนต่อ ตร.ม.พื้นที่ผิวก้นถังต่อวัน) การใช้หินพัมมิสจะช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และเกิดตะกอนแขวนลอยทำให้น้ำมีความขุ่นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นกับถังดิน นอกจากนี้หินพัมมิสยังมีน้ำหนักเบา ใช้งานง่าย และเกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัดในเทรตมากกว่าทรายและทรายเทียม สภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัดในเทรตภายในถังดีในทรีฟเคชั่นคือ ค่าไออาร์พีอยู่ในช่วง -300 ถึง -200 มิลลิโวลต์ และค่าออกซิเจนละลายน้ำไม่ต่ำกว่า 2 มก.ต่อลิตร การคงค่าออกซิเจนละลายในระดับดังกล่าวจะช่วยลดสภาวะการขาดออกซิเจนอย่างถาวรบริเวณชั้นด้านล่างของวัสดุและชั้นน้ำ ซึ่งจะทำให้น้ำเน่าเสียและระบบล้มเหลวในที่สุด

5.1.2 การเลือกใช้สารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมต่อการบำบัดในเทรตด้วยถังดีในทรีฟเคชั่น บรรจุหินพัมมิสได้แก่ เมทานอลและกากน้ำตาล พบว่า เมทานอลสามารถบำบัดในเทรตได้สมบูรณ์ (ในเทรตหลังบำบัดมีความเข้มข้นต่ำกว่า 5 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร) และไม่มีการสะสมของไนไตรต์ ที่เป็นสารตัวกลางในปฏิกิริยาดีในทรีฟเคชั่นต่างจากการใช้กากน้ำตาล พบว่าเกิดปริมาณไนไตรต์ และแอมโมเนียสูงกว่าชุดเดิมเมทานอล เนื่องจากปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในกากน้ำตาลมีค่าสูง (11.46 ก.ต่อลิตร) ทำให้มีปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนตกค้างในน้ำสูงเช่นกัน การเกิดปฏิกิริยาดีในทรีฟเคชั่นที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เสี่ยงต่อการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ นอกจากนี้ใช้กากน้ำตาลยังทำให้เกิดสีและกลิ่นที่ไม่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอีกด้วย

5.1.3 การเลือกใช้อัตราส่วนซีโอดีต่อในเทรตไนโตรเจนของเมทานอลที่เหมาะสมต่อการบำบัดในเทรตด้วยถังดีในทรีฟเคชั่นบรรจุหินพัมมิส โดยศึกษาอัตราส่วนซีโอดีต่อในเทรตไนโตรเจน 4 ระดับ ได้แก่ 3:1 4:1 5:1 และ 6:1 พบว่าอัตราส่วนซีโอดีต่อในเทรตไนโตรเจน 3 และ 4 เท่า ไม่สามารถบำบัดในเทรตได้อย่างสมบูรณ์ (น้ำหลังจากการบำบัดในเทรตมีความเข้มข้นของไนโตรเจนมากกว่า 5 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร) ในขณะที่อัตราส่วนอัตราส่วนซีโอดีต่อในเทรตไนโตรเจน เท่ากับ

5 และ 6 เท่า สามารถบำบัดไนเตรตได้อย่างสมบูรณ์ โดยมีอัตราดีไนทริฟิเคชันเท่ากับ 4,591 และ 7,300.8 กรัมไนโตรเจนต่อ ตร.ม.พื้นที่ผิวกันถึงต่อวัน ตามลำดับ แต่เนื่องจากการใช้เมทานอลในอัตราส่วน 6 เท่า จะพบเมทานอลคงเหลือในน้ำเท่ากับ 63.0 มก.ต่อลิตร เมทานอลคงเหลือในน้ำปริมาณสูงจะส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เพราะฉะนั้นอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนที่เหมาะสมเท่ากับ 5:1

5.1.4. การใช้ถังดีไนทริฟิเคชันบรรจุหินพัมมิสเพื่อบำบัดไนเตรต และเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 โดยทดสอบรูปแบบการเติมที่แตกต่างกัน คือ การเติมในชั้นน้ำ และในชั้นหินพัมมิสบริเวณด้านล่างของถังปฏิกรณ์ พบว่ารูปแบบการเติมเมทานอลไม่แตกต่างกัน เนื่องจากเกิดอัตราการบำบัดไนเตรต ระยะเวลาที่ใช้บำบัดไนเตรต และปริมาณเมทานอลคงเหลือในน้ำไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการอัดตัวเป็นชั้นของหินพัมมิสมีลักษณะเป็นช่องว่างระหว่างอนุภาคของหินไม่อัดแน่นมากเกินไป ทำให้เมทานอลสามารถผ่านชั้นสุบริเวณด้านบนของถังได้ง่าย ปริมาณเมทานอลที่พบในน้ำหลังบำบัดจึงไม่แตกต่างจากการเติมเมทานอลในชั้นโดยตรง

5.1.5 การเพาะเลี้ยงปลานิลในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กที่ติดตั้งถังดีไนทริฟิเคชันเพื่อบำบัดแอมโมเนียและการแยกตะกอน ในระยะเวลา 101 วัน ควบคู่กับการใช้ระบบถังดีไนทริฟิเคชันเพื่อบำบัดไนเตรตภายใต้สภาวะที่เหมาะสมได้แก่ บรรจุหินพัมมิส และเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในชั้นน้ำด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 พบว่าถังดีไนทริฟิเคชันช่วยควบคุมปริมาณไนเตรตในระบบเพาะเลี้ยง โดยในวันสุดท้ายมีปริมาณไนเตรตเท่ากับ 36.06 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตมากกว่า 80% และมีปริมาณเมทานอลตกค้างในระบบเพาะเลี้ยงน้อยกว่า 5.5 มก.ต่อลิตร ด้วยผลผลิตของปลานิลที่มีน้ำหนักเฉลี่ยในวันสุดท้ายเท่ากับ 5.86 ± 2.91 กรัมต่อตัว คิดเป็นความหนาแน่น 3.57 กก.ต่อลบ.ม. และมีอัตรารอดร้อยละ 89.5

5.2 ข้อเสนอแนะ

การสร้างระบบดีไนทริฟิเคชันที่ใหญ่ขึ้นจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำขนาดใหญ่ได้ เมื่อระบบใหญ่ขึ้นปริมาณหินพัมมิสที่ใช้เป็นวัสดุบรรจุในถังจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน แม้ว่าหินพัมมิสจะเป็นวัสดุที่หาซื้อได้ทั่วไป แต่หินพัมมิสขนาดเล็กค่อนข้างหาได้ยาก (สำหรับการทดลองนี้ใช้หินพัมมิสอยู่ในช่วง 1-3 มม.) เนื่องจากหินพัมมิสที่มีขายตาม

ห้องตลาดมักจะมีรูปร่างปานกลางไปจนถึงขนาดใหญ่ การนำมาใช้ในระบบจึงจะต้องผ่านการบดอัดให้มีขนาดเล็กลง

5.2.2 การพัฒนารูปแบบของถังดีไนทริฟิเคชันเพื่อให้สะดวกต่อการใช้งาน โดยเฉพาะทางออกของน้ำหลังบำบัดไนเตรต ควรมีการติดตั้งก๊อกน้ำเปิด-ปิด บริเวณด้านล่างของถัง เพื่ออำนวยความสะดวกถ่ายน้ำและป้องกันการรบกวนชั้นวัสดุภายในถังโดยตรง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กษิดิศ หนูทอง. 2551. การบำบัดไนโตรเจนในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง ปีที่ 16 1: 11- 12.
- ชลอ ลิมสุวรรณ และพรเลิศ จันทรรักษ์กุล. 2547. อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: เมจิค พลัปปลิเคชัน.
- ทยากร สุวรรณรัตน์. 2552. การพัฒนาระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดความหนาแน่นสูงโดยผสมผสานตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทรายเทียม [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: www.vermiculite.org [2554, มกราคม 19]
- ธัญญา พันธุ์ฤทธิ์ดำ. 2541. ระบบหมุนเวียนสัตว์น้ำแบบปิดที่มีระบบดีไนตริฟิเคชันสำหรับการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิคม จ้อยสุข. 2540. หินอุตสาหกรรมกับการเกษตรแผนใหม่. เอกสารการประชุมเสนอผลงานทางวิชาการกองธรณีวิทยา 2540: 7-19.
- มันสิน ตันจุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันจุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา. 2539. การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคนอื่นๆ. 2536. การพัฒนาการเพาะเลี้ยงปลานิล. เอกสารวิชาการฉบับที่ 23. สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด กรมประมง. 96 น.
- ราคามะทานอล [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.methanolmsa.com/exec/sam/view/id=129/node=139/> [2554, มกราคม 15]
- รุ่งนภา สุทธิศรี. 2549. ประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับการเลี้ยงกุ้งความหนาแน่นสูงในโรงเรือน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตมหาวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิรวรรณ แจ่มศิลป์, อรวรรณ ธีระสุขจินดา, ภูมิศักดิ์ ราชศรี, หัสณพงค์ ดวงขวัญ และชาญชัย แพทอง.

2551. ภาวะเศรษฐกิจการเกษตรปี 2551 และแนวโน้มปี 2552. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

วิลาลินี ไตรยราช. 2546. สภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดไนโตรเจนในน้ำทะเล ด้วยระบบบำบัดไนโตรเจนแบบท่อสำหรับเลี้ยงกุ้งทะเล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุวิมล ตันทสุกิจวนิช. 2545. สภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดไนโตรเจนในน้ำทะเล ด้วยระบบบำบัดไนโตรเจนแบบท่อสำหรับเลี้ยงกุ้งทะเล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิริวรรณ ศิลาภากุล. 2545. การกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับเลี้ยงกุ้งโดยถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกที่มีการไหลเวียนแบบภายนอก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกชัย มาลาพล. 2551. การบำบัดไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร่นากลางแจ้งโดยตัวกรองชีวภาพในตริฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกชัย มาลาพล, มะลิวัลย์ คุตะโค, สรวิต เผ่าทองสุข และเปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต. 2551. ผลของเมทานอลและกลูโคสต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันของดินตะกอนจากบ่อเลี้ยงกุ้งในสภาวะห้องปฏิบัติการ. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46: สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม 2551: 482-489.

อำไพเทพิน สิงหะพันธุ์. 2543. ระบบบำบัดไนโตรเจนเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Abril, G., and Frankignoulle, M. 2001. Nitrogen-Alkalinity interactions in the highly polluted Scheldt basin (Belgium). Water Research 35: 844-850.

Arbiv, A., and van Rijn, J. 1995. Performance of treatment system for inorganic nitrogen removal in intensive quaculture systems. Aquacultural Engineering 14: 189-203.

- Akunna, J. C., Bizeau, C., and Moletta, R. 1993. Nitrate and nitrite reduction with anaerobic sludge using various carbon sources: glucose, glycerol, acetic acid, lactic and methanol. Water Research 27: 1303-1312.
- Alves, C. F., Melo, L. F., and Vieira, M. J. 2002. Influence of medium composition on the characteristics of a denitrifying biofilm formed by *Alcaligenes denitrificans* in a fluidised bed reactor. Process Biochemistry 37: 837-845.
- Annual Book of ASTM Standards. 2008. Soil and Rock (I). Vol. 04.08. USA: Baltimore.
- Annual Book of ASTM Standards. 2008. Refractories, Activated Carbon; Advanced Ceramics. Vol. 15.01. USA: Baltimore.
- APHA, AWWA and WEF. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st edition. Washington DC: American Public Health Association.
- Avnimelech, Y., and Ritvo, G. 2003. Shrimp and fishpond soils: processes and management. Aquaculture 220: 549-567.
- Bang, D. Y., Watanabe, Y., and Noike, T. 1995. An experimental study on aerobic denitrification with polyvinyl alcohol as a carbon source in biofilms. Water Science and Technology 32(8): 235-242.
- Bernet, N., Delgenes, N., and Moletta, R. 1996. Denitrification by anaerobic sludge in piggery wastewater. Environmental Technology 17: 293-300.
- Bernat, K., and Wojnowska-Baryla, I. 2007. Carbon source in aerobic denitrification. Biochemical Engineering Journal 36(2): 116-122.
- Boley, A., Muller, W. R., and Haider, G. 2000. Biodegradable polymers as solid substrate and biofilm carrier for denitrification in recirculated aquaculture systems. Aquacultural Engineering 22: 75-85.
- Brazil, B. L. 2006. Performance and operation of a rotating biological contactor in a tilapia recirculating aquaculture system. Aquacultural Engineering 34: 261-274.
- Brinkhoff, T., Santegoeds, C., Sahm, K., Kuever, J., and Muyzer, G. 1998. A polyphasic approach to study the diversity and vertical distribution of sulfur-oxidizing *Thiomicrospira* species in coastal sediments of the German Wadden Sea. Applied and Environmental Microbiology 64: 4650-4657.

- Brune, D. E., Schwartz, G., Eversole, A. G., Collier, J. A., and Schwedler, T. E. 2003. Intensification of pond aquaculture and high rate photosynthetic systems. Aquacultural Engineering 28: 65-86.
- Camargo, J. A., and Alonso, A. 2007. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. Environment International 32: 831-849.
- Carrera, J., Vicent, T., and Lafuente, F. J. 2003. Influence of temperature on denitrification of an industrial high-strength nitrogen wastewater in a two-sludge system. Water South African 29: 11-16.
- Cecen, F., and Gronenc, I. E. 1992. Nitrification-denitrification of high-strength nitrogen wastes in two up-flow submerged filters. Water Science and Technology 26(9-11): 2225-2228.
- Chen, M., Canelli, E., and Fush, G. W. 1975. Effect of Salinity on Nitrification in East River. Journal of the Water Pollution Control Federation 47: 2474-2481. Cited in ชฎารัตน์ อนันต์. 2540. ผลของความเค็มที่มีผลต่อการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของกระบวนการแยกทิวเด็คสไลด์แบบฟลูอิดออกซ์ 3 ขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Chen, S., Ling, J., and Blancheton, J. P. 2006. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. Aquacultural Engineering 34: 179-197.
- Chiu, Y. C., and Chung, M. S. 2003. Determination of optimal COD/nitrate ratio for biological denitrification. International Biodeterioration and Biodegradation 51:43-49.
- 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.
- Delwiche, C. C. 1981. Denitrification Nitrification and Atmospheric Nitrous Oxide. USA: John Wiley and Sons.
- Dincer, A. R., and Kargi, F. 2000. Kinetics of sequential nitrification and denitrification processes. Enzyme and Microbial Technology 27: 37-42.

- Di Toro, D. M., Mahony, J. D., and Gonzalez, A. M. 1996. Particle oxidation model of synthetic FeS and sediment acid-volatile sulfide. Environmental Toxicology and Chemistry 5: 2156-2167.
- Eding, E. H., Kamstra, A., Verreth, J. A. J., Huisman, E. A., and Klapwijk, A. 2006. Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: a review. Aquacultural Engineering 34: 234-260.
- Foglar, L., and Briski, F. 2003. Wastewater denitrification process the influence of methanol and kinetic analysis. Process Biochemistry 39: 95-103.
- Gelfand, I., et al. 2003. A novel zero-discharge intensive seawater recirculating system for culture of marine fish. Journal of the World Aquaculture Society 34: 344-358.
- Ghafari, S., Hasan, M., and Aroua, M. K. 2010. A kinetic study of autohydrogenotrophic denitrification at the optimum pH and sodium bicarbonate dose. Bioresource Technology 101(7): 2236-2242.
- Gomez, M., Gonzalez-Lopez, J., and Honotia-Garcia, E. 2000. Influence of carbon source on nitrate removal of contaminated groundwater in a denitrifying submerged filter. Journal of Hazardous Materials B80: 69-80.
- Grguric, G., Sondey, C. J., and DuVall, B. M. 2000. Carbon and nitrogen fluxes in a closed seawater facility. Science Total Environment 247: 57-69.
- Grommen, R., Verhaege, M., and Verstraete, W. 2006. Removal of nitrate in aquaria by means of electrochemically generated hydrogen gas as electron donor for biological denitrification. Aquacultural Engineering 34: 33-39.
- Gutierrez-Wing, M. T., and Malone, R. F. 2006. Biological filters in aquaculture: trends and research direction for fresh water and marine applications. Aquacultural Engineering 34(3): 163-171.
- Hamlin, H. J., et al. 2008. Comparing denitrification rates and carbon sources in commercial scale upflow denitrification biological filters in aquaculture. Aquacultural Engineering 38: 79-92.
- Hellinga, C., Schellen, A. A. J. C., Mulder, J. W., van Loosdrecht, M. C. M., and Heijnen, J. J. 1998. The sharon process: a innovative method for nitrogen removal from ammonia-rich wastewater. Water Science Technology 37: 135-142.

- Henze, M., Harremoës, P., Jansen, J. C., and Arvin, E. 1996. Wastewater treatment: biological and chemical processes. Berlin: Springer-Verlag.
- Her, J. J., and Huang, J. S. 1995. Influences of carbon source and C/N ratio on nitrate/nitrite denitrification and carbon breakthrough. Bioresource Technology 54: 45-51.
- Honda, H., et al. 1993. High density rearing of Japanese Flounder, *Paralichthys olivaceus* with a closed seawater recirculation system equipped with a denitrification unit. Suisanzoshoku 41: 19-26.
- Huey, D. W., Simco, B. A., and Criswell, D. W. 1980. Nitrite-induced methemoglobin formation in channel catfish. Transactions of the American Fisheries Society 109: 558-562.
- Kaviraj, A., Bhunia, F., and Saha, N. C. 2004. Toxicity of Methanol to Fish, Crustacean, Oligochaete Worm, and Aquatic Ecosystem. International Journal Toxicity 23(1): 55-63.
- Kim, Y. K., Nakano, K., Lee, T. L., Kanchanatawee, S., and Matsumura, M. 2002. On-site nitrate removal of groundwater by an immobilized phydrophilic denitrifier using soluble starch as a carbon source. Journal of Bioscience and Bioengineering 93: 303-308.
- Kleerebezem, R., and Mendez, R. 2002. Autotrophic denitrification for combined hydrogen sulfide removal from biogas and post-denitrification. Water Science and Technology 45: 349-356.
- Knowles, R. 1982. Denitrification. Microbiology Review 46: 43-70. Cited in ธีรญา พันธุ์ฤทธิ์ดำ. 2541. ระบบหมุนเวียนสัตว์น้ำแบบปิดที่มีระบบดีไนตริฟิเคชันสำหรับการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Kuba, T., Smolders, G., van Loosdrecht, M. C. M., and Heijnen, J. J. 1993. Biological phosphorus removal from wastewater by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor. Water Science and Technology 27(5-6): 241-252.
- Kutako, M., Yiewya, K., Nupasant, P., Ngamphongsai, C., and Powtongsook, S. 2005. Conversion of inorganic nitrogen compounds from organic matter decomposition in

- sediment from shrimp pond under laboratory condition. Proceedings 31st Congress on Science and Technology of Thailand.
- Lee, P. G., et al. 2000. Denitrification in aquaculture systems: an example of a fuzzy logic control problem. Aquacultural Engineering 23: 37-59.
- Li, B., and Irvin, S. 2007. The comparison of alkalinity and ORP as indicators for nitrification and denitrification in a sequencing batch reactor (SBR). Biochemical Engineering Journal 34: 248-255.
- Ling, J., and Chen, S. 2005. Impact of organic carbon on nitrification performance of different biofilters. Aquacultural Engineering 33: 150-162.
- Liu, H., Jianga, W., Wana, D., and Qua, J. 2009. Study of a combined heterotrophic and sulfur autotrophic denitrification technology for removal of nitrate in water. Journal of Hazardous Materials 169: 23-28.
- Martin, D., et al. 2009. Acetate and ethanol as potential enhancers of low temperature denitrification in soil contaminated by fur farms: A pilot-scale study. Journal of Hazardous Materials 163: 1230–1238.
- Matos, C. T., Velizarov, S., Crespo, J. G., and Reis, M. A. M. 2009. Simultaneous removal of per-chlorate and nitrate from water using the ion exchange membrane bioreactor concept. Water Research 40: 231-241.
- McCarty, P. M., Beck, L., and Amant, St. P. 1969. Biological denitrification of wastewaters by addition of organic materials. Proceedings of the 24th Industrial Water Conference, Purdue University: 1271-1285.
- Menasveta, P., et al. 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.
- 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.
- Murray, P. J., et al. 2004. Denitrification potential in a grassland subsoil: effect of carbon substrates. Soil Biology and Biochemistry 36: 545-547.
- Najafpour, G. D., and Shan, C. P. 2003. Enzymatic hydrolysis of molasses. Bioresource Technology 86: 91-94.

