

รูปแบบและประสิทธิภาพของระบบตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ
ระบบน้ำหมุนเวียน



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Types and Efficiency of Nitrification Biofilters for Recirculating Aquaculture System

Mr. Thanawat Kanjanakul



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 2016

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | รูปแบบและประสิทธิภาพของระบบตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบน้ำหมุนเวียน |
| โดย | นายฐานวัฒน์ กาญจนกุล |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ ฝั่งรัมย์ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ ฝั่งรัมย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิ้มปิยากร)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศรัณย์ เตชะเสน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิไล เจียมไชยศรี)

ฐานวัฒน์ กาญจนกุล : รูปแบบและประสิทธิภาพของระบบตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน สำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบน้ำหมุนเวียน (Types and Efficiency of Nitrification Biofilters for Recirculating Aquaculture System) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข , 278 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียรวมในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดด้วยตัวกรองชีวภาพชนิด BCN-012 ในรูปแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพไนทริฟิเคชันต่างกัน 3 ชนิด โดยแบ่งการทดลองเป็น 4 ช่วง การทดลองช่วงที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์ในการบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน พบว่าตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 เดือนมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (V_{max}) และค่าคงที่เมื่ออัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (K_s) สูงกว่าตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 6 เดือน โดยค่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด เท่ากับ 73.20 และ 53.92 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน และค่าคงที่เมื่ออัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด เท่ากับ 6.47 และ 2.15 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ การทดลองช่วงที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเดินระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพรูปแบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้น 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. พบว่าระบบโปรยกรองมีประสิทธิภาพไนทริฟิเคชันดีที่สุด เท่ากับ 1.336, 1.913 และ 2.779 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./ชม. ในขณะที่ระบบตัวกลางจมตัวมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมต่ำที่สุด เท่ากับ 0.930, 0.640 และ 2.361 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./ชม. ตามลำดับ การทดลองช่วงที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ชีวภาพทั้ง 3 รูปแบบในการบำบัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบเลี้ยงปลาชนิด พบว่าทุกระบบมีความสามารถในการควบคุมปริมาณไนโตรเจนให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ โดยมีปริมาณแอมโมเนียรวมและไนไตรต์เฉลี่ยตลอดการทดลองใกล้เคียงกัน เท่ากับ 0.04 ± 0.04 และ 0.04 ± 0.03 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ และในวันสุดท้ายของการทดลองมีปริมาณไนเตรตสูงสุดในระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง เท่ากับ 15.11 ± 0.88 , 12.88 ± 4.00 และ 17.08 ± 2.22 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ สำหรับการทดลองช่วงสุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพไนทริฟิเคชันของถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ผ่านการบำบัดน้ำเลี้ยงปลามาแล้วเป็นเวลา 60 วัน พบว่าทุกระบบมีประสิทธิภาพไนทริฟิเคชันเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก.....

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม.....

5670177921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: RECIRCULATING AQUACULTURE SYSTEM / SUBMERGED FILTER BIOREACTOR / FLUIDIZED BED BIOREACTOR / TRICKLING FILTER BIOREACTOR / TAN REMOVAL RATE

THANAWAT KANJANAKUL: Types and Efficiency of Nitrification Biofilters for Recirculating Aquaculture System. ADVISOR: ASSOC. PROF.WIBOONLUK PUNGRASMI, Ph.D., CO-ADVISOR: SORAWIT POWTONGSOOK, Ph.D. , 278 pp.

This research evaluated the TAN removal efficiency of BCN-012 biofilter media in 3 types of nitrification reactors in the Recirculating Aquaculture System (RAS). The experiments were divided into 4 parts. The first experiment was to compare the kinetics of TAN removal of nitrifying biofilters after 3 and 6 months incubation. The results showed that the 3 months biofilter had higher maximum TAN removal rates (V_{max}) and half saturation constant (K_s) than the 6 months biofilter. In detail, the maximum rates of TAN removal were 73.20 and 53.92 mg-N/m²/day, and the half saturation constants were 6.47 and 2.15 mg-N/L, for 3 and 6 months biofilter respectively. The second experiment was to compare the efficiency of submerged, fluidized bed and trickling filter bioreactors for inorganic nitrogen removal from synthetic wastewater with initial TAN concentrations of 1, 2 and 3 mg-N/L. The results showed that trickling filter system had the highest nitrification efficiency of 1.336, 1.913 and 2.779 mg-N/m²/hr while the lowest TAN removal rates were found in submerged system of 0.930, 0.640 and 2.361 mg-N/m²/hr, respectively. The third experiment was to compare 3 types of nitrification bioreactors for inorganic nitrogen removal in tilapia culture systems. The results showed that all types of bioreactors could control nitrogen within the acceptable concentrations for aquaculture. The average TAN and nitrite concentrations of all treatments were 0.04±0.04 and 0.04±0.03 mg-N/L, respectively. The maximum nitrate concentrations of 15.11±0.88, 12.88±4.00 and 17.08±2.22 mg-N/L were found on the last day of submerged, fluidized bed and trickling filter systems, respectively. In the last experiment, the nitrification efficiencies of bioreactors after 60 days operation for aquaculture wastewater treatment was compared. The results showed that nitrification efficiency was significantly ($P<0.05$) increased in all treatments.

Department: Environmental Engineering Student's Signature.....

Field of Study:Environmental Engineering Advisor's Signature.....

Academic Year: 2016

Co-Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้เกี่ยวข้องดังรายนามต่อไปนี้

อันดับแรกขอขอบพระคุณ รศ.ดร. วิบูลย์ลักษณะ ฝั่งรัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร. สรวิศ เผ่าทองสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับหลักวิชาการที่มีประโยชน์ในการออกแบบงานวิจัย รวมถึงการให้คำปรึกษาแนะนำ ความเอาใจใส่ดูแล ตลอดจนความช่วยเหลือในแต่ละขั้นตอนระหว่างการทำงานจนเสร็จสมบูรณ์ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล ประธานกรรมการ ผศ.ดร. ศรีณย์ เตชะเสน รศ.ดร. ตะวัน ลิมปิยากร กรรมการ และ รศ.ดร. วิไล เจียมไชยศรี ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำชี้แนะและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่อบรมสั่งสอน และให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์สำหรับการประกอบวิชาชีพวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ขอขอบพระคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่ วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมีในการทำงานวิจัย รวมถึงขอขอบคุณปวีณา ตปนียวรงค์ ดร. สุรเชษฐ์ บุรุษอาชาไนย และคุณเสรี ดอนเหนือ ตลอดจนบุคลากรของศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเลทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการทำงานวิจัยและการวิเคราะห์ทางด้านวิทยาศาสตร์

ขอขอบคุณทุนยุทธศาสตร์การวิจัยเชิงลึกประจำปีงบประมาณ 2559 กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (รหัสโครงการ CU-59-022-FW) ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายตลอดการทำวิจัย และขอขอบคุณการสนับสนุนเครื่องมือ Microplate Spectrophotometer จากโครงการ Thai Government Stimulus Package 2 (TKK2555) จนสามารถดำเนินงานวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวบิดา มารดา รวมถึงเพื่อนๆทุกคนอันเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดสำหรับผู้วิจัยเสมอมา จนกระทั่งสามารถสำเร็จการศึกษาและได้รับปริญญามหาบัณฑิตตามที่ตั้งใจ

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ฎ |
| สารบัญรูป..... | ฐ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 4 |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 5 |
| 2.1 ระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ..... | 5 |
| 2.1.1 ระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถจำแนกตามการจัดการคุณภาพน้ำภายในบ่อเลี้ยงได้ 3 รูปแบบ..... | 5 |
| 2.1.2 ระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถจำแนกตามลักษณะทางกายภาพของบ่อเลี้ยงได้ 3 รูปแบบ ... | 6 |
| 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ..... | 7 |
| 2.2.1 พีเอช (pH)..... | 8 |
| 2.2.2 อุณหภูมิ (Temperature)..... | 9 |
| 2.2.3 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen; DO)..... | 9 |
| 2.2.4 ค่าสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)..... | 10 |
| 2.2.5 ค่าความกระด้าง (Hardness)..... | 10 |
| 2.2.6 แอมโมเนีย (Ammonia)..... | 11 |

| | |
|---|----|
| 2.2.7 ไนไตรต์ (Nitrite)..... | 12 |
| 2.2.8 ไนเตรต (Nitrate)..... | 13 |
| 2.2.9 ฟอสฟอรัส (Phosphorus)..... | 13 |
| 2.2.10 คลอรีน (Chlorine)..... | 14 |
| 2.2.11 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H ₂ S)..... | 15 |
| 2.3 การบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำทางชีวภาพ..... | 17 |
| 2.3.1 กระบวนการแอมโมนิฟิเคชันหรือไนโตรเจนมิเนอแรไลเซชัน (Ammonification or Nitrogen mineralization)..... | 18 |
| 2.3.2 กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification)..... | 19 |
| 2.3.3 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)..... | 23 |
| 2.4 การบำบัดไนโตรเจนด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันสำหรับระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด..... | 26 |
| 2.4.1 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบโปรยกรอง (Trickling Filters)..... | 26 |
| 2.4.2 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางจมตัว (Submerged Filters)..... | 27 |
| 2.4.3 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางเคลื่อนที่ (Fluidized Bed)..... | 28 |
| 2.4.4 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบบีดส์ฟิลเตอร์ (Bead Filters)..... | 29 |
| 2.4.5 ระบบถังปฏิกรณ์แบบจานหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactors; RBC)..... | 30 |
| 2.5 การเจริญเติบโตของจุลชีพในฟิล์มชีวภาพ (Biofilms)..... | 33 |
| 2.6 ปลาไนล 35 | 35 |
| 2.6.1 อนุกรมวิธานและรูปร่างของปลาไนล..... | 35 |
| 2.6.2 รูปแบบการเพาะเลี้ยงปลาไนล..... | 36 |
| 2.6.3 ประเภทของการเลี้ยงสัตว์น้ำ..... | 37 |
| 2.6.4 ปัจจัยของคุณภาพน้ำที่ส่งผลต่อการเลี้ยงปลาไนล..... | 39 |
| 2.7 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 40 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.7.1 | รูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิด..... | 40 |
| 2.7.2 | การใช้ตัวกรองชีวภาพบำบัดไนโตรเจนในการเลี้ยงสัตว์น้ำ | 40 |
| 2.7.3 | รูปแบบระบบบำบัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในการเลี้ยงสัตว์น้ำ..... | 44 |
| บทที่ 3 | แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย..... | 48 |
| 3.1 | วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี..... | 48 |
| 3.1.1 | อุปกรณ์สำหรับการทดลอง..... | 48 |
| 3.1.2 | อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ..... | 49 |
| 3.1.3 | สารเคมี..... | 50 |
| 3.2 | แผนการทดลอง | 51 |
| 3.3 | การดำเนินงานวิจัย | 58 |
| 3.3.1 | การทดลองช่วงที่ 1 การเปรียบเทียบตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน | 58 |
| 3.3.2 | การทดลองช่วงที่ 2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ ไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์..... | 64 |
| 3.3.3 | การทดลองช่วงที่ 3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลา | 73 |
| 3.3.4 | การทดลองช่วงที่ 4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ ไนโตรเจน ภายหลังเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลา | 79 |
| บทที่ 4 | ผลการทดลองและวิจารณ์ผล | 82 |
| 4.1 | การเปรียบเทียบตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน..... | 82 |
| 4.1.1 | จลนพลศาสตร์ในการบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อ เป็นเวลา 3 และ 6 เดือน..... | 82 |

| | |
|---|-----|
| 4.1.2 การเกาะติดของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน..... | 87 |
| 4.2 ประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์..... | 88 |
| 4.3 ประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลา..... | 94 |
| 4.4 ประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ภายหลังเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลา..... | 115 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... | 127 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง..... | 127 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 130 |
| รายการอ้างอิง..... | 131 |
| ภาคผนวก..... | 139 |
| ภาคผนวก ก..... | 140 |
| ภาคผนวก ข..... | 145 |
| ภาคผนวก ค..... | 160 |
| ภาคผนวก ง..... | 172 |
| ภาคผนวก จ..... | 220 |
| ภาคผนวก ฉ..... | 228 |
| ภาคผนวก ช..... | 256 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 278 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--------------|---|
| ตารางที่ 2.1 | ค่าระดับพีเอชที่ส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำและแนวทางการแก้ไข 8 |
| ตารางที่ 2.2 | ผลกระทบของปริมาณออกซิเจนละลายต่อสัตว์น้ำ 10 |
| ตารางที่ 2.3 | การแบ่งประเภทของน้ำตามระดับค่าความกระด้าง 11 |
| ตารางที่ 2.4 | ร้อยละของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ไม่แตกตัวที่ค่าพีเอชและอุณหภูมิต่างๆ 16 |
| ตารางที่ 2.5 | พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกรองชีวภาพแบบต่างๆ 31 |
| ตารางที่ 2.6 | เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของถังปฏิกรณ์ชีวภาพรูปแบบต่างๆ ที่บรรจุตัวกรองชีวภาพ..... 32 |
| ตารางที่ 3.1 | ตัวแปรในการศึกษาจลนพลศาสตร์ในการบำบัดแอมโมเนียรวมของ ตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน 61 |
| ตารางที่ 3.2 | พารามิเตอร์และเครื่องมือวิเคราะห์สำหรับการทดลองช่วงที่ 1 61 |
| ตารางที่ 3.3 | ตัวแปรในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารอินทรีย์ ไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์..... 72 |
| ตารางที่ 3.4 | พารามิเตอร์และเครื่องมือวิเคราะห์สำหรับการทดลองช่วงที่ 2..... 73 |
| ตารางที่ 3.5 | ตัวแปรในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารอินทรีย์ ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลา..... 76 |
| ตารางที่ 3.6 | พารามิเตอร์และเครื่องมือวิเคราะห์สำหรับการทดลองช่วงที่ 3..... 77 |
| ตารางที่ 3.7 | ตัวแปรในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ภายหลังเดินระบบ ด้วยน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลา..... 80 |
| ตารางที่ 3.8 | พารามิเตอร์และเครื่องมือวิเคราะห์สำหรับการทดลองช่วงที่ 4..... 81 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| ตารางที่ 4.1 | อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (V_{max}) และค่าคงที่เมื่ออัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (K_s)..... | 84 |
| ตารางที่ 4.2 | พารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำในชุดควบคุมและชุดทดลองในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้น เท่ากับ 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. | 94 |
| ตารางที่ 4.3 | ค่าสภาพความเป็นต่างระหว่างการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน | 103 |
| ตารางที่ 4.4 | ค่าพีเอชระหว่างการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน | 103 |
| ตารางที่ 4.5 | ค่าออกซิเจนละลายน้ำระหว่างการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน..... | 104 |
| ตารางที่ 4.6 | อุณหภูมิระหว่างการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน | 105 |
| ตารางที่ 4.7 | เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของปลานิลภายใต้สภาวะจำลองของระบบบ่อไร้ดินในโรงเรือนของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น..... | 110 |
| ตารางที่ 4.8 | การเจริญเติบโตของปลานิลในชุดควบคุม (บ่อเลี้ยงปลานิลที่ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพ)..... | 111 |
| ตารางที่ 4.9 | การเจริญเติบโตของปลานิลในชุดทดลองระบบตัวกลางจมตัว (บ่อเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางจมตัว) | 112 |
| ตารางที่ 4.10 | การเจริญเติบโตของปลานิลระบบตัวกลางเคลื่อนที่ (บ่อเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางเคลื่อนที่)..... | 113 |
| ตารางที่ 4.11 | การเจริญเติบโตของปลานิลในชุดทดลองระบบโปรยกรอง (บ่อเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบโปรยกรอง) | 114 |
| ตารางที่ 4.12 | พื้นที่ผิวที่สามารถเกิดการเกาะติดของไบโอฟิล์มได้ในแต่ละระบบ และพื้นที่ของตัวกลางชีวภาพรุ่น BCN-012..... | 124 |
| ตารางที่ 4.13 | การเปรียบเทียบระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และโปรยกรองจากงานวิจัยนี้..... | 126 |

สารบัญรูป

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 ผลของค่าพีเอชต่อสัดส่วนกรดไฮโปคลอรัสและไฮโปคลอไรต์ไอออน | 14 |
| รูปที่ 2.2 ผลของค่าพีเอชต่อร้อยละการแตกตัวของไฮโดรเจนซัลไฟด์ | 16 |
| รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ..... | 18 |
| รูปที่ 2.4 ลำดับชั้นของกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน | 19 |
| รูปที่ 2.5 แผนผังแสดงกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน..... | 25 |
| รูปที่ 2.6 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบโปรยกรอง..... | 27 |
| รูปที่ 2.7 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางจมตัว..... | 28 |
| รูปที่ 2.8 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางเคลื่อนที่ | 29 |
| รูปที่ 2.9 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ Expandable media filters | 30 |
| รูปที่ 2.10 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบจานหมุนเวียนชีวภาพ..... | 31 |
| รูปที่ 2.11 ปลานิล | 35 |
| รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย | 53 |
| รูปที่ 3.2 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 1 | 54 |
| รูปที่ 3.3 แผนผังการดำเนินการทดลองช่วงที่ 2..... | 55 |
| รูปที่ 3.4 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 3 | 56 |
| รูปที่ 3.5 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 4 | 57 |
| รูปที่ 3.6 ตัวกรองชีวภาพรุ่น BCN-012 | 58 |
| รูปที่ 3.7 การบ่มเชื้อของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันเป็นเวลา (ก) 3 เดือน และ (ข) 6 เดือน..... | 59 |
| รูปที่ 3.8 การติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับการเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์ในการบำบัด แอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน | 60 |
| รูปที่ 3.9 การเติมอากาศก่อนนำตัวกรองชีวภาพไปตรวจสอบการเกาะติดของจุลชีพบนพื้นผิว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน | 64 |

