

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดในเรตด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว

นางสาวพรรณนภา โชคชัยทวี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2556 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2013 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

FACTORS AFFECTING THE EFFICIENCY OF NITRATE TREATMENT IN TUBULAR
DENITRIFICATION REACTOR

Miss Pannapa Chokchaitavee



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 2013
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดในเทรตด้วย
	กระบวนการดีในทรีฟิเคชันในระบบท่อยาว
โดย	นางสาวพรรณนภา โชคชัยทวี
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัมย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. สรวิศ เผ่าทองสุข

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัมย์)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. สรวิศ เผ่าทองสุข)
.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ)
.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มณฑล แก่นมณี)

พรรณนา โชคชัยทวี : ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรดด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว. (FACTORS AFFECTING THE EFFICIENCY OF NITRATE TREATMENT IN TUBULAR DENITRIFICATION REACTOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัมย์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. สรวิศ เผ่าทองสุข, 205 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรดด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด การทดลองเริ่มต้นจากการเตรียมสภาพตัวกรองพลาสติก Digester box (DB) ในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว เพื่อให้กระบวนการดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ โดยพบการลดลงของไนเตรดแต่ไม่พบการสะสมของไนไตรต์ ภายหลังทำการบ่มตัวกรองพลาสติก Digester box (DB) เป็นเวลา 62 วัน ทั้งนี้การบำบัดไนเตรดเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับร้อยละ 45 การทดลองช่วงที่ 2 เป็นการศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรดไนโตรเจนของเมทานอลและระยะเวลาพักเก็บน้ำที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนเตรดด้วยถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว โดยเริ่มจากการแปรผันค่าอัตราส่วนในรูปคาร์บอนต่อไนเตรดไนโตรเจนในน้ำเสียเข้าระบบแตกต่างกัน 3 ระดับเท่ากับ 1:1 2:1 และ 5:1 ในสถานะที่เดินระบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 22 ล./ชม. ควบคุมให้มีระยะเวลาพักเก็บน้ำในระบบเท่ากับ 2 ชม. ด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากโซเดียมไนเตรดความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ปริมาตรน้ำ 493 ล. และเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อเร่งอัตราดีไนทริฟิเคชัน ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรดไนโตรเจนจาก 1:1 เป็น 5:1 จะทำให้ค่าอัตราดีไนทริฟิเคชันเพิ่มขึ้นจาก $1,282.7 \pm 347.6$ เป็น $2,950.3 \pm 643.3$ มก.ไนโตรเจน/วัน โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรดไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนเตรดในการทดลองนี้ คือ 5:1 จากนั้นทำการทดลองต่อเนื่องโดยแปรผันระยะเวลาพักเก็บน้ำ 3 ค่า ได้แก่ 2 1.5 และ 1 ชม. ตามลำดับ เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรดไนโตรเจนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ผ่านมา ผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาพักเก็บน้ำที่ 2 ชม. ให้ค่าอัตราการบำบัดเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 2,503.8 มก.ไนโตรเจน/วัน การทดลองช่วงที่ 3 เป็นการประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวกับระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด โดยศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรดของถังปฏิกรณ์เมื่อนำมาติดตั้งเข้ากับบ่อเลี้ยงปลานิลความหนาแน่นสูงขนาด 4 ลบ.ม. ควบคุมกับถังตกตะกอนในสถานะที่ควบคุมการเติมเมทานอลแบบอัตโนมัติ ภายใต้อัตราส่วนที่เหมาะสม ได้แก่ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรดไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 2 ชม. โดยเติมเมทานอลเป็นแหล่งคาร์บอนภายนอก และทำการเดินระบบเป็นเวลา 72 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดการทดลอง ผลการทดลองพบว่าถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวสามารถควบคุมแอมโมเนียและไนไตรต์ให้มีปริมาณต่ำกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. และควบคุมไนเตรดให้มีปริมาณต่ำกว่า 50 มก.ไนโตรเจน/ล.ได้ สำหรับการทดลองช่วงสุดท้ายเป็นการศึกษากลุ่มจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวด้วยเทคนิคการเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอของยีน 16S rDNA ร่วมกับ PCR-DGGE พบว่าชนิดของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพเมื่อทำการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลานิลไม่แตกต่างกัน โดยชนิดของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพจะมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวของท่อ นั่นคือ เกิดการคัดเลือกกลุ่มจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพให้คงเหลือเฉพาะชนิดที่ไม่สามารถทนต่อความเข้มข้นของออกซิเจนสูงได้ โดยจุลินทรีย์กลุ่มเด่นที่พบ คือ *Alphaproteobacteria*, *Firmicutes* และ *Betaproteobacteria* และตรวจพบจุลินทรีย์กลุ่มรอง คือ *Gammaproteobacteria* และ *Actinobacteria*

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5370297221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: DENITRIFICATION / AQUACULTURE SYSTEMS / NITRATE / TUBULAR REACTOR

PANNAPA CHOKCHAITAVEE: FACTORS AFFECTING THE EFFICIENCY OF NITRATE TREATMENT IN TUBULAR DENITRIFICATION REACTOR. ADVISOR: ASST. PROF. WIBOONLUK PUNGRASMI, Ph.D., CO-ADVISOR: SORAWIT POWTONGSOOK, Ph.D., 205 pp.

This study focused on improving the efficiency of nitrate treatment with denitrification process in a tubular reactor for the recirculating aquaculture systems. The experiment began with an incubation of denitrifying bacteria in the tubular denitrification reactor (TDNR) packed with plastic media (Digester box). With proper incubation process, complete denitrification process in TDNR was achieved as nitrate was removed without an accumulation of nitrite. Average nitrate removal efficiency was 45% throughout 62 days experiment. The optimum C to N ratio was then evaluated in 493 L TDNR by varying the concentration of external carbon (methanol) to obtain the C:N ratio of 1:1, 2:1 and 5:1 while the TDNR retention time was kept constant at 2 hr with 22 L/hr flow rate. TDNR was operated continuously with an addition of synthetic wastewater containing 100 mg-N/L sodium nitrate. It was found that denitrification rate increased from $1,282.7 \pm 347.6$ to $2,950.3 \pm 643.3$ mg-N/day when the C:N ratio was adjusted from 1:1 to 5:1. Therefore C:N ratio of 5:1 was chosen as the optimum ratio. After varying retention time from 2 to 1.5 and 1 hrs, it was found that retention time of 2 hr provided the highest denitrification rate of 2,503.8 mg-N/day. TDNR was finally applied for nitrate treatment in the recirculating aquaculture system (RAS). The RAS was 4 m³ tilapia culture tank operated for 72 days without water exchange. TDNR operating condition was C:N ratio of 1:1, retention time of 2 hr with methanol supplement as external carbon source. The results showed that TDNR was able to maintain ammonia and nitrite concentration below 1 mg-N/L and nitrate below 50 mg-N/L. Microorganisms analysis using PCR-DGGE technique for 16S rDNA showed that microbial diversity in the TDNR was rather similar with both synthetic and raw wastewater from the RAS. However, some microorganisms were absent in the presence of high oxygen in the forepart of the TDNR. The dominant microorganisms were *Alphaproteobacteria*, *Firmicutes*, and *Betaproteobacteria* with minor extent of *Gammaproteobacteria* and *Actinobacteria*.

Department: Environmental Engineering

Field of Study: Environmental Engineering

Academic Year: 2013

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และดร.สรวิศ เผ่าทองสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้คำปรึกษา ถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ คอยให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย รวมทั้งตรวจทานและแก้ไขงานวิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจนผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ กรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑล แก่นมณี กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้กรุณาชี้แนะ ตรวจทาน และแก้ไขงานวิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ตะวัน ลิ้มปายกร ที่ได้ให้คำแนะนำและปรึกษาในการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิคทางชีววิทยาระดับโมเลกุล และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตรายที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีสำหรับการทำวิจัย ทั้งนี้ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

ขอขอบพระคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่สำหรับทำวิจัย ตลอดจนให้ความกรุณาสำหรับเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี รวมทั้งคำแนะนำในการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ด้านต่างๆ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุนสนับสนุนบางส่วน of โครงการในแผนพัฒนาวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (รหัสโครงการ CU56-FW14) ทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภท บัณฑิตศึกษา ประจำปี 2556 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ทุนสนับสนุนเพิ่มเติมจากโครงการส่งเสริมการวิจัย และพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (รหัสโครงการFW1017A) ที่ได้สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำวิจัย ตลอดจนจัดซื้อเครื่องมือและครุภัณฑ์ต่างๆ ที่จำเป็น และขอขอบคุณการสนับสนุนเครื่องมือ Microplate Spectrophotometer จากโครงการ Thai Government Stimulus Package 2 (TKK2555) จนทำให้ งานวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณปวีณา ตบนิยวรงค์ คุณเอกชัย มาลาพล คุณเสรี ดอนเหนือ ณ ห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล และนางสาวเพ็ญพิชญา พินิจธนาภักย์ นางสาวพรรณทรรณ สิริพิลากร นางสาวปณัฏฐ์ ชุตินุสรี นางสาวภัทรพร คุณาพงษ์กิติ ดร.สุรเชษฐ์ บุรุษอาชาไนย และพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทุกคน ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือในระหว่างการทำงานวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้อง ที่คอยช่วยเหลือ สนับสนุน เป็นกำลังใจในทุกๆ ด้าน ต่อการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์จนทำให้สำเร็จปรียูณมาหาบัณฑิตได้อย่างภาคภูมิใจ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	4
2.1.1 ระบบเปิด (Open system)	4
2.1.2 ระบบปิดหรือระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด (Closed or Recirculating system)	4
2.1.3 ระบบกึ่งปิด (Semi-closed system)	5
2.2 ปัจจัยด้านคุณภาพน้ำสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	5
2.2.1 แอมโมเนีย (Ammonia)	5
2.2.2 ไนไตรต์ (Nitrite)	6
2.2.3 ไนเตรต (Nitrate)	6
2.2.4 อุณหภูมิ (Temperature)	7
2.2.5 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen; DO)	7
2.2.6 ความเป็นกรดต่าง หรือพีเอช (pH)	8
2.2.7 ค่าสภาพด่าง (Alkalinity)	8
2.2.8 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide; H ₂ S)	9
2.2.9 ฟอสฟอรัส (Phosphorus)	9
2.2.10 อนุภาคของแข็งแขวนลอย (Suspended solid)	9

2.3 ไนโตรเจนในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	10
2.3.1 กระบวนการสร้างแอมโมเนีย (Ammonification)	11
2.3.2 กระบวนการดูดซึม (Assimilation).....	11
2.3.3 ปฏิกริยานิทรifikasi (Nitrification).....	12
2.4 การควบคุมปฏิกริยาดีไนทรifikasi.....	19
2.5 การศึกษาความหลากหลายของแบคทีเรียในตัวกรองชีวภาพ.....	20
2.5.1 ส่วนประกอบของปฏิกริยาจุลินทรีย์โพลีเมอร์เรส	20
2.5.2 การเพิ่มจำนวนยีน 16s rDNA ด้วยเทคนิคปฏิกริยาจุลินทรีย์โพลีเมอร์เรส	21
2.5.3 การวิเคราะห์ยีนจากปฏิกริยาจุลินทรีย์โพลีเมอร์เรสโดยเทคนิคภาพพิมพ์พันธุกรรม.....	22
2.6 ปลานิลและการเพาะเลี้ยงปลานิล.....	24
2.6.1 สรีรวิทยาและอนุกรมวิธานของปลานิล	24
2.6.2 การเพาะเลี้ยงปลานิล.....	25
2.7 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
2.7.1 การเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในกระบวนการดีไนทรifikasi.....	27
2.7.2 การใช้วัสดุตัวกลางเป็นตัวยึดเกาะของจุลินทรีย์และช่วยในการบำบัดไนเตรต	28
2.7.3 การบำบัดไนเตรตด้วยระบบดีไนทรifikasiแบบท่อยาว.....	30
2.7.4 การศึกษาความหลากหลายของแบคทีเรียโดยใช้เทคนิคพีซีอาร์-ดีจีจีอี.....	32
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	36
3.1 แผนการทดลอง.....	36
3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี	43
3.2.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง.....	43
3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ.....	43
3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความหลากหลายของประชากรจุลินทรีย์.....	44
3.2.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ.....	45
3.2.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ความหลากหลายของประชากรจุลินทรีย์.....	46
3.3 การทดลอง.....	47
3.3.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์	47

3.3.2 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับเดินระบบ.....	47
การทดลองช่วงที่ 1 การเตรียมสภาพตัวกรองชีวภาพดีในทรีฟิเคชันและติดตั้งถัง ปฏิกรณ์ ดีในทรีฟิเคชันแบบท่อยาว.....	51
การทดลองช่วงที่ 2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดในเทรตใน ระบบท่อยาว	55
การทดลองที่ 2.1 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีในทรี ฟิเคชันในระบบ ท่อยาว	55
การทดลองที่ 2.2 ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาดีในทรีฟิเคชันใน ระบบท่อยาว	58
การทดลองช่วงที่ 3 ประสิทธิภาพของระบบบำบัดดีในทรีฟิเคชันแบบท่อยาวใน การบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงปลา.....	60
3.4 การประเมินอัตราการเติบโตของสัตว์น้ำ.....	66
3.5 การประเมินสมดุลไนโตรเจน	67
การทดลองช่วงที่ 4 การศึกษาความหลากหลายและการเปลี่ยนแปลงกลุ่ม ประชากรจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ดีในทรีฟิเคชันแบบท่อยาว	68
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	73
4.1 การเตรียมสภาพตัวกรองชีวภาพดีในทรีฟิเคชันและติดตั้งถังปฏิกรณ์ดีในทรีฟิเคชันแบบ ท่อยาว	73
4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดในเทรตในระบบท่อยาว	80
4.2.1 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีในทรีฟิเคชันในระบบท่อยาว....	80
4.2.2 การศึกษาระยะเวลาที่กักเก็บน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาดีในทรีฟิเคชันในระบบท่อยาว	93
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดดีในทรีฟิเคชันแบบท่อยาวในการบำบัดน้ำเสีย จริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	100
4.3.1 การประเมินประสิทธิภาพระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	113
4.3.2 การประเมินสมดุลไนโตรเจน	114
4.4 การศึกษาความหลากหลายและการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในถัง ปฏิกรณ์ ดีในทรีฟิเคชันแบบท่อยาว.....	118
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	126
5.1 สรุปผลการทดลอง	126

5.2 ข้อเสนอแนะ	128
รายการอ้างอิง	130
ภาคผนวก.....	139
ภาคผนวก ก.....	140
ภาคผนวก ข.....	149
ภาคผนวก ค.....	155
ภาคผนวก ง	183
ภาคผนวก จ.....	198
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	205



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนละลายน้ำกับผลกระทบต่อสัตว์น้ำ	7
ตารางที่ 2.2	ระดับความเป็นกรดต่างที่มีผลต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	8
ตารางที่ 2.3	ค่าศักยภาพออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) ที่เกิดจากปฏิกิริยาต่างๆในน้ำ	19
ตารางที่ 3.1	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ	44
ตารางที่ 3.2	ชุดทดสอบและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความหลากหลายและการ เปลี่ยนแปลง กลุ่มประชากรจุลินทรีย์ด้วยเทคนิคพีซีอาร์-ดีจีจีอี	44
ตารางที่ 3.3	สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ.....	45
ตารางที่ 3.4	สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ความหลากหลายและการเปลี่ยนแปลงกลุ่มประชากร จุลินทรีย์ด้วยเทคนิคพีซีอาร์-ดีจีจีอี	46
ตารางที่ 3.5	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 1.....	53
ตารางที่ 3.6	พารามิเตอร์และความถี่ที่ทำการตรวจวิเคราะห์สำหรับการทดลองที่ 1	54
ตารางที่ 3.7	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 2.1.....	56
ตารางที่ 3.8	พารามิเตอร์และความถี่ที่ทำการตรวจวิเคราะห์สำหรับการทดลองที่ 2.1	57
ตารางที่ 3.9	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 2.2.....	58
ตารางที่ 3.10	พารามิเตอร์และความถี่ที่ทำการตรวจวิเคราะห์สำหรับการทดลองที่ 2.2	59
ตารางที่ 3.11	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 3.....	63
ตารางที่ 3.12	พารามิเตอร์และความถี่ที่ทำการตรวจวิเคราะห์สำหรับการทดลองที่ 3	64
ตารางที่ 3.13	การทดลองปรับเปลี่ยนค่าไออาร์พี ในโปรแกรมระบบควบคุมการเติมเมทานอล ด้วยวิธีอัตโนมัติ	66
ตารางที่ 3.14	สารเคมีที่ใช้ในการทำพีซีอาร์.....	70
ตารางที่ 3.15	ลำดับเบสของไพรเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง	70
ตารางที่ 3.16	การเตรียม Denaturing solution ที่มีความเข้มข้นของยูเรียร้อยละ 0	71

ตารางที่ 3.17 การเตรียม Denaturing solution ที่มีความเข้มข้นของยูเรียร้อยละ 80	71
ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำทั้งก่อนเข้าและออกจากถังปฏิกรณ์ ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว	79
ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำของน้ำก่อนเข้าถังปฏิกรณ์ ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว เมื่อเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน ในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 2:1 และ 5:1	90
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำของน้ำที่ออกจากถังปฏิกรณ์ ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว เมื่อเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน ในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 2:1 และ 5:1	91
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบอัตราการบำบัดไนเตรตกับงานวิจัยที่ผ่านมา	92
ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำของน้ำก่อนเข้าถังปฏิกรณ์ ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวเมื่อทำการแปรเปลี่ยนระยะเวลากักเก็บน้ำ ที่ 2 1.5 และ 1 ชม.	98
ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำของน้ำที่ออกจากถังปฏิกรณ์ ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวเมื่อทำการแปรเปลี่ยนระยะเวลากักเก็บน้ำ ที่ 2 1.5 และ 1 ชม.	99
ตารางที่ 4.7 สภาวะที่เหมาะสมของระบบถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวจาก ในช่วงก่อนการทดลองจริง	100
ตารางที่ 4.8 การปรับตั้งโปรแกรมควบคุมการเติมเมทานอล.....	102
ตารางที่ 4.9 การปรับตั้งโปรแกรมควบคุมการเติมเมทานอลเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพ การบำบัดไนเตรตเฉลี่ย.....	109
ตารางที่ 4.10 พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำของน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิลทั้งก่อนเข้าท่อยาว และออกจากท่อยาวเมื่อเลี้ยงปลานิลเป็นเวลา 72 วัน	111

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบอัตราการบำบัดไนเตรตของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา	112
ตารางที่ 4.12 อัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตของปลานิล	113
ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบมาตรฐานทั่วไปของอัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตของปลานิล แต่ละช่วงอายุ	114
ตารางที่ 4.14 ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนของตะกอนในน้ำและในตัวปลานิล เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHNS/O ANALYZER.....	115
ตารางที่ 4.15 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบและเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัด น้ำเสียจริงจากการเลี้ยง ปลานิล	116
ตารางที่ 4.16 รายละเอียดของตัวกรองชีวภาพที่ใช้ในการศึกษาความหลากหลายของจุลินทรีย์ ด้วยเทคนิค PCR-DGGE	119
ตารางที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์ของจุลินทรีย์จากการทดลอง กับฐานข้อมูล นิวคลีโอไทด์ของจุลินทรีย์ที่มีการเก็บรวบรวมไว้ใน Gen Bank	122
ตารางที่ 4.18 เปรียบเทียบผลการศึกษาความหลากหลายของประชากรจุลินทรีย์กับงานวิจัยที่มี มาก่อนหน้านี้.....	125

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 วัฏจักรไนโตรเจน.....	10
ภาพที่ 2.2 การถ่ายเทอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาดีโนทริฟิเคชัน	18
ภาพที่ 2.3 การเคลื่อนที่ของดีเอ็นเอที่มีลำดับเบสแตกต่างกันบนโพลีอะคริลาไมด์เจล	23
ภาพที่ 2.4 ขั้นตอนโดยสรุปของการทำพีซีอาร์ดีจีจีอี	23
ภาพที่ 2.5 ลักษณะของปลานิล <i>Oreochromis niloticus</i> Linnaeus.....	24
ภาพที่ 3.1 สรุปแนวทางการทดลองในงานวิจัยนี้.....	36
ภาพที่ 3.2 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 1.....	38
ภาพที่ 3.3 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองที่ 2.1.....	39
ภาพที่ 3.4 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองที่ 2.2.....	40
ภาพที่ 3.5 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 3.....	41
ภาพที่ 3.6 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 4.....	42
ภาพที่ 3.7 ภาพถ่ายของถังบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์	47
ภาพที่ 3.8 ภาพถ่ายของถังกวนผสม.....	48
ภาพที่ 3.9 ภาพถ่ายของระบบบำบัดในเทรตแบบท่อยาว	49
ภาพที่ 3.10 ตัวกลางพลาสติกโพลิเอทิลีน	50
ภาพที่ 3.11 ภาพถ่ายของถังตกตะกอน.....	50
ภาพที่ 3.12 แผนภาพการติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลองช่วงที่ 1	52
ภาพที่ 3.13 การติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลองช่วงที่ 1	52
ภาพที่ 3.14 แผนภาพการติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลองช่วงที่ 3 (Side View).....	61
ภาพที่ 3.15 ภาพถ่ายการติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลองช่วงที่ 3	61
ภาพที่ 3.16 แผนผังการติดตั้งระบบดีโนทริฟิเคชันเข้ากับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Top View).....	62
ภาพที่ 3.17 ภาพถ่ายมุมกว้างแสดงการติดตั้งระบบดีโนทริฟิเคชันเข้ากับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ..	62

ภาพที่ 3.18 การติดตามอัตราการเจริญเติบโตของปลานิลด้วยการวัดความยาวและชั่งน้ำหนัก	67
ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนและสารประกอบอินทรีย์คาร์บอน เปรียบเทียบระหว่างก่อนเข้าท่อยาวและออกจากท่อยาว	74
ภาพที่ 4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและการเปลี่ยนแปลงค่าไออาร์พีบริเวณทางออก จาก ท่อยาว	76
ภาพที่ 4.3 ฟองอากาศบนผิวน้ำของถังบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ในช่วงวันที่ 47-49.....	76
ภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ค่าสภาพต่าง ค่าออกซิเจนละลายน้ำและค่าอุณหภูมิ เปรียบเทียบระหว่างก่อนเข้าท่อยาวและออกจากท่อยาว.....	78
ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรตและสารประกอบอินทรีย์คาร์บอน เปรียบเทียบระหว่างก่อนเข้าท่อยาวและออกจากท่อยาว ที่แปรค่าอัตราส่วน คาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 2:1 และ 5:1	81
ภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนียมและไนไตรต์เปรียบเทียบระหว่าง ก่อนเข้าท่อยาวและออกจากท่อยาว ที่แปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรต ไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 2:1 และ 5:1	83
ภาพที่ 4.7 อัตราดีไนทริฟิเคชันจากการเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน โดยแปรผัน อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจน 1:1 2:1 และ 5:1	84
ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและการเปลี่ยนแปลงค่าไออาร์พีบริเวณทางออก จากท่อยาวที่แปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 2:1 และ 5:1	87
ภาพที่ 4.9 ค่าพีเอชและค่าสภาพต่างเปรียบเทียบระหว่างก่อนเข้าท่อยาวและออกจากท่อยาว ที่แปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 2:1 และ 5:1	88
ภาพที่ 4.10 ค่าออกซิเจนละลายน้ำและอุณหภูมิเปรียบเทียบระหว่างก่อนเข้าท่อยาวและออก จากท่อยาว ที่แปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 2:1 และ 5:1	89

ภาพที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนและสารประกอบอินทรีย์คาร์บอน เปรียบเทียบระหว่างก่อนเข้าท่อยาวและออกจากท่อยาว	94
ภาพที่ 4.12 ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและการเปลี่ยนแปลงค่าไออาร์พีบริเวณทางออกจากท่อยาวที่แปรค่าระยะเวลากักเก็บน้ำเท่ากับ 2 1.5 และ 1 ชม.....	95
ภาพที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ค่าสภาพต่าง ค่าออกซิเจนละลายน้ำและค่าอุณหภูมิ เปรียบเทียบระหว่างก่อนเข้าท่อยาวและออกจากท่อยาวโดยแปรค่าระยะเวลากักเก็บน้ำเท่ากับ 2 ชม. 1.5 ชม. และ 1 ชม.	97
ภาพที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต เปรียบเทียบระหว่างบ่อเลี้ยงปลานิลกับถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว.....	103
ภาพที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์คาร์บอน พีเอช และค่าสภาพต่าง เปรียบเทียบระหว่างบ่อเลี้ยงปลานิลกับถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว.....	106
ภาพที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนและอุณหภูมิ เปรียบเทียบระหว่างบ่อเลี้ยงปลานิลกับถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว	107
ภาพที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงของค่าไออาร์พี เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าของระดับที่ใช้ในการควบคุมการเติมเมทานอลในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 100 มิลลิโวลต์ , 0 ถึง 50 มิลลิโวลต์ และ -50 ถึง 50 มิลลิโวลต์	110
ภาพที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงของค่าไออาร์พี เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าของระดับที่ใช้ในการควบคุมการเติมเมทานอลในช่วงตั้งแต่ -100 ถึง 0 มิลลิโวลต์ และ -200 ถึง 0 มิลลิโวลต์.....	110
ภาพที่ 4.19 อัตราดีไนทริฟิเคชันของถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวจากการเพาะเลี้ยงปลานิล.....	112
ภาพที่ 4.20 ปริมาณอาหารที่ให้และปริมาณอาหารที่สะสมภายในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิล	113

ภาพที่ 4.21 ปริมาณของแข็งแขวนลอย และปริมาตรตะกอนจมตัวที่เวลา 30 นาที ในบ่อ เพาะเลี้ยงปลานิล ตลอดการทดลองเป็นระยะเวลา 72 วัน.....	117
ภาพที่ 4.22 โปรไฟล์แสดงการเคลื่อนที่ของแถบดีเอ็นเอบนแผ่นดีจีจีเจล.....	120
ภาพที่ 4.23 แผนภาพสรุปชนิดของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพจากถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชัน แบบท่อยาวบริเวณต้นท่อ (0 ม.) กลางท่อ (12.5 ม.) ปลายท่อ (25 ม.) ทั้งในน้ำเสีย สังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากผลดีจีจีจีในหัวข้อที่ 4.4.....	124

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำถือเป็นแหล่งรายได้หลักที่สำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทยและทั่วโลก ทุกประเทศจึงให้ความสำคัญและหันมาพัฒนารูปแบบการเพาะเลี้ยงเพื่อให้เป็นระบบที่มีความยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จากเหตุผลข้างต้นส่งผลให้การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบพัฒนาซึ่งเป็นรูปแบบการเลี้ยงที่มีการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่เป็นระบบที่ได้รับความนิยมเนื่องจากสามารถช่วยแก้ปัญหาด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมภายนอกฟาร์มและปัญหาโรคระบาดได้อีกทั้งยังสามารถเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้ในระดับความหนาแน่นที่สูงขึ้น ทำให้ได้ผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่เพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดความคุ้มค่าแก่การลงทุน แต่การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในรูปแบบนี้มักประสบปัญหาการสะสมของสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจน โดยเฉพาะแอมโมเนียและไนไตรต์ในระดับสูงกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งจะส่งผลเสียต่อสุขภาพของสัตว์น้ำ ดังนั้นการควบคุมปริมาณสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนในระบบจึงมีความจำเป็นซึ่งสามารถดำเนินการได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพที่เรียกว่า “ไนทริฟิเคชัน” กระบวนการดังกล่าวจะเป็นการเปลี่ยนรูปแอมโมเนียที่เกิดจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำและการย่อยสลายของเศษอาหารที่เหลือจากการบริโภคไปเป็นไนเตรตที่มีความเป็นพิษต่ำกว่า ดังนั้นการมีระบบไนทริฟิเคชันจะช่วยยืดระยะเวลาการเปลี่ยนถ่ายน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงออกไปได้ แต่อย่างไรก็ตามการใช้งานระบบไนทริฟิเคชันเป็นระยะเวลานานจะส่งผลให้เกิดการสะสมของไนเตรตในน้ำ โดยถ้าระดับความเข้มข้นของไนเตรตสูงกว่า 50 มก.ไนโตรเจน/ล. จะทำให้สัตว์น้ำเครียดและเจริญเติบโตช้า ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีความพยายามในการพัฒนาระบบบำบัดไนเตรตด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันในระบบแบบท่อยาว โดยหลักการทำงานของระบบท่อยาวนี้จะอาศัยแบคทีเรียที่เจริญอยู่บริเวณส่วนต้นของท่อในการลดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ผ่านกระบวนการหายใจแบบใช้อากาศทำให้ออกซิเจนลดลงตามความยาวของท่อจนถึงระดับหนึ่งที่จะสามารถเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันได้ ที่บริเวณนี้แบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟายเออร์จะทำการเปลี่ยนรูปไนเตรตไปเป็นก๊าซไนโตรเจนภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยใช้คาร์บอนจากภายนอกเป็นแหล่งให้อิเลคตรอน แต่ปัญหาที่ยังคงพบอยู่จากการเดินระบบท่อยาวก็คือ สภาวะการเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้มีการสะสมของไนไตรต์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ โดยแนวทางหนึ่งที่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ คือความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ ที่มีผล

ต่อกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน ซึ่งได้แก่ ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เนื่องจากในกระบวนการดีไนทริฟิเคชันนั้นต้องอาศัยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟซึ่งต้องใช้คาร์บอนจากภายนอกเป็นแหล่งพลังงาน ดังนั้นการหาอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนจึงมีความสำคัญต่ออัตราการบำบัดไนเตรต นอกจากนี้การศึกษาระยะเวลาการกักเก็บน้ำที่เหมาะสมจะช่วยควบคุมไม่ให้เกิดการสะสมของไนไตรต์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทำให้กระบวนการดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

งานวิจัยนี้จึงสนใจทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว และศึกษาองค์ประกอบและการเปลี่ยนแปลงชนิดของจุลินทรีย์ในระบบท่อยาว เพื่อให้ได้องค์ความรู้ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับการเลี้ยงปลานิลที่ความหนาแน่นสูง ซึ่งแนวทางดังกล่าวเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความเหมาะสมต่อเกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยสามารถนำไปดำเนินการได้จริงภายใต้การทำการเกษตรทฤษฎีใหม่ที่ช่วยลดการระบายของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในน้ำ และระยะเวลาการกักเก็บน้ำที่เหมาะสมในการเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว
- 1.2.2 เพื่อศึกษาองค์ประกอบและการเปลี่ยนแปลงกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในระบบท่อยาวที่มีผลต่อการบำบัดไนเตรตในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองระดับปฏิบัติการ ดำเนินการที่อุณหภูมิตั้งที่ ๒๕ องศาเซลเซียส ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการชีววิทยาระดับโมเลกุลอาคารสี่ภาควิชา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และห้องปฏิบัติการศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกำหนดขอบเขตต่างๆ ดังนี้

- 1.3.1 ทำการบำบัดในเกรตด้วยกระบวนการดีไนริฟิเคชันในระบบท่อยาวที่ทำจากท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม. ยาว 25 ม. โดยบรรจุตัวกลางพลาสติกชนิด Digester box (DB) เป็นวัสดุตัวกลาง
- 1.3.2 การทดลองช่วงที่ 1 และ 2 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากโซเดียมไนเตรตความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ส่วนการทดลองช่วงที่ 3 ใช้น้ำเสียจริงที่เกิดจากการเลี้ยงปลานิลที่ความหนาแน่นสูงกว่า 1.0 กก./ลบ.ม. ด้วยอาหารเม็ดที่ขายตามท้องตลาด ภายใต้สภาวะจำลองของบ่อเพาะเลี้ยงในโรงเรือนที่มีระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด
- 1.3.3 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา คือ ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในน้ำเสียเข้าระบบ จำนวน 3 ค่า ได้แก่ 1:1 2:1 5:1 และระยะเวลาเก็บน้ำที่แตกต่างกันในระบบ ท่อยาวจำนวน 3 ค่า ได้แก่ 2 1.5 และ 1 ชม.
- 1.3.4 การทดลองช่วงที่ 3 ทำการเลี้ยงปลานิลที่ความหนาแน่นเริ่มต้น 17.03 กก./ลบ.ม. ภายใต้สภาวะจำลองของระบบไร้นินในโรงเรือน
- 1.3.5 ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำตามวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2005)
- 1.3.6 ทำการศึกษาประชากรแบคทีเรียกลุ่มดีไนริฟายเออร์ในถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาวด้วยเทคนิคทางชีววิทยาระดับโมเลกุลโดยใช้เทคนิคพีซีอาร์-ดีจีจีจี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดในเกรตของถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาว
- 1.4.2 ได้ข้อมูลพื้นฐานที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและเดินระบบถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาวในการบำบัดในเกรตในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด
- 1.4.3 เป็นการเพิ่มองค์ความรู้เกี่ยวกับแบคทีเรียกลุ่มดีไนริฟายเออร์ที่เติบโตร่วมกันในระบบบำบัดในเกรตแบบท่อยาว เพื่อนำไปสู่การคัดเลือกกลุ่มแบคทีเรียที่มีบทบาทหลักในการบำบัดในเกรตและพัฒนาเพื่อใช้ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดต่อไป

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว และเป็นการเพาะเลี้ยงในเชิงธุรกิจมากขึ้น เพื่อให้เพียงพอและรองรับความต้องการของตลาดทั้งภายในและภายนอกประเทศ สำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำเศรษฐกิจในประเทศไทยแม้ว่าจะมีการพัฒนารูปแบบและวิธีการเพาะเลี้ยงอย่างต่อเนื่องในช่วงระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมา แต่ยังไม่ได้มีการประยุกต์และนำเทคโนโลยีใหม่ๆเข้ามาช่วยบรรเทาปัญหาการจัดการเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมในการเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างเพียงพอ ดังนั้นเพื่อให้เกิดประโยชน์อย่างยั่งยืนของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงต้องมีการพัฒนานวัตกรรมและแนวทางใหม่ๆของระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อช่วยลดผลกระทบต่อทรัพยากรธรรมชาติบริเวณแหล่งน้ำและพื้นที่ใกล้เคียง

โดยทั่วไปรูปแบบของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท (สุบัญญัติ นิมิตรรัตน์ และ วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย, 2552) ได้แก่

2.1.1 ระบบเปิด (Open system)

เป็นรูปแบบที่มีการถ่ายน้ำที่ผ่านการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแล้วทิ้งออกนอกระบบหรือทิ้งออกจากฟาร์มสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ โดยเป็นการเปลี่ยนถ่ายน้ำในระยะสั้นๆ เพื่อควบคุมคุณสมบัติของน้ำภายในบ่อให้มีคุณภาพที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ และเป็นระบบการเพาะเลี้ยงแบบดั้งเดิมในประเทศไทยด้วย (Chuntapa และคณะ, 2002) ซึ่งระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบดั้งเดิมทั้งแบบกึ่งพัฒนาและแบบพัฒนาส่วนใหญ่จะเป็นแบบระบบเปิด โดยข้อเสียของรูปแบบการเพาะเลี้ยงระบบนี้คือ มีการใช้น้ำปริมาณมากจากแหล่งน้ำภายนอก จึงทำให้เกิดปัญหาการขาดแคลนน้ำ รวมทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาการติดเชื้อก่อโรคจากแหล่งน้ำภายนอกที่ปนเปื้อน นอกจากนั้นน้ำที่ออกจากบ่อเพาะเลี้ยงยังก่อให้เกิดมลภาวะในแหล่งน้ำที่รองรับน้ำทิ้งอีกด้วย

2.1.2 ระบบปิดหรือระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด (Closed or Recirculating system)

เป็นรูปแบบการเพาะเลี้ยงโดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ แต่มีการชดเชยน้ำส่วนที่ระเหยไป รวมทั้งส่วนที่รั่วซึมและส่วนที่นำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ การเพาะเลี้ยงแบบปิดจะต้องใช้กระบวนการทาง

ชีวเคมีและทางกายภาพเพื่อรักษาคุณภาพน้ำ โดยการแก้ปัญหาต่างๆ จะกระทำภายในบ่อระหว่าง การเพาะเลี้ยงเพื่อให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วย ระบบนี้ต้องมีการสร้างบ่อบำบัดเพื่อตกตะกอนสารแขวนลอยและสารอินทรีย์ในน้ำที่ใช้ในการ เพาะเลี้ยง รวมทั้งกำจัดแพลงค์ตอนพืชและแพลงค์ตอนสัตว์ เป็นต้น เพื่อให้ น้ำสามารถหมุนเวียน กลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นรูปแบบการเลี้ยงแบบปิดนี้จึงเป็นที่น่าสนใจอย่างมาก เนื่องจากใช้น้ำน้อยกว่า ระบบการเพาะเลี้ยงแบบเปิดประมาณ 50 - 60 เท่า จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ แบบระบบหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่เป็นระบบที่กำลังได้รับความสนใจอย่างยิ่งในปัจจุบัน

2.1.3 ระบบกึ่งปิด (Semi-closed system)

เป็นรูปแบบที่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำบางส่วนเมื่อบ่อเลี้ยงมีปริมาณแอมโมเนียและไนโตรด สูงเกินไป ซึ่งช่วยให้ระบบกึ่งปิดมีความยืดหยุ่นมากกว่าระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบเปิด โดย รูปแบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบนี้จะมีการบำบัดและหมุนเวียนน้ำเหมือนกับการเพาะเลี้ยงแบบ ระบบปิด

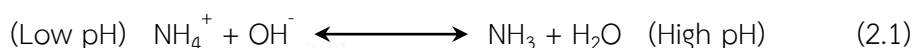
2.2 ปัจจัยด้านคุณภาพน้ำสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

การจัดการคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากเป็นสิ่งแวดล้อมที่สัตว์น้ำอาศัยอยู่ ถ้ามีการจัดการคุณภาพน้ำที่ไม่ดีจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อ สุขภาพ อัตราการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ และถ้าในสภาวะที่รุนแรงอาจเป็นสาเหตุทำให้สัตว์น้ำตาย ได้ โดยปัจจัยต่างๆด้านคุณภาพน้ำที่มีความสำคัญต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ได้แก่

2.2.1 แอมโมเนีย (Ammonia)

เนื่องจากในอาหารสัตว์น้ำจะมีองค์ประกอบของโปรตีนเป็นหลักทำให้มีปริมาณ ไนโตรเจนสูง และเมื่อรวมกับของเสียที่สัตว์น้ำขับถ่ายออกมาซึ่งจะอยู่ในรูปแอมโมเนีย ทำให้มี ผลกระทบต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบความหนาแน่นสูงเป็นอย่างมาก ซึ่งระดับความเข้มข้นของ แอมโมเนียที่ปลอดภัยสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรอยู่ในช่วง 0.02 - 3 มก./ล. (สุบัณฑิต นิมรัตน์ และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย, 2552) โดยความเป็นพิษของแอมโมเนียขึ้นอยู่กับค่าพีเอชที่ทำให้เกิดการ เปลี่ยนรูประหว่างแอมโมเนีย (NH_3) และแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) โดยถ้าในน้ำมีความเป็นด่างสูง จะพบแอมโมเนียมากขึ้น และแอมโมเนียในรูปที่ไม่มีไอออนจะมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมากกว่าในรูป ที่มีไอออน (Eshchar และคณะ, 2006) การเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียจะมีผลทำให้การขับถ่ายแอมโมเนีย

ของสัตว์น้ำทำได้น้อยลง จึงเกิดการสะสมแอมโมเนียในเลือดและเนื้อเยื่อส่งผลให้ค่าความเป็นกรดต่างในเลือดเพิ่มขึ้นและมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ นอกจากนี้แอมโมเนียยังทำให้การใช้ออกซิเจนของเนื้อเยื่อสูงขึ้น และทำลายเหงือกซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการขนส่งออกซิเจน ทำให้สัตว์น้ำอ่อนแอติดเชื้อโรคได้ง่าย (รุ่งนภา สุทธิศรี, 2549) โดยสมดุลของแอมโมเนียและแอมโมเนียมไอออนแสดงดังสมการที่ 2.1



2.2.2 ไนไตรต์ (Nitrite)

ไนไตรต์เป็นสารตัวกลางที่พบได้ระหว่างปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ สำหรับความเป็นพิษของไนไตรต์ต่อสัตว์น้ำมักเกิดจากไนไตรต์ไปออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) ในเลือดให้กลายเป็นเหล็กเฟอร์ริก (Fe^{3+}) เป็นผลให้ฮีโมโกลบินเปลี่ยนเป็นเมทีโมโกลบิน (Methemoglobin) ที่มีความสามารถในการรับออกซิเจนต่ำลง จึงทำให้เกิดสภาพที่เลือดมีออกซิเจนต่ำกว่าปกติ (Hypoxia หรือ Brown blood disease) สัตว์น้ำจึงตายจากการขาดออกซิเจน ซึ่งโดยทั่วไปความเป็นพิษของไนไตรต์จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณออกซิเจนต่ำและอุณหภูมิสูง โดยมีนลิน ตันกุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา (2539) รายงานว่าปริมาณไนไตรต์ที่สูงเกิน 1 มก./ล.จะเป็นอันตรายต่อปลา และระดับความเข้มข้นของไนไตรต์ที่ปลอดภัยต่อสัตว์น้ำ คือ ไม่ควรเกิน 0.36 มก.ไนไตรต์-ไนโตรเจน/ล.

2.2.3 ไนเตรต (Nitrate)

เนื่องจากไนเตรตเป็นสารประกอบไนโตรเจนลำดับสุดท้ายที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน และมีความเป็นพิษน้อยกว่าแอมโมเนียและไนไตรต์ โดยทั่วไประบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่อยู่ในภาวะมีออกซิเจนจะเกิดการสะสมของไนเตรตในปริมาณที่สูงขึ้นในบ่อเลี้ยง ซึ่งจะทำให้เกิดผลกระทบในระยะยาวต่อสุขภาพของสัตว์น้ำ โดยไนเตรตปริมาณน้อยจะไม่ส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำ แต่ถ้ามีการสะสมไนเตรตปริมาณสูงมากจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อสัตว์น้ำ ทำให้เกิดความเครียด อัตราการบริโภคอาหารต่ำ การเจริญเติบโตช้า อ่อนแอและอัตราการเจริญพันธุ์ลดลงเป็นอุปสรรคต่อการวางไข่ ซึ่งทำให้ผลผลิตลดลง โดยปริมาณไนเตรตที่สูงเกิน 50 มก.ไนเตรต-ไนโตรเจน/ล. จะทำให้เป็นพิษต่อปลา ที่ระดับความเข้มข้นของไนเตรต 30 มก.ไนเตรต-ไนโตรเจน/ล. จะมีโอกาสเกิดโรคจุดขาวในสัตว์น้ำ (Gutierrez-Wing และ Malone, 2006)

2.2.4 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ เนื่องจากสัตว์น้ำส่วนใหญ่เป็นสัตว์เลือดเย็น นั่นคือเมื่ออุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในร่างกายสัตว์น้ำ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมในร่างกาย การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำได้ เช่น ทำให้ระบบควบคุมการขับถ่ายและแร่ธาตุภายในผิดปกติ ทำให้ร่างกายอ่อนแอและถึงตายได้ นอกจากนี้ อุณหภูมิของน้ำยังส่งผลในทางอ้อม เช่น เมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงขึ้นปริมาณออกซิเจนจะละลายน้ำได้น้อยลงและยังเป็นการเร่งอัตราการดูดซึมของสารพิษเข้าสู่ร่างกายได้รวดเร็วขึ้นด้วย (คณิต ไชยา คำ และยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร, 2537) โดยชโล ลิมสุวรรณ และพรเลิศ จันทรรักษ์กุล (2547) ได้รายงานว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงปลามีค่าอยู่ในช่วง 27–30 องศาเซลเซียส

2.2.5 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen; DO)

ออกซิเจนเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดในการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ เนื่องจากสิ่งมีชีวิตต้องการออกซิเจนในขบวนการต่างๆ ภายในร่างกายเพื่อการเจริญเติบโต ในทางปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำต่ำกว่า 5 มก./ล. (Timmons และคณะ, 2002) ซึ่งผลกระทบของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่มีผลต่อสัตว์น้ำดังแสดงในตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนละลายน้ำกับผลกระทบต่อสัตว์น้ำ

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	ผลกระทบต่อสัตว์น้ำ
น้อยกว่า 1.0	อันตรายต่อสัตว์น้ำเป็นอย่างมาก สัตว์น้ำอาจตายได้
1.0 – 5.0	สัตว์น้ำสามารถมีชีวิตอยู่ได้แต่ถ้าเกิดขึ้นต่อเนื่องเป็นเวลานานก็จะเจริญเติบโตช้าและไม่สามารถสืบพันธุ์ได้ดี
มากกว่า 5 (แต่ไม่เกินระดับอิ่มตัว)	เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการขยายพันธุ์
สูงเกินระดับอิ่มตัว	ทำให้เกิดฟองอากาศในเลือดของสัตว์น้ำ ซึ่งเมื่อสัตว์น้ำเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีออกซิเจนสูงไปยังบริเวณที่มีออกซิเจนต่ำ ทำให้เกิดการปรับตัวไม่ทันซึ่งอาจจะทำให้สัตว์น้ำตายได้

(ที่มา : บุญศิริ กฤตยานันต์, 2552 อ้างถึงใน มั่นสิน ตันจุลเวศม์, 2539)

2.2.6 ความเป็นกรดต่าง หรือพีเอช (pH)

ค่าความเป็นกรดต่างหรือพีเอช คือ ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนที่มีอยู่ในน้ำ พีเอชเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมาก เพราะจะมีผลต่อคุณภาพทางเคมีของน้ำ เช่น พีเอชที่สูงหรือต่ำเกินไปจะส่งผลให้ปลาเกิดอาการเครียดและมีผลโดยตรงต่อการเจริญของปลา (มันสิน ตันทุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2539) โดยทั่วไปค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอยู่ระหว่าง 6.5 - 8.5 (Timmons และคณะ, 2002) นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชจะทำให้สารพิษชนิดอื่นๆ เกิดการแตกตัวเพิ่มมากขึ้นหรือลดลง เช่น เมื่อค่าพีเอชสูงทำให้ความเป็นพิษของแอมโมเนียเพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าพีเอชต่ำจะทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งมีความเป็นพิษมากขึ้น โดยผลกระทบของค่าพีเอชที่มีผลต่อสัตว์น้ำดังแสดงในตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ระดับความเป็นกรดต่างที่มีผลต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ความเป็นกรดต่าง	ผลกระทบต่อสัตว์น้ำ
น้อยกว่า 5	เป็นอันตรายและอาจทำให้สัตว์น้ำตายได้อย่างรวดเร็ว
ระหว่าง 5-7	การเจริญเติบโตลดลง กินอาหารน้อยลง หรืออาจตายได้ถ้าอยู่ในสภาพนี้นานๆ
ระหว่าง 7.5 – 8.5	เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
ระหว่าง 8.5 – 10.5	การเจริญเติบโตลดลง กินอาหารน้อยลง หรืออาจตายได้ถ้าอยู่ในสภาพนี้นานๆ
มากกว่า 10.5	เป็นอันตรายและอาจทำให้สัตว์น้ำตายได้อย่างรวดเร็ว

(ที่มา : วิชัย ลาภจตุพร และอรทัย เดียววานิชย์, 2535)

2.2.7 ค่าสภาพต่าง (Alkalinity)

ค่าสภาพต่าง หมายถึง ความสามารถของน้ำในการรับไฮโดรเจนไอออน (H^+) เพื่อทำให้กรดเป็นกลาง โดยสารประกอบที่ทำให้เกิดค่าสภาพต่างมี 3 ชนิดคือ ไฮดรอกไซด์ (OH^-) คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) (มันสิน ตันทุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2539) ค่าสภาพต่างช่วยเพิ่มความสามารถในการรักษาค่าพีเอชของน้ำไม่ให้เปลี่ยนแปลงมากเกินไป (Buffering capacity) ค่าสภาพต่างที่เหมาะสมสำหรับบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีค่าระหว่าง 20 - 150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. (วิรัช จิวแหยม, 2544)

2.2.8 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide; H_2S)

ในสภาวะไร้ออกซิเจนแบคทีเรียบางชนิดสามารถใช้ซัลเฟอร์ในรูปของซัลเฟต และสารประกอบซัลเฟอร์ตัวอื่นๆ เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน โดยสารประกอบเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของซัลไฟด์ ได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) HS^- และ HS^{2-} หรือ S^{2-} โดยที่ความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์จะมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมากกว่าในรูปอื่นๆ และมีความเป็นพิษคล้ายกับการขาดออกซิเจนแต่มีความรุนแรงกว่า (รุ่งนภา สุทธิศรี, 2549) โดยไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเข้าไปขัดขวางการขนส่งออกซิเจนภายในเซลล์ซึ่งทำให้ปริมาณแลคเตท (Lactate) ในเลือดสูงขึ้นมีผลทำให้กระบวนการเมแทบอลิซึมถูกยับยั้ง (Becker และคณะ, 2009) นอกจากนี้แบคทีเรียยังสามารถออกซิไดซ์ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้กลายเป็นกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ทำให้น้ำมีสภาวะเป็นกรด ดังนั้นเพื่อป้องกันอันตรายจากสภาวะดังกล่าว ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีค่าต่ำกว่า 0.002 มก./ล. (สุบัณฑิต นิมรรัตน์ และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย, 2552)

2.2.9 ฟอสฟอรัส (Phosphorus)

ถึงแม้ว่าปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำธรรมชาติจะมีไม่มากนัก แต่ฟอสฟอรัสก็มีความสำคัญมากเนื่องจากเป็นสารอาหารที่กำหนดปริมาณผลผลิตของสัตว์น้ำที่เพาะเลี้ยงในบ่อ การขาดแคลนฟอสฟอรัสมีผลทำให้ได้ผลผลิตต่ำ ฟอสฟอรัสอาจพบได้ในรูปสารละลายน้ำหรืออนุภาคแขวนลอยในบ่อปลา มีทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ สารอินทรีย์ฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้มักเกิดจากการเน่าเปื่อยของพืชหรือสิ่งมีชีวิต ส่วนสารอนินทรีย์ฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้มักเป็นออร์โธฟอสเฟต โดยแบคทีเรียสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ฟอสเฟตที่อยู่ในรูปของสารละลายหรือตะกอนแขวนลอยให้กลายเป็นออร์โธฟอสเฟตได้ โดยปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำของบ่อเลี้ยงปลาควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 - 0.5 มก./ล. (วัดในรูปของฟอสฟอรัส) หากมีน้อยกว่านี้ควรเติมปุ๋ยฟอสเฟตให้กับบ่อเลี้ยงปลา (มันสิน ตันทุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2539)

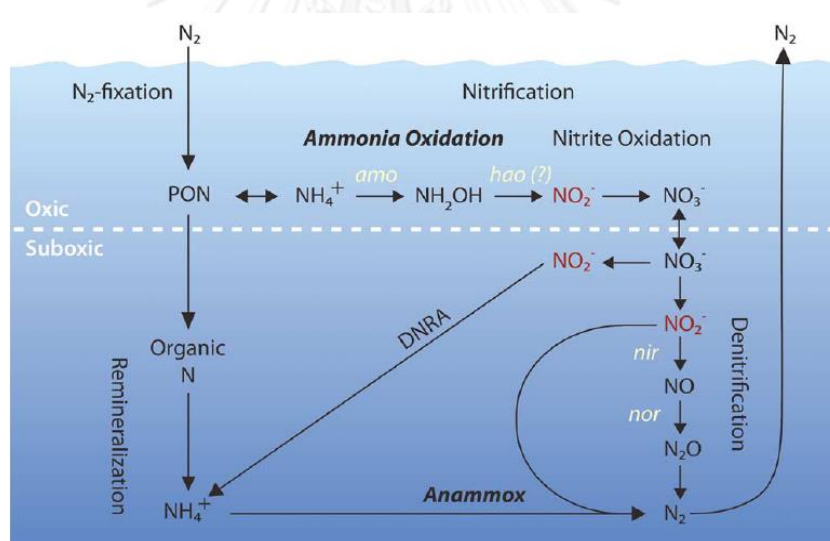
2.2.10 อนุภาคของแข็งแขวนลอย (Suspended solid)

อนุภาคของแข็งแขวนลอยเกิดจากการรวมตัวกันของอาหารที่เหลืตกค้างอยู่ในบ่อเลี้ยง ของเสียที่สัตว์น้ำขับถ่ายออกมา เซลล์ของจุลสาหร่าย และเซลล์แบคทีเรีย โดยทั่วไปการประมาณปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะคิดจากร้อยละ 25 ของปริมาณอาหารที่ให้ในระบบในรูปน้ำหนักแห้ง (ปกฉัตร ชูติคุทธิ, 2552) การที่ในบ่อเลี้ยงปลามีอนุภาคของแข็งแขวนลอยในน้ำมากเกินไปอาจส่งผลต่อการหายใจของปลาได้ โดยอนุภาคดังกล่าวจะไปอุดตันในช่องเหงือก ทำให้การหายใจของปลาติดขัดรับออกซิเจนได้น้อยลง และเมื่ออนุภาคของแข็ง

แขวนลอยในปริมาณมากถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรีย จะทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง โดยปริมาณอนุภาคของแข็งแขวนลอยในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรควบคุมให้มีค่าต่ำกว่า 80 มก./ล. ด้วยกระบวนการแยกอนุภาคของแข็งแขวนลอย

2.3 ไนโตรเจนในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ในบรรยากาศมีก๊าซไนโตรเจนอยู่ร้อยละ 78 และเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของคลอโรฟิลล์และโปรตีน สิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำก๊าซไนโตรเจนมาใช้ได้โดยตรงแต่จะสามารถใช้ไนโตรเจนในรูปของโปรตีน และเนื่องจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการให้อาหารสำเร็จรูป ไนโตรเจนจะอยู่ในรูปโปรตีนจากอาหารที่ให้และในรูปของเสียที่สัตว์น้ำขับถ่ายออกมา ซึ่งสิ่งมีชีวิตสามารถใช้ไนโตรเจนได้เมื่ออยู่ในสภาพของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ซึ่งการเปลี่ยนรูปของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนเหล่านี้สามารถอธิบายได้ด้วยวัฏจักรไนโตรเจน ดังแสดงในภาพที่ 2.1



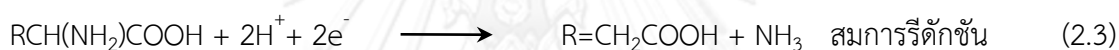
ภาพที่ 2.1 วัฏจักรไนโตรเจน

(ที่มา: Francis และคณะ, 2007)

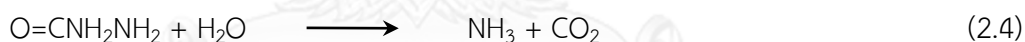
วัฏจักรของไนโตรเจนในน้ำแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนได้แก่ กระบวนการสร้างแอมโมเนีย (Ammonification) กระบวนการดูดซึม (Assimilation) ปฏิกิริยานิทรifikasi (Nitrification) และปฏิกิริยาดินิทรifikasi (Denitrification) ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1 กระบวนการสร้างแอมโมเนีย (Ammonification)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนไปเป็นสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน โดยปัญหาของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำส่วนใหญ่เกิดมาจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำ ซึ่งร้อยละ 50 ของไนโตรเจนจะอยู่ในรูปของแอมโมเนีย (มันซิน ตันทูลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2539) เนื่องจากสัตว์น้ำจะขับถ่ายไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียเป็นหลัก นอกจากนี้ยังมีของเสียในรูปสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน เช่น ซากพืช ซากสัตว์ เซลล์จุลินทรีย์ที่ตายแล้ว หรือเศษอาหารที่เหลือจากการบริโภคของสัตว์น้ำตกค้างอยู่ในบ่อ ซึ่งจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นอนินทรีย์ไนโตรเจนก็คือแอมโมเนีย โดยจุลินทรีย์หลายชนิด เช่น แบคทีเรีย แอคทีโนมัยซีตีส ฟังไจ ในกระบวนการนี้โปรตีนจะถูกย่อยสลายเป็นกรดอะมิโน และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของกรดอะมิโนให้เป็นแอมโมเนีย ดังสมการที่ 2.2 และ 2.3 (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)



ส่วนยูเรียจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนียและคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอนไซม์ยูรีเอส ดังสมการที่ 2.4



2.3.2 กระบวนการดูดซึม (Assimilation)

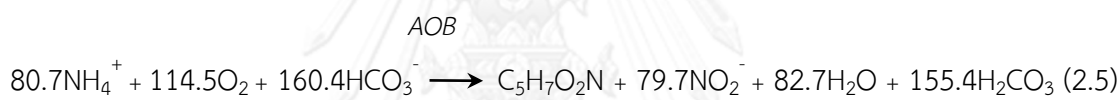
เป็นกระบวนการที่แอมโมเนียถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดอะมิโนเพื่อสร้างโปรตีนหรือสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนอื่นๆ ซึ่งเกิดขึ้นได้จากกิจกรรมของพืชเอง และกิจกรรมของจุลินทรีย์หลายชนิด อาทิเช่น *E.coli*, *Synechocystis sp.*, *Aspergillus nidulans* และ *Candida utilis* เป็นต้น โดยโปรตีนหลักที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาได้แก่ กลูตาเมต อะลานีน และแอสปาร์เทส ส่วนเอนไซม์ที่มีบทบาทสำคัญได้แก่ Glutamate dehydrogenase (GDH), Glutamate synthetase (GS) และ NADPH-dependent glutamine 2-oxoglutarate amidotransferase (GOGAT) ซึ่งไนเตรตก็สามารถถูกตรึงเป็นสารอินทรีย์ได้เช่นกัน เรียกว่า ไนเตรตรีดักชัน โดยไนเตรตจะถูกรีดิวซ์เป็นแอมโมเนียก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นสารอินทรีย์ ดังนั้นพืชหรือจุลินทรีย์จึงใช้ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียเป็นอันดับแรกในการเจริญเติบโตและสังเคราะห์เซลล์ สำหรับกระบวนการที่ตรงกันข้ามกับการดูดซับแอมโมเนีย (Ammonium assimilation) ได้แก่การปลดปล่อยแอมโมเนียจากเซลล์ที่ตายเรียกว่า

แอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) โดยกระบวนการทั้งสองเกิดทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน (วีรานูช หลาง, 2551)

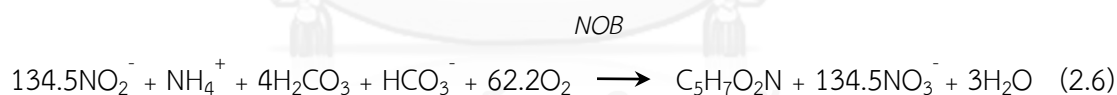
2.3.3 ปฏิริยาไนทริฟิเคชัน (Nitrification)

ปฏิริยาไนทริฟิเคชันเป็นการออกซิไดส์สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากแอมโมเนียให้ไปเป็นไนไตรต์และไนเตรต ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้สูงขึ้น ปฏิริยาไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นในสภาวะที่มีออกซิเจน โดยอาศัยการทำงานของออกโตโทรฟ 2 กลุ่มที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์หรือไบคาร์บอเนตเป็นแหล่งคาร์บอน ซึ่งปฏิริยาไนทริฟิเคชันประกอบด้วย 2 ขั้นตอนย่อยได้แก่

ก) ปฏิริยาไนไตรเทชัน (Nitritation) เป็นปฏิริยาที่ต้องอาศัยแบคทีเรียกลุ่มแอมโมเนียออกซิไดส์ซิง (Ammonium oxidizing bacteria ; AOB) ทำหน้าที่ออกซิไดส์แอมโมเนียไปเป็นไนไตรต์ดังสมการที่ (2.5)



ข) ปฏิริยาไนเตรเทชัน (Nitrataion) เป็นปฏิริยาที่ต้องอาศัยแบคทีเรียกลุ่มไนไตรต์ออกซิไดส์ซิง (Nitrite oxidizing bacteria ; NOB) ทำหน้าที่ออกซิไดส์ไนไตรต์ไปเป็นไนเตรตดังสมการที่ (2.6)



ถ้าให้ยิลด์ (Yield) ของ *Nitrosomonas sp.* และ *Nitrobacter sp.* มีค่าประมาณ 0.1 กรัมวีเอสเอส/กรัมแอมโมเนีย-ไนโตรเจน และ 0.06 กรัมวีเอสเอส/กรัมไนไตรต์-ไนโตรเจน ตามลำดับ โดยสามารถแสดงปฏิริยาไนทริฟิเคชันที่รวมการเจริญเติบโตได้ดังสมการที่ (2.7)



จากปฏิริยาแสดงว่าการบำบัดแอมโมเนีย 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ต้องการสภาพต่างและออกซิเจน 7.07 และ 4.25 มก./ล. ตามลำดับ ถ้าหากคิดเฉพาะแอมโมเนียที่ถูกออกซิไดส์โดยไม่มี การสร้างเซลล์ปริมาณออกซิเจนและสภาพต่างที่ต้องการจะมีค่าประมาณ 4.57 และ 7.14 มก./ล. (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไนทริฟิเคชัน

การออกซิไดซ์แอมโมเนียและไนไตรต์นั้นเกิดขึ้นในสภาวะที่มีออกซิเจน โดยแบคทีเรีย 2 กลุ่มได้แก่ กลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซ์ซึ่งแบคทีเรียและกลุ่มไนไตรต์ออกซิไดซ์ซึ่งแบคทีเรีย ซึ่งมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมต่างๆ ดังนี้

1) ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (Ammonia concentration)

ความเข้มข้นของแอมโมเนียมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชัน เนื่องจากแอมโมเนียเป็นสารตั้งต้นที่ใช้ในปฏิกิริยาไนทริฟิเคชัน ถ้าความเข้มข้นของแอมโมเนีย 10 – 150 มก. ไนโตรเจน/ล. อาจจะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม *Nitrosomonas spp.* และการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม *Nitrobacter spp.* อาจจะถูกยับยั้งเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนีย 0.1 – 1.0 มก. ไนโตรเจน/ล. (Anthonisen และคณะ, 1976)

2) ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen; DO)

เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากต่อการเกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันของแบคทีเรีย การเกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์มักเกิดขึ้นเมื่อค่าออกซิเจนละลายน้ำไม่ต่ำกว่า 2 มก./ล. แต่สามารถยอมรับได้ถึงค่า 1 มก./ล. (Camargo และ Alonso, 2007) นอกจากนี้การมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมากจะทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันเพิ่มขึ้น แต่การเติมอากาศมากเกินไปจะทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำสูงเกินไปจะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน

3) อุณหภูมิ (Temperature)

ที่อุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส แบคทีเรียกลุ่มไนไตรต์ออกซิไดซ์ซึ่ง (NOB) จะมีจำนวนลดลง เนื่องจากเกิดการแข่งขันกันกับแบคทีเรียกลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซ์ซึ่ง (AOB) โดยปกติแบคทีเรียกลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซ์ซึ่ง จะมีอัตราการเติบโตดีกว่าแบคทีเรียกลุ่มไนไตรต์ออกซิไดซ์ซึ่ง (Hellinga และคณะ, 1998) และอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันอยู่ในช่วง 30 – 36 องศาเซลเซียส (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

4) ความเป็นกรดต่าง หรือพีเอช (pH)

ปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันมีความไวต่อพีเอชมาก เนื่องจากปฏิกิริยาของไฮโดรเจนไอออน (H^+) และไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) มีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตของไนทริฟายอิงแบคทีเรีย อีกทั้งปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันจะใช้สภาพต่างจากน้ำเสีย ทำให้ค่าพีเอชลดต่ำลง ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมระดับพีเอชให้เหมาะสม โดยพีเอชที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 7.5 - 8.5 หากพีเอชเริ่มต่ำกว่า 7.0

ปฏิกิริยาไนทรีฟเคชันจะถูกยับยั้ง เนื่องจากเกิดก๊าซไนทริกออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ขึ้น (Ling และ Chen, 2005) และถ้าพีเอชสูงกว่า 8.5 จะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มไนไตรต์ออกซิไดซ์ซึ่ง ส่งผลให้เกิดการสะสมของไนไตรต์ (Fenchel และ Blackburn, 1979 อ้างถึงใน เอกชัย มาลาพล, 2551)

5) ค่าสภาพด่าง (Alkalinity)

ค่าสภาพด่างมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของไนทรีฟายอิงแบคทีเรีย โดยไนทรีฟายอิงแบคทีเรียจะใช้คาร์บอนหรือไบคาร์บอนเป็นแหล่งคาร์บอนในการสร้างเซลล์ และในการออกซิไดซ์แอมโมเนียไนโตรเจน 1 ก. ให้เป็นไนเตรตมีความต้องการค่าสภาพด่าง 7.14 ก. แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งค่าสภาพด่างที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาไนทรีฟเคชันควรมีค่าไม่น้อยกว่า 100 มก./ล. (Hart และ O'sullivan, 1993 อ้างถึงใน เพ็ญพิชญา พินิจธนาภักย์, 2556)

6) อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio)

การทำงานของกลุ่แบคทีเรียในปฏิกิริยาไนทรีฟเคชันจะถูกยับยั้งเมื่ออัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงขึ้น จากการศึกษาของ Satoh และคณะ (2000) พบว่าเมื่อปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่ให้กับระบบเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนทรีฟเคชันลดลง เนื่องจากแบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟจะเจริญเติบโตแข่งกับไนทรีฟายอิงแบคทีเรีย และมีอัตราการเจริญเติบโตที่สูงกว่าไนทรีฟายอิงแบคทีเรีย (Michaud และคณะ, 2006) นอกจากนี้แบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟยังมีค่าyieldสูงกว่าไนทรีฟายอิงแบคทีเรียถึง 5 เท่า (Ling และ Chen, 2005)

7) การยับยั้งจากสารที่เป็นพิษ (Inhibitory substance)

ไนทรีฟายอิงแบคทีเรียจะถูกยับยั้งโดยแสงสว่าง (Hagopain และ Rilay, 1998) และพบว่า ไฮดรอกซีลามีน แอมโมเนีย และไนทริกออกไซด์ จะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียออกซิไดซ์ไนไตรต์ (Schmidt และคณะ, 2003 อ้างถึงในสุธาสนี อ่วมจันทร์, 2546) และสารประกอบอินทรีย์บางชนิด เช่น ไธโอยูเรีย (thiourea) 8-ไฮดรอกซีควิโนลีน (8-hydroxyquinoline) ฟีนอล (phenol) สเคตอล (sketol) และ ไธโอเซมิเซอร์บาไซด์ (thiosemicerbazide) รวมถึงโลหะหนักบางตัว เช่นปรอท นิกเกิล โครเมียม ทองแดง สังกะสี เป็นต้น (กษิตศ หนูทอง, 2551)

8) พื้นที่ผิวสำหรับแบคทีเรีย (Surface area)

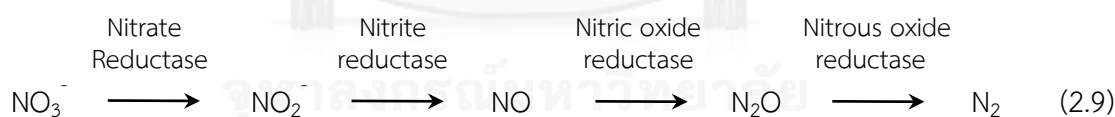
การเพิ่มพื้นที่ผิวในการยึดเกาะของแบคทีเรียสำหรับกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันและไนทรีฟิเคชันเป็นการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรีย ทำให้ประสิทธิภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น (Spotte, 1979 อ้างถึงใน ธัญญา พันธ์ฤทธิ์ดำ, 2541)

2.3.4 ปฏิกริยาดีไนทริฟิเคชัน (Denitrification)

ปฏิกริยาดีไนทริฟิเคชันเป็นการรีดิวซ์ไนเตรตให้อยู่ในรูปก๊าซไนโตรเจนหรือไนตรัสออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ โดยอาศัยดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่ม Facultative anaerobic bacteria พบในดิน แหล่งน้ำจืด น้ำกร่อย และในทะเล ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียมีหลายสกุลเช่น *Pseudomonas*, *Halobacterium*, *Enterobacter*, *Clostridium*, *Corynebacterium*, *Citrobacter* และ *Bacillus* (Delwiche, 1981) สามารถหายใจได้ทั้งแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน ไม่สามารถสร้างอาหารได้เองจึงต้องใช้สารอินทรีย์ ได้แก่ เมทานอล เอทานอล อะซิเตท กลูโคส เป็นต้นเพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอน (Rittmann และ McCarty, 2001) ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียสามารถเปลี่ยนไนเตรตให้เป็นก๊าซไนโตรเจนได้โดยปฏิกริยาดีไนทริฟิเคชัน ซึ่งแบคทีเรียจะใช้ไนเตรต ไนไตรต์ ไนทริกออกไซด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนและใช้เมทานอลเป็นตัวให้อิเล็กตรอนในกระบวนการหายใจ อาจแสดงได้ด้วยสมการที่ (2.8) (Metcalf และ Eddy, 2004) โดยอาศัยการทำงานของเอนไซม์รีดักเทส (Bitton, 1994 อ้างถึงในวิลาสินี ไตรยราช, 2546) ดังสมการที่ (2.9)



แบคทีเรียจะใช้เมทานอลเพื่อเปลี่ยนไนเตรตเป็นก๊าซไนโตรเจนและใช้สังเคราะห์เซลล์ โดยการรีดิวซ์ไนเตรตไนโตรเจน 1 กรัม จะต้องใช้เมทานอล 2.47 กรัม/กรัมไนเตรตไนโตรเจน จากสมการ (2.8) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ($\text{CH}_3\text{OH}/\text{NO}_3^- \text{-N}$) ตามหลักปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry) มีค่าเท่ากับ 2.47



อย่างไรก็ตามเอ็นไซม์เหล่านี้ อาจถูกยับยั้งการทำงานหากอยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจนและจะเกิดการสะสมไนไตรต์ ไนทริกออกไซด์ และไนตรัสออกไซด์ เรียกว่าเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันแบบไม่สมบูรณ์ (Rittmann และ McCarty, 2001) ซึ่งในทางปฏิบัติหากสามารถควบคุมระบบให้เกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ก็เท่ากับว่าระบบสามารถบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนไปได้อย่างสมบูรณ์

ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน

เช่นเดียวกับในกรณีของปฏิกิริยาไนทริฟิเคชัน ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมมีบทบาทสำคัญมากในการกำหนดอัตราการเจริญเติบโตของดีไนทริฟายอิงแบคทีเรีย โดยมีปัจจัยที่สำคัญดังนี้

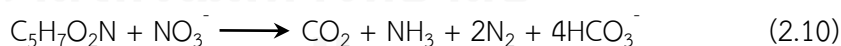
1) สารอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon)

สารอินทรีย์คาร์บอนสำหรับปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเลคตรอน ซึ่งสามารถแบ่งสารอินทรีย์คาร์บอนของปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันออกเป็น 2 ประเภท คือ

ก. Substrate Nitrate Denitrification เป็นการเจริญเติบโตของเซลล์แบบปกติที่ได้ออกซิเจนจากไนเตรต โดยใช้สารอินทรีย์คาร์บอนจากแหล่งใดก็ได้ที่ไม่ใช่คาร์บอนจากภายในเซลล์จุลินทรีย์ เช่น เมทานอล กรดอะซิติก กลูโคส กลีเซอรอล กรดแลคติก เป็นต้น

จากข้อมูลของ Hamlin และคณะ (2008) ได้เปรียบเทียบแหล่งคาร์บอนสำหรับปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน 5 ชนิด ได้แก่ เมทานอล เอทานอล กรดอะซิติก น้ำตาล และอะซิโตน ซึ่งสรุปว่าเมทานอลมีความเหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันมากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูกที่สุดรวมถึงการเก็บรักษาและการเติมให้ระบบสามารถทำได้ง่าย การเติมเมทานอลในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเพิ่มขึ้น 5 - 10 เท่า โดยไม่มีผลกระทบต่อสัตว์น้ำ (Delwiche, 1981)

ข. Endogenous Nitrate Denitrification เป็นปฏิกิริยาที่แสดงถึงการย่อยสลายตัวจุลินทรีย์เอง จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อในระบบไม่มีแหล่งคาร์บอนจากภายนอก ซึ่งจุลินทรีย์จะใช้แหล่งคาร์บอนจากภายในเซลล์จุลินทรีย์เองหรือจากจุลินทรีย์อื่นๆที่ตายแล้ว ดังสมการที่ 3.10



เมื่อพิจารณาจากปฏิกิริยาทั้งสองประเภทจะเห็นได้ว่า Substrate Nitrate Denitrification เป็นปฏิกิริยาของการเจริญเติบโตของเซลล์แบบปกติที่ได้ออกซิเจนจากไนเตรต โดยเมื่อคาร์บอนในระบบลดน้อยลงจะต้องเติมสารอินทรีย์คาร์บอน เพื่อคงระบบให้เกิดกระบวนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพมากที่สุด (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542)

2) ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen; DO)

ออกซิเจนเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน เพราะในสถานะที่มีออกซิเจนสูงแบคทีเรียจะเลือกใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนไนเตรต เพราะพลังงานที่ได้