- Narcis, N., Rebhun, M., and Scheindorf, C. 1979. Denitrification at various carbon to nitrogen ratios. Water Research 13: 93-98.
- Neori, A., et al. 2004. Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. Aquaculture 231: 361-391.
- Oh, S. E., Yoo, Y. B., Young, J. C., and Kim, I. S. 2001. Effect of organics on sulfur-utilizing autotrophic denitrification under mixotrophic conditions. Journal of Biotechnology 92: 1-8.
- Oleszkiewicz, J. A., and Berquist, S. A. 1988. Low temperature nitrogen removal in sequencing batch reactors. Water Research 22: 1163-1171.
- Park, E. J., et al. 2001. Salinity acclimation of immobilized freshwater denitrifiers. Aquacultural Engineering 24: 169-180.
- Payne, W. J. 1973. Reduction of nitrogenous oxides by microorganisms. Bacteria Review 37: 409-452.
- Piedrahita, R. H. 2003. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. Aquaculture 226: 35-44.
- Rodrigues, C. V., Schwarz, M. H., Delbos, B. C., and Sampaio, L. A. 2007. Acute toxicity and sublethal effects of ammonia and nitrite for juvenile cobia (*Rachycentron canadum*). Aquaculture 271: 553-557.
- Ruiz, G., Jeison, D., and Chamy, R. 2003. Nitrification with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration. Water Research 37: 1371-1377.
- 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.
- Satoh, H., Okabe, S., Norimatsu, N., and Watanabe, Y. 2000. Significance of substrate C/N ratio on structure and activity of nitrifying biofilms determined by in situ hybridization and the use of microelectrodes. Water Science Technology 41: 317-321.
- Sauthier, N., Grasmick, A., and Blancheton, J. P. 1998. Biological denitrification applied to a marine closed aquaculture system. Water Resources 32: 1932-1938.

- Shnel, N., Barak, Y., Ezer, T., Dafni, Z., and van Rijn, J. 2002. Design and performance of a zero-discharge tilapia recirculating system. Aquacultural Engineering 26: 191-203.
- Sillen, L. G. 1965. Oxidation states of Earth's ocean and atmosphere: a model calculation on earlier states: the myth of prebiotic soup. Archiv Kemi Acta 24: 431-456.
- Skinde, J. R., and Bhagat, S. K. 1982. Industrial wastes as carbon sources in biological denitrification. Journal of the Water Pollution Control Federation 54: 370-377.
- Spotte, S. 1979. Seawater Aquariums: The Captive Environment. 2nd edition. New York: Wiley.
- Strickland, J. D. H., and Parsons, T. R. 1972. A practical handbook of seawater analysis. 2nd edition. Ottawa: Fisheries research board of Canada.
- Suthersan, S., and Ganczarcczyk, J. 1986. Inhibition of nitrite oxidation during nitrification. Water Pollution Research 21(2): 257-266.
- Suzuki, Y., Maruyama, T., Numata, H., Sato, H., and Asakawa, M. 2003. Performance of a closed recirculating system with foam separation, nitrification and denitrification units for intensive culture of eel: toward zero emission. Aquacultural Engineering 29: 165-182.
- Tal, Y., Nussinovitch, A., and van Rijn, J. 2003. Nitrate removal in aquariums by immobilized denitrifiers. Biotechnology Progress 19: 1019-1021.
- Tal, Y., and Schreier, H. J. 2004. Dissimilatory sulfate reduction as a process to promote denitrification in marine recirculated aquaculture systems. Proceedings 5th International Conference on Recirculating Aquaculture: 379-384.
- Terada, A., Yamamoto, T., Igarashi, R., Tsuned, S., and Hirata, A. 2006. Feasibility of a membrane-aerated biofilm reactor to achieve controllable nitrification. Biochemical Engineering Journal 28: 123-130.
- Timmons, M. B., Ebeling, J. M., Wheaton, F. W., Summerferlt, S. T., and Vinci, B. J. 2002. Recirculating Aquaculture systems. 2nd edition. New York: Cayuca Aqua Ventures.
- Tomasso, J. R., Simco, B. A., and Davis, K. B. 1979. Chloride inhibition of nitrite-induced methemoglobinemia in channel catfish (*Ictalurus punctatus*). Journal of the Fisheries Research Board of Canada 36: 1141-1144.

- Van Rijn, J., and Rivera, G. 1990. Aerobic and anaerobic biofiltration in an aquaculture unit: nitrite accumulation as a result of nitrification and denitrification. Aquacultural Engineering 9: 1-18.
- Van Rijn, J. 1996. The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture - a review. Aquaculture 139: 181-201.
- Van Rijn, J., Tal, Y., and Schreier, J. 2006. Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. Aquacultural Engineering 34: 364-376.
- Vasiliadou, I. A., Karanasiosa, K. A., Pavloub, S., and Vayenasa, D. V. 2009. Experimental and modelling study of drinking water hydrogenotrophic denitrification in packed-bed reactors. Journal of Hazardous Materials 165: 812-824.
- Vermiculite [Online]. Available from: <http://webmineral.com/data/Vermiculite.shtml> [2011, January 19]
- Vives, M. T. 2004. SBR Technology for Wastewater Treatment: Suitable Operational Conditions for a Nutrient Removal. Tesis de doctorado. Universidad de Girona.
- Warneke, S., Schipper, L. A., Bruesewitz, D. A., McDonald, I., and Cameron, S. 2011. Rates, controls and potential adverse effects of nitrate removal in a denitrification bed. Ecological Engineering 37: 511-522.
- Wetzel, R. G. 2001. Limnology. 3rd edition. New York: Academic Press, 2001. Cited in Camargo, J. A., Alonso, A., and Salamanca, A. 2005. Nitrate toxicity to aquatic animals: a review with new data for freshwater invertebrates. Chemosphere 58: 1255-1267.
- Wu, C., Chen, Z., Liu, X., and Peng, Y. 2007. Nitrification–denitrification via nitrite in SBR using real-time control strategy when treating domestic wastewater. Biochemical Engineering Journal 36: 87-92.
- Yamashita, T., Yamamoto-Ikemoto, R., and Zhu, J. 2011. Sulfate-reducing bacteria in a denitrification reactor packed with wood as a carbon source. Bioresource Technology 102(3): 2235-2241.
- Zhu, S., and Chen, S. 2001. Effects of organic carbon on nitrification rate in fixed film biofilters. Aquacultural Engineering 25: 1-11.

ภาคผนวก

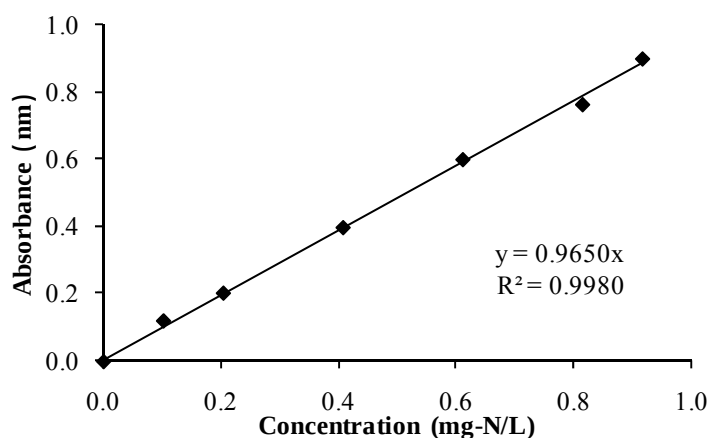
ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี

1. วิธีวิเคราะห์แอมโมเนีย

การวิเคราะห์แอมโมเนียในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์แอมโมเนียซึ่งดัดแปลงมาจากของ Strickland and Parson (1972) โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 10 มล. ควรทำการวิเคราะห์ทันที (หากน้ำตัวอย่างมีของแข็งแขวนลอยอยู่ให้กรองด้วยกระดาษกรอง 0.45 ไมโครเมตร) ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ทันทีควรแช่แข็งที่อุณหภูมิ -15°C หรือแช่เย็นโดยเติมฟีนอล 1 มล. ต่อปริมาตรน้ำตัวอย่าง 25 มล. ซึ่งถ้าเก็บรักษาด้วยวิธีดังกล่าวจะสามารถเก็บตัวอย่างได้ถึง 2 สัปดาห์

ปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 1 มล. โดยใช้น้ำ De-Ionized (D.I.) เป็นแบลนด์ เติมสารละลายฟีนอล (phenol 20 กรัม ใน 95% v/v Ethyl Alcohol ปริมาตร 200 มล.) ปริมาตร 0.04 มล. เติมสารละลายโซเดียมไนโตรพรัสไซด์ ($\text{Na}_2\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1.0 กรัม ในน้ำ D.I. 200 มล.) ปริมาตร 0.04 มล. จากนั้นเติมสารละลายออกซิไดซิง (ผสม alkaline reagent (Sodium citrate 100 กรัม และ NaOH 5 กรัม ในน้ำ D.I. 500 มล.) และ Sodium hypochlorite solution ในอัตราส่วน 100 มล. ต่อ 25 มล.) ปริมาตร 0.1 มล. เขย่าให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 ชม. สีที่เกิดขึ้นจะคงอยู่ภายใน 24 ชม. หลังทำปฏิกิริยา นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร จากนั้นเตรียมสารละลายแอมโมเนียมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างกัน คือ 0.1 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 0.9 มก.แอมโมเนียไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ จากสารละลายสต็อกแอมโมเนียความเข้มข้น 100 มก.แอมโมเนียไนโตรเจนต่อลิตร

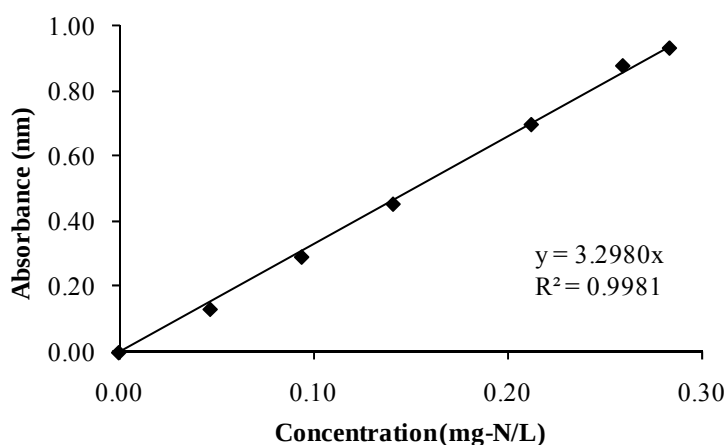


รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานแอมโมเนีย (Total ammonia)

2. วิเคราะห์ไนไตรต์

การวิเคราะห์ไนไตรต์ในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์ไนไตรต์ซึ่งดัดแปลงมาจากของ Strickland and Parson (1972) โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 10 มล. ควรทำการวิเคราะห์ทันที (หากน้ำตัวอย่างมีของแข็งแขวนลอยอยู่ให้กรองด้วยกระดาษกรอง 0.45 ไมโครเมตร) ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ทันที ควรแช่แข็งที่อุณหภูมิ -15°C

ปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 1 มล. โดยใช้น้ำ De-Ionized (D.I.) เป็นแบลนด์ เดิมสารละลายซัลฟานิลาไมด์ (Sulphanilamide 5 กรัม และ Hydrochloric acid 50 มล. ในน้ำกลั่นปริมาตร 500 มล.) ปริมาตร 0.02 มล. เขย่าให้เข้ากันและทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 2 นาที แต่ไม่เกิน 10 นาที จากนั้นเติม Naphthylethylenediamine reagent (N-(1-naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride 0.50 กรัม ในน้ำ 500 มล.) ปริมาตร 0.02 มล. เขย่าให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 10 นาที หรือไม่เกิน 2 ชม. นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 543 นาโนเมตร จากนั้นเตรียมสารละลายไนไตรต์มาตรฐานที่มีความเข้มข้นต่างกัน คือ 0.05 0.10 0.15 0.20 0.25 และ 0.30 มก.ไนไตรต์ไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ จากสารละลายสต็อกไนไตรต์ความเข้มข้น 100 มก.ไนไตรต์ไนโตรเจนต่อลิตร

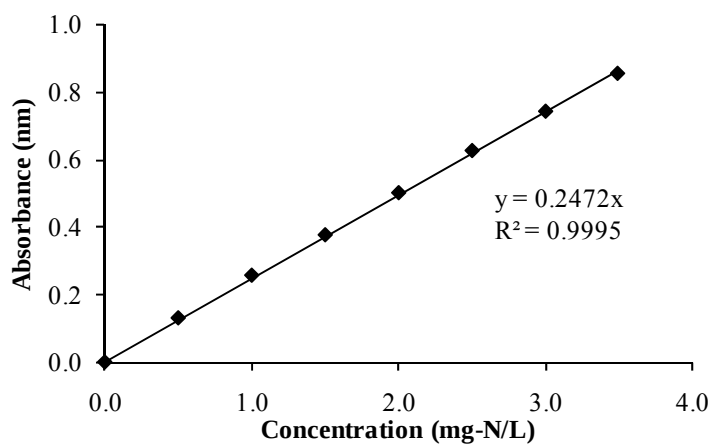


รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานไนไตรต์ (NO_2^- -N)

3. วิธีวิเคราะห์ไนเตรต

การวิเคราะห์ไนเตรตในน้ำ โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 10 มล. ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ทันที ควรแช่แข็งที่อุณหภูมิ -15°C

น้ำตัวอย่างมีของแข็งแขวนลอยอยู่ให้กรองด้วยกระดาษกรอง 0.45 ไมโครเมตร ก่อนการวิเคราะห์ โดยใช้น้ำกลั่นเป็นเบลงค์ นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 220 และ 275 นาโนเมตร ตามลำดับ ผลต่างที่ได้จากการวัดทั้งสองความยาวคลื่น จะนำไปใช้คำนวณหาปริมาณไนเตรตต่อไป จากนั้นเตรียมสารละลายไนเตรตมาตรฐานที่มีความเข้มข้นต่างกัน คือ 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 และ 3.5 มก.ไนเตรตไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ จากสารละลายสต็อกไนเตรตความเข้มข้น 100 มก.ไนเตรตไนโตรเจนต่อลิตร



รูปที่ ก.3 กราฟมาตรฐานไนเตรต (NO_3^- -N)

ภาคผนวก ข

ข้อมูลคุณภาพน้ำที่ตรวจวัดในการทดลองช่วงที่ 1 การประเมินประสิทธิภาพการบำบัด
ไนเตรตของดินธรรมชาติเปรียบเทียบกับวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติในถังดีไนทริฟิเคชัน

ตารางที่ ข.1 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตในน้ำของถังดินธรรมชาติ (ชุด
ควบคุม) จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/11/2552	0	0.01	0.00	0.17	0.04	110.58	0.51
6/11/2552	1	0.02	0.00	0.05	0.00	108.44	11.63
7/11/2552	2	0.01	0.01	0.11	0.00	114.57	0.49
8/11/2552	3	0.00	0.00	0.15	0.04	113.39	0.78
9/11/2552	4	0.00	0.00	0.23	0.14	114.04	0.86
10/11/2552	5	0.00	0.00	0.17	0.08	112.38	0.81
11/11/2552	6	0.01	0.00	0.17	0.04	110.58	0.51
12/11/2552	7	0.02	0.00	0.05	0.00	108.40	11.63
13/11/2552	8	0.02	0.00	1.20	0.10	101.86	18.56
14/11/2552	9	0.02	0.01	1.65	0.31	89.79	16.10
15/11/2552	10	0.01	0.00	1.12	0.37	74.37	8.22
16/11/2552	11	0.00	0.00	2.61	0.33	47.92	14.99
17/11/2552	12	0.00	0.00	2.98	0.34	42.38	7.96
18/11/2552	13	0.00	0.00	2.71	0.37	18.30	2.16
19/11/2552	14	0.00	0.00	2.16	0.26	17.18	2.05
20/11/2552	15	0.00	0.00	1.84	0.06	11.43	4.87
21/11/2552	16	0.00	0.00	1.01	0.28	5.60	3.10
22/11/2552	17	0.00	0.00	0.89	0.28	3.64	0.99
23/11/2552	18	0.00	0.00	0.00	0.00	109.26	0.77
24/11/2552	19	0.01	0.00	2.50	0.45	47.36	21.86
25/11/2552	20	0.01	0.00	2.81	0.65	17.30	7.04
26/11/2552	21	0.01	0.00	1.56	0.22	17.46	5.11
27/11/2552	22	0.01	0.01	0.54	0.09	10.62	5.07
28/11/2552	23	0.01	0.00	0.56	0.05	5.78	2.45
29/11/2552	24	0.00	0.00	0.00	0.00	107.73	0.18
30/11/2552	25	0.00	0.00	1.85	0.19	42.41	12.52
1/12/2552	26	0.00	0.00	1.95	0.16	27.51	0.27
2/12/2552	27	0.00	0.00	0.60	0.05	18.27	11.42

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรด (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
3/12/2552	28	0.00	0.00	0.55	0.07	9.66	3.14
4/12/2552	29	0.00	0.00	0.00	0.00	97.36	7.67
5/12/2552	30	0.02	0.01	1.64	0.28	78.25	19.36
6/12/2552	31	0.01	0.00	1.03	0.14	54.23	14.60
7/12/2552	32	0.00	0.00	0.63	0.30	32.98	8.04
8/12/2552	33	0.00	0.00	0.52	0.39	14.60	11.31
9/12/2552	34	0.00	0.00	0.05	0.04	5.67	3.64
10/12/2552	35	0.00	0.00	0.00	0.00	102.55	15.59
11/12/2552	36	0.01	0.00	2.22	0.11	81.99	24.08
12/12/2552	37	0.00	0.00	0.82	0.14	52.47	15.12
13/12/2552	38	0.00	0.00	0.74	0.22	16.70	5.31
14/12/2552	39	0.00	0.00	0.36	0.11	5.14	1.48
15/12/2552	40	0.00	0.00	0.00	0.00	102.61	2.39
16/12/2552	41	0.00	0.00	0.00	0.00	102.12	2.86
17/12/2552	42	0.01	0.01	1.70	0.28	78.26	37.03
18/12/2552	43	0.00	0.00	1.10	0.23	53.79	23.86
19/12/2552	44	0.00	0.00	0.65	0.07	29.74	14.43
20/12/2552	45	0.00	0.00	0.22	0.01	6.93	2.35
21/12/2552	46	0.00	0.00	0.15	0.01	5.91	2.01
22/12/2552	47	0.00	0.00	0.00	0.00	103.86	2.63
23/12/2552	48	0.00	0.00	0.00	0.00	100.54	5.94
24/12/2552	49	0.00	0.00	1.79	0.25	70.45	26.85
25/12/2552	50	0.00	0.00	1.35	0.28	40.32	18.20
26/12/2552	51	0.00	0.00	0.34	0.07	10.35	5.46
27/12/2552	52	0.00	0.00	0.26	0.09	5.50	1.30
28/12/2552	53	0.00	0.00	0.00	0.00	104.06	5.29
29/12/2552	54	0.00	0.00	2.26	0.61	78.61	7.15
30/12/2552	55	0.00	0.00	2.40	0.49	57.79	12.36
31/12/2552	56	0.00	0.00	0.78	0.19	33.11	5.16
1/1/2553	57	0.00	0.00	0.58	0.10	11.82	8.27
2/1/2553	58	0.00	0.00	0.41	0.06	5.32	2.15
3/1/2553	59	0.00	0.00	0.00	0.00	105.82	1.58
4/1/2553	60	0.00	0.00	0.20	0.04	105.91	0.70
5/1/2553	61	0.00	0.00	0.14	0.01	109.51	0.94
6/1/2553	62	0.00	0.00	0.00	0.00	103.18	6.08
7/1/2553	63	0.01	0.01	2.32	0.16	77.94	10.61
8/1/2553	64	0.00	0.00	0.82	0.02	59.12	15.50
9/1/2553	65	0.00	0.00	0.41	0.06	34.14	6.91

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
10/1/2553	66	0.00	0.00	0.55	0.06	17.11	1.66
11/1/2553	67	0.00	0.00	0.44	0.07	5.84	0.75

ตารางที่ ข.2 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตในน้ำของถังทราย จำนวน 3 ถัง ทดลอง (วิเคราะห์ถึงละ 3 ชั่วโมง)