| | | |
|-------------|--|----|
| รูปที่ 3.10 | แผนภาพการหมุนเวียนน้ำและการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับชุดควบคุม | 67 |
| รูปที่ 3.11 | แผนภาพการหมุนเวียนน้ำและการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับระบบตัวกลางจมตัว..... | 68 |
| รูปที่ 3.12 | แผนภาพการหมุนเวียนน้ำและการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับระบบตัวกลางเคลื่อนที่ | 69 |
| รูปที่ 3.13 | แผนภาพการหมุนเวียนน้ำและการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับระบบโปรยกรอง..... | 70 |
| รูปที่ 3.14 | การเตรียมและปรับสภาพปลานิลในบ่อพักน้ำก่อนการทดลอง | 74 |
| รูปที่ 3.15 | แผนภาพการติดตั้งบ่อปลา ถังตกตะกอน และถังปฏิกรณ์ชีวภาพของการทดลองช่วงที่ 3 เมื่อ (ก) ชุดควบคุม และ (ข) ชุดทดลอง..... | 75 |
| รูปที่ 3.16 | การชั่งน้ำหนัก และ การวัดความยาวปลานิลเพื่อประเมินประสิทธิภาพ ของระบบเลี้ยงปลานิล..... | 79 |
| รูปที่ 4.1 | การเปลี่ยนแปลงแอมโมเนียรวมในน้ำผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน ของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน..... | 83 |
| รูปที่ 4.2 | ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแอมโมเนียรวมในระบบและ อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อ เป็นเวลา (ก) 3 เดือน และ (ข) 6 เดือน | 85 |
| รูปที่ 4.3 | จลนพลศาสตร์อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพ ที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน..... | 86 |
| รูปที่ 4.4 | ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนแสดงจุลินทรีย์ บนพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน | 87 |
| รูปที่ 4.5 | การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ไนไตรต์ และไนเตรตจากท่อน้ำออก ของถังปฏิกรณ์ชีวภาพในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน จากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล..... | 90 |
| รูปที่ 4.6 | การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ไนไตรต์ และไนเตรตของน้ำในบ่อเลี้ยงปลา ระหว่างการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน จากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล..... | 91 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| รูปที่ 4.7 | การเปลี่ยนแปลงพีเอชและค่าสภาพต่างของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาระหว่างการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล..... | 93 |
| รูปที่ 4.8 | การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ไนไตรต์ และไนเตรตจากท่อน้ำออกของชุดควบคุมและถังปฏิกรณ์ชีวภาพในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน..... | 98 |
| รูปที่ 4.9 | การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ไนไตรต์ และไนเตรตของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาระหว่างการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน..... | 99 |
| รูปที่ 4.10 | การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต่าง พีเอช ค่าออกซิเจนละลายน้ำ และอุณหภูมิของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาระหว่างการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน..... | 102 |
| รูปที่ 4.11 | การเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอยจากท่อน้ำเข้า ท่อน้ำออก และบ่อเลี้ยงปลาในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน..... | 107 |
| รูปที่ 4.12 | การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ไนไตรต์ และไนเตรตจากท่อน้ำออกของถังปฏิกรณ์ชีวภาพภายหลังจากการเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้น เท่ากับ 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. | 118 |
| รูปที่ 4.13 | การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ไนไตรต์ และไนเตรตของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาภายหลังจากการเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้น เท่ากับ 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. | 119 |
| รูปที่ 4.14 | อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรองก่อนและหลังจากการเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากระบบการเลี้ยงปลา (น้ำจากท่อน้ำออกของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ) | 122 |
| รูปที่ 4.15 | อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรองก่อนและหลังจากการเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากระบบการเลี้ยงปลา (น้ำในบ่อเลี้ยงปลา)..... | 123 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สืบเนื่องมาจากในปัจจุบันอุตสาหกรรมการเลี้ยงสัตว์น้ำของประเทศไทยมีการขยายตัวเพื่อรองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้นของตลาดทั้งภายในและภายนอกประเทศ ซึ่งเป็นผลมาจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจที่ดีทำให้ผู้บริโภคหันมานิยมการบริโภคโปรตีนจากสัตว์น้ำมากขึ้น โดยทั่วไปอุตสาหกรรมการเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์นิยมเลี้ยงสัตว์น้ำในระดับความหนาแน่นสูง ภายใต้การดำเนินการด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด (Recirculating Aquaculture System; RAS) นั่นคือ ทำการเลี้ยงสัตว์น้ำปริมาณมากต่อพื้นที่การเลี้ยงที่จำกัดภายในบ่อปิดที่มีการผสมผสานเทคโนโลยีทางวิศวกรรมเพื่อช่วยในการควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อให้เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ทั้งนี้ข้อได้เปรียบของระบบดังกล่าว คือ สามารถหมุนเวียนน้ำที่ผ่านการใช้งานแล้วเข้าหน่วยบำบัด และผันน้ำที่ผ่านการบำบัดเพื่อนำกลับมาใช้ในการเลี้ยงสัตว์น้ำรอบต่อไปได้ โดยไม่มีความจำเป็นในการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะช่วยลดผลกระทบในการระบายน้ำเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม และยังสามารถลดการเกิดโรคระบาดในสัตว์น้ำได้อีกด้วย ตลอดจนทำให้ผลผลิตสัตว์น้ำที่ได้มีปริมาณและคุณภาพสูงตรงตามความต้องการของตลาดและผู้บริโภค อย่างไรก็ตามปัญหาหลักที่พบในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด คือการสะสมตัวของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียในระดับความเข้มข้นสูงซึ่งเกิดจากการย่อยสลายโปรตีนในอาหารที่เหลือจากการบริโภคและของเสียที่เกิดจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำ ผ่านกระบวนการทางชีวภาพโดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ภายในระบบ ทั้งนี้การสะสมตัวของแอมโมเนียจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมและการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ อีกทั้งยังยับยั้งการเจริญเติบโตและการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างไนไตรต์และไนเตรต (Anthonised และคณะ, 1976) โดยทั่วไปในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำควรควบคุมระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียให้มีค่าไม่เกิน 0.025 มก.ไนโตรเจน/ล. (มันสิน ตันจุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2538) โดยการเปลี่ยนรูปแอมโมเนียในน้ำให้อยู่ในรูปของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนที่มีความเป็นพิษน้อยกว่า นั่นคือ ไนไตรต์ และไนเตรต ตามลำดับ ผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอ

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ ที่ดำเนินงานภายใต้ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน ด้วยตัวกรองชีวภาพชนิด BCN-012 ที่ผลิตจากพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-density polyethylene; HDPE) ซึ่งได้รับความนิยมในการใช้เป็นวัสดุตัวกลางในการบำบัดคุณภาพน้ำ เนื่องจากมีพื้นผิวจำเพาะสำหรับการยึดเกาะของจุลินทรีย์มาก (High specific surface area) คือเท่ากับ 859 ตร.ม./ลบ.ม. (มนวิกานต์ ขจรบุญ, 2551) นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ตัวกรองชีวภาพชนิดนี้เพื่อติดตั้งภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพรูปแบบต่างๆ ได้ เช่น ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางจมตัว (Submerged Filter Bioreactor; SF) ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางเคลื่อนที่ (Fluidized Bed Bioreactor; FB) และถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบโปรยกรอง (Trickling Filter Bioreactor; TF) เพื่อให้การบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ในงานวิจัยได้ทำการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของถังปฏิกรณ์ทั้ง 3 รูปแบบที่บรรจุตัวกรองชีวภาพ BCN-012 ซึ่งผ่านการบ่มเชื้อและเกิดการเกาะติดของจุลินทรีย์บนพื้นผิวตัวกรองการออกซิไดซ์แอมโมเนียเกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์กลุ่มไนตริไฟเออร์ (Nitrifier) ที่เจริญเติบโตบนตัวกรองในรูปแบบ Attached-growth ผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน ภายใต้สภาวะที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายน้ำให้มีค่ามากกว่า 2 มก./ล. (Timmons และคณะ, 2002) จนอยู่ในรูปของไนไตรต์และไนเตรต ตามลำดับ เพื่อให้ได้รูปแบบของระบบบำบัดไนตริฟิเคชันที่มีอัตราการบำบัดสูงสุด สามารถดำเนินการได้ง่าย ประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง และเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริงในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การบำบัดแอมโมเนียรวมของถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่บรรจุตัวกรองชีวภาพ BCN-012 ในระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์

1.2.2 เพื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียรวมจากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำจริงแบบปิด ผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับปฏิบัติการ ดำเนินการที่อุณหภูมิต้อง ณ ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกำหนดขอบเขตต่างๆ ดังนี้

1.3.1 รูปแบบของระบบบำบัดไนทรีฟิเคชันที่บรรจุตัวกรองชีวภาพซึ่งทำการศึกษา ได้แก่ ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางจมตัว ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบโปรยกรอง

1.3.2 ตัวกรองชีวภาพที่ใช้ในการศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนีย คือ วัสดุพลาสติกชนิด BCN-012 ที่ทำจากโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง มีพื้นผิวจำเพาะสำหรับการยึดเกาะของจุลชีพ เท่ากับ 859 ตร.ม./ลบ.ม.

1.3.3 การทดลองช่วงที่ 1 ดำเนินการทดลองแบบแบทช์ (Batch experiment) ด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากแอมโมเนียมคลอไรด์ ในถังปฏิกรณ์ทรงกระบอกสูงปริมาตร 2 ลิตร ส่วนการทดลองช่วงที่ 2 และ 3 ดำเนินการทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous experiment) ด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ ตามลำดับ

1.3.4 สัตว์น้ำที่ใช้ในการทดลอง คือ ปลาไนล์ (*Oreochromis nilotica* Linn.) โดยทำการเลี้ยงภายใต้สภาวะจำลองของระบบบ่อไร้ดินในโรงเรือน ที่ความหนาแน่นเริ่มต้น 0.5 กก./ลบ.ม. ของปริมาณน้ำจืดในบ่อ โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำเป็นเวลา 2 เดือน และให้อาหารเม็ดสำเร็จรูปด้วยอัตราร้อยละ 3 ต่อวันของน้ำหนักปลาทั้งหมดในถัง

1.3.5 ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ สภาพความเป็นต่าง ฯลฯ ตามวิธีมาตรฐานที่ระบุใน Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWA, WPCF, 2005) ตลอดจนประเมินคุณภาพและอัตราการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำเมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง ด้วยการชั่งน้ำหนักและวัดความยาวของลำตัว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อให้ได้ข้อมูลการบำบัดแอมโมเนียทางจลนพลศาสตร์ของตัวกรองชีวภาพชนิด BCN-012 และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบบำบัดแบบตัวกรองชีวภาพ ตลอดจนเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง โดยข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบและพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งประยุกต์ใช้งานได้จริง ดำเนินการง่าย ราคาถูก และประหยัดพื้นที่ในการติดตั้งส่วนของระบบบำบัด



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ

ปัจจุบันปริมาณสัตว์น้ำจากธรรมชาติมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากระบบนิเวศทางน้ำถูกทำลาย ประกอบกับความต้องการบริโภคอาหารประเภทโปรตีนที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีการพัฒนารูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยเทคโนโลยีต่างๆ ทั้งนี้การเลี้ยงสัตว์น้ำถือเป็นอุตสาหกรรมที่มีแนวโน้มการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง จึงมีการพัฒนารูปแบบการเลี้ยงโดยมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มปริมาณและคุณภาพของสัตว์น้ำ เพื่อให้มีปริมาณเพียงพอต่อความต้องการของตลาดและผู้บริโภคภายในประเทศตลอดจนความต้องการเพื่อจัดจำหน่ายยังต่างประเทศ

2.1.1 ระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถจำแนกตามการจัดการคุณภาพน้ำภายในบ่อเลี้ยงได้ 3 รูปแบบ

(O'Sullivan และคณะ, 1993) ดังนี้

2.1.1.1 ระบบเปิด (Open systems) เป็นรูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบดั้งเดิม โดยผันน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติเข้าสู่บ่อดินหรือกระชังเพื่อเลี้ยงสัตว์น้ำโดยตรง เมื่อดำเนินการเลี้ยงสัตว์น้ำไปช่วงเวลาหนึ่ง พบว่าคุณภาพน้ำภายในบ่อไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ อันเนื่องมาจากเศษอาหาร ของเสียจากการขับถ่าย และการเจริญเติบโตของจุลชีพ ดังนั้นเกษตรกรจึงทำการระบายน้ำเสียที่เกิดขึ้นออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัด ส่งผลให้เกิดมลภาวะและกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำบริเวณใกล้เคียง นอกจากนี้ยังไม่มีกระบวนการรักษาความสะอาดในบ่อเลี้ยง ทำให้ต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำบ่อยครั้ง และอาจเกิดการติดเชื้อโรคระบาดในสัตว์น้ำ

2.1.1.2 ระบบกึ่งเปิด (Semi-open systems) เป็นรูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำที่พัฒนาจากระบบแบบดั้งเดิม โดยลดปริมาณการเปลี่ยนถ่ายน้ำลง หรือมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำในช่วงเวลาที่คุณภาพน้ำที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำเท่านั้น จึงสามารถลดกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำบริเวณใกล้เคียงได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งระบบกึ่งเปิดยังสามารถควบคุมคุณภาพน้ำที่เข้าสู่บ่อเลี้ยง โดยสามารถปิดระบบเมื่อคุณภาพน้ำภายนอกไม่เหมาะสม ทำให้ความเสี่ยงในการติดเชื้อโรคระบาดในสัตว์น้ำลดลง นอกจากนี้ระบบดังกล่าวยังมีการดูแลเรื่องอาหารสำหรับสัตว์น้ำ และการรักษาความ

สะอาดภายในบ่ออย่างต่อเนื่อง ทำให้ผลผลิตสัตว์น้ำที่ได้มีคุณภาพและปริมาณมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเปิด

2.1.1.3 ระบบปิด (Closed systems) เป็นรูปแบบการเลี้ยงสัตว์เลี้ยงน้ำที่พัฒนาขึ้นเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และลดความเสี่ยงในการติดโรคของสัตว์น้ำอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนถ่ายน้ำ โดยมีการติดตั้งระบบบำบัดเข้ากับบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อหมุนเวียนน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ใหม่ ส่งผลให้น้ำภายในบ่อมีความเหมาะสมต่อสัตว์น้ำมากขึ้น ปัจจุบันมีการพัฒนาออกแบบระบบบำบัดทางชีวภาพหลายประเภท ซึ่งสามารถออกซิโดซ์แอมโมเนียที่มีความเป็นพิษสูงให้อยู่ในรูปของไนเตรตที่มีความเป็นพิษต่ำต่อสัตว์น้ำ โดยอาศัยแบคทีเรียชนิดไนทริฟายเออร์ในการย่อยสลายผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน นอกจากนี้บางระบบยังมีการติดตั้งหน่วยแยกตะกอนและของแข็งแขวนลอยเพื่อให้การบำบัดมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ดังนั้นรูปแบบการเลี้ยงด้วยระบบปิดจึงเหมาะสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์ที่ระดับความหนาแน่นสูง เพื่อให้ได้สัตว์น้ำที่มีคุณภาพและมีปริมาณเพียงพอต่อความต้องการของตลาดและผู้บริโภค อย่างไรก็ตามการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบดังกล่าวยังมีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากมีการเติมออกซิเจนและติดตั้งปั๊มหมุนเวียนน้ำเพื่อควบคุมคุณภาพน้ำภายในบ่อตลอดเวลา อีกทั้งยังต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการควบคุมในกรณีที่ระบบมีปัญหา

2.1.2 ระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถจำแนกตามลักษณะทางกายภาพของบ่อเลี้ยงได้ 3 รูปแบบ (กษิติศ หนูทอง, 2551) ดังนี้

2.1.2.1 บ่อดินกลางแจ้ง (Outdoor earthen pond) เป็นรูปแบบบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำที่สามารถดำเนินการได้ง่าย เสียค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและการเดินระบบต่ำ กระบวนการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนภายในบ่อสามารถเกิดขึ้นเองโดยอาศัยการทำงานของจุลชีพตามธรรมชาติ เริ่มจากการออกซิโดซ์แอมโมเนียให้อยู่ในรูปของไนเตรตภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอ ทั้งนี้อัตราการบำบัดไม่สามารถควบคุมได้โดยขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ของออกซิเจนบริเวณผิวน้ำ รวมถึงอัตราการเติมอากาศจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายและแพลงก์ตอนพืชในเวลากลางวัน นอกจากนี้กระบวนการสังเคราะห์แสงสามารถผลิตสารอนินทรีย์ขนาดเล็ก ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนีย และไนเตรต ซึ่งสิ่งมีชีวิตสามารถนำมาใช้ในการเจริญเติบโตโดยเป็นการหมุนเวียนสารตามธรรมชาติ ในส่วนของกระบวนการดีไนตริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้เองเช่นเดียวกัน โดยอาศัยแบคทีเรียกลุ่มดีไนตริฟายเออร์ภายใต้สภาวะกึ่งไร้อากาศบริเวณดินตะกอนก้น

บ่อ อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวไม่เหมาะกับการเลี้ยงสัตว์น้ำความหนาแน่นสูง เนื่องจากของเสียที่เกิดขึ้นเกินความสามารถในการบำบัดตามธรรมชาติ อีกทั้งยังมีข้อเสียในเรื่องของการติดเชื้อโรคในสัตว์น้ำที่มีการปนเปื้อนมากับดินตะกอน

2.1.2.2 บ่อไร้อินกลางแจ้ง (Outdoor lining pond) เป็นรูปแบบบ่อกลางแจ้งที่ถูกปูทับด้วยวัสดุสังเคราะห์ประเภทพลาสติก หรือบ่อที่สร้างจากวัสดุพวกซีเมนต์ จึงช่วยลดความเสี่ยงในการติดเชื้อโรคสัตว์น้ำที่ปนเปื้อนมาจากดิน อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของระบบดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากบ่อได้รับแสงตามธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืชอย่างรวดเร็ว และเมื่อแพลงก์ตอนตายจะเกิดการทับถมกัน ทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะไร้อากาศและเกิดการย่อยสลายโดยแบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟต ได้ผลผลิตเป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ

2.1.2.3 บ่อภายในโรงเรือน (Indoor pond) เป็นรูปแบบบ่อไร้อินประเภทบ่อพลาสติก ดำเนินการเลี้ยงสัตว์น้ำภายในโรงเรือนที่มีหลังคาคลุม จึงสามารถแก้ไขปัญหาเรื่องการรั่วซึมของน้ำภายในบ่อจากการปูวัสดุสังเคราะห์ทับบ่อดิน รวมถึงสามารถป้องกันการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืชและสาหร่ายจากการได้รับแสงในปริมาณมากเกินไป อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของระบบดังกล่าว คือการสะสมของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในระดับความเข้มข้นสูง เนื่องจากการเลี้ยงสัตว์น้ำภายในบ่อพลาสติกเป็นสภาพแวดล้อมไม่เอื้ออำนวยต่อการเกิดกระบวนการบำบัดตามธรรมชาติ ทำให้จุลินทรีย์ภายในบ่อไม่สามารถแสดงศักยภาพได้เต็มที่

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

คุณภาพน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพและปริมาณเพียงพอต่อความต้องการของตลาดและผู้บริโภค ทั้งนี้ยังเป็นปัจจัยสำคัญในการเจริญเติบโต การรักษาสสมดุลร่างกาย และกระบวนการเมตาบอลิซึมของสัตว์น้ำ รวมถึงกิจกรรมทางชีวเคมีของจุลินทรีย์ภายในบ่อเลี้ยง โดยปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำมีดังนี้

2.2.1 พีเอช (pH)

ค่าพีเอช หมายถึงปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน ซึ่งเป็นตัวกำหนดว่าน้ำนั้นมีคุณสมบัติเป็นกรดหรือด่าง แหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไปจะมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5-9 สำหรับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำควรควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.5-8.3 และไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชเกิน 2 หน่วยต่อวัน (O'Sullivan และคณะ, 1993) ในระบบที่มีค่าพีเอชสูงเกินไปส่งผลให้เกิดการแตกตัวของแอมโมเนียอิสระซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ในทางตรงข้ามพบว่าระบบที่มีค่าพีเอชต่ำเป็นสาเหตุให้เกิดการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำเช่นกัน โดยระดับพีเอชที่ส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำและแนวทางการแก้ไข แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าระดับพีเอชที่ส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำและแนวทางการแก้ไข

| ค่าพีเอช | ผลกระทบต่อสัตว์น้ำ | แนวทางการแก้ไข |
|----------|--|--|
| <4.0 | เป็นอันตรายและอาจทำให้สัตว์น้ำตาย | การเติมปูนขาว (CaOH_2) สามารถปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 6-6.5 |
| 4.0-6.0 | ส่งผลกระทบต่อสุขภาพสัตว์น้ำ และอัตราการเจริญเติบโต รวมถึงผลผลิต สัตว์น้ำที่ได้มีปริมาณลดลง โดยเมื่อพีเอช <5 จะไม่พบการสืบพันธุ์และวางไข่ | การเติมหินปูน (CaCO_3) หรือปุ๋ยที่มีความเป็นด่าง (alkaline fertilizers) เช่น $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ สามารถปรับพีเอชให้มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 6.5 |
| 6.5-9.0 | เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ | การเติมปุ๋ยที่มีความเป็นกรด (acid forming fertilizers) เช่น ปุ๋ยแอมโมเนียมสามารถปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 8.5 |
| 9.5-11.0 | ส่งผลกระทบต่อสุขภาพสัตว์น้ำ และอัตราการเจริญเติบโต รวมถึงผลผลิต สัตว์น้ำที่ได้มีปริมาณลดลง | ในกรณีที่มีพีเอช <10 การเติมปุ๋ยที่มีความเป็นกรด (acid forming fertilizers) เช่น ปุ๋ยแอมโมเนียมสามารถปรับพีเอชให้มีค่าลดลงเท่ากับ 8 |
| >11.0 | เป็นอันตรายและอาจทำให้สัตว์น้ำตาย | ในกรณีที่มีพีเอช >10 พบว่ายากต่อการแก้ไข |