จากการออกซิไดซ์แหล่งคาร์บอนด้วยไนเตรตจะมีค่าน้อยกว่าการออกซิไดซ์แหล่งคาร์บอนด้วยออกซิเจน โดยในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายน้ำประมาณ 0.1 - 0.2 มก./ล. แบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟายอิงจะใช้ไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (ชลธิชา พลายชุม, 2553) ดังนั้นออกซิเจนจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องควบคุมให้เหลือน้อยที่สุดเพื่อให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟเคชันเกิดได้อย่างสมบูรณ์ (Van Rijn และคณะ, 2006)

3) อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟเคชัน โดยปฏิกิริยาดีไนทริฟเคชันสามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิ 2 ถึง 50 องศาเซลเซียส แต่ช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียอยู่ระหว่าง 25 ถึง 35 องศาเซลเซียส (Rivett และคณะ, 2008)

4) ความเป็นกรดต่าง หรือพีเอช (pH)

พีเอชที่เหมาะสมสำหรับดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียอยู่ในช่วงระหว่าง 6.5 - 8.5 (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) โดยพีเอชที่ต่ำกว่า 5 จะทำให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟเคชันถูกยับยั้งและมีแนวโน้มที่จะเกิดการสะสมของไนไตรต์หรือไนตริกออกไซด์ (Rivett และคณะ, 2008) และในกรณีที่พีเอชมีค่าต่ำกว่า 6 และสูงกว่า 8 อัตราของปฏิกิริยาดีไนทริฟเคชันจะเกิดได้ช้า เนื่องจากแบคทีเรียไม่สามารถปรับสภาพให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมได้ และอาจส่งผลให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟเคชันถูกยับยั้ง (Rezaee และคณะ, 2008)

5) ค่าสภาพต่าง (Alkalinity)

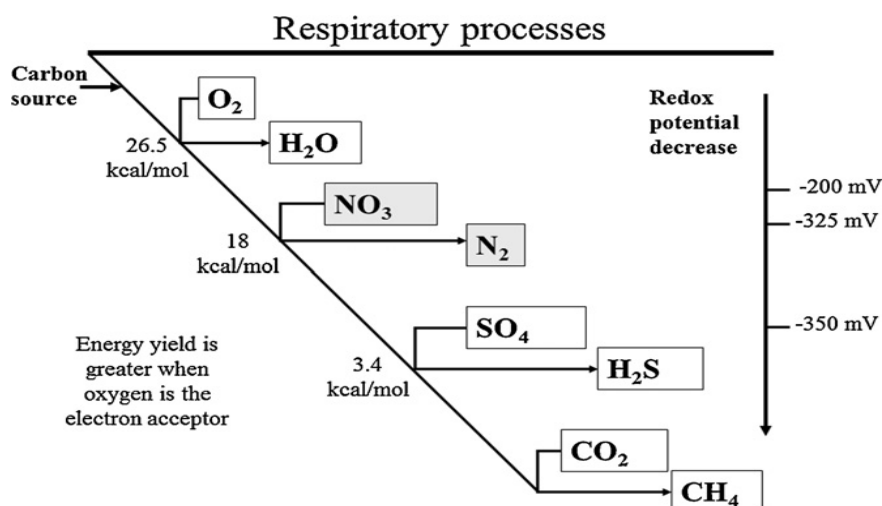
ค่าสภาพต่างมีความสัมพันธ์กับพีเอชโดยตรง โดยในปฏิกิริยาดีไนทริฟเคชันแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟจะปลดปล่อยไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ออกมา จึงทำให้ค่าสภาพต่างในน้ำจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น โดยการรีดิวซ์ไนเตรต 1 ก. ให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนจะผลิตค่าสภาพต่าง 3.57 ก.แคลเซียมคาร์บอเนต (Li และ Irvin, 2007)

6) ความเข้มข้นของไนเตรต (Nitrate concentration)

ไนเตรตถูกใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในปฏิกิริยาดีไนทริฟเคชัน ดังนั้นไนเตรตจึงมีผลกระทบต่ออัตราการเกิดและอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยจะเกิดขึ้นในอัตราเร็วสูงสุดเมื่อมีความเข้มข้นของไนเตรตอยู่ในระดับสูงอย่างเกินพอ (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542)

7) ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation – Reduction Potential; ORP)

ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) คือความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนในน้ำ โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาที่โมเลกุลหรือไอออนสูญเสียอิเล็กตรอน ส่วนปฏิกิริยารีดักชันเป็นปฏิกิริยาที่โมเลกุลหรือไอออนได้รับอิเล็กตรอน ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 2.2 การถ่ายเทอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน

(ที่มา: Gutierrez-Wing และคณะ, 2012)

ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน มีหน่วยการวัดคือ มิลลิโวลต์(mV) มีค่าได้ทั้งเป็นบวกและลบ โดยมีค่าเป็นบวกเมื่อน้ำมีออกซิเจนหรือมีไนเตรต และมีค่าเป็นลบเมื่อน้ำปราศจากออกซิเจน จากข้อมูลของ Hamlin และคณะ (2008) พบว่าค่า ORP ที่มากกว่า -200 มิลลิโวลต์ จะทำให้เกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ นั่นคือจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ไนตริกออกไซด์ (NO) และไนไตรต์ (NO_2^-) ส่วนค่า ORP ที่ต่ำกว่า -400 มิลลิโวลต์ จะทำให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gutierrez-Wing และคณะ (2012) ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าช่วงของค่า ORP ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์จะอยู่ระหว่าง -200 ถึง -300 มิลลิโวลต์

2.4 การควบคุมปฏิกิริยาดีในทรีฟเคชั่น

การใช้ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเป็นตัวบ่งชี้สภาวะที่เกิดปฏิกิริยาดีในทรีฟเคชั่นนั้น จะทำได้ยาก เนื่องจากการใช้หัววัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO probe) จะไม่สามารถวัดปริมาณออกซิเจนที่ระดับความเข้มข้นต่ำได้อย่างแม่นยำ และไม่สามารถบ่งชี้ได้ว่าเกิดปฏิกิริยาดีในทรีฟเคชั่นขึ้นหรือไม่ จึงมีการเปลี่ยนมาใช้ ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-reduction potential, ORP) หรือค่ารีดอกซ์ (Redox) เป็นพารามิเตอร์ในการตรวจวัด โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดคู่กันกับปฏิกิริยารีดักชันเสมอ โดยค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) ที่เกิดปฏิกิริยาต่างๆ ในน้ำแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) ที่เกิดจากปฏิกิริยาต่างๆ ในน้ำ

ORP (mV)	กระบวนการ	ตัวรับอิเล็กตรอน	สภาวะ
+ 300		O_2	ออกซิก (Oxic) หรือ แอโรบิก (Aerobic)
+ 200			
+ 100			
0		NO_3^-	แอนออกซิก (Anoxic) แอนแอโรบิก (Anaerobics)
- 100		SO_4^{2-} Carbonaceous Organics	การหมัก (Fermentive) แอนแอโรบิก (Anaerobics)
- 200			
- 300			
- 400			

1 - Organic Carbon Oxidation

2 - Polyphosphate Development

3 - Nitrification

4 - Denitrification

5 - Polyphosphate Breakdown

6 - Sulfide Formation

7 - Acid Formation

8 - Methane Formation

(ที่มา : สุวิมล ต้นทสุกิจวนิช, 2545)

2.5 การศึกษาความหลากหลายของแบคทีเรียในตัวกรองชีวภาพ

ในการพัฒนาระบบบำบัดในเทรตให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ความชัดเจนของประชาคมจุลินทรีย์ในระบบบำบัดนั้นก็เป็นสิ่งสำคัญ และจำเป็นต้องอาศัยความรู้ทางด้านจุลชีววิทยามาช่วยสนับสนุนให้เข้าใจการทำงานของระบบมากยิ่งขึ้น แต่ในปัจจุบันยังขาดแคลนข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับจำนวนหรือชนิดของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดในตัวกรองชีวภาพ และตลอดจนความรู้ทางด้านความหลากหลายของจุลินทรีย์ในธรรมชาติยังมีน้อย เนื่องจากการใช้วิธีส่องตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์และการเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อยังมีข้อจำกัดอยู่มาก ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาเทคนิคทางชีววิทยาในระดับโมเลกุล ทำให้สามารถศึกษาความหลากหลายของจุลินทรีย์ถึงระดับยีน (gene) ซึ่งความหลากหลายทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตเป็นผลมาจากวิวัฒนาการ โดยหลักการของการศึกษาความหลากหลายของจุลินทรีย์ในธรรมชาติก็คือ การวิเคราะห์ความแตกต่างของลำดับเบสในอาร์เอ็นเอ (RNA) หรือดีเอ็นเอ (DNA) และจัดแบ่งความหลากหลายของประชากรออกมาเป็นกลุ่มตามความแตกต่าง (pattern หรือ profile) หรืออาจเรียกว่าเทคนิค DNA fingerprint ซึ่งสามารถใช้เปรียบเทียบองค์ประกอบประชาคมแบคทีเรียจากตัวอย่างในสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ รวมทั้งสามารถใช้ประโยชน์ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงจำนวนของแบคทีเรียได้อีกด้วย

ในปัจจุบันวิธีทางชีววิทยาโมเลกุลที่นิยมใช้ในการศึกษาประชาคมแบคทีเรียก็คือ เทคนิคการเพิ่มจำนวนยีนในช่วงสายของ 16s rDNA ด้วยปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอร์เรส หรือ PCR (Polymerase Chain Reaction) และทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของยีนด้วยเทคนิคภาพพิมพ์พันธุกรรม หรือ DGGE (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis) ซึ่งรวมเรียกรย่อๆ ว่าเทคนิค PCR-DGGE ซึ่งสามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

2.5.1 ส่วนประกอบของปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอร์เรส มีดังนี้

2.5.1.1 ดีเอ็นเอต้นแบบ (Template)

เป็นดีเอ็นเอที่ต้องการเพิ่มจำนวน ซึ่งในที่นี้คือ ดีเอ็นเอจากตัวอย่างที่ต้องการใช้เป็นแม่พิมพ์ในการศึกษา

2.5.1.2 ไพร์เมอร์ (Primer)

เป็นดีเอ็นเอสายเดี่ยวสายสั้นๆ ที่สามารถจับคู่กับปลายของดีเอ็นเอต้นแบบแต่ละสาย

2.5.1.3 ดีเอ็นเอโพลีเมอเรส (DNA polymerase)

เป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ต่อสายดีเอ็นเอ สามารถทนความร้อนสูง (93 ถึง 95 องศาเซลเซียส) ได้

2.5.1.4 นิวคลีโอไทด์ (Nucleotide)

นิวคลีโอไทด์มี 4 ชนิด คือ (A ; adenine, C ; cytosine, G ; guanine และ T ; thymine) เป็นวัตถุดิบที่จะนำมาต่อกันเป็นดีเอ็นเอสายใหม่ตามลำดับสารพันธุกรรมตั้งต้นของสายดีเอ็นเอแม่พิมพ์

2.5.1.5 เครื่องทำปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอร์เรส (Thermal cycler)

หรือเครื่องพีซีอาร์เป็นเครื่องเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องในการเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอ

2.5.2 การเพิ่มจำนวนยีน 16s rDNA ด้วยเทคนิคปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอร์เรส

การเพิ่มจำนวนยีนด้วยเทคนิคนี้ ใช้หลักการพื้นฐานในการสังเคราะห์ดีเอ็นเอสายใหม่จากสายดีเอ็นเอต้นแบบด้วยเอนไซม์ดีเอ็นเอโพลีเมอเรส ซึ่งสามารถสังเคราะห์ดีเอ็นเอได้คราวละ 2 สายพร้อมกันได้โดยใช้ไพรเมอร์ 1 คู่ ซึ่งปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอร์เรส ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ที่มีการหมุนเวียนต่อเนื่องกันไปภายใต้สภาวะที่เหมาะสมของแต่ละขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 Denaturing เป็นการแยกสายดีเอ็นเอต้นแบบจากสภาพสายคู่ให้กลายเป็นดีเอ็นเอสายเดี่ยว 2 เส้น ซึ่งขั้นตอนนี้จะใช้อุณหภูมิสูงประมาณ 92-95 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนที่ 2 Annealing เป็นขั้นตอนที่ลดอุณหภูมิลง เพื่อให้ไพรเมอร์เข้าจับกับดีเอ็นเอต้นแบบ ซึ่งไพรเมอร์ซึ่งเป็นดีเอ็นเอสายสั้นๆ ประกอบด้วยนิวคลีโอไทด์จำนวน 14-30 เบส (Oligonucleotide primer) และมีลำดับเบสเป็นคู่สมกับดีเอ็นเอต้นแบบ โดยในขั้นตอนนี้ต้องควบคุมอุณหภูมิให้ลดต่ำลงจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิ ณ จุดแยกตัว (Melting Temperature ; T_m) ของไพรเมอร์ (โดยทั่วไปจะต่ำกว่า T_m 1-2 องศาเซลเซียส) ซึ่งจะอยู่ในช่วงประมาณ 37-60 องศาเซลเซียส โดยไพรเมอร์จะถูกเติมให้มีความเข้มข้นสูงกว่าดีเอ็นเอต้นแบบมาก ดังนั้นการจับกันระหว่างไพรเมอร์กับดีเอ็นเอต้นแบบจึงมีโอกาสเกิดขึ้นมากกว่าการจับคู่กันเองของดีเอ็นเอต้นแบบซึ่งเป็นสายเดี่ยว

ขั้นตอนที่ 3 Extension เป็นขั้นตอนการสังเคราะห์ดีเอ็นเอสายใหม่ต่อจากส่วนปลาย 5' ของไพรเมอร์ตามข้อมูลบนดีเอ็นเอที่เป็นต้นแบบแต่ละสาย โดยอาศัยการทำงานของเอนไซม์

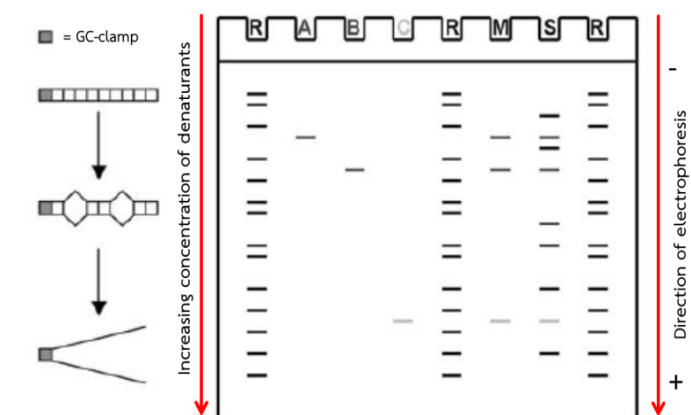
ดีเอ็นเอโพลีเมอร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลจากปฏิกิริยาการสังเคราะห์จะทำให้ได้ดีเอ็นเอสายใหม่ซึ่งมีไพรเมอร์เป็นส่วนประกอบอยู่ ขั้นตอนนี้จะใช้อุณหภูมิประมาณ 72-75 องศาเซลเซียสเพราะเป็นช่วงที่อุณหภูมิเหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ดีเอ็นเอโพลีเมอร์มากที่สุด

จากขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 3 นับเป็นจำนวนปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอร์เรส 1 รอบ (One cycle) และได้ผลผลิตเป็นดีเอ็นเอสายใหม่ที่มีลำดับเบสเป็นคู่สมกับดีเอ็นเอต้นแบบ โดยจะเพิ่มดีเอ็นเอขึ้นแบบทวีคูณ (Exponential) เมื่อเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอร์เรสจากขั้นที่ 1 ถึง 3 หมุนเวียนไปอีกหลายรอบก็จะเป็นการเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอได้อีกมาก และถ้าทำกระบวนการนี้ 20 รอบก็จะสามารถเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอได้ไม่น้อยกว่า 100,000 เท่า อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้วผลผลิตของปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอร์เรสที่เกิดขึ้นจะต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีเพราะเกิดการจับคู่กันเองระหว่างผลผลิตที่เกิดขึ้น และความเข้มข้นของเอนไซม์ดีเอ็นเอโพลีเมอร์เรสที่ลดลงระหว่างการทำปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอร์เรส

2.5.3 การวิเคราะห์ยีนจากปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอร์เรสโดยเทคนิคภาพพิมพ์พันธุกรรม

เทคนิคภาพพิมพ์พันธุกรรม หรือ ดีจีจีอี (DGGE; Denaturing Gradient Gel Electrophoresis) ได้ถูกนำมาใช้ในการบ่งบอกถึงความหลากหลายของยีนในประชากรแบคทีเรียตามความแตกต่างของลำดับเบสบนชิ้นส่วนดีเอ็นเอ ใช้หลักการแยกความแตกต่างของดีเอ็นเอด้วยกระแสไฟฟ้าผ่านตัวกลางชนิดโพลีอะคริลามายด์เจล (Polyacrylamide gel) ที่เตรียมให้มีความเข้มข้นของสารที่แตกต่างกันเป็นเกรเดียนต์ (gradient gel) โดยการเคลื่อนที่ของดีเอ็นเอบนแผ่นเจลจะหยุดตามความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารที่มีคุณสมบัติในการทำให้ดีเอ็นเอเสียสภาพที่ผสมอยู่ในเนื้อเจล ที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของสารจากส่วนบนของเจลน้อยไปสู่ส่วนล่างของเจลที่มีความเข้มข้นมาก ซึ่งสารที่มักใช้ในการทำให้ดีเอ็นเอเสียสภาพ ได้แก่ ยูเรียและฟอร์มาไมด์รวมไปถึงการใช้อุณหภูมิสูงในการทำลายพันธะระหว่างคู่เบส G-C ซึ่งความเข้มข้นหรือปริมาณของคู่เบสดังกล่าวที่มีในดีเอ็นเอของสิ่งมีชีวิตที่ต่างกันจะเคลื่อนที่บนเจลด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของยูเรียที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นตามระยะทางบนเกรเดียนต์เจล (Gradient gel) ดังภาพที่ 2.3

ดังนั้นเทคนิคภาพพิมพ์พันธุกรรมจึงสามารถนำมาใช้ในการแยกดีเอ็นเอของสิ่งมีชีวิตที่สนใจได้ แม้ดีเอ็นเอที่สกัดได้จะมีขนาดความยาวของดีเอ็นเอเท่ากันและมีความแตกต่างของลำดับเบสเพียงหนึ่งตำแหน่งก็ตาม ซึ่งจากหลักการดังกล่าวทำให้สามารถนำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้ได้ในการแยกความแตกต่างของสิ่งมีชีวิตด้วยยีนหนึ่งหรือใช้ในการแยกสิ่งมีชีวิตเป็นระดับกลุ่มประชากร ทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หรือตรวจสอบความหลากหลายของประชากรจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ น้ำเสีย หรือของเสียทางอุตสาหกรรมและการเกษตรรวมถึงทางการแพทย์ด้วย



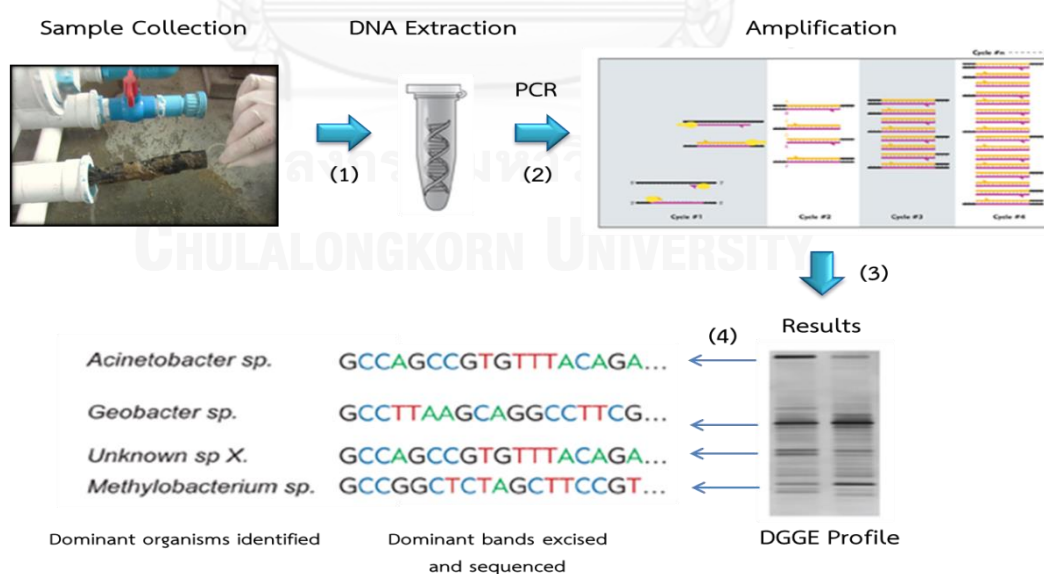
R = Reference pattern, A = Organism 1, B = Organism 2, C = Organism 3,

M = Mix of Organism 1,2 and 3, S = Unknown sample

(ที่มา: Temmerman และคณะ, 2004)

ภาพที่ 2.3 การเคลื่อนที่ของดีเอ็นเอที่มีลำดับเบสแตกต่างกันบนโพลีอะครีลาไมด์เจล

โดยขั้นตอนของเทคนิคดีจีจีมีทั้งหมด 4 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 การสกัดแยกดีเอ็นเอรวมทั้งหมด ขั้นตอนที่ 2 ทำการเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอบริเวณสับทกเอสดีเอ็นเอด้วยเทคนิคพีซีอาร์ ขั้นตอนที่ 3 การแยกสายของดีเอ็นเอจากตัวอย่างบนเกรเดียนต์เจล และขั้นตอนสุดท้าย คือ สกัดแยกชิ้นส่วนดีเอ็นเอที่ต้องการออกจากเจลและนำไปวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ด้วยเทคนิคดีเอ็นเอซีควนซิง (DNA Sequencing) ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ขั้นตอนโดยสรุปของการทำพีซีอาร์ดีจีจี

(ที่มา: ดัดแปลงจาก <http://www.envirolagek.com>)

2.6 ปลานิลและการเพาะเลี้ยงปลานิล

ปลานิลจัดเป็นปลาเศรษฐกิจที่สร้างรายได้ภายในประเทศและการส่งออก เนื่องจากเป็นปลาที่เพาะเลี้ยงได้ง่าย ปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดี เจริญเติบโตได้รวดเร็วจึงเป็นที่นิยมต่อการเพาะเลี้ยงของเกษตรกร ปลานิลไม่ใช่ปลาพื้นเมืองของประเทศไทย แต่นำเข้ามาจากประเทศญี่ปุ่น มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปแอฟริกา โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.6.1 สรีรวิทยาและอนุกรมวิธานของปลานิล

ปลานิลเป็นปลาน้ำจืดชนิดหนึ่ง จัดอยู่ในวงศ์ปลาหมอสี (Cichlidae) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Oreochromis niloticus* Linnaeus มีชื่อสามัญว่า Nile tilapia ลักษณะของปลานิลคือ มีริมฝีปากบนและล่างเสมอกัน บริเวณแก้มมีเกล็ด 4 แถว ลำตัวสีเขียวปนน้ำตาล มีลายพาดขวาง 9-10 แถบ มีครีบหลัง ครีบกันและครีบหางเป็นจุดขาว มีลายดำพาดขวางตามลำตัว ตรงกลางเกล็ดมีสีเข้ม ที่กระดูกแก้มมีจุดสีเข้มอยู่ 1 จุด และมีความยาวประมาณ 10-30 ซม. (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536)

การจัดลำดับอนุกรมวิธานของปลานิลเป็นดังนี้

Kingdom: Animalia

Phylum: Vertebrata

Class: Osteichthyes

Order: Perciformes

Family: Cichlidae

Genus: *Oreochromis*

Species: *Oreochromis niloticus*



ภาพที่ 2.5 ลักษณะของปลานิล *Oreochromis niloticus* Linnaeus

(ที่มา: <http://www.oratix.com>)

ปลานิลจัดเป็นปลาประเภทกินพืชและสัตว์เป็นอาหารรวมทั้งแบคทีเรียและพืชน้ำชนิดต่างๆ เช่น สาหร่ายแพลงก์ตอนพืชและแพลงก์ตอนสัตว์ โดยทั่วไปปลานิลชอบอาศัยอยู่รวมกันเป็นฝูงอยู่ได้ทั้งแหล่งน้ำจืดและแหล่งน้ำกร่อย เนื่องจากปลานิลมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้ดี จึงอาศัยอยู่ในแหล่งน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงกว้างมาก คือ 11 – 42 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ปลานิลยังสามารถอาศัยในน้ำได้อย่างปกติที่ความเค็มสูงถึง 20 พีพีที และจะเริ่มตายในแหล่งน้ำที่มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5 - 5.5 (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536)

2.6.2 การเพาะเลี้ยงปลานิล

ปัจจุบันเกษตรกรนิยมเพาะเลี้ยงปลานิลในเชิงเศรษฐกิจมากกว่าการเพาะเลี้ยงแบบยังชีพโดยเน้นที่การเพาะเลี้ยงแบบความหนาแน่นสูง ซึ่งผลผลิตปลาต้องมีน้ำหนักและขนาดตัวตามความต้องการของผู้บริโภค โดยอาหารที่ให้เป็นอาหารสำเร็จรูปที่มีโปรตีนสูงเป็นหลักและนิยมแปลงเพศปลาเพื่อให้ได้ผลผลิตที่คุ้มค่า โดยทั่วไปความหนาแน่นที่นิยมใช้ในการเพาะเลี้ยงปลานิล คือ 4,000 - 10,000 ตัวต่อเฮกเตอร์ (4 - 10 ตัวต่อตารางเมตร)

ปัจจัยที่มีผลต่อการกินอาหารของปลา ได้แก่

1) อุณหภูมิ ปลานิลจะกินอาหารได้ดีเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงกว่า 24 องศาเซลเซียสและปลานิลจะไม่กินอาหารและไม่เจริญเติบโตเมื่ออุณหภูมิของน้ำต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส และจะไม่วางไข่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เหมาะสมในการวางไข่อยู่ระหว่าง 26 - 29 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตอยู่ระหว่าง 19 - 28 องศาเซลเซียส และจะตายเมื่ออุณหภูมิเริ่มต่ำกว่า 8 องศาเซลเซียส (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536)

2) ขนาด ปลาที่มีขนาดเล็กจะกินอาหารมากกว่าปลาที่มีขนาดใหญ่ เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับน้ำหนักตัวแล้วในปลาชนิดเดียวกัน ดังนั้นปลาที่มีขนาดเล็กจะเจริญเติบโตและมีอัตราการแลกเนื้อดีกว่าปลาที่มีขนาดใหญ่

3) จำนวนความถี่ในการให้อาหาร ปลาที่มีขนาดเล็กควรให้อาหารแต่ละครั้งในปริมาณที่น้อยแต่บ่อยครั้งกว่าปลาขนาดใหญ่

4) ลักษณะสมบัติของน้ำ ในน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนละลายในระดับสูงกว่า 3 มก./ล. ปลาจะกินอาหารอย่างปกติ แต่หากปริมาณออกซิเจนลดลง การย่อยอาหารของปลาจะใช้เวลานานกว่าปกติ

ลักษณะสมบัติของน้ำที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงปลานิลดังนี้

1) ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ โดยในบ่อเพาะเลี้ยงปลา ค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 5 มก./ล. จนถึงจุดอิ่มตัว ถ้าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำเป็นเวลานานอาจส่งผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโตและถ้ามีปริมาณต่ำกว่า 1 มก./ล. สัตว์น้ำจะตายภายในไม่กี่ชั่วโมง ซึ่งปลานิลสามารถทนต่อสภาพน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำในช่วง 0-0.4 มก./ล. โดยออกซิเจนละลายน้ำต่ำกว่า 0.3 มก./ล. ปลาจะว่ายขึ้นสู่ผิวน้ำทำให้เกิดอาการเครียดและลดการเจริญเติบโต ดังนั้นปริมาณออกซิเจนที่ผิวน้ำไม่ควรต่ำกว่า 0.3 มก./ล. (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536)

2) อุณหภูมิ ปลานิลสามารถทนต่ออุณหภูมิได้ในช่วงกว้างคือที่อุณหภูมิ 11 – 42 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า 42 องศาเซลเซียส ปลาจะไม่สามารถอยู่ได้นานและอาจตายได้ เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส ปลาจะไม่กินอาหารและไม่เจริญเติบโตและที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส ปลาจะไม่วางไข่ โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตอยู่ในช่วง 19 – 28 องศาเซลเซียส (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536)

3) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เนื่องจากในสภาวะไร้ออกซิเจน แบคทีเรียบางชนิดสามารถใช้ซัลเฟอร์ในรูปซัลเฟตและสารประกอบซัลเฟอร์อื่นๆ ในรูปออกซิไดซ์ ซึ่งเปลี่ยนสารประกอบซัลเฟอร์เหล่านี้ให้อยู่ในรูปซัลไฟด์ทั้ง 3 รูปแบบได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ไอออน (HS^-) และไบซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) สัดส่วนแต่ละชนิดที่พบขึ้นกับค่าพีเอชของน้ำโดยน้ำที่มีพีเอชสูงโอกาสการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์จะต่ำและความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำจะลดลง ระดับความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทำให้ปลาตายได้ในช่วง 0.01-0.05 พีพีเอ็ม (ชะลอ ลัมสุวรรณ และพรเลิศ จันทรรักษ์กุล, 2547) และจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการของไมตรี ดวงสวัสดิ์ และจารุวรรณ สมศิริ (2528) พบว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์เพียงเล็กน้อยสามารถทำให้ปลาตายได้ภายในเวลา 48 ชั่วโมง และระบุว่าในบ่อเลี้ยงปลาไม่ควรมีไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิน 0.002 มก./ล.

4) พีเอช ปลานิลสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชได้ แต่ปลานิลจะเริ่มตายเมื่อน้ำมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4.5-5.0 เฉลี่ยร้อยละ 70 และปลานิลจะตายจนหมดเมื่อมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 3.5-4.5 ซึ่งปลานิลสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอช 7.2-8.3 (อุดม เรืองนพคุณ, 2550)

5) ค่าความเป็นด่าง น้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาควรมีสภาพต่างมากกว่า 20-40 มก./ล.ของแคลเซียมคาร์บอเนต (มันสิน ตันทุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2539) หรือควรอยู่ในช่วง

ระหว่าง 200-300 มก./ลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ในกรณีเติมปุ๋ยในบ่อเลี้ยงปลา (Camargo และคณะ, 2005)

6) ความกระด้าง ไม่ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำ แต่ความกระด้างของน้ำมีความสัมพันธ์กับค่าความเป็นด่างและพีเอช นอกจากนี้ความกระด้างของน้ำยังช่วยในการลดความเป็นพิษของโลหะหนัก ดังนั้นน้ำที่มีความกระด้างปานกลาง (75-150 มก./ล.) หรือสูง (150-300 มก./ล.) จึงมีความเหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ

7) แอมโมเนีย ในการเลี้ยงปลานิลควรควบคุมปริมาณแอมโมเนียไม่ให้สูงเกิน 2.5 มก. ไนโตรเจน/ล. เพราะถ้าแอมโมเนียมีปริมาณมากกว่า 2.5 มก.ไนโตรเจน/ล. จะทำให้ปลานิลเกิดความเครียดและเจริญเติบโตช้า (Hegazi และ Hasanein, 2010)

2.7 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 การเพิ่มสารอินทรีย์คาร์บอนในกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน

Chiu และ Chung (2003) ศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเพื่อเปลี่ยนไนเตรตเป็นก๊าซไนโตรเจนในกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน โดยใช้วิธีการวัดศักยภาพของไนโตรเจนทางชีวเคมี (Biochemical nitrogen potential) เพื่อหาค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสม เมื่อน้ำทิ้งหลังการบำบัดมีค่าความเข้มข้นของไนเตรตน้อยกว่า 50 มก.ไนเตรตไนโตรเจน/ล. โดยน้ำเสียที่ใช้ทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสารละลายโพแทสเซียมไนเตรต ความเข้มข้นของไนเตรตเริ่มต้นเท่ากับ 25 50 100 และ 200 มก.ไนเตรตไนโตรเจน/ล.และเติมสารละลายโซเดียมอะซิติกเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน จากผลการทดลองพบว่า เมื่อไนเตรตมีความเข้มข้นเท่ากับ 25 50 100 และ 200 มก.ไนเตรตไนโตรเจน/ล. จะมีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเป็น 5.3 4.7 3.9 และ 2.6 ตามลำดับ

Hamlin และคณะ (2008) ศึกษาการบำบัดไนเตรตในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจัดแบบปิด โดยเปรียบเทียบการใช้สารอินทรีย์คาร์บอน 4 ชนิด ได้แก่ เมทานอล กรดอะซิติก กากน้ำตาล และแป้งที่ผ่านการย่อย (Hydrolyzed starch) ใช้ น้ำเสียที่ผ่านถังไนทริฟิเคชันแล้วเข้าสู่ถังดีไนทริฟิเคชัน ปริมาตร 1.89 ลบ.ม. และบรรจุตัวกลางพลาสติกในถังดีไนทริฟิเคชันปริมาตร 1 ลบ.ม. โดยจะผ่านน้ำเสียเข้าทางด้านล่างของถังซึ่งมีอัตราการไหลเท่ากับ 10 ลิตร/นาที่ และความเข้มข้นของไนเตรตขาเข้าสูงสุดเท่ากับ 50 มก.ไนเตรตไนโตรเจน/ล. จากการทดลองพบว่าสารอินทรีย์คาร์บอนทั้ง 4

ชนิดมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรตในน้ำเสียได้ไม่แตกต่างกัน โดยเมทานอล กรดอะซิติก และกากน้ำตาล มีอัตราดีไนทริฟิเคชันเท่ากับ 670 กรัมไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน แต่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่างกันคือ 2:1 7:1 และ 2.5:1 ตามลำดับ ส่วนแบ่งที่ผ่านการย่อยมีอัตราดีไนทริฟิเคชันเท่ากับ 680 กรัมไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมเป็น 2.5:1 และเมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายพบว่า กากน้ำตาลมีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด จึงเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนที่น่าจะสนใจในการศึกษาต่อไป

เอกชัย มาลาพล (2551) ศึกษาผลของการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนต่ออัตราดีไนทริฟิเคชันของดินตะกอนจากบ่อเลี้ยงกุ้งในสภาวะห้องปฏิบัติการ ด้วยการบรรจุดินหนา 8 ซม. ลงในถังกระจกที่มีน้ำทะเลความเค็ม 20 พีเอสยู ปริมาตร 7 ลิตร การทดลองประกอบด้วยชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน และชุดทดลองที่มีการเติมเมทานอลหรือกลูโคส โดยแปรผันค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเป็น 1:1 5:1 10:1 และ 20:1 ผลการทดลองพบว่า การเติมสารอินทรีย์คาร์บอนสามารถเพิ่มอัตราดีไนทริฟิเคชันของดินตะกอนได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยการใช้เมทานอลและกลูโคสให้ผลไม่แตกต่างกัน อัตราดีไนทริฟิเคชันเฉลี่ยของถังชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนมีค่าเท่ากับ 386 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม.ต่อวัน เมื่อมีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจาก 1:1 เป็น 20:1 จะทำให้อัตราดีไนทริฟิเคชันเพิ่มขึ้นจาก 516 เป็น 2,849 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน นอกจากนี้การคำนวณอัตราดีไนทริฟิเคชันสูงสุด (DNR_{max}) โดยใช้สมการโคเนติกส์ พบว่าอัตราดีไนทริฟิเคชันสูงสุดของดินตะกอนจากบ่อเลี้ยงกุ้งที่มีการเติมเมทานอลหรือกลูโคสมีค่าเท่ากับ 3,333 และ 5,000 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน ตามลำดับ

2.7.2 การใช้วัสดุตัวกลางเป็นตัวยึดเกาะของจุลินทรีย์และช่วยในการบำบัดไนเตรต

Boley และคณะ (2000) ศึกษาการบำบัดไนเตรตในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยใช้ น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไนเตรตในช่วง 5-40 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่อุณหภูมิ 20-25 องศาเซลเซียส โดยใช้เม็ดโพลีเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นตัวกลาง 3 ชนิด ได้แก่ PHB ($[C_4H_6O_2]_n$), PCL ($[C_6H_{10}O_2]_n$) และ Bionolle ($[C_6H_8O_4]_n$) โดยโพลีเมอร์แต่ละชนิดมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 1.49 0.87 และ 1.22 ตร.ม./ล. ตามลำดับโดยโพลีเมอร์จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางเพื่อก่อให้เกิดไบโอฟิล์มของกลุ่มแบคทีเรีย และเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนให้กับระบบ ดังนั้น การศึกษานี้จึงไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนจากแหล่งภายนอก จากการศึกษาพบว่า อัตราการบำบัดไนเตรตของ PCL มีอัตราการบำบัดสูงสุดคือ 21-166 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./ชม. ส่วนอัตราการบำบัดของ PHB และ Bionolle เท่ากับ 7 - 41 และ 1.5-10 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./ชม. ตามลำดับ แต่

การใช้ PCL และ Bionolle เป็นตัวกลางจะต้องทำการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เพื่อปรับพีเอชของระบบให้สูงขึ้น ซึ่งการบำบัดด้วยวิธีดังกล่าวต้องใช้ต้นทุนในการบำบัดสูง

ัญญา พันธุ์ฤทธิ์ดำ (2541) ทำการทดลองระบบดีไนทริฟิเคชันในการเลี้ยงกุ้งกุลาดำด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด ซึ่งการทดลองประกอบด้วยบ่อเลี้ยงกุ้งรูปวงกลมความจุ 9 ลบ.ม. และบ่อกรองชีวภาพแบบใช้ออกซิเจนขนาด $2 \times 2 \times 1.7$ ม. ที่มีวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ Bio-polymaTM โดยมีอัตราหมุนเวียนน้ำเข้าระบบบำบัด 7 รอบ/วัน และมีระบบกรองชีวภาพสภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งประกอบด้วยคอลัมน์ลดปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกใช้พลาสติกทรงกลมที่มีรูพรุนเป็นวัสดุกรอง และใช้ดินจากป่าชายเลนซึ่งเป็นแหล่งดีไนทริฟายอิงแบคทีเรีย ช่วงที่ 2 ใช้เปลือกหอยนางรมและดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียที่ทำการคัดพันธุ์ โดยในการทดลองช่วงที่ 1 และ 2 ใช้เอทานอลเป็นแหล่งคาร์บอน ส่วนช่วงที่ 3 ใช้เมทานอล ผลการทดลองพบว่าสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนียและไนไตรต์ได้ในระดับ 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. และ 0.2 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ แต่อัตราการบำบัดไนเตรตค่อนข้างต่ำและมีการแปรผัน

Menasveta และคณะ (2001) ได้ดำเนินการทดลองต่อจาก ัญญา พันธุ์ฤทธิ์ดำ (2541) โดยใช้ระบบเดียวกันแต่เปลี่ยนแหล่งคาร์บอนจากเอทานอลเป็นเมทานอลในอัตราที่เพิ่มขึ้น ผลการทดลองพบว่า สามารถลดปริมาณไนเตรตจาก 165 มก.ไนโตรเจน/ล.ลงเหลือ 50 มก.ไนโตรเจน/ล. ภายในระยะเวลา 9 สัปดาห์ แต่ระบบดังกล่าวมีต้นทุนการบำบัดค่อนข้างสูง เนื่องจากจำเป็นต้องใช้ก๊าซไนโตรเจนซึ่งมีราคาแพงเพื่อลดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและทำให้เกิดสภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งสามารถเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันขึ้นในระบบที่ได้สร้างขึ้น

ชลธิชา พลายชุม (2553) พัฒนาระบบการบำบัดไนเตรตในถังดีไนทริฟิเคชัน โดยทำการทดลองแบบแบทช์ในถังกระจกที่บรรจุวัสดุเป็นชั้นหนา 5 ซม. เติมน้ำจืดที่มีความเข้มข้นไนเตรต 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ปริมาตร 8 ลิตร แบ่งการทดลองเป็น 3 ช่วง โดยการทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุทดแทนธรรมชาติในถังดีไนทริฟิเคชัน ได้แก่ ดินธรรมชาติ (ชุดควบคุม) ทราาย หินพัมมิส และทรายเทียม ทำการเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตเท่ากับ 5:1 และผลการทดลองพบว่า หินพัมมิสเป็นวัสดุที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นตัวกลางในถังดีไนทริฟิเคชัน การทดลองช่วงที่ 2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดไนเตรตในถังดีไนทริฟิเคชันที่บรรจุหินพัมมิส และพบว่าเมทานอลมีความเหมาะสมมากกว่ากากน้ำตาล และศึกษาอัตราส่วนซีโอดีของเมทานอลต่อไนเตรตไนโตรเจน พบว่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับบำบัดไนเตรตคือ 5:1 และผลของการเติมเมทานอลลงในชั้นน้ำกับชั้นหินพัมมิสไม่แตกต่างกัน จึงเลือกใช้การเติมเมทานอลในชั้นน้ำเนื่องจากสะดวกต่อการใช้งาน

สำหรับการทดลองครั้งที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรดจากระบบเพาะเลี้ยงปลานิลของถังดีไนทริฟิเคชันที่เดินระบบการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองครั้งที่ 1 และ 2 และทำการเดินระบบเป็นเวลา 3 เดือน พบว่าถังดีไนทริฟิเคชันมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรดมากกว่าร้อยละ 80 โดยมีอัตราดีไนทริฟิเคชันเฉลี่ย $6,311.29 \pm 945.52$ มก.ไนโตรเจน/ตร.ม.พื้นที่ผิวก้นถัง/วัน

2.7.3 การบำบัดไนเตรดด้วยระบบดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว

อำไพเทพิน สิงห์พันธุ์ (2543) ทำการพัฒนาระบบบำบัดไนเตรดแบบท่อยาวที่ใช้กระบวนการดีไนทริฟิเคชัน โดยมีแนวคิดที่จะให้แบคทีเรียส่วนต้นของท่อลดปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำโดยกระบวนการหายใจของแบคทีเรีย ให้มีค่าต่ำลงจนถึงระดับที่แบคทีเรียในส่วนปลายท่อจะเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันได้ ซึ่งวิธีนี้ทำให้ไม่ต้องใช้ก๊าซไนโตรเจนซึ่งมีราคาแพงในการลดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ จากการทดลองระยะแรกได้ใช้เปลือกหอยนางรมทุบเป็นวัสดุกรอง แต่เกิดการอุดตันเนื่องจากมวลชีวภาพ จึงเปลี่ยนวัสดุกรองมาใช้วัสดุกรองทรงกลมขนาดเล็ก (Super Bioball) โดยระบบบำบัดไนเตรดแบบท่อยาวที่สร้างขึ้นประกอบด้วยสายยางพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ยาว 50 เมตร บรรจุวัสดุกรองทรงกลมจำนวน 2,870 ลูก จากผลการทดลองพบว่าสามารถบำบัดไนเตรดในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งที่มีปริมาณไนเตรดสะสมอยู่สูงได้ โดยจำเป็นต้องมีการเติมแหล่งคาร์บอนตลอดเวลา ซึ่งพบว่าหากไม่เติมเมทานอลระบบจะมีประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรดเพียงร้อยละ 2.96 และเมื่อทดลองเติมเมทานอลในอัตรา 4.5 มล./ชม. พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 31.08 และเมื่อหยุดเติมเมทานอลประสิทธิภาพการบำบัดลดลงเหลือร้อยละ 6.61 โดยทั้งสามช่วงการทดลองเป็นการเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันแบบไม่สมบูรณ์

สุวิมล ตันทสุกิจวณิช (2545) ได้ศึกษาพัฒนาระบบบำบัดไนเตรดแบบท่อยาวต่อจากอำไพเทพิน สิงห์พันธุ์ (2543) โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 การทดลอง การทดลองแรกเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราการใช้ออกซิเจนของแบคทีเรีย อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน และการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในถังปฏิกรณ์ขนาด 1 ลิตรที่ภายในบรรจุวัสดุกรองทรงกลมและน้ำเสียเทียมที่มีความเข้มข้นไนเตรดตั้งแต่ 20-60 มก.ไนเตรด-ไนโตรเจน/ล. และทำการเติมเมทานอลเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าแบคทีเรียในระบบสามารถลดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลงได้ด้วยอัตรา 1.25-2.30 ไมโครกรัมออกซิเจน/ไบโอบอล/ชม. และค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) ในขณะเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันอยู่ระหว่าง 0 ถึง -100 มิลลิโวลต์ และเมื่อค่า ORP ต่ำกว่า -300 มิลลิโวลต์ จะเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ขึ้นในระบบ การทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน

ในระบบบำบัดในเทรตแบบท่อยาวความยาว 25 ม. ซึ่งภายในบรรจุวัสดุทรงกลม จากผลการทดลองพบว่ายังมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากท่อที่สั้นเกินไปทำให้ระยะเวลาพักเก็บน้ำไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์ ดังนั้นในการทดลองที่ 3 จึงได้ทำการเพิ่มความยาวท่อเป็น 50 ม. และเพิ่มระยะเวลาพักเก็บน้ำเป็น 4.2 ชม. พบว่าระบบสามารถบำบัดในเทรตได้อย่างสมบูรณ์ โดยมีค่า ORP อยู่ระหว่าง 0 ถึง -200 มิลลิโวลต์ และเมื่อนำระบบบำบัดในเทรตมาต่อเข้ากับบ่อเลี้ยงกุ้งขนาด 352 ลิตร พบว่าสามารถบำบัดในเทรตโดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 84-97 โดยเป็นปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์

วิลาสินี ไตรยราช (2546) ได้ศึกษาพัฒนาระบบบำบัดในเทรตแบบท่อยาวต่อจากสุวิมล ตันทสุกิจวนิช (2545) โดยระบบบำบัดดังกล่าวสร้างขึ้นจากท่อสายยางพีวีซี เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม. ความยาว 50 ม. ภายในบรรจุวัสดุพลาสติกทรงกลมไบโอบอลจำนวน 2,860 ลูก และมีการเติมเมทานอลร้อยละ 5 ในอัตราเร็ว 10 มล./ชม โดยการเติมเมทานอลจะถูกควบคุมโดยอัตโนมัติจากค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) ที่มีการตรวจวัดจากหัวตรวจวัดบริเวณปลายท่อ และมีการปรับตั้งระบบให้หยุดเติมเมทานอลเมื่อค่า ORP ลดต่ำกว่าที่ตั้งไว้ ทำให้ระบบท่อยาวสามารถบำบัดในเทรตได้อย่างสมบูรณ์ และทำการติดตั้งระบบท่อยาวเข้ากับบ่อเลี้ยงพ่อแม่พันธุ์กุ้งกุลาดำที่เป็นบ่อรูปกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ม. และมีการเชื่อมต่อเข้ากับบ่อบำบัดไนทริฟิเคชัน มีปริมาตรน้ำ 6,200 ลิตร ความเค็ม 25 พีเอสยู และมีการหมุนเวียนน้ำระหว่างบ่อเลี้ยงและบ่อบำบัดตลอดเวลา และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าระบบบำบัดในเทรตสามารถควบคุมปริมาณในเทรตได้เป็นอย่างดี

รุ่งนภา สุทธิศรี (2549) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับการเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบหนาแน่นสูงในโรงเรือน โดยระบบมีองค์ประกอบ 5 ส่วน ได้แก่ (1) บ่อเลี้ยงกุ้งความจุ 3,000 ลิตร (2) ระบบกรองตะกอนด้วยไส้กรองขนาด 5 ไมครอน (3) ระบบแยกตะกอนโปรตีนและไขมัน (4) บ่อบำบัดไนทริฟิเคชันที่บรรจุใยกรอง BiopolymaTM และ (5) ระบบบำบัดในเทรตแบบท่อยาวที่ทำมาจากท่อพีวีซีภายในบรรจุตัวกลางพลาสติกทรงกลม (bioball) สำหรับช่วงตอนต้นของท่อยาวจะมีการเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนให้กับดีไนทริฟายอิงแบคทีเรีย และใช้หัวตรวจวัดค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันควบคุมปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน ทำการเพาะเลี้ยงลูกกุ้งที่ความหนาแน่นสูง 150 ตัว/ตร.ม. เป็นระยะเวลา 132 วัน ในน้ำทะเลความเค็ม 25 พีเอสยู พบว่าการใช้ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสามารถควบคุมคุณภาพน้ำให้อยู่ในสภาพที่ดีตลอดการเลี้ยงโดยไม่จำเป็นต้องทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำ และน้ำภายหลังการเลี้ยงสามารถนำกลับมาใช้ใหม่สำหรับการเลี้ยงกุ้งในรอบต่อไปได้

ทยากร สุวรรณรัตน์ (2552) ทำการออกแบบระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วง โดยช่วงที่ 1 เป็นการอนุบาลลูกปลาวัยอ่อนในโรงเรือนที่ระบบประกอบด้วยบ่อเพาะเลี้ยงขนาด 2 ลบ.ม. ภายในบ่อมีกระชังไนลอนตาถี่ขนาด 0.32 ลบ.ม. และตัวกรองชีวภาพ BioCord™ ความยาว 30 ม. ทำการอนุบาลลูกปลาวัยอ่อนในระยะเวลา 24 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ พบว่าระบบไม่สามารถควบคุมคุณภาพน้ำได้ จึงได้ทำการนำตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันมาใส่ในถังแยกออกจากบ่อเลี้ยงและเพิ่มผ้ากรองไนลอนตาถี่สำหรับแยกตะกอน พบว่าปลา มีอัตราการรอดร้อยละ 85 และมีอัตราการเจริญเติบโตใกล้เคียงกับปลาที่เพาะเลี้ยงในฟาร์มเลี้ยงปลานิลทั่วไป สำหรับการทดลองที่ 2 เป็นการประเมินประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในการเพาะเลี้ยงปลาขนาดตลาดในโรงเรือน ระบบประกอบด้วยบ่อเพาะเลี้ยงที่มีตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันในบ่อและระบบดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว ทำการทดลองโดยเพาะเลี้ยงปลาที่มีความหนาแน่นเริ่มต้น 5 กก./ลบ.ม. เป็นเวลา 81 วันโดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ พบว่าระบบทดลองที่มีการบำบัดแบบไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตให้ต่ำกว่า 0.7 0.76 และ 16.94 มก.ไนโตรเจน/ล.ตามลำดับ และมีอัตราการรอดร้อยละ 92 และมีอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยเท่ากับ 1.03 ก./วัน ซึ่งสูงกว่าบ่อควบคุมที่มีค่าเท่ากับ 0.8 ก./วัน

2.7.4 การศึกษาความหลากหลายของแบคทีเรียโดยใช้เทคนิคพีซีอาร์-ดีจีจีจี

สุธาสิณี อ่วมจันทร์ (2546) ศึกษาองค์ประกอบชนิดของแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันและถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชัน (NR และ DNR) สำหรับใช้ในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งดำเนินการทดลองด้วยถังปฏิกรณ์สองถังที่เหมือนกัน โดยจัดให้ถังไนทริฟิเคชันมีการพ่นอากาศอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชัน ส่วนถังดีไนทริฟิเคชันควบคุมให้ภายในถังมีสภาวะไร้อากาศซึ่งจะเหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาดีนไนทริฟิเคชัน ผลการทดลองพบว่าแบคทีเรียกลุ่มเด่นที่พบในทั้ง 2 ถังร่วมกัน ได้แก่ *Cytophaga-Flavobacterium-Bacteroides* (CFB) group bacterium กลุ่มเด่นที่พบในถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันได้แก่ *Alpha-proteobacterium*, CFB group bacterium และ *Methylobacterium* sp. ส่วนแบคทีเรียชนิดเด่นในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันได้แก่ *Bacteroidetes* bacterium(CFB) group bacterium, *Desulfobulbus* sp. และ *Pseudomonas* sp.

Grommen และคณะ (2005) ศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียและการเปลี่ยนแปลงกลุ่มประชากรของแอมโมเนียออกซิไดซ์ซึ่งแบคทีเรีย โดยการนำหัวเชื้อไนทริไฟอิงที่มีจำหน่ายมาทำการเลี้ยงในน้ำจืดและน้ำทะเลเทียมเป็นเวลา 2 เดือน และสุ่มตัวอย่างตัวกรองมาตรวจวัดอัตราการ

บำบัดแอมโมเนีย พบว่าตัวกรองจากน้ำเค็มมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับ 308 ± 34 มก. ไนโตรเจน/ตัวกรอง/วัน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าตัวกรองจากน้ำจืดที่มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับ 389 ± 74 มก. ไนโตรเจน/ตัวกรอง/วัน สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCR-DGGE พบแบคทีเรียกลุ่ม *Nitrosomonas marina* spp. จากทั้งน้ำจืดและน้ำเค็ม โดยเชื้อจากถังปฏิกรณ์น้ำเค็มพบแถบ ดีเอ็นเอที่เห็นได้ชัดเจน 1 แถบ ในขณะที่น้ำจืดเมื่อทำการเลี้ยงเชื้อเป็นเวลา 1 เดือนพบแถบดีเอ็นเอ เพิ่มขึ้น 4-7 แถบ แสดงว่าการเลี้ยงเชื้อในน้ำเค็มจะคัดเลือกแบคทีเรียบางกลุ่มที่สามารถอาศัยอยู่ได้เท่านั้น

Jian และคณะ (2008) ศึกษาความหลากหลายของแบคทีเรียในชั้นตะกอนของแม่น้ำ Guanting Reservoir ในประเทศจีนด้วยเทคนิค PCR-DGGE โดยทำการเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอในช่วง สาย 16S rDNA ซึ่งแยกตามความลึกของชั้นตะกอนดิน โดยความลึกที่ 5 และ 35 ซม. พบแบคทีเรีย กลุ่ม *Acidobacteria* ในปริมาณน้อย แต่ที่ความลึก 69 ซม. พบแบคทีเรียกลุ่ม *Nitrospirae* นอกจากนั้นที่ระดับความลึกของชั้นตะกอนดินต่างๆ ยังพบแบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ เช่น *Acinobacteria*, *Firmicute*, *Chloroflexi*, *Gemmatimonadates*, *Proteobacteria* และ *Verrucomicrobia*

วลัยภรณ์ วุฒิเมธา (2551) ศึกษาจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ยูเอเอสบี ด้วยเทคนิคการเพิ่มจำนวนในช่วงสายของยีน 16S rDNA ร่วมกับ PCR-DGGE พบว่าทั้งระยะเวลาที่กักเก็บและภาระ บรรทุกอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณและชนิดของจุลินทรีย์ ในระบบ โดยจุลินทรีย์กลุ่มเด่นที่พบในถังปฏิกรณ์คือ *Bacteroidetes*, *Thermomicrobia* และ *Firmicutes* ซึ่งมีการกระจายตัวอยู่ในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นและในทุกอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรด ที่ระยะเวลาที่กักเก็บน้ำ 24 และ 4 ชม. ส่วนจุลินทรีย์กลุ่มย่อยที่พบคือ *Nitrospira*, *Acidobacteria*, *Actinobacteria*, *Deltaproteobacteria*, *Chlorobi*, *Betaproteobacteria* และ *OP8* ซึ่งจัดเป็น จุลินทรีย์ในกลุ่มไร้อากาศทั้งสิ้น

Sun และคณะ (2009) ศึกษาจุลินทรีย์ในเม็ดตะกอนจากระบบอีจีเอสบีแบบอัตรา สูง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์และใช้หัวเชื้อจากระบบยูเอเอสบีที่บำบัดน้ำเสียโรงงานแป้งมัน และ ทำการศึกษาจุลินทรีย์ในเม็ดตะกอนด้วยเทคนิคฟิชอาร์ดีจีจีไอและเทคนิค fluorescent in situ hybridization (FISH) พบกลุ่มจุลินทรีย์ คือ *Methanocorpusculum*, *Methanobacterium* และ *Methanosaeta*

สรุปประเด็นสำคัญจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การศึกษาค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP)

พารามิเตอร์ที่สำคัญในการตรวจสอบปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน ได้แก่ ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) โดยค่า ORP ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์นั้นควรอยู่ในช่วงระหว่าง -200 ถึง -300 มิลลิโวลต์ เนื่องจากพบว่าเมื่อระบบไม่มีไนเตรตค่า ORP จะมีการลดลงอย่างรวดเร็วและพบว่าที่ค่า ORP ต่ำกว่า -300 มิลลิโวลต์ จะมีปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้นในระบบ ดังนั้นเมื่อระบบมีการบำบัดไนเตรตหมดลงการเติมไนเตรตในถังปฏิกรณ์จะทำให้ค่า ORP กลับเพิ่มสูงขึ้นมาจึงเป็นการช่วยยับยั้งการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันได้

2. การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน

สามารถคำนวณได้จากอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน (Denitrification rate : DNR) โดย DNR จะมีอัตราเร็วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาการทดลอง ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากปริมาณแบคทีเรียที่เพิ่มจำนวนขึ้นทำให้ค่า DNR เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดในระบบบำบัดไนเตรตแบบท่อยาวที่ไม่สามารถคำนวณ DNR ที่ถูกต้องภายในระบบได้ เนื่องจากในบริเวณส่วนต้นของท่อยาวจะทำหน้าที่ลดออกซิเจนและที่ส่วนกลางจนถึงส่วนปลายของท่อจะเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน ซึ่งค่า DO จะลดลงเรื่อยๆ ตามระยะทางของท่อทำให้ไม่ทราบถึงช่วงระยะความยาวที่แน่นอนของท่อส่วนที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันได้ การคำนวณ DNR จึงทำได้ยาก

3 การศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน (C:N) ในระบบที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันได้ จะมีค่าไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับสถานะของระบบ เนื่องจากแบคทีเรียที่อยู่ในระบบบำบัดจะต้องการแหล่งคาร์บอนส่วนหนึ่งไปใช้ในการหายใจเพื่อลด DO และต้องการคาร์บอนอีกส่วนหนึ่งเพื่อใช้ในการกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน ทำให้ค่า C:N ที่ได้จากการทดลองไม่เท่ากัน

4. การศึกษาระยะเวลากักเก็บน้ำ

เนื่องจากระบบท่อยาวมีการไหลของน้ำในทิศทางเดียว (plug-flow) ระยะเวลาการกักเก็บน้ำในระบบจึงขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำเข้าและออกจากท่อยาวร่วมกับความยาวของท่อ โดยถ้าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในระบบท่อยาวเพียงพอแต่หากระยะเวลากักเก็บน้ำหรือระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไม่เพียงพอส่งผลให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันหยุดลงเพียงขั้นตอนที่เกิด

การเปลี่ยนแปลงไนเตรตไปเป็นไนไตรต์ ทำให้เกิดการสะสมของไนไตรต์ในระบบท่อยาว ดังนั้นควรจะให้มีระยะเวลาพักเก็บน้ำที่เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์

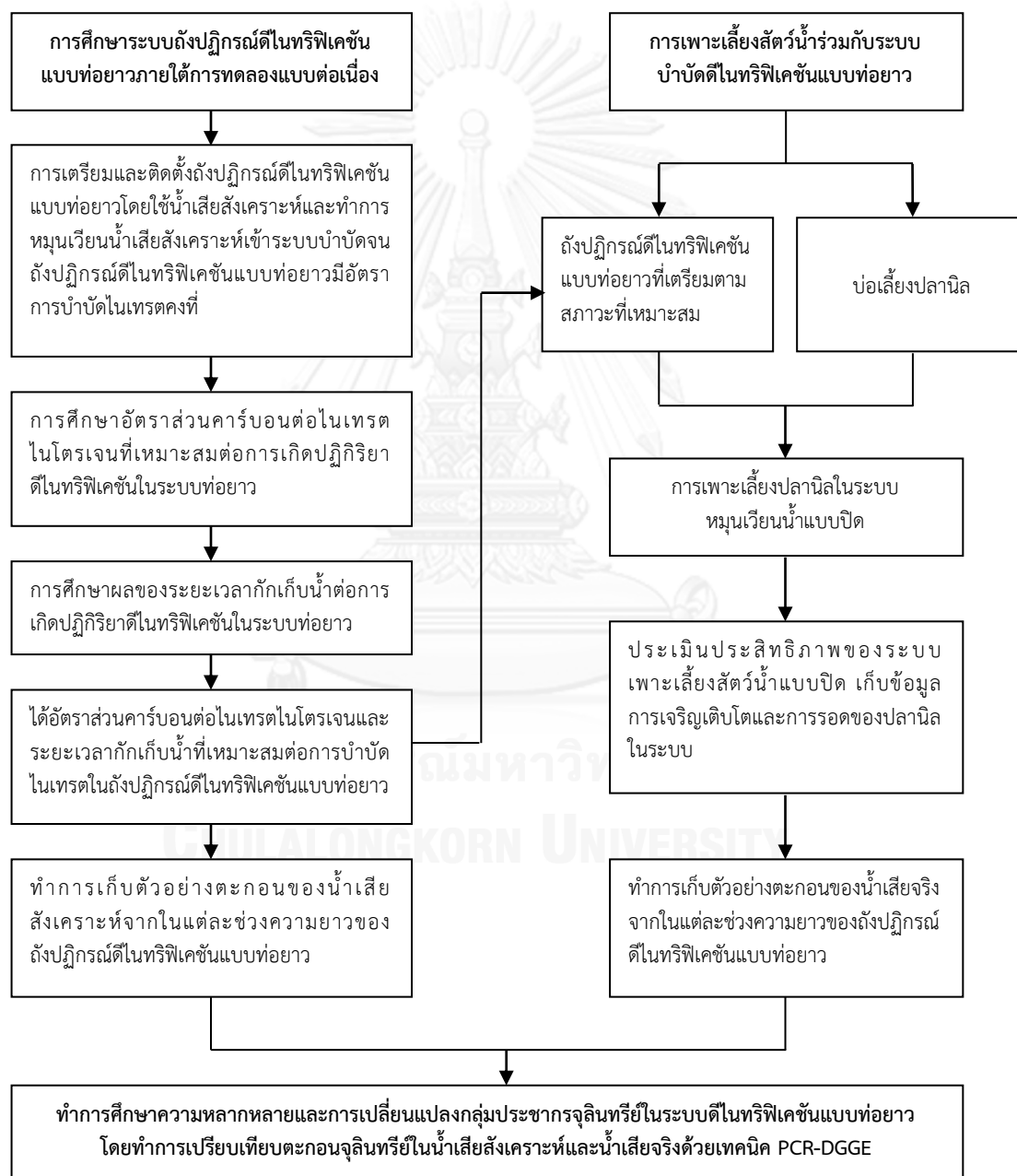
5. การศึกษาจุลินทรีย์ด้วยเทคนิคทางชีววิทยาโมเลกุล

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าได้มีการติดตามการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศด้วยเทคนิคทางชีวโมเลกุลมากมาย เช่น พีซีอาร์ดีจีจีอีหรือ เทคนิค fluorescent in situ hybridization (FISH) เป็นต้น โดยการจะเลือกใช้เทคนิคใดนั้นอาจต้องคำนึงถึงสภาพแวดล้อมของระบบ และควรศึกษาจากหลายๆ งานวิจัยมาประกอบกันถึงเทคนิคและผลที่ได้ว่าตรงตามวัตถุประสงค์และการลงทุนหรือไม่ ซึ่งการนำความรู้ทางชีวโมเลกุลมาใช้อธิบายกลไกการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์ในระบบเนื่องจากจุลินทรีย์เป็นปัจจัยที่สำคัญในการทำงานในระบบบำบัดน้ำเสียที่มีอยู่ในปัจจุบัน

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง



ภาพที่ 3.1 สรุปแนวทางการทดลองในงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้เดินระบบการทดลองที่ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของจุลินทรีย์ด้วยเทคนิคระดับโมเลกุลที่ห้องปฏิบัติการชีววิทยาระดับโมเลกุล ณ อาคารสรีรวิทยา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และห้องปฏิบัติการศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งการทดลองเป็น 4 ช่วงดังนี้

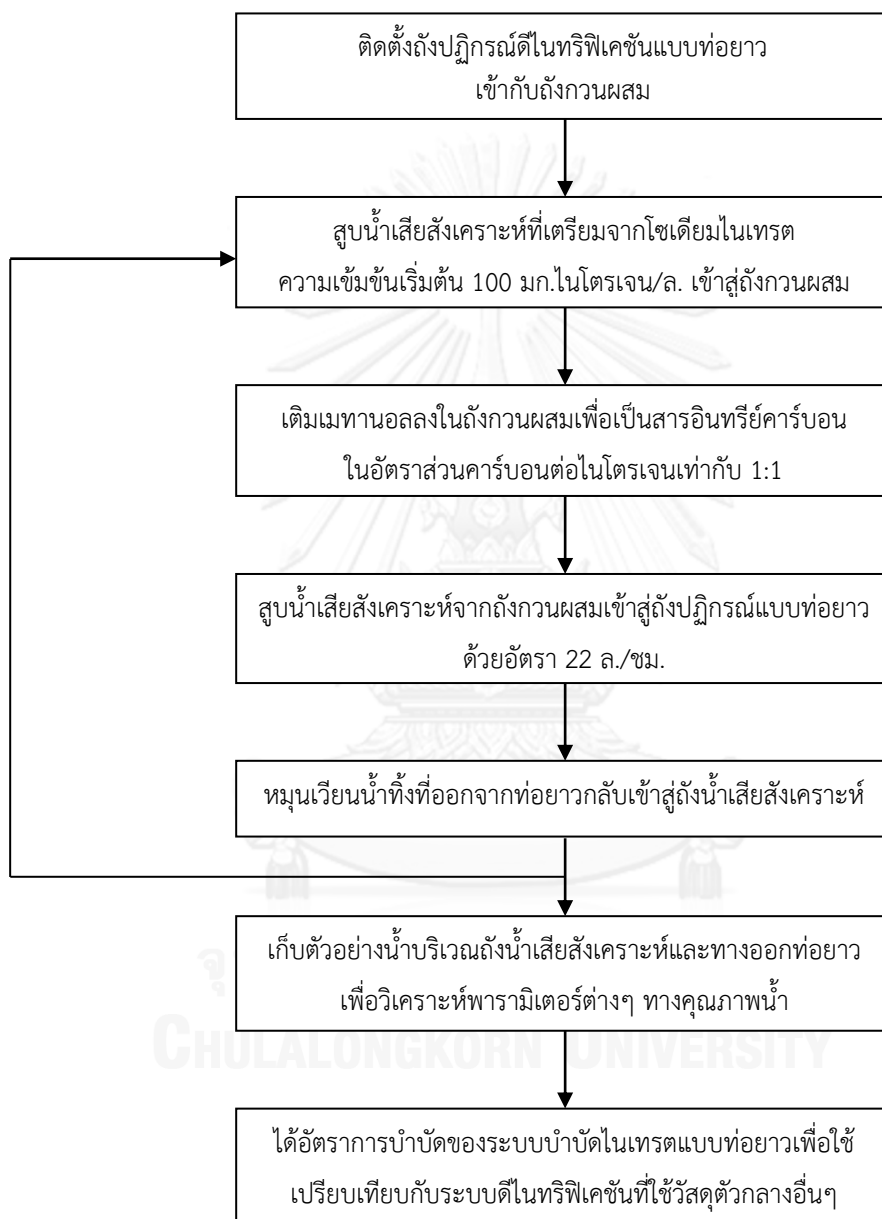
การทดลองช่วงที่ 1 การเตรียมและติดตั้งถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว โดยเป็นการเชื่อมต่อชุดถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวเข้ากับถังกวนผสมและถังบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเดินระบบต่อเนื่องและหมุนเวียนน้ำเสียสังเคราะห์เข้าระบบจนถึงปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวมีอัตราการบำบัดไนเตรตคงที่ ดังมีรายละเอียดแสดงด้วยแผนภาพที่ 3.2

การทดลองช่วงที่ 2 เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตในระบบท่อยาว โดยทำการทดลองต่อเนื่องจากการทดลองช่วงที่ 1 และแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อย ได้แก่ การศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว และการศึกษาผลของระยะเวลาพักเก็บน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว ดังมีรายละเอียดแสดงด้วยแผนภาพที่ 3.3

การทดลองช่วงที่ 3 เป็นการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจริงจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว โดยทำการเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์ของระบบบำบัดดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวเข้ากับบ่อเลี้ยงปลาจำลองขนาดเล็ก ที่ดำเนินการด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในถังไร์ดินในโรงเรือน และเดินระบบการทดลองแบบต่อเนื่องตามสภาวะที่เหมาะสมด้วยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนและระยะเวลาพักเก็บน้ำจากการทดลองช่วงที่ 2 ดังมีรายละเอียดแสดงด้วยแผนภาพที่ 3.4

การทดลองช่วงที่ 4 เป็นการศึกษาความหลากหลายและการเปลี่ยนแปลงกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว ระหว่างดำเนินการทดลองช่วงที่ 2 และ 3 โดยใช้เทคนิคพีซีอาร์-ดีจีจีอี (PCR-DGGE)

การทดลองช่วงที่ 1 : การเตรียมสภาพตัวกรองชีวภาพดีไนทริฟิเคชันและติดตั้ง
ถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว



ภาพที่ 3.2 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 1

การทดลองช่วงที่ 2 : ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตในระบบท่อยาว

การทดลองที่ 2.1 : อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน
ในระบบท่อยาว

เดินระบบการทดลองต่อจากช่วงที่ 1 แต่แปรผันปริมาณการเติมเมทานอลเข้าถังกวนผสม
จนมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนแตกต่างกัน 3 ระดับได้แก่ 1:1 2:1 และ 5:1

เปรียบเทียบการทำงานของระบบบำบัดไนเตรตแบบท่อยาวจำนวน 3 รอบ

ครั้งที่ 1 C:N เท่ากับ 1:1
ระยะเวลาเก็บน้ำเท่ากับ 2 ชม.

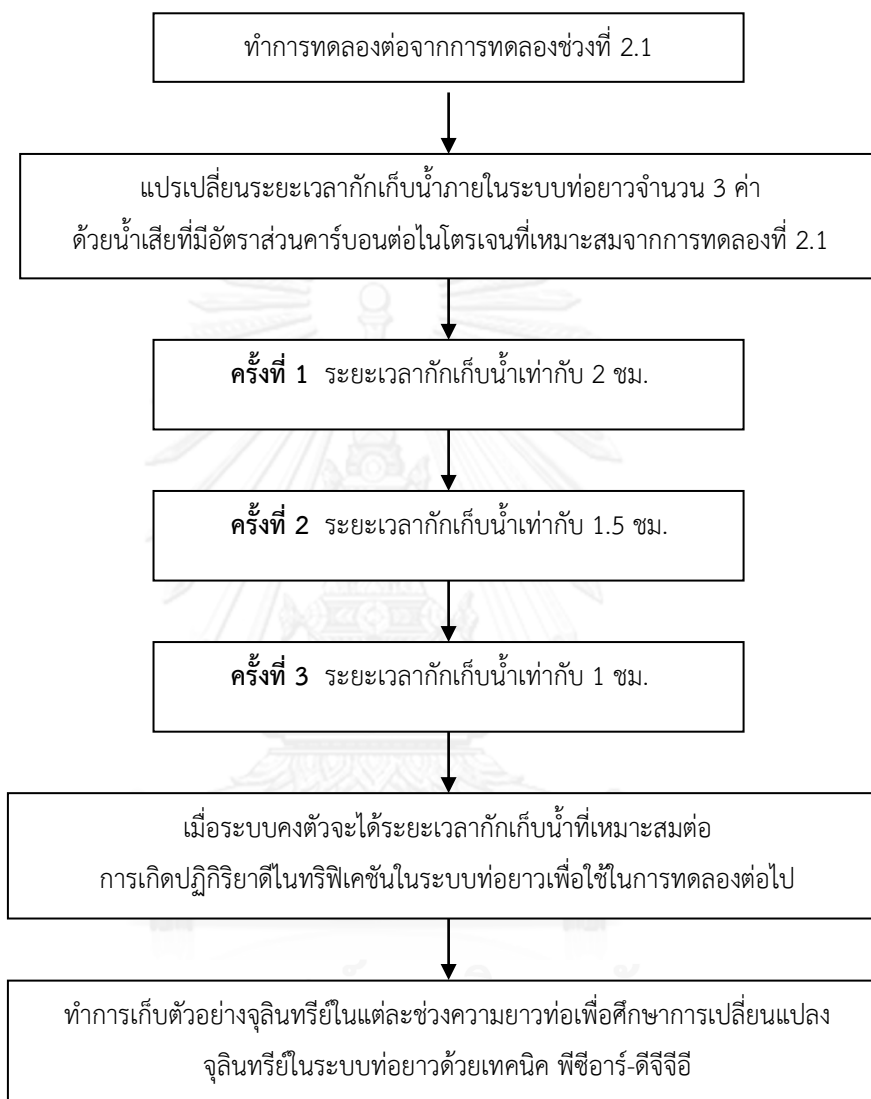
ครั้งที่ 2 C:N เท่ากับ 2:1
ระยะเวลาเก็บน้ำเท่ากับ 2 ชม.

ครั้งที่ 3 C:N เท่ากับ 5:1
ระยะเวลาเก็บน้ำเท่ากับ 2 ชม.