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/11/2552	0	0.00	0.00	0.00	0.00	115.17	1.70
12/11/2552	7	0.00	0.00	0.03	0.02	116.59	0.81
13/11/2552	8	0.00	0.00	0.10	0.08	116.48	0.71
14/11/2552	9	0.00	0.00	0.12	0.08	116.30	0.71
15/11/2552	10	0.01	0.01	0.13	0.07	115.82	0.24
16/11/2552	11	0.01	0.01	0.14	0.08	115.43	0.25
17/11/2552	12	0.02	0.00	0.15	0.09	114.29	0.63
18/11/2552	13	0.00	0.00	0.17	0.09	114.82	0.43
19/11/2552	14	0.00	0.00	0.18	0.09	111.88	1.59
20/11/2552	15	0.00	0.00	0.19	0.13	111.77	19.96
21/11/2552	16	0.00	0.00	0.37	0.17	103.55	12.72
22/11/2552	17	0.00	0.00	0.14	0.04	102.98	11.95
23/11/2552	18	0.00	0.00	0.00	0.00	102.50	15.52
24/11/2552	19	0.00	0.00	0.52	0.12	98.21	10.33
25/11/2552	20	0.00	0.00	0.63	0.08	92.41	0.54
26/11/2552	21	0.00	0.00	0.67	0.12	86.06	0.31
27/11/2552	22	0.00	0.00	0.69	0.13	79.02	0.17
28/11/2552	23	0.00	0.00	0.69	0.14	56.22	0.62
29/11/2552	24	0.00	0.00	0.55	0.19	43.34	0.46
30/11/2552	25	0.00	0.00	0.19	0.04	33.07	0.38
1/12/2552	26	0.00	0.00	0.17	0.05	23.76	0.22
2/12/2552	27	0.00	0.00	0.13	0.06	17.38	0.22
3/12/2552	28	0.00	0.00	0.09	0.04	10.46	0.15
4/12/2552	29	0.00	0.00	0.00	0.00	104.14	1.31
5/12/2552	30	0.01	0.00	6.59	3.77	94.67	4.94
6/12/2552	31	0.01	0.00	9.19	1.28	63.07	20.79
7/12/2552	32	0.00	0.00	12.58	1.18	59.68	22.21
8/12/2552	33	0.00	0.00	9.03	4.39	55.53	20.14
9/12/2552	34	0.00	0.00	9.89	2.17	41.04	15.86

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
10/12/2552	35	0.00	0.00	8.32	0.32	32.07	14.56
11/12/2552	36	0.00	0.00	4.49	0.86	23.33	9.85
12/12/2552	37	0.00	0.00	4.39	1.08	18.16	6.97
13/12/2552	38	0.00	0.00	3.86	0.18	13.71	6.86
14/12/2552	39	0.00	0.00	1.06	0.38	9.52	6.93
15/12/2552	40	0.00	0.00	0.56	0.57	5.75	2.13
16/12/2552	41	0.00	0.00	0.09	0.09	5.33	0.97
17/12/2552	42	0.00	0.00	0.00	0.00	96.61	3.31
18/12/2552	43	0.00	0.00	5.22	0.29	86.74	2.64
19/12/2552	44	0.00	0.00	4.55	0.05	71.91	29.29
20/12/2552	45	0.00	0.00	3.85	0.77	66.47	18.15
21/12/2552	46	0.00	0.00	1.27	0.13	55.11	23.18
22/12/2552	47	0.00	0.00	1.37	0.15	44.75	19.18
23/12/2552	48	0.00	0.00	0.96	0.30	28.80	17.30
24/12/2552	49	0.00	0.00	0.87	0.33	22.12	2.23
25/12/2552	50	0.01	0.00	0.85	0.19	17.08	0.76
26/12/2552	51	0.00	0.00	0.66	0.09	13.09	3.56
27/12/2552	52	0.00	0.00	0.66	0.20	8.79	0.42
28/12/2552	53	0.00	0.00	0.49	0.07	6.45	0.95
29/12/2552	54	0.00	0.00	0.00	0.00	97.11	2.62
30/12/2552	55	0.01	0.00	3.57	0.80	86.79	10.11
31/12/2552	56	0.02	0.01	2.51	0.94	74.54	14.54
1/1/2553	57	0.02	0.01	2.99	0.44	67.44	24.30
2/1/2553	58	0.01	0.00	3.31	0.90	58.62	11.37
3/1/2553	59	0.01	0.01	2.68	0.17	50.38	7.31
4/1/2553	60	0.00	0.00	2.35	0.34	43.19	14.05
5/1/2553	61	0.00	0.00	1.54	0.46	33.62	13.96
6/1/2553	62	0.00	0.00	0.96	0.34	27.60	9.09
7/1/2553	63	0.00	0.00	0.93	0.36	21.22	6.93
8/1/2553	64	0.01	0.00	0.76	0.03	14.09	3.10
9/1/2553	65	0.00	0.00	0.67	0.18	8.22	2.35
10/1/2553	66	0.00	0.00	0.47	0.13	6.24	3.87

ตารางที่ ข.3 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตในน้ำของถังหินพั้มมิส จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถึงละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/11/2552	0	0.00	0.00	0.00	0.00	115.43	0.69
12/11/2552	7	0.00	0.00	0.00	0.00	115.56	0.32
13/11/2552	8	0.01	0.00	0.01	0.00	115.71	0.73
14/11/2552	9	0.01	0.01	0.02	0.00	116.20	0.66
15/11/2552	10	0.02	0.00	0.02	0.00	115.66	0.32
16/11/2552	11	0.01	0.00	0.02	0.00	116.04	1.06
17/11/2552	12	0.00	0.00	0.02	0.00	114.82	0.58
18/11/2552	13	0.00	0.00	0.03	0.01	115.14	0.45
19/11/2552	14	0.00	0.00	0.24	0.10	113.42	0.88
20/11/2552	15	0.00	0.00	0.23	0.11	100.60	0.28
21/11/2552	16	0.00	0.00	0.13	0.04	89.51	1.50
22/11/2552	17	0.00	0.00	0.11	0.02	74.44	0.32
23/11/2552	18	0.00	0.00	0.08	0.01	67.15	1.12
24/11/2552	19	0.00	0.00	0.05	0.00	54.16	0.76
25/11/2552	20	0.00	0.00	0.05	0.01	31.36	0.66
26/11/2552	21	0.00	0.00	0.06	0.01	14.57	0.14
27/11/2552	22	0.00	0.00	0.07	0.02	6.14	0.03
28/11/2552	23	0.00	0.00	0.00	0.00	94.68	0.53
29/11/2552	24	0.00	0.00	0.15	0.11	54.37	0.20
30/11/2552	25	0.00	0.00	0.09	0.01	29.64	0.22
1/12/2552	26	0.00	0.00	0.02	0.03	16.89	0.09
2/12/2552	27	0.00	0.00	0.02	0.03	10.82	0.08
3/12/2552	28	0.00	0.00	0.01	0.02	8.73	0.16
4/12/2552	29	0.00	0.00	0.00	0.00	97.54	2.42
5/12/2552	30	0.01	0.00	2.45	0.42	82.67	5.56
6/12/2552	31	0.00	0.00	2.84	0.41	75.90	9.23
7/12/2552	32	0.00	0.00	1.69	0.25	48.92	3.51
8/12/2552	33	0.00	0.00	0.34	0.06	22.96	6.11
9/12/2552	34	0.00	0.00	0.41	0.15	9.25	4.29
10/12/2552	35	0.00	0.00	0.47	0.05	6.00	3.93
11/12/2552	36	0.00	0.00	0.00	0.00	99.29	1.74
12/12/2552	37	0.01	0.00	2.34	0.33	81.27	13.57
13/12/2552	38	0.01	0.00	3.00	0.64	57.50	20.30
14/12/2552	39	0.00	0.00	1.53	0.92	41.64	5.34

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
15/12/2552	40	0.00	0.00	0.86	0.76	21.66	12.88
16/12/2552	41	0.00	0.00	0.78	0.12	7.84	3.14
17/12/2552	42	0.00	0.00	0.50	0.01	6.00	2.02
18/12/2552	43	0.00	0.00	0.00	0.00	103.54	1.95
19/12/2552	44	0.00	0.00	2.92	0.55	91.51	17.74
20/12/2552	45	0.00	0.00	1.52	0.17	51.95	18.63
21/12/2552	46	0.00	0.00	0.49	0.06	29.80	2.10
22/12/2552	47	0.00	0.00	0.46	0.04	13.99	6.69
23/12/2552	48	0.00	0.00	0.30	0.04	7.28	2.98
24/12/2552	49	0.00	0.00	0.20	0.14	6.37	0.77
25/12/2552	50	0.00	0.00	0.00	0.00	99.02	8.74
26/12/2552	51	0.00	0.00	2.44	0.55	87.49	27.11
27/12/2552	52	0.00	0.00	2.98	0.22	50.09	19.34
28/12/2552	53	0.00	0.00	1.34	0.14	29.85	5.54
29/12/2552	54	0.00	0.00	0.65	0.14	11.39	6.76
30/12/2552	55	0.00	0.00	0.36	0.11	6.75	2.70
31/12/2552	56	0.00	0.00	0.17	0.09	5.74	2.23
1/1/2553	57	0.00	0.00	0.00	0.00	96.04	10.65
2/1/2553	58	0.00	0.00	1.33	0.46	78.76	14.19
3/1/2553	59	0.00	0.00	0.96	0.33	65.30	14.11
4/1/2553	60	0.00	0.00	0.58	0.14	47.00	26.59
5/1/2553	61	0.00	0.00	0.20	0.07	30.04	6.55
6/1/2553	62	0.00	0.00	0.35	0.27	16.84	5.24
7/1/2553	63	0.00	0.00	0.23	0.23	8.13	2.62
8/1/2553	64	0.00	0.00	0.09	0.09	5.96	3.50

ตารางที่ ข.4 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตในน้ำของถังทรายเทียม จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถึงละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/11/2552	0	0.00	0.00	0.00	0.00	103.90	1.24
12/11/2552	7	0.00	0.00	0.00	0.00	104.16	1.51
13/11/2552	8	0.00	0.00	0.00	0.00	102.73	0.31
14/11/2552	9	0.00	0.00	0.00	0.00	103.05	0.30
15/11/2552	10	0.00	0.00	0.01	0.00	102.99	0.47
16/11/2552	11	0.00	0.00	0.01	0.00	103.06	0.49
17/11/2552	12	0.00	0.00	0.02	0.00	103.50	0.12
18/11/2552	13	0.00	0.00	0.02	0.01	103.83	0.95
19/11/2552	14	0.01	0.00	0.03	0.00	103.90	0.95
20/11/2552	15	0.00	0.00	0.09	0.01	103.81	0.60
21/11/2552	16	0.00	0.00	0.30	0.29	103.26	0.22
22/11/2552	17	0.00	0.00	0.17	0.03	103.83	1.25
23/11/2552	18	0.00	0.00	0.18	0.02	103.46	0.39
24/11/2552	19	0.00	0.00	0.20	0.02	103.38	0.64
25/11/2552	20	0.00	0.00	0.25	0.03	103.21	1.20
26/11/2552	21	0.00	0.00	0.24	0.01	104.12	0.55
27/11/2552	22	0.00	0.00	0.26	0.04	103.24	0.59
28/11/2552	23	0.00	0.00	0.29	0.03	103.27	0.53
29/11/2552	24	0.00	0.00	0.32	0.04	103.60	0.89
30/11/2552	25	0.00	0.00	0.37	0.06	102.57	0.35
1/12/2552	26	0.00	0.00	0.37	0.05	102.61	0.96
2/12/2552	27	0.00	0.00	0.41	0.06	103.29	0.58
3/12/2552	28	0.00	0.00	0.39	0.05	103.12	0.92
4/12/2552	29	0.00	0.00	0.00	0.00	104.88	5.60
5/12/2552	30	0.01	0.00	1.51	0.27	99.12	1.18
6/12/2552	31	0.00	0.00	2.65	0.46	97.86	0.66
7/12/2552	32	0.00	0.00	1.30	0.39	99.19	1.31
8/12/2552	33	0.00	0.00	1.11	0.21	100.26	2.06
9/12/2552	34	0.00	0.00	3.74	0.84	101.58	1.20
10/12/2552	35	0.00	0.00	3.93	0.28	98.59	2.37
11/12/2552	36	0.00	0.00	4.29	1.30	97.99	1.22
12/12/2552	37	0.00	0.00	4.49	1.31	97.40	2.19
13/12/2552	38	0.00	0.00	9.27	0.08	93.70	1.09

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรด (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
14/12/2552	39	0.00	0.00	4.54	1.31	97.93	1.53
15/12/2552	40	0.00	0.00	5.90	1.63	95.76	2.00
16/12/2552	41	0.00	0.00	6.35	1.79	98.71	1.57
17/12/2552	42	0.00	0.00	3.01	0.93	101.53	1.53
18/12/2552	43	0.00	0.00	5.98	1.27	95.85	1.60
19/12/2552	44	0.00	0.00	6.55	0.38	97.66	1.48
20/12/2552	45	0.00	0.00	8.87	0.64	93.40	2.72
21/12/2552	46	0.00	0.00	6.97	0.36	91.86	4.29
22/12/2552	47	0.00	0.00	7.45	0.17	96.77	2.26
23/12/2552	48	0.00	0.00	8.38	0.90	95.36	1.09
24/12/2552	49	0.00	0.00	5.07	0.68	96.78	2.26
25/12/2552	50	0.00	0.00	8.04	1.93	90.06	1.94
26/12/2552	51	0.00	0.00	10.45	1.54	84.58	5.19
27/12/2552	52	0.00	0.00	8.06	0.71	86.00	4.28
28/12/2552	53	0.00	0.00	11.75	1.27	82.70	2.44
29/12/2552	54	0.00	0.00	7.87	0.69	84.75	1.50
30/12/2552	55	0.00	0.00	8.49	0.42	84.15	1.34
31/12/2552	56	0.00	0.00	10.47	2.41	82.02	2.38
1/1/2553	57	0.00	0.00	5.72	1.20	81.57	11.84
2/1/2553	58	0.00	0.00	10.99	2.87	82.83	0.84
3/1/2553	59	0.00	0.00	9.04	0.59	82.65	5.02
4/1/2553	60	0.00	0.00	8.06	0.21	80.77	7.92
5/1/2553	61	0.00	0.00	7.51	0.19	79.40	12.03
6/1/2553	62	0.00	0.00	8.14	0.25	77.82	10.67
7/1/2553	63	0.00	0.00	13.71	0.22	76.68	1.70
8/1/2553	64	0.00	0.00	16.27	2.05	71.13	10.24
9/1/2553	65	0.00	0.00	10.60	0.72	67.05	14.49
10/1/2553	66	0.00	0.00	6.39	0.51	59.60	15.79
11/1/2553	67	0.00	0.00	7.57	0.50	60.59	10.90

ตารางที่ ข.5 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในถังดิน (ชุดควบคุม) ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม ระหว่างการทดลองวันที่ 29-34

วัน/เดือน/ปีเวลา	วันที่	ดิน (ชุดควบคุม) (มก/ลิตร)		ทราย (มก/ลิตร)		หินพัมมิส (มก/ลิตร)		ทรายเทียม (มก/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/12/2552 8:00	29.0	6.40	0.45	6.97	0.49	6.46	0.31	6.75	0.19
4/12/2552 11:00	29.1	5.98	0.13	6.19	0.20	6.84	0.13	6.39	0.23
4/12/2552 17:00	29.4	5.60	0.51	6.14	0.13	6.26	0.12	6.28	0.22
4/12/2552 23:00	29.6	3.49	0.42	4.66	0.13	4.67	0.09	5.22	0.22
5/12/2552 6:00	29.9	2.46	0.23	4.50	0.15	3.83	0.20	4.95	0.11
5/12/2552 8:00	30.0	0.78	0.64	1.01	0.69	1.11	0.11	4.37	0.18
5/12/2552 8:30	30.0	2.88	0.35	2.62	0.09	2.62	0.10	4.22	0.07
6/12/2552 8:00	31.0	3.64	0.16	3.55	0.22	3.33	0.03	4.14	0.20
7/12/2552 8:00	32.0	3.85	0.10	3.55	0.47	3.65	0.15	4.10	0.05
8/12/2552 8:00	33.0	3.43	0.22	3.94	0.06	3.83	0.10	4.24	0.11
9/12/2552 8:00	34.0	3.71	0.11	4.02	0.14	3.97	0.14	4.12	0.13

ตารางที่ ข.6 อุณหภูมิในถังดิน (ชุดควบคุม) ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม ระหว่างการทดลอง วันที่ 29-67

วัน/เดือน/ปี	วันที่	ดิน (ชุดควบคุม) (°ซ)		ทราย (°ซ)		หินพัมมิส (°ซ)		ทรายเทียม (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/12/2552	29	27.0	0.2	26.8	0.7	27.3	0.5	27.5	0.1
5/12/2552	30	27.4	0.2	27.4	0.3	27.6	0.2	27.7	0.1
6/12/2552	31	27.5	0.6	28.2	0.3	27.9	0.2	28.0	0.2
7/12/2552	32	28.1	0.1	27.8	0.3	27.8	0.6	28.0	0.0
8/12/2552	33	27.5	0.1	27.7	0.2	27.9	0.1	28.0	0.0
9/12/2552	34	28.3	0.1	28.2	0.0	28.0	0.0	28.0	0.1
10/12/2552	35	28.0	0.5	27.8	0.3	27.8	0.3	27.8	0.3
11/12/2552	36	27.2	0.6	27.6	0.2	27.5	0.1	27.6	0.2
12/12/2552	37	26.2	0.4	26.7	0.1	26.7	0.2	26.9	0.2
13/12/2552	38	27.9	0.4	27.8	0.3	27.7	0.6	27.8	0.3
14/12/2552	39	27.2	0.1	27.5	0.1	27.6	0.2	27.7	0.1
15/12/2552	40	29.5	0.0	28.0	0.0	28.3	0.3	28.8	0.3
16/12/2552	41	27.3	0.2	27.2	0.5	26.8	0.3	27.0	0.0
17/12/2552	42	29.0	0.3	29.0	0.0	28.7	0.6	29.0	0.0
18/12/2552	43	28.8	0.1	28.1	0.6	28.3	0.5	28.7	0.1

วัน/เดือน/ปี	วันที่	ดิน (ชุดควบคุม) (⁰ ซ)		ทราย (⁰ ซ)		หินพัมมิส (⁰ ซ)		ทรายเทียม (⁰ ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
19/12/2552	44	29.1	0.1	29.3	0.6	29.0	0.0	29.3	0.6
20/12/2552	45	27.7	0.1	28.0	0.0	27.3	0.6	28.0	0.0
21/12/2552	46	27.1	0.1	26.5	0.0	27.0	0.0	27.0	0.0
22/12/2552	47	26.5	0.0	27.7	0.1	27.7	0.1	27.7	0.1
23/12/2552	48	28.2	0.2	27.7	0.3	27.5	0.0	28.0	0.0
24/12/2552	49	27.1	0.1	27.0	0.0	27.0	0.0	27.0	0.0
25/12/2552	50	28.5	0.0	27.9	0.3	28.5	0.2	28.7	0.2
26/12/2552	51	27.5	0.1	28.2	0.3	28.0	0.0	28.0	0.0
27/12/2552	52	29.5	0.0	29.0	0.0	29.3	0.3	29.5	0.0
28/12/2552	53	29.1	0.1	28.5	0.0	29.0	0.0	28.8	0.3
29/12/2552	54	28.3	0.2	28.5	0.0	27.7	0.6	28.0	0.0
30/12/2552	55	27.5	0.0	28.0	0.3	28.2	0.1	28.4	0.2
31/12/2552	56	27.0	0.1	27.6	0.2	27.8	0.0	27.8	0.2
1/1/2553	57	29.2	0.1	28.7	0.6	29.0	0.0	29.2	0.3
2/1/2553	58	29.7	0.4	30.2	0.1	29.6	0.1	29.8	0.0
3/1/2553	59	29.2	0.2	29.9	0.1	30.2	0.1	30.0	0.2
4/1/2553	60	28.4	0.1	28.7	0.1	29.0	0.2	28.9	0.1
5/1/2553	61	27.4	0.3	27.9	0.1	27.7	0.1	27.9	0.1
6/1/2553	62	27.7	0.4	27.8	0.3	28.2	0.3	28.0	0.0
7/1/2553	63	29.0	0.6	28.9	0.1	29.3	0.3	29.5	0.1
8/1/2553	64	29.1	0.1	29.7	0.1	29.3	0.1	29.1	0.1
9/1/2553	65	28.4	0.2	28.5	0.1	-	-	28.7	0.1
10/1/2553	66	27.8	0.2	28.2	0.3	-	-	28.5	0.1
11/1/2553	67	27.5	-	-	-	-	-	28.7	0.1

ตารางที่ ข.7 ฟิโชนในถ้ำดิน (ชุดควบคุม) ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม

วัน/เดือน/ปี	วันที่	ดิน (ชุดควบคุม)		ทราย		หินพัมมิส		ทรายเทียม	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/11/2552	0	7.63	0.10	7.17	0.05	7.54	0.06	6.60	0.21
12/11/2552	7	7.67	0.15	7.12	0.04	7.62	0.13	6.49	0.13
13/11/2552	8	7.82	0.02	7.18	0.04	7.75	0.03	6.58	0.14
14/11/2552	9	7.83	0.01	7.16	0.02	7.75	0.02	6.61	0.09
15/11/2552	10	7.97	0.05	7.16	0.01	7.70	0.16	6.61	0.12
16/11/2552	11	8.04	0.04	7.19	0.04	7.68	0.04	6.72	0.04
17/11/2552	12	8.09	0.08	7.19	0.05	7.57	0.10	6.67	0.08
18/11/2552	13	8.21	0.05	7.15	0.01	7.75	0.12	6.74	0.17
19/11/2552	14	8.31	0.10	7.18	0.03	7.61	0.15	6.67	0.12
20/11/2552	15	8.42	0.05	7.83	0.13	7.48	0.18	6.70	0.08
21/11/2552	16	8.42	0.02	8.06	0.06	7.65	0.07	6.71	0.06
22/11/2552	17	8.56	0.07	8.19	0.06	7.83	0.19	6.73	0.06
23/11/2552	18	7.87	0.01	7.22	0.03	8.03	0.11	6.69	0.06
24/11/2552	19	8.14	0.10	7.88	0.29	8.13	0.11	6.83	0.02
25/11/2552	20	8.24	0.10	8.03	0.07	8.18	0.05	6.80	0.02
26/11/2552	21	8.30	0.05	8.22	0.02	8.24	0.12	6.78	0.06
27/11/2552	22	8.41	0.02	8.23	0.03	8.43	0.19	6.79	0.07
28/11/2552	23	8.52	0.03	8.31	0.12	7.75	0.08	6.80	0.04
29/11/2552	24	7.88	0.02	8.43	0.13	8.03	0.08	6.83	0.02
30/11/2552	25	8.09	0.05	8.42	0.08	8.22	0.04	6.85	0.06
1/12/2552	26	8.21	0.04	8.51	0.07	8.26	0.14	6.90	0.06
2/12/2552	27	8.33	0.06	8.58	0.14	8.56	0.08	6.91	0.06
3/12/2552	28	8.50	0.04	8.66	0.14	8.68	0.16	6.86	0.06
4/12/2552	29	7.78	0.04	7.25	0.03	7.83	0.11	6.94	0.02
5/12/2552	30	8.01	0.03	7.62	0.32	8.10	0.08	6.86	0.05
6/12/2552	31	8.14	0.02	7.85	0.14	8.21	0.04	6.83	0.09
7/12/2552	32	8.21	0.04	8.11	0.25	8.25	0.09	6.79	0.06
8/12/2552	33	8.31	0.08	8.27	0.05	8.34	0.06	6.79	0.04
9/12/2552	34	8.48	0.06	8.05	0.34	8.37	0.06	6.84	0.02
10/12/2552	35	7.99	0.04	8.42	0.15	8.42	0.05	6.85	0.06
11/12/2552	36	8.16	0.06	8.24	0.23	7.81	0.18	6.84	0.06
12/12/2552	37	8.29	0.06	8.28	0.20	7.96	0.20	6.84	0.08
13/12/2552	38	8.37	0.06	8.32	0.09	8.17	0.11	6.88	0.10
14/12/2552	39	8.46	0.03	8.48	0.12	8.32	0.04	6.89	0.08
15/12/2552	40	7.45	0.15	8.51	0.07	8.25	0.08	6.95	0.06
16/12/2552	41	7.94	0.01	8.42	0.08	8.44	0.08	6.91	0.09

วัน/เดือน/ปี	วันที่	ดิน (ชุดควบคุม)		ทราย		หินพัมมิส		ทรายเทียม	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
17/12/2552	42	8.05	0.06	7.77	0.14	8.56	0.14	7.06	0.08
18/12/2552	43	8.14	0.06	7.80	0.18	7.83	0.06	7.05	0.02
19/12/2552	44	8.23	0.04	7.93	0.16	8.08	0.07	6.93	0.08
20/12/2552	45	8.30	0.06	8.11	0.14	8.27	0.07	7.02	0.07
21/12/2552	46	8.37	0.07	8.15	0.13	8.32	0.06	7.10	0.03
22/12/2552	47	7.69	0.06	8.23	0.13	8.43	0.02	7.05	0.06
23/12/2552	48	7.97	0.06	8.25	0.07	8.58	0.06	7.14	0.06
24/12/2552	49	8.20	0.06	8.31	0.04	8.68	0.13	7.17	0.07
25/12/2552	50	8.31	0.06	8.35	0.10	7.64	0.26	7.08	0.07
26/12/2552	51	8.40	0.05	8.45	0.07	8.22	0.20	7.11	0.02
27/12/2552	52	8.57	0.05	8.47	0.09	8.43	0.04	7.20	0.03
28/12/2552	53	7.99	0.07	8.40	0.05	8.54	0.07	7.22	0.06
29/12/2552	54	8.23	0.09	7.68	0.16	8.62	0.11	7.23	0.07
30/12/2552	55	8.35	0.11	7.81	0.10	8.58	0.13	7.22	0.04
31/12/2552	56	8.43	0.12	7.94	0.11	8.65	0.21	7.19	0.06
1/1/2553	57	8.45	0.12	8.13	0.02	7.62	0.39	7.16	0.06
2/1/2553	58	8.60	0.06	8.19	0.06	8.16	0.13	7.19	0.07
3/1/2553	59	7.11	0.27	8.24	0.02	8.21	0.14	7.18	0.07
4/1/2553	60	6.56	0.45	8.31	0.03	8.22	0.04	7.20	0.03
5/1/2553	61	6.82	0.42	8.35	0.02	8.29	0.09	7.18	0.03
6/1/2553	62	7.94	0.11	8.43	0.05	8.35	0.06	7.21	0.06
7/1/2553	63	8.29	0.05	8.55	0.03	8.49	0.03	7.23	0.10
8/1/2553	64	8.37	0.04	8.53	0.04	8.57	0.03	7.21	0.15
9/1/2553	65	8.48	0.05	8.44	0.03	-	-	7.25	0.09
10/1/2553	66	8.59	0.04	8.44	0.03	-	-	7.23	0.12
11/1/2553	67	8.71	0.04	-	-	-	-	7.20	0.06

ตารางที่ ข.8 ค่าสภาพต่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร) ในถังดิน (ชุดควบคุม) ทราบ หิน
พัมมิส และทรายเทียม ระหว่างการทดลองวันที่ 29-67

วัน/เดือน/ปี	วันที่	ดิน (ชุดควบคุม)		ทราย		หินพัมมิส		ทรายเทียม	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/12/2552	29	200.00	4.41	107.22	0.96	108.89	3.47	94.44	3.85
5/12/2552	30	222.56	8.70	130.56	5.85	202.78	42.76	95.00	8.66
6/12/2552	31	239.44	12.73	152.22	6.74	255.56	18.36	80.56	6.74
7/12/2552	32	258.89	11.82	167.78	9.18	274.44	14.17	84.44	0.96
8/12/2552	33	295.56	3.47	195.56	8.39	299.44	13.37	78.89	0.96
9/12/2552	34	305.00	5.77	230.56	19.46	299.44	15.49	86.67	2.89
10/12/2552	35	176.39	17.35	250.00	4.17	305.56	17.35	126.39	2.41
11/12/2552	36	222.22	9.62	268.06	10.49	238.89	45.90	184.72	26.46
12/12/2552	37	256.94	14.63	279.17	12.50	276.39	27.74	144.44	2.41
13/12/2552	38	295.83	31.46	290.28	14.63	309.72	18.79	163.89	26.46
14/12/2552	39	333.33	39.75	312.50	15.02	343.06	21.38	170.83	7.22
15/12/2552	40	181.94	27.74	333.33	19.09	343.06	6.36	193.06	19.25
16/12/2552	41	215.28	17.35	337.50	18.16	351.39	13.39	220.83	21.65
17/12/2552	42	297.22	33.68	193.06	12.73	386.11	8.67	209.72	26.46
18/12/2552	43	314.71	18.96	193.38	21.11	178.21	21.11	198.43	17.51
19/12/2552	44	348.83	27.34	212.33	10.03	198.43	18.70	198.43	10.95
20/12/2552	45	399.39	33.13	237.61	9.54	224.97	14.36	217.39	4.38
21/12/2552	46	449.94	17.51	278.06	9.54	299.54	11.38	202.22	2.19
22/12/2552	47	149.14	20.88	310.92	7.58	309.65	19.08	219.92	0.00
23/12/2552	48	199.69	4.38	337.46	16.53	369.06	22.86	221.18	2.19
24/12/2552	49	227.50	30.33	356.42	22.75	419.61	15.32	224.97	21.89
25/12/2552	50	348.83	39.95	384.22	31.57	179.47	14.36	209.81	8.76
26/12/2552	51	399.39	22.86	390.54	11.38	233.82	15.32	199.69	10.95
27/12/2552	52	432.25	11.38	415.82	15.32	271.74	7.89	198.43	4.38
28/12/2552	53	228.76	30.41	420.88	3.79	290.69	19.08	208.54	13.13
29/12/2552	54	279.32	21.89	236.35	51.20	300.81	31.80	204.75	13.13
30/12/2552	55	307.13	26.54	297.01	21.56	329.88	49.29	224.97	24.08
31/12/2552	56	331.14	19.46	298.28	19.08	360.21	48.41	212.33	13.13
1/1/2553	57	356.42	30.33	315.97	24.38	194.64	5.79	200.96	0.00
2/1/2553	58	419.61	36.83	333.67	26.54	290.69	32.25	192.11	4.38
3/1/2553	59	166.83	13.67	348.83	34.75	336.19	17.10	183.26	35.03
4/1/2553	60	155.46	16.53	361.47	21.56	409.50	26.54	194.64	15.32
5/1/2553	61	140.29	19.70	382.96	36.17	427.19	10.95	206.01	15.32
6/1/2553	62	189.58	3.79	399.39	40.54	447.42	13.67	243.93	21.89

วัน/เดือน/ปี	วันที่	ดิน (ชุดควบคุม)		ทราย		หินพัมมิส		ทรายเทียม	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
7/1/2553	63	203.49	7.89	394.33	46.59	471.43	18.70	304.60	21.89
8/1/2553	64	261.63	24.86	398.13	17.38	477.75	15.17	285.64	8.76
9/1/2553	65	285.64	20.88	414.56	10.95	-	-	293.22	4.38
10/1/2553	66	326.08	23.68	415.82	23.17	-	-	264.15	10.95
11/1/2553	67	358.94	11.58	-	-	-	-	288.17	13.13

ตารางที่ ข.9 โออาร์พี (มิลลิโวลท์) ในชั้นวัสดุ ของถังดิน (ชุดควบคุม) ทราย หินพัมมิส และทรายเทียม ระหว่างการทดลองวันที่ 50-67

วัน/เดือน/ปี	วันที่	ดิน (ชุดควบคุม)		ทราย		หินพัมมิส		ทรายเทียม	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
25/12/2552	50	-219.80	12.55	-188.63	4.80	-232.93	14.88	-7.50	7.14
26/12/2552	51	-217.83	8.17	-196.20	4.35	-222.27	26.57	-5.10	4.40
27/12/2552	52	-231.27	10.67	-198.10	3.68	-239.23	16.72	-12.43	9.77
28/11/2552	53	-254.43	21.59	-199.93	7.13	-232.60	22.21	-13.90	5.06
29/12/2552	54	-268.83	19.18	-196.73	3.26	-233.73	15.28	-18.43	0.40
30/12/2552	55	-284.03	2.56	-198.37	4.45	-206.93	8.76	-12.67	2.15
31/12/2552	56	-293.20	1.23	-203.70	6.58	-229.67	27.93	-32.30	22.42
1/1/2553	57	-302.73	10.20	-205.03	4.65	-235.20	7.71	-37.10	15.06
2/1/2553	58	-322.17	21.46	-203.40	6.26	-218.30	4.87	-58.53	27.63
3/1/2553	59	-375.00	17.99	-207.97	0.91	-231.40	24.20	-70.43	43.51
4/1/2553	60	-380.13	12.76	-210.93	14.35	-234.07	11.92	-81.94	24.67
5/1/2553	61	-420.27	12.46	-213.70	1.95	-234.07	15.70	-81.17	32.10
6/1/2553	62	-195.60	2.08	-241.97	5.74	-235.87	13.72	-97.00	28.97
7/1/2553	63	-236.30	24.46	-211.60	8.91	-227.23	9.23	-106.27	19.81
8/1/2553	64	-235.80	18.24	-219.50	15.50	-247.57	11.59	-104.83	19.95
9/1/2553	65	-252.43	15.10	-223.90	15.33	-	-	-104.27	12.03
10/1/2553	66	-282.73	14.67	-237.87	9.40	-	-	-111.43	8.40
11/1/2553	67	-313.50	15.11	-	-	-	-	-137.27	17.21

ตารางที่ ข.10 โออาร์พี (มิลลิโวลท์) ในชั้นน้ำ ของถังดิน (ชุดควบคุม) ทราย หินพัมมิส และทราย
เทียม ระหว่างการทดลองวันที่ 50-67

วัน/เดือน/ปี	วันที่	ดิน (ชุดควบคุม)		ทราย		หินพัมมิส		ทรายเทียม	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
25/12/2552	50	226.37	13.06	241.97	13.91	236.87	2.74	194.67	4.46
26/12/2552	51	224.23	12.56	247.23	10.85	248.13	6.55	201.07	4.47
27/12/2552	52	227.83	12.12	245.17	7.33	248.83	7.23	205.27	1.69
28/11/2552	53	221.30	3.84	242.63	8.26	250.83	3.29	195.33	9.80
29/12/2552	54	228.20	7.70	244.40	8.33	256.83	2.80	196.73	7.34
30/12/2552	55	229.90	17.35	243.33	9.58	259.37	3.48	191.40	8.90
31/12/2552	56	222.90	10.21	241.53	6.15	256.20	5.20	198.17	3.97
1/1/2553	57	235.20	9.17	244.03	5.75	257.37	18.22	214.70	17.42
2/1/2553	58	227.90	18.77	244.27	7.55	251.60	28.16	207.87	11.78
3/1/2553	59	228.87	15.31	243.23	3.02	250.40	17.59	202.37	2.80
4/1/2553	60	204.47	7.25	200.80	13.72	214.47	25.66	201.03	12.73
5/1/2553	61	208.30	3.70	208.70	5.22	215.60	17.16	215.93	12.11
6/1/2553	62	200.47	5.42	196.80	13.59	222.20	9.46	206.00	9.60
7/1/2553	63	197.83	4.68	211.30	4.17	224.63	15.67	215.33	25.49
8/1/2553	64	201.53	14.55	208.33	23.71	207.50	3.47	199.87	0.64
9/1/2553	65	204.40	8.38	213.27	7.53	-	-	209.70	6.06
10/1/2553	66	204.10	8.12	213.10	17.16	-	-	199.30	5.02
11/1/2553	67	193.97	10.22	-	-	-	-	201.23	25.04

ตารางที่ ข.11 ความชุ่มชื้นของน้ำหลังการบำบัดไนเตรต (เอ็นทียู) ในถังดิน (ชุดควบคุม) ทราย และ หินพัมมิส

ครั้งที่	วันที่	ดิน (ชุดควบคุม)		วันที่	ทราย		วันที่	หินพัมมิส	
		ค่าเฉลี่ย	SD		ค่าเฉลี่ย	SD		ค่าเฉลี่ย	SD
1	34	8.72	0.30	41	0.43	0.09	35	1.15	0.54
2	39	7.61	0.99	53	1.24	0.40	42	0.90	0.29
3	46	8.20	0.72	66	1.38	0.16	49	1.42	0.12
4	52	7.09	0.57				56	1.46	0.10
5	58	6.86	1.22				64	1.16	0.09
6	59	13.67	1.59						
7	60	15.78	1.51						
8	61	11.56	1.70						
9	67	6.23	0.72						
Average $\pm$ SD		7.45 $\pm$ 0.91			1.02 $\pm$ 0.51			1.22 $\pm$ 0.23	

หมายเหตุ: ไม่มีความชุ่มชื้นของถังทรายเทียม เนื่องจากทรายเทียมไม่สามารถบำบัดไนเตรตได้

ข้อมูลคุณภาพน้ำที่ตรวจวัดในการทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของวัสดุเพื่อทดแทนดินธรรมชาติในถังดีไนทริฟิเคชัน

การทดลองที่ 2.1 การศึกษาชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอนที่มีผลต่ออัตราดีไนทริฟิเคชัน

ตารางที่ ข.12 ลักษณะสมบัติทางเคมีของกากน้ำตาล

	ซีโอดี (มก./ลิตร)	ทีเคเอ็น (มก./ลิตร)	พีเอช
1	997276.60	11222.40	6.71
2	993243.24	11200.00	6.75
3	990127.66	11946.67	6.65
เฉลี่ย	993,549.17	11,456.36	6.70
SD	3584.27	424.77	0.05

ตารางที่ ข.13 ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนของกากน้ำตาล

เครื่องมือวิเคราะห์ CHNS/O Analyzer (Perkin Elmer PE2400 Series II)

วิธีวิเคราะห์ Gaseous product freed by pyrolysis in high-purity oxygen and were chromatographically separated by frontal analysis with quantitatively detected by thermal conductivity detector.

	คาร์บอน (เปอร์เซ็นต์)	ไฮโดรเจน (เปอร์เซ็นต์)	ไนโตรเจน (เปอร์เซ็นต์)
1	31.30	7.10	0.86
2	31.27	7.14	0.97
3	31.22	6.86	0.79
เฉลี่ย	31.26	7.03	0.87
SD	0.04	0.15	0.09

ตารางที่ ข.14 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตในน้ำของชุดเติมเมทานอล
จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถึงละ 3 ชั่วโมง)

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
15/1/2553 16:50	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	104.47	6.74
23/1/2553 16:50	8.0	0.02	0.01	1.08	0.26	11.65	4.55
25/1/2553 16:50	10.0	0.01	0.00	0.83	0.15	7.89	1.83
27/1/2553 10:00	11.7	0.00	0.00	0.04	0.01	6.03	1.63
27/1/2553 16:50	12.0	0.00	0.00	0.00	0.00	102.87	3.49
29/1/2553 16:50	14.0	0.01	0.00	3.99	0.62	49.58	6.91
31/1/2553 16:50	16.0	0.00	0.00	2.55	0.59	27.61	3.63
2/2/2553 16:50	18.0	0.00	0.00	0.28	0.03	9.29	0.32
4/2/2553 12:40	19.8	0.00	0.00	0.02	0.01	5.77	1.55
4/2/2553 16:50	20.0	0.00	0.00	0.00	0.00	98.86	6.23
6/2/2553 16:50	22.0	0.00	0.00	3.88	0.84	47.60	6.20
8/2/2553 16:50	24.0	0.00	0.00	2.33	0.68	32.86	4.82
10/2/2553 16:50	26.0	0.00	0.00	1.68	0.60	22.67	3.70
12/2/2553 16:50	28.0	0.00	0.00	0.22	0.06	8.48	2.62
14/2/2553 11:30	29.8	0.00	0.00	0.02	0.01	5.94	0.46
15/2/2553 16:54	31.0	0.00	0.00	0.00	0.00	95.43	4.63
16/2/2553 16:54	32.0	0.01	0.00	3.23	0.69	77.42	8.26
17/2/2553 16:54	33.0	0.01	0.00	1.93	0.21	52.75	10.92
18/2/2553 16:54	34.0	0.01	0.00	1.05	0.55	35.87	6.70
19/2/2553 16:50	35.0	0.01	0.00	0.69	0.44	18.68	6.09
20/2/2553 16:50	36.0	0.01	0.00	0.55	0.13	7.27	0.53
21/2/2553 16:50	37.0	0.01	0.00	0.10	0.04	6.53	0.45
22/2/2553 8:00	37.6	0.00	0.00	0.00	0.00	102.57	8.16
23/2/2553 8:10	38.6	0.01	0.00	2.31	0.07	83.78	15.49
24/2/2553 8:00	39.6	0.00	0.00	1.49	0.69	58.46	14.29
25/2/2553 8:20	40.6	0.00	0.00	1.41	0.37	45.09	10.06
26/2/2553 8:00	41.6	0.00	0.00	1.09	0.07	21.95	4.29
27/2/2553 8:00	42.6	0.00	0.00	0.62	0.24	7.92	1.81
28/2/2553 8:30	43.7	0.00	0.00	0.11	0.04	6.85	1.56
1/3/2553 16:00	45.0	0.00	0.00	0.00	0.00	100.09	5.40
2/3/2553 16:20	46.0	0.00	0.00	3.36	1.06	82.25	18.92
3/3/2553 16:00	47.0	0.00	0.00	1.82	0.40	60.74	20.37
4/3/2553 16:30	48.0	0.01	0.00	1.43	0.20	36.82	7.31
5/3/2553 16:10	49.0	0.00	0.00	0.47	0.15	14.43	6.93

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
เวลา (น.)		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
6/3/2553 16:20	50.0	0.00	0.00	0.21	0.02	5.37	0.56
7/3/2553 8:30	50.7	0.00	0.00	0.00	0.00	101.88	3.74
8/3/2553 8:20	51.6	0.00	0.00	3.15	0.60	77.02	18.28
9/3/2553 8:25	52.6	0.00	0.00	2.49	0.05	67.36	6.43
10/3/2553 8:30	53.7	0.00	0.00	1.73	0.25	33.37	3.41
11/3/2553 8:45	54.7	0.00	0.00	0.94	0.24	17.00	4.27
12/3/2553 8:10	55.6	0.00	0.00	0.11	0.05	7.73	2.68
13/3/2553 8:20	56.6	0.00	0.00	0.08	0.04	6.25	0.42