(ที่มา : มั่นสิน ตันจุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2538)

2.2.2 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ โดยสัตว์น้ำจัดอยู่ในกลุ่มสัตว์เลือดเย็น (Poikilotherma) ที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิร่างกายตามอุณหภูมิน้ำ โดยปกติอุณหภูมิน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงแบบค่อยเป็นค่อยไปตามอุณหภูมิของอากาศ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วทำให้อุณหภูมิร่างกายของสัตว์น้ำมีความแตกต่างกับอุณหภูมิภายนอก ทำให้สัตว์น้ำไม่สามารถปรับตัวได้และอาจตายในที่สุด โดยการลดอุณหภูมิของน้ำอย่างรวดเร็วจาก 30 °ซจนมีค่าเท่ากับ 20 °ซ ส่งผลให้ปลา มีอัตราการรอดต่ำกว่าการเพิ่มอุณหภูมิ น้ำ ทั้งนี้อุณหภูมิของน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราการเกิดกิจกรรมทางชีวเคมีตามกฎของแวนฮอฟฟ์ (Van Hoff's Law) โดยกระบวนการเมตาโบลิซึมของสิ่งมีชีวิตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2-3 เท่าเมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้น 10 °ซ (ไมตรี ดวงสวัสดิ์ และจารุวรรณ สมศิริ, 2528) นอกจากนี้อุณหภูมียังมีผลต่อคุณภาพน้ำ นั่นคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณของออกซิเจนละลายน้ำลดลง และสามารถกระตุ้นการดูดซึมสารพิษเข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิต (คณิต ไชยาคำ และยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร, 2537) นอกจากนี้ยังส่งผลให้อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพและการละลายของเกลือแร่เพิ่มขึ้นอีกด้วย

2.2.3 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen; DO)

ปริมาณออกซิเจนละลายที่เหมาะสมสำหรับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีค่าสูงกว่า 5 มก./ล. (Timmons และคณะ., 2002) โดยทั่วไปก๊าซออกซิเจนสามารถละลายน้ำได้น้อยมาก ทั้งนี้อัตราการละลายของออกซิเจนขึ้นอยู่กับความกดดันของบรรยากาศ ปริมาณเกลือแร่ในน้ำ และอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม เป็นต้น โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการละลายน้ำของออกซิเจนลดลง (กรรณิการ์ สิริสิงห์, 2522) โดยระบบที่มีปริมาณออกซิเจนละลายต่ำส่งผลให้สัตว์น้ำอ่อนแอเนื่องจากการติดเชื้อ ซึ่งแก้ไขได้โดยการติดตั้งปั๊มและหัวทรายจ่ายอากาศภายในบ่อเลี้ยง อย่างไรก็ตามในระบบที่มีปริมาณออกซิเจนละลายสูงเกินไปส่งผลให้เกิดฟองก๊าซในเลือดของสัตว์น้ำ และเกิดการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซจากบริเวณที่มีออกซิเจนสูงไปยังบริเวณที่มีออกซิเจนต่ำ ทำให้สัตว์น้ำตายได้ โดยผลกระทบของปริมาณออกซิเจนละลายต่อสัตว์น้ำแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบของปริมาณออกซิเจนละลายต่อสัตว์น้ำ

| ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก.-ออกซิเจน/ล.) | ผลกระทบต่อสัตว์น้ำ |
|---|--|
| < 1 | ทำให้สัตว์น้ำตายเมื่ออาศัยอยู่เป็นเวลานาน |
| 1 - 5 | ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ อัตราการเจริญเติบโต และอัตราการแพร่พันธุ์ของสัตว์น้ำ |
| > 5 | สัตว์น้ำสามารถเจริญเติบโตและแพร่พันธุ์ได้ดี |

(ที่มา : มั่นสิน ตันกุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2538)

2.2.4 ค่าสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)

สภาพความเป็นด่างของน้ำ คือความสามารถในการรับโปรตอนหรือไฮโดรเจนไอออนของน้ำ เพื่อให้สภาพความเป็นกรดกลายเป็นกลาง ความเป็นด่างของน้ำเกิดจาก 3 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และไฮดรอกไซด์ (OH^-) นอกจากนี้ยังรวมถึงซิลิเกต (Silicates) ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) และสารอินทรีย์ต่างๆ เป็นส่วนน้อย ปกติค่าความเป็นด่างของน้ำธรรมชาติสามารถพบได้ในช่วงกว้างตั้งแต่ 5 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. จนถึงหลักร้อย โดยสภาพความเป็นด่างสามารถควบคุมไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพีเอชในแหล่งน้ำอย่างรวดเร็วด้วยระบบบัฟเฟอร์ (Buffer system) ทั้งนี้ค่าความเป็นด่างที่เหมาะสมในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำควรอยู่ในช่วง 20-150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. (วิรัช จิวแหยม, 2544) และค่าความเป็นด่างในบ่อเลี้ยงปลานิลควรอยู่ในช่วง 200-300 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. (มั่นสิน ตันกุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2538)

2.2.5 ค่าความกระด้าง (Hardness)

ความกระด้างเกิดจากองค์ประกอบหลักจำพวกเกลือของแคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) โดยทั่วไปความกระด้างไม่จัดเป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพสัตว์น้ำ แต่เนื่องจากความกระด้างมีความสัมพันธ์กับคุณภาพของน้ำ โดยเกี่ยวข้องกับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) นอกจากนี้ความกระด้างยังสามารถลดความเป็นพิษของปรอทและตะกั่วได้ในระดับหนึ่ง โดยน้ำที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำจะต้องมีความกระด้างอยู่ในระดับปานกลางหรือสูง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 80-200 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. (ภาณุ เทวรัตน์มณีกุล และคณะ, 2545) การเพิ่มความกระด้างของน้ำที่มีค่าความเป็นด่างต่ำสามารถทำได้โดยการเติมปูนขาว

(Ca(OH)₂) ปูนบด (CaCO₃) หรือปูนเผา (CaO) ส่วนน้ำที่มีค่าความเป็นด่างสูงสามารถเพิ่มความกระด้างได้โดยการเติมแคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) โดยการแบ่งประเภทของน้ำตามระดับค่าความกระด้างแสดงดังตารางที่ 2.3

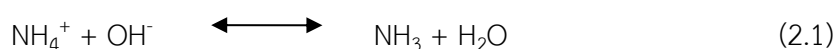
ตารางที่ 2.3 การแบ่งประเภทของน้ำตามระดับค่าความกระด้าง

| ประเภท | ค่าความกระด้าง (มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.) |
|--------------------------------|--|
| น้ำอ่อน (soft) | 0-75 |
| น้ำกระด้างปานกลาง (moderately) | 75 -150 |
| น้ำกระด้างค่อนข้างมาก (hard) | 150-300 |
| น้ำกระด้างมาก (very hard) | >300 |

(ที่มา : มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พระประภา, 2538)

2.2.6 แอมโมเนีย (Ammonia)

แอมโมเนียในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเกิดจากการย่อยสลายโปรตีนจากอาหาร รวมถึงสิ่งขับถ่ายของสัตว์น้ำผ่านกระบวนการชีวภาพโดยจุลินทรีย์ภายในระบบ โดยทั่วไปสามารถแบ่งแอมโมเนียที่พบในแหล่งน้ำได้เป็น 2 รูปแบบ คือแอมโมเนียที่แตกตัวได้หรือแอมโมเนียไอออน (Ionized ammonia; NH₄⁺) และแอมโมเนียที่ไม่แตกตัวหรือแอมโมเนียอิสระ (Unionized ammonia; NH₃) โดยแอมโมเนียสามารถเปลี่ยนรูปไปมาได้ตามค่าพีเอช และอุณหภูมิของน้ำ (Timmons, 2002) ตามสมการที่ 2.1



ในระบบที่มีค่าพีเอชสูงจะพบแอมโมเนียในรูปของแอมโมเนียอิสระ (NH₃) และเมื่อค่าพีเอชต่ำลงแอมโมเนียในน้ำจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน (NH₄⁺) ซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำน้อยกว่าแอมโมเนียอิสระ (Eshchar และคณะ, 2006) ความเป็นพิษของแอมโมเนียขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือความเป็นพิษของแอมโมเนียเพิ่มสูงขึ้นในระบบที่มีปริมาณออกซิเจนที่ละลายต่ำ ในทางตรงข้ามพบว่าน้ำมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สูงจะทำให้ความเป็นพิษของแอมโมเนียลดลง นอกจากนี้ขนาดของสัตว์น้ำ ปริมาณไนเตรต และโลหะหนักก็มีผลต่อความเป็นพิษของแอมโมเนียเช่นเดียวกัน (Crab และคณะ, 2007) ใน

ระบบที่มีแอมโมเนียระดับความเข้มข้นสูง ส่งผลให้ความสามารถในการขับแอมโมเนียออกจากเลือด สัตว์น้ำลดลง ทำให้เกิดการสะสมตัวและเป็นสาเหตุให้ระดับพีเอชในเลือดของสัตว์น้ำสูงขึ้น ซึ่งส่งผลเสียต่อการทำงานของเอนไซม์ ปฏิกริยาชีวเคมีภายในเซลล์ และลดความสามารถในการขนส่ง ออกซิเจนของเลือด (Camargo และ Alonso, 2006) นอกจากนี้ยังเป็นอันตรายต่อเหงือก และมีผล ทำให้สัตว์น้ำอ่อนแอติดเชื้อโรคได้ง่าย (รุ่งนภา สุทธิศรี, 2549) โดยความเข้มข้นของแอมโมเนียเพียง 0.1 มก.ไนโตรเจน/ล. ทำให้สัตว์น้ำเกิดการเครียดและระบบขับถ่ายผิดปกติ (วิลาสินี ไตรยราช, 2546) ทั้งนี้ระดับแอมโมเนียที่ปลอดภัยต่อสัตว์น้ำควรมีค่าไม่เกิน 0.025 มก.ไนโตรเจน/ล. (Neori และคณะ, 2004; Chen และคณะ, 2006)

2.2.7 ไนไตรต์ (Nitrite)

เป็นสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไนตริฟิเคชัน โดยอาศัย กิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซ์ซึ่งแบคทีเรีย (Ammonium-oxidizing Bacteria; AOB) เช่น Nitrosomonas, Nitrosolobus, Nitrosovibrio, Nitrosococcus, Nitrosocystis, Nitrosogloea และ Nitrospira (Watson และคณะ, 1989; Bock และคณะ, 1992) ระบบที่มีไนไตรต์สะสมในระดับ ความเข้มข้นสูงกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. สามารถส่งผลกระทบต่อสุขภาพ และทำให้ความสามารถในการ รับออกซิเจนของสัตว์น้ำต่ำกว่าปกติ (Timmons และคณะ, 2002) ความเป็นพิษของไนไตรต์เกิดจาก การรวมตัวกับฮีโมโกลบินในเลือดของสัตว์น้ำกลายเป็นเมทาฮีโมโกลบิน (Methemoglobin) ซึ่งไม่มี ความสามารถในการลำเลียงออกซิเจนไปสู่เซลล์และกล้ามเนื้อ (Nootong, 2006) เกิดเป็นสภาวะที่ เลือดมีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าปกติ หรือเรียกว่า Brown blood disease (สุบัณฑิต นิมรัตน์, 2548) การลดความเป็นพิษของไนไตรต์ทำได้โดยการเติมอากาศอย่างเพียงพอ และหมั่นเปลี่ยนถ่ายน้ำอยู่ สม่าเสมอ (ชะลอ ลิมสุวรรณ และพรเลิศ จันทร์รัชชกุล, 2547) อย่างไรก็ตามความเป็นพิษของไน ไตริต์ไม่ค่อยพบในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ เนื่องจากไนไตรต์เป็นรูปที่ไม่คงตัว จึงมักเกิดการออกซิไดซ์อยู่ใน รูปของไนเตรตซึ่งมีความเสถียรมากกว่า

2.2.8 ไนเตรต (Nitrate)

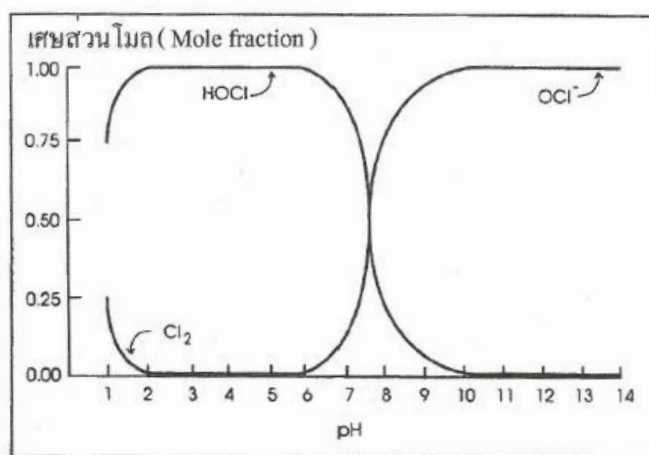
เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่เกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชัน ปกติไนเตรตเป็นรูปของไนโตรเจนที่มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามเนื่องจากไนเตรตเป็นรูปที่คงตัวทำให้สามารถสะสมในบ่อเลี้ยงได้เป็นระยะเวลาอันยาวนาน โดยการสะสมไนเตรตในระดับความเข้มข้นสูงกว่า 50 มก. ไนโตรเจน/ล. สามารถส่งผลกระทบต่อสุขภาพของสัตว์น้ำ ทำให้อัตราการเจริญเติบโตช้า ระบบการสืบพันธุ์ไม่สมบูรณ์ และอัตราการบริโภคอาหารต่ำ (Nootong, 2006) นอกจากนี้การปล่อยน้ำเสียที่มีปริมาณไนเตรตสูงออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัด ทำให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ สาหร่าย และพืชน้ำอย่างรวดเร็วจนเรียกว่า ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำไม่เพียงพอต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต (Tchobanoglous และคณะ, 2003)

2.2.9 ฟอสฟอรัส (Phosphorus)

รูปแบบของสารประกอบฟอสฟอรัสที่พบในแหล่งน้ำมี 2 แบบ คือสารประกอบอินทรีย์ฟอสเฟต (Organic phosphates) ซึ่งได้แก่ สารประกอบฟอสฟอรัสที่เกิดจากกระบวนการทางชีวภาพ และฟอสฟอรัสที่รวมกับสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น โปรตีน เป็นต้น และสารประกอบอนินทรีย์ฟอสเฟต (Inorganic phosphates) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือสารประกอบออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphates) ได้แก่ PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} และ H_2PO_4^- ซึ่งเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ดี และแพลงค์ตอนสามารถนำมาใช้ในการเจริญเติบโตได้ (ไมตรี ดวงสวัสดิ์ และจากรุวรรณ สมศิริ, 2528) เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารหลักที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต การขาดแคลนฟอสเฟตส่งผลกระทบต่อผลผลิตสัตว์น้ำ ในทางตรงข้ามพบว่าระดับฟอสเฟตที่สูงเกินไป ส่งผลให้จุลสาหร่ายและพืชน้ำสามารถเจริญเติบโตได้ดี และเกิดการแย่งออกซิเจนในเวลากลางคืน รวมถึงเมื่อสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ตายลงจะเกิดการทับถมและนำไปสู่การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ ดังนั้นระบบเลี้ยงสัตว์น้ำควรควบคุมปริมาณออร์โธฟอสเฟตในบ่อให้มีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.5 มก.ฟอสฟอรัส/ล. (มันสิน ตันทุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2538)

2.2.10 คลอรีน (Chlorine)

ปกติจะไม่พบคลอรีนตามแหล่งน้ำธรรมชาติ แต่เนื่องจากอาจมีการนำน้ำประปาซึ่งมีการผสมคลอรีนเพื่อกำจัดเชื้อโรคมานำใช้ในการเลี้ยงสัตว์น้ำ ทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพสัตว์น้ำ โดยทั่วไปความเป็นพิษของคลอรีนอยู่ในรูปของกรดไฮโปคลอรัส (Hypochlorous acid; HOCl) ซึ่งเกิดจากการละลายคลอรีนในน้ำ จากนั้นกรดไฮโปคลอรัสที่เกิดขึ้นสามารถแตกตัวเป็นไฮโปคลอไรต์ไอออนได้ ดังแสดงในสมการที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ ทั้งนี้ปัจจัยที่มีผลต่อการแตกตัวของคลอรีน ได้แก่ ค่าพีเอช และอุณหภูมิของน้ำ โดยระบบที่มีพีเอชต่ำคลอรีนจะอยู่ในรูปของกรดไฮโปคลอรัสซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ โดยรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อระดับพีเอชเข้าใกล้ 6 จะพบกรดไฮโปคลอรัสมากถึงร้อยละ 96 และเมื่อพีเอชของระบบเพิ่มขึ้นกรดไฮโปคลอรัสจะแตกตัวกลายเป็นไฮโปคลอไรต์ไอออนซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ



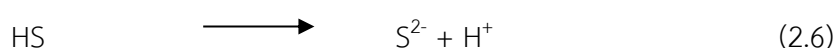
รูปที่ 2.1 ผลของค่าพีเอชต่อสัดส่วนกรดไฮโปคลอรัสและไฮโปคลอไรต์ไอออน (Boyd, 1996)

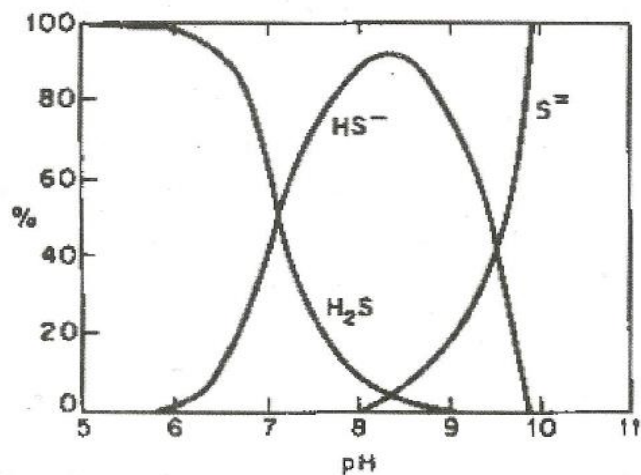
คลอรีนที่พบในรูปของกรดไฮโปคลอรัสส่งผลให้สัตว์น้ำมีอาการกระวนกระวาย กระโดดหนี และ ซับเมื่อกออกมามาก (โชคชัย เหลืองธูวราณี, 2548) โดยน้ำที่มีระดับคลอรีนเท่ากับ 0.2-0.5 มก./ล. ส่งผลให้ปลากระพงขาวและกุ้งก้ามกรามตายภายใน 48 ชม. นอกจากนี้อุณหภูมิถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความเป็นพิษของคลอรีนเช่นเดียวกัน นั่นคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความเป็นพิษของคลอรีนมากขึ้น ดังนั้นควรควบคุมปริมาณคลอรีนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำให้มีค่าไม่เกิน 0.01 มก./ล. (นฤมล อัครเทศมณี, 2556) โดยการกำจัดคลอรีนสามารถทำได้โดยการเติมสารเคมีจำพวกโซเดียมไฮโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) ดังแสดงในสมการที่ 2.4



2.2.11 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)

เกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีการใช้สารประกอบซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนภายใต้สภาวะไร้อากาศหรือแอนแอโรบิก โดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟต ปกติไฮโดรเจนซัลไฟด์ในน้ำจะมีอยู่ 2 รูปแบบ คือรูปที่ไม่แตกตัวหรือไฮโดรเจนซัลไฟด์อิสระ (Un-ionized form) ได้แก่ H_2S และรูปที่แตกตัว (Ionized form) ได้แก่ HS^- และ S^{2-} ดังแสดงในสมการที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการแตกตัวของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ได้แก่ พีเอช และอุณหภูมิ นั่นคือระบบที่มีพีเอชต่ำและอุณหภูมิสูงส่งผลให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ในรูปที่ไม่แตกตัวซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ดังรูปที่ 2.2 และตารางที่ 2.4 ตามลำดับ โดยไฮโดรเจนซัลไฟด์เพียงเล็กน้อยสามารถส่งผลยับยั้งการเจริญเติบโตและขัดขวางการขนส่งออกซิเจนภายในเซลล์ของสัตว์น้ำ ส่งผลให้สัตว์น้ำเกิดภาวะขาดออกซิเจน ทั้งนี้การได้รับไฮโดรเจนซัลไฟด์ติดต่อกันเป็นระยะเวลาานานอาจทำให้สัตว์น้ำตายได้