เมื่อระบบคงตัวจะได้อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสม
ต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาวเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

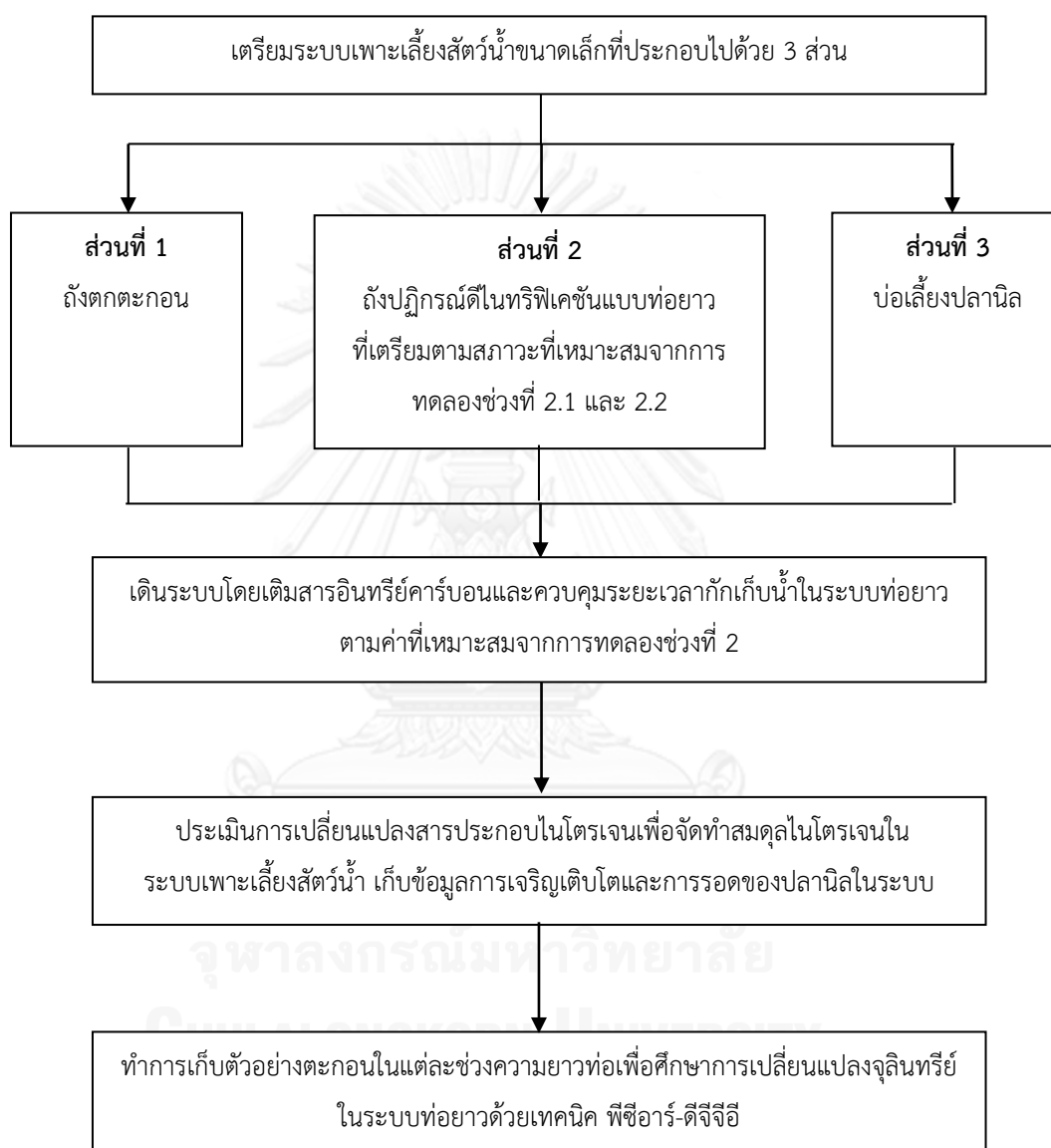
ภาพที่ 3.3 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองที่ 2.1

การทดลองช่วงที่ 2.2 : ระยะเวลาเก็บน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว



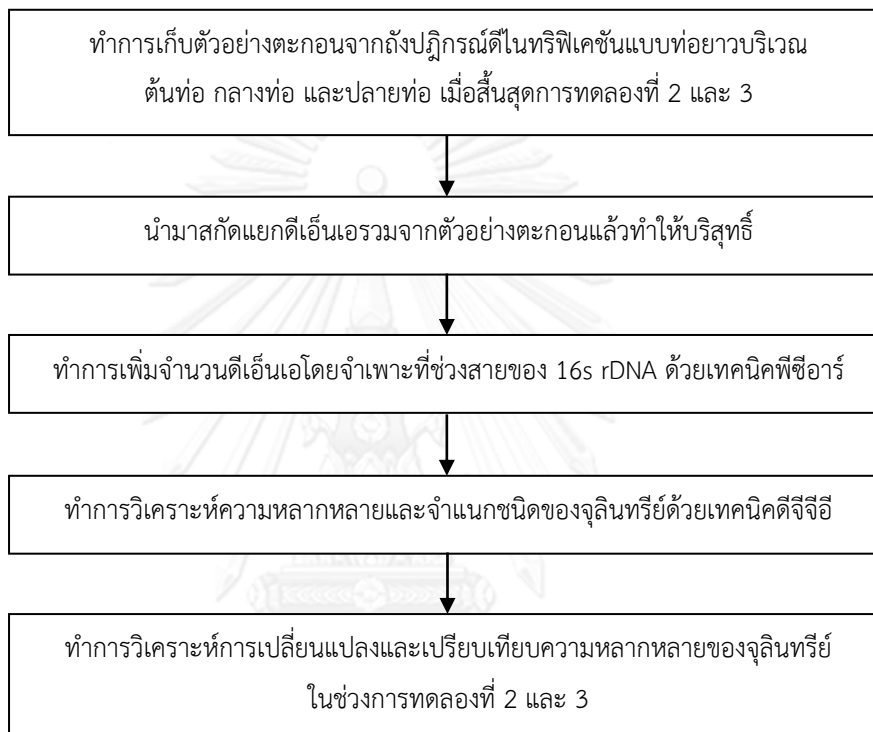
ภาพที่ 3.4 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองที่ 2.2

การทดลองช่วงที่ 3 : ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำในทรีฟเคชั่นแบบท่อยาวในการบำบัด
น้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ



ภาพที่ 3.5 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 3

การทดลองช่วงที่ 4 : ความหลากหลายและการเปลี่ยนแปลงกลุ่มประชากร
จุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว



ภาพที่ 3.6 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 4

3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.2.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

- บ่อเลี้ยงปลาทำจากผ้าพลาสติก HDPE เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร สูง 1 เมตร ปริมาตร 4,000 ลิตร
- ถังพลาสติกปริมาตร 500 ลิตร
- เครื่องสูบน้ำขนาดเล็ก ยี่ห้อ RESUN รุ่น SP-1000
- ถังปฏิกรณ์ตีไนโตรฟิเคชันแบบท่อยาว
- ถังกวนผสม
- ชุดอุปกรณ์ควบคุมค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP controller)
- เครื่องเก็บและบันทึกข้อมูล (Data logger)
- เครื่องสูบน้ำแบบฟันเฟือง (Gear pump)
- เครื่องควบคุมเวลา (Timer)
- อุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า (Adaptor)
- สายออกซิเจนชนิดบางและหนา
- เครื่องเติมอากาศ
- หัวทรายเติมอากาศ
- ท่อพีวีซีและข้อต่อ
- ไยกรองสังเคราะห์
- เครื่องชั่งสารเคมี 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP210s
- เครื่องเขย่าสาร (Vortex Mixer GENIE 2) ยี่ห้อ Scientific Industries รุ่น G560E

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

- ไมโครปิเปตขนาดต่างๆ
- เครื่องแก้วต่างๆ เช่น ปีกเกอร์ ขวดรูปชมพู่ กระจกตวง บิวเรต ฯลฯ
- กรวยกรองบุคเนอร์
- กรวยอิมฮอมพ์
- ชุดทดสอบแอมโมเนีย ไนไตรต์ ค่าสภาพต่าง และคลอรีน ยี่ห้อ AQUA - VBC ของศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- เครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer)
- กระดาษกรอง Whatman GF/C ขนาด 47 มม.

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

เครื่องมือวิเคราะห์	ยี่ห้อ	รุ่น
- เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)	Milton Roy	Spectronic Genesys 5
- เครื่องอ่านค่าบนไมโครเพลท (Microplate reader)	BioTek	PowerWave XS2
- เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter)	HANNA	HI9125
- เครื่องวัดค่าการละลายออกซิเจน (DO meter)	HANNA	HI9147
- เครื่องวัดค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP meter)	HANNA	HI2008

3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความหลากหลายของประชากรจุลินทรีย์

ตารางที่ 3.2 ชุดทดสอบและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความหลากหลายและการเปลี่ยนแปลงกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ด้วยเทคนิคพีซีอาร์-ดีจีจีอี

เครื่องมือวิเคราะห์	ยี่ห้อ	รุ่น
- ชุดสารเคมีสำหรับสกัดดีเอ็นเอ (FastDNA [®] SPIN Kit for Soil)	MP Biomedicals, Solon, Ohio, USA	-
- เครื่องผสมสารละลาย (Vortex)	Sciencetific Industries, Inc.	Vortex-Genie2
- เครื่องเขย่าสาร (FastPrep [®] Instrument)	Thermo Electron Corporation	FastPrepTM FP 120
- เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)	Eppendorf	5804R
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิสำหรับทำ PCR	Thermo Electron Corporation	HB-PX-2220
- เครื่องแยกดีเอ็นเอด้วยไฟฟ้า (Horizontal DNA Electrophoresis gel Boxes)	Bioactive, Inc.	-
- เครื่องดีจีจีอี (D Code System)	Bio-Red Laboratory, Inc.	-
- เครื่องส่องแผ่นเจลด้วยรังสียูวี (UV Tran illuminator Gel)	Wealtec	Gel Dolphin- DOC

3.2.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ตารางที่ 3.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

สารเคมีวิเคราะห์แอมโมเนีย	สารเคมีวิเคราะห์ไนไตรต์	สารเคมีวิเคราะห์ไนเตรต
- Ammonium Sulfate ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)	- Sodium Nitrite (NaNO_2)	- Potassium Nitrate (KNO_3)
- Sodium Salicylate	- Sulphanilamide	- Sodium Nitrate (NaNO_3)
- Sodium Nitroprusside	- Hydrochloric Acid	
- Sodium Citrate	- NNED (N-(1-Naphthyl)- Ethylenediamine-	
- Sodium Hypochlorite	Dihydrochloride)	
- Sodium Hydroxide		
สารเคมีวิเคราะห์ซีโอดี (COD)	สารเคมีวิเคราะห์ ไนโตรเจนทั้งหมด	สารเคมีอื่นๆ
- Potassium Dichromate ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)	- Potassium Persulfate ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$)	- Methanol (CH_3OH)
- Mercuric Sulfate (HgSO_4)	- Sodium Hydroxide	
- Ammonium Ferrous- Sulfate ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$)	- Boric Acid (H_3BO_3)	
- Sulfuric Acid (H_2SO_4)		
- Silver Sulfate (Ag_2SO_4)		
- 1,10-Phenanthroline Monohydrate ($\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)		
- Ferrous Sulfate ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)		

3.2.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ความหลากหลายของประชากรจุลินทรีย์

ตารางที่ 3.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ความหลากหลายและการเปลี่ยนแปลงกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ด้วยเทคนิคพีซีอาร์-ดีจีจีอี

สารเคมีในการสกัดดีเอ็นเอ	สารเคมีในการทำ พีซีอาร์	สารเคมีในการทำ ดีจีจีอี
- Sodium Phosphate Buffer	- 10x PCR Buffer	- 40% acrylamide/bis (37.5:1)
- MT Buffer	- dNTP mix	- 50x TAE Buffer
- PPS Solution	- Taq DNA Polymerase	- Dcode Dye Solution
- Binding Matrix	- Primer GC341f	- TEMED
- Concentrated SEWS-M	- Primer 307r	- 2x Gel Loading Dye
- DES	- Distilled Water	- Ammonium sulphate (APS)
	- Template DNA	- 100% Deionized Formamide
		- 10 mg/ml Ethidium bromide

3.3 การทดลอง

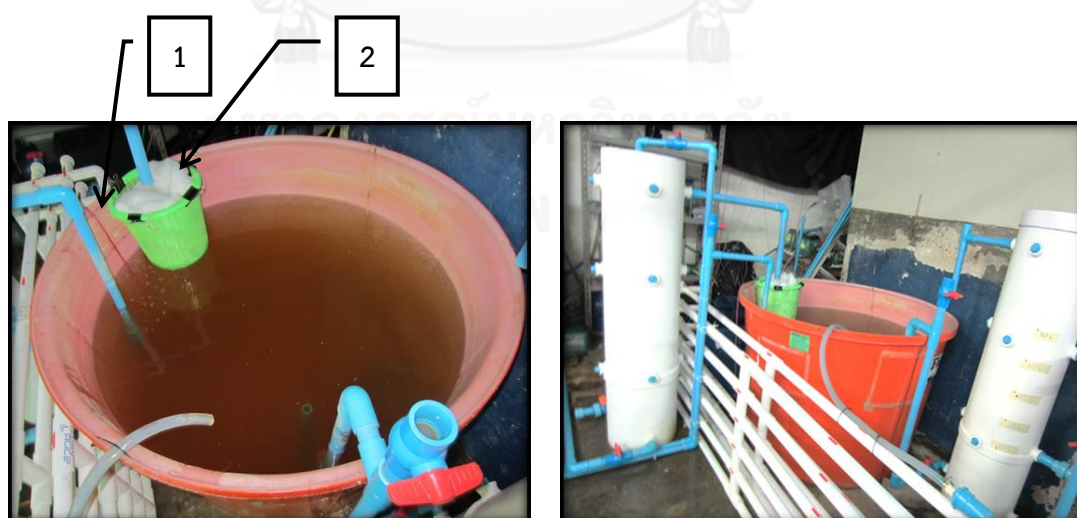
3.3.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองช่วงที่ 1 และ 2 เตรียมจากน้ำประปา โดยเติมสารละลายโซเดียมไนเตรต (NaNO_3) ให้มีความเข้มข้นไนเตรตเท่ากับ 100 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร และเติมอาหารกุ้งที่มีโปรตีนร้อยละ 32 ที่บดละเอียด 9.7 กรัม (คิดเป็นความเข้มข้น 1 มก.ไนโตรเจน/ล.) เพื่อเป็นแหล่งของแอมโมเนียเริ่มต้นและสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของดีไนทริฟายอิงแบคทีเรีย

3.3.2 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับเดินระบบ

3.3.2.1 ถังบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์

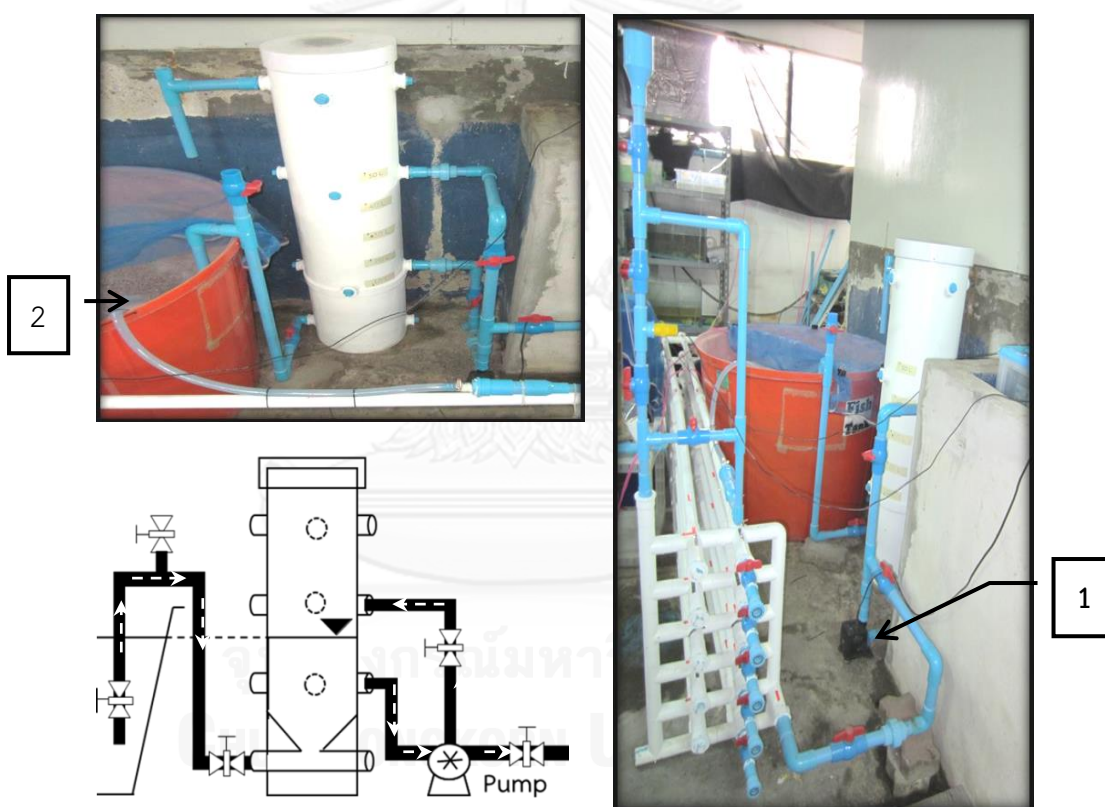
ถังบรรจุน้ำเสียเป็นถังน้ำพลาสติกทรงกลมขนาด 500 ลิตร โดยบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากโซเดียมไนเตรตความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ปริมาตร 450 ลิตร และทำการเติมอากาศด้วยหัวทรายเติมอากาศตลอดเวลา เพื่อให้มีออกซิเจนพอเพียงและป้องกันการเน่าเสียของน้ำ ตลอดจนเป็นการลดความเสี่ยงต่อการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบล้มเหลวได้ ที่บริเวณจุดน้ำเข้าถังบรรจุน้ำเสียจะติดตั้งตะกร้าพลาสติกที่บรรจุใยกรองสังเคราะห์เพื่อช่วยดักตะกอนและสิ่งสกปรกก่อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว ดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ภาพถ่ายของถังบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงโดยมีการติดตั้งใยกรองสังเคราะห์และหัวทรายเติมอากาศ (1) หัวทรายเติมอากาศ (2) ใยกรองสังเคราะห์

3.3.2.2 ถังกวนผสม

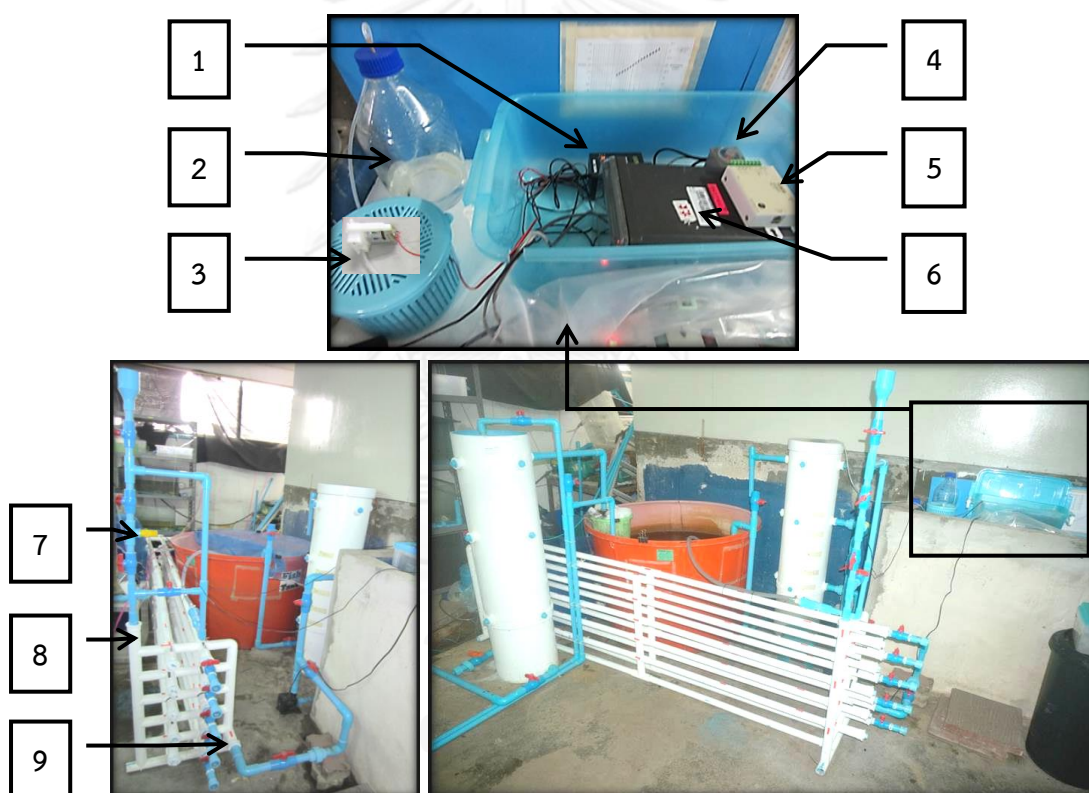
ถังกวนผสมเป็นถังปิดทรงกระบอกปริมาตร 53 ลิตร โดยทำจากท่อพีวีซีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 ม. สูง 1.2 ม. ที่บริเวณด้านล่างของถังออกแบบเป็นรูปกรวยเอียง 60 องศา เพื่อช่วยในการตกตะกอน สำหรับการทดลองที่ 1 และ 2 จะเติมเมทานอลลงไปด้านบนของถังด้วยการเปิดฝา จากนั้นเครื่องสูบน้ำจะทำหน้าที่กวนผสมของเหลวภายในถังโดยวิธีการสูบน้ำออกและสูบน้ำกลับ (By-pass) แต่สำหรับการทดลองที่ 3 จะทำการติดตั้งเครื่องควบคุมอัตราการเติมเมทานอลแบบอัตโนมัติ เพื่อช่วยควบคุมปริมาณการเติมให้ได้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ต้องการ ภาพที่ 3.8 แสดงภาพถ่ายของถังกวนผสมและการติดตั้ง



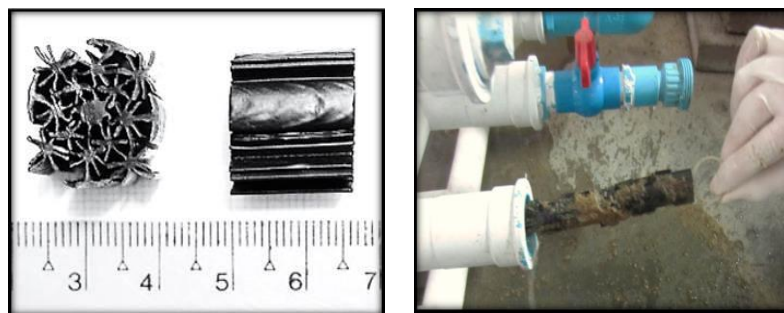
ภาพที่ 3.8 ภาพถ่ายของถังกวนผสม (1) เครื่องสูบน้ำ (2) จุดเก็บตัวอย่างน้ำ

3.3.2.3 ถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว

ถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวทำจากท่อพีวีซีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025ม. ความยาว 25 ม. (ได้รับสิทธิบัตรการประดิษฐ์เลขที่ 26048) โดยภายในเส้นท่อยับรวมตัวกลางพลาสติก Digester box (DB-box) เพื่อเป็นตัวกลางให้แบคทีเรียยีสต์เกาะ มีปริมาตรรวมเมื่อทำการบรรจุตัวกลางพลาสติกแล้วเท่ากับ 13 ลิตร ดังแสดงในภาพที่ 3.9 โดยบริเวณปลายท่อที่จะรับน้ำเข้ามีการติดตั้งเครื่องสูบน้ำเพื่อช่วยควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ ส่วนปลายท่อด้านน้ำออกจะทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ควบคุมค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential ; ORP) เพื่อใช้ควบคุมสถานะในการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันภายในระบบ



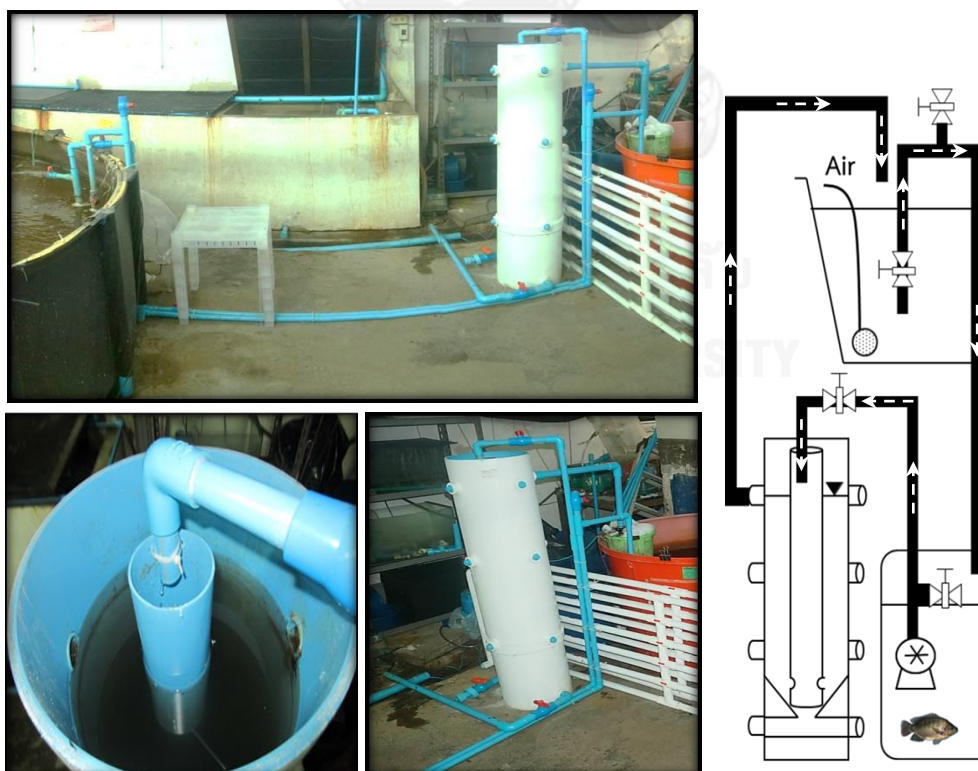
ภาพที่ 3.9 ภาพถ่ายของระบบบำบัดในท่อยาว โดยมีการติดตั้งหัววัดค่าโออาร์พีที่ส่วนปลายท่อน้ำออกของระบบบำบัดในท่อยาวซึ่งเชื่อมต่อกับระบบควบคุมอัตราการเติมเมทานอลแบบอัตโนมัติ (1) ตัวแปลงกระแสไฟฟ้า (2) ขวดบรรจุเมทานอล (3) เครื่องสูบน้ำแบบฟิฟเฟือง (4) เครื่องควบคุมเวลา (5) เครื่องเก็บและบันทึกข้อมูล (6) อุปกรณ์ควบคุมค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (7) หัววัดค่าโออาร์พี (8) ทางน้ำออก (9) ทางน้ำเข้า



ภาพที่ 3.10 ตัวกลางพลาสติกโพลิเอทิลีน (PE) ชื่อทางการค้า Digester box (DB-box) ของบริษัท earthaquarium2003 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร

3.2.1.3 ถังตกตะกอน

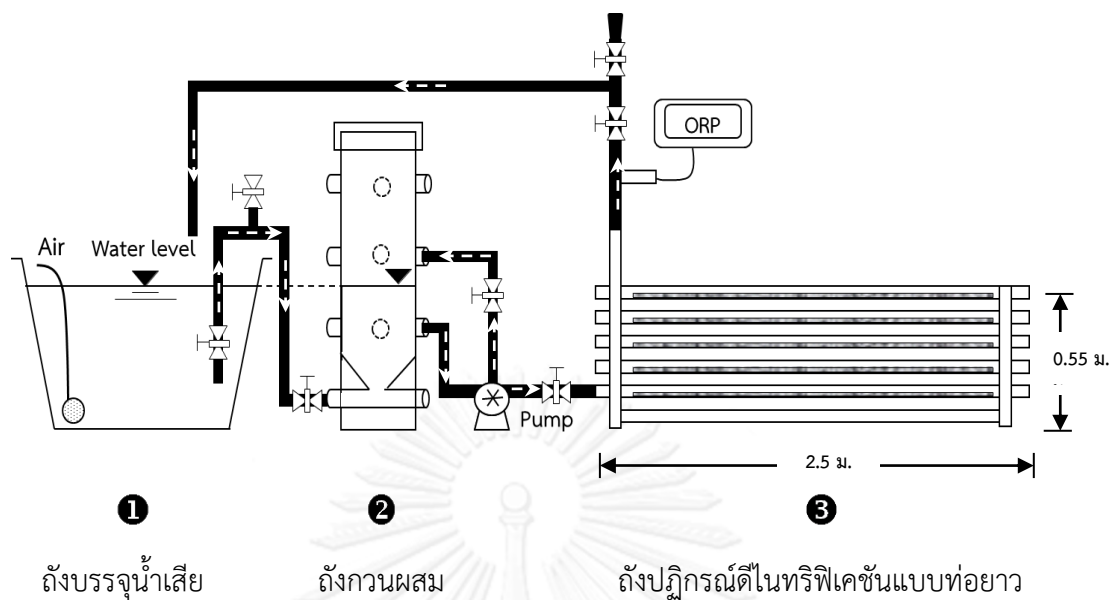
ถังตกตะกอนเป็นถังชนิดเดียวกับถังกวนผสมแต่มีการดัดแปลงโดยการนำท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 ซม. มาวางไว้เป็นแกนกลางแล้วเจาะรูด้านล่างทั้ง 2 ข้าง เพื่อให้น้ำจากถังเลี้ยงปลาไหลเข้ามาทางด้านบนตรงกลางท่อแล้วไหลออกทางรูด้านล่างทั้ง 2 ข้างนี้ จากนั้นน้ำจะถูกดันให้ไหลออกทางด้านบนบริเวณด้านข้างของถังตกตะกอน ซึ่งเป็นการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียตามหลักการตกตะกอนด้านล่างของถังตกตะกอนนี้ โดยน้ำที่ออกจากถังตกตะกอนจะถูกเวียนกลับเข้าไปยังถังพักน้ำเสียอีกครั้ง



ภาพที่ 3.11 ภาพถ่ายของถังตกตะกอน

การทดลองช่วงที่ 1 การเตรียมสภาพตัวกรองชีวภาพดีไนริฟิเคชันและติดตั้งถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาว

การทดลองส่วนนี้เป็นการเตรียมสภาพตัวกรองชีวภาพดีไนริฟิเคชันและติดตั้งถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาว โดยมุ่งเน้นวิเคราะห์อัตราการบำบัดไนเตรตของถังปฏิกรณ์แบบท่อยาว หรือ อัตราดีไนริฟิเคชันเทียบเคียงกับปริมาตรของท่อยาวต่อหน่วยเวลา (มก.ไนโตรเจนต่อลบ.ม./วัน) และเป็นการเตรียมสภาพเบื้องต้นเพื่อเพิ่มปริมาณดีไนริฟิเคชันในถังปฏิกรณ์แบบท่อยาวพลาสติก Digester box (DB) ในท่อยาวจนอยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานได้ ทั้งนี้มีรายละเอียดตัวแปรที่ทำการศึกษาดังตารางที่ 3.5 มีขั้นตอนดำเนินการคือทำการติดตั้งถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาวเข้ากับถังกวนผสมและถังบรรจุน้ำเสีย ดังภาพที่ 3.12 และเริ่มเดินระบบโดยการสูบน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสารละลายโซเดียมไนเตรตความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. จากถังน้ำพลาสติกขนาดความจุ 500 ลิตร เข้าสู่ถังกวนผสม และเติมเมทานอลลงในถังกวนผสมเพื่อเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในการเร่งอัตราดีไนริฟิเคชันที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 จากนั้นหมุนเวียนน้ำเสียภายในถังกวนผสมเพื่อให้เกิดการผสมกันดีระหว่างน้ำเสียสังเคราะห์กับเมทานอล โดยน้ำที่ผสมแล้วส่วนหนึ่งจะถูกสูบเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาวด้วยอัตราการไหล 22 ล./ชม. ในขณะที่อีกส่วนจะถูกส่งกลับไปยังถังกวนผสม ทำการเดินระบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 60 วัน หรือจนกว่าอัตราการบำบัดไนเตรตคงที่ โดยน้ำทิ้งที่ออกจากถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาวจะทำการหมุนเวียนกลับเข้าสู่ถังน้ำเสียสังเคราะห์อีกครั้ง เก็บตัวอย่างน้ำจากถังน้ำเสียสังเคราะห์และทางออกของถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาวทุกวัน เพื่อศึกษาอัตราการบำบัดไนเตรตและติดตามการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ด้วยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต ซีโอดี ค่าศักยภาพออกซิเดชัน-รีดักชัน อุณหภูมิพีเอช และออกซิเจนละลายน้ำ ตามวิธีมาตรฐานและความถี่ที่ระบุในตารางที่ 3.6



ภาพที่ 3.12 แผนภาพการติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลองช่วงที่ 1



ภาพที่ 3.13 การติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลองช่วงที่ 1

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 1

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ระยะตามความยาวของท่อที่ทำการเก็บตัวอย่าง	- 0 ม. และ 26 ม.
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความเข้มข้นของไนเตรดเริ่มต้น	- 100 มก.ไนโตรเจน/ล.
2. จำนวนตัวกลางพลาสติก (DB-Box)	- จำนวน 1,200 ชิ้น
3. ระยะเวลาในการศึกษา	- อย่างน้อย 60 วัน หรือจนกว่าอัตรา การบำบัดไนเตรดคงที่
4. ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน	- เมทานอล
5. ระยะเวลาพักเก็บน้ำ	- 2 ชม.
6. อัตราการสูบน้ำเสียเข้าสู่ปฏิกรณ์แบบท่อยาว	- 22 ล./ชม.
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
1. อัตราการบำบัดไนเตรดของถังปฏิกรณ์แบบท่อยาว (อัตรา ดีไนทริฟิเคชันเทียบเคียงกับปริมาตรของท่อยาวต่อหน่วยเวลา; มก.ไนโตรเจนต่อลบ.ม./วัน)	- แอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรด
2. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ	- ซีโอดี อุณหภูมิ ออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช ค่าศักยภาพออกซิเดชัน-รีดักชัน ค่าสภาพความเป็นด่าง

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์และความถี่ที่ทำการตรวจวิเคราะห์สำหรับการทดลองที่ 1

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/ เครื่องมือวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่างน้ำ		ความถี่ใน การวิเคราะห์
		ทางออก ท่อยาว	บ่อน้ำเสีย สังเคราะห์	
1. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ				
- แอมโมเนีย (NH ₄ ⁺ -N)	Colorimetric and Spectrophotometric method ¹	✓	✓	ทุกวัน
- ไนไตรต์ (NO ₂ ⁻ -N)	Colorimetric and Spectrophotometric method ¹	✓	✓	ทุกวัน
- ไนเตรต (NO ₃ ⁻ -N)	Ultraviolet Spectrophotometric method ²	✓	✓	ทุกวัน
2. ปัจจัยทางกายภาพ				
- ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP)	ORP meter ²	✓	✓	ทุกวัน
- อุณหภูมิ	Thermometer method ²	✓	✓	ทุกวัน
- ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO)	DO meter ²	✓	✓	ทุกวัน
- ค่าสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)	Test Kit (ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)	✓	✓	ทุกวัน
- พีเอช (pH)	pH meter ²	✓	✓	ทุกวัน
- ซีโอดี (COD)	Closed Reflux method ²	✓	✓	ทุกวัน

หมายเหตุ 1 = อ้างอิงจาก Strickland และ Parson (1972) , 2 = อ้างอิงจาก Standard method (2005)

การทดลองช่วงที่ 2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตในระบบท่อยาว

การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดไนเตรตในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว โดยเดินระบบการทดลองแบบต่อเนื่องและแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อย มีรายละเอียดดังนี้

การทดลองที่ 2.1 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว

ศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนโดยใช้เมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในสถานะที่เดินระบบต่อเนื่องจากการทดลองช่วงที่ 1 เริ่มต้นด้วยการสูบน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากโซเดียมไนเตรตและเติมเมทานอลในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 จากถังกวนผสมเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว ภายใต้สภาวะที่ควบคุมอัตราการไหลที่ 22 ล./ชม. และระยะเวลาเก็บน้ำ 2 ชม. โดยน้ำที่ผ่านระบบจะหมุนเวียนกลับไปยังถังน้ำเสียสังเคราะห์อีกครั้ง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ออกจากท่อยาวและจากถังบรรจุน้ำเสียทุกวัน เพื่อวิเคราะห์อัตรา การบำบัดไนเตรตและการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ตามวิธีมาตรฐานการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ได้แก่ ปริมาณแอมโมเนีย ($4500\text{-NH}_3\text{-D}$) ไนไตรต์ ($4500\text{-NO}_2\text{-B}$) ไนเตรต ($4500\text{-NO}_3\text{-B}$) ร่วมกับการวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ ออกซิเจนละลายน้ำ ซีโอดี ค่าศักยภาพออกซิเดชัน-รีดักชัน อุณหภูมิ และพีเอช ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์และความถี่ที่ระบุในตารางที่ 3.8 จากนั้นแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนของน้ำเสียสังเคราะห์ในถังกวนผสมเท่ากับ 2:1 และ 5:1 ตามลำดับ ในขณะที่ควบคุมค่าไนเตรตเริ่มต้นคงที่เท่ากับ 100 มก./ล. ทำการติดตามพารามิเตอร์ต่างๆ จนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว เปรียบเทียบอัตราการบำบัดไนเตรตเพื่อให้ได้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสม โดยมีรายละเอียดของตัวแปรที่ทำการศึกษาสำหรับการทดลองในช่วงนี้ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 2.1

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	- 1:1 2:1 และ 5:1
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความเข้มข้นของไนเตรต	- 100 มก.ไนโตรเจน/ล.
2. จำนวนตัวกลางพลาสติก (DB-Box)	- จำนวน 1,200 ชิ้น
3. ระยะเวลาในการศึกษา	- อย่างน้อย 120 วัน หรือจนกว่าอัตรา การบำบัดไนเตรดคงที่
4. ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน	- เมทานอล
5. ระยะเวลาเก็บน้ำ	- 2 ชม.
6. อัตราการสูบน้ำเสียเข้าสู่ปฏิกรณ์แบบท่อยาว	- 22 ล./ชม.
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
1. อัตราการบำบัดไนเตรดของถังปฏิกรณ์แบบท่อยาว (อัตรา ดีไนทริฟิเคชันเทียบเคียงกับปริมาตรของท่อยาวต่อหน่วยเวลา; มก.ไนโตรเจนต่อลบ.ม./วัน)	- แอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต
2. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ	- ซีโอดี อุณหภูมิ ออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช ค่าศักยภาพออกซิเดชัน-รีดักชัน ค่าสภาพความเป็นด่าง

ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์และความถี่ที่ทำการตรวจวิเคราะห์สำหรับการทดลองที่ 2.1

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/ เครื่องมือวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่างน้ำ		ความถี่ใน การวิเคราะห์
		ทางออก ท่อยาว	บ่อน้ำเสีย สังเคราะห์	
1. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ				
- แอมโมเนีย (NH ₄ ⁺ -N)	Colorimetric and Spectrophotometric method ¹	✓	✓	ทุกวัน
- ไนไตรต์ (NO ₂ ⁻ -N)	Colorimetric and Spectrophotometric method ¹	✓	✓	ทุกวัน
- ไนเตรต (NO ₃ ⁻ -N)	Ultraviolet Spectrophotometric method ²	✓	✓	ทุกวัน
2. ปัจจัยทางกายภาพ				
- ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP)	ORP meter ²	✓	✓	ทุกวัน
- อุณหภูมิ	Thermometer method ²	✓	✓	ทุกวัน
- ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO)	DO meter ²	✓	✓	ทุกวัน
- ค่าสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)	Test Kit (ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)	✓	✓	ทุกวัน
- พีเอช (pH)	pH meter ²	✓	✓	ทุกวัน
- ซีโอดี (COD)	Closed Reflux method ²	✓	✓	ทุกวัน

หมายเหตุ 1 = อ้างอิงจาก Strickland และ Parson (1972) , 2 = อ้างอิงจาก Standard method (2005)

การทดลองที่ 2.2 ระยะเวลาการกักเก็บน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว

ทำการเดินระบบต่อเนื่องจากการทดลองที่ 2.1 โดยแปรเปลี่ยนระยะเวลากักเก็บน้ำภายในระบบท่อยาวจำนวน 3 ค่า ได้แก่ 2 1.5 และ 1 ชม. ด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1 เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ออกจากท่อยาวและจากถังบรรจุน้ำเสียทุกวันเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนตามวิธีมาตรฐานการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ได้แก่ ปริมาณแอมโมเนีย (4500-NH₃-D) ไนไตรต์ (4500-NO₂-B) ไนเตรต (4500-NO₃-B) ร่วมกับการวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ ซีโอดี ออกซิเจนละลายน้ำ ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน อุณหภูมิ และพีเอช และทำการเก็บตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวบริเวณต้นท่อ กลางท่อ และปลายท่อ เพื่อนำไปวิเคราะห์ความหลากหลายและจำแนกชนิดของจุลินทรีย์ด้วยเทคนิคพีซีอาร์-ดีจีจีอี มีรายละเอียดของตัวแปรที่ทำการศึกษาสำหรับการทดลองในช่วงนี้ดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 2.2

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ระยะเวลาการกักเก็บน้ำในระบบท่อยาว	- 2 1.5 และ 1 ชม.
2. ความหลากหลายของแบคทีเรียบนตัวกลางพลาสติก (DB-Box)	- ชนิดจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์แบบท่อยาว
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความเข้มข้นของไนเตรต	- 100 มก.ไนโตรเจน/ล.
2. จำนวนตัวกลางพลาสติก (DB-Box)	- จำนวน 1,200 ชิ้น
3. ระยะเวลาในการศึกษา	- อย่างน้อย 90 วัน หรือจนกว่าอัตรา การบำบัดไนเตรตคงที่
4. ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน	- เมทานอล
5. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	- ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
1. อัตราการบำบัดไนเตรตของถังปฏิกรณ์แบบท่อยาว (อัตราดีไนทริฟิเคชันเทียบกับปริมาตรของท่อยาวต่อหน่วยเวลา; มก.ไนโตรเจนต่อลบ.ม./วัน)	- แอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต
2. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ	- ซีโอดี อุณหภูมิ ออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ค่าสภาพความเป็นด่าง

ตารางที่ 3.10 พารามิเตอร์และความถี่ที่ทำการตรวจวิเคราะห์สำหรับการทดลองที่ 2.2

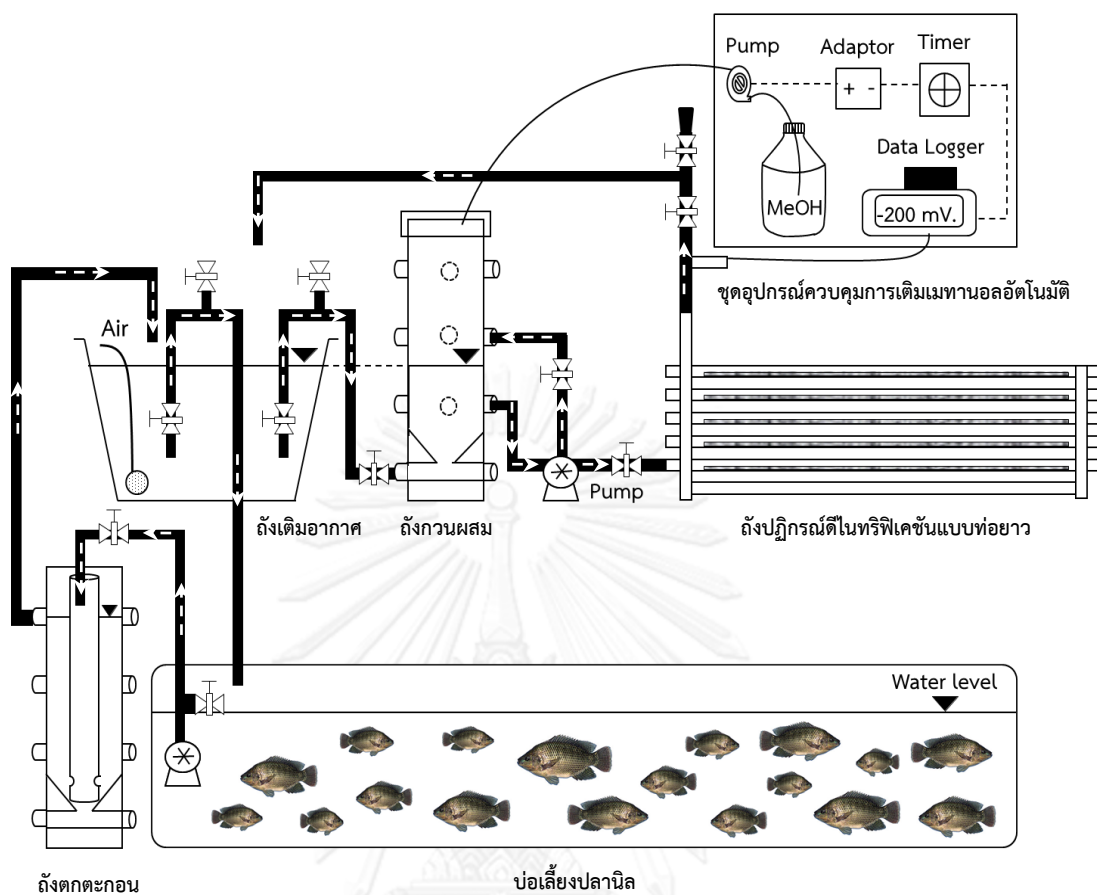
พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/ เครื่องมือวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่างน้ำ			ความถี่ ในการ วิเคราะห์	
		ท่อยาว		บ่อน้ำเสีย ส่งเคราะห์		
		ต้น	กลาง			ปลาย
1. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ						
- แอมโมเนีย	Colorimetric and Spectrophotometric method ¹			✓	✓	ทุกวัน
- ไนไตรต์	Colorimetric and Spectrophotometric method ¹			✓	✓	ทุกวัน
- ไนเตรต	Ultraviolet Spectrophotometric method ²			✓	✓	ทุกวัน
2. ปัจจัยทางกายภาพ						
- ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน	ORP meter ²			✓	✓	ทุกวัน
- อุณหภูมิ	Thermometer method ²			✓	✓	ทุกวัน
- ออกซิเจนละลายน้ำ	DO meter ²			✓	✓	ทุกวัน
- ค่าสภาพความเป็นด่าง	Test Kit			✓	✓	ทุกวัน
- พีเอช	pH meter ²			✓	✓	ทุกวัน
- ซีโอดี	Closed Reflux method ²			✓	✓	ทุกวัน
3. จุลินทรีย์						
- ชนิดของจุลินทรีย์ในระบบ	PCR-DGGE	✓	✓	✓		สิ้นสุดการทดลอง

หมายเหตุ 1 = อ้างอิงจาก Strickland และ Parson (1972) , 2 = อ้างอิงจาก Standard method (2005)

การทดลองช่วงที่ 3 ประสิทธิภาพของระบบบำบัดดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวในการบำบัดน้ำเสีย จริงจากการเพาะเลี้ยงปลานิล

นำระบบบำบัดไนเตรต (จากการทดลองที่ 2.2) มาติดตั้งเข้ากับระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดภายในโรงเรือนที่มีบ่อเลี้ยงปลานิล โดยบ่อเลี้ยงปลานิลเป็นบ่อผ้าใบพลาสติกขนาด 4 ลบ.ม. จำนวน 1 บ่อ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ม. สูง 1 ม. ภายในบ่อมีหัวทรายเติมอากาศและมีวัสดุกรองเส้นใยพลาสติกเพื่อเป็นที่ยึดเกาะของแบคทีเรีย น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำจืด โดยทำการติดตั้งเครื่องสูบน้ำต่อกับท่อพีวีซีสำหรับสูบน้ำจากบ่อเลี้ยงปลานิลไปยังถังตกตะกอน ซึ่งเครื่องสูบน้ำนี้จะทำการติดตั้งให้อยู่ใกล้บริเวณผิวน้ำเพื่อกันไม่ให้ตะกอนในบ่อปลาหลุดเข้าไปอุดตันเครื่องสูบน้ำ ทำการเลี้ยงปลานิลประมาณ 100 ตัว ซึ่งมีน้ำหนักและความยาวเฉลี่ยเริ่มต้นในช่วง 600-650 กรัมต่อตัว และ 22-27 ซม. โดยกำหนดความหนาแน่นเริ่มต้นมากกว่า 15 กก.ต่อลบ.ม.

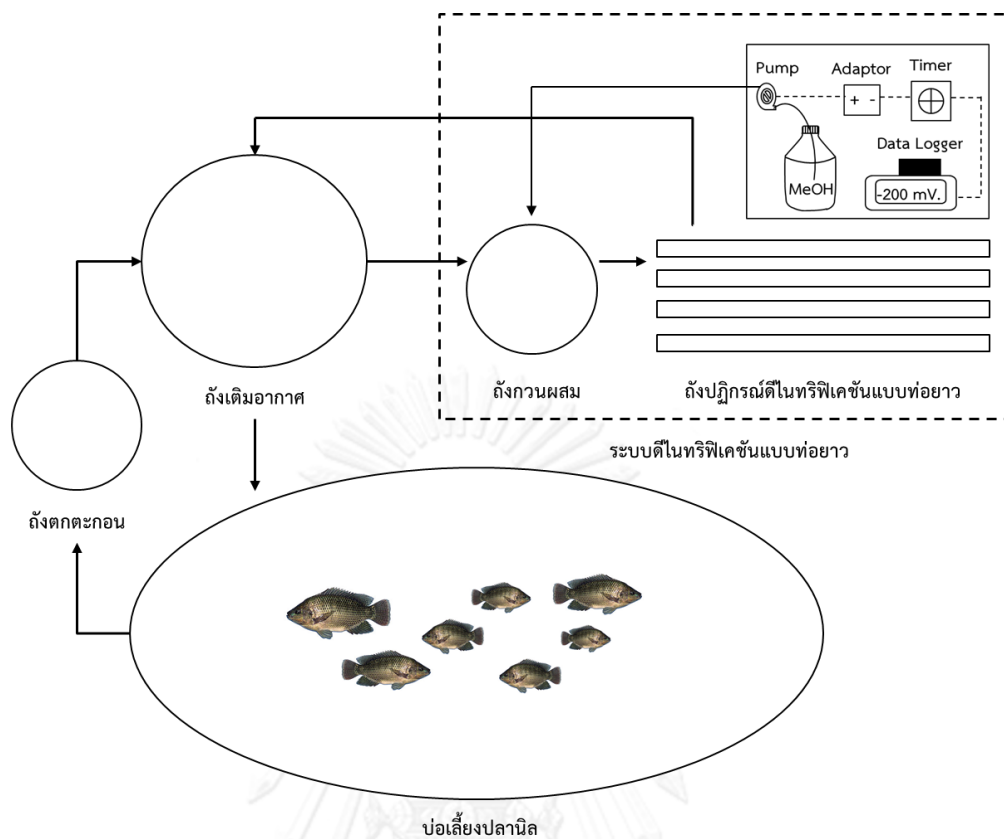
ในระหว่างการทดลองมีการให้อาหารปลาทุกวันด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปยี่ห้อซีพี 9933 (บริษัทเจริญโภคภัณฑ์อาหาร จำกัด) เฉลี่ยวันละ 1,362 กรัม คิดเป็นร้อยละ 1-1.5 ของน้ำหนักปลาต่อวัน และทำการเพาะเลี้ยงปลานิลต่อเนื่องเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 70 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ยกเว้นการเติมน้ำเข้าระบบเพื่อทดแทนน้ำที่เกิดจากการระเหยและจากการเก็บตัวอย่างน้ำ โดยน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิลจะถูกถ่ายเข้าสู่ถังตกตะกอนโดยเข้าทางด้านบนของแกนกลางถังตกตะกอนจากนั้นน้ำใสจะวกกลับขึ้นมาทางด้านบนแล้วไหลออกสู่ถังเติมอากาศ โดยที่ถังเติมอากาศจะมีใยกรองละเอียดเพื่อดักตะกอน และเศษอาหารที่เหลือจากบ่อปลาและในระหว่างการทดลองจะทำความสะอาดใยกรองละเอียดทุก 2 วัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกรอง จากนั้นน้ำจากถังเติมอากาศจะถูกถ่ายต่อไปยังถังกวนผสมด้วยวิธีการกวนน้ำอย่างต่อเนื่อง โดยน้ำก็จะถูกกวนผสมเข้ากับเมทานอลภายในถังกวนผสม แล้วจึงถูกสูบต่อไปยังถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวด้วยอัตราการไหล 22 ลิตรต่อชม. ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 2 ชม. และน้ำที่ออกจากถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวจะไหลมาที่ถังเติมอากาศอีกครั้ง เนื่องจากน้ำที่ออกจากท่อยาวนั้นมีปริมาณออกซิเจนละลายต่ำมากจึงต้องมีการเติมออกซิเจนก่อนจะปล่อยกลับคืนลงสู่บ่อเลี้ยงปลานิล โดยรูปแบบของชุดการทดลองและการเชื่อมต่อบ่อเลี้ยงปลานิลกับระบบบำบัดน้ำแสดงในภาพที่ 3.14 และ 3.15 และสภาวะที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.11



ภาพที่ 3.14 แผนภาพการติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลองช่วงที่ 3 (Side View)



ภาพที่ 3.15 ภาพถ่ายการติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลองช่วงที่ 3



ภาพที่ 3.16 แผนผังการติดตั้งระบบตีโนทรีฟเคชั่นเข้ากับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Top View)



ภาพที่ 3.17 ภาพถ่ายมุมกว้างแสดงการติดตั้งระบบตีโนทรีฟเคชั่นเข้ากับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ตารางที่ 3.11 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองครั้งที่ 3

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. คุณภาพน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	- น้ำเสียจากบ่อเลี้ยงปลานิล
2. การเจริญของแบคทีเรียบนตัวกลางพลาสติก (DB-Box)	- อัตราการบำบัดไนเตรตของถังปฏิกรณ์แบบท่อยาว
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความเข้มข้นของไนเตรตในน้ำเสีย	- 50 มก.ไนโตรเจน/ล.
2. ถังดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว	- เตรียมขึ้นโดยใช้วัสดุและสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1 และ 2.2
3. จำนวนตัวกลางพลาสติก (DB-Box)	- จำนวน 1,200 ชิ้น
4. ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน	- เมทานอล
5. ระยะเวลาพักเก็บน้ำ	- 2 ชม.
6. อัตราการสูบน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์แบบท่อยาว	- 22 ล./ชม.
7. ปริมาณน้ำในบ่อปลา	- 4 ลบ.ม.
8. อาหารสัตว์น้ำ	- อาหารสำเร็จรูปทั่วไปที่ขายตามท้องตลาด
9. ปริมาณการให้อาหาร	- ร้อยละ 1-1.5 ของน้ำหนักตัวสัตว์น้ำต่อวัน
10. ขนาดและความหนาแน่นของปลานิลเริ่มต้น	- ปลานิลน้ำหนักเฉลี่ย 615 ก. ความยาวเฉลี่ย 26 ซม. ความหนาแน่นเริ่มต้น 15 กก./ลบ.ม.
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
1. อัตราการบำบัดไนเตรตของถังปฏิกรณ์แบบท่อยาว (อัตราดีไนทริฟิเคชันเทียบเคียงกับปริมาตรของท่อยาวต่อหน่วยเวลา; มก.ไนโตรเจนต่อลบ.ม./วัน)	- แอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต
2. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ	- ซีโอดี อุณหภูมิ ออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช ค่าศักยภาพออกซิเดชัน-รีดักชัน ค่าสภาพความเป็นด่าง
3. ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนตกค้างในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	- ความเข้มข้นของสารอินทรีย์คาร์บอน
4. ปริมาณและชนิดจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในท่อยาว	- พีซีอาร์-ดีจีจีอี
5. การเจริญเติบโตและการรอดของสัตว์น้ำ	- ชั่งน้ำหนัก วัดความยาวและนับจำนวนของปลานิล

ตารางที่ 3.12 พารามิเตอร์และความถี่ที่ทำการตรวจวิเคราะห์สำหรับการทดลองที่ 3

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/ เครื่องมือวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่างน้ำ				ความถี่ ในการ วิเคราะห์	
		ท่อยาว			ถังเติม อากาศ		บ่อปลา
		ต้น	กลาง	ปลาย			
1. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ							
- แอมโมเนีย	Colorimetric and Spectrophotometric method ¹			✓	✓	✓	ทุกวัน
- ไนไตรต์	Colorimetric and Spectrophotometric method ¹			✓	✓	✓	ทุกวัน
- ไนเตรต	Ultraviolet Spectrophotometric method ²			✓	✓	✓	ทุกวัน
- ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen)	Spectrophotometric method ³			✓	✓	✓	เริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง
2. ปัจจัยทางกายภาพ							
- ค่าศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน	ORP meter ²			✓	✓	✓	ทุกวัน
- อุณหภูมิ	Thermometer method ²			✓	✓	✓	ทุกวัน
- ออกซิเจนละลายน้ำ	DO meter ²			✓	✓	✓	ทุกวัน
- ค่าสภาพความเป็นด่าง	Test Kit			✓	✓	✓	ทุกวัน
- พีเอช	pH meter ²			✓	✓	✓	ทุกวัน
- ซีโอดี	Closed Reflux method ²			✓	✓	✓	ทุกวัน
3. จุลินทรีย์							
- ชนิดของจุลินทรีย์ในระบบ	PCR-DGGE	✓	✓	✓			สิ้นสุดการทดลอง

ตารางที่ 3.12 พารามิเตอร์และความถี่ที่ทำการตรวจวิเคราะห์สำหรับการทดลองที่ 3 (ต่อ)

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/ เครื่องมือวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่างน้ำ				ความถี่ ในการ วิเคราะห์	
		ท่อยาว			ถังเติม อากาศ		บ่อปลา
		ต้น	กลาง	ปลาย			
4. ตะกอน							
- ปริมาณตะกอน จมตัวที่ 30 นาที	Imhoff Cone ¹					✓	ทุกเดือน
- ตะกอนแขวนลอย ทั้งหมด (Total Suspended Solid)	Total Suspended Solid Dried at 103-105°C ²					✓	ทุกเดือน
5. การเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ							
- น้ำหนักปลา (Fish weight)	เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง					✓	ทุกเดือน
- ความยาวปลา (Fish length)	วัดจากปากถึงปลาย หางปลาด้วยไม้บรรทัด					✓	ทุกเดือน
- อัตราการแลก เนื้อ (FCR; feed conversion ratio)	เปรียบเทียบปริมาณ อาหารปลาที่ให้กับ น้ำหนักรวมของปลา ทั้งหมด					✓	สิ้นสุดการ ทดลอง
- อัตราการเติบโต ต่อวัน (DWG; daily weight gain)	เปรียบเทียบน้ำหนักตัว กับระยะเวลาการเลี้ยง					✓	สิ้นสุดการ ทดลอง
- อัตราการรอดตาย (Survival rate)	เปรียบเทียบปริมาณ ปลาในวันเริ่มต้นและ วันสุดท้าย					✓	สิ้นสุดการ ทดลอง

หมายเหตุ 1 = อ้างอิงจาก Strickland และ Parson (1972) , 2 = อ้างอิงจาก Standard method (2005)

3 = อ้างอิงจาก Grasshof และคณะ (1999)

- การประเมินค่าศักยภาพออกซิเดชัน-รีดักชันที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมการเติมเมทานอลให้กับระบบบำบัดในเทรตแบบท่อยาว

การทดลองในส่วนนี้ทำการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันภายในท่อยาว โดยนำช่วงค่าโออาร์พีที่ตรวจวัดได้ในส่วนปลายของท่อยาวมาเป็นตัวกำหนดการเริ่มและหยุดการเติมเมทานอล ซึ่งการปรับเปลี่ยนช่วงของค่าโออาร์พี ที่ใช้ในระบบควบคุมการเติมเมทานอลแบบอัตโนมัติแสดงดังตารางที่ 3.13

ตารางที่ 3.13 การทดลองปรับเปลี่ยนค่าโออาร์พี ในโปรแกรมระบบควบคุมการเติมเมทานอลด้วยวิธีอัตโนมัติ

ครั้งที่	ระยะเวลาที่ทำการทดลอง	การปรับตั้งโปรแกรมควบคุมการเติมเมทานอล	
		ค่า ORP ต่ำสุด (mV)	ค่า ORP สูงสุด (mV)
1	5 วัน (วันที่ 1 - 5)	0	100
2	10 วัน (วันที่ 5 - 14)	0	50
3	12 วัน (วันที่ 14 - 25)	-50	50
4	41 วัน (วันที่ 25 - 65)	-100	0
5	9 วัน (วันที่ 65 - 73)	-200	0

3.4 การประเมินอัตราการเติบโตของสัตว์น้ำ

ทำการตรวจวัดอัตราการเติบโตของปลานิลในบ่อทดลองตลอดช่วงระยะเวลาการทดลองไม่น้อยกว่า 70 วัน โดยการชั่งน้ำหนักและวัดความยาวของปลาด้วยอุปกรณ์วัดความยาวทั้งก่อนการทดลอง ระหว่างการทดลอง และวันสุดท้ายของการทดลอง ดังภาพที่ 3.16 เพื่อนำมาคำนวณหา น้ำหนักและความยาวเฉลี่ยของปลานิล ตลอดจนใช้ในการคำนวณอัตราการเติบโตของปลานิลต่อวัน (Daily Weight Gain: DWG) อัตราการรอดของปลานิล (Survival rate) และอัตราการแลกเนื้อ (Feed conversion ratio: FCR) จากสูตรดังต่อไปนี้

$$\text{น้ำหนักปลาเฉลี่ยต่อตัว (กรัม)} = \frac{\text{ผลรวมของน้ำหนักปลาทั้งหมด}}{\text{จำนวนปลาทั้งหมด}}$$

$$\text{ความยาวปลาเฉลี่ยต่อตัว (ซม.)} = \frac{\text{ผลรวมของความยาวปลาทั้งหมด}}{\text{จำนวนปลาทั้งหมด}}$$

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

$$\text{อัตราการรอด (ร้อยละ)} = \frac{\text{จำนวนปลาเมื่อสิ้นสุดการทดลอง} \times 100}{\text{จำนวนปลาตอนเริ่มต้นการทดลอง}}$$

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



การวัดความยาวปลา



การชั่งน้ำหนักปลา

ภาพที่ 3.18 การติดตามอัตราการเจริญเติบโตของปลานิลด้วยการวัดความยาวและชั่งน้ำหนัก

3.5 การประเมินสมดุลไนโตรเจน

ทำการประเมินสมดุลไนโตรเจนเมื่อสิ้นสุดการทดลอง โดยการประเมินปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบเลี้ยงปลานิลจากอาหาร ตัวปลานิล และในน้ำ เปรียบเทียบกับปริมาณไนโตรเจนในวันสุดท้ายของการทดลองจากในตัวปลานิล ในน้ำ และในตะกอนแขวนลอย เพื่อประเมินประสิทธิภาพของบ่อเพาะเลี้ยงปลานิลที่ติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว

การทดลองช่วงที่ 4 การศึกษาความหลากหลายและการเปลี่ยนแปลงกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ใน ถึงปฏิกรณ์ดีในทรีฟิเคชันแบบท่อยาว

การทดลองในส่วนนี้เลือกใช้เทคนิคทางชีววิทยาระดับโมเลกุลเพื่อศึกษาความหลากหลายของกลุ่มจุลินทรีย์บนพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพ โดยการนำตัวอย่างตัวกรองชีวภาพที่ต้องการศึกษามาทำการสกัดแยกดีเอ็นเอรวมของจุลินทรีย์ และทำการเพิ่มจำนวนยีนในช่วงสายของ 16S rDNA ด้วยเทคนิคพีซีอาร์ จากนั้นวิเคราะห์ความแตกต่างของยีนที่ทำการเพิ่มจำนวนโดยการแยกด้วยไฟฟ้าบนโพลีอะครีลาไมด์เจลตามหลักการของดีจีจีอี ซึ่งตัวกลางชีวภาพที่ใช้ในการทดลองได้เก็บตัวอย่างมาจากการทดลองที่ 2.2 และการทดลองที่ 3 โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ 16S rDNA ด้วยวิธีพีซีอาร์-ดีจีจีอี

กระบวนการศึกษาความหลากหลายและการเปลี่ยนแปลงกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ด้วยเทคนิคพีซีอาร์-ดีจีจีอี มีขั้นตอนดังนี้

1.1 การสกัดแยกดีเอ็นเอรวมของจุลินทรีย์ที่เติบโตบนพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพ

บรรจุตัวอย่างตัวกรองชีวภาพลงในบีกเกอร์ จากนั้นเติมน้ำที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วลงไป 200 มล. นำไปเขย่าในอ่างที่อาศัยการสั่นสะเทือนด้วยเครื่องเสียง (Sonication) เป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้จุลินทรีย์หลุดออกจากตัวกรองชีวภาพ แยกตัวกลางออกจากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยง (Centrifugation) เพื่อเก็บตะกอนจุลินทรีย์ดังกล่าวไว้ในหลอดพลาสติกขนาดเล็ก (Eppendorf) โดยกำหนดให้แต่ละหลอดมีค่าตะกอนแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids) เท่ากับ 2 mgMLSS/L จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) โดยใช้ความเร็ว 14,000 xg เป็นเวลา 5 นาที แล้วดูดเอาน้ำใสด้านบนออก ทำการเก็บตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้ไว้ในที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (-20 องศาเซลเซียส)

1.2 การสกัดแยกดีเอ็นเอออกจากตัวอย่าง

ทำการสกัดแยกดีเอ็นเอด้วยชุดสกัดดีเอ็นเอสำเร็จรูป (FastDNA[®] SPIN Kit for Soil) และดำเนินการตามวิธีที่ระบุโดยผู้ผลิต (MP Biomedicals, USA.) โดยนำตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ที่เก็บไว้ในหลอดทดลองพลาสติกขนาดเล็ก (Eppendorf) จากอุณหภูมิแช่แข็ง (-20 องศาเซลเซียส) มาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนน้ำแข็งละลายหมด เติมนโซเดียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Sodium Phosphate Buffer) 978 ไมโครลิตร แล้วจึงดูดสารละลายทั้งหมดใส่ลงใน Lysing Matrix E tube จากนั้นเติมเอ็มทีบัฟเฟอร์ (MT Buffer) 122 ไมโครลิตร นำไปผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง FastPrep[®]

ที่ตั้งความเร็วไว้ที่ระดับ 6.0 เป็นเวลา 40 วินาที เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดจึงนำไปหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) โดยใช้ความเร็ว 14,000 xg เป็นเวลา 5 นาที จะได้ดีเอ็นเอที่ถูกสกัดออกมาอยู่ในชั้นของสารละลายใส

1.3 ขั้นตอนการทำความสะอาดดีเอ็นเอที่แยกได้

ถ่ายสารละลายใสลงในหลอดทดลองพลาสติกขนาดเล็ก เติมสารละลายพีพีเอส (Protein Precipitation Solution; PPS) 250 ไมโครลิตร นำไปหมุนเหวี่ยงโดยใช้ความเร็ว 14,000 xg เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นถ่ายสารละลายใสลงในหลอดทดลองพลาสติกขนาดเล็กขนาด 2 มล. เติม Binding Matrix Suspension 1 มล. เขย่าด้วยมือเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้อีก 3 นาทีเพื่อตกตะกอน

1.4 ขั้นตอนการชะดีเอ็นเอออกจากตัวกรอง

เทส่วนสารละลายใสส่วนบนทิ้ง 500 ไมโครลิตร แล้วผสมสารละลายกับตะกอนที่เหลือในหลอดให้เข้ากันแล้วถ่ายลงในหลอดทดลองพลาสติกขนาดเล็กที่มีแผ่นกรองติดอยู่ (Spin Filter) นำไปหมุนเหวี่ยงโดยใช้ความเร็ว 14,000 xg เป็นเวลา 1 นาที สารละลายใสจะผ่านกระดาษกรองไปที่บริเวณก้นหลอดส่วนดีเอ็นเอที่ต้องการจะติดอยู่บนกระดาษกรอง จากนั้นนำกระดาษกรองออกแล้วเทสารละลายใสข้างล่างทิ้งไป จากนั้นเติม SEW-M 500 ไมโครลิตร เพื่อล้างสิ่งปนเปื้อนที่ติดอยู่กับดีเอ็นเอออก นำไปหมุนเหวี่ยงโดยใช้ความเร็ว 14,000 xg เป็นเวลา 1 นาที เทสารละลายใสทิ้ง แล้วนำไปหมุนเหวี่ยงที่ 14,000 xg อีกครั้งเป็นเวลา 2 นาที ทำการย้ายส่วนตัวกรองใส่ลงใน Catch tube ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 5 นาที แล้วจึงเติม DES 50 ไมโครลิตร เพื่อชะให้ดีเอ็นเอที่ติดอยู่บนกระดาษกรองละลายออกมา จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงที่ 14,000 xg เป็นเวลา 1 นาที ที่ส่วนของกระดาษกรอง จะได้สารละลายดีเอ็นเอปริมาตร 50 ไมโครลิตร หากยังไม่นำไปวิเคราะห์ให้เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส

1.5 การตรวจสอบความบริสุทธิ์ของตัวอย่างดีเอ็นเอด้วยเครื่องแยกกระแสไฟฟ้า

นำตัวอย่างดีเอ็นเอที่สกัดได้มาตรวจสอบด้วยเครื่อง Horizontal DNA Electrophoresis Gel Box (Bioactive) เมื่อใช้ช่องกาโรสเจลความเข้มข้นร้อยละ 2 ในที่เอ็บัฟเฟอร์ และใช้ 1Kb DNA Ladder (BioLabs) เป็นดีเอ็นเอมาตรฐาน (DNA Marker) ทำการเดินระบบด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrophoresis) โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 100 โวลต์ เป็นเวลา 20 นาที หรือจนเห็นสีย้อมเคลื่อนที่ลงมาถึงประมาณ 2/3 ของแผ่นเจล จากนั้นจึงนำแผ่นเจลไปตรวจสอบด้วยเครื่อง UV Transilluminator (Gel Dolphin DOC, NV, USA.)