ตารางที่ ข.15 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตในน้ำของชุดเติมกากน้ำตาล
จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ชั่วโมง)

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
เวลา (น.)		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
15/1/2553 16:50	0.0	0.00	0.00	0.06	0.01	96.80	3.15
23/1/2553 16:50	8.0	0.01	0.01	2.42	0.41	18.25	3.35
25/1/2553 16:50	10.0	0.02	0.01	0.92	0.14	9.81	1.06
27/1/2553 10:00	11.7	0.01	0.00	0.13	0.03	7.89	1.48
27/1/2553 16:50	12.0	0.00	0.00	0.05	0.02	99.93	5.67
29/1/2553 16:50	14.0	0.04	0.01	3.96	0.61	43.92	6.35
31/1/2553 16:50	16.0	0.02	0.00	2.69	0.57	22.63	2.55
2/2/2553 16:50	18.0	0.01	0.01	0.17	0.06	8.98	0.65
4/2/2553 12:40	19.8	0.01	0.00	0.07	0.02	5.55	0.40
4/2/2553 16:50	20.0	6.85	0.31	0.05	0.01	105.51	10.94
6/2/2553 16:50	22.0	5.80	1.32	6.38	1.23	53.02	10.47
8/2/2553 16:50	24.0	5.16	0.58	3.60	0.90	40.95	4.99
10/2/2553 16:50	26.0	4.74	0.67	3.09	0.78	35.02	6.12
12/2/2553 16:50	28.0	4.64	0.88	2.89	0.85	29.47	3.67
14/2/2553 11:30	29.8	4.49	0.46	2.60	1.09	28.90	2.11
15/2/2553 16:54	31.0	6.69	0.24	0.03	0.01	102.56	5.56
16/2/2553 16:54	32.0	5.79	0.45	4.89	0.77	81.74	17.93
17/2/2553 16:54	33.0	5.75	0.54	4.07	1.82	65.23	18.37
18/2/2553 16:54	34.0	6.03	0.61	2.64	1.25	43.35	0.76
19/2/2553 16:50	35.0	5.47	0.38	3.13	0.75	35.19	4.01
20/2/2553 16:50	36.0	5.25	0.35	2.30	0.36	23.55	5.97
21/2/2553 16:50	37.0	4.66	0.45	1.81	0.38	21.56	2.08

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
เวลา (น.)		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
22/2/2553 8:00	37.6	6.90	0.83	0.06	0.01	103.63	2.06
23/2/2553 8:10	38.6	7.05	0.67	4.30	0.69	88.74	7.12
24/2/2553 8:00	39.6	5.29	0.19	1.80	0.31	62.87	17.28
25/2/2553 8:20	40.6	5.56	0.46	1.48	0.32	42.97	9.32
26/2/2553 8:00	41.6	4.96	0.82	1.43	0.15	29.47	8.00
27/2/2553 8:00	42.6	5.49	0.39	1.06	0.07	26.71	5.34
28/2/2553 8:30	43.7	5.58	0.19	1.09	0.28	25.81	7.76
1/3/2553 16:00	45.0	6.96	0.57	0.06	0.01	99.06	4.82
2/3/2553 16:20	46.0	6.29	0.47	4.31	0.74	78.69	14.15
3/3/2553 16:00	47.0	5.19	0.17	3.37	0.72	59.30	15.92
4/3/2553 16:30	48.0	5.05	0.51	0.86	0.27	39.77	7.22
5/3/2553 16:10	49.0	4.63	0.63	1.23	0.53	34.71	9.10
6/3/2553 16:20	50.0	4.81	0.44	1.82	0.29	32.11	3.73
7/3/2553 8:30	50.7	6.95	0.42	0.06	0.01	102.44	14.62
8/3/2553 8:20	51.6	5.60	0.42	4.35	1.09	81.22	11.94
9/3/2553 8:25	52.6	5.47	0.47	2.13	0.21	62.16	6.88
10/3/2553 8:30	53.7	5.40	0.29	1.94	0.64	40.52	17.09
11/3/2553 8:45	54.7	6.47	0.10	1.42	0.69	32.91	5.13
12/3/2553 8:10	55.6	6.01	0.51	1.15	0.28	29.82	4.09
13/3/2553 8:20	56.6	5.78	1.01	1.74	0.21	27.12	4.26

ตารางที่ ข.16 พีเอชในถังปฏิกรณ์ของชุดเติมเมทานอลและกากน้ำตาล ระหว่างการทดลองวันที่ 20-57

วัน/เดือน/ปี	วันที่	เมทานอล (ชุดควบคุม)		กากน้ำตาล	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/2/2553 16:54	20.0	7.91	0.05	7.13	0.07
6/2/2553 16:54	22.0	8.16	0.03	7.42	0.24
8/2/2553 16:54	24.0	8.21	0.06	7.62	0.29
10/2/2553 16:54	26.0	8.36	0.11	7.94	0.17
14/2/2553 16:54	30.0	8.61	0.06	8.11	0.12
15/2/2553 16:54	31.0	7.84	0.01	7.12	0.08
16/2/2553 16:54	32.0	8.31	0.05	7.46	0.11
17/2/2553 16:54	33.0	8.39	0.07	7.87	0.12
18/2/2553 16:54	34.0	8.46	0.07	7.88	0.18
19/2/2553 16:50	35.0	8.49	0.09	8.06	0.05
20/2/2553 16:50	36.0	8.55	0.06	8.12	0.02
21/2/2553 16:50	37.0	8.71	0.02	8.24	0.05
22/2/2553 8:00	37.6	7.91	0.08	7.09	0.07
23/2/2553 8:10	38.6	8.14	0.06	7.90	0.07
24/2/2553 8:00	39.6	8.35	0.02	8.17	0.08
25/2/2553 8:20	40.6	8.49	0.05	8.07	0.05
26/2/2553 8:00	41.6	8.66	0.05	8.28	0.04
27/2/2553 8:00	42.6	8.78	0.12	8.54	0.14
28/2/2553 8:30	43.7	8.82	0.13	8.50	0.03
1/3/2553 16:00	45.0	8.01	0.03	6.99	0.14
2/3/2553 16:20	46.0	8.22	0.05	7.36	0.16
3/3/2553 16:00	47.0	8.34	0.06	7.33	0.05
4/3/2553 16:30	48.0	8.49	0.03	7.56	0.11
5/3/2553 16:10	49.0	8.59	0.06	8.30	0.15
6/3/2553 16:20	50.0	8.75	0.07	8.38	0.12
7/3/2553 8:30	50.7	7.95	0.13	6.95	0.09
8/3/2553 8:20	51.6	8.34	0.07	7.54	0.11
9/3/2553 8:25	52.6	8.46	0.08	7.52	0.17
10/3/2553 8:30	53.7	8.60	0.09	7.70	0.12
11/3/2553 8:45	54.7	8.69	0.06	7.87	0.08
12/3/2553 8:10	55.6	8.77	0.05	8.11	0.14
13/3/2553 8:20	56.6	8.88	0.09	8.26	0.20

ตารางที่ ข.17 อุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ของชุดเติมเมทานอลและกากน้ำตาล ระหว่างการทดลอง
วันที่ 31-57

วัน/เดือน/ปี	วันที่	เมทานอล (ชุดควบคุม) (°ซ)		กากน้ำตาล (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
15/2/2553 16:54	31.0	29.7	0.4	29.9	0.2
16/2/2553 16:54	32.0	29.6	0.2	29.8	0.2
17/2/2553 16:54	33.0	29.7	0.2	29.9	0.1
18/2/2553 16:54	34.0	30.7	0.1	30.4	0.2
19/2/2553 16:50	35.0	30.1	0.1	30.1	0.2
20/2/2553 16:50	36.0	29.9	0.3	30.0	0.2
21/2/2553 16:50	37.0	29.8	0.2	29.7	0.2
22/2/2553 8:00	37.6	28.5	0.1	28.5	0.2
23/2/2553 8:10	38.6	27.1	0.1	27.3	0.3
24/2/2553 8:00	39.6	27.6	0.2	27.6	0.1
25/2/2553 8:20	40.6	27.3	0.2	27.4	0.2
26/2/2553 8:00	41.6	28.2	0.2	27.8	0.2
27/2/2553 8:00	42.6	28.1	0.2	27.6	0.2
28/2/2553 8:30	43.7	27.6	0.2	27.4	0.1
1/3/2553 16:00	45.0	29.3	0.7	30.0	0.2
2/3/2553 16:20	46.0	29.0	0.4	29.6	0.4
3/3/2553 16:00	47.0	29.6	0.1	30.2	0.2
4/3/2553 16:30	48.0	32.4	0.3	32.5	0.1
5/3/2553 16:10	49.0	29.6	0.2	30.3	0.2
6/3/2553 16:20	50.0	29.5	0.1	29.8	0.1
7/3/2553 8:30	50.7	27.5	0.1	27.5	0.2
8/3/2553 8:20	51.6	26.1	0.2	26.2	0.2
9/3/2553 8:25	52.6	26.8	0.1	26.4	0.4
10/3/2553 8:30	53.7	27.0	0.3	27.1	0.2
11/3/2553 8:45	54.7	27.5	0.1	28.1	0.2
12/3/2553 8:10	55.6	28.1	0.2	28.3	0.1
13/3/2553 8:20	56.6	28.2	0.4	28.4	0.2

ตารางที่ ข.18 ค่าสภาพต่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอน/ลิตร) ในถังปฏิกรณ์ของชุดเติมเมทานอล และกากน้ำตาล ระหว่างการทดลองวันที่ 31-57

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	เมทานอล (ชุดควบคุม)		กากน้ำตาล	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
15/2/2553 16:54	31.0	163.82	4.94	129.87	2.47
16/2/2553 16:54	32.0	227.11	4.53	201.99	14.24
17/2/2553 16:54	33.0	256.41	15.72	245.42	7.42
18/2/2553 16:54	34.0	405.93	22.61	273.01	14.79
19/2/2553 16:50	35.0	413.09	24.46	281.70	13.92
20/2/2553 16:50	36.0	429.31	24.05	311.15	8.62
21/2/2553 16:50	37.0	436.53	20.12	340.04	6.44
22/2/2553 8:00	37.6	170.31	21.44	116.45	9.55
23/2/2553 8:10	38.6	278.02	17.65	183.89	43.60
24/2/2553 8:00	39.6	311.31	14.16	218.31	21.30
25/2/2553 8:20	40.6	329.91	5.56	234.46	14.78
26/2/2553 8:00	41.6	368.58	19.86	273.62	21.99
27/2/2553 8:00	42.6	397.45	18.59	313.26	9.78
28/2/2553 8:30	43.7	417.74	6.56	329.04	11.71
1/3/2553 16:00	45.0	214.12	21.48	146.40	8.74
2/3/2553 16:20	46.0	278.86	10.49	208.40	18.79
3/3/2553 16:00	47.0	306.35	19.97	229.89	17.57
4/3/2553 16:30	48.0	355.24	18.97	287.43	41.68
5/3/2553 16:10	49.0	384.45	28.01	303.08	35.21
6/3/2553 16:20	50.0	435.86	31.38	363.49	52.63
7/3/2553 8:30	50.7	168.31	5.02	132.68	3.42
8/3/2553 8:20	51.6	256.37	40.66	171.27	22.20
9/3/2553 8:25	52.6	323.58	67.49	202.17	29.55
10/3/2553 8:30	53.7	348.33	46.33	234.58	21.52
11/3/2553 8:45	54.7	385.74	37.65	268.45	26.31
12/3/2553 8:10	55.6	425.36	17.44	310.33	29.67
13/3/2553 8:20	56.6	457.88	17.63	393.28	4.98

ตารางที่ ข.19 โออาร์พี (มิลลิโวลท์) ในชั้นหินพัมมิสและชั้นน้ำของชุดเดิมเมทานอลและ
กากน้ำตาล

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ชั้นหินพัมมิส				ชั้นน้ำ			
		เมทานอล		กากน้ำตาล		เมทานอล		กากน้ำตาล	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
23/1/2553 16:50	8.0	-231.50	18.09	-235.36	21.26	188.81	5.77	198.97	5.41
25/1/2553 16:50	10.0	-270.37	16.76	-268.95	11.26	185.67	10.37	193.50	7.65
27/1/2553 16:50	12.0	-150.12	14.17	-163.91	9.64	195.36	6.00	197.67	3.37
29/1/2553 16:50	14.0	-203.68	16.49	-200.02	16.81	201.43	4.29	201.83	1.15
31/1/2553 16:50	16.0	-252.42	9.97	-249.39	18.72	195.13	17.32	199.63	4.39
2/2/2553 16:50	18.0	-284.38	8.26	-289.92	7.29	198.96	4.49	195.16	2.26
4/2/2553 16:50	20.0	-161.49	18.78	-214.77	25.14	190.84	9.07	194.33	10.49
6/2/2553 16:50	22.0	-187.20	23.36	-278.92	14.10	195.38	1.11	195.47	9.65
8/2/2553 16:50	24.0	-243.00	34.10	-299.96	17.14	193.35	10.58	195.33	9.85
10/2/2553 16:50	26.0	-250.74	10.90	-302.92	12.03	203.92	11.72	188.83	5.75
12/2/2553 16:50	28.0	-278.49	15.17	-324.99	6.63	193.69	18.08	202.04	4.93
15/2/2553 16:54	31.0	-191.63	10.20	-217.13	6.90	185.47	0.80	196.53	4.13
16/2/2553 16:54	32.0	-204.17	6.59	-225.90	13.18	208.03	3.23	210.97	7.56
17/2/2553 16:54	33.0	-245.73	21.67	-230.10	20.60	201.60	7.10	199.77	1.50
18/2/2553 16:54	34.0	-205.67	10.45	-248.70	11.48	196.13	2.35	190.50	11.29
19/2/2553 16:50	35.0	-258.07	13.40	-275.80	15.95	197.70	4.19	197.03	3.75
20/2/2553 16:50	36.0	-247.60	13.17	-331.53	15.94	188.13	5.65	190.17	9.37
21/2/2553 16:50	37.0	-198.57	14.61	-336.00	30.95	179.67	4.06	185.37	2.57
22/2/2553 8:00	37.6	-205.03	9.14	-264.20	11.21	192.17	4.68	201.23	7.96
23/2/2553 8:10	38.6	-198.60	6.97	-271.73	18.01	188.10	2.49	187.83	4.65
24/2/2553 8:00	39.6	-213.13	5.89	-253.23	11.51	197.33	1.95	192.40	5.34
25/2/2553 8:20	40.6	-213.37	5.74	-248.87	9.69	185.37	4.42	188.43	4.65
26/2/2553 8:00	41.6	-219.93	5.37	-254.37	21.66	184.60	10.51	178.80	5.28
27/2/2553 8:00	42.6	-221.53	21.89	-270.87	15.04	186.00	2.82	182.00	6.79
28/2/2553 8:30	43.7	-231.97	3.88	-321.70	20.88	171.50	6.97	173.63	0.55
1/3/2553 16:00	45.0	-178.80	6.75	-216.93	21.20	174.13	1.08	170.97	2.14
2/3/2553 16:20	46.0	-191.30	6.37	-253.47	8.38	182.50	3.25	180.70	1.95
3/3/2553 16:00	47.0	-199.97	15.46	-264.23	12.18	175.70	2.81	183.77	0.61
4/3/2553 16:30	48.0	-221.53	6.86	-286.30	10.24	192.00	5.11	190.07	8.13
5/3/2553 16:10	49.0	-240.60	6.24	-321.33	5.74	202.27	5.16	207.20	7.16

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ชั้นหินพัมมิส				ชั้นน้ำ			
		เมทานอล		กากน้ำตาล		เมทานอล		กากน้ำตาล	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
6/3/2553 16:20	50.0	-246.07	24.12	-342.40	18.84	199.27	2.58	202.23	6.00
7/3/2553 8:30	50.7	-187.57	10.64	-237.93	15.41	198.83	14.56	191.80	5.22
8/3/2553 8:20	51.6	-205.07	7.65	-260.43	15.92	178.80	7.04	193.93	2.00
9/3/2553 8:25	52.6	-203.97	12.58	-287.27	11.54	187.43	6.24	183.47	1.36
10/3/2553 8:30	53.7	-211.73	6.05	-284.47	15.87	189.50	5.98	182.27	2.35
11/3/2553 8:45	54.7	-224.23	10.90	-301.63	15.81	185.63	0.67	191.43	2.48
12/3/2553 8:10	55.6	-243.53	21.71	-323.07	7.48	193.70	7.84	199.20	3.03

การทดลองที่ 2.2 การศึกษาอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนของสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสม

ตารางที่ ข.20 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตในน้ำของชุดเติมเมทานอลอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 3:1 จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
20/3/2553 13:30	64.0	0.00	0.00	0.00	0.00	97.74	6.51
21/3/2553 13:30	64.9	0.00	0.00	1.39	0.14	87.14	2.26
22/3/2553 13:30	65.9	0.00	0.00	0.75	0.16	73.26	13.74
23/3/2553 13:30	66.9	0.00	0.00	0.81	0.27	63.87	9.33
24/3/2553 13:30	67.9	0.00	0.00	0.56	0.23	51.48	7.33
25/3/2553 13:30	68.9	0.00	0.00	0.45	0.04	47.26	13.79
26/3/2553 13:30	69.9	0.00	0.00	0.39	0.15	46.81	7.41
27/3/2553 13:30	70.9	0.00	0.00	0.00	0.00	102.46	9.67
28/3/2553 13:30	71.9	0.00	0.00	0.78	0.07	88.70	12.37
29/3/2553 13:30	72.9	0.00	0.00	0.37	0.13	74.29	9.85
30/3/2553 13:30	73.9	0.00	0.00	0.18	0.02	62.50	15.50
31/3/2553 13:30	74.9	0.00	0.00	0.17	0.09	47.63	6.87
1/4/2553 13:30	75.9	0.00	0.00	0.19	0.14	43.29	6.08
2/4/2553 13:30	76.9	0.00	0.00	0.17	0.01	42.84	5.22
3/4/2553 13:30	77.9	0.00	0.00	0.00	0.00	100.89	6.16
4/4/2553 13:30	78.9	0.00	0.00	0.43	0.19	88.17	12.38
5/4/2553 13:30	79.9	0.00	0.00	0.42	0.06	80.40	18.97
6/4/2553 13:30	80.9	0.00	0.00	0.28	0.10	58.46	1.89

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
7/4/2553 13:30	81.9	0.00	0.00	0.51	0.13	48.22	9.23
8/4/2553 13:30	82.9	0.00	0.00	0.33	0.09	43.82	3.15
9/4/2553 13:30	83.9	0.00	0.00	0.10	0.01	42.50	5.25

ตารางที่ ข.21 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตในน้ำของชุดเติมเมทานอล อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 4:1 จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถึงละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
20/3/2553 13:30	64.0	0.00	0.00	0.00	0.00	105.20	3.00
21/3/2553 13:30	64.9	0.01	0.00	1.66	0.36	90.57	7.02
22/3/2553 13:30	65.9	0.00	0.00	1.46	0.31	77.04	27.86
23/3/2553 13:30	66.9	0.00	0.00	0.74	0.11	58.73	11.87
24/3/2553 13:30	67.9	0.01	0.00	0.35	0.20	45.66	11.79
25/3/2553 13:30	68.9	0.01	0.00	0.21	0.06	33.89	5.98
26/3/2553 13:30	69.9	0.00	0.00	0.10	0.03	29.78	4.92
27/3/2553 13:30	70.9	0.00	0.00	0.00	0.00	108.77	10.96
28/3/2553 13:30	71.9	0.01	0.00	1.89	0.25	90.74	10.87
29/3/2553 13:30	72.9	0.00	0.00	1.33	0.23	75.26	23.90
30/3/2553 13:30	73.9	0.00	0.00	0.92	0.13	54.74	21.06
31/3/2553 13:30	74.9	0.00	0.00	0.96	0.14	35.47	7.09
1/4/2553 13:30	75.9	0.00	0.00	0.62	0.04	22.03	7.43
2/4/2553 13:30	76.9	0.00	0.00	0.46	0.04	20.25	3.65
3/4/2553 13:30	77.9	0.00	0.00	0.00	0.00	104.15	12.45
4/4/2553 13:30	78.9	0.01	0.00	2.18	0.49	87.17	21.57
5/4/2553 13:30	79.9	0.00	0.00	1.51	0.28	69.12	26.38
6/4/2553 13:30	80.9	0.00	0.00	1.07	0.09	53.49	5.65
7/4/2553 13:30	81.9	0.00	0.00	0.85	0.09	35.81	7.36
8/4/2553 13:30	82.9	0.00	0.00	0.69	0.03	21.75	7.82
9/4/2553 13:30	83.9	0.00	0.00	0.44	0.08	21.03	6.29