รูปที่ 2.2 ผลของค่าพีเอชต่อร้อยละการแตกตัวของไฮโดรเจนซัลไฟด์
(Sawyer และ McCarty, 1978)

ตารางที่ 2.4 ร้อยละของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ไม่แตกตัวที่ค่าพีเอชและอุณหภูมิต่างๆ

| พีเอช | อุณหภูมิ (°ซ) | | | | | | | | |
|-------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 |
| 5.0 | 99.3 | 99.2 | 99.2 | 99.1 | 99.1 | 99.0 | 98.9 | 98.9 | 98.9 |
| 5.5 | 97.7 | 97.6 | 97.4 | 97.3 | 97.1 | 96.9 | 96.7 | 96.5 | 96.3 |
| 6.0 | 93.2 | 92.8 | 92.3 | 92.0 | 91.4 | 90.8 | 90.3 | 89.7 | 89.1 |
| 6.5 | 81.2 | 80.2 | 79.2 | 78.1 | 77.0 | 75.8 | 74.6 | 73.4 | 72.1 |
| 7.0 | 57.7 | 56.2 | 54.6 | 53.0 | 51.4 | 49.7 | 48.2 | 46.6 | 45.0 |
| 7.5 | 30.1 | 28.9 | 27.5 | 26.3 | 25.0 | 23.8 | 22.7 | 21.6 | 20.6 |
| 8.0 | 12.0 | 11.4 | 10.7 | 10.1 | 9.6 | 9.0 | 8.5 | 8.0 | 7.0 |
| 8.5 | 4.1 | 3.9 | 3.7 | 3.4 | 3.2 | 3.0 | 2.9 | 2.7 | 2.5 |
| 9.0 | 1.3 | 1.3 | 1.2 | 1.1 | 1.0 | 1.0 | 0.9 | 0.9 | 0.8 |

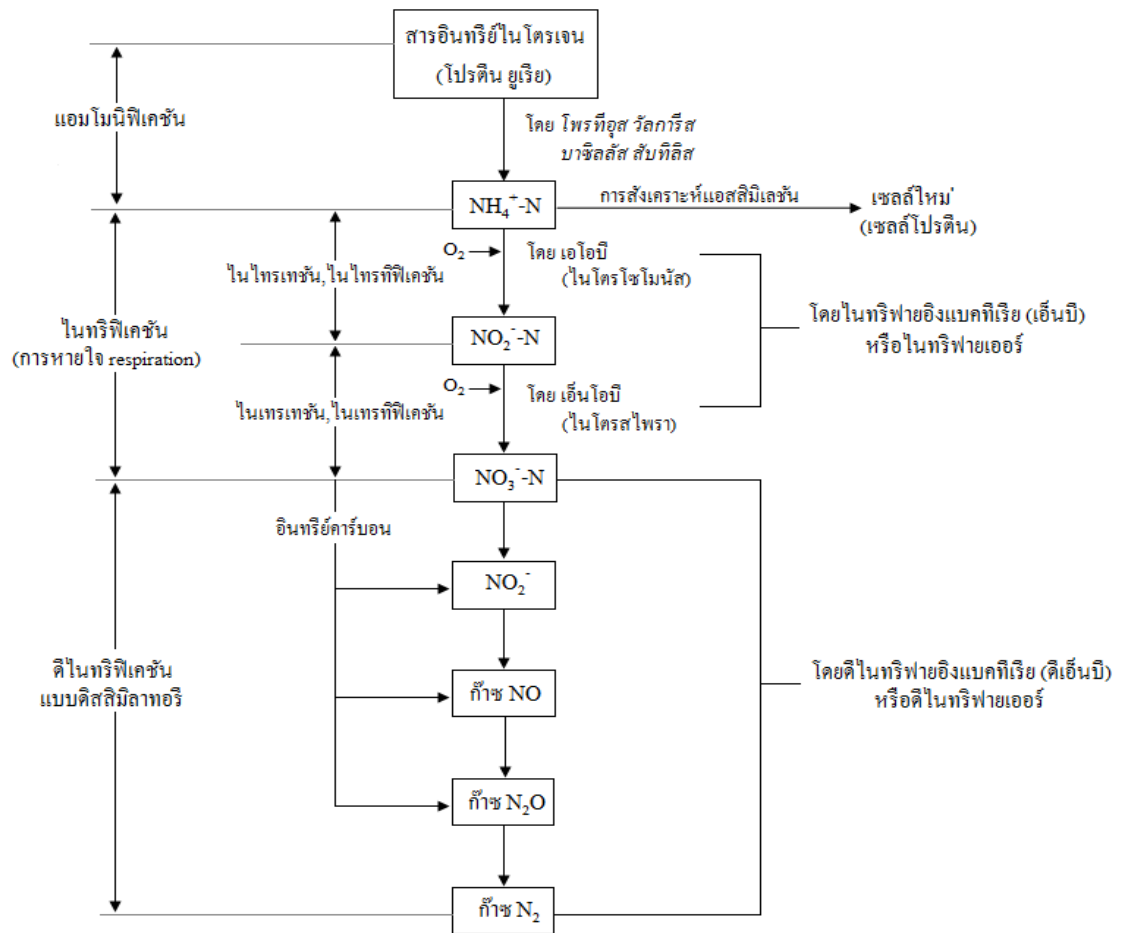
(ที่มา : Boyd, 1996)

ปัญหาการสะสมตัวของไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถพบในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำความหนาแน่นสูงที่มีของเสียจากเศษอาหารและของเสียจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำในปริมาณมาก ก่อให้เกิดการใช้ ออกซิเจนในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียภายในระบบ ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ระบบจึงเข้าสู่สภาวะไร้อากาศและเกิดการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ การลดความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำได้โดยการติดตั้งเครื่องเติมอากาศ เพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในระบบให้กับแบคทีเรียที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฮโดรเจนซัลไฟด์ไปอยู่ในรูปของซัลเฟตซึ่งมีความเป็นพิษลดลง (สมการที่ 2.7) นอกจากนี้การเติมสารเคมีจำพวกสารประกอบเหล็ก เช่น เหล็กออกไซด์ (FeO) สามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์กลายเป็นเหล็กซัลไฟด์ (FeS) ซึ่งจะตกตะกอนอยู่ในรูปที่ไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ (สมการที่ 2.8) หรือการเติมปูนขาวในปริมาณ 30 มก./ล. หรือเกลือโซเดียมคลอไรด์ในปริมาณ 250 มก./ล. ก็สามารถลดความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เช่นเดียวกัน (โชคชัย เหลืองธูวราณี, 2548)



2.3 การบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำทางชีวภาพ

การบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำประกอบด้วยกระบวนการหลัก 3 ขั้นตอน ได้แก่ แอมโมนิฟิเคชัน ไนทริฟิเคชัน และดีไนทริฟิเคชัน ตามลำดับ กระบวนการเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยอาศัยการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลายกลุ่ม นั่นคือ แบคทีเรียกลุ่มแรกทำหน้าที่เปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนให้อยู่ในรูปของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนหรือแอมโมเนียมไอออน ต่อมาแบคทีเรียกลุ่มที่สองจะทำหน้าที่เปลี่ยนแอมโมเนียมไอออนที่เกิดขึ้นให้อยู่ในรูปของไนเตรต ซึ่งเป็นรูปของไนโตรเจนที่มีความเสถียรที่สุดภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอ และสุดท้ายแบคทีเรียกลุ่มที่สามจะทำหน้าที่เปลี่ยนไนเตรตที่เกิดขึ้นให้อยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนและปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ ซึ่งขั้นตอนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนทางชีวภาพ แสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ
(ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

2.3.1 กระบวนการแอมโมนิฟิเคชันหรือไนโตรเจนมิเนอแรไลเซชัน (Ammonification or Nitrogen mineralization)

กระบวนการนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน (R-NH_2) ให้อยู่ในรูปสารประกอบอนินทรีย์หรือแอมโมเนียมไอออน โดยอาศัยการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลายกลุ่ม ตัวอย่างเช่น แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ แบคทีเรียกลุ่มแอมโมนิไฟอิง (Ammonifying bacteria) เชื้อราหลายชนิด และแอคทีโนมัยทีซิส เป็นต้น โดยเริ่มต้นจากการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของโปรตีนโดยอาศัยเอนไซม์โปรตีโอไลซิสให้กลายเป็นกรดอะมิโน เช่น อะลานีน (Alanine) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ย่อยสลายโปรตีนอีกหลายชนิด ได้แก่ กลุ่มของเอนไซม์โปรตีเนส (Proteinase) หรือโปรตีเอส (Protease) และเพปไทเดส (Peptidase) เช่น

เอนไซม์คลอสทริเพน (Clostripain) เป็นต้น จากนั้นกรดอะมิโนที่เกิดขึ้นจะถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์และเกิดกระบวนการดีอะมิเนชัน (Deamination) ได้เป็นสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) หรือแอมโมเนียอิสระ (NH_3) (Bitton, 1994; Paul และ Clark, 1996; Myrold, 2005) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ทั้งนี้กระบวนการแอมโมนิฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอรวมไปถึงสภาวะไร้อากาศ อย่างไรก็ตามมักพบกระบวนการดังกล่าวภายใต้สภาวะไร้อากาศบริเวณผิวดินใต้ดินน้ำเป็นส่วนใหญ่ โดยสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนหรือแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะถูกดูดซึมโดยสิ่งมีชีวิตจำพวกพืชและจุลินทรีย์เพื่อนำไปใช้ในการเจริญเติบโต นอกจากนี้ยังมีประโยชน์ต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำอีกด้วย



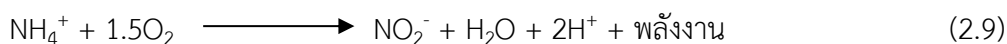
รูปที่ 2.4 ลำดับขั้นของกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน
(Bitton, 1994; Paul และ Clark, 1996; Myrold, 2005)

2.3.2 กระบวนการไนโตรฟิเคชัน (Nitrification)

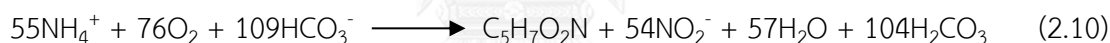
เป็นกระบวนการเปลี่ยนแอมโมเนียที่เกิดขึ้นให้อยู่ในรูปของไนไตรต์และไนเตรต ซึ่งประกอบด้วย 2 กระบวนการย่อย นั่นคือการเปลี่ยนแอมโมเนียมไอออนหรือก๊าซแอมโมเนียให้อยู่ในรูปของไนไตรต์ หรือเรียกว่ากระบวนการไนโตรซิฟิเคชัน (Nitrosification) และการเปลี่ยนไนไตรต์ให้อยู่ในรูปของไนเตรต หรือเรียกว่ากระบวนการไนไตรต์ออกซิเดชัน (Nitrite oxidation) (Paul และ Clark, 1996)

2.3.2.1 ไนโตรซิฟิเคชัน (Nitrosification)

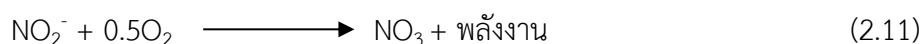
เป็นกระบวนการเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรต์โดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มออกซิไดซ์แอมโมเนีย (Ammonia Oxidizing Bacteria; AOB) ตัวอย่างเช่น Nitrosospira, Nitrosomonas, Nitrosolobus, Nitrosovibrio (Watson และคณะ, 1989) ดังสมการที่ 2.9



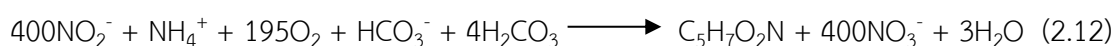
จะเห็นว่ากระบวนการดังกล่าวมีการปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออน (H^+) ซึ่งมีผลทำให้ระบบมีสถานะเป็นกรดเพิ่มมากขึ้น และส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตและการทำงานของแบคทีเรีนั่นคือในสถานะที่ระบบมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 6.0 แบคทีเรียจะมีประสิทธิภาพการทำงานช้าลง และเมื่อพีเอชต่ำกว่า 4.5 ส่งผลให้กระบวนการไนโตรซิฟิเคชันถูกยับยั้งโดยสมบูรณ์ โดยปกติไนไตรต์เป็นรูปของไนโตรเจนที่ไม่ค่อยพบการสะสมตัวในสิ่งแวดล้อม แต่ในระบบที่มีปริมาณแอมโมเนียในระดับความเข้มข้นสูงอาจทำให้เกิดการสะสมตัวของไนไตรต์ และส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ นั่นคือทำให้ปลาหยุดการเจริญเติบโตและสามารถตายได้ ดังนั้นระบบเลี้ยงสัตว์น้ำจึงควรมีการปรับค่าพีเอชให้อยู่ในสถานะที่เป็นกลางโดยการเติมสารเคมีไบคาร์บอเนตเพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับสัตว์น้ำ ทั้งนี้สมการออกซิไดซ์แอมโมเนียให้อยู่ในรูปของไนไตรต์สามารถแสดงดังสมการที่ 2.10 (ธีระ เกรอต, 2539) โดยกำหนดให้ค่าyield (Yield) ของ Nitrosomonas มีค่าเป็น 0.15 กรัมวีเอสเอส/กรัมแอมโมเนียไนโตรเจน



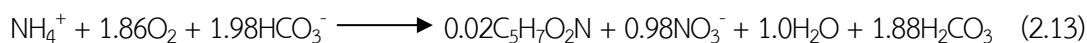
2.3.2.2 ไนไตรต์ออกซิเดชัน (Nitrite oxidation) เป็นกระบวนการเปลี่ยนไนไตรต์เป็นไนเตรต (Paul และ Clark, 1996) โดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มออกซิไดซ์ไนไตรต์ (Nitrite Oxidizing Bacteria; NOB) ตัวอย่างเช่น Nitrospina, Nitrocystis, Nitrospira และ Nitrobacter (Watson และคณะ, 1989; Bock และคณะ, 1992) ดังสมการที่ 2.11



ทั้งนี้สมการออกซิไดซ์ไนไตรต์ให้อยู่ในรูปของไนเตรตแสดงดังสมการที่ 2.12 (ธีระ เกรอต, 2539) โดยกำหนดให้ค่าyield ของ Nitrobacter มีค่าเป็น 0.2 กรัมวีเอสเอส/กรัมไนไตรต์ไนโตรเจน



โดยเมื่อรวมสมการไนโตรซิฟิเคชัน (2.10) และไนไตรต์ออกซิเดชัน (2.12) เข้าด้วยกันเป็นสมการไนโตรซิฟิเคชันแบบสมบูรณ์ ดังแสดงในสมการที่ 2.13



จะเห็นว่าปริมาณเซลล์ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณแอมโมเนียที่ถูกออกซิไดซ์ เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟที่มีบทบาทหลักในกระบวนการไนโตรซิฟิเคชันมีค่าyieldต่ำ และจากสมการที่ 2.10 และ 2.12 จะมีการใช้ออกซิเจนในการออกซิไดซ์แอมโมเนียและไนไตรต์ผ่านกระบวนการไนโตรซิฟิเคชันและไนไตรต์ออกซิเดชัน ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการไนโตรซิฟิเคชันต้องอาศัยออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในกระบวนการออกซิไดซ์แอมโมเนีย นอกจากนี้ อัตราการบำบัดแอมโมเนียยังขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนละลาย อุณหภูมิ จำนวนแบคทีเรียกลุ่มไนโตรฟายเออร์ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง และความเข้มข้นแอมโมเนียในระบบ เป็นต้น

สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดกระบวนการไนโตรซิฟิเคชัน สรุปได้ดังนี้

- ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ

กระบวนการไนโตรซิฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ในระบบที่มีปริมาณออกซิเจนละลายอย่างเพียงพอ นั่นคือมากกว่า 2 มก./ล. (Timmons และคณะ, 2002) ทั้งนี้ในระบบที่มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำกว่า 1 มก./ล. ส่งผลให้ไนโตรซิฟิเคชันถูกยับยั้งได้ (Crab และคณะ, 2007)

- ความเข้มข้นแอมโมเนีย

ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียในระบบส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟ นั่นคือเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงขึ้นจะมีผลยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม Nitrosomonas ในขณะที่เมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียลดลงอยู่ในช่วง 0.1-1.0 มก.ไนโตรเจน/ล. (Anthonisen และคณะ, 1976) สามารถยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม Nitrobacter

- พีเอช

ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อกระบวนการไนทริฟิเคชันอยู่ในช่วง 7.5-8.5 โดยในระบบที่มีพีเอชต่ำกว่า 6 สามารถส่งผลยับยั้งไนทริฟิเคชันได้ (Nootong, 2006) ในขณะที่ระดับพีเอชสูงกว่า 8.5 จะส่งผลยับยั้งการทำงานของกลุ่มแบคทีเรีย NOB (Fenchel, 1979 อ้างถึงในเพ็ญพิชญา พิณจรรย์, 2556)

- อุณหภูมิ

อุณหภูมิจะมีผลต่อ Nitrobactor มากกว่า Nitrosomonas โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดไนทริฟิเคชันมีค่าอยู่ในช่วง 25-30 °ซ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) นอกจากนี้การเปลี่ยนอุณหภูมิอย่างรวดเร็วส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์เกิดอาการช็อคและหยุดการทำงานอย่างกระทันหันได้ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

- สารยับยั้งกระบวนการไนทริฟิเคชัน

กระบวนการไนทริฟิเคชันสามารถถูกยับยั้งได้โดยโลหะหนัก ได้แก่ปรอท เงิน ทองแดง สังกะสี เป็นต้น (กษิตศ หนูทอง, 2551) และสามารถถูกยับยั้งด้วยสารพิษ ได้แก่ ยาฆ่าแมลง ไซยาไนต์ (Cyanide) เมอร์แคปแทน (Mercaptan) ฟีนอล (Phenol) คีซอล (Cresol) ไธโอยูเรีย (Thiourea) อะนิลีน (Anilines) และฮาโลจีเนส (Bitton, 1994)

- สารอินทรีย์คาร์บอน

ในระบบที่มีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนสูงสามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ ทำให้เกิดการแย่งอาหารและพื้นที่ในการสร้างไบโอฟิล์มกับแบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายเออร์ ส่งผลให้อัตราการเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันลดลง (Zhu และ Chen, 2001; Michaud และคณะ, 2006 อ้างถึงในเพ็ญพิชญา พิณจรรย์, 2556)

- พื้นที่ผิวสำหรับการยึดเกาะของแบคทีเรีย

แบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการไนทริฟิเคชันมีอัตราการเจริญเติบโตช้า ดังนั้นการติดตั้งวัสดุตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะของจุลินทรีย์สูง สามารถเพิ่มจำนวนของไนทริฟายเออร์ในระบบ และส่งผลให้การบำบัดแอมโมเนียสามารถเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

- อัตราส่วนบีโอดีต่อทีเคเอ็น

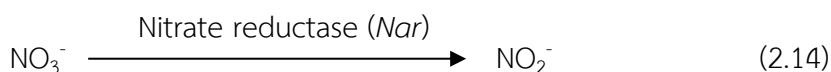
อัตราส่วนบีโอดีต่อทีเคเอ็นที่เหมาะสมต่อกระบวนการไนทริฟิเคชันควรมีค่าไม่เกิน 3 ทั้งนี้ในระบบที่มีอัตราส่วนบีโอดีต่อทีเคเอ็นสูง ส่งผลกระทบต่อแบคทีเรียกลุ่มไนทริไฟเออร์ทำให้มีจำนวนลดลง (Tchobanoglous และคณะ, 2003)