1.6 การเพิ่มจำนวน 16S rDNA ด้วยเทคนิคลูกโซ่พอลิเมอร์เรส

ทำการเพิ่มจำนวน 16S rDNA ซึ่งในการทดลองนี้ดำเนินการโดยใช้ Taq PCR Polymerase (Takara Bio Inc, Japan) ซึ่งในหนึ่งหลอดปฏิกิริยาจะมีองค์ประกอบของสารเคมี ดังตารางที่ 3.14 คิดเป็นปริมาตรรวมเท่ากับ 12.5 ไมโครลิตร โดยใช้ลำดับเบสของไพรเมอร์ (Primer sequence) ดังแสดงในตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.14 สารเคมีที่ใช้ในการทำพีซีอาร์

สารเคมี	ปริมาตร (ไมโครลิตร)
น้ำปราศจากดีเอ็นเอ	7.6250
10x Ex Taq buffer	1.2500
dNTP	1.0000
Primer 341f + GC clamp	1.0000
Primer 907r	1.0000
Takara Ex Taq	0.1250
DNA Template	0.5000

ตารางที่ 3.15 ลำดับเบสของไพรเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง (อ้างอิงตามวิธีของ Muyzer, 1998; Suzuki, 2004; Hashizume, 2005)

ไพรเมอร์	ลำดับเบส
341f + GC clamp	5'- CGC CCG CCG CGC CCC GCG CCC GGC CCG CCG CCC CCG CCC GCC TAC GGG AGG CAG CAG -3'
907r	5'- CCG TCA ATT CCT TTG AGT TT -3'

สภาวะที่ใช้ในการเพิ่มปริมาณ 16S rDNA ด้วยเครื่องทำปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอร์เรส อ้างอิงตามวิธีของ Xiao และคณะ (2009) โดยใช้โปรแกรมอุณหภูมิ (Temperature profile) ดังนี้

Initial Denaturing	94 องศาเซลเซียส	5 นาที	} 30 รอบ
Denaturing	94 องศาเซลเซียส	40 วินาที	
Annealing	55 องศาเซลเซียส	40 วินาที	
Extension	72 องศาเซลเซียส	45 วินาที	
Final Extension	72 องศาเซลเซียส	7 นาที	
End	4 องศาเซลเซียส		

ทำการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ดีเอ็นเอที่ได้จากขั้นตอนพีซีอาร์อีกครั้งด้วยวิธีแยกด้วยกระแสไฟฟ้าตามวิธีในข้อ 1.5

1.7 การวิเคราะห์กลุ่มประชากรจุลินทรีย์ด้วยเทคนิคดีจีจีอี

1.7.1 การเตรียมโพลีอะคริลาไมด์เจล

จากการทดลองแปรผันความเข้มข้นของยูเรีย พบว่าความเข้มข้นของยูเรียที่เหมาะสมในการแยกสายของดีเอ็นเอสำหรับงานวิจัยนี้ คือ ร้อยละ 55-58 ที่มีองค์ประกอบของอะคริลาไมด์เข้มข้นร้อยละ 8 ทำได้โดยเตรียมร้อยละ 8 โพลีอะคริลาไมด์ที่มีความเข้มข้นยูเรียร้อยละ 80 และร้อยละ 0 เพื่อใช้เตรียม สารละลาย Denaturing solution ที่มีความเข้มข้นของยูเรียร้อยละ 55 (ผสมร้อยละ 80 อะคริลาไมด์ 9.63 มล. เข้ากับร้อยละ 0 อะคริลาไมด์ 4.37 มล. ผสมร้อยละ 10 แอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต 90 ไมโครลิตร และ TEMED 9 ไมโครลิตร) และสารละลาย Denaturing solution ที่มีความเข้มข้นของยูเรียร้อยละ 58 (ผสมร้อยละ 80 อะคริลาไมด์ 10.15 มล. เข้ากับร้อยละ 0 อะคริลาไมด์ 3.85 มล. เติม dye solution 100 ไมโครลิตร ผสมร้อยละ 10 แอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต 90 ไมโครลิตร และ TEMED 9 ไมโครลิตร) ซึ่งการเติมโพลีอะคริลาไมด์เข้มข้นร้อยละ 8 ที่มีความเข้มข้นของ denaturing solution ร้อยละ 0 และ 80 แสดงดังตารางที่ 3.16 และตารางที่ 3.17 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.16 การเตรียม Denaturing solution ที่มีความเข้มข้นของยูเรียร้อยละ 0

8 เปอร์เซนต์ เจล (มล.)	
40% acrylamide/Bis 37.5:1	20
50x TAE buffer	2
ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ปริมาตรรวมเท่ากับ	100

ตารางที่ 3.17 การเตรียม Denaturing solution ที่มีความเข้มข้นของยูเรียร้อยละ 80

8 เปอร์เซนต์ เจล (มล.)	
40% acrylamide/Bis 37.5:1	20
50x TAE buffer	2
ฟอร์มามาไมด์ (Formamide)	32
ยูเรีย	33.6
ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ปริมาตรรวมเท่ากับ	100

1.7.2 การเตรียมกระจกและการเตรียมเจล

ใช้กระจกด้วยแอลกอฮอล์รอนแห้งแล้วจึงประกอบกระจกเข้าด้วยกัน และติดตั้งเข้ากับฐานสำหรับเตรียมเจล จากนั้นใช้หลอดฉีดยาคูดสารละลาย Denaturant solution ที่เตรียมได้จากข้อ 4.1.7.1 ทั้งสองชนิดมาประกอบเข้ากับอุปกรณ์การสร้างเกรเดียนท์ (Gradient

former) จากนั้นหมุนวงล้อเพื่อให้อุปกรณ์ดังกล่าวทำการผสม Denaturing solution ทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน ซึ่งจะทำให้ได้แผ่นเจลอะครีลาไมด์ที่มีความเข้มข้นของยูเรียเป็นเกรเดียนท์ ตั้งแต่ร้อยละ 55-58 รอบประมาณ 20 นาที จากนั้นทำการเสียบหวี (Comb) เพื่อสร้างร่องสำหรับบรรจุดีเอ็นเอ และเติมสารละลาย Denaturing solution ร้อยละ 0 จนถึงขอบด้านบนของแผ่นกระจก ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 4 ชม.หรือทิ้งไว้ข้ามคืนเพื่อให้แผ่นเจลแข็งตัวดี

1.7.3 การแยกดีเอ็นเอด้วยกระแสไฟฟ้าบนโพลีอะครีลาไมด์เจล

เติมทีเออีบัฟเฟอร์ 7 ลิตรลงในถังบรรจุสารละลายของเครื่องแยกดีเอ็นเอด้วยกระแสไฟฟ้า (electrophoresis tank) และทำการอุ่นบัฟเฟอร์จนมีอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิถึงระดับ 50 องศาเซลเซียส ให้ทำการดึงหวีออกจากเจลและประกอบชุดกระจกเข้ากับอุปกรณ์ (Sandwich core) แล้วจึงหยดตัวอย่างที่ผสมกับสีย้อม (ตัวอย่าง 50 ไมโครลิตร สีย้อม 4 ไมโครลิตร) ลงในแผ่นเจล เมื่อบัฟเฟอร์มีอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสจึงบรรจุชุดกระจกลงในถังบรรจุสารละลาย ทำการแยกดีเอ็นเอด้วยกระแสไฟฟ้าที่สภาวะกระแสไฟฟ้า 140 มิลลิแอมป์ (mA) แรงดันไฟฟ้า 400 โวลต์ เป็นเวลา 15 ชม. จากนั้นจึงนำเจลมาย้อมด้วยเอทิดียมโบรไมด์ (Ethidium bromide) และน้ำกลั่นเป็นเวลา 20 นาที และ 10 นาที ตามลำดับ แล้วนำมาตรวจสอบภายใต้แสงยูวี ด้วยเครื่อง UV Transilluminator

1.7.4 การจำแนกความแตกต่างของแถบดีเอ็นเอบนโพลีอะครีลาไมด์เจลด้วยวิธีหาลำดับเบส (DNA sequence)

ใช้ใบมีดที่สะอาดตัดแถบ 16s rDNA แต่ละแถบจากเจลใส่ในหลอดพลาสติกขนาดเล็ก เติมน้ำกลั่นปราศจากเชื้อ 50 ไมโครลิตร ให้ท่วมเจลจากนั้นนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเพื่อให้ดีเอ็นเอละลายและหลุดออกมาจากแผ่นเจล

1.7.5 การทำผลิตภัณฑ์พีซีอาร์ให้บริสุทธิ์เพื่อเตรียมส่งไปอ่านรหัสพันธุกรรม

ทำการเพิ่มจำนวน 16s rDNA อีกครั้ง ตามขั้นตอนพีซีอาร์ ในหัวข้อ 1.6 แต่เปลี่ยนใช้ไพรเมอร์ที่ไม่ติด GC-clamp ในสภาวะที่ทำการลดรอบการทำปฏิกิริยาถูกโซ่พอลิเมอร์เรสเป็น 20 รอบ จากนั้นนำดีเอ็นเอที่เพิ่มจำนวนไปสกัดด้วยชุด NucleoSpin® Extract II (MACHEREY-NAGEL, Duren, Germany) และส่งไปอ่านรหัสพันธุกรรมที่บริษัท MacroGen Inc. ประเทศเกาหลี จากนั้นนำรหัสพันธุกรรมที่อ่านได้มาเปรียบเทียบกับลำดับเบสของฐานข้อมูล 16s rDNA ที่ระบุใน GenBank ของ National Center for Biotechnology Information (NCBI) ด้วยโปรแกรม BLASTN (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov>)

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การเตรียมสภาพตัวกรองชีวภาพดีไนทริฟิเคชันและติดตั้งถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว

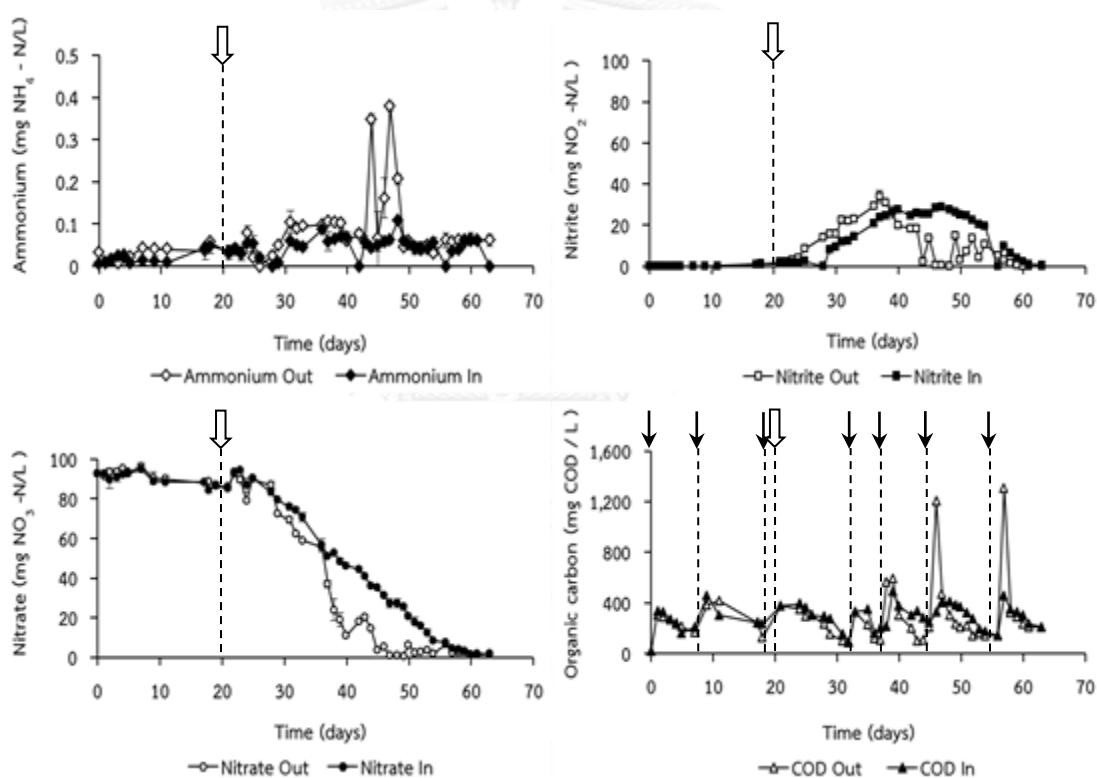
การทดลองส่วนนี้เป็นการเตรียมสภาพตัวกลางพลาสติก Digester box (DB) และติดตั้งถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว โดยมุ่งเน้นประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรตของถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว และเป็นการเตรียมสภาพเบื้องต้นเพื่อเพิ่มปริมาณดีไนทริฟิเคชันแบบคทีเรียให้ยึดเกาะกับตัวกลางพลาสติก Digester box (DB) ในท่อยาวจนอยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานได้

- การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนและสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว

ภายหลังจากการติดตั้งระบบบำบัดดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวที่บรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากโซเดียมไนเตรตความเข้มข้น 100 มก.ไนเตรตไนโตรเจน/ลิตร ปริมาตร 493 ลิตร และเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนปริมาตร 142.3 มล. ในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 โดยกำหนดให้มีระยะเวลาพักเก็บน้ำ 2 ชม. และตรวจวัดสถานะที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันด้วยหัววัดค่าโออาร์พีที่ติดตั้งอยู่บริเวณส่วนปลายของท่อยาว ผลการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนและสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนในน้ำทั้งก่อนเข้าและขาออกจากถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวตลอดระยะเวลาการทดลอง 62 วัน แสดงในภาพที่ 4.1 พบว่าช่วงแรกของการทดลองตั้งแต่วันที่ 0-20 ไม่พบการลดลงของไนเตรตเนื่องจากยังเป็นช่วงต้นของการบ่มเชื้อ ปริมาณเมทานอลที่เติมลงไปให้กับระบบยังมีไม่เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ เมทานอลที่เติมให้กับระบบจึงลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากจุลินทรีย์ใช้เมทานอลไปในการหายใจและการเจริญเติบโต ดังนั้นในวันที่ 8 ของการทดลองเมื่อสารอินทรีย์คาร์บอนที่ออกจากท่อยาวมีค่าต่ำกว่า 100 มก.ซีโอดีต่อลิตร จึงได้ทำการเติมเมทานอลลงไปให้กับระบบเป็นครั้งที่ 2 ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของไนเตรตมีการลดลงอย่างช้าๆ จนเหลือ 88.79 มก.ไนเตรตไนโตรเจน/ลิตร ในขณะที่ปริมาณไนโตรเจนยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลง

เนื่องจากการเติมเฉพาะเมทานอลเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนเพียงชนิดเดียวไม่สามารถทำให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ ดังนั้นในวันที่ 20 ของการทดลองจึงได้ทำการเติมอาหารกุ้ง

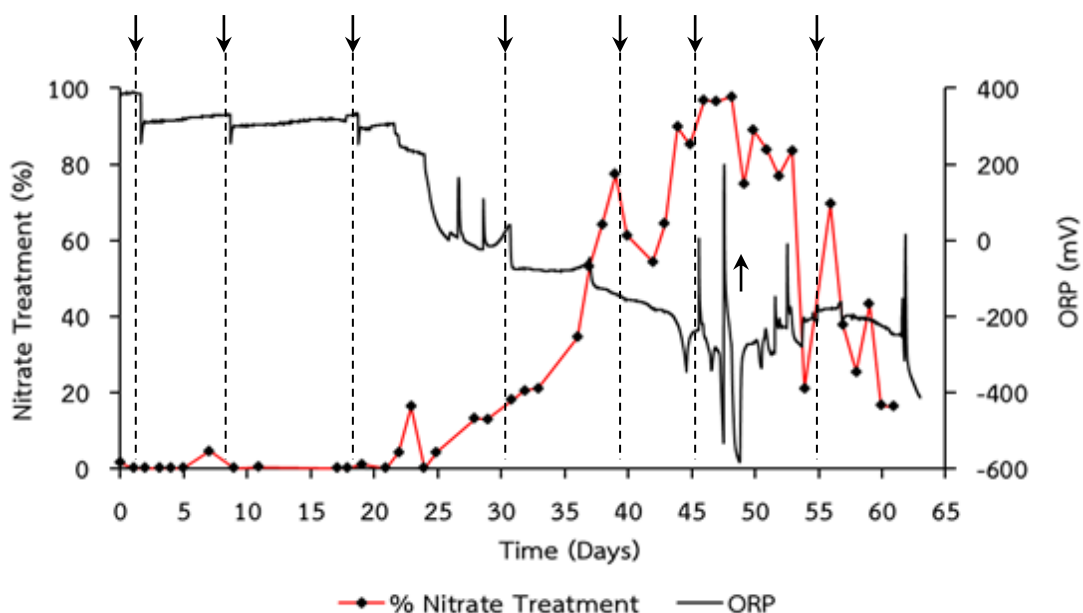
บดละเอียดปริมาณ 9.76 กรัม ละลายในน้ำเพื่อเป็นแหล่งของสารอาหารเพิ่มเติม ทำให้ในช่วงวันที่ 21-49 พบว่าไนเตรดมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วจากระบบ โดยระบบสามารถบำบัดไนเตรดจากความเข้มข้น 85.26 ไนเตรดไนโตรเจน/ลิตร ลดลงเหลือ 25.41 มก. ไนเตรดไนโตรเจน/ลิตร ภายใน 48 วัน และยังพบว่าความเข้มข้นของไนไตรต์เพิ่มขึ้นระหว่างการบำบัดไนเตรด การสะสมของไนไตรต์เพิ่มสูงขึ้นมากในช่วงวันดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดโดยไม่สมบูรณ์จึงมีการสะสมของไนไตรต์ที่เป็นสารตัวกลางในปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน แต่หลังจากวันที่ 49-62 ของการทดลองพบว่าเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์ เนื่องจากปริมาณไนเตรดมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และไม่มีการสะสมของไนไตรต์ในระบบ



ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนและสารประกอบอินทรีย์คาร์บอน เปรียบเทียบระหว่างก่อนเข้าท่อยาวและออกจากท่อยาว โดย (↓) แสดงการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนลงในถังกวนผสมเมื่อสารอินทรีย์คาร์บอนที่ออกจากท่อยาวมีค่าต่ำกว่า 100 มก.ซีไอดีต่อลิตร และ (↓) แสดงการเติมอาหารกึ่งบดละเอียดในวันที่ 20 ของการทดลอง

- ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน

จากผลการทดลองในภาพที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าช่วงวันแรกจนถึงวันที่ 20 ของการทดลองนั้นยังไม่เกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว สอดคล้องกับค่าโออาร์พีที่ตรวจวัดได้บริเวณทางออกจากท่อยาว เนื่องจากค่าโออาร์พีมีค่าสูงกว่า 200 มิลลิโวลต์ หลังจากนั้นค่าโออาร์พีมีการลดลงอย่างรวดเร็วในเวลาเดียวกับที่พบการลดลงของไนเตรต โดยมีรายงานว่า การเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์จะมีค่าโออาร์พีน้อยกว่า -200 มิลลิโวลต์ (สุวิมลตันทสุกิจวานิช, 2545) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในช่วงของวันที่ 47-49 โดยสังเกตได้จากการมีฟองอากาศเกิดขึ้นบริเวณผิวน้ำของถังบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ตรงกับทางน้ำออกจากท่อยาวดังภาพที่ 4.3 และค่าโออาร์พีมีแนวโน้มลดลงและมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงต่ำกว่า -400 มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นค่าโออาร์พีที่มีความเสี่ยงต่อสภาวะรีดิวซ์ซัลเฟต ซึ่งคาดว่าจะเกิดจากการสะสมของสารอินทรีย์คาร์บอนทำให้เกิดสภาวะขาดออกซิเจนได้ง่าย โดยจุลินทรีย์หลากหลายชนิดทั้งดีไนทริฟิเคชันแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟและออโตโทรฟจะเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะไร้ออกซิเจนและใช้สารอินทรีย์คาร์บอนที่มากเกินไปเป็นแหล่งอาหาร โดยใช้ออกซิเจนจากปฏิกิริยารีดักชันของซัลเฟตเป็นผลให้เกิดไอออนของซัลไฟด์ และหากซัลไฟด์เหล่านั้นทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนในน้ำจะเกิดเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ขึ้น ดังนั้นในระหว่างการทดลองในวันที่ 49 จึงทำการถ่ายน้ำภายในท่อยาวออกส่วนหนึ่งเพื่อให้น้ำเกิดการไหลเวียนภายในท่อยาวได้สะดวกไม่เกิดการอุดตัน และรอนจนกระทั่งค่าโออาร์พีมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า -400 มิลลิโวลต์ จึงทำการเดินระบบต่อ นอกจากนี้การเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ยังส่งผลให้ค่าพีเอชและความเป็นด่างของน้ำมีค่าสูงขึ้น โดยค่าพีเอชและสภาพต่างของน้ำที่ออกจากท่อยาวมีค่าอยู่ในช่วง 8.74-8.97 และ 320-330 มก.แคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ตามลำดับ (ดังภาพที่ 4.4) เนื่องมาจากผลผลิตที่สำคัญของปฏิกิริยานี้คือไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) (ธงชัย พรณสวัสดิ์, 2544; Metcalf และ Eddy, 2004) โดยหลังจากที่ได้ทำการถ่ายน้ำออกจากระบบในวันที่ 49 แล้วรอให้ค่าโออาร์พีเพิ่มขึ้นจนอยู่ในช่วงระหว่าง -200 ถึง -400 มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์ (Gutierrez-Wing และคณะ, 2012) ฟองอากาศที่เคยลอยอยู่บนผิวน้ำของถังบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ได้หายไป ดังนั้นจึงได้ทำการเดินระบบต่อโดยการเติมเมทานอลในสัดส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 ซึ่งทำให้ช่วงวันที่ 50-62 ค่าโออาร์พียังคงอยู่ในช่วงที่เกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์



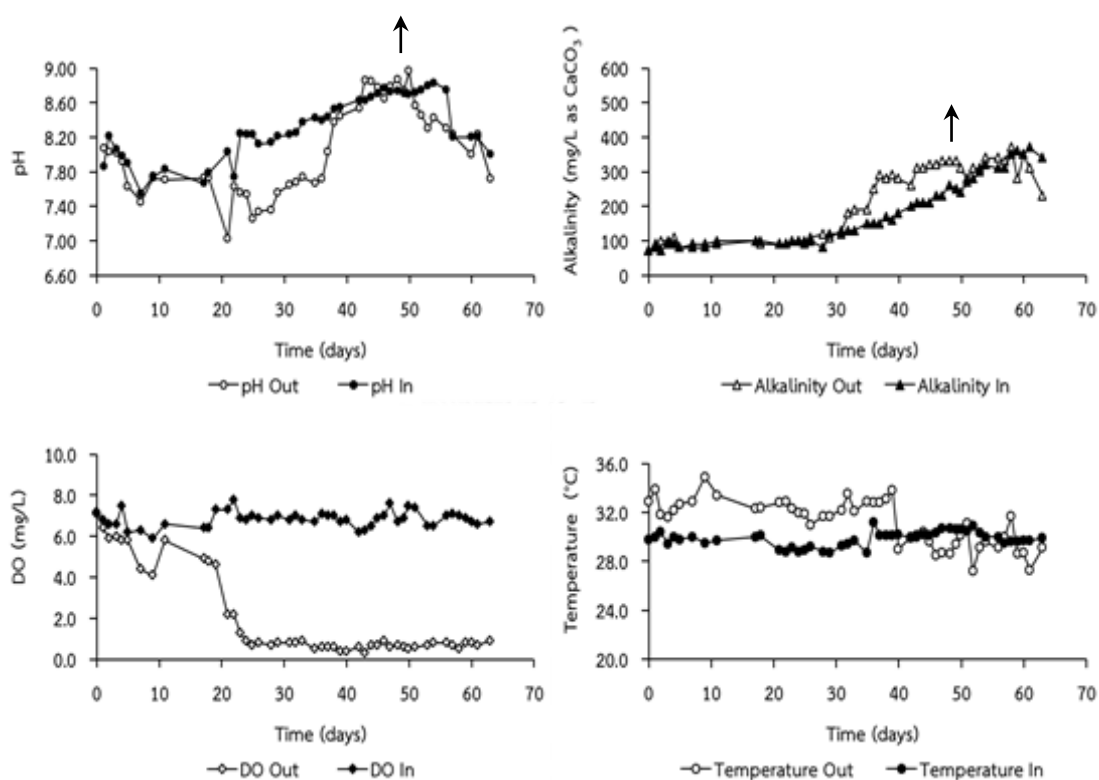
ภาพที่ 4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและการเปลี่ยนแปลงค่าโออาร์พีบริเวณทางออกจากท่อยาว โดย (↓) แสดงการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนลงในถังกวนผสมเมื่อสารอินทรีย์คาร์บอนที่ออกจากท่อยาวมีค่าต่ำกว่า 100 มก.ซีไอดีต่อลิตร และ (↑) แสดงการถ่ายน้ำออกจากท่อยาว



ภาพที่ 4.3 ฟองอากาศบนผิวน้ำของถังบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ในช่วงวันที่ 47-49

โดยการเติมเมทานอลลงในถังจนผสมเพื่อเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนนั้นส่งผลทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำที่ออกจากท่อยาวลดลงอย่างชัดเจนดังภาพที่ 4.4 โดยจะลดลงจนมีค่าต่ำกว่า 1.0 มก. ต่อลิตร และเนื่องจากในถังบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์มีการเติมอากาศด้วยหัวทรายตลอดเวลาทำให้ป้องกันไม่ให้น้ำออกซิเจนในน้ำลดลงต่ำลงมากจนเกิดสภาวะไร้อากาศที่ทำให้เกิดน้ำเน่าและระบบล้มเหลว ดังนั้นสภาวะของถังบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้จึงคงสภาวะของน้ำก่อนเข้าท่อยาวที่มีปริมาณออกซิเจนอยู่ในช่วง 5.9–7.8 มก.ต่อลิตร และการตรวจวัดอุณหภูมิระหว่างการทดลองอยู่ในช่วง 28.7–31.2 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลา (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536) ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยของคุณภาพน้ำทั้งก่อนเข้าและออกจากถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวแสดงในตารางที่ 4.1

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ระบบบำบัดดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวสามารถบำบัดไนเตรตได้ด้วยปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์ โดยมีประสิทธิภาพของการบำบัดไนเตรตเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับร้อยละ 45 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของทยากร สุวรรณรัตน์ (2552) ที่พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรตสูงสุดเท่ากับร้อยละ 55 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตในโตรเจนมีผลโดยตรงต่อการทำงานของจุลินทรีย์ ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปจึงได้ทำการศึกษาค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว



ภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ค่าสภาพต่าง ค่าออกซิเจนละลายน้ำและค่าอุณหภูมิเปรียบเทียบระหว่างก่อนเข้าท่อยาวและออกจากท่อยาว โดย () แสดงการถ่ายน้ำออกจากท่อยาว

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำทั้งก่อนเข้าและออกจากถังปฏิกรณ์
ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด - ค่าสูงสุด)	
	ก่อนเข้าท่อยาว	ออกจากท่อยาว
แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	0.04 ± 0.01 (0.00 - 0.11)	0.07 ± 0.01 (0.00 - 0.38)
ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	11.49 ± 0.04 (0.00 - 28.71)	8.37 ± 0.67 (0.00 - 33.86)
ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	54.05 ± 0.96 (1.48 - 94.81)	43.48 ± 1.01 (0.62 - 96.45)
ซีโอดี (มก.ซีโอดี/ลิตร)	286.41 ± 98.59 (14.88 - 490.40)	292.27 ± 239.77 (84.40 - 1,305.90)
ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร)	180.00 ± 95.80 (70 - 370)	212.30 ± 104.30 (70 - 370)
พีเอช	8.30 ± 0.36 (7.55 - 8.83)	8.05 ± 0.51 (7.03 - 8.97)
ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ลิตร)	6.84 ± 0.38 (5.90 - 7.80)	1.95 ± 2.12 (0.30 - 7.10)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	29.83 ± 0.61 (28.70 - 31.20)	31.17 ± 1.90 (27.20 - 34.90)

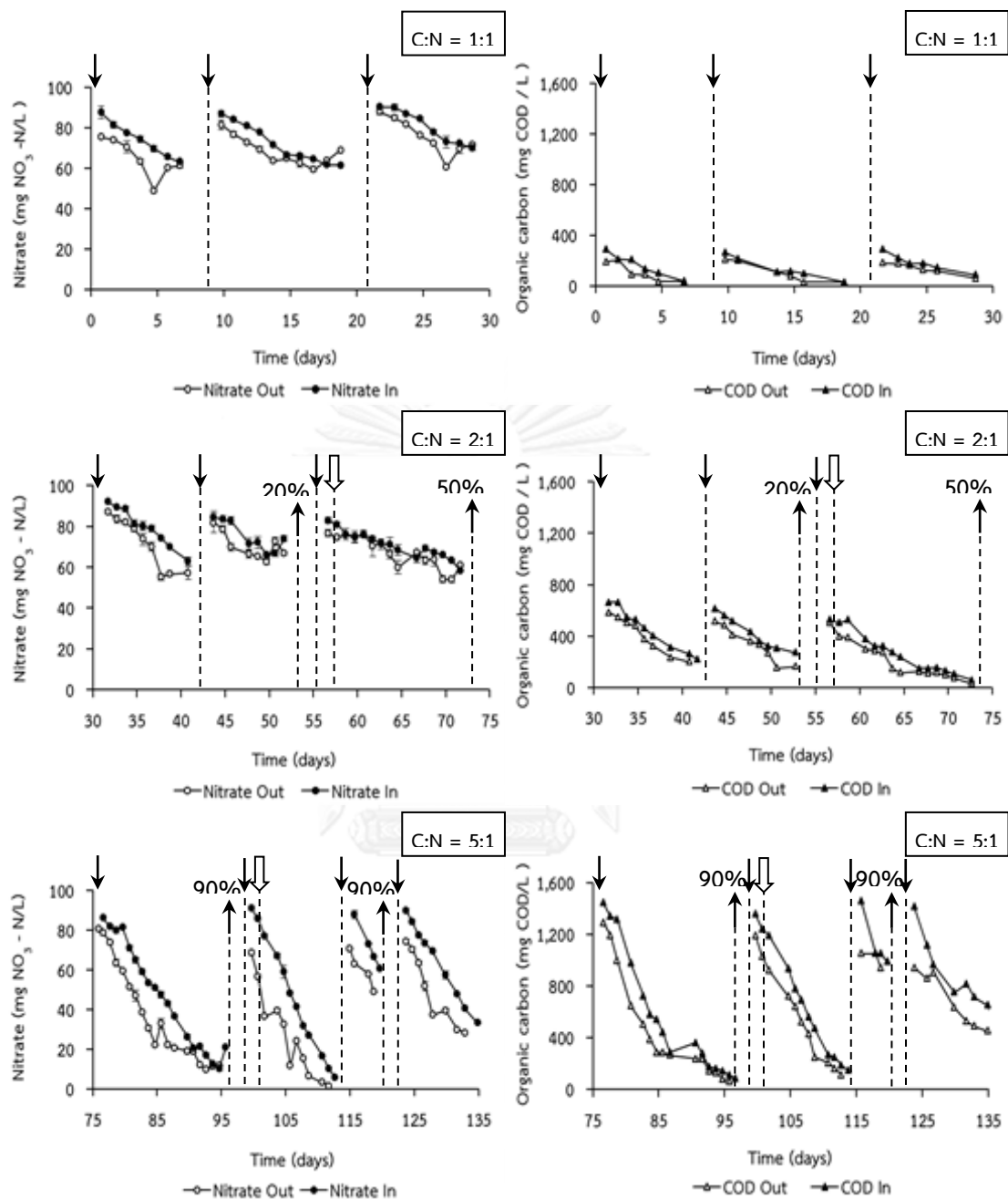
4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรดในระบบท่อยาว

4.2.1 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว

การทดลองในช่วงนี้เป็นการศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรดไนโตรเจนของเมทานอลที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนเตรดด้วยถึงปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว และใช้เมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน โดยทำการแปรผันอัตราส่วนในรูปคาร์บอนต่อไนเตรดไนโตรเจนเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 1:1 2:1 และ 5:1 โดยทำการทดลองต่อเนื่องจากการทดลองที่ 4.1 ซึ่งเป็นระยะที่ทำการบ่มเชื้อเป็นเวลา 62 วัน และจากนั้นจึงเริ่มทำการทดลอง

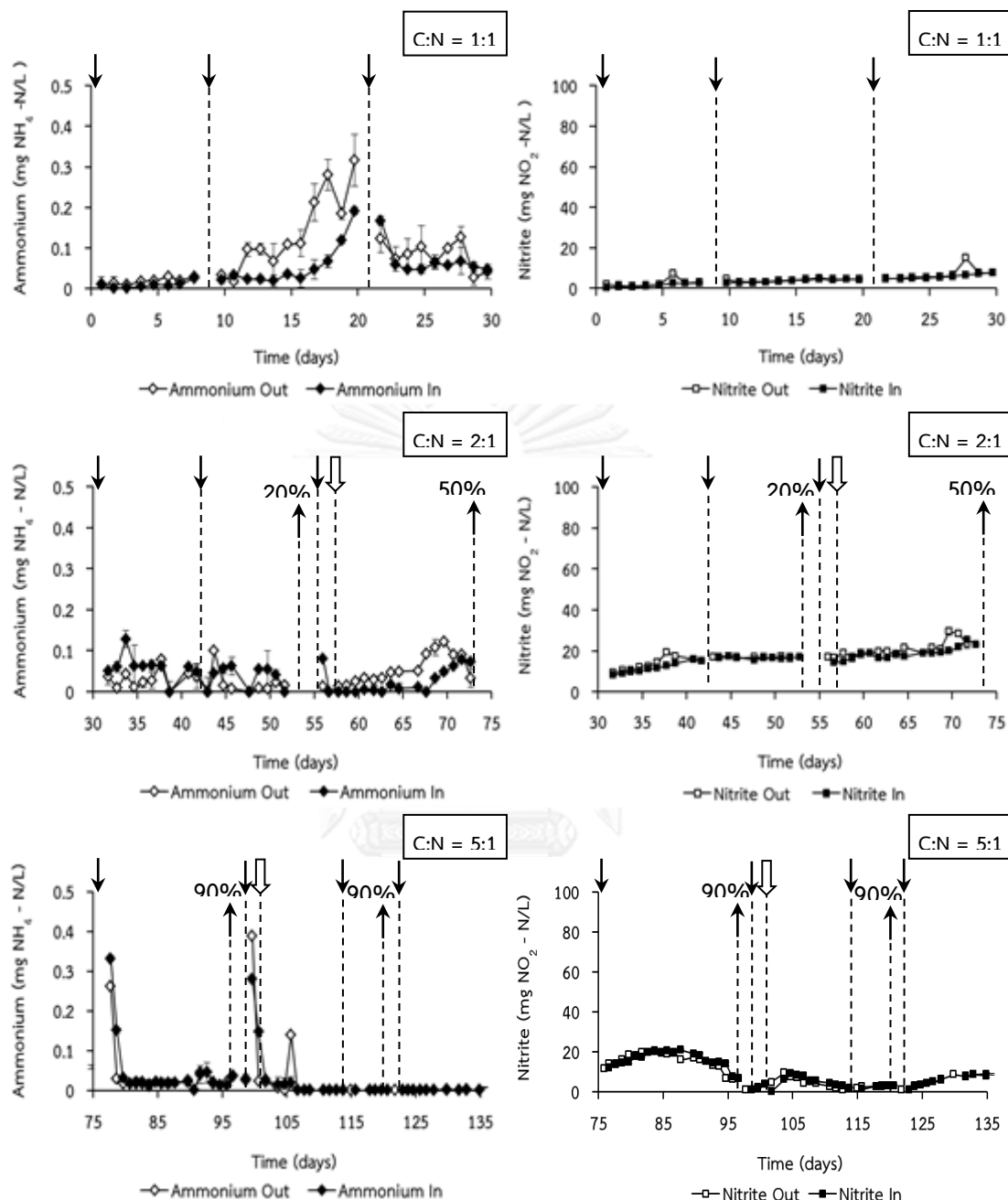
- การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนและสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนในถังปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว

ผลการแปรผันอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรดไนโตรเจนของเมทานอล 3 ระดับ ได้แก่ 1:1 2:1 และ 5:1 แสดงดังภาพที่ 4.5 โดยทำการทดลองต่อเนื่องจากการทดลองที่ช่วงแรก ซึ่งเป็นระยะที่ทำการบ่มเชื้อเป็นเวลา 62 วัน จากนั้นจึงเริ่มทำการทดลอง โดยในวันที่ 0 ถึง 30 ของการทดลอง (ทดลอง 3 ซ้ำ) เป็นการบำบัดไนเตรดโดยกำหนดให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรดไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 (ความเข้มข้นของไนเตรดเริ่มต้นเท่ากับ 100 มก.ไนเตรดไนโตรเจน/ลิตร และปริมาตรเมทานอลเฉลี่ย 135.0 มล.) และในวันที่ 10 ของการทดลองได้ทำการเติมอาหารกึ่งบดละเอียด 9.76 กรัม (คิดเป็นความเข้มข้น 1 มก.ไนโตรเจน/ล.) เพื่อเป็นการเร่งให้เกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน และเร่งการเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบเนื่องจากอาหารที่เหลือจากการกินของสัตว์น้ำหรือของเสียจากการขับถ่ายจะเป็นแหล่งของสารอินทรีย์และสารอาหารที่จำเป็นให้กับเชื้อจุลินทรีย์ได้ จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของไนเตรดจะลดลงและจะเริ่มคงที่ในช่วง 50-60 มก.ไนเตรดไนโตรเจน/ลิตร ส่วนเมทานอลที่เป็นสารอินทรีย์คาร์บอนวัดได้ในรูปของซีโอดีและพบว่ามีความเข้มข้นเริ่มต้นสูงสุดที่ 287.5 มก.ซีโอดี/ลิตร และเริ่มลดลงจนมีค่าต่ำสุดที่ 25.6 มก.ซีโอดี/ลิตร ซึ่งเมื่อพิจารณาระหว่างความเข้มข้นของไนเตรดที่คงเหลือในระบบกับสารอินทรีย์คาร์บอนที่ถูกใช้ไปจนเกือบหมดแสดงให้เห็นว่า สารอินทรีย์คาร์บอนยังมีไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน เนื่องจากสารอินทรีย์คาร์บอนจะถูกใช้ไปเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับจุลินทรีย์ในการหายใจเพื่อปลดปล่อยซิเจนในช่วงต้นของท่อยาว ทำให้แหล่งคาร์บอนมีไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในช่วงปลายท่อยาวอ้างอิงใน สุวิมล ตันทสุกิจวนิช (2545) โดยมีอัตราดีไนทริฟิเคชันของน้ำที่ออกจากท่อยาวเท่ากับ $1,282.7 \pm 347.6$ มก.ไนโตรเจน/วัน

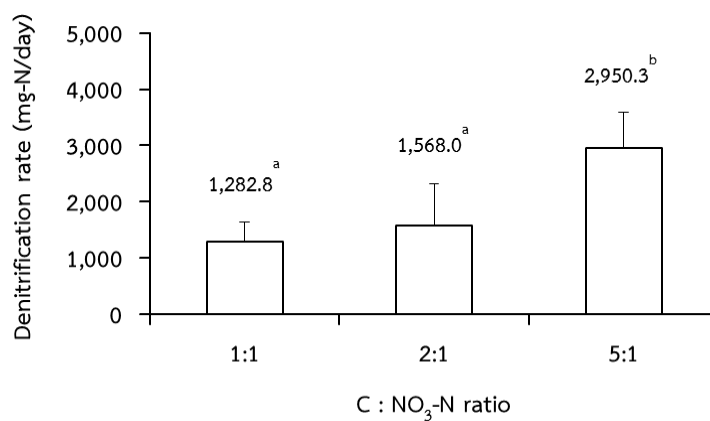


ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรตและสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนเข้าท่อยาวและออกจากท่อยาว ที่แปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 2:1 และ 5:1 โดย () แสดงการเติมไนเตรตและสารอินทรีย์คาร์บอนลงในถังกวนผสมเมื่อสารอินทรีย์คาร์บอนที่ออกจากท่อยาวมีค่าต่ำกว่า 100 มก.ซีไอดีต่อลิตร และ (↑) แสดงการถ่ายน้ำออกจากถังบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ และ (↓) แสดงการเติมอาหารกึ่งบดละเอียด

ดังนั้นจึงได้ทำการเพิ่มปริมาณคาร์บอนขึ้นเป็น 2 เท่า (คาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 2:1) โดยมีปริมาตรเมทานอลเฉลี่ยเท่ากับ 220.0 มล. คิดเป็นอัตราดีไนทริฟิเคชันของน้ำที่ออกจากท่อยาวเท่ากับ $1,568.0 \pm 748.4$ มก.ไนโตรเจน/วัน แต่เนื่องจากระบบเป็นการหมุนเวียนน้ำแบบไม่มีการถ่ายน้ำออก ทำให้เกิดการสะสมของไนไตรต์เพิ่มสูงขึ้นในช่วงดังกล่าว ดังภาพที่ 4.6 ดังนั้นจึงได้ทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำภายในถังบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์คิดเป็นปริมาตรที่ถ่ายน้ำออกร้อยละ 20 ในวันที่ 53 ของการทดลอง โดยใช้น้ำชนิดเดียวกับที่ใช้เมื่อเริ่มต้นการทดลอง จากนั้นในวันที่ 57 จึงทำการเติมอาหารกึ่งบดละเอียด 9.76 กรัม อย่างไรก็ตามการเติมอาหารกึ่งบดละเอียดในช่วงดังกล่าวไม่มีผลต่อการสะสมของแอมโมเนียในระบบ เนื่องจากปริมาณแอมโมเนียมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก คือ น้อยกว่า 0.2 มก.ไนโตรเจน/ล. และในช่วงท้ายของการทดลองได้ทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำออกอีกร้อยละ 50 เพื่อเตรียมสำหรับการเพิ่มปริมาณคาร์บอนขึ้นเป็น 5 เท่าโดยค่าอัตราดีไนทริฟิเคชันในสัดส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนที่ 2:1 มีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 จึงได้ทำการเพิ่มปริมาณคาร์บอนขึ้นเป็น 5 เท่า (ปริมาตรเมทานอลเฉลี่ยเท่ากับ 683 มล.) ผลการทดลองพบว่าอัตราดีไนทริฟิเคชันของน้ำที่ออกจากท่อยาวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังภาพที่ 4.7 โดยมีอัตราดีไนทริฟิเคชันเท่ากับ $2,950.3 \pm 643.3$ มก.ไนโตรเจน/วัน จากนั้นในวันที่ 97 และ 121 ของการทดลอง ได้ทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำในบ่อน้ำเสียสังเคราะห์คิดเป็นปริมาตรน้ำร้อยละ 90 และมีการเติมอาหารกึ่ง ผลการทดลองพบว่าปริมาณไนไตรต์ลดลงเมื่อเทียบกับไนเตรต แสดงว่าระบบเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ ซึ่ง Van Rijn และคณะ (2006) ได้ระบุถึงสาเหตุของการสะสมไนไตรต์ว่า อาจเกิดจากการขาดแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์จึงทำให้มีการสะสมของไนไตรต์เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากการทำงานของเอนไซม์ไนเตรตรีดักเตสและไนไตรตรีดักเตสโดยปริมาณออกซิเจนที่ความเข้มข้นต่ำจะมีผลยับยั้งการสังเคราะห์เอนไซม์ไนเตรตรีดักเตส จึงทำให้มีปริมาณไนไตรต์สะสมเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนียมและไนไตรต์เปรียบเทียบระหว่างก่อนเข้าท่อยาวและออกจากท่อยาว ที่แปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 2:1 และ 5:1 โดย ↓) แสดงการเติมไนเตรตและสารอินทรีย์คาร์บอนลงในถังกวนผสมเมื่อสารอินทรีย์คาร์บอนที่ออกจากท่อยาวมีค่าต่ำกว่า 100 มก.ซีโอดีต่อลิตร และ ↑) แสดงการถ่ายน้ำออกจากถังบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ และ ↓) แสดงการเติมอาหารกุ้งบดละเอียด



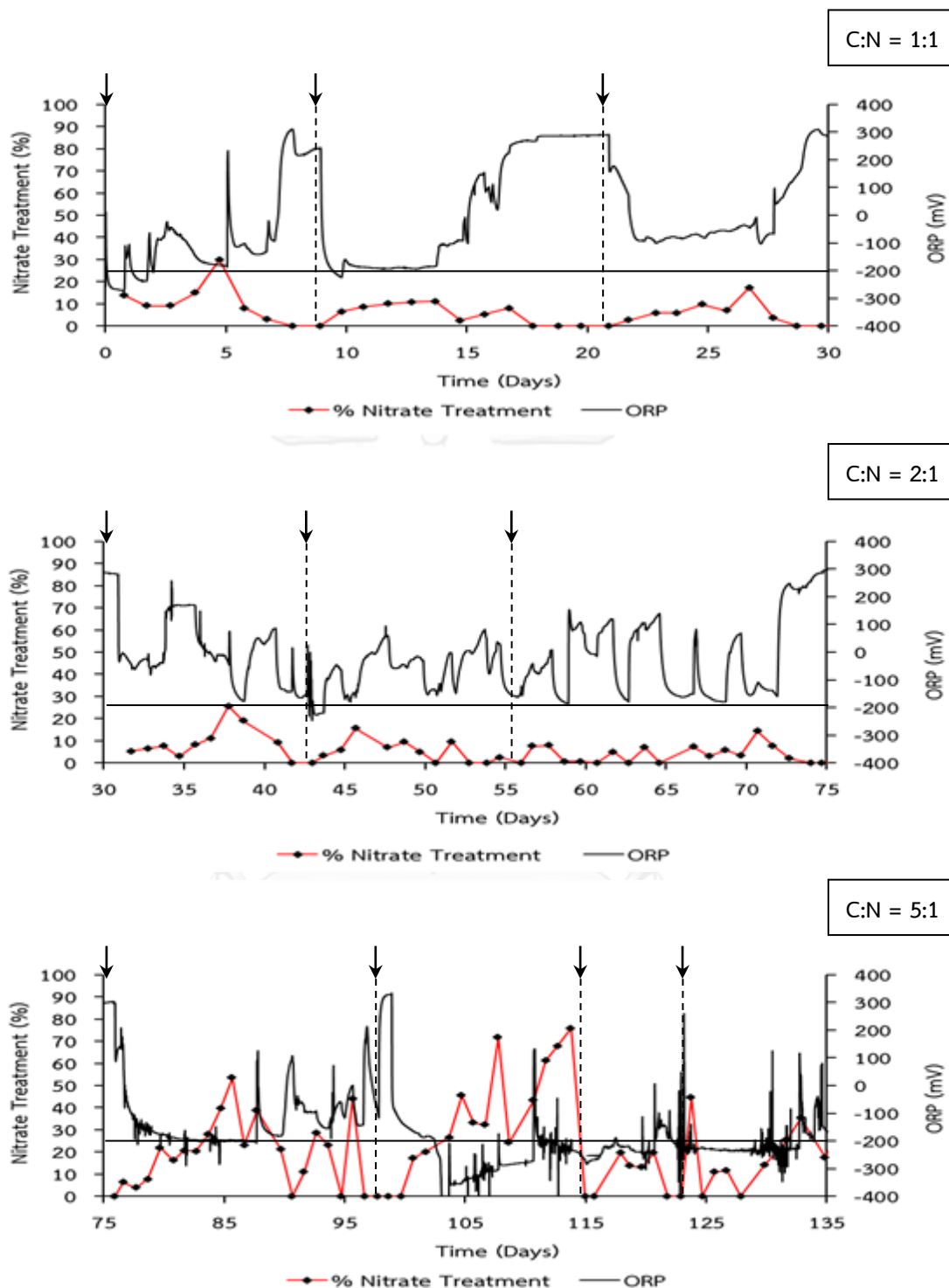
ภาพที่ 4.7 อัตราดีไนทริฟิเคชันจากการเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน โดยแปรผันอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจน 1:1 2:1 และ 5:1 จากการทดลอง 3 ซ้ำ โดยตัวอักษรที่ต่างกันมีความหมายถึงการแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

- ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีในทรีฟเคชัน

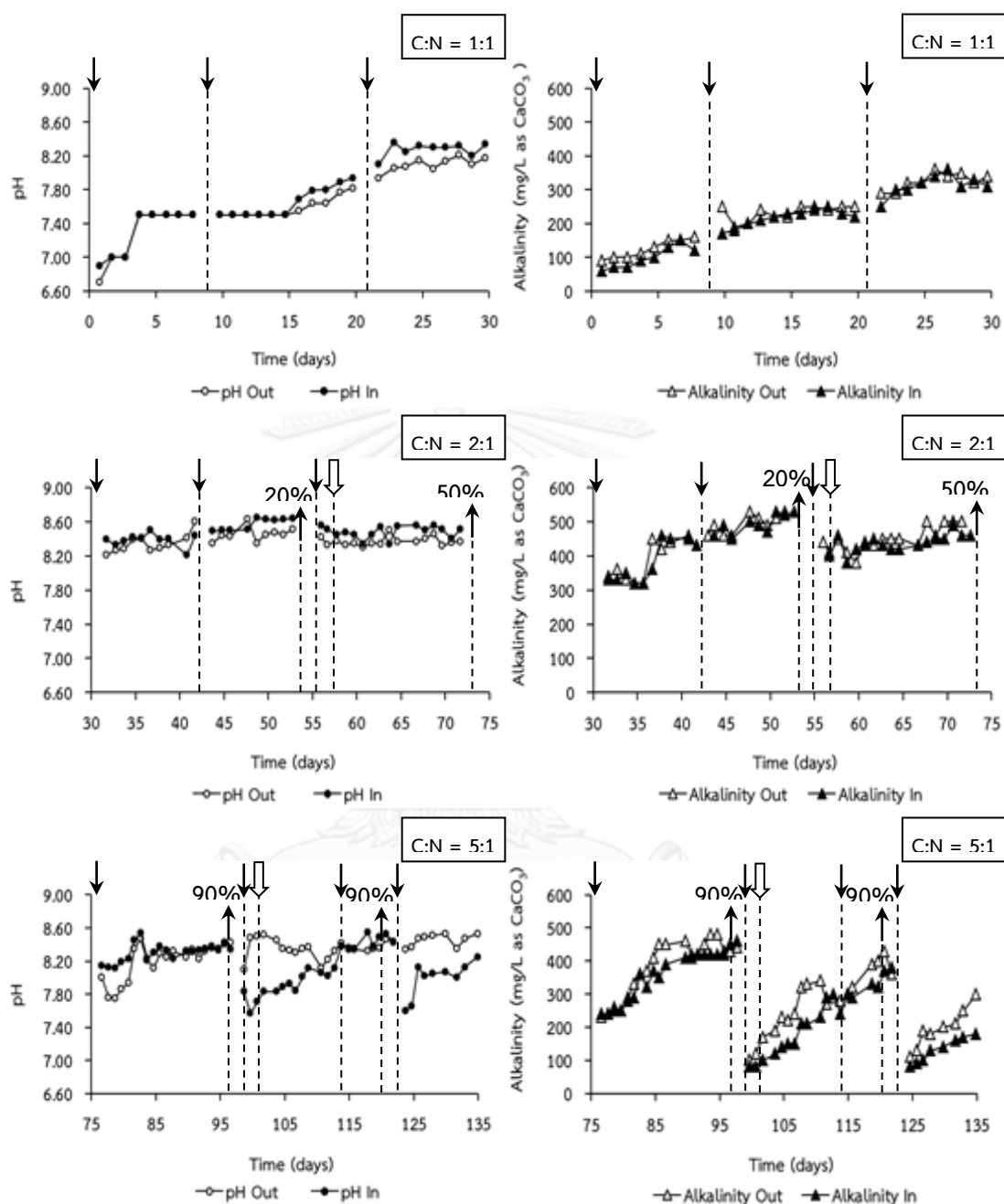
ผลการตรวจวัดปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมในระหว่างการเดินทางระบบการทดลอง ได้แก่ โออาร์พีพีเอช ค่าสภาพต่าง ออกซิเจนละลายน้ำและอุณหภูมิ โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตกับค่าโออาร์พีที่แปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 2:1 และ 5:1 ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.8 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตมีค่าสอดคล้องกับค่าโออาร์พี คือ เมื่อค่าโออาร์พีมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตจะมีค่าลดลง โดยเมื่อเปรียบเทียบจากค่าโออาร์พีของน้ำที่บริเวณทางออกของถังปฏิกิริยาดีในทรีฟเคชันแบบท่อยาวในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 และ 2:1 มีค่าโออาร์พีสูงกว่า -200 มิลลิโวลต์ ทำให้การบำบัดไนเตรตที่เกิดขึ้นดังกล่าวเป็นการบำบัดไนเตรตที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากพบการสะสมของไนไตรต์ในช่วงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 และ 2:1 ดังภาพที่ 4.6 ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการศึกษาของ Lee และคณะ (2000) ที่พบว่าในช่วงค่าโออาร์พีสูงกว่า -200 มิลลิโวลต์ แม้ว่าจะพบการลดลงของไนเตรต แต่ก็จะเป็นการเกิดปฏิกิริยาดีในทรีฟเคชันแบบไม่สมบูรณ์ที่มีการสะสมของไนไตรต์ ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตในช่วงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเฉลี่ยที่ 1:1 และ 2:1 มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 10 แต่เมื่อทำการปรับค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเป็น 5:1 พบว่าค่าโออาร์พีลดลงต่ำกว่า -200 มิลลิโวลต์ และทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 75.8 ในวันที่ 112 ของการทดลอง และพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตของท่อยาวมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอนโดยจะมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 20-70 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของรุ่งนภา สุทธิศรี (2545) ที่พบว่าระบบบำบัดไนเตรตแบบท่อยาวจะมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 60-80 ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นอีกว่าในแต่ละช่วงของการบำบัดไนเตรตมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของพีเอชและค่าสภาพต่าง เมื่ออัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเพิ่มสูงขึ้นดังภาพที่ 4.9 โดยในการเปลี่ยนถ่ายน้ำจะพิจารณาจากค่าสภาพต่าง ซึ่งในการทดลองจะกำหนดว่าถ้าค่าสภาพต่างสูงกว่า 500 มก./ล.ของแคลเซียมคาร์บอเนตจะทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำในถังบรรจุน้ำเสีย เนื่องจากแบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟจะปลดปล่อยไฮดรอกซิลไอออนออกมา ดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดการสะสมของไฮดรอกซิลไอออนจึงต้องมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำเป็นระยะ โดยในช่วงอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเป็น 1:1 จะไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ เนื่องจากค่าสภาพต่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อทำการปรับค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเป็น 2:1 พบว่าค่าสภาพต่างสูงกว่า 500 มก./ล.ของแคลเซียมคาร์บอเนต จึงได้ทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำในถังบรรจุน้ำเสียจำนวน 2 ครั้งโดยคิดเป็นปริมาตรน้ำร้อยละ 20 และร้อยละ 50 ของน้ำทั้งระบบ และเมื่อปรับค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนเป็น 5:1 พบว่าค่าสภาพต่างเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ต้องทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำปริมาณมากขึ้นเป็นร้อยละ

90 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบการลดลงของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำบริเวณทางน้ำออกจากท่อยาว เมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนเตรดไนโตรเจน โดยพบว่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนเตรดไนโตรเจนที่ 5:1 มีปริมาณต่ำที่สุดซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.30–2.20 มก./ล. เนื่องจากเกิดกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำ ซึ่งในขณะที่ย่อยสลายสารอินทรีย์จุลินทรีย์จำเป็นต้องใช้ก๊าซออกซิเจนซึ่งละลายอยู่ในน้ำ แต่อย่างไรก็ตามออกซิเจนเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องควบคุมให้เหลือน้อยที่สุดเพื่อให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเกิดได้อย่างสมบูรณ์ (Van Rijn และคณะ, 2006) สำหรับอุณหภูมิตลอดการทดลองทั้งในช่วงก่อนเข้าและออกจากท่อยาวจะมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าอยู่ในช่วง 27.8-29.7 และ 23.2-28.9 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 4.10 ทั้งนี้ตารางที่ 4.2 และ 4.3 แสดงพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำก่อนเข้าและน้ำที่ออกจากถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรดไนโตรเจนค่าต่างๆ ผลการทดลองพบว่ามีความฟิเอชตลอดการทดลองเฉลี่ยของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรดไนโตรเจนที่ 5:1 เท่ากับ 8.30 ± 0.20 ซึ่งจะสูงกว่าฟิเอชของน้ำที่เข้าท่อยาวที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.17 ± 0.25 ซึ่งแตกต่างจากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรดไนโตรเจนที่ 1:1 และ 2:1 ที่ฟิเอชของน้ำที่เข้าท่อยาวมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าฟิเอชของน้ำที่ออกจากท่อยาวเนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำคิดเป็นปริมาตรน้ำที่ไม่มากคือที่ร้อยละ 20 และร้อยละ 50 จึงทำให้ไม่เห็นถึงความแตกต่างของฟิเอชในน้ำก่อนเข้าท่อยาวกับน้ำที่ออกจากท่อยาว ซึ่งแตกต่างจากในช่วงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรดไนโตรเจนที่ 5:1 ที่เห็นถึงความแตกต่างของฟิเอชชัดเจนเนื่องจากการเปลี่ยนถ่ายน้ำถึงร้อยละ 90 ในบ่อน้ำเสียสังเคราะห์

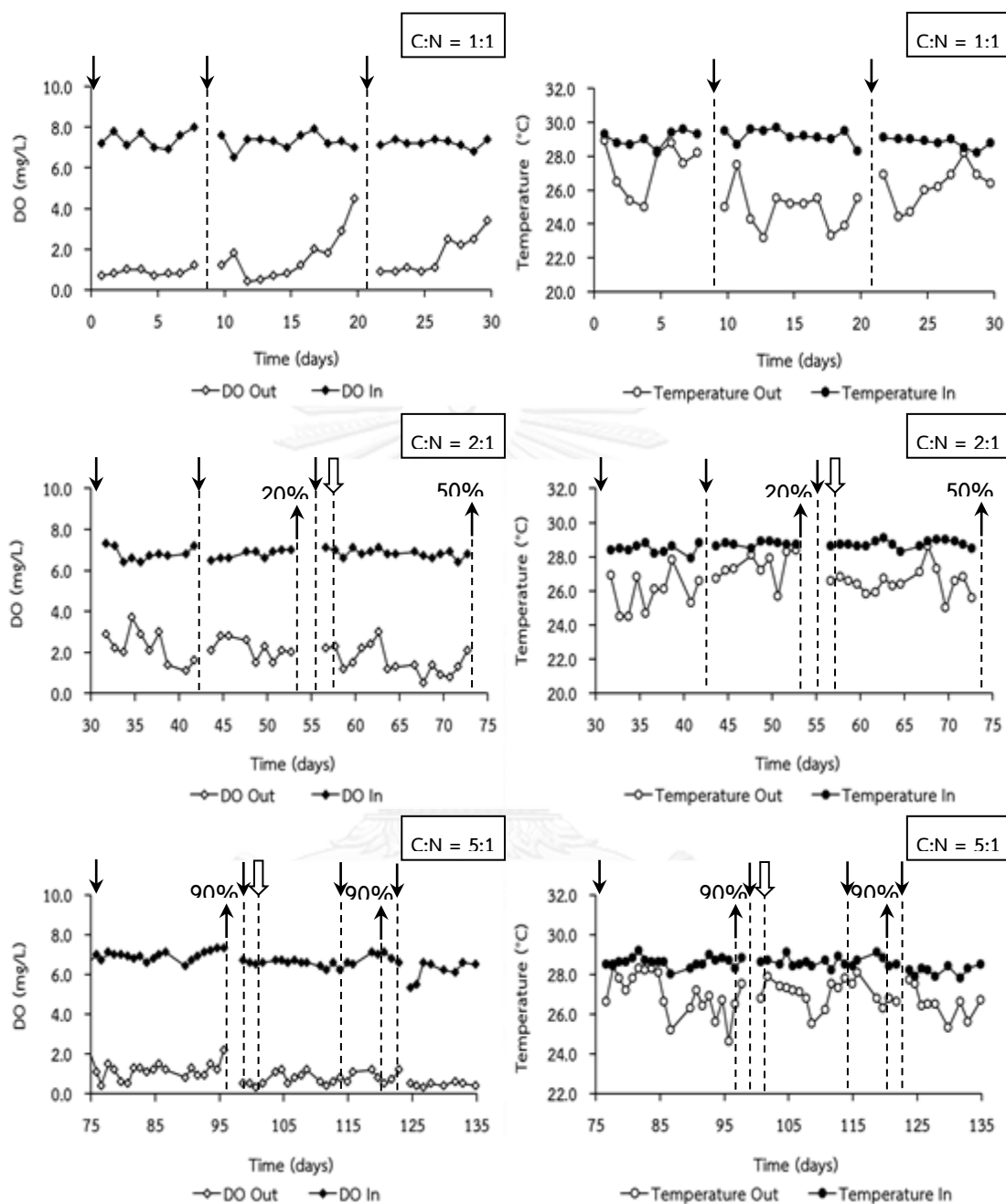
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอัตราการบำบัดไนเตรดกับงานวิจัยที่ผ่านมา ดังตารางที่ 4.4 พบว่าอัตราการบำบัดไนเตรดของงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วงปานกลาง โดยประสิทธิภาพของการบำบัดไนเตรดด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียในระบบ ซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำเสียและชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางในถังทดลอง เนื่องจากในการทดลองนี้ได้ทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์จึงทำให้มีปริมาณของดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียน้อยกว่าในน้ำเสียจริงจากธรรมชาติ สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุตัวกลางที่ทำจากพลาสติก เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยวัสดุแต่ละชนิดมีพื้นที่ผิวให้จุลินทรีย์ยึดเกาะแตกต่างกันจึงทำให้มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรด



ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและการเปลี่ยนแปลงค่าโออาร์พีบริเวณทางออกจากท่อ
ยาวที่แปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตในโตรเจนเท่ากับ 1:1 2:1 และ 5:1 โดย (↓)
แสดงการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนลงในถังจนผสมเมื่อสารอินทรีย์คาร์บอนที่ออกจาก
ท่อยาวมีค่าต่ำกว่า 100 มก.ซีไอดีต่อลิตร



ภาพที่ 4.9 ค่าพีเอชและค่าสภาพด่างเปรียบเทียบระหว่างก่อนเข้าท่อয়ারและออกจากท่อয়ার ที่แปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 2:1 และ 5:1 โดย (↓) แสดงการเติมไนเตรตและสารอินทรีย์คาร์บอนลงในถังจนผสมเมื่อสารอินทรีย์คาร์บอนที่ออกจากท่อয়ারมีค่าต่ำกว่า 100 มก.ซีไอดีต่อลิตร และ (↑) แสดงการถ่ายน้ำออกจากถังบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ และ (↕) แสดงการเติมอาหารกึ่งบดละเอียด



ภาพที่ 4.10 ค่าออกซิเจนละลายน้ำและอุณหภูมิเปรียบเทียบระหว่างก่อนเข้าท่อยาวและออกจากท่อยาว ที่แปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 2:1 และ 5:1 โดย (↓) แสดงการเติมไนเตรตและสารอินทรีย์คาร์บอนลงในถังกวนผสมเมื่อสารอินทรีย์คาร์บอนที่ออกจากท่อยาวมีค่าต่ำกว่า 100 มก.ซีไอดีต่อลิตร และ (↑) แสดงการถ่ายน้ำออกจากถังบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ และ (↘) แสดงการเติมอาหารกึ่งบดละเอียด

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำของน้ำก่อนเข้าถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาว เมื่อเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 2:1 และ 5:1

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด - ค่าสูงสุด)		
	C:N = 1:1	C:N = 2:1	C:N = 5:1
แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	0.05 $\pm$ 0.01 (0.00 - 0.19)	0.04 $\pm$ 0.01 (0.00 - 0.13)	0.03 $\pm$ 0.01 (0.00 - 0.33)
ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	3.87 $\pm$ 0.08 (0.29 - 7.79)	16.23 $\pm$ 0.40 (8.24 - 25.39)	8.82 $\pm$ 0.36 (0.00 - 20.75)
ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	75.35 $\pm$ 0.76 (61.39 - 90.26)	74.39 $\pm$ 0.95 (58.35 - 91.89)	52.46 $\pm$ 0.60 (5.73 - 90.98)
ซีโอดี (มก.ซีโอดี/ลิตร)	159.20 $\pm$ 79.20 (25.6 - 287.5)	348.70 $\pm$ 177.60 (36.8 - 664.0)	712.10 $\pm$ 434.30 (86.5 - 1,458.2)
ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร)	213.90 $\pm$ 89.50 (60 - 360)	435.10 $\pm$ 57.10 (320 - 530)	268.60 $\pm$ 118.70 (80 - 460)
พีเอช	8.02 $\pm$ 0.33 (7.50 - 8.49)	8.47 $\pm$ 0.09 (8.21 - 8.65)	8.17 $\pm$ 0.25 (7.57 - 8.55)
ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ลิตร)	7.30 $\pm$ 0.34 (6.50 - 8.00)	6.81 $\pm$ 0.32 (6.40 - 7.30)	6.68 $\pm$ 0.39 (5.30 - 7.30)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	29.03 $\pm$ 0.41 (28.20 - 29.70)	28.66 $\pm$ 0.25 (27.90 - 29.10)	28.53 $\pm$ 0.30 (27.80 - 29.20)

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำของน้ำที่ออกจากถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาว เมื่อเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 2:1 และ 5:1

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด - ค่าสูงสุด)		
	C:N = 1:1	C:N = 2:1	C:N = 5:1
แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	0.09 $\pm$ 0.02 (0.01 - 0.32)	0.04 $\pm$ 0.01 (0.00 - 0.26)	0.03 $\pm$ 0.01 (0.00 - 0.39)
ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	4.47 $\pm$ 0.11 (0.94 - 15.06)	17.50 $\pm$ 0.47 (8.58 - 29.51)	8.78 $\pm$ 0.43 (0.74 - 20.17)
ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	69.64 $\pm$ 0.73 (48.79 - 87.91)	69.26 $\pm$ 1.08 (53.90 - 87.11)	40.75 $\pm$ 0.68 (1.39 - 80.70)
ซีโอดี (มก.ซีโอดี/ลิตร)	111.00 $\pm$ 66.00 (25.6 - 209.1)	297.30 $\pm$ 161.00 (32.0 - 584.0)	575.90 $\pm$ 371.80 (56.4 - 1,290.2)
ค่าสภาพต่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร)	231.40 $\pm$ 83.30 (90 - 360)	439.70 $\pm$ 61.40 (310 - 530)	313.50 $\pm$ 109.50 (100 - 480)
พีเอช	7.66 $\pm$ 0.40 (7.00 - 8.21)	8.38 $\pm$ 0.09 (8.21 - 8.63)	8.30 $\pm$ 0.20 (7.64 - 8.53)
ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ลิตร)	1.44 $\pm$ 0.97 (0.40 - 4.50)	1.95 $\pm$ 0.74 (0.50 - 3.70)	0.89 $\pm$ 0.45 (0.30 - 2.20)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	20.46 $\pm$ 1.60 (23.20 - 28.90)	26.59 $\pm$ 1.07 (24.50 - 28.60)	26.92 $\pm$ 0.87 (24.60 - 28.40)

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบอัตราการบำบัดไนเตรดกับงานวิจัยที่ผ่านมา

Denitrifying reactor	Medium	Carbon source	Nitrate removal rate (mgNO ₃ -N/l/h)	Reference
Marine system				
Packed bed	Plastic medium	Glucose	1.7	Honda และคณะ (1993)
Packed bed	Brick granules	Ethanol	100	Sauthier และคณะ (1998)
Packed bed	Porous medium	Methanol	7.3-8.4 ^a	Grguric และคณะ (2000)
Packed bed	Polyvinyl alcohol	Glucose	1.4	Park และคณะ (2000)
Packed bed	Plastic balls/crushed oyster shells	Ethanol/Methanol	6.6 ^a	Menasveta และคณะ (2001)
Packed bed	Freeze-dried alginate beads	Starch	2.6	Tal และคณะ (2003)
Digestion basin	Sludge	Endogenous	2.5	Gelfand และคณะ (2003)
Fluidized bed	Sand	Endogenous	72.6	Gelfand และคณะ (2003)
Moving bed	Plastic medium	Endogenous	24.0	Tal and Schreier (2004)
Freshwater system				
Fluidized bed	Sand	Endogenous	35.8	Arbiv and van Rijn (1995)
Packed bed	Biodegradable Polymer	PHB (C ₄ H ₆ O ₂) _n	7-41	Boley และคณะ (2000)
Packed bed	Biodegradable Polymer	PCL (C ₆ H ₁₀ O ₂) _n	21-166	Boley และคณะ (2000)
Packed bed	Biodegradable Polymer	Bionolle (C ₆ H ₈ O ₄) _n	1.5-77	Boley และคณะ (2000)
Digestion basin	Sludge	Endogenous	5.9	Shnel และคณะ (2002)
Fluidized bed	Sand	Endogenous	55.4	Shnel และคณะ (2002)
Packed bed	Freeze-dried alginate beads	Starch	26.0	Tal และคณะ (2003)
Digestion basin	Sludge	Endogenous	1.5	Gelfand และคณะ (2003)
Fluidized bed	Sand	Endogenous	43.3	Gelfand และคณะ (2003)
Packed bed	Polyethylene	Methanol	1.8 ^a	Suzuki และคณะ (2003)
Tubular	Polyethylene	Methanol	0.5-0.6	ทยากร สุวรรณรัตน์ (2552)
Denitrification				
Glass tanks containing 5 cm of Pumice rock	Pumice rock	Methanol	3.8	ชลธิชา พลายชุม (2553)
Tubular Denitrification	Polyethylene	Methanol	2.8	งานวิจัยนี้

^a Extrapolated (rates were not provided by authors)

4.2.2 การศึกษาระยะเวลาการกักเก็บน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว

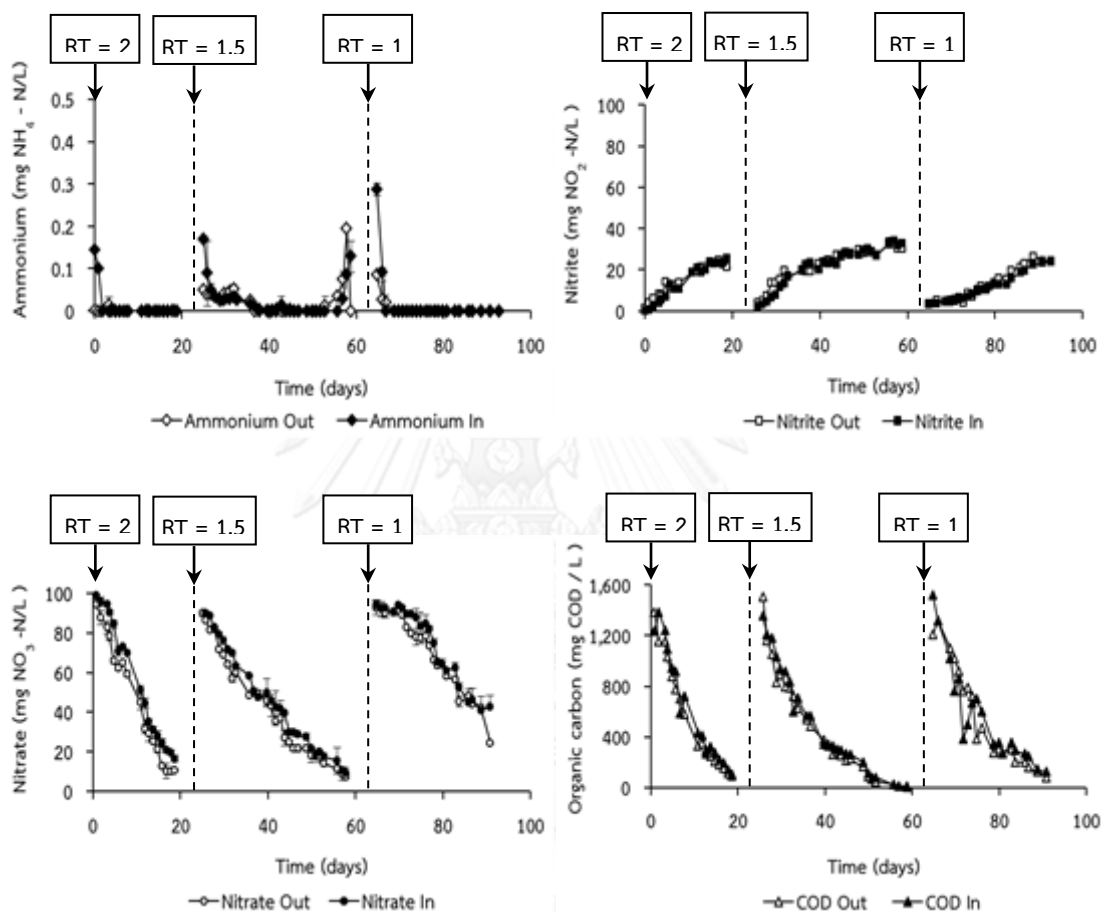
ทำการเดินระบบต่อเนื่องจากการทดลองที่ 2.1 โดยแปรเปลี่ยนระยะเวลาการกักเก็บน้ำภายในระบบท่อยาวจำนวน 3 ค่า ได้แก่ 1 ชม. 1.5 ชม. และ 2 ชม. ด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1

- การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน

สำหรับผลการทดลองส่วนนี้ที่ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันของระบบท่อยาว โดยทำการแปรค่าระยะเวลาการกักเก็บน้ำจำนวน 3 ค่า ได้แก่ 2 1.5 และ 1 ชม. ผลการทดลองพบว่าการลดลงของไนเตรตที่ปรากฏในภาพที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าการคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบทดลองสามารถทำได้โดยใช้สมการเส้นตรง (Regression analysis) ผลการคำนวณพบว่าอัตราดีไนทริฟิเคชันที่เกิดขึ้นเมื่อมีการแปรค่าระยะเวลาการกักเก็บน้ำที่ 2 และ 1.5 ชม. มีค่าลดลงจาก 2,798.4 มก.ไนโตรเจน/วัน เป็น 2,160.0 มก.ไนโตรเจน/วัน ในขณะที่การทดลองช่วงระยะเวลาการกักเก็บน้ำ 1 ชม. มีค่าอัตราดีไนทริฟิเคชันเพิ่มสูงขึ้นเป็น 2,304.0 มก.ไนโตรเจน/วัน ซึ่งสูงกว่าช่วงระยะเวลาการกักเก็บน้ำ 1.5 ชม. แต่เมื่อเปรียบเทียบกับความชันของสมการเส้นตรงที่ระยะเวลาการกักเก็บน้ำ 2 1.5 และ 1 ชม. มีค่าลดลงตามลำดับ คือ 5.3 3.0 และ 2.4 มก.ไนโตรเจน/ลิตร/วัน โดยสาเหตุที่ช่วงระยะเวลาการกักเก็บน้ำ 1 ชม. มีค่าอัตราดีไนทริฟิเคชันสูงกว่าช่วงระยะเวลาการกักเก็บน้ำ 1.5 ชม. เนื่องจากอัตราดีไนทริฟิเคชันที่ได้เกิดจากการนำเอาค่าความชันของสมการเส้นตรงคูณกับปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านระบบท่อยาวในหนึ่งวัน โดยในช่วงระยะเวลาการกักเก็บน้ำ 2 1.5 และ 1 ชม. จะมีอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้น คือ 528 720 และ 960 ลิตรต่อวัน ดังนั้นเมื่อนำเอาค่าความชันของสมการเส้นตรงคูณกับปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านระบบท่อยาวในหนึ่งวัน จึงทำให้ค่าอัตราดีไนทริฟิเคชันในช่วงระยะเวลาการกักเก็บน้ำ 1 ชม. มีค่าสูงกว่าในช่วงระยะเวลาการกักเก็บน้ำ 1.5 ชม.

เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ 5:1 ตลอดการทดลองและเพิ่มอัตราการไหล (ลดระยะเวลาการกักเก็บน้ำ) ของน้ำภายในท่อยาว พบว่าในช่วงของระยะเวลาการกักเก็บน้ำที่ 2 และ 1.5 ชม. ระบบสามารถบำบัดไนเตรตได้หมดเมื่อเทียบกับสารอินทรีย์คาร์บอน แต่จะเป็นปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากพบการสะสมของไนไตรต์มากขึ้น ส่วนในช่วงระยะเวลาการกักเก็บน้ำที่ 1 ชม. พบว่ายังคงมีไนเตรตเหลืออยู่ในระบบขณะที่สารอินทรีย์คาร์บอนได้ถูกใช้หมดแล้ว นั่นคือแม้ว่าระบบจะมีปริมาณคาร์บอนที่เพียงพอแต่หากมีระยะเวลาการกักเก็บน้ำหรือระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไม่เพียงพอก็จะทำให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันหยุดลงเพียงขั้นตอนที่เกิดการเปลี่ยนไนเตรตเป็นไนไตรต์ ทำให้เกิดการสะสมของไนไตรต์ขึ้นแทนที่จะเปลี่ยนไปเป็นก๊าซไนโตรเจน เมื่อพิจารณาปริมาณแอมโมเนียตลอดการทดลองพบว่ามีค่าน้อยมาก คือ น้อยกว่า 0.3 มก.ไนโตรเจน/ลิตร โดยจะ

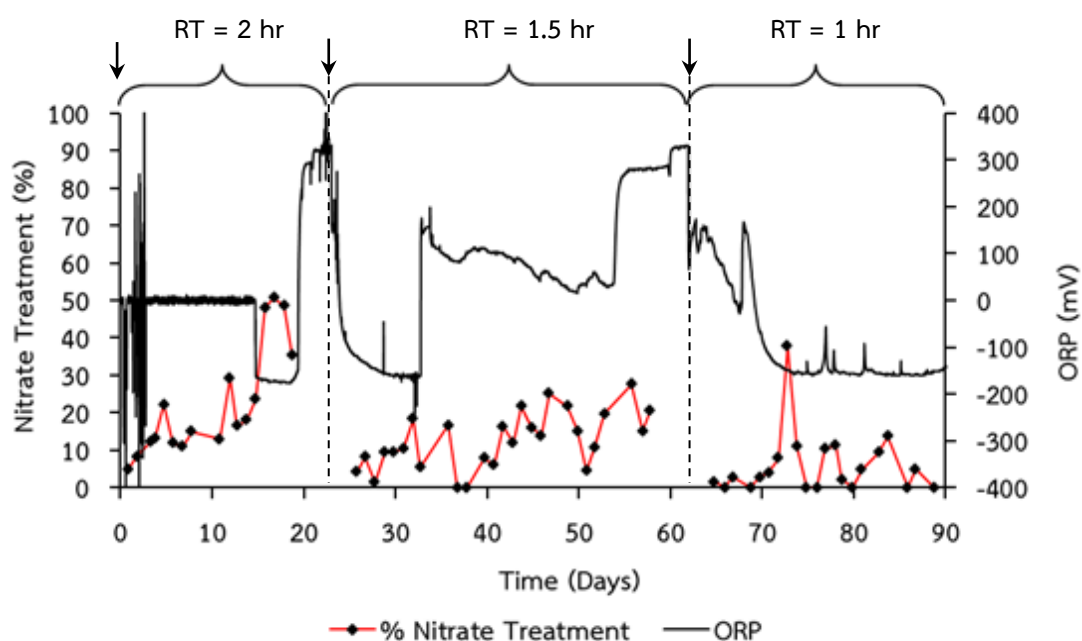
พบการลดลงของแอมโมเนียในวันเริ่มต้นของแต่ละช่วงการทดลอง ซึ่งการลดลงของแอมโมเนียในน้ำที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันขึ้นในระบบท่อยาว เนื่องจากปริมาณออกซิเจนในน้ำจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น (ระยะเวลาที่เก็บน้ำลดลง) จึงทำให้จุลินทรีย์ใช้ออกซิเจนในการหายใจเพื่อเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตรต์ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน



ภาพที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนและสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนเข้าท่อยาวและออกจากท่อยาว โดย (↓) แสดงการเปลี่ยนถ่ายน้ำออกจากถังบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ และทำการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วน C:N = 5:1 ลงในถังกวนผสมเมื่อสารอินทรีย์คาร์บอนที่ออกจากท่อยาวมีค่าต่ำกว่า 100 มก.ซีโอดีต่อลิตร

- ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน

สำหรับผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตกับค่าโออาร์พีของการทดลองเมื่อทำการแปรค่าระยะเวลาเก็บน้ำเท่ากับ 2 1.5 และ 1 ชม. แสดงดังภาพที่ 4.12 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดมีความสัมพันธ์กับค่าโออาร์พี โดยเมื่อค่าโออาร์พีมีค่าติดลบหรือลดลงเข้าใกล้ -200 มิลลิโวลต์ ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตจะสูงขึ้นเกือบร้อยละ 50 ในช่วงระยะเวลากักเก็บน้ำที่ 2 ชม. แต่เมื่อค่าโออาร์พีเพิ่มขึ้นหรือมีค่าเป็นบวกเข้าใกล้ 100 มิลลิโวลต์ ประสิทธิภาพการบำบัดจะต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ในช่วงระยะเวลากักเก็บน้ำที่ 1.5 ชม. ดังนั้นในการควบคุมปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน ควรให้ความสำคัญกับการรักษาระดับค่าโออาร์พีให้มีค่าอยู่ในช่วงความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันที่มีค่าเป็นลบ (ในช่วง -200 ถึง -400) ตลอดการทดลอง

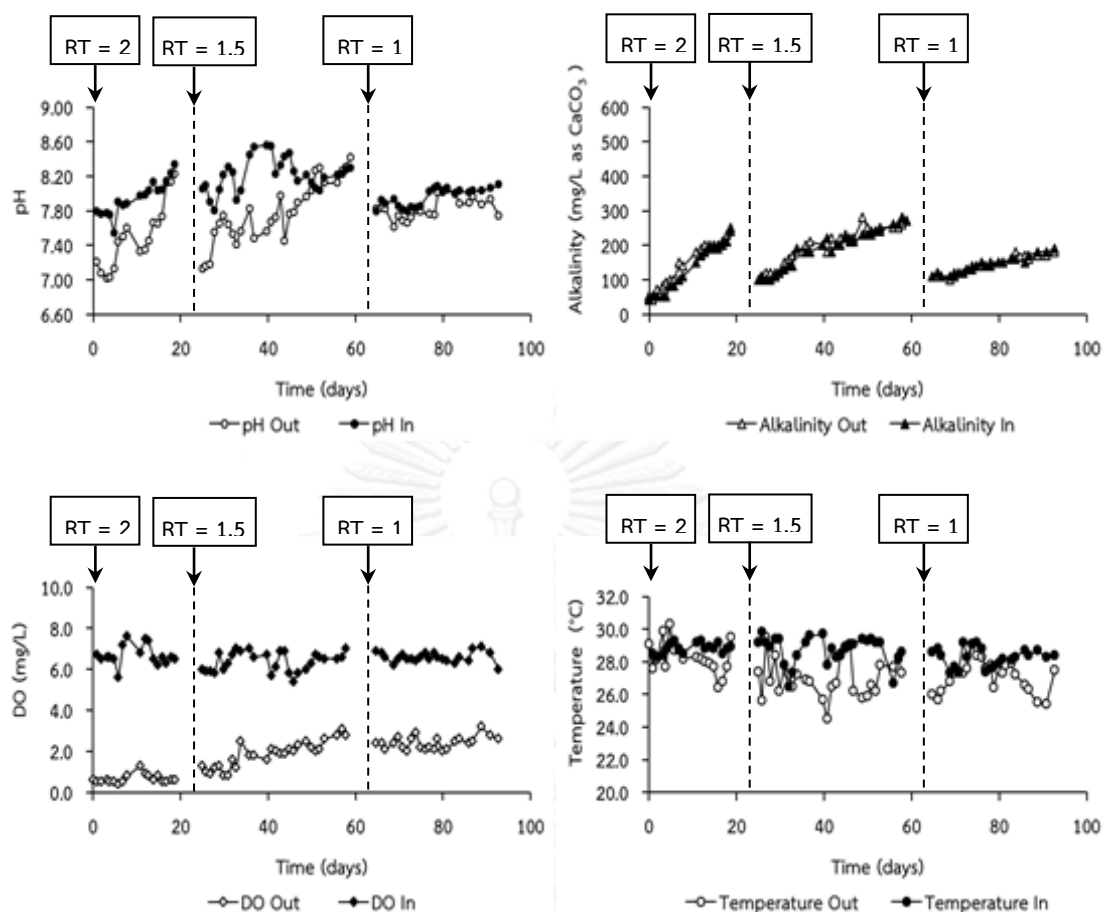


ภาพที่ 4.12 ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและการเปลี่ยนแปลงค่าโออาร์พีบริเวณทางออกจากท่อยาวที่แปรค่าระยะเวลากักเก็บน้ำเท่ากับ 2 1.5 และ 1 ชม. โดย () แสดงการเปลี่ยนถ่ายน้ำออกจากถังบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ และทำการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วน C:N = 5:1 ลงในถังกวนผสมเมื่อสารอินทรีย์คาร์บอนที่ออกจากท่อยาวมีค่าต่ำกว่า 100 มก.ซีไอดีต่อลิตร

ผลการตรวจวัดค่าพีเอชและค่าสภาพต่างของน้ำแสดงให้เห็นได้ว่าทั้งในช่วงของระยะเวลา กักเก็บน้ำที่ 2 และ 1.5 ชม. น้ำที่ออกจากท่อยาวมีพีเอชและค่าสภาพต่างสะสมเพิ่มขึ้นมากโดยมี พีเอชอยู่ในช่วง 7.02–8.26 และ 7.03–8.42 และมีค่าสภาพต่างอยู่ในช่วง 40–250 และ 100–280 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร ซึ่ง ณ เวลาดังกล่าวระบบได้บำบัดในเรตจนเกือบหมด ในขณะที่ช่วง ของระยะเวลากักเก็บน้ำที่ 1 ชม. ค่าพีเอชและค่าสภาพต่างของน้ำที่ออกจากท่อยาวค่อนข้างคงที่อยู ะหว่าง 7.79–8.10 และ 100–180 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวระบบไม่ สามารถบำบัดในเรตได้หมดเมื่อเทียบกับปริมาณคาร์บอน ส่วนผลการตรวจวัดอุณหภูมิในน้ำก่อน เข้าท่อยาวและออกจากท่อยาว แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในระหว่างการทดลองอยู่ระหว่าง 24.5–30.3 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำทั้งน้ำก่อนเข้าท่อยาวและออกจาก ท่อยาวแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6

ปริมาณออกซิเจนในน้ำมีการเปลี่ยนแปลงได้จากการหายใจของจุลินทรีย์ภายในท่อที่สัมพันธ์ กับระยะเวลาการกักเก็บน้ำและปริมาณสารอาหารที่จุลินทรีย์ได้รับ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะเวลา การกักเก็บน้ำโดยเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านเข้าสู่ท่อยาว จะทำให้ปริมาณออกซิเจนภายใน ท่อยาวมีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในภาพที่ 4.13 ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าในระหว่างวันที่ 0-20 ที่ระบบมีระยะเวลาการกักเก็บน้ำ 2 ชม. ปริมาณออกซิเจนในน้ำก่อนเข้าท่อยาวและน้ำที่ออก จากท่อยาวมีความแตกต่างกันประมาณ 6 มก.ต่อลิตร ซึ่งเป็นสภาวะที่สามารถเกิดปฏิกิริยา ดีไนทริฟิเคชันได้ แต่เมื่อลดระยะเวลากักเก็บน้ำเป็น 1.5 และ 1 ชม. พบว่าปริมาณออกซิเจนในส่วน ทางออกจากท่อยาวมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.86 ± 0.63 และ 2.42 ± 0.31 มก.ต่อลิตร โดยมีค่าสูงเกิน กว่าระดับที่จะเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันได้ทั้งนี้ Lee และคณะ (2000) กล่าวว่าระดับปริมาณ ออกซิเจนในน้ำที่จะเกิดปฏิกิริยาได้ไม่ควรสูงกว่า 1.5 มก.ต่อลิตร

ผลการทดลองในภาพรวมแสดงให้เห็นว่า หลังจากการปรับลดระยะเวลากักเก็บน้ำ (เพิ่ม อัตราการไหล) ในระบบท่อยาวจะทำให้ปริมาณออกซิเจนในส่วนท้ายของท่อเพิ่มขึ้นจนอยู่ในระดับที่ ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันได้ ทั้งนี้เนื่องจากการปรับลดระยะเวลากักเก็บน้ำทำให้จุลินทรีย์ ไม่สามารถใช้เมทานอลที่เติมเข้าไปเป็นแหล่งคาร์บอนได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอ ดังนั้นจึงได้ทำ การติดตั้งระบบเติมเมทานอลแบบอัตโนมัติขึ้นเพื่อควบคุมปริมาณการเติมเมทานอลให้คงที่ โดยจะ นำมาใช้ในการทดลองต่อไป และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 2.2 ได้ทำการเก็บตัวอย่างตัวกลางชีวภาพ ในช่วงต้นท่อ กลางท่อ และ ปลายท่อ เพื่อไปทำการวิเคราะห์ความหลากหลายของจุลินทรีย์ในระบบ ท่อยาวด้วย



ภาพที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ค่าสภาพต่าง ค่าออกซิเจนละลายน้ำและค่าอุณหภูมิเปรียบเทียบระหว่างก่อนเข้าท่อยาวและออกจากท่อยาวโดยแปรค่าระยะเวลาเก็บน้ำเท่ากับ 2 ชม. 1.5 ชม. และ 1 ชม. โดย ↓) แสดงการเปลี่ยนถ่ายน้ำออกจากถังบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ และทำการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วน C:N = 5:1 ลงในถังกวนผสมเมื่อสารอินทรีย์คาร์บอนที่ออกจากท่อยาวมีค่าต่ำกว่า 100 มก.ซีไอดีต่อลิตร

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำของน้ำก่อนเข้าถังปฏิกรณ์ไนตริฟิเคชันแบบ
ท่อยาวเมื่อทำการแปรเปลี่ยนระยะเวลาเก็บน้ำที่ 2 1.5 และ 1 ชม.

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด - ค่าสูงสุด)		
	RT = 2	RT = 1.5	RT = 1
แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	0.01 $\pm$ 0.01 (0.00 - 0.14)	0.03 $\pm$ 0.02 (0.00 - 0.17)	0.02 $\pm$ 0.00 (0.00 - 0.29)
ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	13.86 $\pm$ 0.58 (0.06 - 25.47)	21.37 $\pm$ 0.55 (2.26 - 34.00)	11.04 $\pm$ 0.44 (3.11 - 23.99)
ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	56.68 $\pm$ 0.83 (16.35 - 99.03)	45.36 $\pm$ 2.13 (9.20 - 90.13)	72.45 $\pm$ 2.06 (39.21 - 94.03)
ซีโอดี (มก.ซีโอดี/ลิตร)	615.60 $\pm$ 435.91 (103.7 - 1,383.8)	499.94 $\pm$ 412.77 (9.8 - 1,353.6)	562.66 $\pm$ 391.43 (120.7 - 1,520.9)
ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร)	129.44 $\pm$ 68.04 (40 - 240)	188.97 $\pm$ 56.02 (100 - 280)	141.82 $\pm$ 24.62 (110 - 190)
พีเอช	8.08 $\pm$ 0.35 (7.54 - 8.68)	8.20 $\pm$ 0.24 (7.68 - 8.65)	7.95 $\pm$ 0.10 (7.79 - 8.10)
ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ลิตร)	6.69 $\pm$ 0.50 (5.60 - 7.60)	6.37 $\pm$ 0.47 (5.40 - 7.00)	6.59 $\pm$ 0.26 (6.00 - 7.10)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	28.82 $\pm$ 0.32 (28.30 - 29.30)	28.75 $\pm$ 0.86 (26.50 - 29.80)	28.28 $\pm$ 0.58 (27.30 - 29.20)

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำของน้ำที่ออกจากถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาวเมื่อทำการแปรเปลี่ยนระยะเวลาเก็บน้ำที่ 2 1.5 และ 1 ชม.

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด - ค่าสูงสุด)		
	RT = 2	RT = 1.5	RT = 1
แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	0.00 $\pm$ 0.00 (0.00 - 0.01)	0.02 $\pm$ 0.01 (0.00 - 0.19)	0.01 $\pm$ 0.01 (0.00 - 0.08)
ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	15.24 $\pm$ 0.31 (1.21 - 24.84)	22.43 $\pm$ 0.61 (3.89 - 32.89)	12.25 $\pm$ 0.45 (3.51 - 26.45)
ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	46.54 $\pm$ 1.26 (10.00 - 94.26)	42.23 $\pm$ 1.35 (7.31 - 89.86)	67.58 $\pm$ 1.30 (24.39 - 92.57)
ซีโอดี (มก.ซีโอดี/ลิตร)	564.23 $\pm$ 425.00 (92.12 - 1,382.4)	487.41 $\pm$ 404.19 (9.41 - 1,504.0)	556.79 $\pm$ 402.57 (78.40 - 1,317.1)
ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร)	148.89 $\pm$ 66.23 (40 - 250)	197.93 $\pm$ 53.48 (100 - 280)	142.27 $\pm$ 23.89 (100 - 180)
พีเอช	7.52 $\pm$ 0.43 (7.02 - 8.26)	7.87 $\pm$ 0.41 (7.03 - 8.42)	7.82 $\pm$ 0.16 (7.35 - 8.06)
ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ลิตร)	0.64 $\pm$ 0.21 (0.40 - 1.30)	1.86 $\pm$ 0.63 (0.80 - 3.10)	2.42 $\pm$ 0.31 (2.00 - 3.20)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	28.27 $\pm$ 0.99 (26.40 - 30.30)	27.06 $\pm$ 1.16 (24.50 - 29.50)	27.09 $\pm$ 0.96 (25.40 - 29.10)

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำในทรีฟิเคชันแบบท่อยาวในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ในการศึกษานี้ได้ทำการตรวจวัดประสิทธิภาพการบำบัดในเทรตของถังปฏิกรณ์ดีในทรีฟิเคชันแบบท่อยาว โดยใช้ น้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลานิล ซึ่งมีการเดินระบบอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการทดลอง 72 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ และเนื่องจากการทดลองโดยใช้น้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลานิลซึ่งมีตะกอนแขวนลอยจำนวนมาก ดังนั้นในการทดลองนี้จึงต้องทำการติดตั้งถังตกตะกอน เพื่อเป็นการบำบัดคุณภาพน้ำเบื้องต้นโดยกรองน้ำให้มีตะกอนน้อยลงก่อนที่จะสูบน้ำเข้าสู่ท่อยาวเพื่อป้องกันการอุดตันของตะกอนในท่อ นอกจากนี้ยังเพิ่มการติดตั้งตะกร้าบรรจุใยกรอง เพื่อกรองตะกอนที่อาจหลุดรอดมาจากถังตกตะกอนอีกด้วย โดยในระหว่างการทดลองได้ทำการซักล้างใยกรองในทุก 3 วัน และยังได้ทำการติดตั้งระบบควบคุมการเติมเมทานอลแบบอัตโนมัติ ทั้งนี้ในช่วงก่อนการทดลองจริงได้ทำการทดสอบระบบควบคุมการเติมเมทานอลแบบอัตโนมัติและเป็นการหาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ใช้น้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลานิล โดยไม่ได้ทำการร่อนน้ำเสียกลับคืนสู่บ่อปลา เนื่องจากการป้องกันไม่ให้ระบบล้มเหลวเพราะอาจมีสารอินทรีย์คาร์บอนหลุดกลับคืนสู่บ่อปลา ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อบ่อปลาได้ และเนื่องจากในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิลมีความเข้มข้นของไนเตรตเท่ากับ 1.803 ± 0.09 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้ทำการเติมโซเดียมไนเตรต (NaNO_3) ความเข้มข้น 50 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ลงในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิล ซึ่งการเติมโซเดียมไนเตรตเป็นการป้องกันการก่อตัวของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในถังปฏิกรณ์ดีในทรีฟิเคชันแบบท่อยาว โดยสภาวะที่เหมาะสมของระบบถังปฏิกรณ์ดีในทรีฟิเคชันแบบท่อยาวจากในช่วงก่อนการทดลองจริง แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สภาวะที่เหมาะสมของระบบถังปฏิกรณ์ดีในทรีฟิเคชันแบบท่อยาวจากในช่วงก่อนการทดลองจริง

พารามิเตอร์	สภาวะที่เหมาะสม
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรดไนโตรเจน	1:1
ระยะเวลาพักเก็บน้ำ	2 ชม.
ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน	เมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 1.5
การปรับตั้งโปรแกรมควบคุมการเติมเมทานอล	ค่าโออาร์พี ต่ำสุด 0 มิลลิโวลต์ และ ค่าโออาร์พี สูงสุด 100 มิลลิโวลต์

ในเทรตที่เกิดขึ้นในระบบเพาะเลี้ยงปลานิลเป็นผลผลิตจากกระบวนการไนตริฟิเคชันที่อยู่ภายในบ่อเลี้ยงปลานิลและการเติมโซเดียมไนเตรตที่มีความเข้มข้น 50 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร โดยทำการเลี้ยงปลานิลที่ความหนาแน่นเริ่มต้น 17 กก.ต่อลบ.ม. เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 70 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดระยะเวลาการทดลอง และได้ติดตามการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนและปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมดังนี้

- การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบเพาะเลี้ยงปลานิลและถึงปฏิกรณ์ดีไนตริฟิเคชันแบบท่อยาว

ผลจากการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิลและในน้ำทั้งก่อนเข้าและออกจากถังปฏิกรณ์ดีไนตริฟิเคชันแบบท่อยาว แสดงดังภาพที่ 4.14 พบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียเฉลี่ยตลอดการทดลองมีค่าน้อยกว่า 0.20 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งเป็นผลจากการใช้ตัวกลางชีวภาพภายในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิลเพื่อบำบัดแอมโมเนียให้เป็นไนเตรตด้วยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ แต่ในช่วงวันที่ 21-23 ของการทดลอง พบว่าแอมโมเนียความเข้มข้นสูงกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร เนื่องจากในวันที่ 19 ได้ทำการจับปลานิลเพื่อนำมาวัดความยาวและชั่งน้ำหนัก ดังนั้นจึงต้องทำการถ่ายน้ำภายในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิลปริมาตรร้อยละ 70 เพื่อให้สามารถจับปลานิลได้สะดวก และเนื่องจากมีการถ่ายน้ำจึงทำให้จุลินทรีย์ไนตริฟายอิงแบคทีเรียบางส่วนหลุดหายไปจากบ่อเพาะเลี้ยง และจะเห็นว่าในระหว่างการเลี้ยงปลาซึ่งมีการให้อาหารปลาเพิ่มขึ้นตามอัตราการเติบโตของปลา จึงทำให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียสูงขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าว ซึ่งสอดคล้องกับปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ดังจะอธิบายในหัวข้อถัดไป จากนั้นเมื่อเริ่มเดินระบบบำบัดความเข้มข้นของแอมโมเนียจึงเริ่มลดลง และเมื่อตรวจวัดปริมาณแอมโมเนียในน้ำหลังจากการบำบัดไนเตรตด้วยถังปฏิกรณ์ดีไนตริฟิเคชันแบบท่อยาว พบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของแอมโมเนียขาเข้าซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.13 ± 0.02 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร อาจเนื่องมาจากในช่วงต้นของท่อยาวอยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจน ทำให้จุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้อากาศเจริญเติบโตและสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ โดยความเข้มข้นของแอมโมเนียตลอดการทดลองอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมกับการเลี้ยงปลา ทั้งนี้มีรายงานว่าระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ปลอดภัยสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรอยู่ในช่วง 0.02 - 3 มก./ล. (สุบณจิต นิมรัตน์ และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย, 2552)

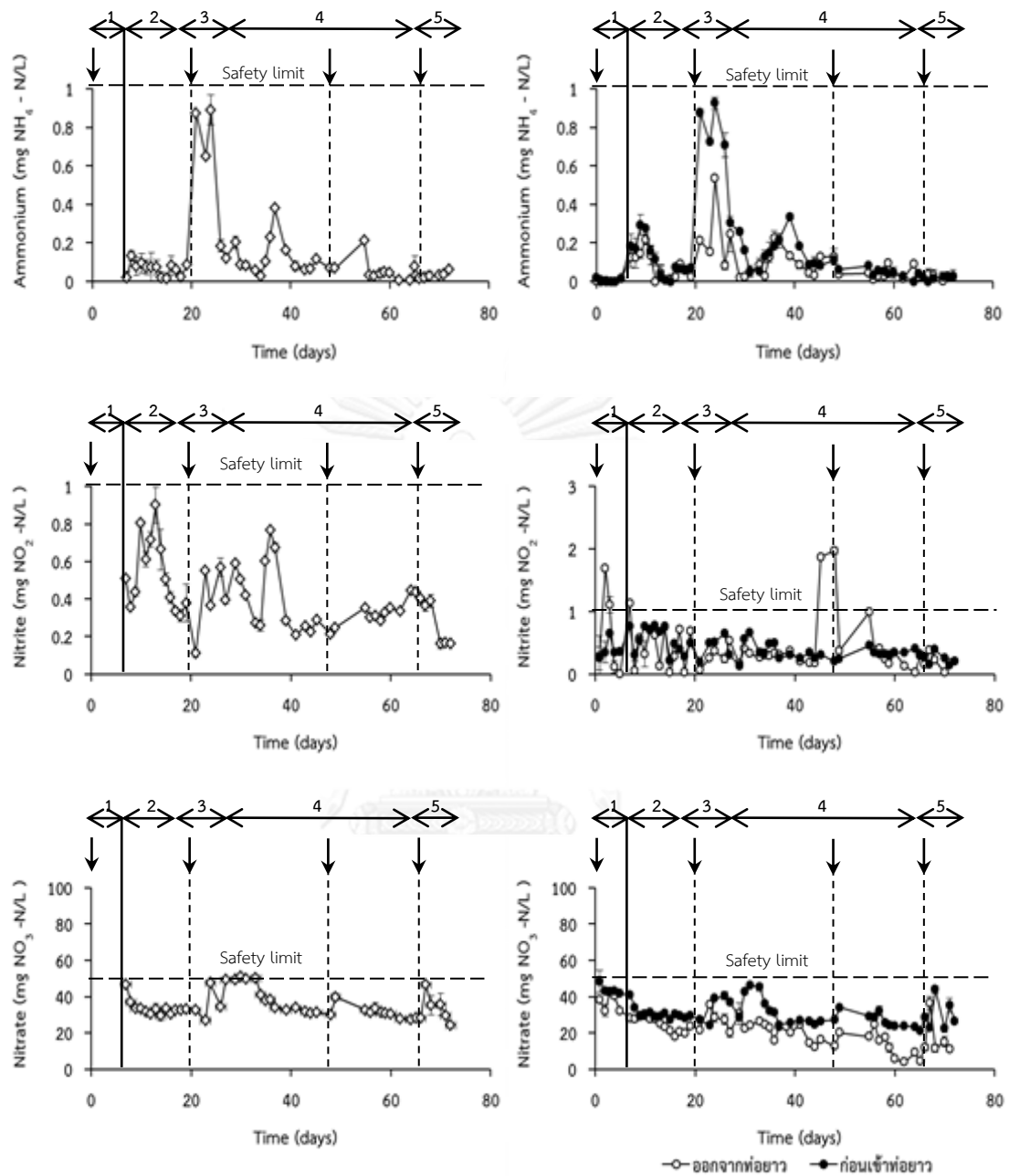
ส่วนผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณไนไตรต์ พบว่าความเข้มข้นของไนไตรต์เฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทดลองในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเท่ากับ 0.40 ± 0.02 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร โดยมันสิน ตันตุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา (2539) รายงานว่าปริมาณไนไตรต์ที่สูงเกิน 1 มก./ล.จะ

เป็นอันตรายต่อปลา และ Camargo and Alonso (2007) ได้เสนอไว้ว่าระดับความเข้มข้นของไนไตรต์ที่ปลอดภัยต่อสัตว์น้ำ คือไม่ควรเกิน 0.36 มก.ไนไตรต์-ไนโตรเจน/ล. ในขณะที่ความเข้มข้นของไนไตรต์ในน้ำหลังจากการบำบัดไนเตรตด้วยถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาวมีค่าเฉลี่ยน้อยกว่า 0.60 มก.ไนโตรเจนต่อลิตรซึ่งอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไนไตรฟิเคชันและดีไนไตรฟิเคชันที่สมบูรณ์ทำให้ไม่มีการสะสมของไนไตรต์ในระบบ

สำหรับความเข้มข้นของไนเตรตในการทดลองนี้ได้ทำการเติมโซเดียมไนเตรต (NaNO_3) ความเข้มข้น 50 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร ลงในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิล ทำให้ความเข้มข้นของไนเตรตมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยการเติมโซเดียมไนเตรตเป็นการป้องกันการก่อตัวของเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันในถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาว ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าไม่มีการสะสมของไนเตรตในบ่อเพาะเลี้ยงปลา ทั้งนี้Rodrigues และคณะ (2007) ได้ระบุไว้ว่าระดับความเข้มข้นสูงสุดของไนเตรตที่ยอมให้มีในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำได้คือ 50 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร หากสูงกว่านี้จะส่งผลให้อัตราการผสมพันธุ์ลดลง ระยะเวลาการฟักไข่ช้ามากขึ้น และการเติบโตของสัตว์น้ำลดลง เกษตรกรส่วนใหญ่จึงใช้วิธีการบำบัดหรือเปลี่ยนถ่ายน้ำเพื่อลดปริมาณไนเตรต นอกจากนี้จากรายงานของ Hart และ O'sullivan (1993) ที่ระบุว่าในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรมีความเข้มข้นของไนเตรตสูงกว่า 100 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร เนื่องจากประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตของถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาวขึ้นกับการปรับตั้งโปรแกรมควบคุมการเติมเมทานอล แสดงดังตารางที่ 4.8 ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อการประเมินค่าศักยภาพออกซิเดชัน-รีดักชันที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในการควบคุมการเติมเมทานอลให้กับระบบบำบัดไนเตรตแบบท่อยาวโดยอัตโนมัติ

ตารางที่ 4.8 การปรับตั้งโปรแกรมควบคุมการเติมเมทานอล

รอบที่	ระยะเวลาที่ทำการทดลอง	การปรับตั้งโปรแกรมควบคุมการเติมเมทานอล	
		ค่า ORP ต่ำสุด(mV)	ค่า ORP สูงสุด(mV)
1	5 วัน (วันที่ 1 – 5)	0	100
2	10 วัน (วันที่ 5 – 14)	0	50
3	12 วัน (วันที่ 14 – 25)	-50	50
4	41 วัน (วันที่ 25 – 65)	-100	0
5	9 วัน (วันที่ 65 – 72)	-200	0



(ก) ในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิล

(ข) ก่อนเข้าท่อยาวและออกจากท่อยาว

ภาพที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารประกอบไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต เปรียบเทียบระหว่างบ่อเลี้ยงปลานิลกับถังปฏิกรณ์ ไตไนทรีย์เคซินแบบท่อยาว โดย ↓) แสดงการเติมไนเตรตความเข้มข้น 50 มก. ไนโตรเจน/ลิตร และหมายเลข 1-5 แสดงการปรับตั้งโปรแกรมควบคุมการเติม เมทานอล

- ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบเพาะเลี้ยงปลานิลและถึงปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว

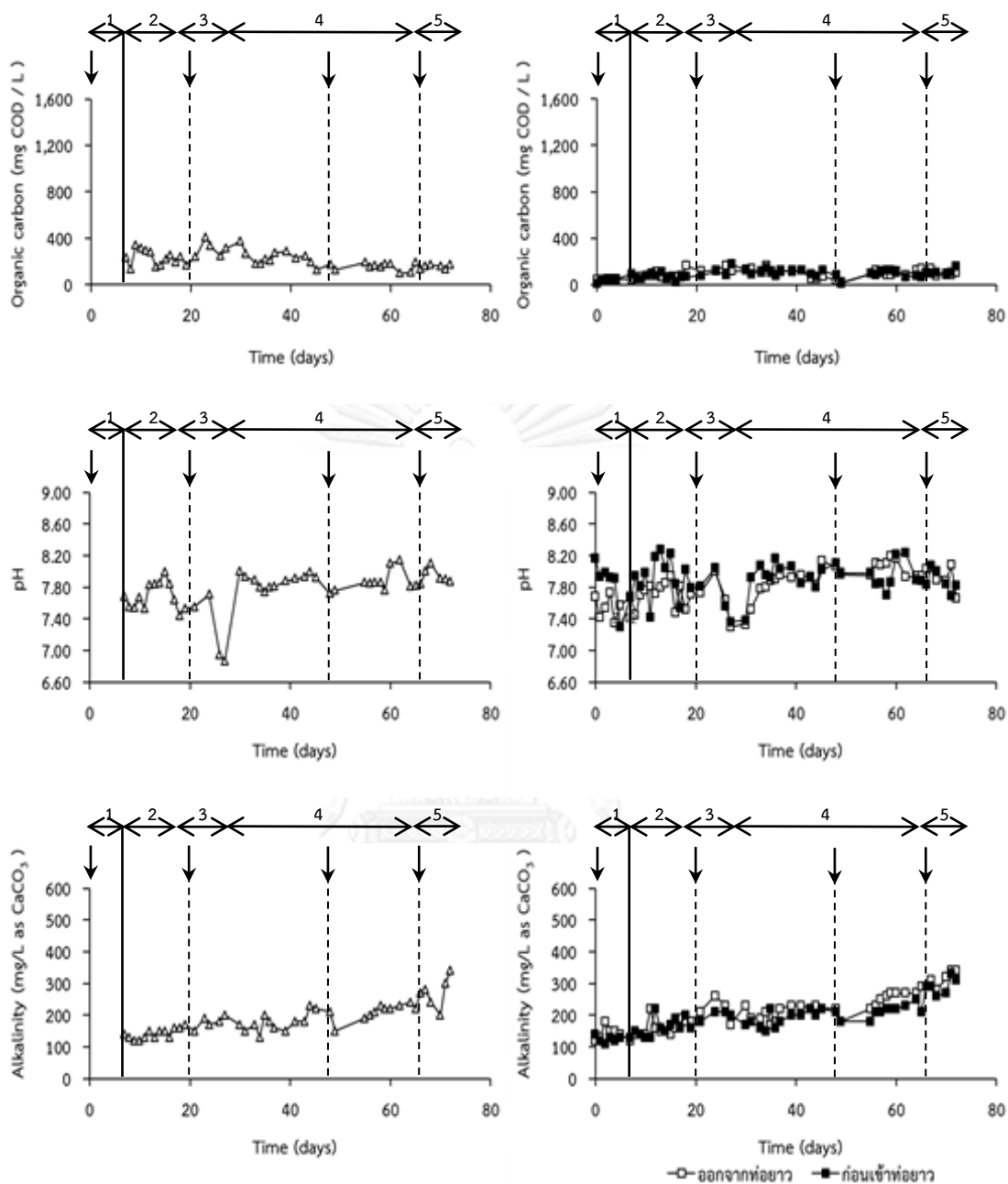
ผลจากการตรวจวัดสารประกอบอินทรีย์คาร์บอน พีเอชและค่าสภาพต่างในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและน้ำก่อนและหลังออกจากถังปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว แสดงดังภาพที่ 4.15 พบว่าสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิลมีปริมาณซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 226.22 ± 93.59 มก.ซีโอดี/ล. ซึ่งสูงกว่าปริมาณซีโอดีในน้ำทั้งก่อนเข้าและออกจากถังปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 85.84 ± 33.91 และ 88.85 ± 38.28 มก.ซีโอดี/ล. ตามลำดับ เนื่องจากค่าซีโอดีที่วัดได้ในน้ำทั้งก่อนเข้าและออกจากถังปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวเป็นน้ำที่ผ่านออกมาจากถังตกตะกอนเพื่อป้องกันการอุดตันของตะกอนในถังปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังถูกรองผ่านใยกรองที่ช่วยกรองตะกอนส่วนที่เหลือจากถังตกตะกอนอีกครั้ง จึงส่งผลให้ปริมาณซีโอดีที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิลที่มีตะกอนแขวนลอยจากอาหารปลาและเซลล์จุลินทรีย์ในปริมาณสูง อย่างไรก็ตามปริมาณเมทานอลที่หลุดรอดจากถังปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวมีปริมาณที่ค่อนข้างต่ำและไม่เป็นอันตรายต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ นอกจากนี้ภายในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิลยังมีจุลินทรีย์กลุ่มเฮเทอโรโทรฟ ซึ่งสามารถนำคาร์บอนจากสารอินทรีย์ไปใช้ในการเจริญเติบโต เป็นผลทำให้สามารถควบคุมปริมาณสารอินทรีย์ในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิลไม่ให้มีค่ามากเกินไปจนเป็นอันตรายต่อปลาได้ จากรายงานของ Kaviraj และคณะ (2004) กล่าวว่าความเป็นพิษของเมทานอลที่มีผลกับสัตว์น้ำจัดแบบเรื้อรังคือ ถ้าระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดกลางแจ้งที่มีเมทานอลในน้ำมากกว่า 47.49 มก./ล. (ประมาณ 71.24 มก.ซีโอดี/ล.) จะส่งผลต่อการเจริญเติบโตและการสืบพันธุ์ของสัตว์น้ำ แต่ถ้าเมทานอลมีความเข้มข้นสูงถึง 1,527.60 มก./ล. (2,291.40 มก.ซีโอดี/ล.) เมทานอลจะไปทำลายเนื้อเยื่อในตัวปลาในส่วนของจอตา เป็นผลให้ปลาตาบอดได้ และทำลายเหงือกปลาทำให้ปลาตายได้ จากผลการทดลองวัดค่าปริมาณซีโอดีในบางครั้งที่ทำการศึกษาตรวจวัดในน้ำที่ออกจากถังปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวมีค่ามากกว่า 71.24 มก.ซีโอดี/ล. แต่ก็ยังเป็นเพียงช่วงระยะเวลาสั้นๆ ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อปลานิล

ผลการตรวจวัดพีเอชและค่าสภาพต่างในระบบเพาะเลี้ยงปลาพบว่า ช่วงวันที่ 23-24 ของการเพาะเลี้ยงปลานิล ค่าพีเอชในบ่อและในน้ำก่อนเข้าและออกจากถังปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวมีค่าพีเอชลดลงต่ำกว่า 7.40 ส่งผลให้ปริมาณแอมโมเนียสูงกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร เนื่องจากในวันที่ 19 ของการทดลองมีการถ่ายน้ำออกเพื่อทำการจับปลา ทำให้จุลินทรีย์ในทรีฟายอิงแบคทีเรียหลุดหายไปจากบ่อเพาะเลี้ยง จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ ทั้งนี้การเกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์จะต้องมีปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมในสภาวะที่เหมาะสมต่อการ

เจริญเติบโตของกลุ่มไนทรีฟายอิงแบคทีเรีย ได้แก่ค่าพีเอชควรอยู่ในช่วง 7.5-8.5 ค่าสภาพต่างอย่างน้อย 80-100 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร (Ling และ Chen, 2005 ; Hart และ O'sullivan, 1993) แต่เมื่อทำการเดินระบบต่อเนื่องพบว่า ระบบสามารถรักษาค่าพีเอชให้กลับมามากที่ได้ โดยผลจากการตรวจวัดพีเอชและค่าสภาพต่างเฉลี่ยตลอดการทดลองในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิลมีค่าเท่ากับ 7.75 ± 0.24 และ 178.87 ± 51.65 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงปลานิล โดยปลานิลสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอช 7.2-8.3 และค่าสภาพต่างที่ 50-300 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. (อุดม เรืองนพคุณ, 2550 ; Timmons และคณะ, 2002)

สำหรับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำตลอดระยะเวลาในการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.16 พบว่าค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิลและในน้ำก่อนเข้าท่อยาวมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 5.22 ± 0.58 และ 5.96 ± 0.74 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงปลานิล โดยมีรายงานว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงปลาควรมีค่ามากกว่า 5 มก./ล. (มันสิน ตันกุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2539) แต่สำหรับในน้ำหลังการบำบัดในเทรตด้วยถังปฏิกรณ์ดีไนทรีฟิเคชันแบบท่อยาว พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.15 ± 0.56 มก./ล. และมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.10–2.20 มก./ล. ซึ่งเป็นค่าที่เพียงพอต่อการทำงานของดีไนทรีฟายอิงแบคทีเรีย โดยในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายน้ำประมาณ 0.1-0.2 มก./ล. แบคทีเรียกลุ่มดีไนทรีฟายอิงจะใช้ในเทรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (ชลธิชา พลายชุม, 2553)

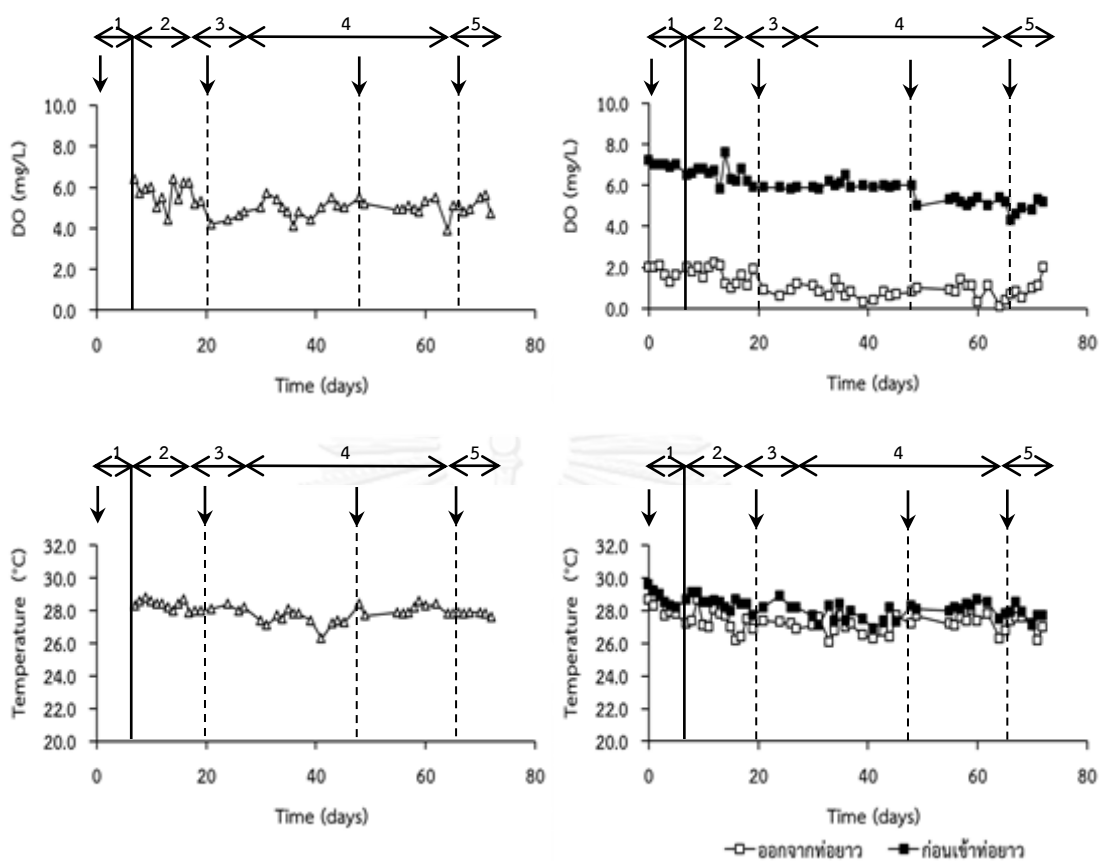
ผลจากการตรวจวัดของค่าอุณหภูมิตลอดการทดลอง พบว่าค่าอุณหภูมิในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิลและในน้ำทั้งก่อนเข้าและออกจากท่อยาวมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 28.00 ± 0.48 28.18 ± 0.57 และ 27.30 ± 0.64 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากเป็นระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดภายในโรงเรือน จึงส่งผลให้อุณหภูมิตลอดการทดลองมีค่าคงที่ โดยอุณหภูมิภายในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองอยู่ในช่วง 26.30-28.80 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการดำรงชีวิตของปลานิล ทั้งนี้มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ (2536) รายงานว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลานิลควรอยู่ในช่วง 19–28 องศาเซลเซียส



(ก) ในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิล

(ข) ก่อนเข้าท่อยาวและออกจากท่อยาว

ภาพที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์คาร์บอน ฟิเอช และค่าสภาพต่างเปรียบเทียบระหว่างบ่อเลี้ยงปลานิลกับถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว โดย (↓) แสดงการเติมไนเตรตความเข้มข้น 50 มก.ไนโตรเจน/ลิตร และหมายเลข 1-5 แสดงการปรับตั้งโปรแกรมควบคุมการเติมเมทานอล



(ก) ในระบบเพาะเลี้ยงปลานิล

(ค) ก่อนเข้าท่อยาวและออกจากท่อยาว

ภาพที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนและอุณหภูมิ เปรียบเทียบระหว่างบ่อเลี้ยงปลานิลกับถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว โดย (↓) แสดงการเติมไนเตรตความเข้มข้น 50 มก.ไนโตรเจน/ลิตร และหมายเลข 1-5 แสดงจำนวนครั้งของการปรับตั้งโปรแกรมควบคุมการเติมเมทานอล

- การประเมินค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการควบคุมการเติมเมทานอลให้กับระบบบำบัดในทรตแบบท่อยาวโดยอัตโนมัติ

สำหรับการทดลองในส่วนนี้ได้ทำการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันภายในท่อยาว โดยนำช่วงค่าโออาร์พีที่ตรวจวัดในส่วนท้ายของท่อยาวมาเป็นตัวกำหนดการเริ่มและหยุดการเติมเมทานอลเมื่อใช้ความเข้มข้นของเมทานอลร้อยละ 1.5 ที่อัตราการเติมเมทานอล 215.3 มล./ชม. โดยตั้งค่ากระแสไฟฟ้าที่จะจ่ายให้ตัวควบคุมเวลาเปิดและปิดของปั๊มเติมเมทานอลที่ 6 โวลต์ มีผลให้เครื่องสูบน้ำเติมเมทานอลมีอัตราการไหลที่ 13 มล./10 วินาที ดังนั้นกำหนดให้ 1 รอบการทำงานของเครื่องสูบน้ำเท่ากับ 6 นาที (เปิดทำงาน 17 วินาที และหยุดทำงาน 5 นาที 43 วินาที) จะได้ปริมาตร 21.53 มล. ดังนั้นภายใน 1 ชม. จะได้ปริมาตรเมทานอลเท่ากับ 215.3 มล.

ผลการศึกษาแสดงในภาพที่ 4.17-4.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าโออาร์พีที่ตรวจวัดได้จากบริเวณส่วนปลายทางออกของท่อยาวและเก็บข้อมูลด้วยระบบบันทึกอัตโนมัติทุก 10 นาที ทั้งนี้ในช่วงแรกคือวันที่ 0-5 ของการทดลองเป็นการทดสอบระบบควบคุมการเติมเมทานอล จึงไม่ได้ทำการรวบน้ำกลับคืนสู่บ่อปลา เนื่องจากอาจมีเมทานอลหลุดรอดจนอาจเป็นอันตรายต่อปลาได้ โดยในช่วงนี้ได้ทำการปรับตั้งโปรแกรมการควบคุมเมทานอล โดยจะหยุดการเติมเมทานอลเมื่อค่าโออาร์พีลดลงถึง 0 มิลลิโวลต์ และเมื่อค่าโออาร์พีเพิ่มสูงขึ้นถึง 100 มิลลิโวลต์จึงเริ่มการเติมเมทานอลอีกครั้งหนึ่ง ผลการศึกษาในช่วงแรกนี้พบว่าการใช้ระบบควบคุมการเติมเมทานอลแบบอัตโนมัติสามารถทำงานได้จริงและยังช่วยให้ระดับโออาร์พีมีความคงที่โดยไม่ต้องอาศัยแรงงานคนในการคอยตรวจสอบค่าโออาร์พีเพื่อเริ่มและหยุดการเติมเมทานอลดังเช่นในการทดลองช่วงต้นที่ผ่านมา

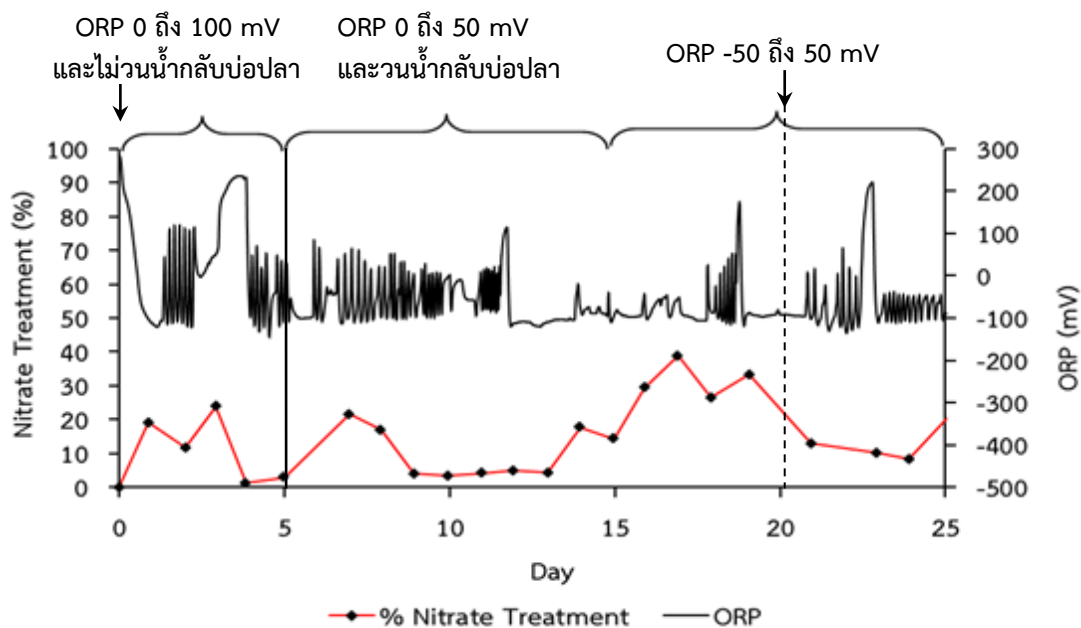
สำหรับผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดในทรตในช่วงระหว่างการทดลองระบบควบคุมการเติมเมทานอลแบบอัตโนมัติ (วันที่ 0 - 5) ได้ทำการตรวจวัดปริมาณในทรตทั้งก่อนเข้าและออกจากท่อยาวเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดในทรตของถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา และประสิทธิภาพการบำบัดจะต่ำกว่าร้อยละ 30 ดังนั้นในวันที่ 6-72 จึงได้ทำการปรับตั้งโปรแกรมการควบคุมเมทานอลโดยโปรแกรมการควบคุมเมทานอลที่ใช้แสดงในตารางที่ 4.9 และได้ทำการรวบน้ำกลับคืนสู่บ่อปลา ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดมีความสัมพันธ์กับค่าโออาร์พี โดยเมื่อโออาร์พีมีค่าสูงกว่า -100 มิลลิโวลต์ประสิทธิภาพการบำบัดจะต่ำกว่าร้อยละ 40 แต่เมื่อค่าโออาร์พีลดต่ำลงเข้าใกล้ -400 มิลลิโวลต์ประสิทธิภาพการบำบัดจะสูงเกือบร้อยละ 80

จากการเดินระบบบำบัดในเทรตแบบท่อยาวเป็นระยะเวลานาน (ในการทดลองได้เดินระบบต่อเนื่องมาตั้งแต่การทดลองในหัวข้อที่ 4.1 เป็นระยะเวลา 15 เดือนก่อนที่จะเริ่มการทดลองเลี้ยงปลาในหัวข้อ 4.3) จึงทำให้เกิดการอุดตันของเซลล์ของจุลินทรีย์จำนวนมากตามช่องว่างภายในตัวกรองชีวภาพที่บรรจุภายในท่อยาวทำให้น้ำไหลผ่านไม่สะดวกดังนั้นในวันที่ 51-52 ของการทดลองจึงได้หยุดระบบบำบัดเพื่อทำการล้างทำความสะอาดตัวกรองชีวภาพและได้ทำการเปลี่ยนปั๊มเวียนน้ำ โดยการล้างทำความสะอาดจะทำการเปิดวาล์วในแต่ละชั้นของท่อยาวและปรับอัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นเพื่อให้น้ำไปดันเอาเซลล์ของจุลินทรีย์ที่อุดตันให้หลุดออกมา โดยจะทำการไล่เปิดวาล์วจากชั้นล่างขึ้นไปยังชั้นบนและทำสลับกันไปทั้งสองข้างของท่อยาว ซึ่งการล้างทำความสะอาดช่วยให้การไหลของน้ำภายในระบบมีความคล่องตัวขึ้น หลังจากนั้นจึงได้ทำการเดินระบบบำบัดต่อเนื่องและพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดกลับคืนสู่ภาวะปกติอย่างรวดเร็วภายในเวลา 1 วัน แต่ในวันที่ 57 ของการทดลองเกิดการรั่วของสายส่งเมทานอลภายในเครื่องเติมเมทานอล เนื่องจากเกิดการเสียดสีกันจึงทำให้สายยางขาดทำให้จำเป็นต้องหยุดการเติมเมทานอล แต่หลังจากทำการเปลี่ยนสายยางใหม่ระบบบำบัดสามารถกลับคืนสู่ภาวะปกติได้อย่างรวดเร็ว

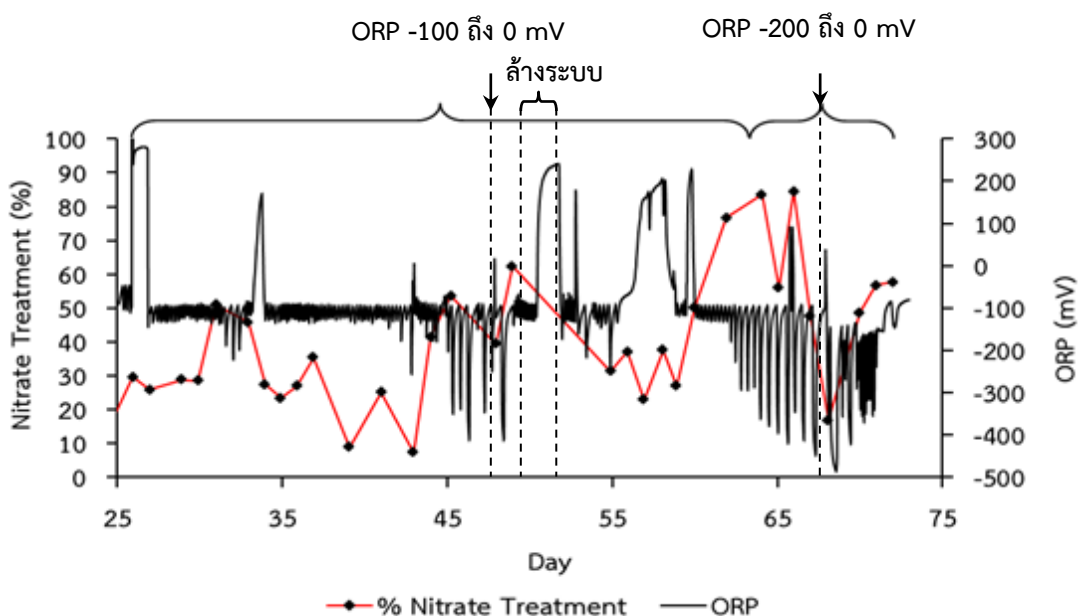
จากผลการทดลองที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ผลการตรวจวัดค่าโออาร์พีที่บริเวณส่วนปลายของถังปฏิกรณ์ดีในทรีฟิเคชันแบบท่อยาวมาเป็นข้อมูลบ่งชี้การเกิดปฏิกิริยาดีในทรีฟิเคชันได้ โดยหากภายในระบบบำบัดมีการเกิดปฏิกิริยาดีในทรีฟิเคชันจะทำให้ค่าโออาร์พีอยู่ระหว่าง -100 ถึง -400 มิลลิโวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gutierrez-Wing และคณะ (2012) ที่กล่าวว่าปฏิกิริยาดีในทรีฟิเคชันจะเกิดในช่วงของค่าโออาร์พีที่ -325 มิลลิโวลต์ ในขณะที่ค่าโออาร์พีที่ต่ำกว่า -400 มิลลิโวลต์จะเป็นค่าที่ต้องหลีกเลี่ยง และในทางกลับกันถ้าค่าโออาร์พีสูงกว่า -100 มิลลิโวลต์แสดงว่าไม่มีการเกิดปฏิกิริยาดีในทรีฟิเคชันขึ้น

ตารางที่ 4.9 การปรับตั้งโปรแกรมควบคุมการเติมเมทานอลเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการบำบัดในเทรตเฉลี่ย

รอบที่	ระยะเวลาที่ทำการทดลอง	การปรับตั้งโปรแกรมควบคุมการเติมเมทานอล		ประสิทธิภาพการบำบัดในเทรตเฉลี่ย (%)
		ค่า ORP ต่ำสุด (mV)	ค่า ORP สูงสุด (mV)	
1	5 วัน	0	100	11.7 %
2	10 วัน	0	50	11.6 %
3	12 วัน	-50	50	22.1 %
4	41 วัน	-100	0	36.5 %
5	9 วัน	-200	0	56.4 %



ภาพที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงของค่าโออาร์พี เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าของระดับที่ใช้ในการควบคุม การเติมเมทานอลในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 100 มิลลิโวลต์ , 0 ถึง 50 มิลลิโวลต์ และ -50 ถึง 50 มิลลิโวลต์ โดย (↓) แสดงการเติมไนเตรตความเข้มข้น 50 มก.ไนโตรเจน/ลิตร



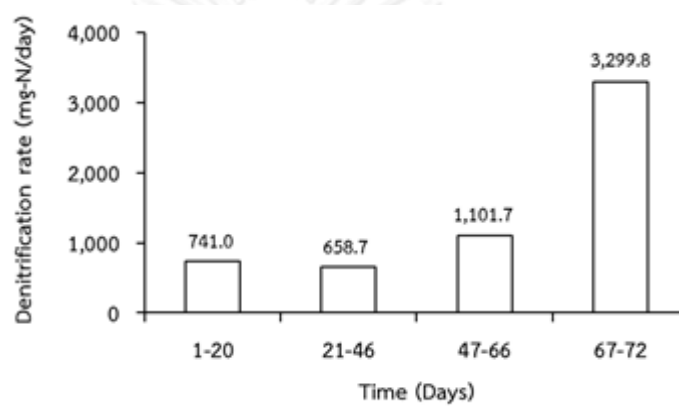
ภาพที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงของค่าโออาร์พี เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าของระดับที่ใช้ในการควบคุม การเติมเมทานอลในช่วงตั้งแต่ -100 ถึง 0 มิลลิโวลต์ และ -200 ถึง 0 มิลลิโวลต์ โดย (↓) แสดงการเติมไนเตรตความเข้มข้น 50 มก.ไนโตรเจน/ลิตร

ตารางที่ 4.10 พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำของน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิลทั้งก่อนเข้าท่อยาวและออกจากท่อยาวเมื่อเลี้ยงปลานิลเป็นเวลา 72 วัน

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด – ค่าสูงสุด)		
	บ่อเพาะเลี้ยง	ก่อนเข้า	ออกจาก
	ปลานิล	ท่อยาว	ท่อยาว
แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	0.11 ± 0.02 (0.00 - 0.89)	0.13 ± 0.02 (0.00 - 0.93)	0.08 ± 0.02 (0.00 - 0.53)
ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	0.40 ± 0.02 (0.11 - 0.90)	0.40 ± 0.04 (0.13 - 0.78)	0.46 ± 0.05 (0.00 - 2.03)
ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ลิตร)	36.61 ± 1.19 (26.88 - 51.04)	31.23 ± 0.76 (12.10 - 49.87)	25.74 ± 1.14 (2.61 - 49.50)
ซีโอดี (มก.ซีโอดี/ลิตร)	226.22 ± 93.59 (96.12 - 560.60)	85.84 ± 33.91 (9.20 - 175.10)	88.85 ± 38.28 (11.90 - 165.90)
ค่าสภาพต่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ลิตร)	178.87 ± 51.65 (110 - 340)	192.12 ± 50.35 (110 - 330)	210.38 ± 58.24 (120 - 340)
พีเอช	7.75 ± 0.24 (6.86 - 8.14)	7.93 ± 0.19 (7.30 - 8.27)	7.82 ± 0.23 (7.30 - 8.19)
ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ลิตร)	5.22 ± 0.58 (3.90 - 6.40)	5.96 ± 0.74 (4.30 - 7.60)	1.15 ± 0.56 (0.10 - 2.20)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	28.00 ± 0.48 (26.30 - 28.80)	28.18 ± 0.57 (26.90 - 29.60)	27.30 ± 0.64 (26.10 - 28.90)

- อัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชัน

ผลจากการคำนวณอัตราดีไนทริฟิเคชันจากการบำบัดไนเตรตของถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว แสดงในภาพที่ 4.19 พบว่าอัตราดีไนทริฟิเคชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการปรับตั้งโปรแกรมควบคุมการเติมเมทานอลที่สามารถควบคุมค่าโออาร์พีให้อยู่ในช่วงของการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์ จึงทำให้ลดการสะสมของไนเตรตในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้ และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการบำบัดกับงานวิจัยอื่นพบว่าอัตราดีไนทริฟิเคชันของถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวอยู่ในเกณฑ์ปานกลางแสดงดังตารางที่ 4.11



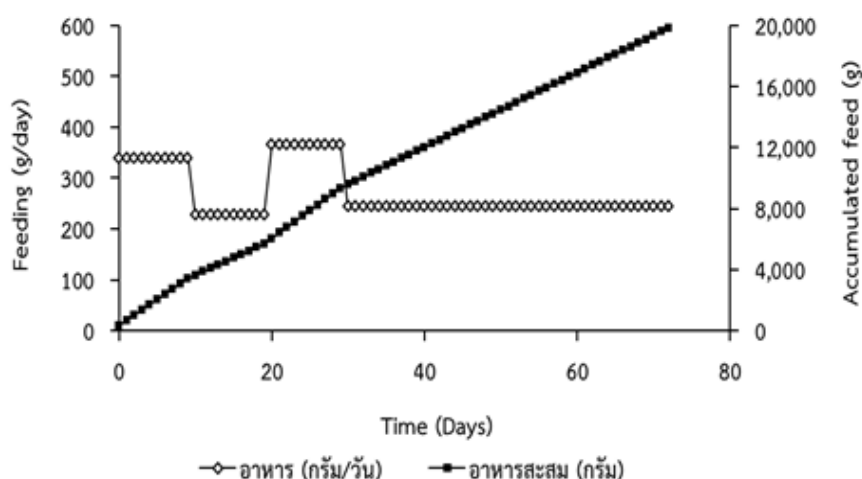
ภาพที่ 4.19 อัตราดีไนทริฟิเคชันของถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวจากการเพาะเลี้ยงปลานิล

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบอัตราการบำบัดไนเตรตของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา

ประเภทของน้ำเสีย	แหล่งคาร์บอน	ปริมาณไนเตรตเข้าระบบ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	อัตราดีไนทริฟิเคชัน (ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน)	อ้างอิง
น้ำใต้ดิน	ซูโครส	22	240-480	Gomaz และคณะ(2000)
น้ำใต้ดิน	น้ำแป้ง	13-17	460	Kim และคณะ(2002)
ปลาทอง	น้ำแป้ง	40	624	Tal และคณะ(2003)
เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด	เมทานอล	50	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	ชลธิชา พลายชุม (2553)
ปลานิล	เมทานอล	50	75	งานวิจัยนี้

4.3.1 การประเมินประสิทธิภาพระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

หลังจากเริ่มเลี้ยงปลานิลความหนาแน่นเริ่มต้น 17.03 กก./ลบ.ม. (จำนวน 111 ตัว) โดยมี น้ำหนักและความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 613.5 ± 291.0 ก. และ 25.9 ± 4.95 ซม. ในบ่อเพาะเลี้ยง ปริมาณน้ำ 4 ลบ.ม. โดยให้อาหารร้อยละ 0.5-1 ของน้ำหนักปลาต่อวัน ซึ่งการให้อาหารปลาขึ้นอยู่กับ การกินอาหารของปลา นั่นคือถ้าพบว่าปลาไม่กินอาหารจะทำการให้อาหารเพียงหนึ่งมือเพื่อไม่ให้ อาหารเหลือตกค้างในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิลมากเกินไป ซึ่งการปรับปริมาณอาหารแสดงดังภาพที่ 4.20 โดยมีการปรับปริมาณอาหารตามน้ำหนักของปลานิลหลังจากที่มีการสุ่มตรวจวัดอัตราการเติบโตของ ปลานิลในวันที่ 19 ของการทดลองซึ่งมีปริมาณอาหารสะสมภายในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำทั้งหมดเท่ากับ 19,822 ก./ลบ.ม. ผลจากการสุ่มตัวอย่างปลาในวันที่ 19 และวันที่ 72 ซึ่งเป็นวันสุดท้ายของการ ทดลองเพื่อชั่งน้ำหนักและวัดความยาว สามารถหาอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 2.42 และ 1.62 กรัม/วัน ตามลำดับ อัตราการรอดในวันสุดท้ายของการทดลองมีค่าเท่ากับร้อยละ 98.2 น้ำหนัก เฉลี่ย 746.1 ± 250.2 กรัม/ตัว มีความหนาแน่น 20.6 กก./ลบ.ม. ดังตารางที่ 4.12



ภาพที่ 4.20 ปริมาณอาหารที่ให้และปริมาณอาหารที่สะสมภายในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิล

ตารางที่ 4.12 อัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตของปลานิล

เวลา (วันที่)	DWG (กรัม/วัน)	น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม/ตัว)	ความยาวเฉลี่ย (ซม./ตัว)	อัตราการรอด (%)	อัตราแลกเนื้อ (FCR)	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)
1		613.5 ± 283.7	25.9 ± 4.9	100		17.03
72	1.62	746.1 ± 250.2	28.7 ± 4.6	98.2	1.50	20.6

* เนื่องจากในวันที่ 19 ของการทดลองได้ทำการนับปลาคิดเป็น 30 เปอร์เซนต์ของจำนวนปลาทั้งหมด

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของปลานิลในการทดลองนี้กับอัตราการเจริญเติบโตของปลานิลในบ่อที่เกษตรกรเลี้ยงทั่วไปแสดงดังตารางที่ 4.13 พบว่าปลานิลในการทดลองนี้มีอัตราการเจริญเติบโตอยู่ในระดับปกติ แต่อย่างไรก็ตามการเจริญเติบโตของปลานิลขึ้นอยู่กับส่วนประกอบและปริมาณการให้อาหารในแต่ละวัน คุณภาพน้ำ ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบมาตรฐานทั่วไปของอัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตของปลานิลแต่ละช่วงอายุ (ดัดแปลงจาก คีรี กอนันตกุล และจุฬ สิ้นชัยพานิช, 2551 อ้างถึงใน (กชพร กฤตยานันต์, 2554) และ<http://www.fisheries.go.th/freshwater/web3/>)

น้ำหนักปลา (ก.)	อายุ (เดือน)	อัตราการเจริญเติบโต (ก./วัน)	อ้างอิง
1 - 5	-	0.16 - 0.18	
5 - 20	1	0.20 - 0.30	
20 - 100	3	0.30 - 0.34	
100 - 200	4	0.30 - 0.35	คีรี และจุฬ (2551)
200 - 700	6	0.43 - 0.49	
700 - 1,000	8	0.50 - 1.00	
1,000 - 1,500	12	1.50 - 1.73	
600 - 1,200	>12	1.62	งานวิจัยนี้

4.3.2 การประเมินสมดุลไนโตรเจน

การทดลองในส่วนนี้เป็นการประเมินสมดุลไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว ซึ่งการประเมินสมดุลไนโตรเจนทำได้โดยการเปรียบเทียบปริมาณและสัดส่วนไนโตรเจนทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบและไนโตรเจนทั้งหมดในวันสุดท้าย ซึ่งปริมาณไนโตรเจนในตะกอนและในตัวอย่างปลานิลอ้างอิงข้อมูลของเพ็ญพิชญา พินิจธนภาคย์ (2556) ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนด้วยเครื่องCHNS/O ANALYZER (PE2400 SeriesII) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังแสดงในตารางที่ 4.14 เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการประเมินสมดุลไนโตรเจนจะได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.15 ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบส่วนใหญ่มาจากอาหารเลี้ยงปลานิล โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 99.97 รองลงมาเป็นตะกอนร้อยละ 0.07 และสัดส่วนที่เหลือเป็นไนโตรเจนในน้ำทั้งหมดเท่ากับ 0.03 สำหรับไนโตรเจนในวันสุดท้ายพบว่า ไนโตรเจนในอาหารเปลี่ยนไปเป็นมวลชีวภาพในตัวปลานิลเท่ากับร้อยละ 19.55 และเนื่องจากในระบบบำบัดมีการติดตั้งถังตกตะกอน ซึ่งเป็นการนำตะกอนออกจากระบบตลอดเวลา จึงเป็นเหตุทำให้พบไนโตรเจนในตะกอนน้อยมาก โดยคิดเป็นร้อยละ 0.08 และ

ปริมาณไนโตรเจนในน้ำทั้งหมดมีเพียงร้อยละ 4.32 ซึ่งเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากในระบบสามารถเกิดการการบำบัดไนโตรเจนในน้ำได้ทั้งกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน จึงทำให้มีไนโตรเจนทั้งหมดเหลืออยู่ในน้ำในปริมาณน้อย สำหรับส่วนที่ไม่สามารถระบุได้ที่พบว่ามีความมากถึงร้อยละ 79.92 โดยคาดว่าจะเป็นส่วนของไนโตรเจนที่สูญเสียไปกับตะกอนที่นำออกจากระบบตลอดเวลา และเนื่องจากในการทดลองมีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวจึงทำให้ไนโตรเจนบางส่วนสูญหายจากระบบไปในรูปของก๊าซไนโตรเจนได้ นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากกระบวนการดีไนทริฟิเคชันที่เกิดขึ้นในตะกอนจากการสะสมตัวเป็นจำนวนมากบริเวณก้นบ่อ

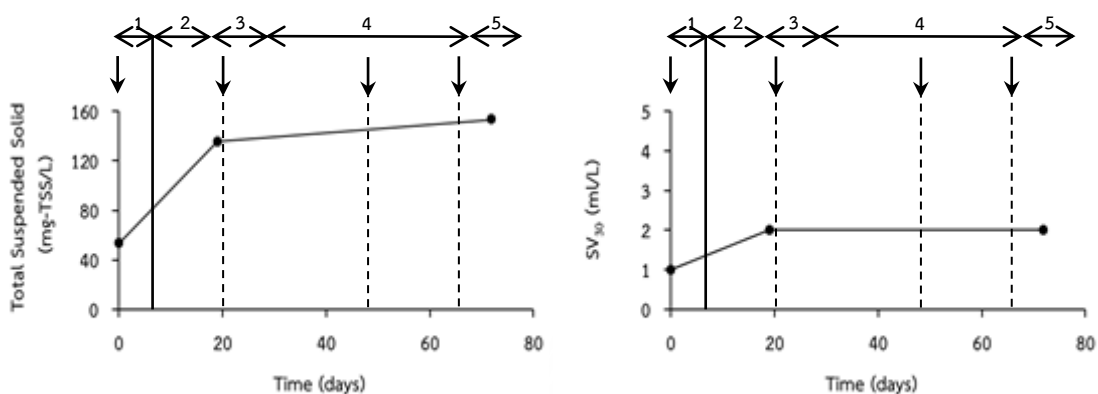
อย่างไรก็ตามการประเมินสมดุลไนโตรเจนในการทดลองนี้ค่าที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากการให้อาหารในปริมาณที่แตกต่างกันตามการเจริญเติบโตและการสังเกตการกินอาหารในแต่ละวัน และการนำตะกอนออกจากระบบตลอดเวลาทำให้ปริมาณไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบมีค่าไม่สมดุลกับไนโตรเจนที่ออกจากระบบ โดยปริมาณของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.21 จะเห็นว่าปริมาณตะกอนแขวนลอยตลอดการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากมีการนำตะกอนออกจากระบบตลอดเวลา นอกจากนี้ในระบบไม่มีการตรวจวัดไนโตรเจนในรูปของก๊าซซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันภายในท่อยาวจึงทำให้ไม่ทราบว่าไนโตรเจนที่สูญหายไปเป็นก๊าซไนโตรเจนมีในปริมาณมากน้อยเพียงใด และเนื่องจากการทดลองได้ทำการจับปลานิลเพื่อนำมาวัดความยาวและชั่งน้ำหนักดังนั้นจึงต้องทำการถ่ายน้ำภายในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิลปริมาตรร้อยละ 70 เพื่อให้สามารถจับปลานิลได้สะดวก ทำให้ต้องทำการเติมน้ำลงไปชดเชย และส่งผลให้ตะกอนบางส่วนอาจหายไปกับการถ่ายน้ำ และจากปัญหาการอุดตันของตัวกลางชีวภาพภายในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวทำให้ต้องมีการล้างทำความสะอาด จึงส่งผลให้ไนโตรเจนบางส่วนอาจหายไปกับน้ำที่มีการล้างทำความสะอาด

ตารางที่ 4.14 ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนของตะกอนในน้ำและในตัวปลานิลเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHNS/O ANALYZER (อ้างอิงจากเพ็ญพิชญา พินิจธนภาคย์; 2556)

ตัวอย่าง	ร้อยละ		
	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน
ตะกอน	35.32	6.70	4.91
ปลานิล (นน.เปียก 86.55 ก. และ นน.แห้ง 19.17 ก.)	53.48	9.55	6.35

ตารางที่ 4.15 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบและเมื่อสิ้นสุดการทดลองในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลานิล

องค์ประกอบไนโตรเจน	ไนโตรเจน (ก.)	ไนโตรเจน (ร้อยละ)
ไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบ		
อาหารปลานิล	951.46	99.97
ไนโตรเจนในน้ำทั้งหมด (TN=TDN+PN)	0.28	0.03
- ไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมด (TDN)	0.19	0.02
- ไนโตรเจนไม่ละลายน้ำทั้งหมด (PN)	0.09	0.01
ตะกอน	0.66	0.07
รวม	951.74	100.00
ไนโตรเจนในวันสุดท้าย		
ปลานิล	186.08	19.55
ไนโตรเจนในน้ำทั้งหมด (TN=TDN+PN)	4.32	0.45
- ไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมด (TDN)	4.23	0.44
- ไนโตรเจนไม่ละลายน้ำทั้งหมด (PN)	0.09	0.01
ตะกอน	0.75	0.08
ส่วนที่ไม่สามารถระบุได้	760.59	79.92
รวม	951.74	100.00