ตารางที่ ข.22 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตในน้ำของชุดเติมเมทานอล อัตราส่วนซีโอดีต่อนิเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถึงละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
20/3/2553 13:30	64.0	0.00	0.00	0.00	0.00	100.56	0.62
21/3/2553 13:30	64.9	0.01	0.00	1.32	0.19	83.22	14.49
22/3/2553 13:30	65.9	0.00	0.00	0.72	0.37	53.58	20.00
23/3/2553 13:30	66.9	0.00	0.00	0.89	0.24	36.95	0.25
24/3/2553 13:30	67.9	0.00	0.00	0.60	0.25	20.40	8.67
25/3/2553 13:30	68.9	0.00	0.00	0.09	0.07	7.45	3.29
26/3/2553 13:30	69.9	0.00	0.00	0.01	0.00	6.91	2.86
27/3/2553 13:30	70.9	0.00	0.00	0.00	0.00	105.92	1.29
28/3/2553 13:30	71.9	0.01	0.00	1.03	0.09	89.14	20.36
29/3/2553 13:30	72.9	0.01	0.00	0.91	0.06	62.76	22.38
30/3/2553 13:30	73.9	0.01	0.00	0.53	0.15	37.44	20.86
31/3/2553 13:30	74.9	0.00	0.00	0.50	0.09	14.34	2.26
1/4/2553 13:30	75.9	0.01	0.00	0.15	0.04	6.70	1.10
2/4/2553 13:30	76.9	0.00	0.00	0.04	0.00	5.97	0.70
3/4/2553 13:30	77.9	0.00	0.00	0.00	0.00	109.65	4.12
4/4/2553 13:30	78.9	0.01	0.00	1.64	0.55	90.00	15.09
5/4/2553 13:30	79.9	0.01	0.00	0.86	0.35	67.81	15.59
6/4/2553 13:30	80.9	0.00	0.00	0.65	0.10	48.67	5.29
7/4/2553 13:30	81.9	0.00	0.00	0.46	0.07	25.66	5.35
8/4/2553 13:30	82.9	0.00	0.00	0.14	0.03	11.73	4.62
9/4/2553 13:30	83.9	0.00	0.00	0.09	0.02	8.71	1.93

ตารางที่ ข.23 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตในน้ำของชุดเติมเมทานอล อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 6:1 จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1/4/2553 15:00	75.9	0.00	0.00	0.00	0.00	106.40	1.23
1/4/2553 19:00	76.1	0.01	0.00	0.61	0.04	101.94	13.71
1/4/2553 23:00	76.3	0.01	0.00	0.86	0.12	66.12	2.64
2/4/2553 3:00	76.4	0.01	0.00	1.14	0.08	60.10	1.14
2/4/2553 7:00	76.6	0.01	0.00	1.38	0.18	58.08	2.89
2/4/2553 11:00	76.8	0.01	0.00	1.53	0.15	43.71	3.04
2/4/2553 15:00	76.9	0.00	0.00	1.50	0.46	37.80	5.73
2/4/2553 19:00	77.1	0.01	0.00	1.50	0.04	30.83	6.09
2/4/2553 23:00	77.3	0.01	0.00	0.75	0.02	22.57	4.77
3/4/2553 3:00	77.4	0.00	0.00	0.71	0.02	14.92	2.94
3/4/2553 7:00	77.6	0.00	0.00	0.29	0.09	10.05	0.95
3/4/2553 11:00	77.8	0.00	0.00	0.18	0.02	6.52	1.77
3/4/2553 15:00	77.9	0.00	0.00	0.14	0.02	2.51	0.41
4/4/2553 15:00	78.9	0.00	0.00	0.00	0.00	100.16	3.85
4/4/2553 19:00	79.1	0.01	0.00	0.63	0.02	92.84	1.09
4/4/2553 23:00	79.3	0.01	0.00	0.88	0.09	89.57	9.78
5/4/2553 3:00	79.4	0.01	0.00	1.17	0.02	63.46	1.63
5/4/2553 7:00	79.6	0.00	0.00	1.51	0.05	58.25	17.42
5/4/2553 11:00	79.8	0.01	0.00	1.54	0.05	50.69	20.86
5/4/2553 15:00	79.9	0.01	0.00	1.53	0.10	29.99	6.03
5/4/2553 19:00	80.1	0.01	0.00	1.92	0.20	17.81	8.33
5/4/2553 23:00	80.3	0.01	0.00	1.05	0.15	8.26	1.94
6/4/2553 7:00	80.6	0.00	0.00	0.58	0.23	3.28	1.14
6/4/2553 11:00	80.8	0.00	0.00	0.33	0.20	1.87	0.60
6/4/2553 15:00	80.9	0.00	0.00	0.15	0.07	1.12	0.72
6/4/2553 18:00	81.0	0.00	0.00	0.00	0.00	101.60	0.00
6/4/2553 22:00	81.2	0.01	0.00	0.50	0.11	99.17	23.93
7/4/2553 2:00	81.4	0.01	0.00	0.85	0.16	71.28	4.73
7/4/2553 6:00	81.5	0.01	0.00	1.33	0.15	56.86	9.23
7/4/2553 10:00	81.7	0.00	0.00	1.58	0.06	52.74	3.25
7/4/2553 14:00	81.9	0.00	0.00	1.53	0.08	46.39	4.45
7/4/2553 18:00	82.0	0.00	0.00	1.46	0.24	34.57	4.34
7/4/2553 22:00	82.2	0.01	0.00	1.60	0.42	21.62	6.20
8/4/2553 2:00	82.4	0.01	0.00	1.28	0.42	15.75	4.22

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
เวลา (น.)		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
8/4/2553 10:00	82.7	0.01	0.00	1.16	0.10	11.64	4.62
8/4/2553 14:00	82.9	0.00	0.00	0.79	0.23	5.44	0.70
8/4/2553 18:00	83.0	0.00	0.00	0.18	0.04	3.39	0.24
8/4/2553 20:00	83.1	0.00	0.00	0.00	0.00	107.95	3.50
9/4/2553 0:00	83.3	0.01	0.00	0.57	0.08	104.69	11.95
9/4/2553 8:00	83.6	0.00	0.00	1.38	0.19	71.67	9.09
9/4/2553 12:00	83.8	0.00	0.00	1.53	0.10	64.89	17.72
9/4/2553 16:00	84.0	0.00	0.00	1.64	0.17	60.44	9.01
9/4/2553 20:00	84.1	0.01	0.00	1.74	0.26	45.66	8.43
10/4/2553 0:00	84.3	0.00	0.00	1.16	0.52	20.58	7.92
10/4/2553 8:00	84.6	0.00	0.00	1.02	0.59	16.58	7.78
10/4/2553 12:00	84.8	0.00	0.00	0.55	0.35	10.90	3.32
10/4/2553 16:00	85.0	0.00	0.00	0.39	0.29	7.13	3.96
10/4/2553 20:00	85.1	0.00	0.00	0.18	0.03	3.53	0.85

ตารางที่ ข.24 พีเอช อุณหภูมิ และค่าสภาพต่างของชุดเดิมเมทานอล อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรต ไนโตรเจนเท่ากับ 3:1

วัน/เดือน/ปี	วันที่	พีเอช		อุณหภูมิ (°C)		ค่าสภาพต่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร)	
เวลา (น.)		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
20/3/2553 13:30	64.0	6.93	0.09	34.0	0.1	91.32	10.55
21/3/2553 13:30	64.9	7.11	0.06	30.1	0.1	132.42	2.64
22/3/2553 13:30	65.9	7.15	0.03	32.4	0.3	141.55	2.64
23/3/2553 13:30	66.9	7.24	0.03	33.4	0.5	144.90	2.76
24/3/2553 13:30	67.9	7.26	0.05	31.5	0.3	156.05	2.76
25/3/2553 13:30	68.9	7.34	0.08	33.4	0.2	159.24	2.76
26/3/2553 13:30	69.9	7.33	0.06	34.1	0.1	160.83	2.76
27/3/2553 13:30	70.9	6.84	0.12	33.8	0.2	105.35	4.72
28/3/2553 13:30	71.9	7.18	0.06	33.1	0.1	119.50	4.72
29/3/2553 13:30	72.9	7.26	0.11	33.2	0.2	127.36	2.72
30/3/2553 13:30	73.9	7.30	0.06	33.5	0.1	140.60	4.74
31/3/2553 13:30	74.9	7.30	0.03	32.9	0.2	144.71	3.83
1/4/2553 13:30	75.9	7.33	0.03	30.3	0.1	151.66	2.74
2/4/2553 13:30	76.9	7.36	0.03	32.7	0.3	165.24	1.64
3/4/2553 13:30	77.9	6.96	0.13	32.2	0.3	163.99	10.04
4/4/2553 13:30	78.9	7.07	0.06	33.0	0.2	175.24	4.82

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	พีเอช		อุณหภูมิ (°C)		ค่าสภาพต่าง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/4/2553 13:30	79.9	7.16	0.08	32.9	0.2	183.28	2.78
6/4/2553 13:30	80.9	7.21	0.06	33.1	0.2	177.71	2.80
7/4/2553 13:30	81.9	7.27	0.07	33.1	0.1	187.40	7.40
8/4/2553 13:30	82.9	7.30	0.02	32.8	0.2	192.25	2.80
9/4/2553 13:30	83.9	7.34	0.03	33.0	0.1	198.71	11.19

ตารางที่ ข.25 พีเอช อุณหภูมิ และค่าสภาพต่างของชุดเติมเมทานอล อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรดไนโตรเจนเท่ากับ 4:1

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	พีเอช		อุณหภูมิ (°C)		ค่าสภาพต่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
20/3/2553 13:30	64.0	6.88	0.12	33.8	0.2	155.25	2.64
21/3/2553 13:30	64.9	7.13	0.01	29.9	0.1	170.47	9.51
22/3/2553 13:30	65.9	7.23	0.03	33.1	0.1	179.60	9.51
23/3/2553 13:30	66.9	7.31	0.05	33.5	0.3	184.71	7.30
24/3/2553 13:30	67.9	7.40	0.05	31.4	0.3	194.27	7.30
25/3/2553 13:30	68.9	7.58	0.07	32.9	0.2	205.41	8.27
26/3/2553 13:30	69.9	7.54	0.08	34.0	0.0	221.34	7.30
27/3/2553 13:30	70.9	6.93	0.09	34.0	0.1	182.39	2.72
28/3/2553 13:30	71.9	7.20	0.06	33.1	0.1	191.82	2.72
29/3/2553 13:30	72.9	7.27	0.07	32.7	0.1	201.26	2.72
30/3/2553 13:30	73.9	7.36	0.10	33.3	0.3	218.01	2.74
31/3/2553 13:30	74.9	7.39	0.11	32.7	0.2	227.49	2.74
1/4/2553 13:30	75.9	7.51	0.10	30.2	0.3	230.65	4.74
2/4/2553 13:30	76.9	7.45	0.10	32.7	0.2	241.71	2.74
3/4/2553 13:30	77.9	6.81	0.12	32.6	0.5	186.50	7.37
4/4/2553 13:30	78.9	7.16	0.05	33.2	0.3	196.14	5.57
5/4/2553 13:30	79.9	7.25	0.04	32.8	0.2	205.79	7.37
6/4/2553 13:30	80.9	7.36	0.03	33.9	0.4	198.71	5.60
7/4/2553 13:30	81.9	7.41	0.04	33.0	0.1	210.02	12.82
8/4/2553 13:30	82.9	7.50	0.02	32.7	0.3	232.63	26.69
9/4/2553 13:30	83.9	7.51	0.04	32.7	0.6	242.33	22.90

ตารางที่ ข.26 พีเอช อุณหภูมิ และค่าสภาพต่างของชุดเติมเมทานอล อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรต ไนโตรเจนเท่ากับ 5:1

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	พีเอช		อุณหภูมิ (°C)		ค่าสภาพต่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
20/3/2553 13:30	64.0	7.10	0.06	34.0	0.0	283.11	2.64
21/3/2553 13:30	64.9	7.25	0.05	30.2	0.3	310.50	2.64
22/3/2553 13:30	65.9	7.31	0.05	33.4	0.3	321.16	2.64
23/3/2553 13:30	66.9	7.46	0.10	33.6	0.3	347.13	7.30
24/3/2553 13:30	67.9	7.73	0.12	31.6	0.4	356.69	7.30
25/3/2553 13:30	68.9	8.04	0.08	32.9	0.2	367.83	4.78
26/3/2553 13:30	69.9	8.23	0.08	34.2	0.2	391.72	4.78
27/3/2553 13:30	70.9	6.99	0.04	33.9	0.3	292.45	9.82
28/3/2553 13:30	71.9	7.17	0.03	33.2	0.3	320.75	7.21
29/3/2553 13:30	72.9	7.26	0.05	32.9	0.1	339.62	7.21
30/3/2553 13:30	73.9	7.34	0.07	33.1	0.1	372.83	4.74
31/3/2553 13:30	74.9	7.76	0.17	32.5	0.4	393.36	7.24
1/4/2553 13:30	75.9	7.94	0.12	30.7	0.3	412.32	2.74
2/4/2553 13:30	76.9	8.26	0.10	32.8	0.3	423.38	7.24
3/4/2553 13:30	77.9	7.10	0.06	32.9	0.1	297.43	7.37
4/4/2553 13:30	78.9	7.26	0.06	33.0	0.0	323.15	7.37
5/4/2553 13:30	79.9	7.63	0.06	33.3	0.3	329.58	4.82
6/4/2553 13:30	80.9	7.83	0.11	33.7	0.1	344.10	14.81
7/4/2553 13:30	81.9	8.07	0.04	32.7	0.2	369.95	9.69
8/4/2553 13:30	82.9	8.28	0.09	32.7	0.3	400.65	10.09
9/4/2553 13:30	83.9	8.42	0.06	32.7	0.5	441.03	10.09

ตารางที่ ข.27 พีเอช อุณหภูมิ และค่าสภาพต่างของชุดเติมเมทานอล อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรต ไนโตรเจนเท่ากับ 6:1

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	พีเอช		อุณหภูมิ (°C)		ค่าสภาพต่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1/4/2553 15:00	76.0	7.14	0.04	32.5	0.5	304.28	11.96
2/4/2553 15:00	76.9	7.68	0.18	32.7	0.6	332.81	7.26
3/4/2553 15:00	77.9	8.42	0.12	31.3	0.3	385.10	26.18
4/4/2553 15:00	78.9	7.09	0.05	33.8	0.2	357.72	14.63
5/4/2553 15:00	79.9	7.86	0.08	32.4	0.6	400.00	14.90
6/4/2553 15:00	80.9	8.55	0.08	33.3	0.3	422.76	18.47
6/4/2553 18:00	81.0	7.09	0.05	34.3	0.3	336.03	12.82
7/4/2553 18:00	82.0	7.80	0.16	34.0	0.1	399.03	17.47
8/4/2553 18:00	83.0	8.53	0.11	33.1	0.1	447.50	14.54
8/4/2553 20:00	83.1	7.07	0.05	34.0	0.1	387.32	15.22
9/4/2553 20:00	84.1	7.69	0.18	33.1	0.1	412.04	9.90
10/4/2553 20:00	85.1	8.41	0.14	33.4	0.4	450.08	9.90

ตารางที่ ข.28 ไออาร์พีในชั้นหินปูนผสมและชั้นน้ำของชุดเดิมเมทานอล อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนเท่ากับ 3:1 4:1 และ 5:1

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ไออาร์พีในชั้นหินปูนผสม (มิลลิโวลต์)						ไออาร์พีในชั้นน้ำ (มิลลิโวลต์)					
		COD:NO ₃ -N =3:1		COD:NO ₃ -N =4:1		COD:NO ₃ -N =5:1		COD:NO ₃ -N =3:1		COD:NO ₃ -N =4:1		COD:NO ₃ -N =5:1	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
20/3/2553 13:30	64.0	-187.44	4.74	-186.52	5.92	-157.24	4.82	128.83	15.41	156.60	16.23	166.80	27.65
21/3/2553 13:30	64.9	-228.21	12.75	-239.04	2.18	-210.32	4.63	133.93	16.28	151.10	12.76	165.17	16.27
22/3/2553 13:30	65.9	-215.33	11.07	-257.08	9.37	-230.57	6.53	119.30	6.99	163.47	8.10	157.63	33.78
23/3/2553 13:30	66.9	-215.90	8.40	-246.06	8.11	-240.77	12.70	142.30	20.59	155.90	15.22	154.67	7.78
24/3/2553 13:30	67.9	-258.45	8.91	-251.02	7.83	-242.31	18.43	162.57	5.92	176.73	13.32	158.03	7.25
25/3/2553 13:30	68.9	-260.48	12.90	-250.43	11.75	-244.70	7.31	155.63	15.66	155.90	4.97	164.07	10.13
26/3/2553 13:30	69.9	-256.05	6.23	-266.01	10.64	-235.59	9.11	157.30	9.08	152.13	15.73	167.17	17.00
27/3/2553 13:30	70.9	-165.41	8.88	-153.27	10.69	-173.45	10.25	149.67	15.08	162.67	13.08	154.73	5.06
28/3/2553 13:30	71.9	-176.76	11.25	-195.52	10.63	-206.82	8.52	154.17	15.41	148.23	1.01	162.40	15.30
29/3/2553 13:30	72.9	-214.98	11.16	-196.56	13.44	-226.31	11.47	160.60	21.33	161.90	6.32	161.93	22.56
30/3/2553 13:30	73.9	-241.76	4.69	-220.71	5.37	-237.12	11.06	160.93	20.68	174.33	11.24	172.03	22.66
31/3/2553 13:30	74.9	-210.48	7.94	-247.18	9.49	-227.38	10.62	126.40	21.00	152.03	8.92	173.33	16.34
1/4/2553 13:30	75.9	-213.90	14.38	-245.54	13.71	-236.45	13.74	154.00	19.41	161.37	14.54	163.60	13.92
2/4/2553 13:30	76.9	-261.54	4.94	-236.30	9.29	-244.98	10.56	161.97	5.59	155.57	5.44	164.10	6.16
3/4/2553 13:30	77.9	-180.07	17.35	-152.77	12.66	-171.47	7.62	154.50	4.76	157.27	10.09	160.27	12.41
4/4/2553 13:30	78.9	-190.04	9.81	-195.18	10.21	-225.15	6.01	156.17	8.08	141.33	24.56	156.53	17.22
5/4/2553 13:30	79.9	-230.66	13.05	-225.44	7.09	-237.40	2.24	151.60	5.88	137.63	9.92	158.37	10.50
6/4/2553 13:30	80.9	-226.56	8.90	-232.20	12.00	-226.82	9.62	147.50	27.20	147.57	18.66	164.93	8.02
7/4/2553 13:30	81.9	-248.60	5.21	-248.78	11.67	-233.46	11.57	153.77	18.16	152.43	10.69	156.07	6.49

ตารางที่ ข.29 ไออาร์พีในชั้นหินปูนและชั้นน้ำของชุดเดิมเมทานอล อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรต ไนโตรเจนเท่ากับ 6:1

วัน/เดือน/ปี	วันที่	ไออาร์พีในชั้นหินปูน (มิลลิโวลต์)		ไออาร์พีในชั้นน้ำ (มิลลิโวลต์)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1/4/2553 15:00	75.9	-176.68	5.32	165.77	7.00
2/4/2553 15:00	76.9	-233.83	7.47	165.27	14.48
3/4/2553 15:00	77.9	-268.13	9.00	155.60	6.41
4/4/2553 15:00	78.9	-190.02	6.53	169.90	13.36
5/4/2553 15:00	79.9	-238.75	2.10	157.70	9.63
6/4/2553 15:00	80.9	-267.31	4.93	167.27	16.27
6/4/2553 18:00	81.0	-187.86	6.42	166.17	16.01
7/4/2553 18:00	82.0	-228.11	19.96	169.80	13.19
8/4/2553 18:00	83.0	-246.00	12.61	161.20	7.20
8/4/2553 20:00	83.1	-197.81	6.37	180.97	20.94
9/4/2553 20:00	84.1	-230.29	12.48	170.60	12.30
10/4/2553 20:00	85.1	-243.07	11.44	167.63	7.71

การทดลองที่ 2.3 การศึกษาลักษณะการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนลงในถังดีไนทริฟิเคชัน

ตารางที่ ข.30 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตของชุดเติมเมทานอลในชั้นน้ำ
จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถึงละ 3 ชั่วโมง)