2.3.3 กระบวนการดีไนทริฟิเคชัน (Denitrification)

เป็นการบำบัดในเทรตที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไนทริฟิเคชัน โดยเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของไนไตรต์ (NO_2^-) ไนทริกออกไซด์ (NO) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และก๊าซไนโตรเจน (N_2) ตามลำดับ โดยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มดีไนทริไฟเออร์ ได้แก่ *Alcaligenes* sp., *Flavobacterium* sp., *Pseudomonas* sp. และ *Bacillus* sp. (Myrold, 2005) ทั้งนี้แบคทีเรียกลุ่มดังกล่าวสามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะที่มีอากาศและไร้อากาศ แต่ทว่าในระบบที่มีทั้งออกซิเจน และไนเทรตแบคทีเรียจะเลือกใช้ออกซิเจนก่อนเนื่องจากเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ให้พลังงานสูงกว่า และเมื่อออกซิเจนในระบบหมดลง แบคทีเรียจึงหันมาใช้ไนเทรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงควรควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายในระบบให้มีค่าไม่เกิน 1 มก./ล. เพื่อให้กระบวนการดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้กระบวนการดีไนทริฟิเคชันประกอบด้วย 4 ขั้นตอนย่อย ได้แก่

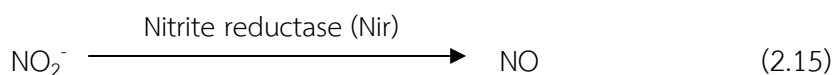
- ขั้นตอนกระบวนการไนเทรตรีดักชัน (Nitrate reduction)

เป็นการเปลี่ยนไนเทรตให้อยู่ในรูปของไนไตรต์โดยอาศัยเอนไซม์ไนเทรตรีดักเทส (Nitrate reductase; *Nar*) ดังสมการที่ 2.14 ทั้งนี้กระบวนการดังกล่าวจะใช้ไนเทรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน และเอนไซม์ไนเทรตรีดักเทสจะถูกยับยั้งด้วยปริมาณออกซิเจนละลายภายในระบบ



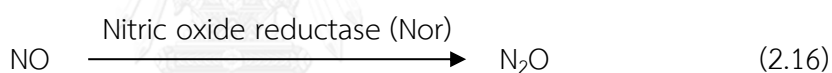
- ขั้นตอนไนไตรต์รีดักชัน (Nitrite reduction)

เป็นการเปลี่ยนไนไตรต์ให้อยู่ในรูปของไนตริกออกไซด์โดยอาศัยเอนไซม์ไนไตรต์รีดักเทส (Nitrite reductase; Nir) ดังสมการที่ 2.15 ทั้งนี้กระบวนการดังกล่าวจะใช้ไนไตรต์เป็นตัวรับอิเล็กตรอน และเอนไซม์ไนไตรต์รีดักเทสจะถูกยับยั้งด้วยปริมาณออกซิเจนละลายภายในระบบ



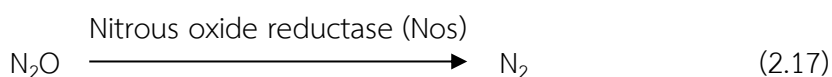
- ขั้นตอนไนตริกออกไซด์รีดักชัน (Nitric oxide reduction)

เป็นการเปลี่ยนไนตริกออกไซด์ให้อยู่ในรูปของไนตรัสออกไซด์โดยอาศัยเอนไซม์ไนตริกออกไซด์รีดักเทส (Nitric oxide reductase; Nor) ดังสมการที่ 2.16 ทั้งนี้กระบวนการดังกล่าวจะใช้ไนตริกออกไซด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอน และเอนไซม์ไนตริกออกไซด์รีดักเทสสามารถจะถูกยับยั้งด้วยปริมาณออกซิเจนละลายภายในระบบ

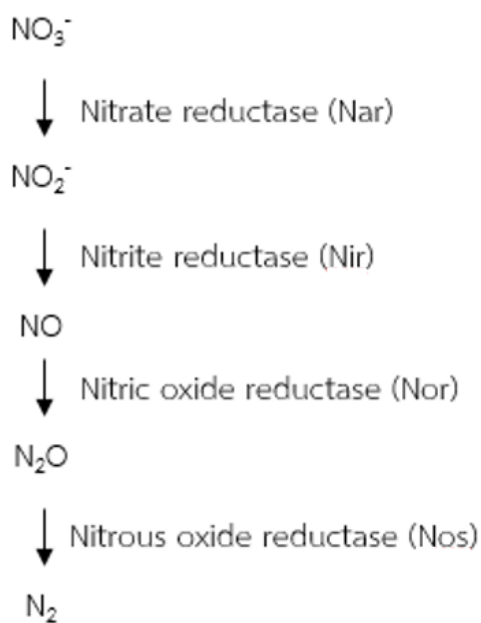


- ขั้นตอนไนตรัสออกไซด์รีดักชัน (Nitrous oxide reduction)

เป็นการเปลี่ยนไนตรัสออกไซด์ให้อยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนโดยอาศัยเอนไซม์ไนตรัสออกไซด์รีดักเทส (Nitrous oxide reductase; Nos) ดังสมการที่ 2.17 ทั้งนี้กระบวนการดังกล่าวจะใช้ไนตรัสออกไซด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอน และเอนไซม์ไนตรัสออกไซด์รีดักเทสจะถูกยับยั้งด้วยปริมาณออกซิเจนละลายภายในระบบ รวมถึงสภาวะที่มีค่าพีเอชต่ำ



จากสมการไนเตรตรีดักชัน (2.14) ไนไตรตรีดักชัน (2.15) ไนทริกออกไซด์รีดักชัน (2.16) และไนทรีสออกไซด์รีดักชัน (2.17) สามารถรวมเป็นสมการรีดักชันผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชันดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนผังแสดงกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน

(Paul และ Clark, 1996)

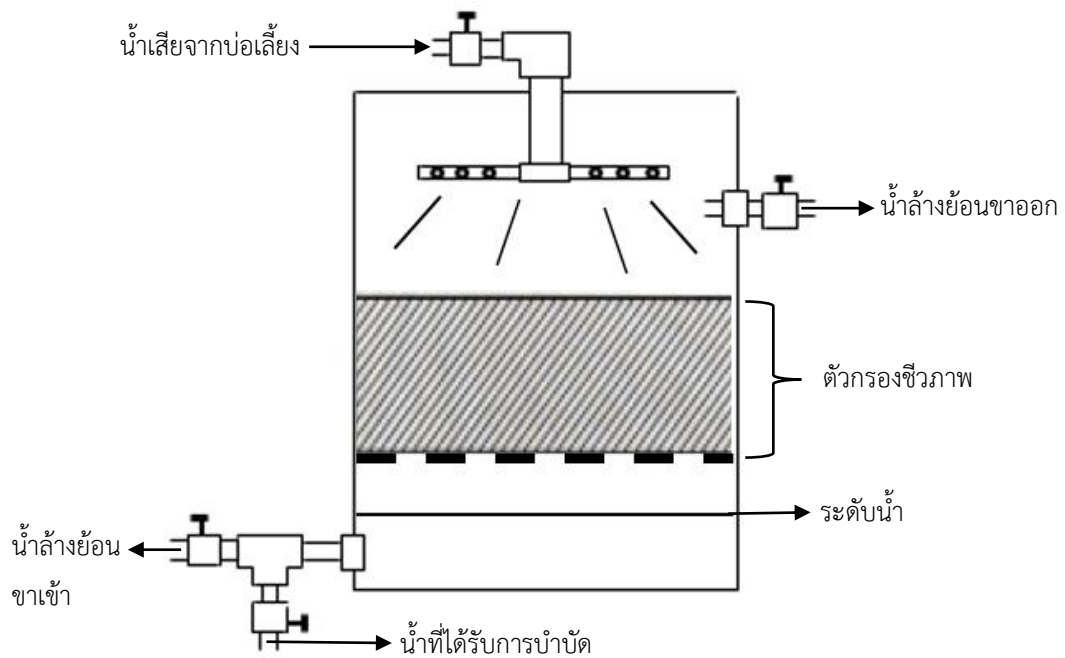
อย่างไรก็ตามดีไนทริฟิเคชันเป็นกระบวนการหลักที่มีความสำคัญต่อระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ เนื่องจากสามารถลดความเป็นพิษของไนเตรตโดยการรีดิวซ์ให้อยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนและปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยตรง ทั้งนี้อัตราการเกิดดีไนทริฟิเคชันนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไนเตรต อุณหภูมิ สารอินทรีย์คาร์บอน และปริมาณแบคทีเรียกลุ่มดีไนทริไฟเออร์ เป็นต้น

2.4 การบำบัดไนโตรเจนด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันสำหรับระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด

ระบบการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันการโดยจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพเป็นรูปแบบที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง อาศัยพื้นที่ในการติดตั้งระบบน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบจุลินทรีย์แขวนลอย อีกทั้งการอาศัยวัสดุตัวกลางในการยึดเกาะของจุลินทรีย์ทำให้แบคทีเรียสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพมากขึ้น โดยสามารถจำแนกรูปแบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพได้ดังต่อไปนี้

2.4.1 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบโปรยกรอง (Trickling Filters)

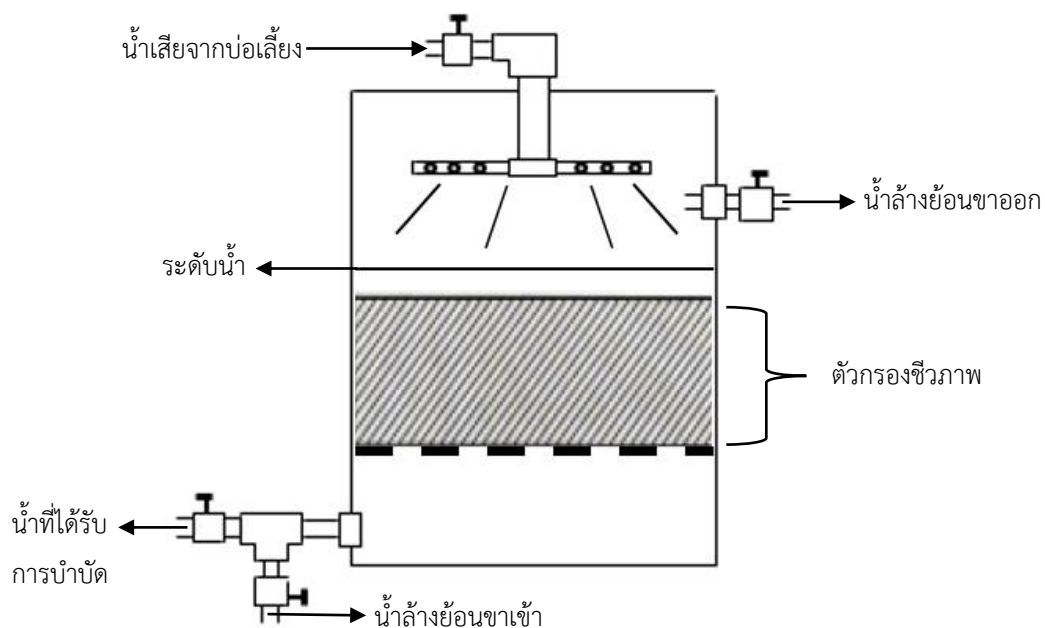
เป็นรูปแบบของถังปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพแบบตัวกลางคงที่ภายในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ในอดีตจะอาศัยหินเป็นวัสดุตัวกลางในการยึดเกาะของจุลชีพ แต่เนื่องจากมีน้ำหนักมาก ดังนั้นตัวกรองชีวภาพในปัจจุบันจึงผลิตจากวัสดุต่างๆที่มีน้ำหนักเบา โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะสำหรับการยึดเกาะของแบคทีเรียกลุ่มไนตริฟายเออร์ในช่วง 100-300 ตร.ม./ลบ.ม. (Timmons และคณะ, 2002) ทั้งนี้หลักการการทำงานของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบโปรยกรอง เริ่มต้นจากการผันน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีปริมาณแอมโมเนียในระดับความเข้มข้นสูง ผ่านตัวกรองชีวภาพจากบนลงล่างอย่างต่อเนื่อง จากนั้นจุลินทรีย์บนตัวกลางจะทำการเปลี่ยนแอมโมเนียให้อยู่ในรูปของไนเตรตผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอ โดยทั่วไปอัตราการบำบัดแอมโมเนียในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบโปรยกรองมีค่าเท่ากับ 0.24-0.64 ก.แอมโมเนียทั้งหมด/ตร.ม./วัน (Eding และคณะ, 2006) ข้อได้เปรียบของระบบดังกล่าว คือเสียค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ เนื่องจากอาศัยการเติมอากาศจากการไหลของน้ำตามแรงโน้มถ่วง อย่างไรก็ตามการไหลของน้ำเสียแบบไม่ต่อเนื่องอาจทำให้ตัวกรองชีวภาพแห้ง ส่งผลให้จุลชีพบนตัวกรองชีวภาพตายและเกิดการหลุดร่อนออกมาปนกับน้ำที่ผ่านการบำบัด ซึ่งเป็นข้อด้อยของระบบนี้ นอกจากนี้ระบบโปรยกรองยังไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีปริมาณตะกอนแขวนลอยสูง เนื่องจากอาจเกิดการอุดตันภายในช่องว่างระหว่างตัวกรองชีวภาพ ดังนั้นจึงควรผ่านน้ำเสียเข้าสู่ถังตกตะกอนขั้นแรกก่อน หรือสามารถแก้ไขได้โดยการจัดช่วงเวลาในการล้างย้อนให้เหมาะสม (มันสิน ตันกุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2538)



รูปที่ 2.6 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบโปรยกรอง
(ดัดแปลงมาจาก Lawson, 1995 อ้างถึงในภาพร กิตติมศักดิ์, 2541)

2.4.2 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางจมตัว (Submerged Filters)

หลักการทำงานของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางจมตัว เริ่มจากการบังคับทิศทางการไหลของน้ำเสียผ่านตัวกรองชีวภาพจากด้านบนลงล่าง ทั้งนี้ตัวกลางอยู่ในสภาวะแบบจมอยู่ในน้ำตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ภายในถังปฏิกรณ์ดังกล่าวแบคทีเรียกลุ่มออกโตโทรฟจะทำหน้าที่บำบัดแอมโมเนียในน้ำให้อยู่ในรูปของไนเตรตซึ่งมีความเป็นพิษน้อยกว่าผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน อย่างไรก็ตามปัญหาที่พบในระบบนี้เกิดขึ้นเช่นเดียวกับระบบโปรยกรอง นั่นคืออาจเกิดการอุดตันภายในช่องว่างระหว่างตัวกรองชีวภาพอันเนื่องมาจากตะกอนแขวนลอยที่ปนมากับน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการจัดช่วงเวลาในการล้างย้อนให้เหมาะสม

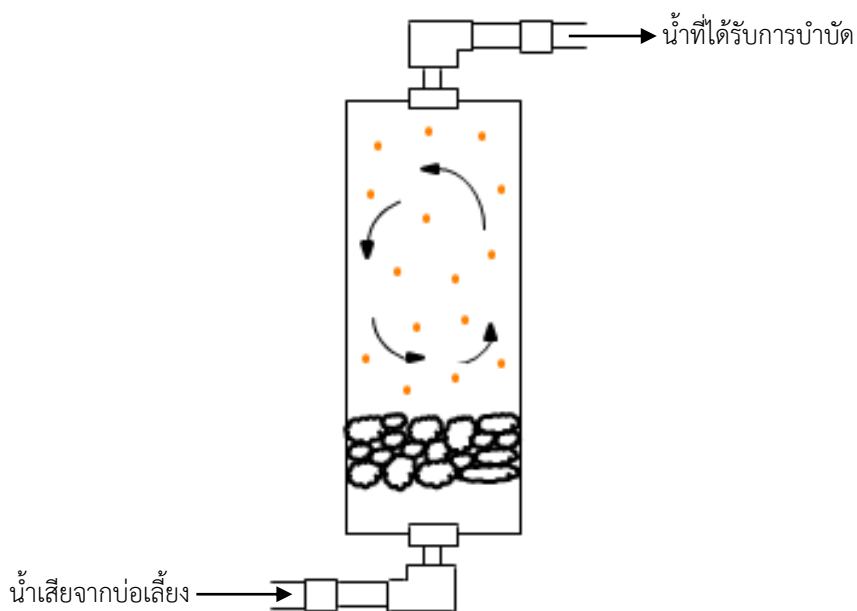


รูปที่ 2.7 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางจมตัว
(ดัดแปลงมาจาก Lawson, 1995 อ้างถึงในนภาพร กิติมศักดิ์, 2541)

2.4.3 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางเคลื่อนที่ (Fluidized Bed)

เป็นรูปแบบของถังปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพแบบตัวกลางเคลื่อนที่ภายในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 วัสดุตัวกลางดังกล่าวจะช่วยให้การยึดเกาะของจุลชีพโดยทั่วไปมักมีขนาดเล็กเพื่อให้เกิดการฟุ้งกระจายได้อย่างสมบูรณ์ ตัวอย่างเช่น Biomedica เม็ดทราย และเม็ดพลาสติกโพลีสไตรีน (Polystyrene bead) เป็นต้น ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะสำหรับการยึดเกาะของแบคทีเรียกลุ่มไนโตรฟายเออร์ ในช่วง 4,000–20,000 ตร.ม./ลบ.ม. (Shieh และคณะ, 1987) สำหรับหลักการทำงานของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางเคลื่อนที่ จะเริ่มต้นจากการสูบน้ำเสียเข้าทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ ทำให้ตัวกรองชีวภาพเกิดการฟุ้งกระจาย จากนั้นจุลินทรีย์บนตัวกรองจะทำการออกซิไดซ์แอมโมเนียให้อยู่ในรูปของไนเตรต ทั้งนี้การฟุ้งกระจายของตัวกลางภายในระบบสามารถเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกับน้ำเสียได้มากขึ้น โดยทั่วไปพบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียในถังปฏิกรณ์ดังกล่าวเท่ากับ 0.24-0.55 ก.แอมโมเนียรวม/ตร.ม./วัน (Sandu และคณะ, 2002; Summerfelt และ Sharrer, 2004) ข้อได้เปรียบของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางเคลื่อนที่ คือ สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณแอมโมเนียในระดับ

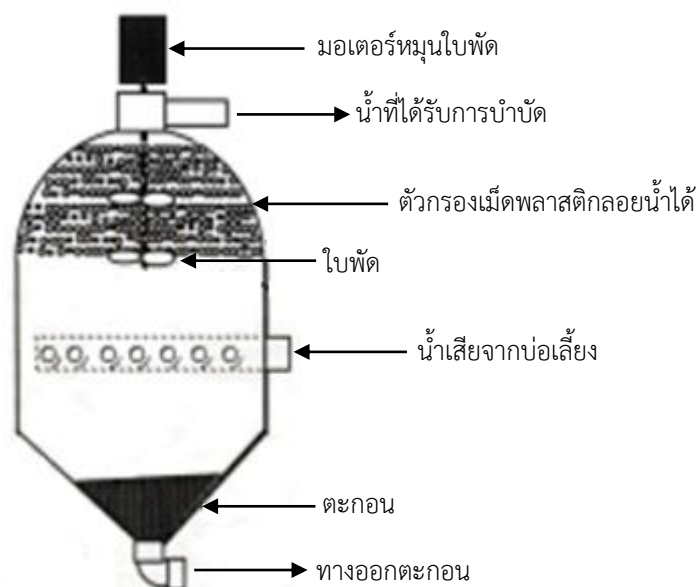
ความเข้มข้นสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพนอกจากนี้ยังแก้ปัญหาการอุดตันของตัวกรองชีวภาพได้อีกด้วย
อย่างไรก็ตามปัญหาที่เกิดขึ้นมักมาจากการเติมอากาศภายในระบบอย่างไม่ทั่วถึง