(ก) ปริมาณของแข็งแขวนลอย

(ข) ปริมาณตะกอนจมตัวที่เวลา 30 นาที

ภาพที่ 4.21 ปริมาณของแข็งแขวนลอย และปริมาตรตะกอนจมตัวที่เวลา 30 นาที ในบ่อเพาะเลี้ยง
 ปลานิล ตลอดการทดลองเป็นระยะเวลา 72 วัน โดย (↓) แสดงการเติมไนเตรต ความ
 เข้มข้น 50 มก.ไนโตรเจน/ลิตร และหมายเลข 1-5 แสดงจำนวนครั้งของการปรับตั้ง
 โปรแกรมควบคุมการเติมเมทานอล

4.4 การศึกษาความหลากหลายและการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว

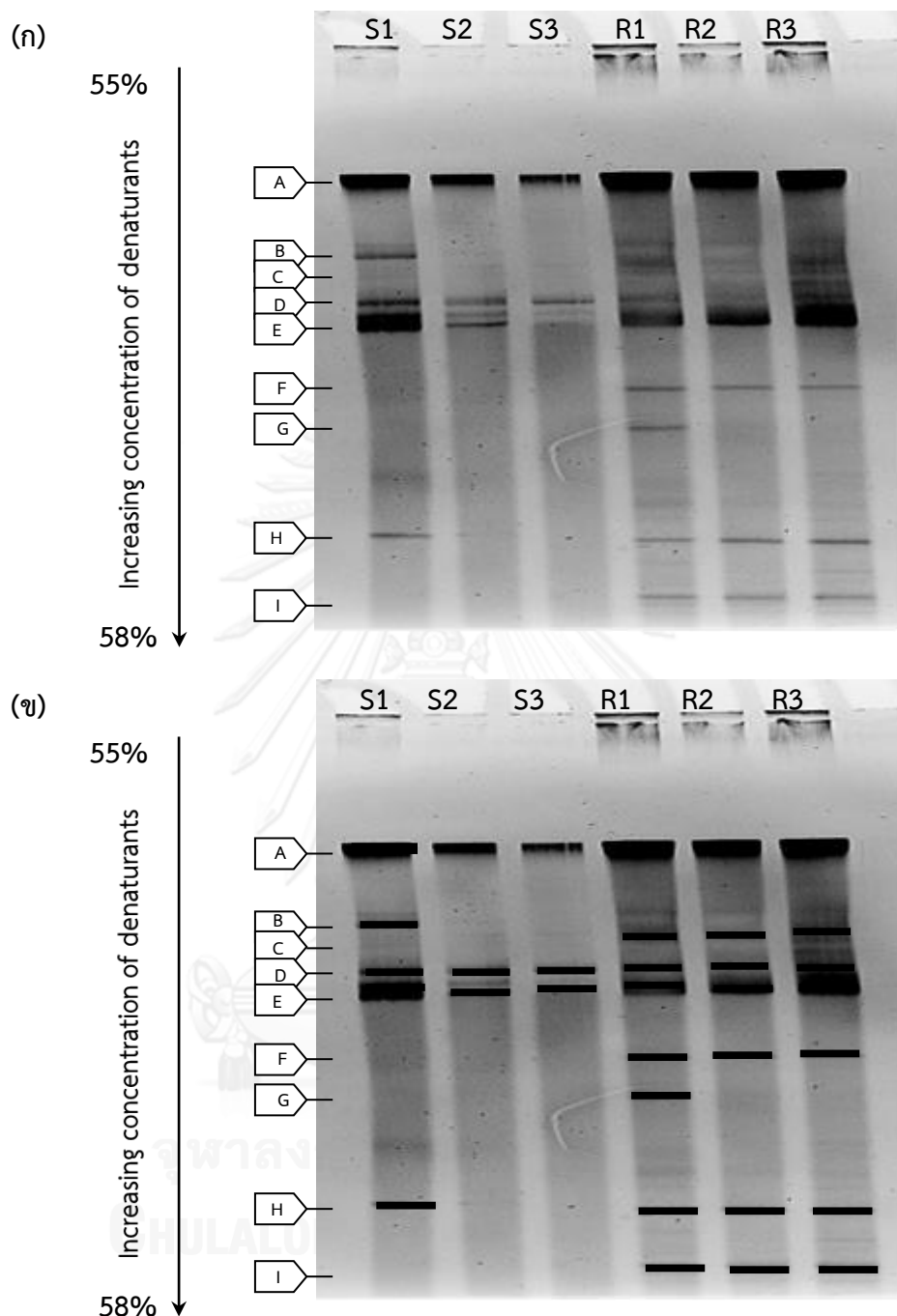
การทดลองส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงและความหลากหลายของกลุ่มจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพภายในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวในช่วงต้นท่อ (S1) กลางท่อ (S2) และปลายท่อ (S3) เมื่อทำการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ในช่วงสิ้นสุดการทดลองที่ 2.2 กับจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพภายในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวในช่วงต้นท่อ (R1) กลางท่อ (R2) และปลายท่อ (R3) เมื่อทำการทดลองด้วยน้ำเสียจริงจากบ่อเลี้ยงปลานิลเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 3 ซึ่งรายละเอียดของตัวกรองชีวภาพที่เก็บตัวอย่างมาสังกัดดีเอ็นเอแสดงดังตารางที่ 4.16

เมื่อทำการสกัดแยกดีเอ็นเอรวมจากจุลินทรีย์ที่ติดอยู่บนตัวกรองชีวภาพและทำการเพิ่มจำนวนยีนในช่วงสายของ 16S rDNA ด้วย Universal Bacterial Primer โดยเทคนิคพีซีอาร์ จากนั้นวิเคราะห์จำแนกดีเอ็นเอของจุลินทรีย์ต่างๆ ด้วยเทคนิคดีจีจีอี พบว่าผลการเคลื่อนที่ของแถบดีเอ็นเอบนแผ่นเจล ดังแสดงในภาพที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าชนิดของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพเมื่อทำการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ (S1, S2 และ S3) มีความคล้ายคลึงกันกับชนิดของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพเมื่อทำการทดลองด้วยน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลานิล (R1, R2 และ R3) โดยพบแถบดีเอ็นเอที่ปรากฏในทั้ง 6 ตัวอย่าง (S1, S2, S3, R1, R2 และ R3) จำนวน 4 แถบ ได้แก่ A D E และ H แต่เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบชนิดของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพในน้ำเสียสังเคราะห์ระหว่าง S1 S2 และ S3 พบว่าชนิดของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวของท่อ โดยจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพจาก S1 มีจำนวนแถบบากกว่า S2 และ S3 จำนวน 2 แถบ ได้แก่ แถบ B และ H เช่นเดียวกับองค์ประกอบชนิดของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพในน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลานิลระหว่าง R1 R2 และ R3 ที่พบว่าชนิดของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพมีการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน โดยจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพจาก R1 มีจำนวนแถบบากกว่า R2 และ R3 จำนวน 2 แถบ ได้แก่ แถบ F และ G นั่นคือจุลินทรีย์ที่พบในช่วงต้นท่อเป็นจุลินทรีย์ชนิดที่สามารถเติบโตได้ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน เนื่องจากน้ำเสียที่เข้ามาในช่วงต้นท่อนี้ยังคงมีออกซิเจนสูงจากการเติมอากาศในบ่อเพาะเลี้ยงให้เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบความหลากหลายของแถบดีเอ็นเอระหว่างชนิดของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพในน้ำเสียสังเคราะห์กับชนิดของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพในน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลานิล พบว่าความหลากหลายของแถบดีเอ็นเอบางแถบของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพในน้ำเสียจริงมีลักษณะเปลี่ยนไป คือแถบดีเอ็นเอ B จะหายไปแต่จะพบแถบ C F G และ I ขึ้นมาแทนโดยแถบเหล่านี้จะแสดงถึงความหลากหลายของชนิดจุลินทรีย์ที่มี

อยู่ในระบบ ถ้ามีจำนวนแถบมากแสดงว่ามีความหลากหลายของจุลินทรีย์ในระบบมาก ส่วนความเข้มของแถบที่แตกต่างกันจะแสดงถึงความเป็นกลุ่มเด่นของจุลินทรีย์ชนิดนั้นในระบบ

ตารางที่ 4.16 รายละเอียดของตัวกรองชีวภาพที่ใช้ในการศึกษาความหลากหลายของจุลินทรีย์ด้วยเทคนิค PCR-DGGE

ตัวอย่างที่	ชื่อย่อ	รายละเอียดของตัวอย่าง
1	S1	ตัวกรองชีวภาพในท่อยาวบริเวณต้นท่อของการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 2.2
2	S2	ตัวกรองชีวภาพในท่อยาวบริเวณกลางท่อของการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 2.2
3	S3	ตัวกรองชีวภาพในท่อยาวบริเวณปลายท่อของการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 2.2
4	R1	ตัวกรองชีวภาพในท่อยาวบริเวณต้นท่อของการทดลองด้วยน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลานิลเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 3
5	R2	ตัวกรองชีวภาพในท่อยาวบริเวณกลางท่อของการทดลองด้วยน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลานิลเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 3
6	R3	ตัวกรองชีวภาพในท่อยาวบริเวณปลายท่อของการทดลองด้วยน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลานิลเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 3



ภาพที่ 4.22 โปรไฟล์แสดงการเคลื่อนที่ของแถบดีเอ็นเอบนแผ่นดีจีจีอีเจล เมื่อสกัดแยกจากจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพจากถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวบริเวณต้นท่อ กลางท่อปลายท่อ เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 2.2 (S1) (S2) (S3) และ ตัวกรองชีวภาพเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 3 (R1) (R2) (R3) ทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นอะคริลาไมด์เจลร้อยละ 8 และความเข้มข้นของยูเรียในช่วงร้อยละ 55-58 โดยภาพ (ก) แผ่นดีจีจีอีเจลต้นแบบ และภาพ (ข) แผ่นดีจีจีอีเจลที่เติมแถบดีเอ็นเอเพื่อให้เห็นความชัดเจนขึ้น

เมื่อได้ผลการจัดเรียงลำดับนิวคลีโอไทด์ (Nucleotide base sequence) ของดีเอ็นเอทั้ง 7 แถบ และได้นำสายนิวคลีโอไทด์ดังกล่าวมาทำการเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลพันธุกรรมออนไลน์ด้วย โปรแกรม Basic Local Aliquiment Search Tool (BLAST) ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.17 พบว่าตัวอย่างดีเอ็นเอที่แยกได้มีลำดับนิวคลีโอไทด์เหมือนกับจุลินทรีย์ที่พบในฐานข้อมูลพันธุกรรม ในช่วงร้อยละ 83 ถึง 99 โดยสามารถสรุปเป็นแผนภาพชนิดของจุลินทรีย์ที่อยู่บนตัวกรองชีวภาพจากถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวบริเวณต้นท่อ กลางท่อ และปลายท่อ ทั้งนี้ น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง ดังภาพที่ 4.23 และเมื่อทำการวิเคราะห์ความหลากหลายของกลุ่มจุลินทรีย์ดังกล่าว พบว่าสามารถจัดลำดับได้ทั้งหมด 5 กลุ่ม ได้แก่

1. *Alphaproteobacteria* คือแบคทีเรียที่พบในถังย่อยไร้อากาศของการบำบัดเบนซิน (Flores และคณะ, 2006) และในตะกอนดินทะเล (Wang และคณะ, 2012)
2. *Firmicutes* คือแบคทีเรียที่พบในถังย่อยไร้อากาศ (Marina และคณะ, 2007)
3. *Betaproteobacteria* คือแบคทีเรียที่มีลักษณะรูปร่างเป็นเส้นสาย (Filamentous) และพบในถังย่อยไร้อากาศ (Xia และคณะ, 2007)
4. *Gammaproteobacteria* คือแบคทีเรียที่พบในตะกอนดิน (Jian และคณะ, 2008)
5. *Actinobacteria* คือแบคทีเรียที่ใช้ในทรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนด้วยกระบวนการรีดิวซ์ในทรตในระบบไร้อากาศ (Tan และ Reinhold-Hurek, 2003)

ผลการศึกษาข้างต้นพบว่าจุลินทรีย์ทั้งหมดที่พบในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวที่ทำการศึกษาเป็นจุลินทรีย์ในกลุ่ม facultative anaerobes ที่พบในตะกอนดิน และในระบบบำบัดแบบไร้อากาศโดยจุลินทรีย์กลุ่มเด่นที่พบ คือ *Alphaproteobacteria*, *Betaproteobacteria* และ *Firmicutes* ซึ่งมีการกระจายตัวของจุลินทรีย์อยู่ในตัวกรองชีวภาพในท่อยาวบริเวณต้นท่อของการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 2.2 และในตัวกรองชีวภาพในท่อยาวทั้งบริเวณต้นท่อ กลางท่อ และปลายท่อของการทดลองด้วยน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลานิลเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 3 ในขณะที่จุลินทรีย์กลุ่มย่อย คือ *Gammaproteobacteria* และ *Actinobacteria* ที่มีการกระจายตัวของจุลินทรีย์เหมือนกับจุลินทรีย์กลุ่มเด่น โดยรายงานการวิจัยเกี่ยวกับความหลากหลายของกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.18

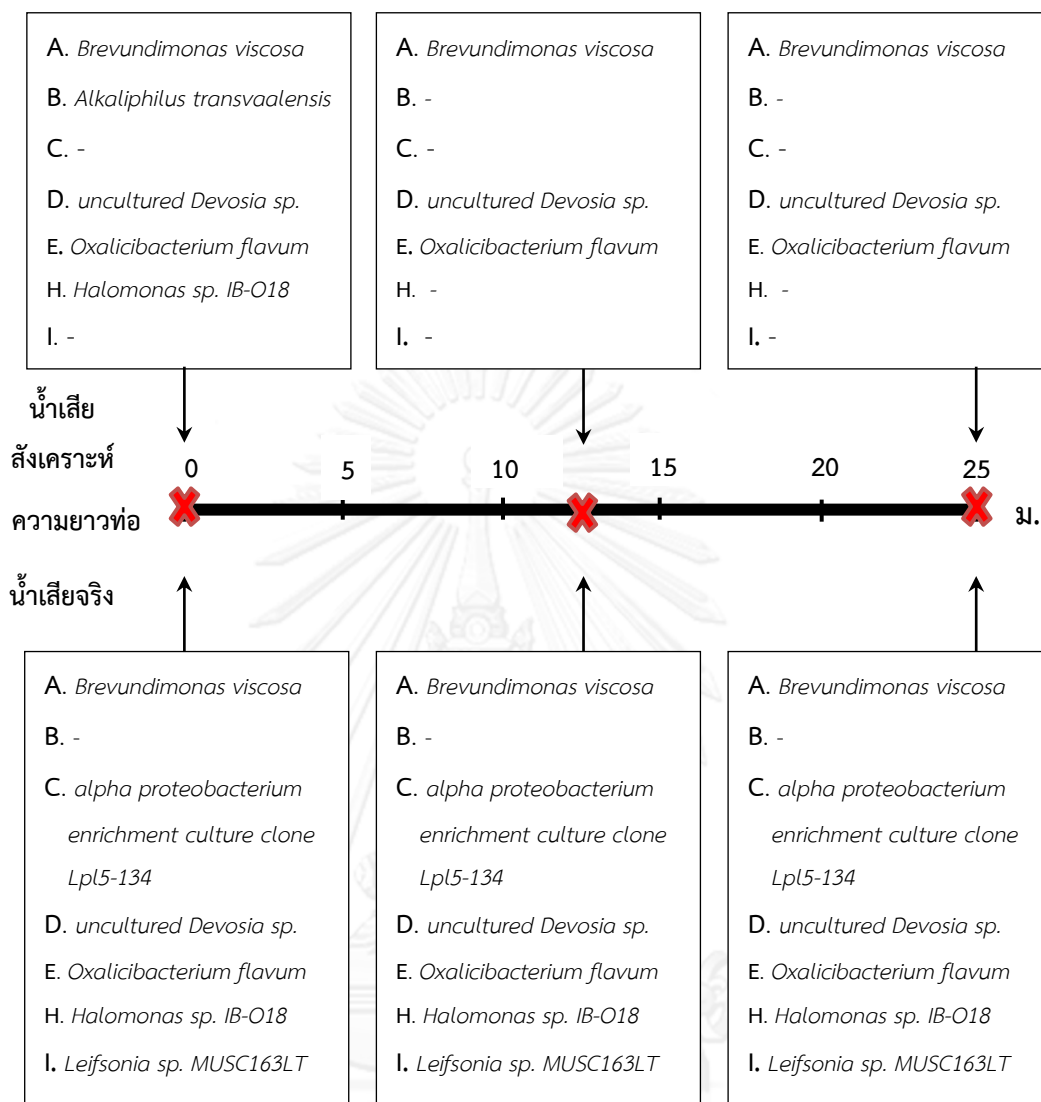
ตารางที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์ของจุลินทรีย์จากการทดลองกับฐานข้อมูลนิวคลีโอไทด์ของจุลินทรีย์ที่มีการเก็บรวบรวมไว้ใน Gen Bank

Band แถบ	Score คะแนน (bits)	Identities ความ เหมือน	Gaps ช่อง ว่าง	Accession Number รหัสประจำตัว	Source แหล่งที่มา	Organism สิ่งมีชีวิตที่มี ความใกล้เคียง	Reference อ้างอิงจาก
A	878 (475)	99% (488/494)	0% (1/494)	HM777012.2	<i>Brevundimonas viscosa</i>	Bacteria; Proteobacteria; Alphaproteobacteria; Caulobacterales; Caulobacteraceae; Brevundimonas	Wang และคณะ, 2012
B	145 (78)	83% (138/167)	1% (3/167)	NR_024748.1	<i>Alkaliphilus transvaalensis</i>	Bacteria; Firmicutes; Clostridia; Clostridiales; Clostridiaceae; Alkaliphilus.	Takai และคณะ, 2001
C	708 (383)	94% (442/470)	1% (6/470)	JX963083.1	<i>alpha proteobacterium enrichment culture clone Lpl5-134</i>	Bacteria; Proteobacteria; Alphaproteobacteria	Santl-Temkiv และคณะ, 2013
D	147 (79)	83% (135/162)	2% (4/162)	JQ700818.1	<i>uncultured Devosia sp.</i>	Bacteria; Proteobacteria; Alphaproteobacteria; Rhizobiales; Hyphomicrobiaceae; Devosia	Pajares และคณะ, 2013
E	307 (166)	83% (290/351)	0% (3/351)	NR_037133.1	<i>Oxalicibacterium flavum</i>	Bacteria; Proteobacteria; Betaproteobacteria; Burkholderiales; Oxalobacteraceae; Oxalicibacterium	Tamer และคณะ, 2002
F	-	-	-	-	ระบุชนิดไม่ได้เนื่องจากทำ พีซีอาร์หลังจากตัดเจลแล้ว ไม่พบแถบดีเอ็นเอ	-	-
G	-	-	-	-	ระบุชนิดไม่ได้เนื่องจากทำ พีซีอาร์หลังจากตัดเจลแล้ว ไม่พบแถบดีเอ็นเอ	-	-

ตารางที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์ของจุลินทรีย์จากการทดลองกับฐานข้อมูลนิวคลีโอไทด์ของจุลินทรีย์ที่มีการเก็บรวบรวมไว้ใน Gen Bank (ต่อ)

Band	Score	Identities	Gaps	Accession	Source	Organism	Reference
แถบ	คะแนน	ความ	ช่อง	Number	แหล่งที่มา	สิ่งมีชีวิตที่มี	อ้างอิงจาก
(bits)	เหมือน	ว่าง	รหัสประจำตัว			ความใกล้เคียง	
H	881 (477)	98% (494/502)	0% (2/502)	AM490136.1	<i>Halomonas sp. IB-O18</i>	Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria Oceanospirillales; Halomonadaceae; Halomonas.	Gilvanova และคณะ, อยู่ใน ระหว่าง ดำเนินการ ตีพิมพ์
I	920 (498)	99% (500/501)	0% (0/501)	KF682190.1	<i>Leifsonia sp.</i> <i>MUSC163LT</i>	Bacteria; Actinobacteria; Actinobacteridae; Actinomycetales; Micrococcineae; Microbacteriaceae; Leifsonia	Lee และคณะ, 2013

จากผลการเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์ดังกล่าวสามารถสรุปเป็นแผนภาพดังภาพที่ 4.23 โดยพบว่าชนิดของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลานิลมีความคล้ายคลึงกัน แต่ในน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลานิลจะมีความหลากหลายของชนิดจุลินทรีย์มากกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ และพบว่าชนิดของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพจะมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวท่อ นั่นคือ จุลินทรีย์ที่พบในช่วงต้นท่อเป็นจุลินทรีย์ชนิดที่สามารถเติบโตได้ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน ในขณะที่เมื่อความยาวท่อมากขึ้นจะพบจุลินทรีย์ในกลุ่ม Facultative anaerobes และเมื่อนำจุลินทรีย์กลุ่มเด่นมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้ดังตารางที่ 4.18 พบว่ากลุ่มจุลินทรีย์มีความคล้ายคลึงกับระบบยูเอเอสพีและระบบ Fluidized bed



ภาพที่ 4.23 แผนภาพสรุปชนิดของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพจากถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบ
 ท่อยาวบริเวณต้นท่อ (0 ม.) กลางท่อ (12.5 ม.) ปลายท่อ (25 ม.) ทั้งในน้ำเสีย
 สักเคราะห์และน้ำเสียจริงจากผลดีจีอีในหัวข้อที่ 4.4

ตารางที่ 4.18 เปรียบเทียบผลการศึกษาความหลากหลายของประชากรจุลินทรีย์กับงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้

สภาวะการศึกษา	เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์	แบคทีเรียชนิดเด่น	ที่มา
การศึกษาตะกอนจุลินทรีย์จากระบบยูเอเอสพีที่บำบัดน้ำเสียจากไวน์	PCR-DGGE	<i>Firmicutes</i> <i>Nitrospirae</i> <i>Deferribacteres</i>	Emiliano และคณะ (2006)
การศึกษาจุลินทรีย์ในถังปฏิกริยาแอมเบอร์นในสภาวะ Anoxic/anaerobic	PCR-DGGE	<i>Betaproteobacteria</i> <i>Actinobacteria</i>	Zubair และคณะ (2006)
การศึกษาความหนาแน่นของดีเอ็นเอในทรียาเออร์ในระบบ Fluidized bed reactor	PCR-DGGE	<i>Betaproteobacteria</i> <i>Alphaproteobacteria</i> <i>Gammaproteobacteria</i> (low G+C) <i>Grampositive bacteria</i>	Gentile และคณะ (2006)
กระบวนการดีเอ็นเอในทรียาเคชั่นในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จากระบบยูเอเอสพี	PCR-DGGE	<i>Proteobacteria</i> <i>Bacteroidates</i> <i>Choloroflexi</i> <i>Firmicutes</i> <i>Actinobacteria</i>	Nuria และคณะ (2007)
กระบวนการดีเอ็นเอในทรียาเคชั่นในถังปฏิกรณ์ดีเอ็นเอในทรียาเคชั่นแบบท่อยาว	PCR-DGGE	<i>Bacteroidates</i> <i>Desulfobullbus</i> sp. <i>Pseudomonas</i> sp.	สุธาสินี อ่วมจันทร์ (2546)
กระบวนการดีเอ็นเอในทรียาเคชั่นในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จากระบบยูเอเอสพี	PCR-DGGE	<i>Firmicutes</i> <i>Bacteroidates</i> <i>Thermomicrobia</i>	วลัยภรณ์ วุฒิเมธา (2551)
กระบวนการดีเอ็นเอในทรียาเคชั่นในถังปฏิกรณ์ดีเอ็นเอในทรียาเคชั่นแบบท่อยาว	PCR-DGGE	<i>Alphaproteobacteria</i> <i>Firmicutes</i> <i>Betaproteobacteria</i>	งานวิจัยนี้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลการเตรียมสภาพตัวกรองพลาสติก Digester box (DB) ในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว พบว่ากระบวนการดีไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์สามารถเกิดขึ้นได้ภายหลังการปรับสภาพประมาณ 1 เดือน โดยจะมีการลดลงของไนเตรตอีกทั้งยังไม่พบการสะสมของไนไตรต์เกิดขึ้น และภายหลังการปรับสภาพตัวกรองพลาสติก Digester box (DB) เป็นเวลา 62 วัน พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับร้อยละ 45

5.1.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนของเมทานอลที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนเตรตด้วยถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว โดยทำการแปรผันอัตราส่วนในรูปคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนในน้ำเสียเข้าระบบแตกต่างกัน 3 ระดับเท่ากับ 1:1 2:1 และ 5:1 ในสถานะที่เดินระบบต่อเนื่องที่อัตราการไหล 22 ล./ชม. และควบคุมให้มีระยะเวลาพักเก็บน้ำในระบบเท่ากับ 2 ชม. ด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากโซเดียมไนเตรตความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ปริมาตรน้ำ 493 ล. และเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อเร่งอัตราดีไนทริฟิเคชัน ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนจาก 1:1 เป็น 5:1 จะทำให้ค่าอัตราดีไนทริฟิเคชันเพิ่มขึ้นจาก $1,282.7 \pm 347.6$ มก.ไนโตรเจน/วัน เป็น $2,950.3 \pm 643.3$ มก.ไนโตรเจน/วัน โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนเตรตในการทดลองนี้ คือ 5:1 ทั้งนี้จากการทดลองพบว่าค่าศักยภาพออกซิเดชัน-รีดักชัน (โออาร์พี) ในช่วง 0 ถึง -300 มิลลิโวลต์ มีความที่เหมาะสมต่อการเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน

5.1.3 ผลการศึกษาระยะเวลากักเก็บน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว โดยทำการแปรผันระยะเวลากักเก็บน้ำจำนวน 3 ค่า ได้แก่ 2 ชม. 1.5 ชม. และ 1 ชม. เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรตไนโตรเจนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1 (C:N เท่ากับ 5:1) ด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากโซเดียมไนเตรตความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. พบว่าการเปลี่ยนแปลงระยะเวลากักเก็บน้ำ มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรต นั่นคือที่ระยะเวลากักเก็บน้ำ 2 ชม. ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตสูงถึงร้อยละ 50 ในขณะที่ระยะเวลากักเก็บน้ำที่ 1.5 ชม. และ 1 ชม. ประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรตต่ำกว่าร้อยละ 20 แสดงว่าการลดของระยะเวลากักเก็บ

น้ำ มีผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรดลดลง แต่ในทางปฏิบัติถ้าสามารถลดระยะเวลาเก็บน้ำเสียให้น้อยที่สุดได้จะทำให้สามารถบำบัดน้ำได้ปริมาณมากขึ้นหรือสามารถลดขนาดถังปฏิกรณ์ลงได้ อาจกล่าวได้ว่าสำหรับงานวิจัยนี้ระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนเตรดในถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาวคือ 2 ชม.

5.1.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาวเมื่อนำมาติดตั้งเข้ากับบ่อเพาะเลี้ยงปลาในความหนาแน่นสูงขนาด 4 ลบ.ม. ควบคู่กับถังตกตะกอนในสภาวะที่ใช้ระบบการเติมเมทานอลแบบอัตโนมัติ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนเตรดไนโตรเจนเท่ากับ 1:1 ที่ระยะเวลาเก็บน้ำ 2 ชม. และเติมเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 1.5 ภายหลังการเดินระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงปลาที่มีความหนาแน่นเริ่มต้น 17.03 กก.ต่อลบ.ม. เป็นเวลา 72 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดการทดลอง พบว่าถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาวมีความเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้กับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยสามารถควบคุมปริมาณสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรดให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยสำหรับการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำได้ นั่นคือสามารถบำบัดแอมโมเนียให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไนเตรดผ่านกระบวนการไนริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ โดยสามารถควบคุมให้แอมโมเนียและไนไตรต์มีความเข้มข้นต่ำกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. และสามารถบำบัดไนเตรดที่เกิดขึ้นต่อเนื่องด้วยกระบวนการดีไนริฟิเคชัน โดยสามารถควบคุมปริมาณไนเตรดให้มีความเข้มข้นต่ำกว่า 50 มก.ไนโตรเจน/ล.ได้ และในระหว่างการทดลองพบว่าค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (โออาร์พี) อยู่ในช่วง 0 ถึง -400 มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการเกิดกระบวนการดีไนริฟิเคชัน ทั้งนี้วันสุดท้ายของการทดลองผลผลิตปลานิลมีน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 746.1 ± 250.2 กรัมต่อตัว คิดเป็นความหนาแน่น 20.6 กก.ต่อลบ.ม. และมีอัตราการรอดร้อยละ 98.2

5.1.5 ผลการศึกษาความหลากหลายของประชากรจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาวด้วยเทคนิค PCR-DGGE พบว่าชนิดของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลามีความคล้ายคลึงกัน คือชนิดของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพจะมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวของท่อ นั่นคือ จุลินทรีย์ที่พบในช่วงต้นท่อเป็นจุลินทรีย์ชนิดที่สามารถเติบโตได้ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน ในขณะที่เมื่อความยาวของท่อมากขึ้นจะพบจุลินทรีย์ในกลุ่ม facultative anaerobes ทั้งนี้จุลินทรีย์กลุ่มเด่นที่พบ คือ *Alphaproteobacteria*, *Firmicutes* และ *Betaproteobacteria* ในขณะที่จุลินทรีย์กลุ่มย่อย คือ *Gammaproteobacteria* และ *Actinobacteria*

5.2 ข้อเสนอแนะ

การเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดด้วยการติดตั้งถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวเข้ากับถังเลี้ยงสัตว์น้ำ สามารถช่วยควบคุมความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ให้อยู่ในปริมาณที่ปลอดภัยต่อสัตว์น้ำได้ แต่อย่างไรก็ตามยังต้องมีการศึกษาและทำการพัฒนาต่อเนื่องเพิ่มเติมเพื่อให้ถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยนี้ ได้แก่

5.2.1 ทำการศึกษาการเติมแหล่งคาร์บอนชนิดอื่น เช่น เอทานอล หรือกากน้ำตาลเพิ่มเติม เพื่อทดแทนการใช้เมทานอล

5.2.2 ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาวเมื่อแปรเปลี่ยนรูปแบบของวัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางในระบบ เพื่อให้ได้ตัวกลางที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานกับสถานะของระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ทั้งนี้ควรเลือกวัสดุที่มีความทนทาน ดูแลรักษาง่าย มีพื้นที่ผิวมาก มีราคาไม่แพง และคงสภาพอยู่ในระบบได้นาน

5.2.3 ด้วยข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือวิจัย ในงานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้ค่าซีไอดีเป็นตัวบ่งชี้สารอินทรีย์และปริมาณเมทานอลที่คงเหลืออยู่ในน้ำ ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นการตรวจสอบในทางอ้อมและอาจได้ข้อมูลที่แตกต่างจากปริมาณเมทานอลที่คงเหลืออยู่จริง ดังนั้นหากสามารถตรวจวิเคราะห์ปริมาณเมทานอลที่เหลือน้อยกว่าอยู่ในน้ำในปริมาณต่ำได้ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography; GC) จะทำให้ข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

5.2.4 ควรมีการศึกษาค่าใช้จ่ายและความคุ้มค่าในการลงทุนก่อสร้างส่วนบำบัดของการทดลองส่วนที่ 3 เพื่อเป็นเกณฑ์ประกอบการตัดสินใจในการนำมาประยุกต์ใช้กับการเพาะเลี้ยงพ่อแม่พันธุ์ในการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ หรือพัฒนาให้รองรับกับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำความหนาแน่นที่สูงขึ้น

5.2.5 ควรมีการพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพของถังตกตะกอนให้เหมาะสมกับระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ เนื่องจากเมื่อเลี้ยงปลาเป็นเวลานานปริมาณตะกอนจะเกิดขึ้นมากและมีโอกาสที่ตะกอนบางส่วนจะเข้าไปอุดตันภายในท่อยาว ทำให้การไหลเวียนของน้ำไม่สะดวก จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดได้

5.2.6 ควรทำการศึกษาความหลากหลายของประชากรจุลินทรีย์โดยใช้พีซีอาร์ไพรเมอร์ ชนิดที่มีความจำเพาะสำหรับจุลินทรีย์กลุ่มดีไนทริฟายเออร์และทำการทดลองเพิ่มเติมด้วยเทคนิคทางโมเลกุลวิธีอื่นๆ เช่น Real time PCR, FISH เป็นต้น เนื่องจากการศึกษาจุลินทรีย์ด้วยเทคนิคพีซีอาร์-ดีจีจีอีเพียงอย่างเดียวยังไม่สามารถให้ข้อมูลที่ครบถ้วนได้ ทั้งนี้เนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มดีไนทริฟายเออร์มีความสำคัญมากในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด



รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เพ็ญพิชญา พินิจธนภาคย์. (2556). การพัฒนาถังปฏิกรณ์ร่วมไนทรีฟเคชัน-ดีไนทรีฟเคชันเพื่อบำบัดไนโตรเจนจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เอกชัย มาลาพล. (2551). การบำบัดไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร่นากลางแจ้งโดยตัวกรองชีวภาพไนทรีฟเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- โปรแกรมBLASTN. Retrieved มกราคม 12, 2557, from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov>
- กชพร กฤตยานันต์. (2554). การพัฒนาระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กสำหรับการเลี้ยงปลาน้ำจืด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กษิต หนูทอง. (2551). การบำบัดไนโตรเจนในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง, 16 (เมษายน), 11 - 22.
- ขั้นตอนโดยสรุปของการทำพีซีอาร์ดีจีจี. Retrieved มกราคม 15, 2557, from www.envirolagek.com
- คณิต ไชยาคำ. (2537). แนวทางการป้องกันเพื่อลดผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมจากการพัฒนาการเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนา. สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งสงขลา. กรมประมง. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์., 27.
- ศิริ กอนันตกุล, & จุฬ สันชัยพานิช. (2551). การเลี้ยงปลานิลในประัง. กรุงเทพมหานคร: สำนักพัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยีการประมง กรมประมง
- คู่มือการปฏิบัติทางการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ดีสำหรับการผลิตสัตว์น้ำ. Retrieved มีนาคม 1, 2557, from <http://www.fisheries.go.th/freshwater/web3>
- ชลธิชา พลายชุม. (2553). การบำบัดไนเตรตในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยถังดีไนทรีฟเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชลอ ลิ้มสุวรรณ, & พรเลิศ จันทรรักษ์กุล. (2547). อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งในประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- ทยากร สุวรรณรัตน์. (2552). การพัฒนาระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดความหนาแน่นสูงโดยผสมผสานตัวกรองชีวภาพไนทรีฟเคชันและดีไนทรีฟเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. (2544). การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ (Vol. พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

- ธัญญา พันธุ์ฤทธิ์ดำ. (2541). ระบบหมุนเวียนสัตว์น้ำแบบปิดที่มีระบบดีไนทริฟิเคชันสำหรับการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปกฉัตร ชูติวิสุทธิ. (2552). ประสิทธิภาพของระบบกรองแบบแบ่งส่วนในการแยกจุลินทรีย์และอนุภาคสารแขวนลอยเพื่อควบคุมคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปลานิล. Retrieved มกราคม 19, 2557, from www.oratix.com
- มันสิน ตัณกุลเวศม์. (2542). เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 2 (Vol. พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตัณกุลเวศม์, & ไพพรรณ พรประภา. (2539). การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- มานพ ตั้งตรงไพโรจน์, ภาณุ เทวรัตน์มณีกุล, พรรณศรี จริโมภาส, สุจินต์ หนูขวัญ, กำชัย ลาวัณยวุฒิ, วีระ วัชรกรโยธิน, & กมล จันทรโรทัย. (2536). การพัฒนาการเพาะเลี้ยงปลานิล. Paper presented at the เอกสารวิชาการฉบับที่ 23. สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด. กรมประมง. 96 หน้า.
- รุ่งนภา สุทธิศรี. (2549). ประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับการเลี้ยงกุ้งความหนาแน่นสูงในโรงเรือน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วลัยภรณ์ วุฒิเมธา. (2551). บทบาทของอัตราส่วนซีโอไลต์ต่อไนเตรตต่อความหลากหลายของประชากรจุลินทรีย์ในระบบยูเอเอสบี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิชัย ลาภจตุพร, & อรทัย เตี้ยวณิชย์. (2535). พีเอช. ฝ่ายวิชาการบริษัทแลปอินเตอร์ จำกัด.
- วิรัช จิวแฮมม. (2544). ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคุณภาพน้ำและการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Vol. พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิลาสินี ไตรยราช. (2546). สภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดไนเตรตในน้ำทะเลด้วยระบบบำบัดไนเตรตแบบท่อยาวสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วีรานุช หลาง. (2551). จุลชีววิทยาสิ่งแวดล้อม. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 166 หน้า.
- สุธาสินี อ่วมจันทร์. (2546). การเปลี่ยนแปลงของกลุ่มแบคทีเรียในตัวกรองชีวภาพแบบไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน สำหรับการเพาะเลี้ยงทางน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุวิมล ตันทสุกิจวนิช. (2545). ระบบบำบัดไนเตรตสำหรับระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อำไพเทพิน สิงหะพันธุ์. (2543). ระบบบำบัดไนเตรดเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ. วิทยาลัยการศึกษาศาสตร์สุขภาพ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อุดม เรืองนพคุณ. (2550). การเพาะพันธุ์และการเลี้ยงปลา (Vol. พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพมหานคร: อักษรสยามการพิมพ์.



ภาษาอังกฤษ

- Anthonisen, A. C., Loehr, R. C., Prakasam, T. B. S. and Srinath. E. G. (1976). Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid. *Journal Water Pollution Control Federation*, 48(5), 835 – 852.
- APHA, AWWA, & WPCF. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21st ed. Washington DC: American Public Health Association.
- Arbiv, A. a. V. R., J. (1995). Performance of treatment system for inorganic nitrogen removal in intensive aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 14, 189-203.
- Becker, A. G., Moraes, B. S., Menezes, C. C., Loro, V. L., Santos, D. R., Reichert, J. M. and Baldisserotto, B. (2009). Pesticide contamination of water alters the metabolism of juvenile silver catfish, *rhanda quelen*. *Ecotoxicology and Environmental safety*, 72, 1734-1739.
- Bitton, G. (1994). *Wastewater microbiology*. New York: John Wiley&Son, pp.51-61.
- 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.
- Camargo, J. A., & Alonso, A. (2007). Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. *Environment International*, 32, 831-849.
- 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.
- Chiu, Y. C., & Chung, M. S. (2003). Determination of optimal COD/nitrate ratio for biological denitrification. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 51, 43-49.
- Chuntapa, B., Powtongsook, S. and Mennasveta, P. (2002). Water quality control using *Spirulina platensis* in shrimp culture tanks. *Aquaculture*, 220, 355-366.
- Delwiche, C. C. (1981). *Denitrification nitrification and atmospheric nitrous oxide*. New York: . John Wiley&Son pp.286.
- Emiliano, E. D., Alfons, J. M., Stams, R. A. and Jose, L. S. (2006). Phenotypic properties and microbial diversity of methanogenic granules from a full-scale upflow anaerobic sludge bed reactor treating brewery wastewater. *Applied and Environmental Microbiology*, 72(7), 4942-4949.
- Eshchar, M., Lahav, O., Mozes, N., Peduel, A. and Ron, B. (2006). Intensive fish culture at high ammonium and low pH. *Aquaculture*, 255, 301-313.

- Fenchel, T., & Blackburn, T. H. (1979). *Bacteria and Mineral cycling*. London: Academic press.
- Flores, A. S. P., Gwon, E. M., Sim, D. M., Nisola, G., Galera, M. M., Chon, S. S., Chung, W. J., Pak, D. W. and Ahn, Z. S. (2006). Performance evaluation of pilot scale sulfur-oxidizing denitrification of treatment of metal plating wastewater. *Journal of Environmental Science and Health*, 41, 101-116.
- Francis, C. A., Beman, J. M. and Kuypers, M. M. M. (2007). New processes and players in the nitrogen cycle. *International Society for Microbial Ecology*, 1(1), 19-27.
- Gelfand, I., Barak, Y., Evan-Chen, Z., Cytryn, E., Van Rijn, J., Krom, M. D. and Neori, A. (2003). A novel zero discharge intensive seawater recirculating system for the culture of marine fish. *Journal of the World Aquaculture Society*, 34, 344-358.
- Gentile, M., Yan, T., Tiquia, S. M., Fields, M. W., Nyman, J., Zhou, J. and Criddle, C. S. (2006). Stability in a denitrifying fluidized bed reactor. *Microbial Ecology*, 52, 311-321.
- Gilvanova, E. A., Semenova, E. A. and Usanov, N. G. (Unpublished). Denitrifying nitrite-reducing bacterium isolated from mud of Buryatia's soda lake Orongoi.
- 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.
- Grasshoff, K., Kremling, K. and Ehrhaedt, M. (1999). *Methods of Seawater Analysis*. 3rd ed. Weinheim: Wiley - vch.
- 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., Dauw, L. and Verstraete, W. (2005). Elevated salinity selects for a less diverse ammonia-oxidizing population in aquarium biofilter. *FEMS Microbiology Ecology*, 52, 1-11.
- Gutierrez - Wing, M. T., & Malone, R. F. (2006). Biological filters in aquaculture: Trends and research directions for freshwater and marine applications. *Aquacultural Engineering*, 34, 163 - 171.
- Gutierrez - Wing, M. T., Malone, R. F. and Rusch, K. A. . (2012). Evaluation of polyhydroxybutyrate as a carbon source for recirculating aquaculture water denitrification. *Aquacultural Engineering*, 51, 36-43.
- Hagopian, D. S., & Riley, J. G. (1998). A closer look at the bacteriology of nitrification. *Aquacultural Engineering*, 18, 223-244.

- Hamlin, H. J., Michaels, J. T., Beaulaton, C. M., Graham, W. F., Steinbach, W.D.P., Losordo, T. M., Schrader, K. K. and Main, K. L. (2008). Comparing denitrification rates and carbon sources in commercial scale upflow denitrification biological filters in aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 38, 79-92.
- Hart, P., & O'sullivan, D. (1993). *Recirculation system: Design, construction and management*. Australia: Turtle Press Pty.
- Hegazi, M. M., & Hasanein, S. S. (2010). Effects of chronic exposure to ammonia concentrations on brain monoamines and ATPases of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Comparative Biochemistry and Physiology, Part C*, 151, 420 - 425.
- Hellinga, C., Schellen, A.A.J.C., Mulder, J.W., Van Loosdrecht, M.C.M. and Heijnen, J.J. (1998). The SHARON process: a innovation method for nitrogen removal from ammonia-rich wastewater. *Water Science Technology*, 37, 135-142.
- Honda, H., Watanabe, Y., Kikuchi, K., Iwata, N., Takeda, S., Uemoto, H., Furuta, T. and Kiyono, M. (1993). High density rearing of Japanese flounder. *Paralichthys olivaceus* with a closed seawater recirculation system equipped with a denitrification unit. *Suisanzoshoku*, 41, 52-65.
- Jian, H. Q., Hong, L. Y., En, T. W., Cui, L. and Huai, Z. H. (2008). Bacterial diversity in sediments of the eutrophic guanting reservoir, china, estimated by analyses of 16S rDNA sequence. *Biodiversity and Conservation*, 17, 1667-1683.
- 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 phychrophilic denitrifier using soluble starch as a carbon source. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 93, 303-308.
- Lee, L. H., Zainal, N., Azman, A. S. and Chan, K. G. (Unpublished). Phylogenetic diversity and antimicrobial properties of Actinobacteria in mangrove environment in Malaysia.
- Lee, P. G., Lea, R.N., Dohmann, E., Prebilssky, W., Turk, P.E., Ying, J.L. and Whitson, J.L. (2000). Denitrification in aquaculture system: an example of a fuzzy logic control problem. *Aquacultural Engineering*, 23, 37-59.

- Li, B., & 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.
- Marina, M., Jean, P. D. and Jean, J. G. (2007). Differences in the aerosolization behavior of microorganisms as revealed through their transport by biogas. *Science of the Total Environment*, 379, 75-88.
- Menesveta, P., Panritdam, T., Sihanonth, P., Powtongsook, S., Chuntapa, B. and Lee., P. (2001). Design and function of a closed, recirculating seawater system with denitrification for the culture of black tiger shrimp broodstock. *Aquacultural Engineering*, 25, 35-49.
- 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.
- Nuria, F., Reyes, S. A., James, A. F., Ricardo, A. and Jose, L. S. (2007). Microbial community dynamics in a chemolithotrophic denitrification reactor inoculated with methanogenic granular sludge. *Chemosphere*, 70, 462-474.
- Pajares, S., Eguiarte, L. E., Bonilla-Rosso, G. and Souza, V. (2013). Drastic changes in aquatic bacterial populations from the Cuatro Ciénegas Basin (Mexico) in response to long-term environmental stress. *Antonie van Leeuwenhoek*, 104, 1159–1175.
- Park, E. J., Seo, J. K., Kim, M. R., Jung, H., Kim, J. K. and Kim, S. K. (2001). Salinity acclimation of immobilized freshwater denitrifiers. *Aquacultural Engineering*, 24, 169-180.
- Rezaee, A., Godini, H., Dehestani, S., Yazdanbakhsh, A. R., Mosavi, G. and Kazemnejad, A. (2008). Biological denitrification by pseudomonas stutzeri immobilized on microbial cellulose. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 24, 2397 – 2402.
- Rivett, M. O., Buss, S. R., Morgan, P., Smith, J. W. N. and Bemment, C. D. (2008). Nitrate attenuation in groundwater: A review of biogeochemical controlling processes. *WATER RESEARCH*, 42, 4215 - 4232.
- 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.
- Santl-Temkiv, T., Finster, K., Hansen, B. M., Pasic, L. and Karlson, U. G. (2013). Viable methanotrophic bacteria enriched from air and rain can oxidize methane at cloud-like conditions. *Aerobiologia*, 29, 373–384.

- 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.
- Schmidt, I., Sliemers, O., Schmidt, M., Bock, E., Fuerst, J., Kuenen, J.G., Jetten, M.S.M. and Strous, M. (2003). New concepts of microbial treatment process for the nitrogen removal in wastewater. *FEMS Microbiology Reviews*, 27, 481-492.
- 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.
- Spotte, S. (1979). *Seawater Aquariums: The Captive Environment*: 2nd ed. New York: Wiley.
- Strickland, J. D. H., & Parsons, T. R. (1972). *A Practical Handbook of Seawater Analysis*: 2nd ed. Ottawa: Fisheries research board of Canada.
- Sun, Y., Xing, W., Li, J. P., Lu, Y. Q. and Zuo, J. E. (2009). Microbial community in granules from a high-rate EGSB reactor. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 45, 659-663.
- Suzuki, K., Koyanagi, M. and Yamashita, H. (2004). Genetic characterization and specific detection of beer-spoilage *Lactobacillus* sp. LA2 and related strains. *Journal Apply Microbiol*, 96, 677-683.
- 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.
- Tamer, A. U., Aragno, M. and Sahin, N. (2002). Isolation and characterization of a new type of aerobic, oxalic acid utilizing bacteria, and proposal of *Oxalicibacterium flavum* gen. nov., sp. Nov. *Systematic and Applied Microbiology*, 25, 513-519.
- Temmerman, R., UGent, G. H. and UGent, J. S. (2004). Identification of lactic acid bacteria: culture-dependent and culture-independent methods. *TRENDS IN FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY*, 15(7-8), 348-359.
- Timmons, M. B., Ebeling, J. M., Wheaton, F. W., Summerfelt, S. T. and Vinci, B. J. (2002). *Recirculating aquaculture systems*: 2nd ed. Ithaca. New York: Cayuga Aqua Ventures.

- Van Rijn, J., Tal, Y. and Schreier, H. J. (2006). Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. *Aquacultural Engineering*, 34, 364 - 376.
- Warneke, S., Schipper, L. A., Bruesewitz, D. A., McDonald, L. and Cameron, S. (2011). Rates controls and potential adverse effects of nitrate removal in a denitrification bed. *Ecological Engineering*, 37, 511-522.
- Xia, Y., Kong, Y. and Nielsen, P. H. (2007). In situ detection of protein-hydrolyzing microorganisms in activated sludge. *FEMS Microbiology Ecology*, 60, 156-165.
- Xiao, Y., Zeng, G. M., Yang, Z. H., Liu, Y. S., Ma, Y. H., Yang, L., Wang, R. J. and Xu, Z. Y. (2009). Coexistence of nitrifiers, denitrifiers and anammox bacteria in a sequencing batch biofilm reactor as revealed by PCR-DGGE. *Journal of Applied Microbiology*, 106, 496-505.
- Zubair, A., Byung, R. L., Jinwoo, C. and Kyu, H. A. (2006). Effects of the internal recycling rate on biological nutrient removal and microbial community structure in a sequential anoxic/anaerobic membrane bioreactor. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 30, 61-69.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ก.1 วิธีวิเคราะห์แอมโมเนีย (วิธีที่ 1)

การวิเคราะห์แอมโมเนียในน้ำ วิธีที่ 1 ใช้วิธีวิเคราะห์แอมโมเนียซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงมาจาก Strickland and Parsons (1972) โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 60 มล. จากนั้นทำการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C และเก็บใส่ขวดพลาสติก ควรทำการวิเคราะห์ทันทีหลังเก็บตัวอย่างน้ำ แต่ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรนำตัวอย่างน้ำแช่แข็งไว้ที่อุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส

- การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายฟีนอล (Phenol solution) เตรียมโดยละลายฟีนอล 20 ก. ใน 95 เปอร์เซ็นต์เอทิลแอลกอฮอล์ และปรับปริมาตรเป็น 200 มล.)

2. สารละลายโซเดียมไนโตรพรัสไซด์ (Sodium nitroprusside solution) เตรียมโดยละลายโซเดียมไนโตรพรัสไซด์ ($\text{Na}_2[\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 1 ก. ในน้ำ D.I. และปรับปริมาตรเป็น 200 มล.

3. อัลคาไลน์รีเอเจนต์ (Alkaline reagent) เตรียมโดยละลายโซเดียมซเตรต 100 ก. กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 ก. ในน้ำ D.I. และปรับปริมาตรเป็น 500 มล.

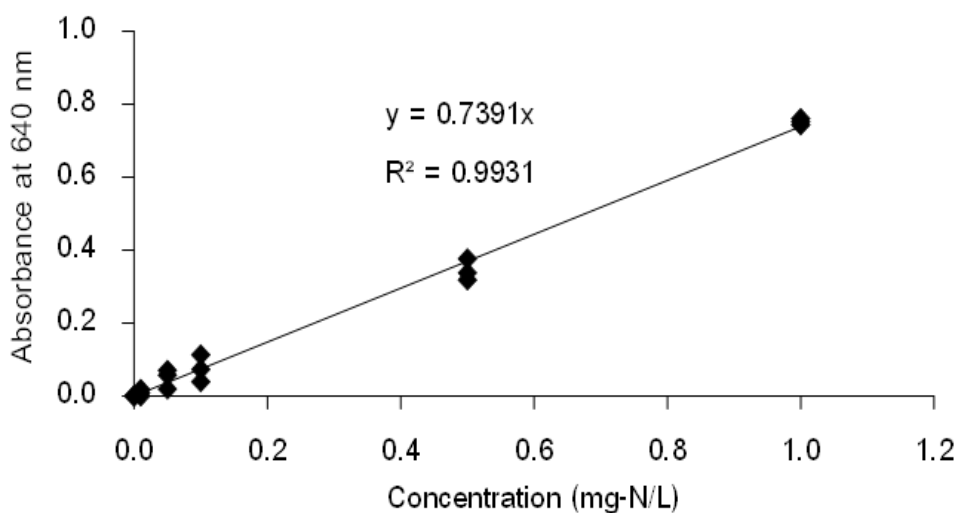
4. สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodium hypochlorite solution) ใช้สารละลายไฮโปคลอไรต์ทางการค้าซึ่งมีความเข้มข้น 1.5 นอร์มอล

5. สารละลายออกซิไดซ์ซิงค์ (Oxidizing reagent) เตรียมโดยการผสมอัลคาไลน์รีเอเจนต์กับสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ในอัตราส่วน 4 ต่อ 1

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

ปิเปตตัวอย่างน้ำปริมาตร 5 มล. ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมสารละลายฟีนอลปริมาตร 0.2 มล. เติมสารละลายโซเดียมไนโตรพรัสไซด์ปริมาตร 0.2 มล. และเติมสารละลายออกซิไดซ์ซิงค์ปริมาตร 0.5 มล. จากนั้นเขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 1 ชม. หลังจากสารเคมีและตัวอย่างน้ำทำปฏิกิริยากันแล้วสีของสารละลายที่เกิดขึ้นจะคงอยู่ภายใน 24 ชม. สำหรับแบลнк (Blank) ใช้น้ำ D.I. ที่มีการใส่สารเคมีเหมือนกับตัวอย่างน้ำ จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืน

แสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร และทำการเตรียมสารละลายแอมโมเนียมาตรฐาน (Standard ammonia solution) ที่ความเข้มข้น 0.01 0.05 0.1 0.5 และ 1.0 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากสารละลายสต็อกแอมโมเนีย (Stock ammonia solution) ความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้กราฟมาตรฐานแสดงดังภาพที่ ก-1



ภาพที่ ก-1 กราฟมาตรฐานแอมโมเนีย

ก.2 วิธีวิเคราะห์แอมโมเนีย (วิธีที่ 2)

การวิเคราะห์แอมโมเนียในน้ำ วิธีที่ 2 ใช้วิธีวิเคราะห์แอมโมเนียซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีของ Bower และ Holm - Hansen (1980) โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 60 มล. จากนั้นทำการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C และเก็บใส่ขวดพลาสติก ควรทำการวิเคราะห์ทันทีหลังเก็บตัวอย่างน้ำ แต่ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรนำตัวอย่างน้ำแช่แข็งไว้ที่อุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส

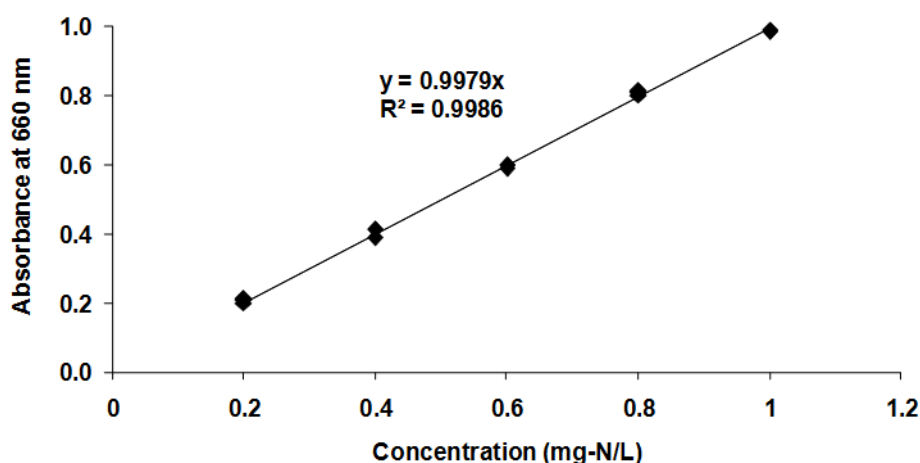
- การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายซาลิไซเลตคตะลิสต์ (Salicylate – catalyst solution) เตรียมโดยละลายโซเดียมซาลิไซเลต 440 ก. กับโซเดียมไนโตรพลัสไซด์ 0.28 ก. ในน้ำ D.I. และปรับปริมาตรเป็น 1 ล.
2. สารละลายอัลคาไลน์ซิเตรต (Alkaline – citrate solution) เตรียมโดยละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18.5 ก. กับโซเดียมซิเตรต 100 ก. ในน้ำ D.I. และปรับปริมาตรเป็น 1 ล.
3. สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรด์ (Sodium hypochlorite solution) ใช้สารละลายไฮโปคลอไรด์ทางการค้าซึ่งมีความเข้มข้น 1.5 นอร์มอล

4. สารละลายอัลคาไลน์ไฮโปคลอไรต์ (Alkaline - hypochlorite solution) เตรียมโดยการผสมสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์กับสารละลายอัลคาไลน์ซีเทรต ในอัตราส่วน 1 ต่อ 9

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

ปิเปตตัวอย่างน้ำปริมาตร 250 ไมโครลิตร ใส่ลงในไมโครเพลท เติมสารละลายซาลิไซเลตคัตเชลิสต์ (โซเดียมซาลิไซเลต 440 ก. กับโซเดียมไนโตรพลัสไซด์ 0.28 ก. ในน้ำ D.I. 1 ล.) ปริมาตร 30 ไมโครลิตร และเติมสารละลายอัลคาไลน์ไฮโปคลอไรต์ (สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์กับสารละลายอัลคาไลน์ซีเทรต ในอัตราส่วน 1 ต่อ 9 โดยที่สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ใช้สารละลายไฮโปคลอไรต์ทางการค้าซึ่งมีความเข้มข้น 1.5 นอร์มอล ส่วนสารละลายอัลคาไลน์ซีเทรตเตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18.5 ก. กับโซเดียมซีเทรต 100 ก. ในน้ำ D.I. 1 ล.) ปริมาตร 50 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันและนำไปเก็บไว้ในที่มืด โดยตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 1 ชม. แต่ไม่เกิน 3 ชม. สำหรับแบลงค์ (Blank) ใช้ น้ำ D.I. ที่เติมสารเคมีเหมือนกับตัวอย่างน้ำ จากนั้นนำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร ทำการเตรียมสารละลายแอมโมเนียมาตรฐาน (Standard ammonia solution) ที่ความเข้มข้น 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มก.ไนโตรเจน/ล. จากสารละลายสต็อกแอมโมเนียความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้กราฟมาตรฐานแสดงดังภาพที่ ก-2



ภาพที่ ก-2 กราฟมาตรฐานแอมโมเนีย

ก.3 วิธีวิเคราะห์ไนไตรต์

การวิเคราะห์ไนไตรต์ในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์ไนไตรต์ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงมาจาก Strickland and Parsons (1972) โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 60 มล. จากนั้นทำการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C และเก็บใส่ขวดพลาสติก ควรทำการวิเคราะห์ทันทีหลังเก็บตัวอย่างน้ำ แต่ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรนำตัวอย่างน้ำแช่แข็งไว้ที่อุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส

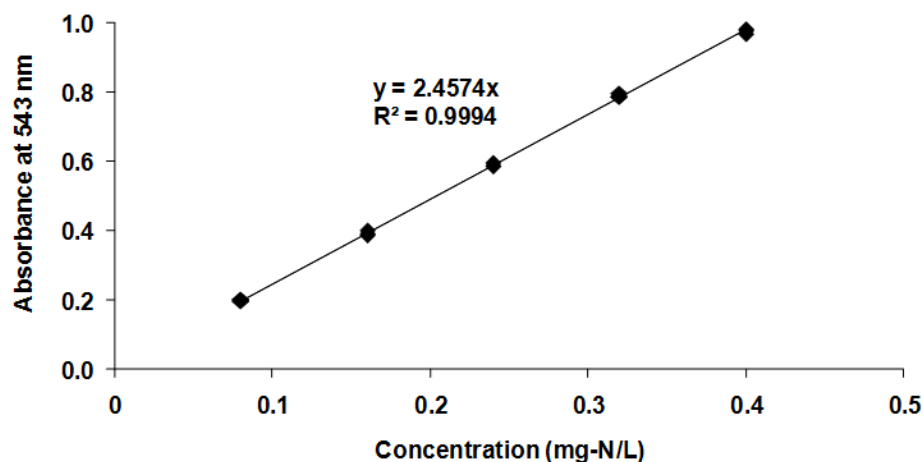
- การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายซัลฟานิลาไมด์ (Sulfanilamide solution) เตรียมโดยละลายซัลฟานิลาไมด์ 5 ก. ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 50 มล. และปรับปริมาตรด้วยน้ำ D.I. เป็น 500 มล.

2. สารละลายเอ็นเอ็นอีดี (Naphthylethylenediamine solution) เตรียมโดยละลาย N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride 0.5 ก. ในน้ำ D.I. และปรับปริมาตรเป็น 500 มล.

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

ปิเปตตัวอย่างน้ำปริมาตร 250 ไมโครลิตร ใส่ลงในไมโครเพลท ทำการเติมสารละลายซัลฟานิลาไมด์ ปริมาตร 5 ไมโครลิตร (ซัลฟานิลาไมด์ 5 ก. และกรดไฮโดรคลอริก 50 มล. ในน้ำ D.I. 500 มล.) ผสมให้เข้ากันและทิ้งไว้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา 2 นาที แต่ไม่เกิน 10 นาที จากนั้นเติมสารละลายเอ็นเอ็นอีดี (N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochlorine 0.5 ก. ในน้ำ D.I. 500 มล.) ปริมาตร 5 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที แต่ไม่เกิน 2 ชม. ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับแบล็ค (Blank) ใช้น้ำ D.I. ที่เติมสารเคมีเหมือนกับตัวอย่างน้ำ จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 543 นาโนเมตร ทำการเตรียมสารละลายไนไตรต์มาตรฐาน (standard nitrite solution) ที่ความเข้มข้น 0.08 0.16 0.24 0.32 และ 0.40 มก.ไนโตรเจน/ล. จากสารละลายสต็อกไนไตรต์ความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้กราฟมาตรฐานแสดงดังภาพที่ ก-3



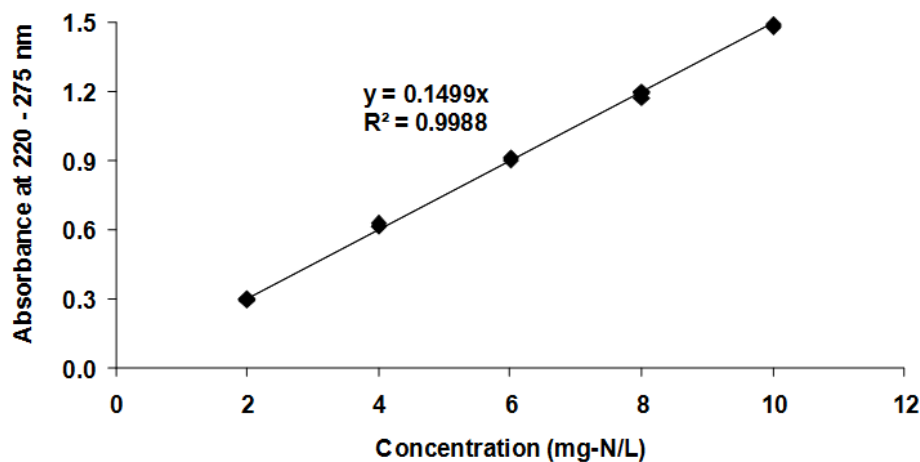
ภาพที่ ก-3 กราฟมาตรฐานไนไตรต์

ก.4 วิธีวิเคราะห์ไนเตรต

การวิเคราะห์ไนเตรตในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์ไนเตรตด้วยวิธีวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงมาจาก Standard Method (2005) โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 30 มล. จากนั้นทำการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C และเก็บใส่ขวดพลาสติก ควรทำการวิเคราะห์ทันทีหลังเก็บตัวอย่างน้ำ แต่ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรนำตัวอย่างน้ำแช่แข็งไว้ที่อุณหภูมิ -15 องศาเซลเซียส

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรตในน้ำด้วยวิธีนี้ ทำได้โดยปิเปตตัวอย่างน้ำปริมาตร 250 ไมโครลิตร ใส่ลงในไมโครเพลท แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 220 และ 275 นาโนเมตร สำหรับแบลнк (Blank) ใช้น้ำ D.I. โดยผลต่างที่ได้จากการวัดทั้งสองความยาวคลื่นจะนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณไนเตรต แต่ค่าไนเตรตที่คำนวณได้ต้องนำไปลบด้วยปริมาณไนไตรต์ที่วิเคราะห์จากตัวอย่างน้ำเดียวกัน เนื่องจากการวิเคราะห์ไนเตรตด้วยวิธีนี้จะมีปริมาณไนไตรต์รวมอยู่ด้วย ทำการเตรียมสารละลายไนเตรตมาตรฐานที่ความเข้มข้น 2 4 6 8 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล. จากสารละลายสต็อกไนเตรตความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้กราฟมาตรฐานแสดงดังภาพที่ ก-4



ภาพที่ ก-4 กราฟมาตรฐานไนเตรต

ก.5 วิธีวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมด

การวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำซึ่งดัดแปลงมาจาก Grasshoff และคณะ (1999)

- การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายออกซิไดซ์ (Oxidize solution) เตรียมโดยละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ($K_2S_2O_8$) 5 ก. และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.75 ก. และกรดบอริก 6 ก. ในน้ำ D.I. จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 250 มล.

2. สารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ (Borate buffer) เตรียมโดยละลายกรดบอริก 15.45 ก. และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 ก. ในน้ำ D.I. และปรับปริมาตรเป็น 250 มล.

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

ปิเปตตัวอย่างน้ำ (ทั้งที่กรองและไม่ได้กรอง) ปริมาตร 5 มล. ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมสารละลายออกซิไดซ์ปริมาตร 2.5 มล. เขย่าให้เข้ากัน และนำตัวอย่างไปย่อยด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) (121 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 15 ปอนด์/ตร.นิ้ว) เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วเติมสารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ปริมาตร 0.5 มล. เขย่าให้เข้ากันและนำไปปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) 15 นาที และนำส่วนที่เป็นน้ำใสไปวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรตด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ด้วยวิธีการเดียวกับในภาคผนวกหัวข้อ ก.4 ซึ่งตัวอย่างน้ำที่ไม่กรองจะเป็น

ตัวแทนของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและตัวอย่างน้ำที่กรองจะเป็นตัวแทนของปริมาณไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมดสำหรับแบลงค์ (Blank) ใช้ น้ำ D.I. และสารละลายไนเตรดมาตรฐาน (Standard nitrite solution) เตรียมที่ความเข้มข้น 2 4 6 8 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากสารละลายสต็อกไนเตรด (Stock nitrate solution) ความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ทำการเติมสารเคมีและทำการวิเคราะห์ตามขั้นตอนเหมือนกับตัวอย่างน้ำ

ก.6 วิธีวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ

การวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงมาจาก Standard Method (2005) โดยนำกระดาศกรอง GF/C ขนาด 47 มม. มาอบและชั่งน้ำหนักจนคงที่ จากนั้นนำตัวอย่างน้ำมากรองผ่านกระดาศกรองแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชม. นำกระดาศกรองออกจากตู้อบและนำมาใส่ไว้ในโถดูดความชื้นจนกระดาศกรองเย็นลงแล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่งจนน้ำหนักคงที่ เพื่อนำน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมาคำนวณหาปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ตะกอนแขวนลอยทั้งหมด} = \frac{(\text{นน.กระดาศกรองหลังกรอง} - \text{นน.กระดาศกรองก่อนกรอง}) \times 10^6}{(\text{ปริมาตรน้ำที่กรอง (มล.)})}$$

ก.7 วิธีวิเคราะห์ซีโอดี

การวิเคราะห์ซีโอดีในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงมาจาก Standard Method (2005) โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 30 มล. ควรทำการวิเคราะห์ทันที ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc. H_2SO_4) แล้วนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

- การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต (Standard Potassium Dichromate Solution) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล เตรียมโดยละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 4.913 ก. (ซึ่งถูกทำให้แห้งด้วยการอบ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชม.) ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มล. เติมกรดซัลฟิวริก 167 มล. และเติมเมอร์คิวริกซัลเฟต ($HgSO_4$) 33.3 ก. คนให้ละลายและตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วจึงทำการปรับปริมาตรให้เป็น 1 ล.

2. กรดซัลฟิวริกและซิลเวอร์ซัลเฟต (Conc. Sulfuric acid with Silver sulfate) เตรียมโดยละลายซิลเวอร์ซัลเฟต 22 ก. ลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2.5 ล. ตั้งทิ้งไว้ 1 - 2 วัน เพื่อให้ซิลเวอร์ซัลเฟตละลายหมด

3. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous Ammonim Sulfate; FAS) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล เตรียมโดยละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต $[Fe (NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O]$ 39 ก. ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มล. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มล. คนให้ละลายและทิ้งให้เย็น แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 1 ล. เนื่องจากสารละลายนี้ความเข้มข้นลดลงทุกวันจึงจำเป็นต้องหาความเข้มข้นที่แน่นอนทุกวันที่ใช้ ซึ่งสามารถทำได้ดังนี้ ตวงน้ำกลั่น 50 มล. ลงในขวดชมพูขนาด 250 มล. ปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 0.1 นอร์มัล 5 มล. แล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 15 มล. เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งให้เย็น แล้วนำมาไทเทรตกับ FAS โดยใช้เฟอโรอิน 2 - 3 หยดเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง

$$\text{ความเข้มข้นของ FAS} = \frac{(\text{มล. } K_2Cr_2O_7 \times 0.1)}{(\text{มล. FAS ที่ใช้})}$$

4. สารละลายเฟอโรอิน อินดิเคเตอร์ (Ferriin Indicator) เตรียมโดยละลาย 1,10 - Phenanthroline Monohydrate ($C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$) 1.485 ก. และ Ferrous Sulfate ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) 0.695 ก. ในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 100 มล.

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

ปิเปตตัวอย่างน้ำ 5 มล. ลงในหลอดย่อยสลาย (Digestion Tubes) ขนาด 20 x 150 มม. เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตปริมาตร 3 มล. เติมกรดซัลฟิวริกและซิลเวอร์ซัลเฟต 7 มล. ปิดฝาหลอดย่อยสลายให้แน่นพอดี แกว่งหลอดเพื่อให้สารละลายผสมเข้ากันอย่างทั่วถึง นำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็น ทำการเปิดฝาหลอดและเติมเฟอโรอิน 2 - 3 หยด แล้วนำไปไทเทรตด้วย 0.1 นอร์มอลเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต จุดยุติจะเปลี่ยนอย่างรวดเร็วจากสีฟ้าอมเขียวเป็นน้ำตาลแดง สำหรับแปลงค่าน้ำกลั่นแทนตัวอย่างน้ำและทำทุกขั้นตอนเหมือนตัวอย่างน้ำ จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณหาปริมาณซีโอดีด้วยสมการต่อไปนี้

$$\text{ซีโอดี (มก./ล.)} = \frac{[(A-B) \times N \times 8,000]}{(\text{มล. FAS ที่ใช้})}$$

เมื่อ A = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตแปลงค์ (มล.)

B = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำ (มล.)