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
12/4/2553 13:00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	99.51	6.51
18/4/2553 13:00	6.0	0.04	0.01	0.03	0.00	5.95	1.29
19/4/2553 10:00	6.9	0.01	0.01	0.09	0.00	101.03	12.13
22/4/2553 10:00	9.9	0.01	0.00	0.57	0.08	17.66	1.10
25/4/2553 10:00	12.9	0.01	0.00	0.07	0.02	6.29	2.14
26/4/2553 14:00	14.0	0.00	0.00	0.21	0.04	102.24	13.29
30/4/2553 14:00	18.0	0.02	0.00	0.15	0.04	6.85	2.07
1/5/2553 10:00	18.9	0.17	0.02	0.20	0.02	103.51	15.28
8/5/2553 10:00	25.9	0.18	0.02	0.35	0.07	6.32	2.13
9/5/2553 12:00	27.0	0.21	0.04	0.23	0.02	103.70	15.62
15/5/2553 13:00	33.0	0.22	0.06	0.51	0.22	7.16	3.13
16/5/2553 12:00	34.0	0.20	0.03	0.25	0.02	105.30	25.50
22/5/2553 11:00	39.9	0.19	0.03	0.19	0.04	6.24	3.74
25/5/2553 15:00	43.1	0.00	0.00	0.07	0.02	110.12	3.68
26/5/2553 14:00	44.0	0.18	0.02	1.95	0.21	88.26	24.09
27/5/2553 13:00	45.0	0.16	0.02	1.96	0.45	43.85	5.99
28/5/2553 14:00	46.0	0.18	0.02	0.56	0.09	19.81	5.37
29/5/2553 15:00	47.1	0.18	0.02	0.06	0.01	8.08	2.37
30/5/2553 10:30	47.9	0.16	0.00	0.05	0.01	6.04	2.78
30/5/2553 16:00	48.1	0.00	0.00	0.08	0.03	114.05	1.63
31/5/2553 17:00	49.2	0.17	0.01	1.89	0.53	68.44	10.30
1/6/2553 16:00	50.1	0.15	0.03	1.42	0.30	33.91	3.78
2/6/2553 17:00	51.2	0.16	0.02	0.84	0.03	15.85	1.13
3/6/2553 19:30	52.3	0.12	0.03	0.13	0.01	10.71	3.10
5/6/2553 17:30	54.2	0.00	0.00	0.06	0.02	102.55	10.22
6/6/2553 17:30	55.2	0.16	0.01	0.81	0.05	75.53	16.19
7/6/2553 18:00	56.2	0.15	0.01	1.63	0.38	47.03	15.98
8/6/2553 18:30	57.2	0.13	0.01	1.20	0.25	27.65	18.01
9/6/2553 17:30	58.2	0.11	0.02	0.97	0.20	14.93	4.86
10/6/2553 17:30	59.2	0.09	0.03	0.08	0.02	6.52	2.45
13/6/2553 15:00	62.1	0.00	0.00	0.07	0.02	108.91	3.92
14/6/2553 15:00	63.1	0.18	0.05	1.17	0.25	81.98	21.04

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
15/6/2553 15:00	64.1	0.15	0.04	0.71	0.04	45.98	13.16
16/6/2553 15:00	65.1	0.11	0.04	0.35	0.16	10.56	2.41
17/6/2553 15:00	66.1	0.11	0.03	0.21	0.29	10.01	8.83
18/6/2553 15:00	67.1	0.08	0.02	0.07	0.01	7.81	7.68
21/6/2553 19:30	70.3	0.00	0.00	0.07	0.02	98.62	2.64
22/6/2553 19:30	70.5	0.15	0.04	0.97	0.27	89.32	5.97
23/6/2553 19:30	71.5	0.12	0.02	1.40	0.17	69.69	25.20
24/6/2553 19:30	72.5	0.17	0.02	1.02	0.20	28.34	8.74
25/6/2553 19:30	73.5	0.15	0.02	0.66	0.43	12.40	4.06
26/6/2553 19:30	74.5	0.12	0.03	0.04	0.06	6.50	1.89

ตารางที่ ข.31 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตของชุดเดิมเมทานอลในชั้น
หินพัมมิส จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถึงละ 3 ชั่วโมง)

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
12/4/2553 13:00	0.0	0.00	0.00	0.04	0.01	99.48	6.53
18/4/2553 13:00	6.0	0.03	0.02	0.03	0.00	5.95	1.29
19/4/2553 10:00	6.9	0.04	0.03	0.09	0.00	101.03	12.13
22/4/2553 10:00	9.9	0.02	0.00	0.57	0.08	17.66	1.10
25/4/2553 10:00	12.9	0.02	0.00	0.07	0.02	6.29	2.14
26/4/2553 14:00	14.0	0.03	0.01	0.21	0.04	102.24	13.29
30/4/2553 14:00	18.0	0.01	0.01	0.15	0.04	6.85	2.07
1/5/2553 10:00	18.9	0.01	0.00	0.20	0.02	103.51	15.28
8/5/2553 10:00	25.9	0.03	0.03	0.35	0.07	6.32	2.13
9/5/2553 12:00	27.0	0.02	0.00	0.23	0.02	103.70	15.62
15/5/2553 13:00	33.0	0.03	0.03	0.51	0.22	7.16	3.13
16/5/2553 12:00	34.0	0.03	0.02	0.25	0.02	105.30	25.50
22/5/2553 11:00	39.9	0.01	0.00	0.19	0.04	6.24	3.74
25/5/2553 15:00	43.1	0.00	0.00	0.04	0.02	105.23	7.10
26/5/2553 14:00	44.0	0.02	0.00	1.42	0.60	82.50	26.48
27/5/2553 13:00	45.0	0.14	0.02	1.04	0.18	50.47	11.18
28/5/2553 14:00	46.0	0.15	0.01	0.96	0.30	25.51	5.83
29/5/2553 15:00	47.1	0.14	0.02	0.16	0.01	13.75	1.89
30/5/2553 10:30	47.9	0.10	0.05	0.06	0.01	6.72	3.88

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรด (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
30/5/2553 16:00	48.1	0.00	0.00	0.03	0.01	101.25	11.61
31/5/2553 17:00	49.2	0.14	0.02	1.47	0.23	72.79	16.20
1/6/2553 16:00	50.1	0.13	0.02	1.73	0.26	39.69	11.64
2/6/2553 17:00	51.2	0.10	0.02	1.42	0.19	16.92	3.48
3/6/2553 19:30	52.3	0.07	0.04	0.13	0.05	6.54	1.57
5/6/2553 17:30	54.2	0.00	0.00	0.05	0.01	102.55	15.74
6/6/2553 17:30	55.2	0.15	0.03	0.46	0.25	75.76	5.88
7/6/2553 18:00	56.2	0.14	0.01	2.04	0.25	52.17	3.16
8/6/2553 18:30	57.2	0.12	0.01	1.36	0.17	23.43	0.29
9/6/2553 17:30	58.2	0.09	0.02	0.89	0.38	13.48	5.20
10/6/2553 17:30	59.2	0.03	0.02	0.12	0.01	7.38	0.50
13/6/2553 15:00	62.1	0.00	0.00	0.04	0.00	100.53	16.88
14/6/2553 15:00	63.1	0.18	0.04	1.93	0.46	73.45	23.60
15/6/2553 15:00	64.1	0.15	0.03	1.31	0.68	37.23	6.31
16/6/2553 15:00	65.1	0.15	0.04	0.87	0.13	14.05	5.52
17/6/2553 15:00	66.1	0.09	0.02	0.56	0.14	8.20	7.68
18/6/2553 15:00	67.1	0.05	0.04	0.21	0.03	7.92	4.36
21/6/2553 19:30	70.3	0.00	0.00	0.03	0.01	101.60	3.78
22/6/2553 19:30	70.5	0.23	0.03	0.78	0.05	74.46	8.68
23/6/2553 19:30	71.5	0.15	0.04	1.86	0.09	50.47	9.36
24/6/2553 19:30	72.5	0.17	0.03	1.54	0.03	30.59	13.20
25/6/2553 19:30	73.5	0.11	0.03	0.60	0.12	8.05	1.91
26/6/2553 19:30	74.5	0.07	0.04	0.10	0.04	7.53	1.37

ตารางที่ ข.32 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณซีโอดี เมื่อเติมเมทานอลในชั้นน้ำและชั้นหินพัมมิส ระหว่างการทดลองวันที่ 54-75

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ซีโอดีของชุดการเติม เมทานอลในชั้นน้ำ (มก/ลิตร)		ซีโอดีของชุดการเติม เมทานอลในชั้นหินพัมมิส (มก/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/6/2553 17:30	54.2	542.17	36.14	493.98	55.21
6/6/2553 17:30	55.2	216.87	7.65	181.20	10.95
7/6/2553 18:00	56.2	48.94	4.08	28.71	26.08
8/6/2553 18:30	57.2	19.76	8.82	13.65	0.82
9/6/2553 17:30	58.2	10.76	0.85	3.91	11.11
10/6/2553 17:30	59.2	ND.	-	ND.	-
13/6/2553 15:00	62.1	526.95	20.74	467.07	62.23
14/6/2553 15:00	63.1	251.50	13.17	209.82	17.25
15/6/2553 15:00	64.1	129.34	5.75	108.26	15.83
16/6/2553 15:00	65.1	57.49	8.74	27.78	42.88
17/6/2553 15:00	66.1	15.35	2.79	15.35	8.71
18/6/2553 15:00	67.1	ND.	-	ND.	-
21/6/2553 19:30	70.3	520.48	14.46	486.75	32.60
22/6/2553 19:30	70.5	172.68	2.93	135.61	28.43
23/6/2553 19:30	71.5	28.78	10.98	19.02	3.87
24/6/2553 19:30	72.5	15.12	3.05	10.73	2.24
25/6/2553 19:30	73.5	9.35	3.72	2.95	3.91
26/6/2553 19:30	74.5	ND.	-	ND.	-

หมายเหตุ: ND. ไม่สามารถวิเคราะห์ได้

การทดลองช่วงที่ 3 การประยุกต์ใช้ถังดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจำลองในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็ก โดยใช้ถังดีไนทริฟิเคชันที่บรรจุหินพัมมิส และเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในชั้นน้ำ อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1

ตารางที่ ข.33 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในถังบ่มเชื้อไนทริฟิเคชัน

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
22/6/2553 13:00	0.0	2.07	0.04	0.01	0.00	1.94	0.04
27/6/2553 13:00	5.0	0.18	0.01	0.03	0.00	2.50	0.00
28/6/2553 13:00	6.0	0.04	0.01	0.00	0.00	5.59	0.06
29/6/2553 13:00	7.0	0.07	0.01	0.02	0.00	6.58	0.06
30/6/2553 13:00	8.0	0.02	0.01	0.04	0.00	7.13	0.05
30/6/2553 13:40	8.0	2.44	0.07	0.09	0.00	7.28	0.03
1/7/2553 13:00	9.0	0.71	0.02	0.01	0.00	10.49	0.06
2/7/2553 13:00	10.0	0.01	0.01	0.00	0.00	11.80	0.04
2/7/2553 14:20	10.1	2.26	0.04	0.06	0.00	11.94	0.11
3/7/2553 14:00	11.0	0.01	0.01	0.01	0.00	13.76	0.04
4/7/2553 13:00	12.0	2.31	0.05	0.00	0.00	14.07	0.29
5/7/2553 13:00	13.0	0.09	0.01	0.00	0.00	15.96	0.11
6/7/2553 13:00	14.0	0.02	0.00	0.01	0.00	16.10	0.11
7/7/2553 13:00	15.0	2.26	0.02	0.02	0.00	16.21	0.47
8/7/2553 13:00	16.0	0.04	0.00	0.03	0.00	18.02	0.68
10/7/2553 13:00	18.0	1.92	0.08	0.04	0.00	18.50	0.39
11/7/2553 13:00	19.0	0.05	0.02	0.14	0.00	21.87	0.36
13/7/2553 14:00	21.0	1.81	0.16	0.04	0.00	22.22	0.19
14/7/2553 10:00	21.9	0.15	0.05	0.02	0.00	24.03	0.29
15/7/2553 10:00	22.9	2.27	0.05	0.01	0.00	24.48	0.33
16/7/2553 10:00	23.9	0.17	0.01	0.02	0.00	27.09	0.10
17/7/2553 9:30	24.9	2.58	0.11	0.02	0.00	27.36	0.42
18/7/2553 10:00	25.9	0.12	0.01	0.02	0.00	30.06	0.16
21/7/2553 10:00	28.9	2.23	0.07	0.02	0.00	30.24	0.12
22/7/2553 10:00	29.9	0.13	0.02	0.01	0.00	32.93	0.23
23/7/2553 10:00	30.9	2.06	0.13	0.01	0.00	33.36	0.16
24/7/2553 10:00	31.9	0.31	0.02	0.13	0.00	36.87	0.53
25/7/2553 10:00	32.9	2.27	0.12	0.03	0.00	37.57	0.31

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
26/7/2553 9:30	33.9	0.20	0.02	0.02	0.00	40.70	1.00
29/7/2553 11:00	36.9	2.02	0.07	0.03	0.00	41.50	0.89
30/7/2553 9:30	37.9	0.16	0.03	0.11	0.01	45.31	0.64
31/7/2553 9:00	38.8	1.80	0.06	0.03	0.01	46.01	0.74
1/8/2553 11:00	39.9	0.12	0.02	0.02	0.00	49.65	1.04
2/8/2553 10:00	40.9	1.90	0.09	0.02	0.01	50.98	1.13
3/8/2553 11:00	41.9	0.16	0.02	0.11	0.00	54.19	0.54
4/8/2553 9:00	42.8	1.89	0.12	0.04	0.00	55.15	0.15
5/8/2553 10:30	43.9	0.15	0.02	0.03	0.00	58.57	0.67
8/8/2553 11:00	46.9	0.16	0.02	0.09	0.00	60.66	1.18
9/8/2553 9:00	47.8	0.10	0.01	0.03	0.00	60.85	1.42
10/8/2553 10:00	48.9	1.95	0.08	0.02	0.00	61.17	0.47
11/8/2553 9:30	49.9	0.16	0.02	0.13	0.00	64.82	1.16

ตารางที่ ข.34 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในเขตทดสอบประสิทธิภาพไนทรีฟิเคชัน

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
12/8/2553 10:00	50.9	6.2109	1.2801	0.0051	0.0056	0.3363	0.0968
12/8/2553 14:00	51.0	5.2454	0.6481	0.0508	0.0121	1.1090	0.2812
12/8/2553 20:00	51.3	3.0190	0.3325	0.0841	0.0090	2.9722	0.1670
13/8/2553 0:00	51.5	1.7626	0.5293	0.0666	0.0067	4.2089	0.4857
13/8/2553 4:00	51.6	1.1574	0.2216	0.0503	0.0076	4.7125	0.6635
13/8/2553 9:10	51.8	0.8334	0.2449	0.0337	0.0051	4.9953	0.7503
13/8/2553 13:30	52.0	0.6543	0.0552	0.0254	0.0028	5.7971	0.6389
13/8/2553 17:30	52.2	0.5034	0.0599	0.0159	0.0014	6.1473	0.3596
15/8/2553 10:00	53.9	6.1031	0.0926	0.0057	0.0014	0.4383	0.0290
15/8/2553 14:00	54.0	4.6686	0.4849	0.0141	0.0044	1.0405	0.2170
15/8/2553 18:00	54.2	2.8443	0.6290	0.0034	0.0018	2.7726	0.4876
15/8/2553 22:00	54.4	1.6170	0.3084	0.0011	0.0017	3.1038	1.1449
16/8/2553 2:00	54.5	1.3869	0.2584	0.0037	0.0009	4.5928	0.3503
16/8/2553 6:00	54.7	1.0107	0.1354	0.0038	0.0007	5.1775	0.4500
16/8/2553 10:00	54.9	0.5612	0.1115	0.0021	0.0006	5.9993	0.7660
16/8/2553 14:00	55.0	0.3111	0.0975	0.0013	0.0004	6.2423	0.4450

ตารางที่ ข.35 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในถังดีไนทริฟิเคชันระยะบ่ม
เชื้อ นาน 91 วัน และระยะทำการทดลองบำบัดน้ำเสียจากระบบเพาะเลี้ยงปลานิล

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย		ไนไตรต์		ไนเตรต	
		(มกไนโตรเจน/ลิตร)		(มกไนโตรเจน/ลิตร)		(มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1/7/2553 15:00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	104.30	1.34
2/7/2553 13:00	0.9	0.02	0.00	0.33	0.02	103.90	1.43
4/7/2553 13:00	2.9	0.02	0.01	0.37	0.03	104.05	1.99
6/7/2553 13:00	4.9	0.02	0.00	0.34	0.03	101.94	0.39
8/7/2553 16:00	7.0	0.01	0.00	1.19	0.01	90.18	2.73
10/7/2553 15:00	9.0	0.01	0.00	0.94	0.09	68.91	2.99
12/7/2553 14:00	11.0	0.00	0.00	0.33	0.02	46.07	2.68
14/7/2553 14:00	13.0	0.02	0.00	0.10	0.00	27.41	5.84
16/7/2553 15:20	15.0	0.00	0.00	1.14	0.00	96.80	10.69
18/7/2553 15:20	17.0	0.01	0.00	0.31	0.00	77.87	6.79
20/7/2553 15:20	19.0	0.01	0.00	0.16	0.00	41.48	2.37
22/7/2553 15:20	21.0	0.01	0.00	0.14	0.01	20.58	2.15
24/7/2553 16:20	23.1	0.00	0.00	0.03	0.00	18.67	1.08
25/7/2553 10:30	23.8	0.00	0.00	0.03	0.00	18.31	1.96
25/7/2553 13:30	23.9	0.45	0.05	0.00	0.00	103.92	1.47
26/7/2553 10:00	24.8	0.01	0.00	0.20	0.00	82.37	2.29
28/7/2553 16:00	27.0	0.02	0.00	2.81	0.08	53.39	7.53
29/7/2553 11:30	27.9	0.01	0.00	0.96	0.04	35.70	9.41
30/7/2553 11:30	28.9	0.00	0.00	3.68	0.01	18.18	6.35
1/8/2553 14:00	31.0	0.00	0.00	0.07	0.02	12.68	0.76
3/8/2553 14:00	33.0	0.00	0.00	0.00	0.00	6.60	1.56
5/8/2553 11:45	34.9	0.00	0.00	0.00	0.00	4.76	0.22
6/8/2553 12:00	35.9	0.00	0.00	0.00	0.00	4.08	0.29
18/8/2553 15:40	48.0	0.18	0.02	0.01	0.00	106.08	0.59
19/8/2553 15:00	49.0	0.13	0.01	1.91	0.01	79.19	4.07
20/8/2553 18:00	50.1	0.10	0.01	3.04	0.13	47.14	7.90
21/8/2553 14:00	51.0	0.07	0.02	2.65	0.05	26.31	7.16
22/8/2553 17:00	52.1	0.03	0.02	1.34	0.04	13.67	1.27
23/8/2553 18:00	53.1	0.02	0.01	0.61	0.01	5.29	0.19
24/8/2553 18:00	54.1	0.01	0.01	0.63	0.01	2.00	0.15
26/8/2553 10:00	55.8	0.00	0.00	0.03	0.01	1.11	0.15
27/8/2553 10:00	56.8	0.00	0.00	0.01	0.00	0.65	0.17
29/8/2553 17:30	59.1	0.50	0.09	0.03	0.00	106.54	1.81

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
30/8/2553 17:30	60.1	0.19	0.06	5.19	0.04	75.07	7.27
31/8/2553 18:00	61.1	0.15	0.03	3.69	0.11	40.52	4.07
1/9/2553 15:40	62.0	0.12	0.01	2.22	0.05	14.28	1.54
2/9/2553 17:30	63.1	0.13	0.00	1.16	0.03	8.70	5.20
3/9/2553 18:00	64.1	0.12	0.01	0.66	0.01	4.97	1.23
12/9/2553 16:00	73.0	0.03	0.01	0.03	0.00	97.54	2.39
13/9/2553 16:00	74.0	0.04	0.01	4.44	0.06	68.28	3.23
14/9/2553 16:00	75.0	0.03	0.01	3.34	0.09	47.01	7.46
15/9/2553 16:00	76.0	0.13	0.02	2.13	0.04	16.58	5.63
16/9/2553 16:00	77.0	0.11	0.03	0.61	0.02	12.26	2.88
17/9/2553 16:00	78.0	0.07	0.02	0.87	0.02	8.00	3.16
18/9/2553 16:00	79.0	0.08	0.04	0.34	0.02	7.10	2.88
25/9/2553 16:00	86.0	0.06	0.02	0.01	0.00	107.26	19.88
27/9/2553 16:00	88.0	0.10	0.01	3.61	0.15	44.85	8.14
28/9/2553 16:00	89.0	0.05	0.02	2.10	0.01	20.36	3.18
30/9/2553 16:00	91.0	0.01	0.00	0.23	0.03	16.91	1.12

ตารางที่ ข.36 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในถังดีไนทริฟิเคชันระยะทำการทดลองบำบัดน้ำเสียจากระบบเพาะเลี้ยงปลานิล ในวันที่ 51-99 ของการทดลองเลี้ยงปลานิล