รูปที่ 2.8 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางเคลื่อนที่
(ดัดแปลงมาจาก Lawson, 1995 อ้างถึงในภาพร กิตติมศักดิ์, 2541)

2.4.4 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบบีดส์ฟิลเตอร์ (Bead Filters)

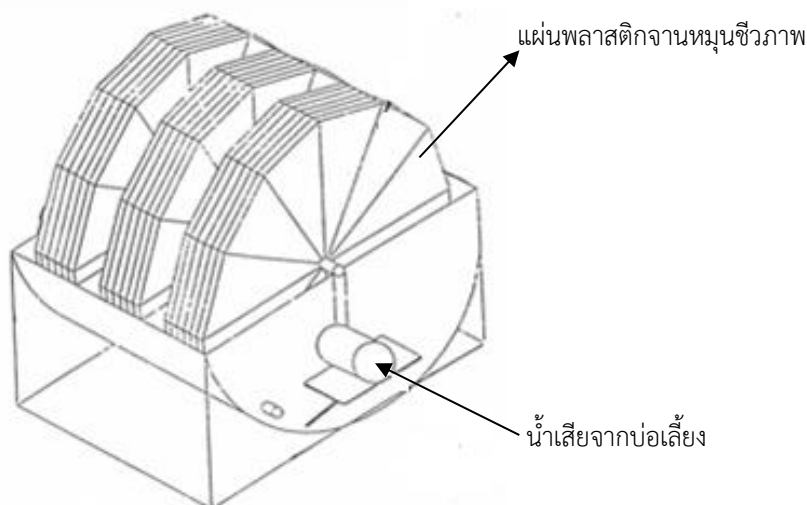
เป็นรูปแบบของถังปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในระบบดังแสดงในรูปที่ 2.9 วัสดุตัวกลางในการยึดเกาะของจุลชีวมักมีขนาดเล็กซึ่งทำจากพลาสติกพอลิเอทิลีน (Polyethylene) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-5 มม. และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสำหรับยึดเกาะของจุลชีพประมาณ 1,150-1,475 ตร.ม./ลบ.ม. หลักการทำงานของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบบีดส์ฟิลเตอร์เริ่มต้นจากการสูบน้ำเสียเข้าทางด้านข้างของถังปฏิกรณ์ ตะกอนที่ปนมากับน้ำเสียจะเกิดการตกตามแรงโน้มถ่วงสู่ก้นถังปฏิกรณ์ ในส่วนของน้ำเสียจะถูกดันผ่านชั้นตัวกรองทำให้เกิดการออกซิไดซ์แอมโมเนียโดยแบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายเออร์ ซึ่งมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับ 325 ก.แอมโมเนียรวม/ลบ.ม./วัน (Losordo และคณะ, 1999) ทั้งนี้ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบบีดส์ฟิลเตอร์เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีอัตราการไหลต่ำ ข้อได้เปรียบของระบบ คือสามารถแยกตะกอนออกจากน้ำเสีย จึงช่วยแก้ปัญหาการอุดตันของตัวกรองชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.9 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ Expandable media filters
(ดัดแปลงมาจาก Losordo และคณะ, 1999 อ้างถึงในเอกชัย มาลาพล, 2551)

2.4.5 ระบบถังปฏิกรณ์แบบจานหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactors; RBC)

เป็นรูปแบบของถังปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 สำหรับวัสดุตัวกลางในการยึดเกาะของจุลชีพจะมีลักษณะคล้ายแผ่นจานทรงกระบอก ทำจากพลาสติกหรือแผ่นพีวีซี โดยมีส่วนที่จมอยู่ใต้น้ำอยู่ประมาณร้อยละ 50 ของพื้นที่ทั้งหมด พื้นที่ผิวในการยึดเกาะของจุลชีพบนตัวกรองชีวภาพเท่ากับ 200 ตร.ม./ลบ.ม. ทั้งนี้หลักการทำงานของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบจานหมุนเวียนชีวภาพ เริ่มต้นจากการหมุนของตัวกลางด้วยความเร็วรอบเท่ากับ 1.5-2 รอบต่อนาที (Timmons และคณะ, 2002) ซึ่งทำให้จุลชีพเกิดการสัมผัสกับน้ำและอากาศอย่างทั่วถึง ส่งผลให้เกิดการบำบัดแอมโมเนียได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับ 76 ก.แอมโมเนียรวม/ลบ.ม./วัน (Wheaton และคณะ, 1994) ส่วนข้อได้เปรียบของระบบคือสามารถแก้ปัญหาการอุดตันของตัวกรองชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้สำหรับการใช้งานในระยะยาวซึ่งก่อให้เกิดการเพิ่มจำนวนของจุลชีพบนตัวกรองชีวภาพ จะส่งผลให้ตัวกรองมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นและเกิดการสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการหมุนตัวกรองชีวภาพ (เอกชัย มาลาพล, 2551)



รูปที่ 2.10 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบจานหมุนเวียนชีวภาพ
(ดัดแปลงมาจาก Wheaton และคณะ, 1994 อ้างถึงในภาพร กิติมศักดิ์, 2541)

ตารางที่ 2.5 และ 2.6 แสดงข้อมูลสรุปพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกรองชีวภาพต่างๆ และการเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของระบบถังปฏิกรณ์รูปแบบต่างๆที่มีการบรรจุตัวกรองชีวภาพเป็นวัสดุตัวกลาง

ตารางที่ 2.5 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกรองชีวภาพแบบต่างๆ

| ชนิดของตัวกรองชีวภาพ | พื้นที่ผิว (ตร.ม./ลบ.ม.) | เอกสารอ้างอิง |
|--|--------------------------|----------------------------|
| - Kaldnes rings | 500 | Lekang และ Kleppe (2000) |
| - Norton rings | 220 | Timmons และคณะ (2006) |
| - Finturfartical grass | 284 | Greiner และ Timmons (1998) |
| - leca or light weight Clay aggregate | 500-1,000 | Timmons และคณะ (2006) |
| - Biomedia | 850 | Suhr และ Pedersen (2010) |
| - Polystyrene bead | 4,000-20,000 | Shieh และ Keenan (1987) |
| - Filter sand | 4,000-20,000 | Summerfelt (2006) |
| - Polyethylene | 1,150-1,475 | Timmons และคณะ (2002) |
| - R-190 | 190 | มนต์วิภากร ขจรบุญ (2551) |
| - BCN-009 | 864 | มนต์วิภากร ขจรบุญ (2551) |
| - BCN-012 | 859 | ชินินทร์ ทับทอง (2554) |

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของถังปฏิกรณ์ชีวภาพรูปแบบต่างๆที่บรรจุตัวกรองชีวภาพ

| ระบบถังปฏิกรณ์ | ข้อดี | ข้อเสีย |
|------------------------|--|---|
| ระบบไปรยกรอง | <ul style="list-style-type: none"> - สะดวกในการสร้างและออกแบบ - กำจัด CO₂ ในน้ำได้ดี - แลกเปลี่ยนออกซิเจนในกระบวนการไนตริฟิเคชันได้ดี | <ul style="list-style-type: none"> - เกิดการอุดตันภายในช่องว่างระหว่างตัวกรองชีวภาพ |
| ระบบตัวกลางจมตัว | <ul style="list-style-type: none"> - สะดวกในการสร้างและออกแบบ | <ul style="list-style-type: none"> - เกิดการอุดตันภายในช่องว่างระหว่างตัวกรองชีวภาพ |
| ระบบตัวกลางเคลื่อนที่ | <ul style="list-style-type: none"> - แยกตะกอนแขวนลอยได้ดี ซึ่งสามารถแก้ปัญหาเรื่องการอุดตันของตัวกรองชีวภาพ - สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีแอมโมเนียในระดับความเข้มข้นสูงได้ - มีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะของจุลินทรีย์สูง | <ul style="list-style-type: none"> - ระบบการเติมอากาศไม่ทั่วถึง |
| ระบบบีดส์ฟิลเตอร์ | <ul style="list-style-type: none"> - แยกตะกอนแขวนลอยได้ดี ซึ่งแก้ปัญหาเรื่องการอุดตันของตัวกรองชีวภาพ - บำบัดน้ำเสียที่มีแอมโมเนียในระดับความเข้มข้นสูงได้ | <ul style="list-style-type: none"> - น้ำเสียไม่ได้รับการบำบัดอย่างทั่วถึง - มีต้นทุนในการสร้างระบบสูงเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของตัวกรองชีวภาพ |
| ระบบจานหมุนเวียนชีวภาพ | <ul style="list-style-type: none"> - แก้ปัญหาเรื่องการอุดตันของตัวกรองชีวภาพ - แลกเปลี่ยนออกซิเจนในกระบวนการไนตริฟิเคชันได้ดี - ระบบมีความยืดหยุ่นสูง เพิ่มหรือลดขนาดของระบบได้ | <ul style="list-style-type: none"> - สิ้นเปลืองพลังงานจากการหมุนตัวกรองชีวภาพ - ใช้พื้นที่ในการติดตั้งสูง - ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการเดินระบบ |

(ที่มา : Timmons และคณะ, 2002)

2.5 การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในฟิล์มชีวภาพ (Biofilms)

รูปแบบการเจริญของจุลินทรีย์ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท นั่นคือ แบบที่เรียกว่าเติบโตแบบแขวนลอยอยู่ในน้ำ (Suspended growth) และแบบที่เรียกว่าเกิดการเกาะติดบนพื้นผิวตัวกรองชีวภาพด้วยวิธีการตรึงเชื้อ (Attach growth หรือ Immobilization) ทั้งนี้ การรวมกลุ่มกันของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพจะส่งผลให้แบคทีเรียมีอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น นอกจากนี้การสร้างชั้นไบโอฟิล์มยังช่วยปกป้องเซลล์จากสิ่งแวดล้อมภายนอกได้อีกด้วย กระบวนการสร้างชั้นไบโอฟิล์มบนตัวกรองชีวภาพ คือ การขนส่งและการดูดซับของสารอาหารจากชั้นน้ำเข้าสู่พื้นผิวของตัวกรองชีวภาพ (Transportation และ Adsorption) จากนั้นสารอาหารที่ถูกดูดซับจะเกิดการแพร่ผ่านจากพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพด้านนอกเข้าสู่ด้านใน (Transportation) ทำให้วัสดุตัวกลางเกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นั่นคือมีสารอาหารและปริมาณออกซิเจนละลายอย่างเพียงพอ ส่งผลให้เกิดการเกาะติดและการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพมากขึ้น (Attachment) โดยแบคทีเรียที่รวมกลุ่มกันบนวัสดุตัวกลางจะทำการสร้างเมือกไบโอฟิล์มผ่านกระบวนการทางชีวภาพ เรียกว่าการแปลงรูปของแบคทีเรียเป็นฟิล์มชีวภาพบริเวณผิวของตัวกลาง (Transformation) และสุดท้ายเมื่อชั้นฟิล์มมีความหนามากขึ้น อาจส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนไม่สามารถแพร่ผ่านเข้าสู่ภายในตัวกรองชีวภาพได้อย่างเพียงพอ จึงเกิดการตายและหลุดร่อนของฟิล์มชีวภาพบางส่วน (Detachment) โดยทั่วไปแผ่นฟิล์มบนตัวกรองชีวภาพจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 70-89 โดยน้ำหนัก ซึ่งภายในแผ่นฟิล์มจะประกอบด้วยชั้นที่มีอากาศหรือแอโรบิก (Aerobic layer) และชั้นไร้อากาศหรือแอนแอโรบิก (Anaerobic layer) โดยชั้นมีอากาศจะอยู่บริเวณผิวด้านนอกที่ความหนาประมาณ 200-300 ไมโครเมตร ซึ่งทำหน้าที่หลักในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ดังนั้นความหนาของชั้นนี้จึงขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ นั่นคือระบบที่มีปริมาณสารอาหารต่ำซึ่งไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ส่งผลให้แผ่นฟิล์มชีวภาพมีความบาง ในทางกลับกันพบว่าถ้าปริมาณอาหารมีความเข้มข้นสูง ทำให้ฟิล์มชีวภาพมีความหนาเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ถ้าความหนาของชั้นไบโอฟิล์มถึงจุดวิกฤติ (Critical thickness) ส่งผลให้ออกซิเจนไม่สามารถแพร่ผ่านเข้าไปด้านในของแผ่นฟิล์ม ทำให้จุลินทรีย์ภายในขาดอากาศ หยุดการเจริญเติบโต และตายในที่สุด โดยประสิทธิภาพการเกาะติดของไบโอฟิล์มบนตัวกรองชีวภาพขึ้นกับหลายปัจจัย ได้แก่ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ

ความเข้มข้นและชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำ ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านผิวของตัวกรอง และลักษณะผิววัสดุของตัวกรองชีวภาพ เป็นต้น

สำหรับกลุ่มจุลินทรีย์ที่เติบโตบนตัวกรองชีวภาพ ประกอบด้วยจุลินทรีย์หลัก 2 กลุ่ม ได้แก่ แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ (Heterotroph) ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงาน และใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในกระบวนการทางชีวภาพ กับแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟ (Autotroph) ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ใช้ไบคาร์บอเนตเป็นแหล่งคาร์บอนโดยทั่วไป แบคทีเรียทั้งสองกลุ่มนี้จะอยู่ในสภาวะที่แข่งขันกันในการเจริญเติบโต ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟจะเจริญเติบโตได้เร็วกว่าแบคทีเรียออโตโทรฟ จึงพบแบคทีเรียกลุ่มดังกล่าวอาศัยอยู่บริเวณด้านนอกของแผ่นฟิล์มชีวภาพ เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีอาหารและออกซิเจนเพียงพอต่อการเจริญเติบโต ในขณะที่แบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟซึ่งมีการเจริญเติบโตช้ากว่าจะอาศัยอยู่บริเวณด้านในของแผ่นฟิล์มชีวภาพ (มนวิกันต์ ขจรบุญ, 2551) โดยจุลินทรีย์บนวัสดุตัวกลางจะทำการสร้างเส้นใย (Glycocalyx) ซึ่งประกอบด้วยไกลโคโปรตีน (Glycoprotein) และพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) ซึ่งเป็นโมเลกุลของน้ำตาลที่มีกิ่ง (Branching sugar molecules) โดยเส้นใยจะเกิดการพันเกาะกันอย่างหนาแน่น ทำให้แบคทีเรียเกาะกันเป็นแผ่นฟิล์มหนานบนพื้นผิวตัวกรองชีวภาพได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้เส้นใยยังช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กได้อีกด้วย กระบวนการกำจัดสารอินทรีย์บนแผ่นฟิล์มชีวภาพ เริ่มต้นจากการขนส่งออกซิเจนและอิเล็กตรอนจากการถ่ายเทผ่านผิวชั้นนอกของฟิล์มชีวภาพกับของเหลว ทำให้ออกซิเจนและสารอินทรีย์แพร่เข้าสู่ภายในของแผ่นไบโอฟิล์ม จากนั้นจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์ผ่านกระบวนการทางชีวภาพภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอ จนได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์

นอกจากนี้หากมีการจำกัดสารอาหารให้มีแต่สารอินทรีย์ในโตรเจน ฟิล์มชีวภาพที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง โดยมีกลุ่มไนทริฟายอิงแบคทีเรียเกิดขึ้นอยู่ตามพื้นที่ผิวตัวกรองชีวภาพ ซึ่งแตกต่างจากไบโอฟิล์มของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟที่จะเติบโตและยึดเกาะเป็นฟิล์มหนานบนพื้นผิวตัวกลาง

2.6 ปลานิล

ปลานิลเป็นปลาน้ำจืดที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ นิยมเลี้ยงเพื่อการค้าเชิงพาณิชย์ รวมถึงใช้เป็นสัตว์น้ำทดลองสำหรับงานวิจัยต่างๆ เนื่องจากเป็นปลาที่มีอัตราเจริญเติบโตเร็ว ขยายพันธุ์ได้เป็นจำนวนมาก และเลี้ยงได้ในทุกสภาวะแวดล้อม โดยปลานิลเป็นชื่อพระราชทานจากพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวรัชกาลที่ 9 ซึ่งได้พระราชทานพันธุ์ปลานิลจำนวน 10,000 ตัวให้แก่กรมประมงเพื่อนำไปขยายพันธุ์และแจกจ่ายให้แก่ประชาชนเพื่อนำไปเพาะเลี้ยง (นุกูล เจนประจักษ์, 2545)



รูปที่ 2.11 ปลานิล

(http://wisarutcp.blogspot.com/p/blog-page_9004.html)

2.6.1 อนุกรมวิธานและรูปร่างของปลานิล

ปลานิล (*Oreochromis niloticus* Linn.) มีถิ่นกำเนิดเดิมอยู่ในทวีปแอฟริกา พบได้ตามบึงและทะเลสาบในประเทศยูกันดาและซูดาน รวมถึงเป็นสัตว์น้ำที่นิยมเพาะเลี้ยงในแถบเอเชียชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Tilapia niloticus* และมีชื่อทั่วไปว่า Nile tilapia ซึ่งมีการจัดลำดับตามอนุกรมวิธานได้ดังนี้

Kingdom: Animalia

Phylum: Vertebrata

Class: Osteichthyes

Order: Perciformes

Family: Cichlidae

Genus: *Oreochromis*

Species: *Oreochromis niloticus*

ปลานิลมีรูปร่างคล้ายกับปลาหมอเทศ โดยมีลักษณะพิเศษ คือลำตัวจะมีลายพาดขวาง จำนวน 9-10 แถบ ริมฝีปากบนและล่างเสมอกัน บริเวณแก้มมีจำนวนเกล็ด 4 แถบ มีครีบหลัง 1 ครีบ ประกอบด้วยก้านครีบอ่อนและก้านครีบแข็งเป็นจำนวนมาก ก้านครีบแข็งจะมีจำนวน 15-18 อันและก้านครีบอ่อน 12-14 อัน ครีบกันจะมีก้านครีบแข็ง 3 อัน และก้านครีบอ่อน 9-10 อัน บริเวณครีบกันครีบหาง และครีบหลังจะมีจุดสีดำและสีขาว ส่วนเกล็ดจะอยู่ตามแนวเส้นข้างลำตัว 33 เกล็ด บริเวณตรงกลางจะมีเกล็ดสีเข้ม ส่วนลำตัวจะมีสีเขียวปนน้ำตาล ปลานิลจะมีลักษณะนิสัยอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม สามารถปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดี พบในแหล่งน้ำจืดทุกภาคของประเทศไทย นอกจากนี้ยังพบได้บริเวณน้ำกร่อยอีกด้วย ซึ่งถ้าเป็นเพศผู้จะมีอวัยวะเพศอยู่ใกล้กับบริเวณช่องทวารมีลักษณะเรียวยาวยื่นออกมา แต่ถ้าเป็นเพศเมียจะมีลักษณะเป็นรูที่มีขนาดใหญ่และกลม นอกจากนี้ปลาเพศผู้มีสีที่ใต้คางและลำตัวเข้มกว่าตัวเมีย เมื่อถึงฤดูสืบพันธุ์สีของเพศผู้จะยิ่งเข้มขึ้น ปลานิลสามารถทนต่ออุณหภูมิถึง 40 °ซ ทนต่อความเค็มถึง 20 พีพีที และทนความเป็นกรดเป็นด่างได้ดีในช่วง 6.5–8.3 นอกจากนี้ปลานิลยังผสมพันธุ์ได้ตลอดทั้งปี ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 2-3 เดือนต่อครั้ง แต่ถ้าสภาวะแวดล้อมมีอาหารอุดมสมบูรณ์ ปลานิลจะผสมพันธุ์และวางไข่ได้ถึง 5-6 ครั้ง (กรมประมง, 2535)