N = นอร์มัลลิตีของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต

ภาคผนวก ข

ข้อมูลคุณภาพน้ำที่ทำการตรวจวัดในการทดลองช่วงที่ 1 การเตรียมสภาพตัวกรองชีวภาพ
ดีไนทริฟิเคชันและติดตั้งถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว

ตารางที่ ข-1 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนโตรต์ และไนเตรตในระหว่างการเตรียมสภาพตัวกรอง
ชีวภาพดีไนทริฟิเคชันและติดตั้งถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว (ก่อนเข้าท่อยาว)

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนโตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
12/3/2012 14:45 น.	0.00	0.006	0.003	0.005	0.000	92.814	1.740
13/3/2012 16:30 น.	1.07	0.007	0.006	0.004	0.000	92.773	1.474
14/3/2012 13:30 น.	1.95	0.014	0.005	0.013	0.001	89.747	1.311
15/3/2012 17:30 น.	3.11	0.024	0.009	0.029	0.001	91.005	4.673
16/3/2012 15:15 น.	4.02	0.025	0.004	0.034	0.001	92.169	2.176
17/3/2012 13:30 น.	4.95	0.008	0.002	0.041	0.001	92.863	0.934
19/3/2012 15:15 น.	7.02	0.013	0.010	0.052	0.001	94.807	0.908
21/3/2012 13:55 น.	8.97	0.012	0.011	0.078	0.011	88.789	0.924
23/3/2012 13:20 น.	10.94	0.009	0.008	0.108	0.021	88.505	0.438
29/3/2012 18:00 น.	17.14	0.044	0.003	0.783	0.028	88.415	0.343
30/3/2012 12:30 น.	17.91	0.048	0.016	0.998	0.029	84.507	0.306
2/4/2012 13:15 น.	20.94	0.035	0.014	1.365	0.027	85.226	1.560
3/4/2012 13:00 น.	21.93	0.040	0.009	1.570	0.004	93.481	0.961
4/4/2012 13:00 น.	22.93	0.028	0.001	1.913	0.137	94.284	0.772
5/4/2012 13:30 น.	23.95	0.054	0.021	1.968	0.072	86.852	0.755
6/4/2012 12:30 น.	24.91	0.053	0.019	2.552	0.175	90.736	3.647
9/4/2012 12:45 น.	27.92	0.000	0.000	0.000	0.000	83.395	0.482
10/4/2012 13:00 น.	28.93	0.008	0.006	7.977	0.284	79.545	1.712
12/4/2012 11:05 น.	30.85	0.059	0.001	9.500	0.609	75.917	0.360
13/4/2012 11:30 น.	31.86	0.049	0.011	12.093	0.323	74.164	1.504
14/4/2012 12:30 น.	32.91	0.046	0.009	12.291	0.337	70.659	1.293
17/4/2012 15:20 น.	36.02	0.088	0.004	14.511	1.210	56.648	2.138
18/4/2012 13:30 น.	36.95	0.059	0.022	20.804	1.128	51.114	3.238
19/4/2012 13:45 น.	37.96	0.064	0.005	23.870	0.474	52.687	0.530
20/4/2012 14:20 น.	38.98	0.071	0.007	24.550	0.135	48.526	0.156
21/4/2012 12:30 น.	39.91	0.068	0.012	26.458	1.247	46.313	1.428
23/4/2012 14:00 น.	41.97	0.000	0.000	24.534	0.997	44.530	1.020
24/4/2012 12:00 น.	42.89	0.056	0.010	25.904	0.289	40.851	0.912

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
25/4/2012 13:00 น.	43.93	0.044	0.008	25.285	0.432	36.195	0.788
26/4/2012 12:20 น.	44.90	0.050	0.016	25.451	0.748	35.139	0.759
27/4/2012 14:20 น.	45.98	0.059	0.012	28.415	0.447	31.415	0.733
28/4/2012 12:30 น.	46.91	0.062	0.007	28.710	0.388	27.268	0.527
29/4/2012 18:30 น.	48.16	0.109	0.005	27.411	0.677	27.209	2.355
30/4/2012 18:00 น.	49.14	0.061	0.009	26.538	0.211	25.410	2.089
1/5/2012 12:00 น.	49.89	0.052	0.007	25.130	0.880	20.695	1.575
2/5/2012 13:00 น.	50.93	0.041	0.012	24.573	1.114	17.823	1.352
3/5/2012 12:00 น.	51.89	0.038	0.009	22.532	1.687	16.081	2.501
4/5/2012 13:30 น.	52.95	0.042	0.008	20.231	0.185	12.466	0.535
5/5/2012 12:15 น.	53.90	0.056	0.012	19.383	1.221	8.262	1.670
7/5/2012 13:00 น.	55.93	0.000	0.000	0.000	0.000	7.593	0.408
8/5/2012 12:30 น.	56.91	0.035	0.005	9.973	0.497	4.339	0.377
9/5/2012 14:00 น.	57.97	0.039	0.005	6.324	0.226	4.220	0.144
10/5/2012 14:35 น.	58.99	0.062	0.008	3.967	0.138	2.830	0.149
11/5/2012 13:00 น.	59.93	0.065	0.013	2.310	0.096	1.481	0.180
12/5/2012 13:00 น.	60.93	0.060	0.003	1.112	0.030	1.981	0.465
14/5/2012 14:15 น.	62.98	0.000	0.000	0.680	0.011	1.673	0.295

ตารางที่ ข-2 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตในระหว่างการเตรียมสภาพตัวกรองชีวภาพดีไนทริฟิเคชันและติดตั้งถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว (ออกจากท่อยาว)

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
12/3/2012 14:45 น.	0.00	0.033	0.007	0.003	0.000	91.435	1.078
13/3/2012 16:30 น.	1.07	0.010	0.008	0.016	0.001	93.675	0.690
14/3/2012 13:30 น.	1.95	0.015	0.013	0.033	0.001	93.593	1.500
15/3/2012 17:30 น.	3.11	0.008	0.007	0.042	0.001	95.369	0.607
16/3/2012 15:15 น.	4.02	0.027	0.006	0.049	0.001	93.556	0.204
17/3/2012 13:30 น.	4.95	0.023	0.008	0.065	0.006	96.452	0.540
19/3/2012 15:15 น.	7.02	0.044	0.003	0.067	0.003	90.451	1.409
21/3/2012 13:55 น.	8.97	0.041	0.004	0.100	0.003	89.937	2.991
23/3/2012 13:20 น.	10.94	0.041	0.006	0.120	0.000	88.237	1.991
29/3/2012 18:00 น.	17.14	0.036	0.020	1.055	0.061	88.711	0.403

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
30/3/2012 12:30 น.	17.91	0.058	0.007	1.221	0.046	86.708	0.829
2/4/2012 13:15 น.	20.94	0.031	0.016	2.045	0.076	92.548	0.626
3/4/2012 13:00 น.	21.93	0.040	0.014	2.256	0.052	89.451	1.188
4/4/2012 13:00 น.	22.93	0.030	0.017	2.999	0.194	78.994	1.320
5/4/2012 13:30 น.	23.95	0.079	0.017	3.994	0.152	90.095	0.646
6/4/2012 12:30 น.	24.91	0.021	0.006	8.561	0.136	86.949	0.439
9/4/2012 12:45 น.	27.92	0.025	0.010	14.155	0.469	72.451	1.938
10/4/2012 13:00 น.	28.93	0.050	0.003	15.625	0.488	69.279	0.240
12/4/2012 11:05 น.	30.85	0.105	0.026	22.476	1.236	62.289	1.714
13/4/2012 11:30 น.	31.86	0.089	0.004	22.133	0.198	58.980	0.714
14/4/2012 12:30 น.	32.91	0.095	0.006	22.895	0.322	55.762	0.472
17/4/2012 15:20 น.	36.02	0.098	0.004	29.153	0.813	37.080	1.830
18/4/2012 13:30 น.	36.95	0.106	0.004	33.862	3.058	23.903	1.677
19/4/2012 13:45 น.	37.96	0.105	0.004	30.864	0.581	18.883	5.506
20/4/2012 14:20 น.	38.98	0.101	0.011	26.280	3.102	10.969	3.476
21/4/2012 12:30 น.	39.91	0.060	0.004	19.973	1.134	17.937	0.949
23/4/2012 14:00 น.	41.97	0.076	0.011	18.393	0.571	20.331	0.123
24/4/2012 12:00 น.	42.89	0.057	0.015	18.452	1.280	14.556	1.377
25/4/2012 13:00 น.	43.93	0.349	0.011	2.306	0.318	3.683	0.414
26/4/2012 12:20 น.	44.90	0.065	0.064	13.714	0.261	5.213	0.352
27/4/2012 14:20 น.	45.98	0.161	0.047	0.716	0.038	0.976	0.071
28/4/2012 12:30 น.	46.91	0.379	0.010	0.363	0.013	0.951	0.168
29/4/2012 18:30 น.	48.16	0.207	0.012	0.000	0.000	0.623	0.270
30/4/2012 18:00 น.	49.14	0.045	0.001	15.031	0.847	6.412	0.607
1/5/2012 12:00 น.	49.89	0.060	0.007	2.947	0.213	2.308	0.843
2/5/2012 13:00 น.	50.93	0.046	0.009	7.103	0.390	2.909	0.340
3/5/2012 12:00 น.	51.89	0.044	0.015	13.476	0.356	3.703	0.100
4/5/2012 13:30 น.	52.95	0.050	0.010	4.157	0.022	2.054	0.109
5/5/2012 12:15 น.	53.90	0.030	0.006	10.838	0.317	6.523	0.371
7/5/2012 13:00 น.	55.93	0.061	0.018	5.359	0.179	2.309	0.506
8/5/2012 12:30 น.	56.91	0.059	0.004	2.944	0.094	2.699	0.080
9/5/2012 14:00 น.	57.97	0.061	0.003	1.227	0.028	3.152	1.514
10/5/2012 14:35 น.	58.99	0.056	0.004	0.482	0.019	1.610	0.494
11/5/2012 13:00 น.	59.93	0.059	0.003	0.180	0.007	1.236	0.259
12/5/2012 13:00 น.	60.93	0.061	0.005	0.040	0.002	1.660	0.363
14/5/2012 14:15 น.	62.98	0.061	0.014	0.089	0.002	0.795	0.076

ตารางที่ ข-3 ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าซีโอดี ในระหว่างการเตรียมสภาพตัวกรองชีวภาพดีไนทริฟิเคชันและติดตั้งถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว บริเวณก่อนเข้าท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง		ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)					
12/3/2012 14:45 น.	0.00	70	7.20	8.09	29.80	14.88		
13/3/2012 16:30 น.	1.07	80	6.80	7.86	30.00	334.50		
14/3/2012 13:30 น.	1.95	70	6.60	8.21	30.40	327.60		
15/3/2012 17:30 น.	3.11	90	6.60	8.06	29.40	268.20		
16/3/2012 15:15 น.	4.02	90	7.50	7.98	30.00	241.70		
17/3/2012 13:30 น.	4.95	80	6.20	7.90	29.80	160.20		
19/3/2012 15:15 น.	7.02	80	6.30	7.55	30.00	209.30		
21/3/2012 13:55 น.	8.97	80	5.90	7.75	29.50	458.70		
23/3/2012 13:20 น.	10.94	90	6.60	7.83	29.70	300.80		
29/3/2012 18:00 น.	17.14	100	6.40	7.67	30.00	246.70		
30/3/2012 12:30 น.	17.91	100	6.40	7.79	30.10	231.60		
2/4/2012 13:15 น.	20.94	90	7.30	8.03	28.90	376.00		
3/4/2012 13:00 น.	21.93	90	7.80	7.74	28.80	393.50		
4/4/2012 13:00 น.	22.93	100	6.90	8.24	29.10	360.90		
5/4/2012 13:30 น.	23.95	100	6.80	8.23	28.80	300.80		
6/4/2012 12:30 น.	24.91	90	7.00	8.23	28.90	291.40		
9/4/2012 12:45 น.	27.92	80	6.80	8.14	28.80	276.40		
10/4/2012 13:00 น.	28.93	120	7.00	8.21	28.70	150.40		
12/4/2012 11:05 น.	30.85	120	6.80	8.23	29.30	90.24		
13/4/2012 11:30 น.	31.86	130	7.00	8.25	29.40	330.20		
14/4/2012 12:30 น.	32.91	130	6.80	8.38	29.70	347.00		
17/4/2012 15:20 น.	36.02	150	7.10	8.43	31.20	161.30		
18/4/2012 13:30 น.	36.95	150	7.00	8.40	30.10	199.30		
19/4/2012 13:45 น.	37.96	170	7.00	8.44	30.10	215.60		
20/4/2012 14:20 น.	38.98	160	6.70	8.53	30.10	490.40		
21/4/2012 12:30 น.	39.91	180	6.80	8.55	30.20	375.40		
23/4/2012 14:00 น.	41.97	200	6.20	8.63	29.90	302.10		
24/4/2012 12:00 น.	42.89	210	6.30	8.63	30.10	332.00		
25/4/2012 13:00 น.	43.93	210	6.50	8.67	30.20	279.00		
26/4/2012 12:20 น.	44.90	210	6.90	8.71	30.10	244.80		
27/4/2012 14:20 น.	45.98	230	7.00	8.77	30.30	325.40		
28/4/2012 12:30 น.	46.91	230	7.60	8.73	30.70	403.80		
29/4/2012 18:30 น.	48.16	260	6.70	8.74	30.70	410.30		

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง	ปริมาณออกซิเจน	พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)			
30/4/2012 18:00 น.	49.14	250	6.90	8.71	30.60	384.20
1/5/2012 12:00 น.	49.89	240	7.50	8.70	30.60	366.50
2/5/2012 13:00 น.	50.93	270	7.40	8.72	30.50	318.20
3/5/2012 12:00 น.	51.89	280	7.00	8.75	30.90	272.00
4/5/2012 13:30 น.	52.95	300	6.50	8.80	30.30	196.00
5/5/2012 12:15 น.	53.90	320	6.50	8.83	30.00	176.00
7/5/2012 13:00 น.	55.93	310	7.00	8.75	30.00	141.10
8/5/2012 12:30 น.	56.91	310	7.10	8.20	29.50	453.70
9/5/2012 14:00 น.	57.97	350	7.00	8.13	29.60	345.90
10/5/2012 14:35 น.	58.99	360	6.90	8.22	29.60	325.20
11/5/2012 13:00 น.	59.93	350	6.70	8.20	29.70	300.80
12/5/2012 13:00 น.	60.93	370	6.60	8.20	29.70	236.20
14/5/2012 14:15 น.	62.98	340	6.70	8.00	29.90	208.50

ตารางที่ ข-4 ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าซีโอดี ในระหว่างการเตรียมสภาพตัวกรองชีวภาพดีไนทริฟิเคชันและติดตั้งถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว บริเวณทางออกจากท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง	ปริมาณออกซิเจน	พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)			
12/3/2012 14:45 น.	0.00	70	7.10	8.26	32.90	20.830
13/3/2012 16:30 น.	1.07	90	6.40	8.07	33.90	298.50
14/3/2012 13:30 น.	1.95	100	5.90	8.03	31.80	284.80
15/3/2012 17:30 น.	3.11	100	6.00	8.02	31.60	265.20
16/3/2012 15:15 น.	4.02	110	5.80	7.92	32.20	231.40
17/3/2012 13:30 น.	4.95	80	5.80	7.63	32.70	210.30
19/3/2012 15:15 น.	7.02	90	4.40	7.45	32.90	165.10
21/3/2012 13:55 น.	8.97	90	4.10	7.73	34.90	384.80
23/3/2012 13:20 น.	10.94	100	5.80	7.71	33.40	418.60
29/3/2012 18:00 น.	17.14	100	4.90	7.73	32.30	240.60
30/3/2012 12:30 น.	17.91	90	4.80	7.73	32.40	127.80
2/4/2012 13:15 น.	20.94	90	2.20	7.03	32.80	376.00
3/4/2012 13:00 น.	21.93	90	2.20	7.63	32.90	350.90
4/4/2012 13:00 น.	22.93	100	1.30	7.56	32.30	293.30
5/4/2012 13:30 น.	23.95	100	0.90	7.54	32.00	306.40

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)			
6/4/2012 12:30 น.	24.91	100	0.70	7.26	31.90	231.20
9/4/2012 12:45 น.	27.92	120	0.70	7.36	31.70	150.40
10/4/2012 13:00 น.	28.93	110	0.80	7.56	31.70	100.70
12/4/2012 11:05 น.	30.85	130	0.80	7.65	32.20	84.40
13/4/2012 11:30 น.	31.86	180	0.80	7.68	33.50	330.00
14/4/2012 12:30 น.	32.91	190	0.90	7.74	32.10	225.70
17/4/2012 15:20 น.	36.02	250	0.60	7.67	32.80	118.40
18/4/2012 13:30 น.	36.95	290	0.60	7.72	32.80	103.50
19/4/2012 13:45 น.	37.96	280	0.60	8.03	33.10	562.40
20/4/2012 14:20 น.	38.98	290	0.40	8.38	33.80	590.40
21/4/2012 12:30 น.	39.91	280	0.40	8.45	29.00	302.10
23/4/2012 14:00 น.	41.97	260	0.60	8.54	30.00	201.60
24/4/2012 12:00 น.	42.89	310	0.30	8.86	30.00	99.40
25/4/2012 13:00 น.	43.93	310	0.70	8.85	30.40	107.70
26/4/2012 12:20 น.	44.90	320	0.70	8.78	29.60	208.80
27/4/2012 14:20 น.	45.98	320	0.90	8.65	28.50	1205.10
28/4/2012 12:30 น.	46.91	330	0.60	8.79	28.70	470.40
29/4/2012 18:30 น.	48.16	330	0.70	8.87	28.60	297.90
30/4/2012 18:00 น.	49.14	330	0.60	8.74	29.40	235.20
1/5/2012 12:00 น.	49.89	310	0.50	8.97	30.10	204.00
2/5/2012 13:00 น.	50.93	280	0.60	8.57	31.10	217.60
3/5/2012 12:00 น.	51.89	310	0.60	8.46	27.20	141.10
4/5/2012 13:30 น.	52.95	310	0.70	8.30	29.10	161.50
5/5/2012 12:15 น.	53.90	340	0.80	8.43	29.60	141.10
7/5/2012 13:00 น.	55.93	340	0.80	8.30	29.10	140.40
8/5/2012 12:30 น.	56.91	330	0.70	8.23	30.00	1305.90
9/5/2012 14:00 น.	57.97	370	0.50	8.31	31.70	323.40
10/5/2012 14:35 น.	58.99	280	0.80	8.23	28.60	285.80
11/5/2012 13:00 น.	59.93	350	0.80	8.00	28.70	236.20
12/5/2012 13:00 น.	60.93	310	0.70	8.23	27.30	208.50
14/5/2012 14:15 น.	62.98	230	0.90	7.72	29.10	207.80

ภาคผนวก ค

ข้อมูลคุณภาพน้ำที่ทำการตรวจวัดในการทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตในระบบท่อยาว

การทดลองที่ 2.1 การศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว

ตารางที่ ค-1 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตของการศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว (ที่สัดส่วน C:N = 1:1) บริเวณก่อนเข้าท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/5/2012 14:00 น.	0.77	0.010	0.018	0.288	0.007	87.551	3.079
17/5/2012 12:30 น.	1.71	0.000	0.000	0.696	0.016	81.351	1.470
18/5/2012 12:30 น.	2.71	0.001	0.002	0.853	0.029	77.449	0.426
19/5/2012 13:15 น.	3.74	0.004	0.006	1.210	0.049	74.340	1.501
20/5/2012 13:15 น.	4.74	0.009	0.007	1.694	0.067	69.563	1.568
21/5/2012 14:15 น.	5.78	0.007	0.006	2.593	0.014	65.483	1.108
22/5/2012 12:00 น.	6.69	0.010	0.002	2.622	0.064	63.077	0.297
23/5/2012 13:45 น.	7.76	0.025	0.002	2.688	0.085	60.234	0.245
25/5/2012 14:45 น.	9.80	0.021	0.008	2.671	0.081	86.906	1.603
26/5/2012 13:00 น.	10.73	0.032	0.004	3.132	0.225	83.984	1.006
27/5/2012 13:15 น.	11.74	0.023	0.005	3.103	0.058	80.804	0.252
28/5/2012 12:45 น.	12.72	0.023	0.008	3.251	0.095	77.612	0.649
29/5/2012 12:00 น.	13.69	0.019	0.013	3.737	0.049	71.581	0.616
30/5/2012 12:45 น.	14.72	0.035	0.007	3.899	0.153	66.457	1.277
31/5/2012 13:00 น.	15.73	0.025	0.022	4.053	0.226	66.011	1.038
1/6/2012 13:15 น.	16.74	0.046	0.024	4.626	0.152	64.438	0.185
2/6/2012 13:30 น.	17.75	0.068	0.016	4.068	0.073	61.599	0.809
3/6/2012 14:30 น.	18.79	0.119	0.007	4.569	0.278	61.389	0.528
4/6/2012 13:30 น.	19.75	0.191	0.009	4.428	0.200	60.256	0.543
6/6/2012 12:30 น.	21.71	0.167	0.012	4.860	0.218	90.265	0.182
7/6/2012 15:30 น.	22.83	0.059	0.004	4.959	0.200	90.037	1.645
8/6/2012 12:30 น.	23.71	0.046	0.005	5.386	0.104	86.887	0.292
9/6/2012 13:30 น.	24.75	0.048	0.011	5.511	0.097	84.381	0.707

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
10/6/2012 14:15 น.	25.78	0.062	0.012	5.757	0.100	77.653	1.246
11/6/2012 13:00 น.	26.73	0.057	0.006	5.922	0.087	72.924	2.805
12/6/2012 13:00 น.	27.73	0.067	0.033	6.687	0.117	72.203	0.297
13/6/2012 12:10 น.	28.69	0.053	0.013	7.293	0.056	69.906	1.297
14/6/2012 12:45 น.	29.72	0.048	0.012	7.786	0.211	68.456	1.245

ตารางที่ ค-2 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตของการศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนริฟิเคชันในระบบท่อยาว (ที่สัดส่วน C:N = 1:1) บริเวณทางออกจากท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/5/2012 14:00 น.	0.77	0.009	0.005	1.785	0.032	77.678	1.944
17/5/2012 12:30 น.	1.71	0.012	0.017	1.390	0.008	75.403	0.668
18/5/2012 12:30 น.	2.71	0.008	0.006	0.938	0.046	74.003	0.825
19/5/2012 13:15 น.	3.74	0.018	0.007	1.361	0.107	70.473	3.039
20/5/2012 13:15 น.	4.74	0.019	0.002	1.820	0.049	63.245	1.292
21/5/2012 14:15 น.	5.78	0.029	0.004	7.177	0.148	48.792	0.919
22/5/2012 12:00 น.	6.69	0.019	0.005	2.615	0.101	60.267	0.332
23/5/2012 13:45 น.	7.76	0.029	0.006	2.948	0.283	61.176	1.059
25/5/2012 14:45 น.	9.80	0.032	0.006	4.473	0.244	60.124	1.023
26/5/2012 13:00 น.	10.73	0.018	0.006	2.839	0.118	81.318	2.226
27/5/2012 13:15 น.	11.74	0.096	0.017	2.818	0.298	76.731	1.420
28/5/2012 12:45 น.	12.72	0.097	0.014	3.160	0.079	72.700	0.856
29/5/2012 12:00 น.	13.69	0.068	0.044	3.359	0.215	69.269	1.432
30/5/2012 12:45 น.	14.72	0.108	0.003	3.968	0.226	63.637	0.717
31/5/2012 13:00 น.	15.73	0.111	0.033	4.445	0.120	64.807	0.565
1/6/2012 13:15 น.	16.74	0.212	0.046	5.029	0.166	62.534	2.022
2/6/2012 13:30 น.	17.75	0.280	0.038	4.544	0.227	59.287	0.697
3/6/2012 14:30 น.	18.79	0.185	0.014	4.586	0.155	63.830	0.064
4/6/2012 13:30 น.	19.75	0.316	0.064	4.381	0.041	68.788	0.207
6/6/2012 12:30 น.	21.71	0.123	0.035	4.616	0.129	87.921	1.434
7/6/2012 15:30 น.	22.83	0.073	0.030	4.692	0.272	87.906	1.405
8/6/2012 12:30 น.	23.75	0.085	0.036	4.902	0.089	84.810	1.119

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
9/6/2012 13:30 น.	24.75	0.103	0.053	5.090	0.296	81.837	0.580
10/6/2012 14:15 น.	25.78	0.065	0.017	5.544	0.008	76.176	0.850
11/6/2012 13:00 น.	26.73	0.099	0.004	6.448	0.202	72.310	0.272
12/6/2012 13:00 น.	27.73	0.127	0.026	15.062	0.233	60.404	0.372
13/6/2012 12:10 น.	28.69	0.028	0.021	7.653	0.383	69.657	2.328
14/6/2012 12:45 น.	29.72	0.041	0.018	7.635	0.365	71.634	0.652

ตารางที่ ค-3 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตของการศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนริฟิเคชันในระบบท่อยาว (ที่สัดส่วน C:N = 2:1) บริเวณก่อนเข้าท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/6/2012 12:45 น.	31.72	0.088	0.007	8.240	0.275	91.890	0.303
17/6/2012 13:45 น.	32.76	0.050	0.011	9.131	0.271	89.222	0.595
18/6/2012 12:45 น.	33.72	0.060	0.021	9.758	0.164	88.452	1.289
19/6/2012 12:15 น.	34.70	0.128	0.053	10.271	0.190	80.982	2.150
20/6/2012 12:15 น.	35.70	0.062	0.005	11.160	0.304	80.184	2.163
21/6/2012 11:45 น.	36.68	0.063	0.012	11.809	0.234	78.769	1.528
22/6/2012 13:45 น.	37.76	0.064	0.007	12.802	0.340	74.293	0.492
23/6/2012 12:30 น.	38.71	0.063	0.004	13.911	0.629	69.788	0.307
25/6/2012 15:20 น.	40.83	0.000	0.000	15.928	0.344	62.959	1.883
26/6/2012 12:45 น.	41.72	0.061	0.021	15.020	0.628	60.453	1.856
27/6/2012 19:00 น.	42.98	0.048	0.034	16.023	0.432	59.566	1.834
28/6/2012 12:15 น.	43.70	0.000	0.000	17.076	0.411	84.315	3.035
29/6/2012 14:00 น.	44.77	0.045	0.006	17.402	0.645	83.459	1.590
30/6/2012 12:00 น.	45.69	0.057	0.022	16.928	0.017	82.630	1.848
2/7/2012 12:00 น.	47.69	0.063	0.008	15.678	0.290	71.458	2.738
3/7/2012 12:30 น.	48.71	0.000	0.000	16.572	0.764	72.189	2.900
4/7/2012 12:30 น.	49.71	0.055	0.046	16.544	0.329	65.892	1.290
5/7/2012 12:00 น.	50.69	0.054	0.012	16.280	0.564	66.668	1.377
6/7/2012 11:30 น.	51.67	0.041	0.024	16.864	0.304	73.844	1.366
7/7/2012 13:30 น.	52.75	0.000	0.000	16.873	1.045	65.865	1.345
11/7/2012 12:00 น.	56.69	0.080	0.004	14.362	0.482	82.899	1.304
12/7/2012 12:30 น.	57.71	0.000	0.000	14.879	0.101	80.853	0.940

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
13/7/2012 12:00 น.	58.69	0.000	0.000	16.510	1.900	76.165	2.766
14/7/2012 12:15 น.	59.70	0.000	0.000	18.197	0.461	74.882	2.942
15/7/2012 12:15 น.	60.70	0.000	0.000	18.793	0.652	75.729	0.104
16/7/2012 13:00 น.	61.73	0.005	0.009	16.552	0.574	73.831	1.268
17/7/2012 11:30 น.	62.67	0.004	0.006	16.740	1.365	71.261	2.581
18/7/2012 11:45 น.	63.68	0.000	0.000	18.672	0.256	71.170	3.482
19/7/2012 10:00 น.	64.60	0.016	0.014	17.245	1.256	68.308	2.776
21/7/2012 12:30 น.	66.71	0.007	0.002	19.068	1.145	64.493	2.350
22/7/2012 12:10 น.	67.69	0.010	0.003	19.086	0.548	69.202	1.433
23/7/2012 12:10 น.	68.69	0.000	0.000	19.180	0.739	67.191	0.844
24/7/2012 11:30 น.	69.67	0.032	0.005	19.918	0.376	65.922	0.960
25/7/2012 12:15 น.	70.70	0.048	0.002	21.910	0.621	63.121	0.525
26/7/2012 11:20 น.	71.66	0.063	0.009	25.390	0.844	58.348	0.326
27/7/2012 12:00 น.	72.69	0.079	0.008	23.198	0.314	54.765	0.765
28/7/2012 19:30 น.	74.00	0.073	0.003	12.109	0.377	53.832	0.786

ตารางที่ ค-4 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตของการศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนริฟิเคชันในระบบท่อยาว (ที่สัดส่วน C:N = 2:1) บริเวณทางออกจากท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/6/2012 12:45 น.	31.72	0.035	0.020	8.581	0.089	87.114	0.934
17/6/2012 13:45 น.	32.76	0.036	0.009	9.403	0.141	87.108	0.963
18/6/2012 12:45 น.	33.72	0.009	0.009	10.575	0.226	83.465	2.023
19/6/2012 12:15 น.	34.70	0.042	0.049	10.459	0.304	81.814	1.176
20/6/2012 12:15 น.	35.70	0.011	0.011	12.262	0.663	78.651	1.335
21/6/2012 11:45 น.	36.68	0.022	0.019	12.547	0.796	73.678	2.819
22/6/2012 13:45 น.	37.76	0.027	0.010	14.205	0.329	70.011	2.071
23/6/2012 12:30 น.	38.71	0.078	0.025	19.357	0.801	55.249	1.576
25/6/2012 15:20 น.	40.83	0.000	0.000	17.483	1.063	56.614	1.105
26/6/2012 12:45 น.	41.72	0.045	0.030	16.077	0.516	57.112	2.976
27/6/2012 19:00 น.	42.98	0.036	0.012	16.776	0.516	56.456	1.234
28/6/2012 12:15 น.	43.70	0.000	0.000	16.889	0.750	80.876	1.356
29/6/2012 14:00 น.	44.77	0.100	0.030	16.593	1.522	81.662	4.703

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
30/6/2012 12:00 น.	45.69	0.015	0.006	17.540	0.851	78.572	1.751
2/7/2012 12:00 น.	47.69	0.007	0.008	16.619	0.443	69.791	1.851
3/7/2012 12:30 น.	48.71	0.000	0.000	16.864	0.385	66.470	1.957
4/7/2012 12:30 น.	49.71	0.009	0.011	17.005	0.311	65.367	0.056
5/7/2012 12:00 น.	50.69	0.007	0.006	16.478	0.464	62.667	1.171
6/7/2012 11:30 น.	51.67	0.023	0.007	17.230	0.299	72.710	1.853
7/7/2012 13:30 น.	52.75	0.016	0.008	16.290	0.907	66.766	0.792
11/7/2012 12:00 น.	56.69	0.013	0.001	16.859	0.747	77.453	0.765
12/7/2012 12:30 น.	57.71	0.000	0.000	16.622	0.319	76.605	1.679
13/7/2012 12:00 น.	58.69	0.013	0.002	18.951	0.979	74.531	1.319
14/7/2012 12:15 น.	59.70	0.015	0.004	17.061	0.683	75.741	0.588
15/7/2012 12:15 น.	60.70	0.024	0.009	18.973	1.099	74.403	2.170
16/7/2012 13:00 น.	61.73	0.033	0.011	18.880	0.765	76.182	1.748
17/7/2012 11:30 น.	62.67	0.028	0.004	19.831	1.514	70.184	4.884
18/7/2012 11:45 น.	63.68	0.032	0.006	19.880	0.331	71.846	0.509
19/7/2012 10:00 น.	64.60	0.047	0.008	18.266	0.231	66.226	2.257
21/7/2012 12:30 น.	66.71	0.049	0.006	21.663	0.491	59.862	3.303
22/7/2012 12:10 น.	67.69	0.051	0.006	19.028	0.858	67.043	1.081
23/7/2012 12:10 น.	68.69	0.092	0.020	21.605	0.376	63.357	2.057
24/7/2012 11:30 น.	69.67	0.108	0.006	20.937	1.769	63.701	3.019
25/7/2012 12:15 น.	70.70	0.121	0.008	29.506	0.917	54.093	1.724
26/7/2012 11:20 น.	71.66	0.090	0.004	28.541	2.127	53.903	1.469
27/7/2012 12:00 น.	72.69	0.091	0.022	23.349	0.348	60.850	0.668
28/7/2012 19:30 น.	74.00	0.033	0.007	11.656	0.832	55.453	0.564

ตารางที่ ค-5 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตของการศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนริฟิเคชันในระบบบ่อดำ (ที่สัดส่วน C:N = 5:1) บริเวณก่อนเข้าบ่อดำ

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1/8/2012 12:15 น.	77.70	0.332	0.007	13.953	0.205	81.837	0.814
2/8/2012 11:45 น.	78.68	0.150	0.006	14.247	0.657	80.057	1.497
3/8/2012 12:00 น.	79.69	0.030	0.004	14.725	0.647	81.407	0.434

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/8/2012 14:00 น.	80.77	0.018	0.003	17.498	0.524	70.998	1.415
5/8/2012 12:00 น.	81.69	0.021	0.009	17.205	0.692	64.869	1.345
6/8/2012 11:45 น.	82.68	0.021	0.001	19.677	1.060	58.979	1.093
7/8/2012 11:45 น.	83.68	0.014	0.013	20.446	0.269	53.567	0.268
8/8/2012 12:30 น.	84.71	0.021	0.006	19.275	0.320	50.903	0.617
9/8/2012 10:45 น.	85.64	0.017	0.009	20.303	1.259	47.449	1.644
10/8/2012 12:00 น.	86.69	0.020	0.009	19.359	0.405	42.929	1.097
13/8/2012 12:30 น.	87.71	0.018	0.007	20.754	0.165	36.473	0.658
14/8/2012 11:00 น.	89.71	0.025	0.008	18.994	1.475	26.392	1.183
15/8/2012 10:45 น.	90.65	0.000	0.000	17.872	0.538	20.521	0.930
16/8/2012 11:00 น.	91.64	0.038	0.022	15.261	0.847	21.303	1.108
17/8/2012 10:45 น.	92.65	0.045	0.025	14.402	0.719	16.932	0.747
18/8/2012 12:30 น.	93.64	0.021	0.002	14.775	1.008	12.742	1.069
19/8/2012 11:45 น.	94.71	0.013	0.002	13.916	1.049	10.300	0.912
20/8/2012 10:50 น.	95.68	0.013	0.004	7.322	0.187	21.085	0.146
21/8/2012 10:50 น.	96.64	0.037	0.005	6.491	0.158	20.564	0.176
23/8/2012 11:45 น.	98.65	0.029	0.011	0.806	0.055	20.587	0.178
25/8/2012 12:30 น.	99.68	0.279	0.007	1.640	0.035	90.977	0.758
27/8/2012 12:00 น.	100.69	0.147	0.01	3.912	0.099	85.831	0.604
28/8/2012 12:00 น.	101.71	0.026	0.00	0.000	0.000	77.037	0.780
29/8/2012 11:45 น.	103.69	0.014	0.02	6.095	0.197	67.006	1.151
30/8/2012 11:30 น.	104.69	0.014	0.02	8.925	0.485	59.103	3.136
31/8/2012 12:45 น.	105.68	0.019	0.01	8.137	0.127	48.436	0.407
1/9/2012 10:45 น.	106.67	0.000	0.00	7.680	0.783	41.254	0.343
3/9/2012 11:45 น.	107.72	0.000	0.00	5.563	0.131	31.788	0.222
4/9/2012 11:45 น.	108.64	0.000	0.00	5.269	0.173	27.031	0.397
5/9/2012 11:45 น.	110.68	0.000	0.00	4.243	0.125	16.669	0.299
6/9/2012 14:20 น.	111.68	0.000	0.00	3.260	0.019	10.352	0.119
7/9/2012 18:20 น.	112.68	0.000	0.00	2.971	0.241	5.729	0.367
8/9/2012 12:30 น.	113.78	0.000	0.00	1.759	0.022	5.654	0.382
10/9/2012 17:00 น.	114.95	0.000	0.00	1.523	0.045	5.678	0.765
11/9/2012 12:00 น.	115.71	0.000	0.00	1.247	0.062	87.827	2.114
12/9/2012 11:25 น.	117.90	0.000	0.00	2.577	0.123	73.263	0.086
13/9/2012 11:15 น.	118.69	0.000	0.00	2.624	0.109	66.709	0.147
14/9/2012 14:15 น.	119.66	0.000	0.00	2.850	0.050	60.836	0.325
15/9/2012 18:00 น.	120.66	0.000	0.00	3.117	0.057	59.765	0.456

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/9/2012 13:30 น.	121.78	0.000	0.00	0.723	0.067	57.654	0.567
17/9/2012 12:00 น.	122.94	0.000	0.00	0.721	0.010	55.786	0.432
18/9/2012 12:00 น.	123.75	0.000	0.00	2.661	0.015	89.788	1.099
19/9/2012 12:00 น.	124.69	0.001	0.00	3.369	0.095	84.116	0.856
20/9/2012 16:00 น.	126.69	0.000	0.00	4.939	0.096	69.401	0.862
22/9/2012 12:30 น.	127.85	0.000	0.00	5.739	0.196	57.401	1.974
24/9/2012 11:30 น.	129.85	0.000	0.00	7.453	0.123	47.965	0.443
25/9/2012 16:30 น.	131.67	0.000	0.00	7.347	0.268	40.619	0.774
27/9/2012 16:30 น.	134.88	0.000	0.00	8.769	0.402	33.395	0.580
28/9/2012 12:00 น.	135.69	0.003	0.00	8.605	0.376	32.456	0.544

ตารางที่ ค-6 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตของการศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนริฟิเคชันในระบบท่อยาว (ที่สัดส่วน C:N = 5:1) บริเวณทางออกจากท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1/8/2012 12:15 น.	77.70	0.261	0.008	14.079	0.264	80.705	0.430
2/8/2012 11:45 น.	78.68	0.029	0.004	13.677	0.352	78.751	1.219
3/8/2012 12:00 น.	79.69	0.016	0.005	15.899	0.872	73.903	0.907
4/8/2012 14:00 น.	80.77	0.016	0.001	18.403	1.813	63.611	1.931
5/8/2012 12:00 น.	81.69	0.017	0.002	18.140	0.054	59.523	0.518
6/8/2012 11:45 น.	82.68	0.016	0.001	19.535	0.392	51.451	0.929
7/8/2012 11:45 น.	83.68	0.010	0.004	19.641	1.845	46.956	2.863
8/8/2012 12:30 น.	84.71	0.020	0.010	20.174	0.596	38.593	0.724
9/8/2012 10:45 น.	85.64	0.018	0.011	19.649	0.466	30.733	1.267
10/8/2012 12:00 น.	86.69	0.017	0.002	18.844	0.347	22.070	0.378
13/8/2012 12:30 น.	87.71	0.020	0.009	19.842	1.145	33.007	2.390
14/8/2012 11:00 น.	89.71	0.021	0.004	15.839	0.482	22.391	0.936
15/8/2012 10:45 น.	90.65	0.000	0.000	16.866	0.308	20.767	0.387
16/8/2012 11:00 น.	91.64	0.045	0.006	16.097	1.185	18.994	1.376
17/8/2012 10:45 น.	92.65	0.045	0.007	15.249	1.173	18.963	0.815
18/8/2012 12:30 น.	93.64	0.017	0.002	13.282	0.366	12.087	0.334
19/8/2012 11:45 น.	94.71	0.012	0.003	12.593	0.308	9.799	0.273

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
20/8/2012 10:50 น.	95.68	0.021	0.007	6.707	0.109	11.549	0.237
21/8/2012 10:50 น.	96.64	0.035	0.004	6.009	0.204	11.780	0.544
23/8/2012 11:45 น.	98.65	0.025	0.005	0.742	0.066	10.765	0.453
25/8/2012 12:30 น.	99.68	0.388	0.004	3.345	0.202	76.897	0.478
27/8/2012 12:00 น.	100.69	0.022	0.004	1.917	0.091	75.245	2.365
28/8/2012 12:00 น.	101.71	0.022	0.017	3.621	0.072	68.609	0.970
29/8/2012 11:45 น.	103.69	0.006	0.004	4.660	0.258	56.627	0.663
30/8/2012 11:30 น.	104.69	0.000	0.000	9.445	0.874	36.515	0.432
31/8/2012 12:45 น.	105.68	0.140	0.008	7.545	0.336	39.553	1.082
1/9/2012 10:45 น.	106.67	0.000	0.000	7.034	0.325	32.745	0.212
3/9/2012 11:45 น.	107.72	0.000	0.000	4.115	0.152	11.710	0.107
4/9/2012 11:45 น.	108.64	0.000	0.000	4.821	0.130	24.088	0.600
5/9/2012 11:45 น.	110.68	0.000	0.000	3.976	0.153	15.319	0.190
6/9/2012 14:20 น.	111.68	0.000	0.000	2.587	0.065	6.466	0.042
7/9/2012 18:20 น.	112.68	0.000	0.000	1.780	0.100	3.338	0.244
8/9/2012 12:30 น.	113.78	0.000	0.000	0.950	0.065	1.387	0.227
10/9/2012 17:00 น.	114.95	0.000	0.000	0.980	0.030	1.430	0.456
11/9/2012 12:00 น.	115.71	0.000	0.000	1.787	0.021	1.432	0.487
12/9/2012 11:25 น.	117.90	0.000	0.000	2.501	0.075	70.627	0.339
13/9/2012 11:15 น.	118.69	0.000	0.000	2.699	0.134	63.176	0.357
14/9/2012 14:15 น.	119.66	0.000	0.000	2.897	0.152	57.993	0.125
15/9/2012 18:00 น.	120.66	0.000	0.000	2.733	0.262	48.871	0.259
16/9/2012 13:30 น.	121.78	0.000	0.000	0.912	0.034	47.564	0.342
17/9/2012 12:00 น.	122.94	0.000	0.000	0.913	0.020	47.345	0.453
18/9/2012 12:00 น.	123.75	0.000	0.000	2.343	0.041	79.657	0.765
19/9/2012 12:00 น.	124.69	0.000	0.000	3.095	0.065	79.949	0.680
20/9/2012 16:00 น.	126.69	0.000	0.000	4.241	0.148	63.484	0.624
22/9/2012 12:30 น.	127.85	0.000	0.000	4.827	0.257	51.855	2.222
24/9/2012 11:30 น.	129.85	0.003	0.003	6.078	0.265	37.251	0.359
25/9/2012 16:30 น.	131.67	0.002	0.004	8.460	0.056	39.512	1.023
27/9/2012 16:30 น.	134.88	0.000	0.000	8.496	0.790	29.846	0.080
28/9/2012 12:00 น.	135.69	0.008	0.003	7.931	0.555	28.317	0.333

ตารางที่ ค-7 ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าซีโอดี ในระหว่างการ
การศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบ
ท่อยาว (ที่สัดส่วน C:N = 1:1) บริเวณก่อนเข้าท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง		ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)	ละลายน้ำ	(มก./ล.)				
16/5/2012 14:00 น.	0.77	60	7.20	6.90	29.30	287.50		
17/5/2012 12:30 น.	1.71	70	7.80	7.00	28.80	209.10		
18/5/2012 12:30 น.	2.71	70	7.10	7.00	28.70	205.30		
19/5/2012 13:15 น.	3.74	90	7.70	7.50	29.00	128.60		
20/5/2012 13:15 น.	4.74	100	7.00	7.50	28.30	97.30		
21/5/2012 14:15 น.	5.78	130	6.90	7.50	29.40	37.60		
22/5/2012 12:00 น.	6.69	150	7.60	7.50	29.60			
23/5/2012 13:45 น.	7.76	120	8.00	7.50	29.30			
25/5/2012 14:45 น.	9.80	170	7.60	7.50	29.50	261.30		
26/5/2012 13:00 น.	10.73	180	6.50	7.50	28.70	213.30		
27/5/2012 13:15 น.	11.74	200	7.40	7.50	29.60			
28/5/2012 12:45 น.	12.72	210	7.40	7.50	29.50			
29/5/2012 12:00 น.	13.69	220	7.30	7.50	29.70	107.20		
30/5/2012 12:45 น.	14.72	230	7.00	7.50	29.10	112.80		
31/5/2012 13:00 น.	15.73	230	7.60	7.69	29.20	94.70		
1/6/2012 13:15 น.	16.74	240	7.90	7.79	29.10			
2/6/2012 13:30 น.	17.75	250	7.20	7.80	29.00			
3/6/2012 14:30 น.	18.79	230	7.30	7.89	29.50	25.60		
4/6/2012 13:30 น.	19.75	220	7.00	7.94	28.30			
6/6/2012 12:30 น.	21.71	250	7.10	8.10	29.10	285.30		
7/6/2012 15:30 น.	22.83	300	7.40	8.36	29.00	220.00		
8/6/2012 12:30 น.	23.75	300	7.20	8.25	29.00	174.00		
9/6/2012 13:30 น.	24.75	320	7.20	8.32	28.90	177.60		
10/6/2012 14:15 น.	25.78	340	7.40	8.30	28.80	142.00		
11/6/2012 13:00 น.	26.73	360	7.30	8.30	29.00			
12/6/2012 13:00 น.	27.73	310	7.10	8.32	28.50			
13/6/2012 12:10 น.	28.69	330	6.80	8.20	28.20	86.50		
14/6/2012 12:45 น.	29.72	310	7.40	8.34	28.80			

ตารางที่ ค-8 ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าซีโอดี ในระหว่างการ
การศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบ
ท่อยาว (ที่สัดส่วน C:N = 1:1) บริเวณทางออกจากท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง		ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)					
16/5/2012 14:00 น.	0.77	90	0.70	6.70	28.90	190.70		
17/5/2012 12:30 น.	1.71	100	0.80	7.00	26.50	205.30		
18/5/2012 12:30 น.	2.71	100	1.00	7.00	25.40	88.30		
19/5/2012 13:15 น.	3.74	110	1.00	7.50	25.00	85.30		
20/5/2012 13:15 น.	4.74	130	0.70	7.50	28.20	31.36		
21/5/2012 14:15 น.	5.78	150	0.80	7.50	28.80	31.36		
22/5/2012 12:00 น.	6.69	150	0.80	7.50	27.60			
23/5/2012 13:45 น.	7.76	160	1.20	7.50	28.20			
25/5/2012 14:45 น.	9.80	250	1.20	7.50	25.00	209.10		
26/5/2012 13:00 น.	10.73	190	1.80	7.50	27.50	197.30		
27/5/2012 13:15 น.	11.74	200	0.40	7.50	24.30			
28/5/2012 12:45 น.	12.72	240	0.50	7.50	23.20			
29/5/2012 12:00 น.	13.69	220	0.70	7.50	25.50	107.20		
30/5/2012 12:45 น.	14.72	220	0.80	7.50	25.20	75.20		
31/5/2012 13:00 น.	15.73	250	1.20	7.55	25.20	27.20		
1/6/2012 13:15 น.	16.74	250	2.00	7.64	25.50			
2/6/2012 13:30 น.	17.75	240	1.80	7.64	23.30			
3/6/2012 14:30 น.	18.79	250	2.90	7.77	23.90	25.60		
4/6/2012 13:30 น.	19.75	250	4.50	7.82	25.50			
6/6/2012 12:30 น.	21.71	290	0.90	7.94	26.90	180.00		
7/6/2012 15:30 น.	22.83	290	0.90	8.06	24.40	174.00		
8/6/2012 12:30 น.	23.75	320	1.10	8.07	24.70	159.80		
9/6/2012 13:30 น.	24.75	320	0.90	8.15	26.00	124.30		
10/6/2012 14:15 น.	25.78	360	1.10	8.05	26.20	117.20		
11/6/2012 13:00 น.	26.73	340	2.50	8.14	26.90			
12/6/2012 13:00 น.	27.73	350	2.20	8.21	28.20			
13/6/2012 12:10 น.	28.69	320	2.50	8.10	26.90	58.80		
14/6/2012 12:45 น.	29.72	340	3.40	8.18	26.40			

ตารางที่ ค-9 ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าซีโอดี ในระหว่างการ
การศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบ
ท่อยาว (ที่สัดส่วน C:N = 2:1) บริเวณก่อนเข้าท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง		ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอนต./ล.)	(มก.คลอไรด์ คาร์บอนต./ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)	รวม (มก./ล.)			
16/6/2012 12:45 น.	31.72	330	7.30	8.39	28.40	664.00		
17/6/2012 13:45 น.	32.76	330	7.20	8.33	28.50	664.00		
18/6/2012 12:45 น.	33.72	350	6.40	8.38	28.40	544.00		
19/6/2012 12:15 น.	34.70	320	6.60	8.42	28.60	528.00		
20/6/2012 12:15 น.	35.70	320	6.40	8.41	28.80	464.00		
21/6/2012 11:45 น.	36.68	360	6.70	8.50	28.20	403.80		
22/6/2012 13:45 น.	37.76	460	6.80	8.39	28.30			
23/6/2012 12:30 น.	38.71	450	6.70	8.40	28.60	313.60		
25/6/2012 15:20 น.	40.83	450	6.80	8.21	27.90	261.30		
26/6/2012 12:45 น.	41.72	430	7.20	8.44	28.80	219.50		
27/6/2012 19:00 น.	42.98	430	7.10	8.43	28.70			
28/6/2012 12:15 น.	43.70	460	6.50	8.49	28.60	614.40		
29/6/2012 14:00 น.	44.77	490	6.60	8.50	28.80	560.60		
30/6/2012 12:00 น.	45.69	450	6.60	8.50	28.70	514.60		
2/7/2012 12:00 น.	47.69	500	6.90	8.51	28.50	433.90		
3/7/2012 12:30 น.	48.71	490	6.90	8.65	28.90	360.90		
4/7/2012 12:30 น.	49.71	470	6.60	8.63	28.90	322.60		
5/7/2012 12:00 น.	50.69	530	6.90	8.62	28.80	307.20		
6/7/2012 11:30 น.	51.67	520	7.00	8.63	28.70			
7/7/2012 13:30 น.	52.75	530	7.00	8.64	28.70	273.90		
11/7/2012 12:00 น.	56.69	400	7.10	8.51	28.60	526.40		
12/7/2012 12:30 น.	57.71	460	7.00	8.45	28.70	503.80		
13/7/2012 12:00 น.	58.69	380	6.60	8.48	28.70	526.40		
14/7/2012 12:15 น.	59.70	420	7.10	8.45	28.60			
15/7/2012 12:15 น.	60.70	430	6.80	8.34	28.60	376.00		
16/7/2012 13:00 น.	61.73	450	6.90	8.45	28.90	323.40		
17/7/2012 11:30 น.	62.67	430	7.10	8.54	29.10	323.40		
18/7/2012 11:45 น.	63.68	420	6.80	8.34	28.70	274.50		
19/7/2012 10:00 น.	64.60	420	6.80	8.55	28.30	236.90		
21/7/2012 12:30 น.	66.71	430	6.90	8.56	28.60	150.40		
22/7/2012 12:10 น.	67.69	440	6.70	8.50	28.90	150.40		

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)			
23/7/2012 12:10 น.	68.69	450	6.60	8.56	29.00	156.40
24/7/2012 11:30 น.	69.67	450	6.80	8.51	29.00	131.30
25/7/2012 12:15 น.	70.70	490	6.90	8.40	28.90	105.80
26/7/2012 11:20 น.	71.66	460	6.40	8.51	28.70	
27/7/2012 12:00 น.	72.69	460	6.80	8.51	28.50	58.00
28/7/2012 19:30 น.	74.00	240	6.60	8.16	28.50	

ตารางที่ ค-10 ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าซีโอดี ในระหว่างการ
การศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบ
ท่อยาว (ที่สัดส่วน C:N = 2:1) บริเวณทางออกจากท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)			
16/6/2012 12:45 น.	31.72	310	31.72	8.21	26.90	584.00
17/6/2012 13:45 น.	32.76	340	32.76	8.27	24.50	544.00
18/6/2012 12:45 น.	33.72	360	33.72	8.28	24.50	504.00
19/6/2012 12:15 น.	34.70	330	34.70	8.39	26.80	480.00
20/6/2012 12:15 น.	35.70	320	35.70	8.40	24.70	380.0
21/6/2012 11:45 น.	36.68	320	36.68	8.27	26.10	325.30
22/6/2012 13:45 น.	37.76	450	37.76	8.29	26.10	
23/6/2012 12:30 น.	38.71	420	38.71	8.33	27.80	235.20
25/6/2012 15:20 น.	40.83	440	40.83	8.41	25.30	201.20
26/6/2012 12:45 น.	41.72	460	41.72	8.60	26.60	
27/6/2012 19:00 น.	42.98	450	42.98	8.50	26.60	
28/6/2012 12:15 น.	43.70	460	43.70	8.35	26.70	514.60
29/6/2012 14:00 น.	44.77	490	44.77	8.44	27.20	483.80
30/6/2012 12:00 น.	45.69	460	45.69	8.43	27.30	410.90
2/7/2012 12:00 น.	47.69	460	47.69	8.63	28.10	361.00
3/7/2012 12:30 น.	48.71	530	48.71	8.35	27.20	334.10
4/7/2012 12:30 น.	49.71	510	49.71	8.45	27.90	268.80
5/7/2012 12:00 น.	50.69	490	50.69	8.48	25.70	153.60
6/7/2012 11:30 น.	51.67	510	51.67	8.45	28.30	
7/7/2012 13:30 น.	52.75	530	52.75	8.51	28.40	164.60
11/7/2012 12:00 น.	56.69	440	56.69	8.33	26.60	503.90

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง		ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอนต/ล.)	(มก.แคลเซียม คาร์บอนต/ล.)	ละลายน้ำ	(มก./ล.)			
12/7/2012 12:30 น.	57.71	410	57.71	8.38	26.80	398.60		
13/7/2012 12:00 น.	58.69	450	58.69	8.33	26.60	387.30		
14/7/2012 12:15 น.	59.70	410	59.70	8.35	26.40			
15/7/2012 12:15 น.	60.70	380	60.70	8.30	25.80	300.80		
16/7/2012 13:00 น.	61.73	440	61.73	8.35	25.90	285.80		
17/7/2012 11:30 น.	62.67	430	62.67	8.34	26.70	274.50		
18/7/2012 11:45 น.	63.68	450	63.68	8.50	26.30	150.40		
19/7/2012 10:00 น.	64.60	450	64.60	8.37	26.40	115.30		
21/7/2012 12:30 น.	66.71	450	66.71	8.37	27.10	125.30		
22/7/2012 12:10 น.	67.69	430	67.69	8.40	28.60	111.70		
23/7/2012 12:10 น.	68.69	500	68.69	8.46	27.30	117.60		
24/7/2012 11:30 น.	69.67	460	69.67	8.32	25.00	98.00		
25/7/2012 12:15 น.	70.70	500	70.70	8.36	26.60	73.70		
26/7/2012 11:20 น.	71.66	500	71.66	8.37	26.80			
27/7/2012 12:00 น.	72.69	500	72.69	8.37	25.60	32.00		
28/7/2012 19:30 น.	74.00	230	74.70	7.64	26.40			

ตารางที่ ค-11 ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าซีโอดี ในระหว่างการ
การศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบ
ท่อยาว (ที่สัดส่วน C:N = 5:1) บริเวณก่อนเข้าท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง		ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอนต/ล.)	(มก.แคลเซียม คาร์บอนต/ล.)	ละลายน้ำ	(มก./ล.)			
1/8/2012 12:15 น.	77.70	240	7.10	8.13	28.50	1336.30		
2/8/2012 11:45 น.	78.68	250	7.00	8.12	28.60	1315.20		
3/8/2012 12:00 น.	79.69	250	7.00	8.19	28.60			
4/8/2012 14:00 น.	80.77	280	6.90	8.23	28.80	975.40		
5/8/2012 12:00 น.	81.69	290	6.80	8.45	29.20			
6/8/2012 11:45 น.	82.68	360	6.90	8.54	28.70	721.90		
7/8/2012 11:45 น.	83.68	320	6.60	8.23	28.60	576.00		
8/8/2012 12:30 น.	84.71	370	6.80	8.30	28.60	537.60		
9/8/2012 10:45 น.	85.64	350	7.00	8.38	28.60	437.70		
10/8/2012 12:00 น.	86.69	390	7.10	8.33	28.00	284.20		
13/8/2012 12:30 น.	87.71	410	6.40	8.23	28.30			

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)			
14/8/2012 11:00 น.	89.71	410	6.70	8.32	28.50	
15/8/2012 10:45 น.	90.65	420	6.90	8.31	28.50	360.90
16/8/2012 11:00 น.	91.64	420	7.10	8.33	29.00	274.50
17/8/2012 10:45 น.	92.65	420	7.20	8.35	28.70	172.90
18/8/2012 12:30 น.	93.64	420	7.30	8.36	28.80	161.70
19/8/2012 11:45 น.	94.71	420	7.30	8.33	28.70	140.40
20/8/2012 10:50 น.	95.68	450	7.20	8.43	28.30	107.80
21/8/2012 10:50 น.	96.64	460	6.50	8.34	28.80	86.50
23/8/2012 11:45 น.	98.65	80	6.70	7.83	28.70	
25/8/2012 12:30 น.	99.68	80	6.60	7.57	28.80	1354.60
27/8/2012 12:00 น.	100.69	80	6.50	7.71	28.60	1240.30
28/8/2012 12:00 น.	101.71	100	6.60	7.83	28.70	1191.30
29/8/2012 11:45 น.	103.69	120	6.70	7.83	28.50	
30/8/2012 11:30 น.	104.69	140	6.70	7.89	29.10	936.00
31/8/2012 12:45 น.	105.68	150	6.60	7.93	28.40	776.00
1/9/2012 10:45 น.	106.67	150	6.70	7.84	28.50	692.00
3/9/2012 11:45 น.	107.72	210	6.60	8.01	28.60	560.00
4/9/2012 11:45 น.	108.64	210	6.60	8.12	28.40	468.00
5/9/2012 11:45 น.	110.68	230	6.40	8.06	28.70	266.60
6/9/2012 14:20 น.	111.68	290	6.20	8.02	28.20	248.00
7/9/2012 18:20 น.	112.68	300	6.60	8.12	28.90	186.60
8/9/2012 12:30 น.	113.78	240	6.20	8.38	28.50	144.00
10/9/2012 17:00 น.	114.95	300	6.60	8.36	28.40	
11/9/2012 12:00 น.	115.71	290	6.50	8.34	28.70	1458.20
12/9/2012 11:25 น.	117.90	330	7.10	8.55	29.10	1050.50
13/9/2012 11:15 น.	118.69	320	7.00	8.38	28.80	1050.50
14/9/2012 14:15 น.	119.66	370	7.10	8.49	28.40	987.80
15/9/2012 18:00 น.	120.66	380	6.80	8.53	28.50	
16/9/2012 13:30 น.	121.78	80	6.60	8.43	28.70	
17/9/2012 12:00 น.	122.94	80	6.30	7.50	28.20	
18/9/2012 12:00 น.	123.75	90	5.30	7.60	27.90	
19/9/2012 12:00 น.	124.69	100	5.50	7.66	28.30	1112.90
20/9/2012 16:00 น.	126.69	130	6.60	8.02	28.20	962.60
22/9/2012 12:30 น.	127.85	140	6.50	8.05	27.90	752.00
24/9/2012 11:30 น.	129.85	160	6.20	8.07	28.40	815.90
25/9/2012 16:30 น.	131.67	170	6.10	8.00	27.80	714.40

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง		ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)					
27/9/2012 16:30 น.	134.88	180	6.60			8.25	28.50	651.70
28/9/2012 12:00 น.	135.69	200	6.50			8.33	28.50	518.90

ตารางที่ ค-12 ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าซีโอดี ในระหว่างการ
การศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบ
ท่อยาว (ที่สัดส่วน C:N = 5:1) บริเวณทางออกจากท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง		ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)					
1/8/2012 12:15 น.	77.70	240	1.50			7.76	28.40	1290.20
2/8/2012 11:45 น.	78.68	260	1.20			7.75	27.80	1190.40
3/8/2012 12:00 น.	79.69	250	0.60			7.86	27.20	998.40
4/8/2012 14:00 น.	80.77	290	0.50			7.94	27.80	
5/8/2012 12:00 น.	81.69	330	1.30			8.35	28.30	645.10
6/8/2012 11:45 น.	82.68	360	1.30			8.47	28.20	
7/8/2012 11:45 น.	83.68	370	1.10			8.21	28.30	499.20
8/8/2012 12:30 น.	84.71	410	1.20			8.12	28.10	384.00
9/8/2012 10:45 น.	85.64	450	1.50			8.29	26.60	284.20
10/8/2012 12:00 น.	86.69	450	1.20			8.25	25.20	284.20
13/8/2012 12:30 น.	87.71	460	0.80			8.32	26.30	263.20
14/8/2012 11:00 น.	89.71	420	1.30			8.25	27.20	
15/8/2012 10:45 น.	90.65	420	0.90			8.34	26.40	
16/8/2012 11:00 น.	91.64	450	0.90			8.23	26.90	236.80
17/8/2012 10:45 น.	92.65	480	1.50			8.32	25.60	236.80
18/8/2012 12:30 น.	93.64	480	1.20			8.38	26.70	140.40
19/8/2012 11:45 น.	94.71	430	2.20			8.35	24.60	125.30
20/8/2012 10:50 น.	95.68	430	2.10			8.41	26.50	80.80
21/8/2012 10:50 น.	96.64	440	2.00			8.43	27.50	56.40
23/8/2012 11:45 น.	98.65	90	0.50			8.10	27.40	
25/8/2012 12:30 น.	99.68	100	0.50			8.48	26.70	
27/8/2012 12:00 น.	100.69	120	0.30			8.50	26.80	1191.40
28/8/2012 12:00 น.	101.71	170	0.50			8.52	27.90	1028.20
29/8/2012 11:45 น.	103.69	190	1.10			8.45	27.40	922.10
30/8/2012 11:30 น.	104.69	230	1.20			8.35	27.30	720.00

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)			
31/8/2012 12:45 น.	105.68	220	0.50	8.33	27.20	640.00
1/9/2012 10:45 น.	106.67	240	0.80	8.30	27.10	520.00
3/9/2012 11:45 น.	107.72	320	0.90	8.35	26.80	428.00
4/9/2012 11:45 น.	108.64	330	1.20	8.37	25.50	248.00
5/9/2012 11:45 น.	110.68	340	0.60	8.12	26.20	205.30
6/9/2012 14:20 น.	111.68	270	0.40	8.22	27.50	160.00
7/9/2012 18:20 น.	112.68	290	0.60	8.32	27.30	112.00
8/9/2012 12:30 น.	113.78	280	0.80	8.42	27.80	
10/9/2012 17:00 น.	114.95	300	0.60	8.34	27.50	
11/9/2012 12:00 น.	115.71	320	1.10	8.35	28.10	1050.50
12/9/2012 11:25 น.	117.90	390	1.20	8.32	26.80	1050.50
13/9/2012 11:15 น.	118.69	400	0.80	8.35	26.30	940.80
14/9/2012 14:15 น.	119.66	430	0.50	8.36	26.80	
15/9/2012 18:00 น.	120.66	360	0.70	8.46	26.60	
16/9/2012 13:30 น.	121.78	100	1.20	8.44	26.70	
17/9/2012 12:00 น.	122.94	110	1.10	8.32	27.70	
18/9/2012 12:00 น.	123.75	130	0.50	8.34	27.50	
19/9/2012 12:00 น.	124.69	190	0.40	8.37	26.40	940.80
20/9/2012 16:00 น.	126.69	180	0.30	8.49	26.50	857.30
22/9/2012 12:30 น.	127.85	200	0.50	8.51	26.50	827.20
24/9/2012 11:30 น.	129.85	210	0.40	8.53	25.30	631.70
25/9/2012 16:30 น.	131.67	250	0.60	8.35	26.60	526.40
27/9/2012 16:30 น.	134.88	300	0.50	8.53	26.70	488.80
28/9/2012 12:00 น.	135.69	310	0.40	8.35	26.80	451.20

ตารางที่ ค-13 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS เมื่อแปรผันอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ 1:1 2:1 และ 5:1

ANOVA (VAR00002)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	5702744.11	2	2851372.055	7.667	0.017
Within Groups	2603471.254	7	371924.465		
Total	8306215.364	9			

Duncan

อัตราส่วนคาร์บอนต่อ ไนโตรเจน	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
1:1	3	1282.7667	
2:1	3	1568.0000	
5:1	4		2950.2750
Sig.		.568	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.273.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used.

Type I error levels are not guaranteed.

มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การทดลองที่ 2.2 การศึกษาระยะเวลากักเก็บน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว

ตารางที่ ค-14 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตของการศึกษาระยะเวลากักเก็บน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว (ที่ $RT = 2$ ชม.)
บริเวณก่อนเข้าท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2012 17:30 น.	0.00	0.145	0.004	0.065	0.001	0.260	0.014
17/10/2012 13:00 น.	0.81	0.100	0.004	0.363	0.032	99.032	0.037
18/10/2012 12:45 น.	1.80	0.000	0.000	1.638	0.168	95.743	2.039
19/10/2012 23:50 น.	3.26	0.000	0.000	3.711	0.131	94.345	0.260
20/10/2012 12:15 น.	3.78	0.000	0.000	5.607	0.060	90.249	1.032
21/10/2012 12:20 น.	4.78	0.000	0.000	6.993	0.306	84.373	2.152
22/10/2012 11:30 น.	5.75	0.000	0.000	12.710	0.533	70.854	2.568
23/10/2012 12:45 น.	6.80	0.000	0.000	10.535	0.172	73.030	0.762
24/10/2012 12:15 น.	7.78	0.000	0.000	10.875	0.245	69.715	0.267
27/10/2012 13:15 น.	10.82	0.000	0.000	18.662	0.969	51.306	1.911
28/10/2012 15:30 น.	11.92	0.000	0.000	20.864	0.512	44.508	2.540
29/10/2012 11:00 น.	12.73	0.000	0.000	18.598	0.465	34.850	1.565
30/10/2012 12:00 น.	13.77	0.000	0.000	19.887	1.085	30.809	1.789
31/10/2012 12:00 น.	14.77	0.000	0.000	23.583	1.322	27.915	2.666
1/11/2012 12:00 น.	15.77	0.000	0.000	22.992	1.015	24.381	2.201
2/11/2012 12:00 น.	16.77	0.000	0.000	23.537	0.575	20.702	1.322
3/11/2012 14:30 น.	17.88	0.000	0.000	23.312	1.017	19.407	1.241
4/11/2012 11:00 น.	18.73	0.000	0.000	25.470	2.219	16.352	1.558

ตารางที่ ค-15 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตของการศึกษาระยะเวลากักเก็บน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว (ที่ $RT = 2$ ชม.)
บริเวณทางออกจากท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/10/2012 17:30 น.	0.00	0.000	0.000	1.206	0.028	0.321	1.056
17/10/2012 13:00 น.	0.81	0.000	0.000	3.904	0.196	94.261	1.092

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
18/10/2012 12:45 น.	1.80	0.000	0.000	6.163	0.260	87.818	3.635
19/10/2012 23:50 น.	3.26	0.015	0.018	8.009	0.255	82.917	3.068
20/10/2012 12:15 น.	3.78	0.001	0.001	7.465	0.312	78.484	2.430
21/10/2012 12:20 น.	4.78	0.000	0.000	13.979	1.032	65.720	1.353
22/10/2012 11:30 น.	5.75	0.000	0.000	11.088	0.553	62.456	1.570
23/10/2012 12:45 น.	6.80	0.000	0.000	12.462	0.274	65.060	1.103
24/10/2012 12:15 น.	7.78	0.000	0.000	13.773	1.150	59.332	1.610
27/10/2012 13:15 น.	10.82	0.000	0.000	18.789	0.435	44.703	3.611
28/10/2012 15:30 น.	11.92	0.001	0.002	19.183	0.473	31.458	2.371
29/10/2012 11:00 น.	12.73	0.000	0.000	21.117	0.842	29.096	3.952
30/10/2012 12:00 น.	13.77	0.000	0.000	21.394	0.696	25.252	0.935
31/10/2012 12:00 น.	14.77	0.000	0.000	23.915	0.669	21.283	2.042
1/11/2012 12:00 น.	15.77	0.000	0.000	23.348	0.457	12.661	0.242
2/11/2012 12:00 น.	16.77	0.000	0.000	24.842	0.518	10.198	3.754
3/11/2012 14:30 น.	17.88	0.001	0.001	22.672	0.074	9.996	0.660
4/11/2012 11:00 น.	18.73	0.000	0.000	21.095	0.178	10.564	0.174

ตารางที่ ค-16 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตของการศึกษาระยะเวลากักเก็บน้ำ
ต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนริฟิเคชันในระบบท่อยาว (ที่ RT = 1.5 ชม.)
บริเวณก่อนเข้าท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
10/11/2012 18:00 น.	25.02	0.169	0.008	2.234	1.060	90.156	0.976
11/11/2012 12:30 น.	25.79	0.089	0.077	2.256	0.036	90.133	0.864
12/11/2012 10:45 น.	26.72	0.049	0.015	2.978	0.112	88.705	0.674
13/11/2012 12:00 น.	27.77	0.032	0.002	4.340	0.079	82.764	0.578
14/11/2012 14:30 น.	28.88	0.023	0.009	6.394	0.210	79.398	0.615
15/11/2012 11:30 น.	29.75	0.027	0.004	7.634	0.231	76.060	1.689
16/11/2012 14:30 น.	30.88	0.028	0.002	11.427	0.337	71.545	0.240
17/11/2012 15:30 น.	31.92	0.032	0.005	13.412	0.230	69.731	1.131
18/11/2012 10:30 น.	32.71	0.028	0.006	16.475	0.571	63.211	1.036
19/11/2012 11:30 น.	33.75	0.015	0.009	19.958	0.411	58.249	0.437
22/11/2012 11:45 น.	36.76	0.010	0.004	22.441	1.250	49.904	0.596

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
23/11/2012 12:45 น.	37.80	0.004	0.006	23.480	0.129	47.508	1.155
25/11/2012 11:00 น.	39.73	0.001	0.001	20.035	0.626	49.666	7.076
26/11/2012 11:30 น.	40.75	0.001	0.001	23.939	0.319	45.945	1.181
27/11/2012 11:10 น.	41.74	0.003	0.005	23.036	0.439	42.399	8.278
28/11/2012 14:00 น.	42.85	0.014	0.021	23.567	0.334	41.685	3.871
29/11/2012 11:30 น.	43.75	0.000	0.000	22.398	0.820	39.594	0.992
30/11/2012 14:00 น.	44.85	0.000	0.000	26.297	1.138	29.637	1.026
1/12/2012 14:30 น.	45.88	0.000	0.000	27.906	0.999	29.571	0.724
2/12/2012 12:15 น.	46.78	0.000	0.000	27.079	0.534	28.651	1.087
4/12/2012 12:00 น.	48.77	0.000	0.000	27.259	1.109	27.608	1.616
5/12/2012 15:00 น.	49.90	0.000	0.000	29.113	0.366	21.513	0.500
6/12/2012 13:30 น.	50.83	0.000	0.000	30.228	0.108	18.613	1.490
7/12/2012 11:30 น.	51.75	0.000	0.000	28.569	1.632	19.785	0.759
8/12/2012 13:50 น.	52.85	0.000	0.000	26.869	0.946	17.568	1.552
11/12/2012 12:30 น.	55.79	0.000	0.000	33.074	1.204	15.459	6.773
12/12/2012 16:45 น.	56.97	0.028	0.005	33.996	2.413	10.520	1.647
13/12/2012 12:40 น.	57.80	0.086	0.006	31.641	0.575	9.203	2.721
14/12/2012 12:30 น.	58.79	0.129	0.037	32.521	0.976	9.023	2.723

ตารางที่ ค-17 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตของการศึกษาระยะเวลากักเก็บน้ำ
ต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว (ที่ RT = 1.5 ชม.)
บริเวณทางออกจากท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
10/11/2012 18:00 น.	25.02	0.049	0.003	3.294	0.160	89.857	1.120
11/11/2012 12:30 น.	25.79	0.039	0.011	3.892	0.116	86.335	0.830
12/11/2012 10:45 น.	26.72	0.039	0.004	4.849	0.136	81.534	0.174
13/11/2012 12:00 น.	27.77	0.034	0.003	7.479	0.114	81.680	0.533
14/11/2012 14:30 น.	28.88	0.026	0.002	13.473	0.111	71.773	0.165
15/11/2012 11:30 น.	29.75	0.040	0.003	13.641	0.177	68.850	0.207
16/11/2012 14:30 น.	30.88	0.046	0.006	15.487	0.969	64.177	1.548
17/11/2012 15:30 น.	31.92	0.051	0.011	19.715	1.262	57.008	1.788
18/11/2012 10:30 น.	32.71	0.025	0.005	16.920	0.064	59.847	2.229

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
19/11/2012 11:30 น.	33.75	0.025	0.005	19.764	0.528	48.604	0.154
22/11/2012 11:45 น.	36.76	0.000	0.000	19.167	0.583	50.856	0.613
23/11/2012 12:45 น.	37.80	0.000	0.000	19.145	1.293	49.141	2.003
25/11/2012 11:00 น.	39.73	0.000	0.000	22.956	0.580	45.741	2.192
26/11/2012 11:30 น.	40.75	0.000	0.000	23.434	0.453	43.164	5.670
27/11/2012 11:10 น.	41.74	0.000	0.000	24.204	2.369	35.458	2.226
28/11/2012 14:00 น.	42.85	0.000	0.000	24.151	0.845	36.752	1.275
29/11/2012 11:30 น.	43.75	0.000	0.000	26.988	1.398	26.971	3.996
30/11/2012 14:00 น.	44.85	0.004	0.007	27.154	0.683	24.900	0.893
1/12/2012 14:30 น.	45.88	0.000	0.000	28.657	0.788	21.490	1.018
2/12/2012 12:15 น.	46.78	0.000	0.000	28.161	1.015	21.464	1.781
4/12/2012 12:00 น.	48.77	0.000	0.000	29.629	0.719	21.622	0.460
5/12/2012 15:00 น.	49.90	0.000	0.000	28.242	1.960	18.257	3.609
6/12/2012 13:30 น.	50.83	0.000	0.000	29.004	0.781	17.774	0.360
7/12/2012 11:30 น.	51.75	0.000	0.000	28.895	1.659	17.697	3.194
8/12/2012 13:50 น.	52.85	0.013	0.022	27.087	1.019	14.105	1.549
11/12/2012 12:30 น.	55.79	0.034	0.004	32.889	2.006	11.207	0.783
12/12/2012 16:45 น.	56.97	0.074	0.019	32.804	1.260	8.930	3.389
13/12/2012 12:40 น.	57.80	0.194	0.003	30.124	0.981	7.307	1.261
14/12/2012 12:30 น.	58.79	0.000	0.000	30.124	0.981	7.302	1.245

ตารางที่ ค-18 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตของการศึกษาระยะเวลากักเก็บน้ำ
ต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนริฟิเคชันในระบบท่อยาว (ที่ RT = 1 ชม.)
บริเวณก่อนเข้าท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
20/12/2012 12:00 น.	64.77	0.287	0.014	3.106	0.084	94.028	2.464
21/12/2012 16:45 น.	65.97	0.092	0.009	3.304	0.154	92.644	1.126
22/12/2012 12:00 น.	66.77	0.000	0.000	3.554	0.099	92.439	0.531
24/12/2012 12:00 น.	68.77	0.000	0.000	4.496	0.080	90.512	2.193
25/12/2012 12:00 น.	69.77	0.000	0.000	4.437	0.182	93.943	0.606
26/12/2012 11:00 น.	70.73	0.000	0.000	4.779	0.290	92.688	0.584
27/12/2012 11:45 น.	71.76	0.000	0.000	5.406	0.101	89.666	1.017