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/10/2553 16:00	51.3	0.09	0.00	0.01	0.00	57.64	0.88
6/10/2553 9:30	52.1	0.15	0.03	1.38	0.03	33.41	0.98
6/10/2553 15:40	52.3	0.02	0.01	1.51	0.15	26.41	1.20
7/10/2553 10:00	53.1	0.01	0.00	1.01	0.03	14.82	3.24
7/10/2553 15:40	53.3	0.01	0.00	0.43	0.03	9.18	2.00
8/10/2553 15:40	54.3	0.01	0.00	0.04	0.00	7.25	0.43
11/10/2553 17:30	57.4	0.23	0.04	0.08	0.00	38.24	1.08
12/10/2553 9:00	58.0	0.17	0.04	0.59	0.04	25.15	4.42
12/10/2553 16:50	58.4	0.22	0.03	0.77	0.04	15.77	5.26
13/10/2553 10:00	59.1	0.28	0.07	0.09	0.00	8.08	1.69
13/10/2553 16:40	59.4	0.28	0.03	0.05	0.00	7.97	1.25
14/10/2553 9:30	60.1	0.24	0.04	0.03	0.00	7.33	1.16
9/11/2553 19:00	86.5	0.12	0.01	0.04	0.00	50.97	0.44

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มกไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มกไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
10/11/2553 9:00	87.0	0.05	0.00	0.53	0.04	50.45	3.50
10/11/2553 19:00	87.5	0.05	0.03	1.01	0.05	39.21	3.37
11/11/2553 12:00	88.2	0.09	0.01	2.41	0.01	21.33	2.20
11/11/2553 19:00	88.5	0.07	0.01	2.08	0.07	15.80	3.34
12/11/2553 11:00	89.1	0.06	0.01	1.08	0.03	10.75	3.34
12/11/2553 19:00	89.5	0.08	0.01	0.31	0.01	7.57	1.06
13/11/2553 13:00	90.2	0.09	0.01	0.01	0.00	6.15	0.26
13/11/2553 19:00	90.5	0.12	0.02	0.02	0.00	39.09	1.43
14/11/2553 10:00	91.1	0.08	0.02	0.81	0.04	28.51	2.11
14/11/2553 19:00	91.5	0.15	0.04	1.33	0.16	21.97	1.26
15/11/2553 10:00	92.1	0.14	0.03	1.03	0.03	12.72	1.58
15/11/2553 19:00	92.5	0.09	0.02	0.44	0.03	9.31	0.57
16/11/2553 9:30	93.1	0.09	0.01	0.05	0.00	8.42	3.30
16/11/2553 19:00	93.5	0.10	0.01	0.02	0.00	7.33	6.66
17/11/2553 19:00	94.5	0.13	0.02	0.01	0.00	6.69	0.70
18/11/2553 20:00	95.5	0.27	0.02	0.03	0.00	42.90	0.59
19/11/2553 7:30	96.0	0.41	0.05	0.72	0.14	33.25	0.33
19/11/2553 18:30	96.4	0.26	0.02	0.60	0.03	25.60	0.80
20/11/2553 9:30	97.1	0.23	0.03	0.47	0.07	16.86	1.54
20/11/2553 18:00	97.4	0.29	0.02	0.38	0.01	11.49	1.60
21/11/2553 8:30	98.0	0.15	0.04	0.13	0.00	7.40	0.71
22/11/2553 8:00	99.0	0.21	0.04	0.01	0.00	5.69	0.36

ตารางที่ ข.37 พีเอช สภาพต่าง และค่าไออาร์พี ในถังดีไนทริฟิเคชันระยะทำการทดลองบำบัดน้ำเสียจากระบบเพาะเลี้ยงปลานิล ในวันที่ 51-99 ของการทดลองเลี้ยงปลานิล

วัน/เดือน/ปี	วันที่	สภาพต่าง (มก.)							
		พีเอช		แคลเซียม-คาร์บอเนต/ลิตร)		ไออาร์พี (มิลลิโวลท์)			
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/10/2553 16:00	51.3	7.39	0.03	70.00	0.00	-174.10	10.89	140.15	3.89
6/10/2553 15:40	52.3	7.99	0.08	220.00	14.14	-187.15	6.43	129.25	4.88
7/10/2553 15:40	53.3	8.41	0.02	410.00	14.14	-200.45	3.89	114.25	14.21
8/10/2553 10:00	54.1	8.44	0.05	425.00	7.07	-219.65	7.71	120.70	6.22
11/10/2553 17:30	57.4	7.32	0.06	105.00	7.07	-170.00	4.10	137.80	5.52
12/10/2553 16:50	58.4	8.07	0.06	230.00	14.14	-193.15	0.78	107.40	5.94
13/10/2553 16:40	59.4	8.27	0.03	365.00	21.21	-205.30	14.28	138.65	8.27

วัน/เดือน/ปี	วันที่	พีเอช		สภาพต่าง (มก. แ ค ล เ ซี ย ม คาร์บอนेट/ลิตร)		โออาร์พี (มิลลิโวลท์)			
						ชั้นหินฟอสซิล		ชั้นน้ำ	
เฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD		
14/10/2553 16:00	60.3	8.29	0.03	395.00	7.07	-211.05	11.67	155.00	4.81
9/11/2553 19:00	86.5	7.31	0.08	95.00	7.07	-119.90	8.06	109.75	6.29
10/11/2553 19:00	87.5	7.42	0.06	190.00	14.14	-175.40	17.96	116.20	1.41
11/11/2553 19:00	88.5	7.57	0.02	290.00	14.14	-195.65	19.16	119.45	7.42
12/11/2553 19:00	89.5	7.60	0.01	345.00	7.07	-191.95	9.55	107.15	1.34
13/11/2553 13:00	90.2	7.67	0.02	395.00	7.07	-221.45	5.73	100.50	1.27
13/11/2553 19:00	90.5	7.45	0.04	150.00	14.14	-169.80	6.36	108.65	8.41
14/11/2553 19:00	91.5	7.62	0.09	245.00	7.07	-167.95	6.86	108.85	3.61
15/11/2553 19:00	92.5	7.65	0.00	350.00	14.14	-196.75	2.05	145.45	3.75
16/11/2553 19:00	93.5	7.72	0.04	355.00	7.07	-188.70	6.93	141.20	4.38
17/11/2553 19:00	94.5	7.80	0.01	370.00	0.00	-214.20	6.93	144.80	6.22
18/11/2553 20:00	95.5	7.50	0.06	160.00	14.14	-170.25	5.59	105.80	13.29
19/11/2553 18:30	96.4	7.58	0.06	255.00	7.07	-181.15	10.39	128.40	1.56
20/11/2553 18:00	97.4	7.70	0.02	305.00	7.07	-189.35	7.85	134.20	6.93
21/11/2553 8:30	98.0	7.77	0.04	355.00	7.07	-224.80	6.22	118.85	2.05
22/11/2553 8:00	99.0	7.82	0.04	390.00	0.00	-223.90	12.73	118.60	15.13

ตารางที่ ข.38 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบเพาะเลี้ยงปลานิล

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มก. ไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ ลิตร)		ไนเตรต (มก. ไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
15/8/2553 8:00	0.0	-	-	-	-	-	-
17/8/2553 8:30	2.0	0.12	0.02	0.20	0.00	2.24	0.03
19/8/2553 9:30	4.1	0.15	0.01	0.07	0.00	3.47	0.01
21/8/2553 9:30	6.1	0.24	0.02	0.27	0.00	5.46	0.06
23/8/2553 9:30	8.1	0.26	0.04	0.10	0.00	7.81	0.08
25/8/2553 9:00	10.0	0.19	0.02	0.05	0.00	9.21	0.10
27/8/2553 11:30	12.1	0.07	0.02	0.14	0.00	10.03	0.03
29/8/2553 10:00	14.1	0.21	0.02	0.28	0.00	13.39	0.54
31/8/2553 9:30	16.1	0.15	0.02	0.16	0.00	15.94	0.16
2/9/2553 11:30	18.1	0.22	0.01	0.11	0.00	18.12	1.03
3/9/2553 10:00	19.1	0.25	0.02	0.11	0.00	20.16	1.35
5/9/2553 9:00	21.0	0.25	0.01	0.09	0.00	23.73	1.15
7/9/2553 9:00	23.0	0.27	0.01	0.12	0.00	25.42	0.60

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มก. ไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มก. ไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
9/9/2553 10:00	25.1	0.12	0.02	0.11	0.00	27.24	0.50
12/9/2553 9:30	28.1	0.24	0.02	0.18	0.00	29.79	1.46
14/9/2553 10:00	30.1	0.23	0.01	0.16	0.01	30.62	0.71
16/9/2553 9:00	32.0	0.50	0.02	0.28	0.01	31.02	0.71
19/9/2553 10:00	35.1	0.15	0.03	0.10	0.00	35.29	0.57
21/9/2553 9:00	37.0	0.15	0.03	0.11	0.00	39.66	0.42
23/9/2553 10:00	39.1	0.18	0.01	0.12	0.00	49.32	0.56
25/9/2553 10:00	41.1	0.11	0.00	0.06	0.00	50.94	1.09
26/9/2553 9:30	42.1	0.10	0.00	0.05	0.00	52.76	0.23
28/9/2553 9:30	44.1	0.07	0.02	0.03	0.00	51.95	0.09
30/9/2553 9:30	46.1	0.04	0.01	0.02	0.00	53.25	0.32
2/10/2553 10:00	48.1	0.07	0.01	0.04	0.00	54.69	0.41
5/10/2553 16:00	51.3	0.07	0.01	0.04	0.00	56.03	0.30
6/10/2553 16:00	52.3	0.09	0.01	0.04	0.00	31.13	0.56
7/10/2553 9:30	53.1	0.14	0.01	0.10	0.00	33.63	0.88
11/10/2553 17:30	57.4	0.21	0.04	0.02	0.00	37.96	0.64
11/10/2553 18:00	57.4	0.28	0.05	0.04	0.00	21.99	0.79
12/10/2553 9:30	58.1	0.22	0.03	0.04	0.00	23.45	0.34
14/10/2553 9:30	60.1	0.23	0.03	0.04	0.00	24.41	0.33
16/10/2553 9:30	62.1	0.24	0.02	0.04	0.00	26.82	0.85
18/10/2553 9:30	64.1	0.15	0.01	0.04	0.00	30.10	0.48
20/10/2553 9:00	66.0	0.11	0.01	0.02	0.00	33.00	0.56
21/10/2553 9:30	67.1	0.10	0.01	0.14	0.00	31.60	0.31
24/10/2553 10:00	70.1	0.16	0.02	0.05	0.00	33.77	0.41
26/10/2553 11:00	72.1	0.21	0.03	0.06	0.00	29.15	0.27
28/10/2553 9:00	74.0	0.23	0.03	0.07	0.00	35.81	0.53
30/10/2553 9:30	76.1	0.18	0.01	0.09	0.00	37.74	0.44
1/11/2553 9:30	78.1	0.16	0.02	0.02	0.00	39.06	0.30
2/11/2553 9:30	79.1	0.14	0.02	0.05	0.00	42.79	0.43
4/11/2553 9:30	81.1	0.16	0.01	0.05	0.00	45.62	1.19
6/11/2553 18:00	83.4	0.18	0.01	0.05	0.00	47.70	0.64
8/11/2553 9:30	85.1	0.21	0.02	0.08	0.00	48.27	0.08
9/11/2553 18:00	86.4	0.15	0.01	0.08	0.00	50.33	0.07
9/11/2553 19:00	86.5	0.13	0.01	0.06	0.00	38.83	0.14
10/11/2553 16:20	87.3	0.30	0.01	0.06	0.01	39.89	0.28
12/11/2553 10:00	89.1	0.22	0.02	0.19	0.00	40.78	0.18
13/11/2553 14:00	90.3	0.25	0.01	0.03	0.00	41.93	0.19

วัน/เดือน/ปี	วันที่	แอมโมเนีย (มก. ไนโตรเจน/ลิตร)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)		ไนเตรต (มก. ไนโตรเจน/ลิตร)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
13/11/2553 19:00	90.5	0.15	0.01	0.06	0.00	36.33	0.12
15/11/2553 19:00	92.5	0.24	0.04	0.20	0.00	38.40	0.16
17/11/2553 19:00	94.5	0.19	0.01	0.08	0.00	39.68	0.17
18/11/2553 19:00	95.5	0.24	0.01	0.08	0.00	41.18	0.17
18/11/2553 20:30	95.5	0.11	0.03	0.02	0.00	31.05	0.09
20/11/2553 20:30	97.5	0.15	0.02	0.09	0.00	33.44	0.29
22/11/2553 20:30	99.5	0.15	0.03	0.08	0.01	35.12	0.20

ตารางที่ ข.39 น้ำหนักและความยาวเฉลี่ยของปลาในในระบบเพาะเลี้ยง

จำนวน ตัว	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 40		วันที่ 67		วันที่ 101	
	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
1	0.32	2.2	0.70	4.0	1.60	3.4	5.70	7.0
2	0.32	2.4	0.40	3.5	1.50	3.2	3.60	6.3
3	0.34	2.6	0.80	4.0	1.10	3.5	3.30	5.9
4	0.35	2.7	0.70	3.6	0.70	3.5	3.90	6.5
5	0.44	2.7	0.70	3.7	1.30	4.0	10.40	11.1
6	0.43	2.9	0.70	3.8	1.80	4.0	3.20	6.3
7	0.57	2.3	1.20	4.3	1.50	4.2	3.10	7.2
8	0.59	3.0	0.60	3.6	1.40	4.3	3.60	6.3
9	0.62	3.0	0.80	4.0	0.80	3.7	3.20	7.2
10	0.3	2.5	1.20	4.3	1.30	2.6	10.80	8.5
11	0.51	3.2	0.70	3.5	1.30	4.0	3.20	6.4
12	0.25	2.1	0.90	4.0	0.80	3.5	3.30	5.6
13	0.27	2.4	0.80	3.5	4.90	6.2	3.70	6.0
14	0.41	2.7	0.40	3.2	1.40	3.0	5.50	7.2
15	0.54	2.7	0.80	3.9	0.70	3.5	3.60	6.1
16	0.53	2.9	1.20	4.3	2.00	4.5	3.90	5.0
17	0.47	3.0	0.40	3.2	0.90	3.8	8.60	7.4
18	0.36	2.5	0.50	3.3	1.30	4.3	3.20	5.2
19	0.51	3.1	0.70	4.0	1.80	4.5	4.10	7.0
20	0.6	3.0	0.40	3.5	1.60	4.4	5.00	7.1
21	0.7	3.0	0.80	4.0	1.80	4.7	3.60	5.6
22	0.49	3.5	0.30	2.8	2.30	5.0	4.50	7.1
23	0.71	3.0	0.50	3.4	1.40	4.6	4.90	6.8
24	0.47	3.0	0.60	3.5	0.80	3.5	3.70	5.7

จำนวน ตัว	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 40		วันที่ 67		วันที่ 101	
	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
25	0.61	3.4	0.60	3.5	1.40	4.0	8.30	8.5
26	0.35	3.5	0.70	3.5	1.70	4.6	8.60	9.0
27	0.62	2.7	0.90	4.0	1.80	4.6	8.00	7.8
28	0.34	2.1	0.80	4.0	1.80	4.6	15.00	9.4
29	0.6	3.0	0.30	3.0	1.10	3.8	6.50	7.9
30	0.86	3.2	0.50	3.5	2.20	5.5	4.20	6.2
31	0.65	2.8	0.60	3.5	1.50	4.2	7.20	8.4
32	0.67	3.0	0.80	4.0	1.80	4.5	9.30	11.4
33	0.49	2.5	0.70	4.0	1.70	4.5	6.90	7.0
34	0.41	2.6	0.70	3.8	1.80	3.7	12.40	8.5
35	0.47	2.7	0.70	4.0	1.90	4.0	7.50	8.5
36	0.41	3.0	0.40	3.1	2.20	5.1	5.90	7.0
37	0.3	2.3	0.80	4.0	1.80	4.7	6.30	7.8
38	0.56	3.0	0.70	4.0	1.90	3.7	4.90	6.0
39	0.47	2.8	0.60	3.5	2.10	4.7	5.70	7.5
40	0.4	2.6	0.90	4.2	1.70	3.4	5.00	6.0
41	0.57	2.5	0.60	3.5	1.80	4.1	4.60	5.9
42	0.23	2.5	0.70	3.8	1.70	4.6	3.30	5.3
43	0.48	2.8	0.80	4.2	1.90	4.6	7.60	7.6
44	0.41	2.9	0.30	3.0	2.10	4.5	6.70	7.8
45	0.56	3.4	0.50	3.2	1.90	3.5	4.50	6.5
46	0.54	3.0	0.30	3.0	1.80	4.8	5.40	6.8
47	0.31	2.4	0.50	3.5	2.10	4.8	4.20	5.8
48	0.34	2.6	0.60	3.8	2.30	5.1	3.30	5.4
49	0.59	3.4	1.10	4.5	1.70	3.5	4.80	6.5
50	0.4	2.4	0.80	4.0	1.70	3.4	4.90	6.8
51	0.55	2.8	0.90	4.2	1.80	4.4	9.60	8.4
52	0.6	3.5	0.80	3.5	1.60	3.1	5.50	7.0
53	0.32	2.5	0.70	3.6	1.50	3.4	6.00	7.1
54	0.31	2.8	0.60	3.4	2.10	4.6	4.10	5.1
55	0.44	2.6	0.80	4.0	2.10	4.6	5.70	6.6
56	0.54	3.0	0.70	3.9	2.60	5.1	5.30	6.7
57	0.43	2.7	0.80	4.1	1.90	3.5	5.30	6.9
58	0.53	2.9	0.80	4.1	1.30	3.9	4.20	5.0
59	0.36	3.4	0.50	3.4	1.80	3.5	4.80	5.7
60	0.41	3.0	0.90	4.0	1.80	3.6	4.40	5.6
61	0.32	2.5	0.80	3.8	2.10	5.3	4.70	6.4

จำนวน ตัว	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 40		วันที่ 67		วันที่ 101	
	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
62	0.36	2.4	0.60	3.3	1.60	4.2	4.80	5.8
63	0.41	3.0	0.50	3.3	3.00	5.5	4.20	5.8
64	0.37	2.6	0.60	3.3	2.00	5.0	8.80	9.2
65	0.52	3.2	0.50	3.4	1.90	4.5	3.70	4.7
66	0.43	3.1	0.80	4.0	1.40	3.1	6.00	7.5
67	0.48	3.4	1.00	4.3	1.70	3.5	6.70	7.9
68	0.41	3.0	0.50	3.6	1.50	3.5	5.90	6.9
69	0.56	3.5	0.20	2.7	1.60	3.4	17.20	11.8
70	0.51	3.1	0.70	3.7	1.60	4.0	15.20	9.6
71	0.33	2.7	0.80	4.5	1.40	4.5	8.40	8.0
72	0.47	3.2	0.90	4.0	1.90	3.8	9.30	8.0
73	0.21	1.7	0.60	3.7	1.40	2.8	8.20	9.2
74	0.68	3.4	0.40	3.1	5.40	6.9	7.10	7.0
75	0.34	2.1	0.30	3.1	1.80	4.0	9.60	8.0
76	0.16	1.7	0.90	4.0	1.20	4.0	5.40	6.6
77	0.28	1.8	1.00	4.2	1.50	4.0	8.40	9.7
78	0.42	3.0	0.60	3.5	1.50	3.2	8.50	7.8
79	0.41	3.0	0.50	3.3	1.50	4.4	5.30	6.7
80	0.25	1.6	0.60	3.4	1.40	4.5	7.30	7.5
81	0.27	1.8	0.50	3.5	1.60	4.7	5.30	6.7
82	0.26	2.0	0.90	4.0	2.20	4.8	5.80	6.4
83	0.31	2.5	0.40	3.3	1.90	4.9	3.50	6.8
84	0.36	2.1	0.80	4.0	1.30	4.7	3.30	5.6
85	0.28	2.1	1.00	3.9	1.70	4.0	3.60	6.7
86	0.32	2.5	0.70	3.5	1.80	4.6	6.40	7.0
87	0.42	3.0	0.80	3.9	1.60	2.0	5.40	7.2
88	0.43	2.9	0.30	3.1	1.30	4.9	5.70	7.3
89	0.51	3.2	0.70	3.6	2.20	4.6	6.30	7.1
90	0.37	2.6	0.80	3.9	1.50	4.6	7.40	8.8

หมายเหตุ: จำนวนปลาในการทดลองวันที่ 101 มีจำนวนทั้งหมด 274 ตัว การรายงานนี้เป็นเพียงข้อมูลส่วนหนึ่งเท่านั้น

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชลธิชา พลายชุม เกิดเมื่อวันที่ 15 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2551

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

Playchoom, C., Pungrasmi, W., and Powtongsook, S. (2010). Nitrate Removal in Recirculating Aquaculture System Using Denitrification Tank with Artificial Soil Layer. 16th Asian Agricultural Symposium and 1st International Symposium on Agricultural Technology: Sufficiency Agriculture, Bangkok, Thailand, August 25-27, 2010. (Oral presentation)

Playchoom, C., Pungrasmi, W., and Powtongsook, S. (2010). Effect of Carbon Sources and Carbon/Nitrogen Ratio on Nitrate Removal in Aquaculture Denitrification Tank. 2010 International Conference on Biology, Environment and Chemistry (ICBEC 2010), Hong Kong, China, December 28-30, 2010. (Oral presentation)