2.6.2 รูปแบบการเพาะเลี้ยงปลานิล

แบ่งได้ 3 รูปแบบ ดังนี้

2.6.2.1 การเลี้ยงแบบยังชีพ (Extensive) เป็นรูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการบริโภคภายในครัวเรือนเป็นหลัก ซึ่งอาศัยอาหารตามธรรมชาติและไม่มีการให้อาหารเพิ่ม ทำให้ผลผลิตที่ได้มีปริมาณไม่สูงมากนัก นั่นคือประมาณไม่เกิน 200 กก./ไร่/ปี (เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน, 2549) นอกจากนี้ปริมาณปลาที่เลี้ยงภายในบ่อยังมีจำนวนไม่แน่นอน (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536) ทั้งนี้มีความหนาแน่นเริ่มต้นประมาณ 0.5–2 ตัว/ตร.ม. (El - Sayed, 2006)

2.6.2.2 การเลี้ยงแบบกึ่งพัฒนา (Semi-intensive) เป็นระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำที่ได้รับ ความนิยมค่อนข้างมากโดยเฉพาะในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด เช่น ปลานิล เป็นต้น โดยมี วัตถุประสงค์เพื่อการบริโภคภายในครัวเรือน และสามารถจำหน่ายส่วนที่เหลือจากการบริโภคออกสู่ ตลาดได้บางส่วน (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536) ทั้งนี้จะอาศัยอาหารตามธรรมชาติเป็น หลัก โดยจะมีการเติมปุ๋ยและอาหารเสริมบ้างเพื่อเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ ซึ่งผลผลิตที่ได้ จะมีปริมาณน้อยถึงปานกลาง นั่นคือ ประมาณ 400-1,000 กก./ไร่/ปี ที่ความหนาแน่นเริ่มต้นเท่ากับ 2-4 ตัว/ตร. ม. (El-Sayed, 2006)

2.6.2.3 การเลี้ยงแบบพัฒนา (Intensive) เป็นระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำที่เริ่มได้รับการ พัฒนาและนิยมมากและมีบทบาทสำคัญในการเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง การเลี้ยงในกระชัง เช่น การเลี้ยง ปลาดุก เป็นต้น มีการให้อาหารที่เป็นเม็ดซึ่งมีโปรตีนสูง มีการให้อาหารที่แน่นอน มีการเติมอากาศลง บ่อและเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดเวลา โดยวัตถุประสงค์ของการเลี้ยงรูปแบบนี้คือ เพื่อการจำหน่ายเป็น หลัก (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536) ซึ่งผลผลิตที่ได้จะสูงประมาณ 500-2,000 กก./ไร่/ปี ซึ่งความหนาแน่นเริ่มต้นในการเลี้ยงปลาจะเท่ากับ 4 – 10 ตัว/ตร.ม. (El-Sayed, 2006)

2.6.3 ประเภทของการเลี้ยงสัตว์น้ำ

แบ่งได้เป็น 4 ประเภท (พิทยา สมุทรเวช, 2537) ได้แก่

2.6.3.1 การเลี้ยงปลานิลในบ่อดิน เป็นการเลี้ยงที่จำลองสภาวะให้มีความคล้ายคลึงกับวิธี ตามธรรมชาติ ทำให้ได้ผลผลิตสัตว์ในปริมาณสูงและมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีอื่น โดยบ่อที่ใช้ในการ เลี้ยงสัตว์น้ำจะเป็นบ่อดินขนาดใหญ่ที่มีความลาดมาก มีความลึกประมาณ 1 ม. เพื่อให้ปลานิล สามารถขุดหลุมเพื่อทำการวางไข่ในฤดูผสมพันธุ์ได้ สำหรับการเตรียมอาหารสำหรับปลานิลจะมีการ เติมปุ๋ยคอก เช่น มูลสุกร มูลควาย มูลเป็ด เป็นต้น ในบางครั้งอาจจะมีการเติมปุ๋ยหมักหรือปุ๋ยพืชสดก็ได้ ทั้งนี้ในการใช้ปุ๋ยคอกเป็นอาหารสัตว์น้ำควรมีความระมัดระวัง เนื่องจากปุ๋ยคอกสดจะมีส่วนผสม ของแอมโมเนีย ซึ่งเมื่อละลายน้ำสามารถส่งผลกระทบต่อสุขภาพของสัตว์น้ำได้ นอกจากนี้การเติมปุ๋ย คอกหรือปุ๋ยหมักควรเติมน้ำประมาณ 1 ม. และใช้เวลาบ่มประมาณ 2 สัปดาห์ เพื่อให้เกิดการ เจริญเติบโตและการเพิ่มจำนวนของแพลงค์ตอนก่อน จึงค่อยปล่อยปลานิลลงในบ่อเลี้ยง

2.6.3.2 การเลี้ยงปลานิลในนาข้าว เป็นการใช้นาข้าวเป็นบ่อเลี้ยงปลานิล ซึ่งจำเป็นจะต้องมีการเสริมคันดินให้แน่น เพื่อเพิ่มปริมาณในการกักเก็บน้ำให้มีระดับสูงประมาณ 50 ซม. ในด้านคันนาจะต้องลาดเอียงต่ำสุดเพื่อเป็นที่รวบรวมของลูกปลานิล โดยพื้นที่ดังกล่าวจะใช้ได้หลังจากปักดำข้าวประมาณ 10 วัน หรือหลังจากที่เก็บเกี่ยวข้าวแล้ว สำหรับวิธีการป้องกันศัตรูของปลานิลในนาข้าว ทำได้โดยใช้อวนไนลอนตาที่มีความสูงประมาณ 1 ม. ทำเป็นรั้วล้อมรอบเพื่อป้องกันงูและกบ

2.6.3.3 การเลี้ยงปลานิลในกระชัง เป็นการเลี้ยงปลาที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงในแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น หนอง บึง และลำน้ำ เป็นต้น กระชังที่ใช้จะมีหลายแบบ เช่น กระชังแบบลอย และกระชังที่ผูกติดกับที่ เป็นต้น ทั้งนี้กระชังแบบลอยจะลักษณะเหมือนกระชังทั่วไป แต่มีความแตกต่างตรงที่ไม่ใช้เสาปักยึดติดกับที่ ด้านบนของกระชังผูกติดทุ่นลอย ส่วนด้านล่างใช้แท่งปูนซีเมนต์หรือก้อนหินผูกติดกับเชือกเพื่อถ่วงให้กระชังจม ส่วนกระชังแบบผูกติดกับที่สร้างโดยใช้ไม้ไผ่ปักลงแม่น้ำ จะทำการขึงให้ตึงด้วยเส้นเชือกบริเวณส่วนของด้านบนและด้านล่างโดยเฉพาะตรงมุม 4 มุม การวางกระชังควรจัดวางให้เป็นกลุ่มโดยวางเว้นระยะห่างเท่ากัน ทั้งนี้กระชังแบบที่ผูกติดกับที่และกระชังแบบลอยสามารถทำจากอวนไนลอนขนาด $5 \times 8 \times 2$ ม. ซึ่งจะวางกระชังตามแหล่งน้ำธรรมชาติโดยพื้นของกระชังจะต้องต่ำกว่าระดับน้ำ 1 ม. ใช้หลักไม้ 4 หลักผูกมุม 4 มุมเพื่อยึดปากและพื้นกระชังให้แน่น

2.6.3.4 การเลี้ยงปลานิลในบ่อปูนซีเมนต์ การเลี้ยงในรูปแบบนี้นิยมมากสำหรับการเพาะเลี้ยงหรืออนุบาลลูกปลานิล โดยทั่วไปรูปร่างของบ่อควรจะเป็นทรงกลมหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า ความลึกของบ่อควรจะเป็นประมาณ 1 ม. พื้นที่ผิวน้ำมีค่าตั้งแต่ 10 ตร.ม. ขึ้นไป ในบ่อซีเมนต์ควรจะมีการติดตั้งเครื่องเติมอากาศเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในระบบ อัตราการปล่อยปลาลงในบ่อซีเมนต์ขึ้นอยู่กับปริมาณอาหาร และคุณภาพน้ำเป็นสำคัญ โดยทั่วไปจะปล่อยลูกปลาขนาด 3-5 ซม. ลงในบ่อเลี้ยงด้วยอัตรา 1-3 ตัว/ตร.ม. หรือ 2,000-5,000 ตัว/ไร่

2.6.4 ปัจจัยของคุณภาพน้ำที่ส่งผลต่อการเลี้ยงปลานิล

2.6.4.1 พีเอช

ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของปลานิลอยู่ในช่วง 7.2–8.3 (อุดม เรืองนพคุณ, 2550) โดยระบบที่มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4-6 และ 9.5-11 ส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตของปลานิลลดลง และถ้าพีเอชอยู่ในช่วง 3.5-4.5 ส่งผลให้ปลานิลตายอย่างเฉียบพลัน (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536)

2.6.4.2 อุณหภูมิ

ปลานิลเป็นปลาที่ทนอุณหภูมิได้ในช่วงกว้าง นั่นคือในช่วงอุณหภูมิ 10–42 °ซ ทั้งนี้ในระบบที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 10 °ซ หรือสูงกว่า 42 °ซ ส่งผลให้ปลานิลดำรงชีวิตอยู่ได้ไม่นานและอาจจะทำให้ตายได้ และถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 15 °ซ จะทำให้ปลานิลไม่กินอาหาร ส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตช้า ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของปลานิลคือ อุณหภูมิช่วง 19–28 °ซ และอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการวางไข่ของปลานิลนั้นอยู่ในอุณหภูมิช่วง 26–29 °ซ (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536)

2.6.4.3 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ

ปลานิลทนปริมาณออกซิเจนละลายในระดับต่ำได้ในช่วง 0-0.4 มก./ล. ทั้งนี้ปริมาณออกซิเจนละลายที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโตของปลานิลควรมีค่าตั้งแต่ 5 มก./ล. จนถึงจุดอิ่มตัว (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536)

2.6.4.4 สภาพความเป็นด่าง

สภาพความเป็นด่างในน้ำที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงปลานิลควรอยู่ในช่วง 200-300 มก. แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. (Balarin และ Haller, 1979 อ้างถึงในทยากร สุวรรณรัตน์, 2552)

2.6.4.5 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย

ความเข้มข้นของแอมโมเนียไม่ควรเกิน 2.5 มก. ไนโตรเจน/ล. เนื่องจากแอมโมเนียในระดับความเข้มข้นสูงส่งผลให้ปลานิลมีอัตราการเจริญเติบโตช้า และทำให้ปลาเกิดความเครียด (Hegazi และ Hasanein, 2010)

2.6.4.5 ปริมาณไนโตรต์

ปริมาณไนโตรต์ในระบบควรมีค่าต่ำกว่า 1 มก. ไนโตรเจน/ล. เนื่องจากระบบที่มีความเข้มข้นของไนโตรต์สูงกว่า 1 มก. ไนโตรเจน/ล. ส่งผลให้ปลานิลเกิดความเครียดและมีอัตราการเจริญเติบโตช้า (Timmons และคณะ, 2002)

2.6.4.6 ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์

ปลานิลทนต่อก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในปริมาณต่ำได้ แต่ถ้าระบบมีปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงกว่า 1 มก./ล. จะส่งผลกระทบต่ออาการดำรงชีวิตของปลานิลและทำให้ปลานิลตายได้ (อุตม เรื่องนพคุณ, 2550)

2.7 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 รูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิด

Landau (1992) ศึกษา รูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด จากการศึกษาพบว่าระบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นผ่านกระบวนการกำจัดตะกอน รวมถึงการบำบัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เกิดจากอาหารตกค้างและของเสียจากการขับถ่ายของปลาผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน โดยเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดกลับสู่ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำได้โดยไม่จำเป็นในการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ยกเว้นการเติมน้ำเพื่อชดเชยส่วนที่เกิดการระเหย

2.7.2 การใช้ตัวกรองชีวภาพบำบัดไนโตรเจนในการเลี้ยงสัตว์น้ำ

Ridha และ Cruz (2001) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดอนินทรีย์ไนโตรเจนของตัวกรองชีวภาพชนิดพลาสติกโพลีโพรไพลีน (Polypropylene plastic chips) และโพลีเอทิลีน (Polyethylene blocks) รวมถึงทำการประเมินคุณภาพน้ำภายในบ่อ และติดตามคุณภาพของสัตว์น้ำ ได้แก่ อัตราการเจริญเติบโต และอัตราการรอดตาย เป็นระยะเวลา 172 วัน จากการศึกษาพบว่าตัวกรองชีวภาพทั้ง 2 ชนิดมีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียซึ่งมีความเป็นพิษสูงต่อสัตว์น้ำผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน และควบคุมคุณภาพน้ำภายในบ่อให้เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบในด้านราคา พบว่าวัสดุตัวกลางที่ทำจากพลาสติกโพลีโพรไพลีนมีราคาถูกกว่า สำหรับประสิทธิภาพของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ พบว่าระบบที่มีการบรรจุตัวกรองชีวภาพชนิดพลาสติกโ

ลิโพรไฟลีนและโพลีเอทิลีน มีอัตราการเจริญเติบโตของปลาเท่ากับ 1.17 และ 1.18 ก./ตัว/วัน ตามลำดับ และมีอัตราการรอดตายของสัตว์น้ำเท่ากับร้อยละ 97.6 และ 98.2 ตามลำดับ

Al-Hafedh และคณะ (2003) ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียจากระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นสูงผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ม้วนพลาสติก (Plastic roll) ท่อพีวีซี (PVC pipe) และแผ่นขัด (Scrub pads) โดยชุดการทดลองประกอบด้วยระบบแยกตะกอน 3 ส่วน นั่นคือ ถังตกตะกอน ถังกรองทราย และถังกรองที่มีการบรรจุวัสดุตัวกลาง จากการทดลองพบว่าระบบที่มีการบรรจุม้วนพลาสติกในถังกรองมีอัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนียและไนไตรต์สูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 29.37 และ 27.3 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในการทดลองได้เลือกใช้ท่อพีวีซีเป็นวัสดุตัวกลางเนื่องจากใช้งานได้ง่าย และมีราคาถูกกว่าตัวกลางชนิดอื่น

Tseng และ Wu (2004) ทำการศึกษาการบำบัดแอมโมเนียในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันด้วยตัวกรองชีวภาพแบบจม จากการศึกษาพบว่าตัวกรองชีวภาพควบคุมปริมาณอนินทรีย์ไนโตรเจนภายในบ่อเลี้ยงให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อปลาไหลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อพื้นที่ผิวของตัวกรองชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเริ่มเดินระบบ ซึ่งเป็นผลมาจากการเกาะติดของแบคทีเรียกลุ่มไนตริฟายเออร์บนวัสดุตัวกลางซึ่งมีส่วนช่วยในการออกซิไดซ์แอมโมเนียเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นเมื่อปริมาณตะกอนจุลินทรีย์สะสมบนพื้นที่ผิวของตัวกรองชีวภาพมากเกินไป ส่งผลให้เกิดการแพร่ผ่านของออกซิเจนไม่ทั่วถึง จึงเกิดสภาวะไร้อากาศขึ้นด้านในของตัวกรองชีวภาพทำให้จุลชีพไม่สามารถทำงานได้และตายในที่สุด ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนของตัวกรองชีวภาพจึงมีค่าคงที่และเริ่มลดลงเมื่อระยะเวลาการใช้งานตัวกรองยาวนานเกินไป ทั้งนี้การล้างย้อนตัวกรองอย่างสม่ำเสมอจึงมีความสำคัญในการช่วยกำจัดเศษตะกอนจุลชีพส่วนเกินบนตัวกรองชีวภาพ ส่งผลให้ตัวกรองชีวภาพทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Emparanza (2009) ทำการศึกษาปัญหาที่มีผลกระทบต่อปฏิริยาไนตริฟิเคชันของระบบเลี้ยงปลาแซลมอนที่มีการหมุนเวียนน้ำแบบปิดด้วยตัวกรองชีวภาพแบบไม่เคลื่อนที่ในประเทศชิลี จากการศึกษาพบว่าปัญหาที่พบในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ ได้แก่ คุณภาพน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดมีความผันผวนสูง ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนไม่คงที่ ปริมาณน้ำเข้าในแต่ละวันมีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมระดับพีเอชและอุณหภูมิภายในระบบให้มีค่า

เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ และการเลี้ยงสัตว์น้ำในระดับความหนาแน่นสูงก่อให้เกิดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับความเข้มข้นสูง ปริมาณตะกอนมาก และอัตราการใช้ออกซิเจนสูง ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ เป็นต้น ทั้งนี้หากระบบมีการจัดการหมุนเวียนน้ำผ่านตัวกรองชีวภาพได้เหมาะสม จะช่วยลดปริมาณความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบได้ถึงร้อยละ 10 และเลี้ยงสัตว์น้ำที่ความหนาแน่นเท่ากับ 60 กก./ลบ.ม. ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องของการบำบัดไนโตรฟิเคชัน

Sesuk และคณะ (2009) ทำการศึกษาระบบบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนผ่านกระบวนการไนโตรฟิเคชันในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดด้วยตัวกรองชีวภาพเส้นใยที่จมอยู่ใต้น้ำ จากการทดลองพบว่าการเติมอาหารกุ้งช่วยกระตุ้นกระบวนการไนโตรฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพระหว่างการบ่มเชื้อได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 3 สัปดาห์ โดยมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ย 24.1 มก.-ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน และเมื่อติดตั้งวัสดุตัวกลางที่ผ่านการบ่มเชื้อภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ พบว่าสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อปลานิล โดยตรวจพบการเพิ่มขึ้นของไนเตรตผ่านกระบวนการไนโตรฟิเคชันจากความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1.24 มก.-ไนโตรเจน/ล. จนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 10.78 มก.-ไนโตรเจน/ล. ทั้งนี้ตัวกรองชีวภาพทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพหลังจากเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 44 วัน นอกจากนี้ยังพบว่าบ่อที่มีการติดตั้งวัสดุตัวกลางมีอัตราการเจริญของสัตว์น้ำมากกว่าบ่อควบคุมคิดเป็นร้อยละ 7-16

Suhr และ Pedersen (2010) ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียผ่านกระบวนการไนโตรฟิเคชันจากระบบเลี้ยงปลาเรนโบว์เทราท์ (Rainbow trout) ที่ระดับความหนาแน่นเท่ากับ 32 กก./ลบ.ม. ของตัวกรองชีวภาพ 2 ชนิด นั่นคือ Biomedia ซึ่งเป็นวัสดุตัวกลางแบบเคลื่อนที่ (Moving bed; MB) ทำจากวัสดุพอลิโพรไพลีน (Polypropylene carriers) มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 850 ตร.ม./ลบ.ม. และ Bioblock ซึ่งเป็นวัสดุตัวกลางแบบไม่เคลื่อนที่ (Fixed bed; FB) ทำจากวัสดุพอลิเอทิลีน (Polyethylene) มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 200 ตร.ม./ลบ.ม. ทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 3 เดือน ที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 2.89 ± 0.1 มก.-ไนโตรเจน/ล. และอุณหภูมิเท่ากับ 8°C จากการทดลองพบว่าวัสดุตัวกลางแบบเคลื่อนที่มีปริมาตรจำเพาะเท่ากับ 231 ± 17 ก./นิวตัน/ลบ.ม./วัน ซึ่งมากกว่าตัวกลางแบบไม่เคลื่อนที่ที่มีปริมาตรจำเพาะเท่ากับ 92 ± 2 ก./นิวตัน/ลบ.ม./วัน ในทางกลับกันพบว่าตัวกรองชีวภาพแบบเคลื่อนที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสำหรับการยึดเกาะของจุลินทรีย์เท่ากับ 0.27 ± 0.02 ก./ตร.ม./วัน ซึ่งน้อยกว่าตัวกลางแบบไม่

เคลื่อนที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 0.46 ± 0.01 ก./ตร.ม./วัน และเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียเริ่มต้นในระบบสูงขึ้นเป็น 6.27 ± 0.39 มก.ไนโตรเจน/ล. และทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ พบว่าอัตราการกำจัดแอมโมเนียของตัวกลางแบบไม่เคลื่อนที่จะเพิ่มขึ้นเป็น 146 ± 3 ก./นิวตัน/ลบ.ม./วัน หรือคิดเป็น 0.73 ± 0.01 ก./ตร.ม./วัน ในขณะที่อัตราการกำจัดแอมโมเนียของตัวกลางแบบเคลื่อนที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากจุลินทรีย์สามารถยึดเกาะและเจริญเติบโตบนตัวกรองชีวภาพแบบไม่เคลื่อนที่ได้ดีกว่า