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
28/12/2012 11:00 น.	72.73	0.000	0.000	6.154	0.169	89.511	0.851
29/12/2012 13:00 น.	73.81	0.000	0.000	6.940	0.053	87.675	4.585
30/12/2012 13:00 น.	74.81	0.000	0.000	8.118	0.104	83.177	6.990
31/12/2012 18:00 น.	76.02	0.000	0.000	9.390	0.217	84.412	4.780
1/1/2013 14:30 น.	76.88	0.000	0.000	10.194	0.472	81.728	1.724
2/1/2013 17:45 น.	78.01	0.000	0.000	10.058	0.329	74.632	2.289
3/1/2013 10:30 น.	78.71	0.000	0.000	11.842	0.669	65.159	1.551
4/1/2013 14:30 น.	79.88	0.000	0.000	12.635	1.419	64.254	2.299
5/1/2013 14:00 น.	80.85	0.000	0.000	12.810	0.624	61.003	0.883
7/1/2013 12:00 น.	82.77	0.000	0.000	12.861	0.088	62.297	2.497
8/1/2013 10:30 น.	83.71	0.000	0.000	15.877	0.335	52.415	2.084
10/1/2013 14:30 น.	85.88	0.000	0.000	18.649	0.694	44.834	3.812
11/1/2013 11:00 น.	86.73	0.000	0.000	19.586	0.884	46.290	5.846
13/1/2013 11:00 น.	88.73	0.000	0.000	22.649	1.221	40.991	6.969
15/1/2013 12:00 น.	90.77	0.000	0.000	23.189	0.459	42.788	5.480
17/1/2013 11:00 น.	92.73	0.000	0.000	23.987	1.536	41.478	2.904

ตารางที่ ค-19 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตของการศึกษาระยะเวลากักเก็บน้ำ
ต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนริฟิเคชันในระบบท่อยาว (ที่ RT = 1 ชม.)
บริเวณทางออกจากท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
20/12/2012 12:00 น.	64.77	0.084	0.003	3.514	0.073	92.568	3.487
21/12/2012 16:45 น.	65.97	0.027	0.044	3.601	0.022	91.944	3.622
22/12/2012 12:00 น.	66.77	0.019	0.018	5.008	0.077	89.955	2.230
24/12/2012 12:00 น.	68.77	0.000	0.000	4.800	0.113	90.249	1.613
25/12/2012 12:00 น.	69.77	0.000	0.000	5.203	0.159	91.374	1.817
26/12/2012 11:00 น.	70.73	0.000	0.000	5.659	0.114	89.048	0.548
27/12/2012 11:45 น.	71.76	0.000	0.000	6.646	0.112	82.630	0.301
28/12/2012 11:00 น.	72.73	0.000	0.000	3.982	0.088	79.720	0.733
29/12/2012 13:00 น.	73.81	0.000	0.000	8.539	0.299	77.974	4.069
30/12/2012 13:00 น.	74.81	0.000	0.000	6.782	0.119	77.417	2.553
31/12/2012 18:00 น.	76.02	0.000	0.000	10.160	0.383	78.233	3.077

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1/1/2013 14:30 น.	76.88	0.000	0.000	11.755	0.329	73.252	0.451
2/1/2013 17:45 น.	78.01	0.000	0.000	10.587	0.889	66.301	0.132
3/1/2013 10:30 น.	78.71	0.000	0.000	11.992	0.121	63.766	1.428
4/1/2013 14:30 น.	79.88	0.000	0.000	13.577	0.390	64.239	0.994
5/1/2013 14:00 น.	80.85	0.000	0.000	15.687	0.285	58.116	1.197
7/1/2013 12:00 น.	82.77	0.000	0.000	15.424	1.841	56.436	0.839
8/1/2013 10:30 น.	83.71	0.000	0.000	19.609	0.333	45.273	2.788
10/1/2013 14:30 น.	85.88	0.000	0.000	21.366	1.395	47.785	3.827
11/1/2013 11:00 น.	86.73	0.000	0.000	22.893	0.778	44.022	0.630
13/1/2013 11:00 น.	88.73	0.000	0.000	26.448	0.470	42.04	0.31
15/1/2013 12:00 น.	90.77	0.000	0.000	24.310	0.282	24.39	0.50
17/1/2013 11:00 น.	92.73	0.000	0.000	24.310	0.282	23.34	0.50

ตารางที่ ค-20 ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าซีโอดี ในระหว่าง
การการศึกษาระยะเวลากักเก็บน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว
(ที่ RT = 2 ชม.) บริเวณก่อนเข้าท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)			
16/10/2012 17:30 น.	0.00	40	6.80	7.76	28.40	
17/10/2012 13:00 น.	0.81	50	6.70	7.79	28.50	1235.00
18/10/2012 12:45 น.	1.80	50	6.50	7.76	28.30	1383.80
19/10/2012 23:50 น.	3.26	50	6.60	7.77	28.40	1242.50
20/10/2012 12:15 น.	3.78	50	6.60	7.75	28.70	1093.70
21/10/2012 12:20 น.	4.78	80	6.50	7.54	29.10	944.80
22/10/2012 11:30 น.	5.75	80	5.60	7.90	29.30	915.10
23/10/2012 12:45 น.	6.80	100	7.20	7.86	28.70	586.60
24/10/2012 12:15 น.	7.78	110	7.60	7.88	28.50	718.20
27/10/2012 13:15 น.	10.82	150	6.80	7.97	29.20	430.10
28/10/2012 15:30 น.	11.92	170	7.50	7.98	29.30	409.10
29/10/2012 11:00 น.	12.73	180	7.40	8.03	28.80	266.20
30/10/2012 12:00 น.	13.77	190	6.50	8.13	28.90	317.80
31/10/2012 12:00 น.	14.77	190	6.20	8.03	28.80	273.90
1/11/2012 12:00 น.	15.77	190	6.60	8.04	29.20	219.40

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)			
2/11/2012 12:00 น.	16.77	200	6.30	8.12	28.50	190.90
3/11/2012 14:30 น.	17.88	210	6.60	8.23	28.80	134.40
4/11/2012 11:00 น.	18.73	240	6.50	8.34	28.90	103.70

ตารางที่ ค-21 ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าซีโอดี ในระหว่าง
การการศึกษาระยะเวลากักเก็บน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว
(ที่ RT = 2 ชม.) บริเวณทางออกจากท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)			
16/10/2012 17:30 น.	0.00	50	0.60	7.02	29.10	
17/10/2012 13:00 น.	0.81	40	0.50	7.21	27.60	1382.40
18/10/2012 12:45 น.	1.80	70	0.50	7.08	28.10	1152.00
19/10/2012 23:50 น.	3.26	80	0.60	7.02	29.90	1152.00
20/10/2012 12:15 น.	3.78	90	0.50	7.03	27.70	1029.10
21/10/2012 12:20 น.	4.78	100	0.50	7.13	30.30	875.50
22/10/2012 11:30 น.	5.75	100	0.40	7.44	28.70	774.60
23/10/2012 12:45 น.	6.80	150	0.50	7.50	28.80	699.40
24/10/2012 12:15 น.	7.78	140	0.80	7.60	28.20	575.30
27/10/2012 13:15 น.	10.82	180	1.30	7.33	28.30	323.40
28/10/2012 15:30 น.	11.92	190	0.90	7.35	28.20	345.60
29/10/2012 11:00 น.	12.73	200	0.80	7.45	28.00	295.70
30/10/2012 12:00 น.	13.77	200	0.60	7.66	27.90	245.80
31/10/2012 12:00 น.	14.77	200	0.80	7.65	27.70	207.40
1/11/2012 12:00 น.	15.77	200	0.50	7.73	26.40	180.50
2/11/2012 12:00 น.	16.77	210	0.50	8.14	26.80	153.60
3/11/2012 14:30 น.	17.88	230	0.60	8.13	27.70	107.50
4/11/2012 11:00 น.	18.73	250	0.60	8.22	29.50	92.12

ตารางที่ ค-22 ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าซีโอดี ในระหว่าง
การการศึกษาระยะเวลากักเก็บน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว
(ที่ RT = 1.5 ชม.) บริเวณก่อนเข้าท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)			
10/11/2012 18:00 น.	25.02	100	6.00	8.05	29.20	
11/11/2012 12:30 น.	25.79	110	5.90	8.09	29.80	1353.60
12/11/2012 10:45 น.	26.72	100	5.90	7.90	29.20	1203.20
13/11/2012 12:00 น.	27.77	100	5.80	7.80	28.90	1180.60
14/11/2012 14:30 น.	28.88	110	6.80	8.04	29.40	1030.20
15/11/2012 11:30 น.	29.75	120	6.00	8.21	29.40	932.50
16/11/2012 14:30 น.	30.88	130	6.30	8.30	27.80	917.40
17/11/2012 15:30 น.	31.92	140	6.70	8.24	26.50	834.90
18/11/2012 10:30 น.	32.71	140	7.00	7.92	27.30	599.80
19/11/2012 11:30 น.	33.75	190	6.90	8.03	28.40	705.60
22/11/2012 11:45 น.	36.76	180	7.00	8.45	29.20	560.60
23/11/2012 12:45 น.	37.80	190	6.60	8.54	29.60	560.60
25/11/2012 11:00 น.	39.73	200	6.70	8.56	29.70	339.70
26/11/2012 11:30 น.	40.75	220	5.70	8.55	27.80	325.40
27/11/2012 11:10 น.	41.74	180	6.10	8.22	28.80	325.40
28/11/2012 14:00 น.	42.85	200	6.90	8.33	28.30	297.90
29/11/2012 11:30 น.	43.75	200	6.90	8.43	28.50	295.30
30/11/2012 14:00 น.	44.85	220	5.80	8.47	28.90	269.10
1/12/2012 14:30 น.	45.88	210	5.40	8.25	29.00	261.30
2/12/2012 12:15 น.	46.78	210	5.80	8.14	29.10	
4/12/2012 12:00 น.	48.77	230	6.00	8.21	29.40	198.60
5/12/2012 15:00 น.	49.90	230	6.30	8.12	29.30	109.80
6/12/2012 13:30 น.	50.83	230	6.70	8.06	29.40	78.40
7/12/2012 11:30 น.	51.75	240	6.60	8.03	29.20	78.40
8/12/2012 13:50 น.	52.85	240	6.50	8.18	29.20	
11/12/2012 12:30 น.	55.79	260	6.50	8.21	26.70	19.60
12/12/2012 16:45 น.	56.97	260	6.60	8.22	28.30	9.80
13/12/2012 12:40 น.	57.80	280	7.00	8.27	28.60	
14/12/2012 12:30 น.	58.79	270	7.00	8.29	28.60	10.90

ตารางที่ ค-23 ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าซีโอดี ในระหว่าง
การการศึกษาระยะเวลากักเก็บน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว
(ที่ RT = 1.5 ชม.) บริเวณทางออกจากท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)			
10/11/2012 18:00 น.	25.02	100	1.30	7.13	25.02	
11/11/2012 12:30 น.	25.79	110	1.00	7.16	25.79	1504.00
12/11/2012 10:45 น.	26.72	120	0.90	7.18	26.72	1158.10
13/11/2012 12:00 น.	27.77	120	1.20	7.55	27.77	1052.80
14/11/2012 14:30 น.	28.88	120	1.30	7.65	28.88	827.20
15/11/2012 11:30 น.	29.75	120	0.80	7.74	29.75	891.10
16/11/2012 14:30 น.	30.88	150	0.80	7.64	30.88	795.80
17/11/2012 15:30 น.	31.92	160	1.60	7.53	31.92	784.00
18/11/2012 10:30 น.	32.71	170	1.20	7.41	32.71	717.40
19/11/2012 11:30 น.	33.75	180	2.50	7.56	33.75	627.20
22/11/2012 11:45 น.	36.76	210	1.80	7.82	35.80	533.10
23/11/2012 12:45 น.	37.80	200	1.80	7.48	36.76	482.10
25/11/2012 11:00 น.	39.73	200	1.60	7.56	39.73	376.30
26/11/2012 11:30 น.	40.75	180	2.10	7.67	40.75	337.10
27/11/2012 11:10 น.	41.74	220	2.00	7.72	41.74	258.70
28/11/2012 14:00 น.	42.85	200	1.90	7.97	42.85	277.00
29/11/2012 11:30 น.	43.75	220	1.90	7.45	43.75	250.80
30/11/2012 14:00 น.	44.85	230	2.10	7.76	44.85	209.10
1/12/2012 14:30 น.	45.88	220	2.00	7.78	45.88	224.70
2/12/2012 12:15 น.	46.78	220	2.30	7.89	46.78	
4/12/2012 12:00 น.	48.77	280	2.50	7.96	48.77	162.70
5/12/2012 15:00 น.	49.90	250	2.20	8.03	49.90	84.30
6/12/2012 13:30 น.	50.83	240	2.00	8.26	50.83	64.70
7/12/2012 11:30 น.	51.75	240	2.10	8.29	51.75	45.10
8/12/2012 13:50 น.	52.85	250	2.60	8.12	52.85	
11/12/2012 12:30 น.	55.79	250	2.80	8.12	55.79	25.10
12/12/2012 16:45 น.	56.97	250	3.10	8.26	56.97	9.40
13/12/2012 12:40 น.	57.80	260	2.80	8.31	57.80	
14/12/2012 12:30 น.	58.79	270	2.30	8.42	58.79	

ตารางที่ ค-24 ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าซีโอดี ในระหว่าง
การการศึกษาระยะเวลากักเก็บน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว
(ที่ RT = 1 ชม.) บริเวณก่อนเข้าท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง	ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)				
20/12/2012 12:00 น.	64.77	110	6.90		7.79	28.60	1520.90
21/12/2012 16:45 น.	65.97	120	6.80		7.92	28.80	1317.10
22/12/2012 12:00 น.	66.77	110	6.60		7.88	28.40	
24/12/2012 12:00 น.	68.77	110	6.20		7.93	27.30	1019.20
25/12/2012 12:00 น.	69.77	110	6.50		7.85	27.70	760.50
26/12/2012 11:00 น.	70.73	120	6.70		7.81	27.30	862.40
27/12/2012 11:45 น.	71.76	120	6.50		7.79	29.20	380.20
28/12/2012 11:00 น.	72.73	130	6.50		7.84	28.30	497.80
29/12/2012 13:00 น.	73.81	130	6.40		7.83	29.10	666.40
30/12/2012 13:00 น.	74.81	140	6.60		7.85	29.20	697.80
31/12/2012 18:00 น.	76.02	150	6.80		8.03	28.80	599.70
1/1/2013 14:30 น.	76.88	140	6.50		8.02	27.40	
2/1/2013 17:45 น.	78.01	140	6.80		8.06	27.60	
3/1/2013 10:30 น.	78.71	140	6.60		8.08	27.70	341.00
4/1/2013 14:30 น.	79.88	150	6.50		8.01	27.90	352.80
5/1/2013 14:00 น.	80.85	150	6.40		8.04	28.20	262.60
7/1/2013 12:00 น.	82.77	160	6.30		8.00	28.10	352.80
8/1/2013 10:30 น.	83.71	160	6.60		8.03	28.30	289.50
10/1/2013 14:30 น.	85.88	150	6.40		8.01	28.70	263.20
11/1/2013 11:00 น.	86.73	170	7.00		8.03	28.40	243.10
13/1/2013 11:00 น.	88.73	180	7.10		8.03	28.70	142.90
15/1/2013 12:00 น.	90.77	180	6.80		8.06	28.30	120.70
17/1/2013 11:00 น.	92.73	190	6.00		8.10	28.40	

ตารางที่ ค-25 ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าซีโอดี ในระหว่าง
การการศึกษาระยะเวลากักเก็บน้ำต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในระบบท่อยาว
(ที่ RT = 1 ชม.) บริเวณทางออกจากท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง		ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)					
20/12/2012 12:00 น.	64.77	110	2.40			7.82	26.00	1207.40
21/12/2012 16:45 น.	65.97	120	2.40			7.83	25.70	1317.10
22/12/2012 12:00 น.	66.77	110	2.10			7.82	26.20	
24/12/2012 12:00 น.	68.77	100	2.40			7.61	26.80	1097.60
25/12/2012 12:00 น.	69.77	120	2.70			7.74	27.30	1019.20
26/12/2012 11:00 น.	70.73	120	2.20			7.68	27.40	917.30
27/12/2012 11:45 น.	71.76	120	2.00			7.66	27.30	760.50
28/12/2012 11:00 น.	72.73	130	2.60			7.72	27.60	784.00
29/12/2012 13:00 น.	73.81	140	2.90			7.80	29.10	716.10
30/12/2012 13:00 น.	74.81	140	2.20			7.79	28.40	380.20
31/12/2012 18:00 น.	76.02	140	2.10			7.78	28.30	470.40
1/1/2013 14:30 น.	76.88	140	2.20			7.76	27.60	
2/1/2013 17:45 น.	78.01	150	2.10			7.75	27.80	
3/1/2013 10:30 น.	78.71	150	2.60			8.01	26.40	274.40
4/1/2013 14:30 น.	79.88	150	2.00			8.03	27.50	301.80
5/1/2013 14:00 น.	80.85	150	2.10			8.06	27.30	274.40
7/1/2013 12:00 น.	82.77	160	2.50			7.99	27.90	301.80
8/1/2013 10:30 น.	83.71	180	2.60			7.88	27.20	199.30
10/1/2013 14:30 น.	85.88	170	2.40			7.89	26.60	200.50
11/1/2013 11:00 น.	86.73	160	2.50			7.96	26.30	157.90
13/1/2013 11:00 น.	88.73	170	3.20			7.87	25.50	120.70
15/1/2013 12:00 น.	90.77	170	2.80			7.93	25.40	78.40
17/1/2013 11:00 น.	92.73	180	2.60			7.74	27.50	

ภาคผนวก ง

ข้อมูลคุณภาพน้ำที่ทำการตรวจวัดในการทดลองช่วงที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดดีไนทรีฟิเคชันแบบท่อยาวในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ตารางที่ ง-1 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงปลานิล

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
17/6/2013 13:40 น.	6.97	0.019	0.033	0.508	0.01	46.769	0.773
18/6/2013 12:25 น.	7.91	0.133	0.026	0.355	0.02	36.906	0.292
19/6/2013 12:30 น.	8.9	0.077	0.046	0.438	0.01	33.496	0.145
20/6/2013 13:00 น.	9.94	0.096	0.050	0.804	0.04	33.368	0.314
21/6/2013 13:30 น.	10.96	0.075	0.039	0.612	0.04	31.754	1.004
22/6/2013 12:30 น.	11.92	0.072	0.075	0.717	0.09	30.320	0.500
23/6/2013 13:45 น.	12.97	0.075	0.038	0.902	0.11	33.066	3.221
24/6/2013 13:00 น.	13.94	0.020	0.031	0.665	0.03	29.462	2.679
25/6/2013 13:30 น.	14.96	0.013	0.022	0.505	0.03	33.278	0.115
26/6/2013 12:00 น.	15.90	0.082	0.051	0.408	0.02	30.531	0.239
27/6/2013 12:00 น.	16.90	0.061	0.003	0.334	0.03	32.409	0.141
28/6/2013 12:30 น.	17.92	0.023	0.007	0.312	0.10	32.535	1.399
29/6/2013 16:00 น.	19.06	0.085	0.001	0.379	0.02	33.151	0.190
1/7/2013 13:00 น.	20.94	0.874	0.006	0.109	0.00	32.395	0.227
3/7/2013 12:30 น.	22.92	0.649	0.013	0.549	0.004	26.882	0.310
4/7/2013 12:00 น.	23.90	0.890	0.077	0.365	0.048	47.432	0.478
6/7/2013 13:00 น.	25.94	0.184	0.030	0.568	0.020	34.368	0.584
7/7/2013 14:00 น.	26.98	0.121	0.005	0.393	0.015	49.097	0.392
9/7/2013 12:00 น.	28.90	0.202	0.032	0.590	0.005	49.357	1.410
10/7/2013 12:00 น.	29.90	0.088	0.009	0.504	0.006	51.040	1.023
11/7/2013 14:00 น.	30.98	0.084	0.018	0.422	0.012	49.781	0.500
13/7/2013 13:00 น.	32.94	0.058	0.008	0.270	0.030	50.209	1.903
14/7/2013 13:00 น.	33.94	0.026	0.011	0.260	0.004	41.023	1.490
15/7/2013 12:00 น.	34.90	0.103	0.011	0.601	0.013	38.024	0.452
16/7/2013 11:30 น.	35.88	0.231	0.009	0.767	0.024	38.232	0.750
17/7/2013 11:30 น.	36.88	0.379	0.001	0.676	0.018	33.717	0.257
19/7/2013 16:00 น.	39.06	0.160	0.011	0.285	0.004	32.591	1.259

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
21/7/2013 14:30 น.	41.00	0.080	0.023	0.208	0.003	33.796	0.799
23/7/2013 13:00 น.	42.94	0.062	0.009	0.256	0.002	31.658	0.487
24/7/2013 14:00 น.	43.98	0.063	0.006	0.225	0.005	30.799	0.560
25/7/2013 19:30 น.	45.21	0.114	0.008	0.289	0.015	31.097	1.208
28/7/2013 13:00 น.	47.94	0.071	0.012	0.213	0.004	30.073	0.489
29/7/2013 13:00 น.	48.94	0.068	0.005	0.248	0.008	39.794	2.138
4/8/2013 11:30 น.	54.88	0.211	0.007	0.353	0.009	32.756	0.364
5/8/2013 12:00 น.	55.90	0.031	0.005	0.303	0.010	31.079	1.029
6/8/2013 12:00 น.	56.90	0.027	0.005	0.310	0.009	33.410	3.145
7/8/2013 15:30 น.	58.04	0.040	0.015	0.287	0.008	31.051	1.144
8/8/2013 11:30 น.	58.88	0.047	0.003	0.327	0.004	30.667	0.588
9/8/2013 14:00 น.	59.98	0.042	0.009	0.351	0.005	30.493	0.388
11/8/2013 12:00 น.	61.90	0.006	0.006	0.336	0.013	27.697	0.187
13/8/2013 16:00 น.	64.06	0.008	0.014	0.446	0.008	27.431	0.762
14/8/2013 16:00 น.	65.06	0.078	0.055	0.435	0.011	27.983	0.236
15/8/2013 14:30 น.	66.00	0.014	0.010	0.404	0.029	28.026	0.298
16/8/2013 14:00 น.	66.98	0.020	0.023	0.364	0.033	46.508	1.397
17/8/2013 16:00 น.	68.06	0.028	0.026	0.390	0.026	35.378	5.264
19/8/2013 14:00 น.	69.98	0.032	0.009	0.162	0.009	35.520	6.069
20/8/2013 13:30 น.	70.96	0.035	0.010	0.166	0.009	29.456	0.446
21/8/2013 14:00 น.	71.98	0.060	0.009	0.164	0.005	24.234	1.578

ตารางที่ ง-2 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนบริเวณก่อนเข้าท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
10/6/2013 14:30 น.	0.00	0.017	0.020	0.320	0.180	35.592	6.220
11/6/2013 11:30 น.	0.88	0.000	0.000	0.250	0.170	48.522	1.074
12/6/2013 14:45 น.	2.01	0.000	0.000	0.350	0.010	43.137	2.182
13/6/2013 12:50 น.	2.93	0.000	0.000	0.660	0.010	42.522	0.037
14/6/2013 10:30 น.	3.83	0.000	0.000	0.350	0.010	43.301	0.422
15/6/2013 14:15 น.	4.99	0.016	0.016	0.350	0.010	41.639	0.976
17/6/2013 13:40 น.	6.97	0.184	0.062	0.760	0.100	41.111	1.174
18/6/2013 12:25 น.	7.91	0.169	0.054	0.300	0.000	34.088	0.412

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
19/6/2013 12:30 น.	8.92	0.293	0.052	0.542	0.026	29.143	0.735
20/6/2013 13:00 น.	9.94	0.274	0.011	0.770	0.045	30.442	0.880
21/6/2013 13:30 น.	10.96	0.156	0.030	0.703	0.027	31.302	0.187
22/6/2013 12:30 น.	11.92	0.115	0.035	0.778	0.019	29.080	0.693
23/6/2013 13:45 น.	12.97	0.033	0.054	0.677	0.016	29.161	1.373
24/6/2013 13:00 น.	13.94	0.007	0.012	0.747	0.011	30.660	0.201
25/6/2013 13:30 น.	14.96	0.000	0.000	0.223	0.025	27.447	1.077
26/6/2013 12:00 น.	15.90	0.075	0.006	0.481	0.017	30.223	0.292
27/6/2013 12:00 น.	16.90	0.064	0.013	0.399	0.011	29.587	0.520
28/6/2013 12:30 น.	17.92	0.060	0.003	0.287	0.027	28.240	0.472
29/6/2013 16:00 น.	19.06	0.069	0.021	0.499	0.014	29.452	0.767
1/7/2013 13:00 น.	20.94	0.875	0.019	0.196	0.004	27.506	0.954
3/7/2013 12:30 น.	22.92	0.723	0.000	0.496	0.021	24.109	0.249
4/7/2013 12:00 น.	23.90	0.926	0.032	0.512	0.037	39.088	2.247
6/7/2013 13:00 น.	25.94	0.710	0.063	0.650	0.011	40.470	1.523
7/7/2013 14:00 น.	26.98	0.304	0.008	0.311	0.009	37.061	1.585
9/7/2013 12:00 น.	28.90	0.258	0.015	0.128	0.004	28.562	0.550
10/7/2013 12:00 น.	29.90	0.163	0.010	0.566	0.004	42.870	0.073
11/7/2013 14:00 น.	30.98	0.053	0.028	0.669	0.073	46.249	1.941
13/7/2013 13:00 น.	32.94	0.055	0.016	0.340	0.019	45.134	0.777
14/7/2013 13:00 น.	33.94	0.128	0.034	0.336	0.013	36.204	0.794
15/7/2013 12:00 น.	34.90	0.150	0.052	0.487	0.005	32.254	0.974
16/7/2013 11:30 น.	35.88	0.181	0.009	0.497	0.005	31.299	1.585
17/7/2013 11:30 น.	36.88	0.216	0.014	0.255	0.004	24.321	0.738
19/7/2013 16:00 น.	39.06	0.335	0.015	0.311	0.008	25.771	0.443
21/7/2013 14:30 น.	41.00	0.181	0.009	0.253	0.006	27.062	0.204
23/7/2013 13:00 น.	42.94	0.085	0.002	0.340	0.008	26.491	1.225
24/7/2013 14:00 น.	43.98	0.095	0.008	0.263	0.007	24.710	0.530
25/7/2013 19:30 น.	45.21	0.083	0.006	0.311	0.004	26.631	0.606
28/7/2013 13:00 น.	47.94	0.110	0.009	0.205	0.003	27.199	0.211
29/7/2013 13:00 น.	48.94	0.061	0.007	0.249	0.008	33.982	0.921
4/8/2013 11:30 น.	54.88	0.080	0.003	0.459	0.003	29.241	1.595
5/8/2013 12:00 น.	55.90	0.030	0.012	0.351	0.003	28.541	2.581
6/8/2013 12:00 น.	56.90	0.059	0.008	0.318	0.005	32.093	0.369
7/8/2013 15:30 น.	58.04	0.053	0.002	0.325	0.022	25.346	0.763

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
8/8/2013 11:30 น.	58.88	0.042	0.011	0.310	0.009	24.212	0.290
9/8/2013 14:00 น.	59.98	0.043	0.002	0.343	0.004	23.707	0.358
11/8/2013 12:00 น.	61.90	0.029	0.007	0.347	0.014	23.995	0.042
13/8/2013 16:00 น.	64.06	0.000	0.000	0.403	0.038	23.246	0.097
14/8/2013 16:00 น.	65.06	0.039	0.003	0.316	0.014	21.092	0.271
15/8/2013 14:30 น.	66.00	0.017	0.013	0.276	0.001	28.435	0.348
16/8/2013 14:00 น.	66.98	0.000	0.000	0.156	0.012	23.044	1.885
17/8/2013 16:00 น.	68.06	0.015	0.007	0.391	0.009	43.813	2.129
19/8/2013 14:00 น.	69.98	0.022	0.023	0.254	0.005	22.289	3.825
20/8/2013 13:30 น.	70.96	0.026	0.015	0.146	0.014	35.225	1.153
21/8/2013 14:00 น.	71.98	0.028	0.034	0.211	0.002	26.491	0.472

ตารางที่ ง--3 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนบริเวณทางออกจากท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
10/6/2013 14:30 น.	0.00	0.002	0.003	2.030	0.326	37.932	0.454
11/6/2013 11:30 น.	0.88	0.005	0.015	0.290	0.006	39.227	3.299
12/6/2013 14:45 น.	2.01	0.002	0.004	1.700	0.127	38.107	0.299
13/6/2013 12:50 น.	2.93	0.000	0.000	1.110	0.096	32.344	0.963
14/6/2013 10:30 น.	3.83	0.000	0.000	0.117	0.002	42.754	1.037
15/6/2013 14:15 น.	4.99	0.014	0.011	0.000	0.000	40.410	0.563
17/6/2013 13:40 น.	6.97	0.123	0.048	1.132	0.041	32.226	2.136
18/6/2013 12:25 น.	7.91	0.122	0.053	0.050	0.001	28.324	0.647
19/6/2013 12:30 น.	8.92	0.143	0.025	0.580	0.205	27.966	2.485
20/6/2013 13:00 น.	9.94	0.218	0.026	0.321	0.008	29.418	1.218
21/6/2013 13:30 น.	10.96	0.135	0.049	0.710	0.014	29.991	1.150
22/6/2013 12:30 น.	11.92	0.000	0.000	0.627	0.048	27.660	0.757
23/6/2013 13:45 น.	12.97	0.045	0.037	0.136	0.005	27.923	0.086
24/6/2013 13:00 น.	13.94	0.008	0.014	0.769	0.032	25.242	0.639
25/6/2013 13:30 น.	14.96	0.012	0.026	0.029	0.003	23.509	0.227
26/6/2013 12:00 น.	15.90	0.025	0.001	0.282	0.005	21.331	0.284
27/6/2013 12:00 น.	16.90	0.092	0.009	0.717	0.033	18.105	1.254
28/6/2013 12:30 น.	17.92	0.056	0.006	0.028	0.000	20.751	0.358

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
29/6/2013 16:00 น.	19.06	0.024	0.029	0.688	0.018	19.645	0.697
1/7/2013 13:00 น.	20.94	0.211	0.000	0.064	0.003	23.930	0.152
3/7/2013 12:30 น.	22.92	0.154	0.000	0.260	0.021	21.654	2.667
4/7/2013 12:00 น.	23.90	0.534	0.002	0.370	0.070	35.833	2.810
6/7/2013 13:00 น.	25.94	0.081	0.021	0.249	0.001	28.506	2.768
7/7/2013 14:00 น.	26.98	0.245	0.093	0.530	0.020	27.505	5.965
9/7/2013 12:00 น.	28.90	0.020	0.013	0.165	0.008	20.318	1.557
10/7/2013 12:00 น.	29.90	0.022	0.013	0.414	0.007	30.629	1.176
11/7/2013 14:00 น.	30.98	0.049	0.012	0.327	0.016	22.681	1.042
13/7/2013 13:00 น.	32.94	0.086	0.036	0.266	0.015	24.441	1.287
14/7/2013 13:00 น.	33.94	0.026	0.012	0.307	0.038	26.298	0.500
15/7/2013 12:00 น.	34.90	0.127	0.016	0.294	0.004	24.718	0.886
16/7/2013 11:30 น.	35.88	0.223	0.041	0.338	0.007	22.853	0.118
17/7/2013 11:30 น.	36.88	0.213	0.038	0.307	0.003	15.734	0.513
19/7/2013 16:00 น.	39.06	0.131	0.009	0.371	0.005	23.496	0.561
21/7/2013 14:30 น.	41.00	0.088	0.021	0.211	0.006	20.259	0.528
23/7/2013 13:00 น.	42.94	0.045	0.020	0.181	0.011	24.574	0.595
24/7/2013 14:00 น.	43.98	0.032	0.096	0.179	0.001	14.464	0.601
25/7/2013 19:30 น.	45.21	0.126	0.006	1.872	0.052	12.345	0.592
28/7/2013 13:00 น.	47.94	0.129	0.042	1.971	0.040	16.499	1.006
29/7/2013 13:00 น.	48.94	0.037	0.012	0.374	0.010	12.790	0.904
4/8/2013 11:30 น.	54.88	0.043	0.013	0.987	0.008	20.100	0.275
5/8/2013 12:00 น.	55.90	0.012	0.004	0.389	0.015	17.958	0.585
6/8/2013 12:00 น.	56.90	0.026	0.008	0.413	0.007	24.770	0.871
7/8/2013 15:30 น.	58.04	0.026	0.003	0.244	0.009	15.840	2.487
8/8/2013 11:30 น.	58.88	0.093	0.001	0.165	0.005	17.689	0.174
9/8/2013 14:00 น.	59.98	0.045	0.028	0.351	0.013	11.829	0.078
11/8/2013 12:00 น.	61.90	0.016	0.003	0.134	0.003	5.613	0.226
13/8/2013 16:00 น.	64.06	0.090	0.009	0.023	0.009	3.827	0.170
14/8/2013 16:00 น.	65.06	0.022	0.012	0.293	0.030	9.280	1.786
15/8/2013 14:30 น.	66.00	0.024	0.016	0.158	0.020	4.435	3.448
16/8/2013 14:00 น.	66.98	0.037	0.027	0.384	0.007	12.101	2.309
17/8/2013 16:00 น.	68.06	0.030	0.030	0.232	0.012	36.423	2.913
19/8/2013 14:00 น.	69.98	0.004	0.044	0.027	0.015	11.463	1.420
20/8/2013 13:30 น.	70.96	0.020	0.018	0.184	0.006	15.235	1.325
21/8/2013 14:00 น.	71.98	0.023	0.013	0.182	0.003	11.234	1.212

ตารางที่ ง-4 ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าซีโอดี ในบ่อ
เพาะเลี้ยงปลานิล

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง		ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)					
17/6/2013 13:40 น.	6.97	140	6.40	7.68	28.30	230.40		
18/6/2013 12:25 น.	7.91	130	5.70	7.55	28.60	130.60		
19/6/2013 12:30 น.	8.92	120	5.9	7.54	28.8	342.20		
20/6/2013 13:00 น.	9.94	120	6.00	7.67	28.60	312.50		
21/6/2013 13:30 น.	10.96	130	5.00	7.53	28.40	292.60		
22/6/2013 12:30 น.	11.92	150	5.50	7.83	28.40	277.80		
23/6/2013 13:45 น.	12.97	130	4.40	7.84	28.20	153.80		
24/6/2013 13:00 น.	13.94	150	6.40	7.85	28.00	168.60		
25/6/2013 13:30 น.	14.96	150	5.40	7.99	28.40	218.20		
26/6/2013 12:00 น.	15.90	130	6.20	7.84	28.70	253.00		
27/6/2013 12:00 น.	16.90	160	6.20	7.64	27.90	192.20		
28/6/2013 12:30 น.	17.92	160	5.20	7.44	28.00	238.50		
29/6/2013 16:00 น.	19.06	170	5.30	7.53	28.00	167.30		
1/7/2013 13:00 น.	20.94	150	4.20	7.55	28.10	238.50		
4/7/2013 12:00 น.	23.90	170	4.40	7.71	28.40	334.10		
6/7/2013 13:00 น.	25.94	180	4.60	6.94	28.00	245.80		
7/7/2013 14:00 น.	26.98	200	4.80	6.86	28.20	311.10		
10/7/2013 12:00 น.	29.90	170	5.00	8.00	27.40	372.50		
11/7/2013 14:00 น.	30.98	150	5.70	7.93	27.10	268.80		
13/7/2013 13:00 น.	32.94	170	5.40	7.89	27.70	180.50		
14/7/2013 13:00 น.	33.94	130	5.00	7.80	27.50	180.50		
15/7/2013 12:00 น.	34.90	200	4.80	7.74	28.10	218.90		
16/7/2013 11:30 น.	35.88	180	4.10	7.80	27.80	207.40		
17/7/2013 11:30 น.	36.88	160	4.80	7.81	27.80	275.30		
19/7/2013 16:00 น.	39.06	150	4.40	7.88	27.40	286.40		
21/7/2013 14:30 น.	41.00	180	5.00	7.91	26.30	226.90		
23/7/2013 13:00 น.	42.94	180	5.50	7.93	27.20	249.20		
24/7/2013 14:00 น.	43.98	230	5.10	7.99	27.40	189.70		
25/7/2013 19:30 น.	45.21	220	5.00	7.92	27.30	126.50		
28/7/2013 13:00 น.	47.94	210	5.50	7.72	28.40	174.80		
29/7/2013 13:00 น.	48.94	150	5.20	7.76	27.70	126.50		
4/8/2013 11:30 น.	54.88	190	4.90	7.86	27.90	192.24		

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง	ปริมาณออกซิเจน	พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)			
5/8/2013 12:00 น.	55.90	200	4.90	7.85	27.80	153.08
6/8/2013 12:00 น.	56.90	210	5.10	7.86	27.90	167.32
7/8/2013 15:30 น.	58.04	230	4.90	7.86	28.20	153.08
8/8/2013 11:30 น.	58.88	220	4.80	7.76	28.60	178.00
9/8/2013 14:00 น.	59.98	220	5.30	8.10	28.30	178.00
11/8/2013 12:00 น.	61.90	230	5.50	8.14	28.40	96.12
13/8/2013 16:00 น.	64.06	240	3.90	7.81	27.80	106.80
14/8/2013 16:00 น.	65.06	220	5.10	7.82	27.80	192.24
15/8/2013 14:30 น.	66.00	270	5.10	7.84	27.90	131.72
16/8/2013 14:00 น.	66.98	280	4.80	8.00	27.80	160.00
17/8/2013 16:00 น.	68.06	240	4.90	8.10	27.90	172.00
19/8/2013 14:00 น.	69.98	200	5.50	7.91	27.90	160.00
20/8/2013 13:30 น.	70.96	300	5.60	7.90	27.80	132.00
21/8/2013 14:00 น.	71.98	340	4.70	7.87	27.60	172.00

ตารางที่ ง-5 ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าซีโอดี บริเวณ
ก่อนเข้าท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง	ปริมาณออกซิเจน	พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)			
10/6/2013 14:30 น.	0.00	140	7.20	8.16	29.60	39.90
11/6/2013 11:30 น.	0.88	120	7.00	7.93	29.20	30.70
12/6/2013 14:45 น.	2.01	110	7.00	7.98	29.00	43.00
13/6/2013 12:50 น.	2.93	130	7.00	7.92	28.50	52.20
14/6/2013 10:30 น.	3.83	120	6.90	7.91	28.30	46.10
15/6/2013 14:15 น.	4.99	130	7.00	7.30	28.20	
17/6/2013 13:40 น.	6.97	130	6.50	7.67	28.70	43.00
18/6/2013 12:25 น.	7.91	150	6.60	7.94	29.10	59.50
19/6/2013 12:30 น.	8.92	140	6.80	7.81	29.10	68.40
20/6/2013 13:00 น.	9.94	130	6.80	7.98	28.50	77.40
21/6/2013 13:30 น.	10.96	130	6.60	7.42	28.50	77.40
22/6/2013 12:30 น.	11.92	220	6.70	8.18	28.60	107.10
23/6/2013 13:45 น.	12.97	160	5.80	8.27	28.50	62.50
24/6/2013 13:00 น.	13.94	150	7.60	8.04	28.20	50.60

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง	ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)				
25/6/2013 13:30 น.	14.96	170	6.30	8.22	28.00	50.60	
26/6/2013 12:00 น.	15.90	190	6.20	7.84	28.70	68.30	
27/6/2013 12:00 น.	16.90	160	6.80	7.54	28.40	59.80	
28/6/2013 12:30 น.	17.92	200	6.20	8.02	28.40	162.30	
29/6/2013 16:00 น.	19.06	160	5.90	7.79	27.70		
1/7/2013 13:00 น.	20.94	180	5.90	7.81	28.20	113.60	
4/7/2013 12:00 น.	23.90	210	5.90	8.04	28.90	125.90	
6/7/2013 13:00 น.	25.94	210	5.80	7.56	28.20	165.80	
7/7/2013 14:00 น.	26.98	200	5.90	7.36	28.20	113.60	
10/7/2013 12:00 น.	29.90	170	5.90	7.38	27.70	122.90	
11/7/2013 14:00 น.	30.98	180	5.80	7.92	27.10	135.20	
13/7/2013 13:00 น.	32.94	160	6.20	8.07	28.30	104.40	
14/7/2013 13:00 น.	33.94	150	6.00	7.95	27.40	165.90	
15/7/2013 12:00 น.	34.90	220	6.10	7.92	28.40	104.40	
16/7/2013 11:30 น.	35.88	160	6.50	8.16	27.40	80.40	
17/7/2013 11:30 น.	36.88	180	5.90	8.03	28.00	110.10	
19/7/2013 16:00 น.	39.06	200	6.00	8.06	27.50	122.00	
21/7/2013 14:30 น.	41.00	200	5.90	7.85	26.90	122.00	
23/7/2013 13:00 น.	42.94	220	6.00	7.92	27.40	50.60	
24/7/2013 14:00 น.	43.98	200	5.90	7.80	28.20	50.60	
25/7/2013 19:30 น.	45.21	220	6.00	8.02	27.30	71.40	
28/7/2013 13:00 น.	47.94	210	6.00	8.10	28.30	35.70	
29/7/2013 13:00 น.	48.94	180	5.00	7.98	28.10	11.90	
4/8/2013 11:30 น.	54.88	180	5.30	7.98	28.00	93.90	
5/8/2013 12:00 น.	55.90	210	5.40	7.84	28.20	122.50	
6/8/2013 12:00 น.	56.90	210	5.20	7.85	28.10	113.92	
7/8/2013 15:30 น.	58.04	220	5.00	7.70	28.40	85.44	
8/8/2013 11:30 น.	58.88	220	5.20	7.86	28.30	85.44	
9/8/2013 14:00 น.	59.98	220	5.40	8.21	28.70	105.40	
11/8/2013 12:00 น.	61.90	230	5.00	8.23	28.50	85.44	
13/8/2013 16:00 น.	64.06	250	5.40	7.89	27.50	122.50	
14/8/2013 16:00 น.	65.06	210	5.20	7.88	27.80	133.80	
15/8/2013 14:30 น.	66.00	290	4.30	7.83	27.90	96.00	
16/8/2013 14:00 น.	66.98	290	4.60	8.07	28.50	137.60	
17/8/2013 16:00 น.	68.06	260	4.90	8.00	27.90	76.89	
19/8/2013 14:00 น.	69.98	270	4.80	7.84	27.20	83.20	

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง	ปริมาณออกซิเจน	พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)			
20/8/2013 13:30 น.	70.96	330	5.30	7.69	27.70	83.20
21/8/2013 14:00 น.	71.98	310	5.20	7.82	27.70	105.60

ตารางที่ ง-6 ค่าสภาพต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และค่าซีโอดี บริเวณ
ทางออกท่อยาว

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง	ปริมาณออกซิเจน	พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)			
10/6/2013 14:30 น.	0.00	120	2.00	7.68	28.700	9.20
11/6/2013 11:30 น.	0.88	130	2.00	7.42	28.30	39.90
12/6/2013 14:45 น.	2.01	180	2.10	7.54	28.90	52.20
13/6/2013 12:50 น.	2.93	150	1.60	7.73	27.70	43.00
14/6/2013 10:30 น.	3.83	150	1.30	7.35	27.90	43.00
15/6/2013 14:15 น.	4.99	140	1.60	7.57	27. 08	
17/6/2013 13:40 น.	6.97	120	2.00	7.68	27.20	92.20
18/6/2013 12:25 น.	7.91	140	1.80	7.45	27.40	52.20
19/6/2013 12:30 น.	8.92	140	2.00	7.70	28.70	47.60
20/6/2013 13:00 น.	9.94	140	1.50	7.76	27.10	77.40
21/6/2013 13:30 น.	10.96	220	2.00	7.81	27.00	98.20
22/6/2013 12:30 น.	11.92	160	2.20	7.72	28.10	77.40
23/6/2013 13:45 น.	12.97	150	2.10	7.80	27.80	107.10
24/6/2013 13:00 น.	13.94	150	1.20	7.85	27.70	62.50
25/6/2013 13:30 น.	14.96	140	1.00	7.94	27.00	71.40
26/6/2013 12:00 น.	15.90	160	1.20	7.48	26.20	20.80
27/6/2013 12:00 น.	16.90	190	1.60	7.81	26.40	76.90
28/6/2013 12:30 น.	17.92	180	1.10	7.52	27.50	68.30
29/6/2013 16:00 น.	19.06	180	1.90	7.71	26.90	
1/7/2013 13:00 น.	20.94	210	0.90	7.73	27.40	76.90
4/7/2013 12:00 น.	23.90	260	0.60	8.00	27.30	113.60
6/7/2013 13:00 น.	25.94	230	0.90	7.64	27.20	82.90
7/7/2013 14:00 น.	26.98	170	1.20	7.30	26.90	175.10
10/7/2013 12:00 น.	29.90	230	1.10	7.33	27.10	129.00
11/7/2013 14:00 น.	30.98	190	0.80	7.52	27.60	92.20
13/7/2013 13:00 น.	32.94	190	0.60	7.78	26.10	113.70

วันเดือนปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพต่าง	ปริมาณออกซิเจน		พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ซีโอดี (มก./ล.)
		(มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)	ละลายน้ำ (มก./ล.)				
14/7/2013 13:00 น.	33.94	210	1.40	7.80	26.80	144.40	
15/7/2013 12:00 น.	34.90	170	1.00	7.88	27.70	113.70	
16/7/2013 11:30 น.	35.88	180	0.60	7.90	27.00	73.70	
17/7/2013 11:30 น.	36.88	220	0.80	7.95	27.20	122.00	
19/7/2013 16:00 น.	39.06	230	0.30	7.92	26.50	110.10	
21/7/2013 14:30 น.	41.00	230	0.40	7.95	26.30	122.00	
23/7/2013 13:00 น.	42.94	220	0.80	7.93	26.70	92.30	
24/7/2013 14:00 น.	43.98	230	0.60	7.83	26.40	71.40	
25/7/2013 19:30 น.	45.21	220	0.70	8.13	27.70	122.00	
28/7/2013 13:00 น.	47.94	220	0.80	8.06	27.20	80.40	
29/7/2013 13:00 น.	48.94	180	1.00	7.96	27.70	20.80	
4/8/2013 11:30 น.	54.88	220	0.90	7.95	27.20	93.90	
5/8/2013 12:00 น.	55.90	230	0.80	8.10	27.10	85.44	
6/8/2013 12:00 น.	56.90	250	1.40	8.08	27.60	105.40	
7/8/2013 15:30 น.	58.04	260	1.10	8.10	27.40	122.50	
8/8/2013 11:30 น.	58.88	270	1.10	8.19	28.10	122.50	
9/8/2013 14:00 น.	59.98	270	0.30	8.16	27.40	113.92	
11/8/2013 12:00 น.	61.90	270	1.10	7.93	27.80	65.50	
13/8/2013 16:00 น.	64.06	270	0.10	7.94	26.30	76.89	
14/8/2013 16:00 น.	65.06	290	0.40	7.94	26.80	65.60	
15/8/2013 14:30 น.	66.00	290	0.70	8.03	27.40	105.40	
16/8/2013 14:00 น.	66.98	310	0.80	8.04	27.60	96.00	
17/8/2013 16:00 น.	68.06	280	0.50	7.89	27.60	105.60	
19/8/2013 14:00 น.	69.98	320	1.00	7.88	27.10	96.00	
20/8/2013 13:30 น.	70.96	340	1.10	8.08	26.20	105.60	
21/8/2013 14:00 น.	71.98	340	2.00	7.66	27.00	160.00	

ตารางที่ ง-7 น้ำหนักและความยาวของปลานิลในบ่อเพาะเลี้ยง

ตัวที่	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 19		วันที่ 72	
	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
1	180	25	500	27	500	26
2	110	24.5	830	32	400	27
3	710	31	900	34	1000	32
4	1300	33	580	29.5	900	33
5	600	29	310	26	900	35
6	400	26	400	26	400	20
7	1000	29	320	25	900	30
8	600	30	600	31	700	30
9	600	30	300	24	700	30
10	300	21	800	34	400	21
11	1300	33	320	25	400	22
12	700	27.5	420	27.5	400	25
13	1000	32	310	25	700	30
14	700	29	300	23.5	300	24
15	800	30	810	31	900	32
16	400	25	410	25	700	32
17	1200	35	610	31	1000	35
18	1000	29	320	24	500	24
19	1100	31	910	35	1000	35
20	1000	30	300	23	700	30
21	900	29	390	27	400	22
22	800	28	600	29.5	900	32
23	1100	30	300	24	1000	35
24	300	20	600	30	500	21
25	900	28	490	27	900	32
26	1000	30	1100	35	600	30
27	500	22	600	30	500	23
28	1100	30	800	32	1300	35
29	1000	35	400	27	800	32
30	600	31	210	23	1100	34
31	400	25	850	30	600	26
32	1000	32	700	32	700	30
33	800	29	600	27.5	1000	32
34	900	29	1000	35	900	32

ตัวที่	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 19		วันที่ 72	
	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
35	1000	30	910	33	800	30
36	600	26			1000	35
37	1000	38			600	27
38	800	30			700	30
39	500	26			600	27
40	500	26			500	24
41	700	30			700	30
42	400	27			1000	35
43	900	30			500	24
44	800	30			1100	33
45	800	31			700	30
46	500	26			700	30
47	400	25			1100	35
48	600	29			1100	35
49	700	27			1400	36
50	900	30			1000	32
51	800	29			900	30
52	800	29			800	30
53	1200	31			1000	33
54	600	27			900	32
55	700	28			900	32
56	500	27			520	27
57	700	29			500	24
58	900	29			600	28
59	500	21			800	32
60	800	29			700	32
61	500	23			600	27
62	600	27			400	21
63	400	23			500	26
64	500	22			400	20
65	500	24			400	22
66	400	23			230	14
67	500	24			300	15
68	700	28			480	24
69	800	29			800	32
70	800	29			600	27

ตัวที่	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 19		วันที่ 72	
	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
71	600	25			1200	32
72	400	19			1000	32
73	700	29			1200	35
74	500	23			700	30
75	500	22			900	31
76	1000	30			1200	35
77	200	15			900	30
78	200	17			1000	33
79	300	17			1000	33
80	200	14			700	27
81	400	23			900	30
82	500	23			800	29
83	400	24			500	24
84	900	30			900	30
85	400	26			300	19
86	700	26			600	27
87	600	27			600	26
88	600	24			500	26
89	400	26			500	24
90	600	27			400	23
91	500	22			600	26
92	900	33			500	26
93	600	28			500	24
94	600	27			1000	30
95	300	22			800	30
96	500	26			800	29
97	700	23			900	30
98	600	26			900	30
99	400	24			900	30
100	200	22			900	31
101	300	19			800	28
102	200	20			900	30
103	100	15			1000	33
104	100	17			700	28
105	200	17			500	25
106	100	16			1200	35
107	400	24			600	24

ตัวที่	ก่อนเริ่มทำการทดลอง		วันที่ 19		วันที่ 72	
	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)	นน. (กรัม)	ความยาว (ซม.)
108	200	14			900	29
109	100	16			700	25
110	200	16				
111	200	18				

หมายเหตุ: เนื่องจากในวันที่ 19 ของการทดลองได้ทำการนับปลาคิดเป็นร้อยละ 30 ของจำนวนปลาทั้งหมด



ตัวอย่างการคำนวณ

จาก ปริมาณน้ำในระบบบำบัดไนเตรตแบบท่อยาว (ถังกวนผสม 30 L + ท่อยาว 15 L) = 45 L.

กำหนดให้ความเข้มข้นของไนเตรตเริ่มต้น = 50 mgNO₃-N/L ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำ 2 hr

ดังนั้นต้องเติมไนเตรตทั้งหมด = (45)(50) = 2,250 mgNO₃-N/45 L

$$= 2.25 \text{ gNO}_3\text{-N/45 L}$$

$$= 0.16 \text{ molN}$$

กำหนดให้ สัดส่วน C:N = 1:1

ดังนั้น

$$0.16 \text{ molN} = 0.16 \text{ molC}$$

$$= 1.92 \text{ gC}$$

$$= 5.12 \text{ gCH}_3\text{OH}$$

$$(\rho_{\text{MeOH}} = 0.7918)$$

$$= 6.46 \text{ mlCH}_3\text{OH/2hr}$$

$$= 3.23 \text{ mlCH}_3\text{OH/hr}$$

นั่นคือ ต้องเติมเมทานอลความเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตรทั้งสิ้น 3.23 มล.ต่อชั่วโมง

แต่เนื่องจากต้องการให้เติมเมทานอลอย่างต่อเนื่องตลอดทั้งวันดังนั้นจึงต้องทำการเจือจางเมทานอลที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์

จาก

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$(100)(3.23) = (1.5) V_2$$

$$V_2 = 215.3 \text{ ml-dilutedCH}_3\text{OH/hr}$$

$$= 5,167 \text{ ml-dilutedCH}_3\text{OH/day}$$

นั่นคือ ต้องเติมเมทานอลความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตรทั้งสิ้น 5,167 มล.ต่อหนึ่งวัน

จากนั้นทำการกำหนดตั้งค่าปั๊มเติมเมทานอล โดยจากปั๊มเติมเมทานอลมีอัตราการไหลที่ 13 ml/10s (ที่กระแสไฟฟ้า 6 โวลล์)

$$21.53 \text{ ml} = (21.53)(10)/13$$

$$= 17 \text{ s}$$

ดังนั้นจึงกำหนดให้ปั๊มเติมเมทานอลทำงานโดยเปิดเป็นเวลา 17 วินาทีและหยุดพัก 5 นาที 43 วินาที

ภาคผนวก จ

ผลการศึกษาลำดับเบส (Base sequence) ของดีเอ็นเอทั้ง 7 แถบด้วยโปรแกรม BLAST

DEFINITION Brevundimonas viscosa strain F3 16S ribosomal RNA gene, partial sequence.
 ACCESSION HM777012 VERSION HM777012.2 GI:348011287.
 Max score = 878 Total score = 878 Query cover = 99% E value = 0.0 Ident = 99%
 SOURCE Brevundimonas viscosa
 ORGANISM Bacteria; Proteobacteria; Alphaproteobacteria; Caulobacterales; Caulobacteraceae; Brevundimonas.
 REFERENCE
 AUTHORS Wang,J., Zhang,J., Ding,K., Xin,Y. and Pang,H.
 TITLE Brevundimonas viscosa sp. nov., isolated from saline soil
 JOURNAL Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 62 (PT 10), 2475-2479 (2012)

```

Query 1 CATGCCGCGTGAATGATGAAGGTCTTAGGATTGTAAGCCCTTTACCGGGGAAGATAAT 60
      |||
Sbjct 392 CATGCCGCGTGGATGATGAAGGTCTTAGGATTGTAATCCTTTACCGGTGAAGATAAT 451

Query 61 GACTGTAGCCGGAGAAGAAGCCCCGGCTAACTTCGTGCCAGCAGCCGCGGTAATACGAAG 120
      |||
Sbjct 452 GACTGTAGCCGGAGAAGAAGCCCCGGCTAACTTCGTGCCAGCAGCCGCGGTAATACGAAG 511

Query 121 GGGGCTAGCGTTGCTCGGAATTACTGGGCGTAAAGGGAGCGTAGGCGGACATTTAAGTCA 180
      |||
Sbjct 512 GGGGCTAGCGTTGCTCGGAATTACTGGGCGTAAAGGGAGCGTAGGCGGACATTTAAGTCA 571

Query 181 GGGGTGAAATCCCGAGGCTCAACCTCGGAAGTGCCTTTGATACTGGGTGTCTTGAGTGTG 240
      |||
Sbjct 572 GGGGTGAAATCCCGAGGCTCAACCTCGGAAGTGCCTTTGATACTGGGTGTCTTGAGTGTG 631

Query 241 AGAGAGGTGAGTGGAATCCGAGTGTAGAGGTGAAATTCGTAGATATTCGGAAGAACACC 300
      |||
Sbjct 632 AGAGAGGTGAGTGGAATCCGAGTGTAGAGGTGAAATTCGTAGATATTCGGAAGAACACC 691

Query 301 AGTGGCGAAGGCGACTCACTGGCTCATTACTGACGCTGAGGCTCGAAAGCGTGGGGAGCA 360
      |||
Sbjct 692 AGTGGCGAAGGCGACTCACTGGCTCATTACTGACGCTGAGGCTCGAAAGCGTGGGGAGCA 751

Query 361 AACAGGATTAGATACCCTGGTAGTCCACGCCGTAAACGATGATTGCTAGTTGTCTGGGGAG 420
      |||
Sbjct 752 AACAGGATTAGATACCCTGGTAGTCCACGCCGTAAACGATGATTGCTAGTTGTCTGGGGAG 811

Query 421 CTTGCTCTTCGGTGACGCAGCTAACGCATTAAGCAATCCGCCTGGAGGAGTACGGTCGCA 480
      |||
Sbjct 812 CTTGCTCTTCGGTGACGCAGCTAACGCATTAAGCAATCCGCCTGG-GGAGTACGGTCGCA 870

Query 481 AGATTAAACTCAA 494
      |||
Sbjct 871 AGATTAAACTCAA 884
  
```

DEFINITION Alkaliphilus transvaalensis strain SAGM1 16S ribosomal RNA, partial sequence.

ACCESSION NR_024748 VERSION NR_024748.1 GI:219857120

Max score = 145 Total score = 145 Query cover = 98% E value = 1e-31 Ident = 83%

SOURCE Alkaliphilus transvaalensis

ORGANISM Bacteria; Firmicutes; Clostridia; Clostridiales; Clostridiaceae; Alkaliphilus.

REFERENCE

AUTHORS Takai,K., Moser,D.P., Onstott,T.C., Spoelstra,N., Pfiffner,S.M., Dohnalkova,A. and Fredrickson,J.K.

TITLE Alkaliphilus transvaalensis gen. nov., sp. nov., an extremely alkaliphilic bacterium isolated from a deep South African gold mine

JOURNAL Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 51 (PT 4), 1245-1256 (2001)



```

Query 1   ACGCCGCGTGAGCGATGAAGGCCTTCGGGTTGTAAGCTCTGTCGTGAGGGACGAATTTG 60
          |||
Sbjct 396 ACGCCGCGTGAGCGATGAAGGCCTTCGGGTCGTAAAGCTCTGTCCTAAGGGAAGAATTTT 455

Query 61   GACGGTCCCGTAGGAGGAGCCCCGGC-AACTTCGTTGCAATAAGCCCCGGCTAATCCAT 119
          |||
Sbjct 456 GACGGTACCTTAGGAGGAAGCCCCGGCTAACTACG-TGCCAGCAGCCGCGG-TAATACGT 513

Query 120  AGGGGCCAAGCTTGTTCCGAATTCACGGGGCGAAAGGGGTGCGAAGG 166
          |||
Sbjct 514 AGGGGGCAAGCGTTATCCGGAATCACTGGGCGTAAAGGGTGCGTAGG 560
  
```



DEFINITION Alpha proteobacterium enrichment culture clone Lpl5-134 16Sribosomal RNA gene, partial sequence.

ACCESSION JX963083 VERSION JX963083.1 GI:418968786

Max score = 708 Total score = 708 Query cover = 99% E value = 0.0 Ident = 94%

SOURCE alpha proteobacterium enrichment culture clone Lpl5-134

ORGANISM Bacteria; Proteobacteria; Alphaproteobacteria; environmental samples.

REFERENCE

AUTHORS Santl-Temkiv,T., Finster,K., Hansen,B.M., Pasic,L. and Karlson,U.G.

TITLE Viable methanotrophic bacteria enriched from air and rain can oxidize methane at cloud-like conditions

JOURNAL Aerobiologia (2013) 29:373–384.



```

Query 1 GGGTTGTAAAGTTCTTTTCGTTGGGGACGATAATGACGGTACCCATAGAAGAAGCTCCGGC 60
        ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| |||||
Sbjct 379 GGGTTGTAAACTCTTTTCGTTGGGGACGATAATGACGGTACCCAAGAAGAAGCTCCGGC 438

Query 61 TAACTTCGTGCCAGCAGCCGCGGTAATACTAAGGGGGCTAGCGTTGTTCCGATTTACTGG 120
        ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| |||||
Sbjct 439 TAACTTCGTGCCAGCAGCCGCGGTAATACGAAGGGGGCTAGCGTTGTTCCGATTTACTGG 498

Query 121 GCGTAAAGCGCGTGTAAAGCGGGTCGTTAAA-TTGGGGGTGAAATCCCGAGGCTCAACCTC 179
        ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| |||||
Sbjct 499 GCGTAAAGCGCGTGTAGGCGGG-CTGGAAAGTTGGGGGTGAAATCCCGAGGCTCAACCTC 557

Query 180 GGAAGTGCCTTCGAAACTGACCA-CCTGGACTCAAGCAGAGGCTGAGTGAATTCGAGT 238
        ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| |||||
Sbjct 558 GGAAGTGCCTCCAAACT-TCCAGCCTGGACTCAAGTAGAGGC-AAGTGAATTCGAGT 615

Query 239 GTAGAGGTGAAATTCATATATATTCGCAGGAACACCATTTGGCGAAGGCGACTTGCTGGGC 298
        ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| |||||
Sbjct 616 GTAGAGGTGAAATTCGTAGATATTCGCAGGAACACCAAGTGGCGAAGGCGACTTGCTGGAC 675

Query 299 TTGTACTGACGCTGAGACGCGAAAGCGTGGGGAGCAAACAGGATTAGATACCCTGGTAGT 358
        ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| |||||
Sbjct 676 TTGTAGTGACGCTGAGACGCGAAAGCGTGGGGAGCAAACAGGATTAGATACCCTGGTAGT 735

Query 359 CCACGCTGTAAACGATGAGAGCTAGCTGTCGGCACGCATGCGTTGTCGGTGACGCAGCTA 418
        ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| |||||
Sbjct 736 CCACGCTGTAAACGATGAGAGCTAGTTGTCGGCACGCATGCG-TGTCGGTGACGCAGCTA 794

Query 419 ACGCATTAAGCTCTCCGCTGGGGAGTACGGCCGCAAGGTTAAACTCAA 468
        ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| ||||| |||||
Sbjct 795 ACGCATTAAGCTCTCCGCTGGGGAGTACGGCCGCAAGGTTAAACTCAA 844
  
```

```

Query    1      CTGAT-CAGCCATGCCGCGTGAGTGAAGAAGGCCTTCGGGTTGTAAAGCTCTTTCGGCGG  59
          ||||| ||||||||||||||||| ||||||| |||||||||||||||||
Sbjct   272    CTGATCCAGCCATGCCGCGTGAGTGATGAAGGCCTTAGGGTTGTAAAGCTCTTTCGGCGG  331

Query    60      GGAAGATAATGA-GGTGGCTAATACCAAGAAGCGAAGGATATCTTCCTGCCAACAGCCGC  118
          ||||||||||| ||| | | | ||||||| || || |||| ||||| |||||||
Sbjct   332    GGAAGATAATGACGGTACCCAC-AG-AAGAAGCCCCGGCTAACTTCGTGCCAGCAGCCGC  389

Query   119      GGTTATACTACGGGGCCTAGCCTTGGTCACTTACTGGGCG  160
          ||| |||| | |||| ||||| ||| || | |||||||||
Sbjct   390      GGTAATACGAAGGGGGCTAGCGTTGTTCGGATTACTGGGCG  431

```

DEFINITION Oxalicibacterium flavum strain TA17 16S ribosomal RNA, partial sequence.

ACCESSION NR_037133 VERSION NR_037133.1 GI:310975269

Max score = 307 Total score = 307 Query cover = 100% E value = 4e-80 Ident = 83%

SOURCE Oxalicibacterium flavum

ORGANISM Bacteria; Proteobacteria; Betaproteobacteria; Burkholderiales; Oxalobacteraceae; Oxalicibacterium.

REFERENCE

AUTHORS Tamer,A.U., Aragno,M. and Sahin,N.

TITLE Isolation and characterization of a new type of aerobic, oxalic acid utilizing bacteria, and proposal of Oxalicibacterium flavum gen. nov., sp. nov

JOURNAL Syst. Appl. Microbiol. 25 (4), 513-519 (2002)



```

Query 1  AAGGCCTTCGGGTTGTAAGCTCTTTTGTGGGGGACGAAAAAGCGCGTCTCACACGAG- 59
          |||||
Sbjct 383 AAGGCCTTCGGGTTGTAAGCTCTTTTGTGAGGGAAGAAACGGTGAGCTCTAACAT-AGC 441

Query 60  TCGGTCATGACGGTACCTGTGGAAGAAGCACCGGTTAACTACGTGCCACCAGCCTCGTTA 119
          ||| |||||
Sbjct 442 TTGCTAATGACGGTACCTGAAGAATAAGCACCGGCTAACTACGTGCCAGCAGCGCGGTA 501

Query 120 ATACTTACGGTGCGAGCGTGAATCGGAATTGCTGGGCGTAAAGCGTGCGCAAGCGGCTTG 179
          |||| || |||||
Sbjct 502 ATACGTAGGGTGCGAGCGTTAATCGGAATTACTGGGCGTAAAGCGTGCGCAGGCGG-TTG 560

Query 180 TGCAAAACCGGTGTGAAATCCCCGAGCTTAACCTGGGAACTGCATTTGAAACTGCGTGGA 239
          |||| || |||||
Sbjct 561 TGCAAGACAGATGTGAAATCCCCGGGCTTAACCTGGGAACTGCATTTGTGACTGCACGGC 620

Query 240 TATAGTGTGGTAGAGGGGAGTGAATTCCAAGTGTAAACATGACATGCGTAGAGATGGAC 299
          || ||||| ||||| || ||||| |||| || |||||
Sbjct 621 TAGAGTGTGTCAGAGGGGGGTAGAATTCCACGTGTAGCAGTGAAATGCGTAGAGATGTGG 680

Query 300 AGGAACACCCATGGCTAACGCTGCCACCTGAAACAATACTGACCCTCATGC 350
          |||| || |||| || || || || || || |||||
Sbjct 681 AGGAATACCGATGGCGAAGGCAGCCCCCTGGGATAACACTGACGCTCATGC 731
  
```

DEFINITION Halomonas sp. IB-O18 partial 16S rRNA gene, strain IB-O18.
 ACCESSION AM490136 VERSION AM490136.1 GI:124377259
 Max score = 881 Total score = 881 Query cover = 99% E value = 0.0 Ident = 98%
 SOURCE Halomonas sp. IB-O18
 ORGANISM Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Oceanospirillales; Halomonadaceae; Halomonas.
 REFERENCE
 AUTHORS Gilvanova,E.A., Semenova,E.A. and Usanov,N.G.
 TITLE Denitrifying nitrite-reducing bacterium isolated from mud of Buryatia's soda lake Orongoi
 JOURNAL Unpublished

```

Query 1 AGGCCCTCGGGTTGTAAAGCACTTTCAGTGGGGAAGAAAGCCTGGTGGTTAATACCCGTC 60
      |||
Sbjct 386 AGGCCCTCGGGTTGTAAAGCACTTTCAGTGGGGAAGAAAGCCTCGGGGCCAATACCC-TC 444

Query 61 -AGGAAGGACATCACCCACAGAAGAAGCACCGGCTAACTCCGTGCCAGCAGCCGCGGTAA 119
      |||
Sbjct 445 GAGGAAGGACATCACCCACAGAAGAAGCACCGGCTAACTCCGTGCCAGCAGCCGCGGTAA 504

Query 120 TACGGAGGGTGCAGCGTTAATCGGAATTACTGGGCGTAAAGCGCGCGTAGGTGGCTTGA 179
      |||
Sbjct 505 TACGGAGGGTGCAGCGTTAATCGGAATTACTGGGCGTAAAGCGCGCGTAGGTGGCGTGA 564

Query 180 TAAGCCGGTTGTGAAAGCCCCGGGCTCAACCTGGGAACGGCATCCGGAAGTGTGAGGCTA 239
      |||
Sbjct 565 TAAGCCGGTTGTGAAAGCCCCGGGCTCAACCTGGGAACGGCATCCGGAAGTGTGAGGCTA 624

Query 240 GAGTGCAGGAGAGGAAGGTAGAAATCCCGGTGTAGCGGTGAAATGCGTAGAGATCGGGAG 299
      |||
Sbjct 625 GAGTGCAGGAGAGGAAGGTAGAAATCCCGGTGTAGCGGTGAAATGCGTAGAGATCGGGAG 684

Query 300 GAATACCAGTGGCGAAGGCGGCCTTCTGGACTGACACTGACACTGAGGTGCGAAAGCGTG 359
      |||
Sbjct 685 GAATACCAGTGGCGAAGGCGGCCTTCTGGACTGACACTGACACTGAGGTGCGAAAGCGTG 744

Query 360 GGTAGCAAACAGGATTAGATACCCTGGTAGTCCACGCCGTAAACGATGTCGACTAGCCGT 419
      |||
Sbjct 745 GGTAGCAAACAGGATTAGATACCCTGGTAGTCCACGCCGTAAACGATGTCGACTAGCCGT 804

Query 420 TGGGTCCCTCGCGGACTTTGTGGCGCAGTTAACGCGATAAGTCGACCGCCTGGGGAGTAC 479
      |||
Sbjct 805 TGGGTCCCTCGCGGACTTTGTGGCGCAGTTAACGCGATAAGTCGACCGCCTGGGGAGTAC 864

Query 480 GGCCGCAAGGTTAAAACTCAAA 501
      |||
Sbjct 865 GGCCGCAAGGTTAAAACTCAAA 886

```


DEFINITION Leifsonia sp. MUSC163LT 16S ribosomal RNA gene, partial sequence.

ACCESSION KF682190 VERSION KF682190.1 GI:559163201

Max score = 920 Total score = 920 Query cover = 99% E value = 0.0 Ident = 99%

SOURCE Leifsonia sp. MUSC163LT

ORGANISM Actinobacteria; Actinobacteridae; Actinomycetales; Micrococcineae; Microbacteriaceae; Leifsonia.

REFERENCE

AUTHORS Lee,L.-H., Zainal,N., Azman,A.S. and Chan,K.-G.

TITLE Phylogenetic diversity and antimicrobial properties of Actinobacteria in mangrove environment in Malaysia

JOURNAL Submitted (19-SEP-2013) Jeffrey Cheah School of Medicine and Health Sciences, Monash University Sunway Campus, Jalan Lagoon Selatan, Bandar Sunway, Selangor 46150, Malaysia

```

Query 1   AGGCCCTCGGGTTGTAAAGCACTTTCAGTGGGGAAGAAAGCCTGGTGGTTAATACCCGTC 60
          |||
Sbjct 386 AGGCCCTCGGGTTGTAAAGCACTTTCAGTGGGGAAGAAAGCCTCGGGGCCAATACCC-TC 444

Query 61  -AGGAAGGACATCACCCACAGAAGAAGCACCGGCTAACTCCGTGCCAGCAGCCGCGGTAA 119
          |||
Sbjct 445 GAGGAAGGACATCACCCACAGAAGAAGCACCGGCTAACTCCGTGCCAGCAGCCGCGGTAA 504

Query 120 TACGGAGGGTGCGAGCGTTAATCGGAATTACTGGGCGTAAAGCGCGCTAGGTGGCTTGA 179
          |||
Sbjct 505 TACGGAGGGTGCGAGCGTTAATCGGAATTACTGGGCGTAAAGCGCGCTAGGTGGCGTGA 564

Query 180 TAAGCCGGTTGTGAAAGCCCCGGGCTCAACCTGGGAACGGCATCCGGAAGTGTGAGGCTA 239
          |||
Sbjct 565 TAAGCCGGTTGTGAAAGCCCCGGGCTCAACCTGGGAACGGCATCCGGAAGTGTGAGGCTA 624

Query 240 GAGTGCAGGAGAGGAAGGTAGAAATCCCGGTGTAGCGGTGAAATGCGTAGAGATCGGGAG 299
          |||
Sbjct 625 GAGTGCAGGAGAGGAAGGTAGAAATCCCGGTGTAGCGGTGAAATGCGTAGAGATCGGGAG 684

Query 300 GAATACCAGTGGCGAAGGCGGCCTTCTGGACTGACACTGACACTGAGGTGCGAAAGCGTG 359
          |||
Sbjct 685 GAATACCAGTGGCGAAGGCGGCCTTCTGGACTGACACTGACACTGAGGTGCGAAAGCGTG 744

Query 360 GGTAGCAAACAGGATTAGATACCCTGGTAGTCCACGCCGTAAACGATGTGCGACTAGCCGT 419
          |||
Sbjct 745 GGTAGCAAACAGGATTAGATACCCTGGTAGTCCACGCCGTAAACGATGTGCGACTAGCCGT 804

Query 420 TGGGTCCTTCGCGGACTTTGTGGCGCAGTTAACGCGATAAGTCGACCGCTGGGGAGTAC 479
          |||
Sbjct 805 TGGGTCCTTCGCGGACTTTGTGGCGCAGTTAACGCGATAAGTCGACCGCTGGGGAGTAC 864

Query 480 GGCCGCAAGGTTAAACTCAAA 501
          |||
Sbjct 865 GGCCGCAAGGTTAAACTCAAA 886

```

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพรรณนภา โชคชัยทวี เกิดเมื่อวันที่ 13 พฤษภาคม พ.ศ. 2530 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 โดยขณะที่ศึกษานั้นได้รับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2556 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

(1) พรรณนภา โชคชัยทวี, วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัมย์ และสรวิศ เผ่าทองสุข. 2555. ผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนริฟิเคชันในถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาว. การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9, หน้า 347-354. 6-7 ธันวาคม 2555 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม. (นำเสนอผลงานแบบบรรยายมีเรื่องเต็ม)

(2) พรรณนภา โชคชัยทวี, วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัมย์ และสรวิศ เผ่าทองสุข. 2556. สภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนริฟิเคชันในถังปฏิกรณ์ดีไนริฟิเคชันแบบท่อยาว. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 12, หน้า 225-226. 27-29 มีนาคม 2556 ณ โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออร์คิด จังหวัดขอนแก่น. (นำเสนอผลงานแบบบรรยายมีเรื่องเต็ม)