Schroeder และคณะ (2015) ทำการศึกษาผลกระทบของการใช้อิโคโนและไอโคโนที่เหลือตกค้างต่อกระบวนการไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพแบบเคลื่อนที่ (Moving bed) จากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่ใช้ในการเลี้ยงปลาชนิด โดยทำการทดลองแบบแบตช์ (Batch experiment) และแบ่งแบคทีเรียทดสอบเป็น 3 กลุ่มนี้ ได้แก่ กลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย (AOB) กับกลุ่มแบคทีเรียไนโตรตออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย (NOB) กลุ่มที่สอง คือ กลุ่มที่มีไนโตรตออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย (NOB) เพียงอย่างเดียว ส่วนกลุ่มสุดท้ายจะเป็นกลุ่มหลากหลายของแบคทีเรีย (Heterogeneous biofilm culture) แบคทีเรียทั้ง 3 กลุ่มนี้ จะยึดเกาะบนตัวกรองชีวภาพรุ่น BCN-012 โดยจะได้รับ ความเข้มข้นของโอโซน (Ozone-Produced Oxidants) ที่แตกต่างกันจนถึงความเข้มข้นสูงสุด คือ 0.6 มก./ล. เป็นระยะเวลา 1 ชม. ผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของโอโซนมีผลต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน ทำให้แบคทีเรียเข้าไปยึดเกาะตัวกรองชีวภาพรุ่น BCN-012 ได้มากขึ้น และจะยึดเกาะกันแข็งแรงเป็นเมทริกซ์ไบโอฟิล์ม (Matrix biofilm) นอกจากนี้ยังพบว่า การได้รับโอโซนเป็นระยะเวลานานๆ ประมาณ 21 วัน ที่ความเข้มข้นต่างกัน ได้แก่ 0.05, 0.10 และ 0.15 มก./ล. จะไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียอยู่บนตัวกรองชีวภาพ แต่ยังคงพบว่ากระบวนการไนตริฟิเคชันจะเพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่า การได้รับโอโซนจะเป็นการส่งเสริมกระบวนการไนตริฟิเคชัน

สุธาสนิ อ่วมจันทร์ (2546) ทำการศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพ จากการศึกษาพบว่าแบคทีเรียประเภทไนตริฟายอิงซึ่งเป็นจุลชีพกลุ่มออกโตโทรฟที่อาศัยไบคาร์บอเนตเป็นแหล่งคาร์บอนจึงมีอัตราการเจริญเติบโตช้า ดังนั้นการสร้างสรรค์ที่มีลักษณะเป็นเมือกไบโอฟิล์ม (Biofilm) ที่เรียกว่า Lipopolysaccharide จึงมีประโยชน์ในการช่วยยึดเกาะของจุลชีพบนตัวกรองชีวภาพ อีกทั้งยังปกป้องเซลล์จากสิ่งแวดล้อมภายนอกได้อีกด้วย

มนวิกันต์ ขจรบุญ (2551) ทำการศึกษาการคัดเลือกหัวเชื้อไนทรีฟายอิงแบคทีเรียเพื่อประยุกต์ใช้กับตัวกรองชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดเพื่อการเลี้ยงกุ้ง จากการทดลองพบว่าตัวกรองชีวภาพรุ่น BCN-009 ที่ผ่านการบ่มในบ่อเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 1 เดือน สามารถเกิดกระบวนการไนทรีฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ โดยบำบัดแอมโมเนียในระบบที่ความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 0, 0.5, 2 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล. ให้ต่ำกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้ภายใน 12, 10, 7 และ 2 วัน ตามลำดับ

กชพร กฤตยานันต์ (2554) ทำการพัฒนากระบวนการหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กสำหรับการเลี้ยงปลาน้ำจืด โดยศึกษาอัตราการบำบัดไนทรีฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพที่ทำจากวัสดุประเภทพลาสติกกรีซเคิล และศึกษาประสิทธิภาพการแยกตะกอนของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ขวดพลาสติกเป็นส่วนประกอบภายใต้สภาวะที่ใช้ระบบลมเข้ามาช่วยในการขับเคลื่อนมวลน้ำแทนการใช้ปั๊มน้ำ ผลการทดลองพบว่าวัสดุพลาสติก 5 รูปแบบ ได้แก่ ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SB) ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง (RB) ฝาขวดน้ำดื่ม (WL) พลาสติกถั่วงอก (PL) และแก้วน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SG) เมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุตัวกรองชีวภาพเพื่อบำบัดแอมโมเนียในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ สามารถบำบัดแอมโมเนียได้อย่างสมบูรณ์ภายหลังการตรึงเชื้อไนทรีฟายอิงแบคทีเรียเป็นระยะเวลาประมาณ 25 วัน โดยมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงสุด เท่ากับ 6.79, 5.41, 4.58, 10.73 และ 4.23 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน ตามลำดับ ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้นมีความเป็นไปได้สูงที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดแอมโมเนียและไนโตรท์ในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

2.7.3 รูปแบบระบบบำบัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในการเลี้ยงสัตว์น้ำ

Rogers และ Klemeston (1985) ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพ 4 ชนิดคือ ตัวกรองชีวภาพแบบแผ่นหมุนชีวภาพ ตัวกรองชีวภาพแบบไบโอดรัม (Biodrum) ตัวกรองชีวภาพแบบโปรยกรอง (Trickling filter) และตัวกรองชีวภาพแบบไร้อากาศใต้น้ำ (Submerged anaerobic filter) ปรากฏว่าตัวกรองชีวภาพแบบแผ่นหมุนชีวภาพมีความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียต่อพื้นที่ผิวได้มากที่สุด (มากกว่าร้อยละ 90) รองลงมา ตัวกรองชีวภาพแบบไบโอดรัม (มากกว่าร้อยละ 80) และ ตัวกรองชีวภาพแบบโปรยกรอง (ร้อยละ 50) ตามลำดับ ส่วนตัวกรองชีวภาพแบบไร้อากาศใต้น้ำมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตได้ดีสามารถนำไปใช้ควบคู่กับตัวกรองชีวภาพในระบบที่มีอากาศ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบตัวกรองที่มี

ขนาดเท่ากันพบว่ากรองชีวภาพแบบไบโอเดร็มจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าตัวกรองชีวภาพแบบแผ่นหมุนชีวภาพ และเพิ่มอากาศให้แก่ระบบได้มากกว่า

Reyes และ Lawson (1996) ออกแบบระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่มีตัวกรองชีวภาพ 2 ชนิดร่วมกันในการเลี้ยงปลาชนิด คือ ตัวกรองชีวภาพแบบตัวกลางหมุน และตัวกรองชีวภาพแบบตัวกรองลอย พบว่าระบบสามารถเปลี่ยนแอมโมเนีย และไนไตรต์ได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งตัวกรองชีวภาพแบบตัวกลางหมุนสามารถกำจัดแอมโมเนียได้มากกว่าแบบตัวกรองลอย แต่ตัวกรองชีวภาพแบบตัวกรองลอยก็สามารถกำจัดของเสียที่เป็นของแข็งได้ดี

Silapakul และคณะ (2005) ศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกแบบเบตนิ่งในการบำบัดน้ำเสียที่มีส่วนประกอบของแอมโมเนียและไนเตรต โดยถังปฏิกรณ์นี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนสภาวะมีอากาศและสภาวะไร้อากาศ ผลการทดลองพบว่าถังปฏิกรณ์นี้สามารถบำบัดสารประกอบไนโตรเจนได้สมบูรณ์ โดยเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันขึ้นพร้อมกัน และไม่มีการสะสมของไนโตรเจน ซึ่งมีอัตราการเกิดไนตริฟิเคชันอยู่ในช่วง 60-870 มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน และมีอัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชันอยู่ในช่วง 10-80 มก.ไนเตรตไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน.

Sanchez และ Matsumoto (2011) ศึกษาการประเมินเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไอซ์เบดแบบแอโรบิคสามเฟสในการบำบัดน้ำเสียจากสัตว์น้ำ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสารอินทรีย์ ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในระบบบำบัดน้ำเสียที่เลี้ยงปลาชนิดความหนาแน่นสูง ระบบบำบัดประกอบด้วยถังตกตะกอนแบบดั้งเดิมที่มีระยะเวลาที่เก็บน้ำเสีย (Hydraulic detention time; HDT) เท่ากับ 2.94 ชม. มีตัวกลางที่ใช้ คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดมีความหนาแน่น 1.64 g/cm³ ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของบีโอดี ซีโอดี ฟอสฟอรัส แอมโมเนียและไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 47, 77, 38, 27 และ 24 ตามลำดับ

นภาพร กิตติมศักดิ์ (2541) ได้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างตัวกรองชีวภาพแบบไบโอเดร็ม และแบบใต้น้ำ ซึ่งใช้ในระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ในการทดลองเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*) และปลากะพงขาว (*Lates calcarifer*) เป็นเวลา 3 เดือน โดยระบบแบบใต้น้ำ ตัวกรองชีวภาพที่ใช้จะประกอบไปด้วย 2 ชั้น คือ ชั้นบนเป็นเปลือกหอยนางรมบรรจุในถุงไนลอน ส่วนชั้นล่างเป็นท่อพีวีซีบรรจุในถุงไนลอน จากการทดลองพบว่า การทดลองที่เลี้ยงปลากะพงขาว ระบบตัวกรองชีวภาพทั้งสองแบบสามารถควบคุมคุณภาพน้ำ

คือ แอมโมเนียรวม ไนโตรต์ และไนเตรต ให้อยู่ในเกณฑ์ปกติ อย่างไรก็ตามพบว่าในการทดลองเลี้ยงปลากระพงขาว ปริมาณแอมโมเนียรวม และไนโตรต์ในชุดการทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพแบบใต้น้ำจะมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพแบบไฮโอโดรมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ซึ่งอัตราการรอดของปลากระพงขาวเท่ากับร้อยละ 58.42 และร้อยละ 57.00 อัตราการเติบโตเท่ากับ 1.273 กรัม/วัน และ 1.228 กรัม/วัน ในชุดการทดลองแบบไฮโอโดรมและแบบใต้น้ำตามลำดับ

ศิริวรรณ ศิลาภากุล (2545) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนจากระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับการเลี้ยงกุ้งด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกเบตนิ่งซึ่งประกอบด้วยส่วนที่มีอากาศ และไร้อากาศที่บรรจุวัสดุตัวกรองชีวภาพไบโอบอลสำหรับการยึดเกาะของจุลชีพ จากการทดลองพบว่าถังปฏิกรณ์ชีวภาพดังกล่าวบำบัดไนโตรเจนผ่านกระบวนการร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์พร้อมกันโดยไม่มี การสะสมของไนโตรเจนในระบบ ซึ่งมีอัตราไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันอยู่ในช่วง 60–870 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน และ 10–80 มก.ไนโตรต์-ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน ตามลำดับ

นฤฎ จูประจักษ์ (2547) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียและไนโตรต์จากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับการเลี้ยงกุ้ง ด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกแบบเบตนิ่งที่มีการไหลวนภายนอก โดยทำการบรรจุพลาสติกไบโอบอลที่ผ่านการตรึงเชื้อลงในถังปฏิกรณ์ในส่วนที่มีอากาศและส่วนที่ไร้อากาศซึ่งสามารถรองรับปริมาณน้ำเสียได้ 60 ล. จากการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์พบว่ากระบวนการไนทริฟิเคชัน และดีไนทริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นพร้อมกันโดยมีอัตราการบำบัดอยู่ในช่วง 0.563–3.971 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล./วัน และ 2.290–18.913 มก.ไนเตรต-ไนโตรเจน/ล./วัน ตามลำดับ และเมื่อติดตั้งระบบบำบัดเข้ากับบ่อเลี้ยงกุ้งในชุดทดลองเปรียบเทียบกับชุดควบคุม พบว่าถังปฏิกรณ์สามารถควบคุมสารประกอบไนโตรเจนในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำโดยไม่ต้องมีการเติมเมทานอล ซึ่งสภาวะที่ใช้ในการเดินระบบบำบัดร่วม คือปริมาณออกซิเจนละลายในส่วนที่มีอากาศและไร้อากาศ เท่ากับ 3–5 และ 0–2 มก./ล. ตามลำดับ สภาพความเป็นด่างมีค่ามากกว่า 100 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. และค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในส่วนไร้อากาศมีค่าอยู่ระหว่าง -400 ถึง +100 มิลลิโวลต์

สรุปประเด็นสำคัญจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1) การบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันสามารถลดความเป็นพิษของแอมโมเนียด้วยการเปลี่ยนรูปไปอยู่เป็นไนไตรต์และไนเตรตตามลำดับ ซึ่งเป็นรูปของไนโตรเจนที่มีความเสถียรและมีความเป็นพิษน้อยที่สุด โดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มออกซิโดโทรฟที่มีการใช้ไบคาร์บอเนตเป็นแหล่งคาร์บอนภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอ ดังนั้นจึงต้องควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายภายในระบบให้มีค่ามากกว่า 4 มก./ล. และค่าสภาพความเป็นด่างให้มีค่าอยู่ในช่วง 100-150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. เพื่อให้เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มดังกล่าว

2) ระบบบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพไนตริฟิเคชันที่มีการติดตั้งวัสดุตัวกลางเป็นระบบที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง เสียค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและการดำเนินงานต่ำ นอกจากนี้เนื่องจากคุณสมบัติของตัวกรองชีวภาพ BCN-012 มีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะของจุลินทรีย์ค่อนข้างสูงจึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียได้ดี แต่ทั้งนี้อัตราการบำบัดแอมโมเนียจะขึ้นกับคุณสมบัติของตัวกรองชีวภาพ ตัวอย่างเช่น ชนิดและวัสดุของตัวกรองชีวภาพ พื้นที่ผิวจำเพาะในการยึดเกาะของจุลินทรีย์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังขึ้นกับปริมาณจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพ และระยะเวลาในการบ่มของตัวกรองชีวภาพอีกด้วย

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

- ถังพลาสติก ปริมาตร 2.8 ลิตร
- ตัวกรองชีวภาพชนิด BCN-012
- เครื่องเติมอากาศ (Air Pump) ยี่ห้อ Resun รุ่น AP-120 และ
ยี่ห้อ Hailea รุ่น ACO-450
- วาล์วแรงดันลม
- สายยางพลาสติก (Plastic cord)
- หัวทรายจ่ายอากาศ (Air Stone)
- ท่อพีวีซี ขนาด 1/2, 3/4, 1, 2 1/2, 3 และ 6 นิ้ว
- ข้อต่อตรงเกลียวนอก ขนาด 3/4 และ 1 นิ้ว
- ข้อต่อตรงเกลียวใน ขนาด 1 นิ้ว
- ข้องอ 90 องศา ขนาด 1/2, 3/4 และ 1 นิ้ว
- ข้อต่อสามทาง ขนาด 1/2, 3/4 และ 1 นิ้ว
- Ball Valve ขนาด 1/2, 3/4 และ 1 นิ้ว
- ข้อต่อตรงลด ขนาด 3/4 x 1/2 และ 2 x 1/2 นิ้ว
- ปัมพ์หมุนเวียนน้ำ ยี่ห้อ Resun รุ่น SP-6000 และ รุ่น SP-9000
- เส้นลวดอะลูมิเนียม แท่งอะลูมิเนียม และน็อตอะลูมิเนียม
- แผ่นพีวีซีและลวดเชื่อมพีวีซี
- กระจก
- อิฐบล็อกจาก

- ยางพลาสติก
- ตะแกรงพลาสติก ขนาดรู 1.1 ซม.
- ผ้าสกรีน เบอร์ 36 ขนาดรู 186 ไมครอน
- เคเบิลไทร์ (Cable Tie)
- พัดลมขนาดเล็กสำหรับกระจายละอองน้ำ
- หม้อแปลงไฟฟ้าแปลงไฟฟ้าจากกระแสตรง 12 DC เป็น 220 โวลต์
- ตัวรับลม
- เครื่องสำรองไฟฟ้า ยี่ห้อ CHUPHOTIC รุ่น Moon-Plus MO1250P V3.1
- สายไฟและปลั๊กพ่วง
- กาวซิลิโคน กาวอีพอกซี ดินน้ำมันอีพอกซี
- กระบอกลดขนาดสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำ
- เครื่องชั่งน้ำหนักปลา ยี่ห้อ Sartorius รุ่น PT 1200
- อุปกรณ์วัดความยาว
- พันธุ์ปลานิลจากบริษัท ป.เจริญฟาร์ม (P.CHAREON FARM)
- อาหารปลากินพืช ยี่ห้อซีพี สูตร 9931 ที่มีปริมาณโปรตีนไม่น้อยกว่าร้อยละ 18.75

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

- เครื่องวัดค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (DO meter) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 9147
- เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 9125
- เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 9147
- เครื่องอ่านค่าบนไมโครเพลท (Microplate reader) ยี่ห้อ BioTek รุ่น PowerWave XS2
- เครื่องอบอุณหภูมิสูง (Hot air oven) ยี่ห้อ Memmert
- โถดูดความชื้น (Desiccator)
- เครื่องเขย่าสาร (Vortex Mixer GENIE 2) ยี่ห้อ Scientific Industries รุ่น G560E
- บั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)

- ชุดกรองสำหรับกระบอกฉีดยา (Syringe filter holder)
- เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP3100s
- เครื่องชั่งสารเคมี 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ E-Scale รุ่น ES-A320
- กระดาษกรอง Whatman GF/C ขนาด 25 และ 47 มม.
- เครื่องแก้ว เช่น หลอดทดลอง หลอดหยด ปีกเกอร์ กระบอกตวง ขวดวัดปริมาตร ขวดรูปخمพู่ แท่งแก้วคนสาร ฯลฯ
- ไมโครปิเปต (Micropipette)
- ชุดทดสอบแอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต และค่าความเป็นด่าง ยี่ห้อ AQUA-VBC ของศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.3 สารเคมี

- Ammonium Chloride (NH_4Cl)
- De-ionized water (DI)
- Hydrochloric acid (HCl)
- NNED (N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride)
- Sodium bicarbonate (NaHCO_3)
- Sodium citrate dihydrate ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- Sodium hydroxide (NaOH)
- Sodium hypochlorite (NaOCl)
- Sodium nitroprusside dihydrate ($\text{Na}_2\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- Sodium salicylate ($\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})\text{COONa}$)
- Sulphanilamide ($\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2\text{S}$)

3.2 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษารูปแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพไนทริฟิเคชัน และประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ ที่ดำเนินงานภายใต้ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด ดังแสดงในแผนผังรูปที่ 3.1 โดยดำเนินการในระดับห้องทดลอง ที่อุณหภูมิตั้งที่ ๒๕ องศาเซลเซียส ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ช่วง ดังนี้

การทดลองช่วงที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อระยะยาวเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน โดยแบ่งการศึกษาเป็น 2 ช่วง คือ การเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์ในการบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวม อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (V_{max}) และค่าคงที่เมื่ออัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (K_s) ตลอดจนเปรียบเทียบความหนาแน่นของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อ โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope ; SEM) ดังแสดงรายละเอียดการทดลองในแผนผังรูปที่ 3.2

การทดลองช่วงที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน โดยผสมตัวกรองชีวภาพชนิด BCN-012 ที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน (จากการทดลองช่วงที่ 1) ซึ่งผ่านการใช้งานในบ่อเลี้ยงปลา บรรจุลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพทั้ง 3 รูปแบบที่เชื่อมต่อกับบ่อพลาสติกและถังตกตะกอน เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ดังแสดงรายละเอียดการทดลองในแผนผังรูปที่ 3.3

การทดลองช่วงที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ชีวภาพระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลาแบบปิดผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน โดยระบบการทดลองประกอบด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพ บ่อพลาสติกสำหรับเลี้ยงปลา และถังตกตะกอน (จากการทดลอง

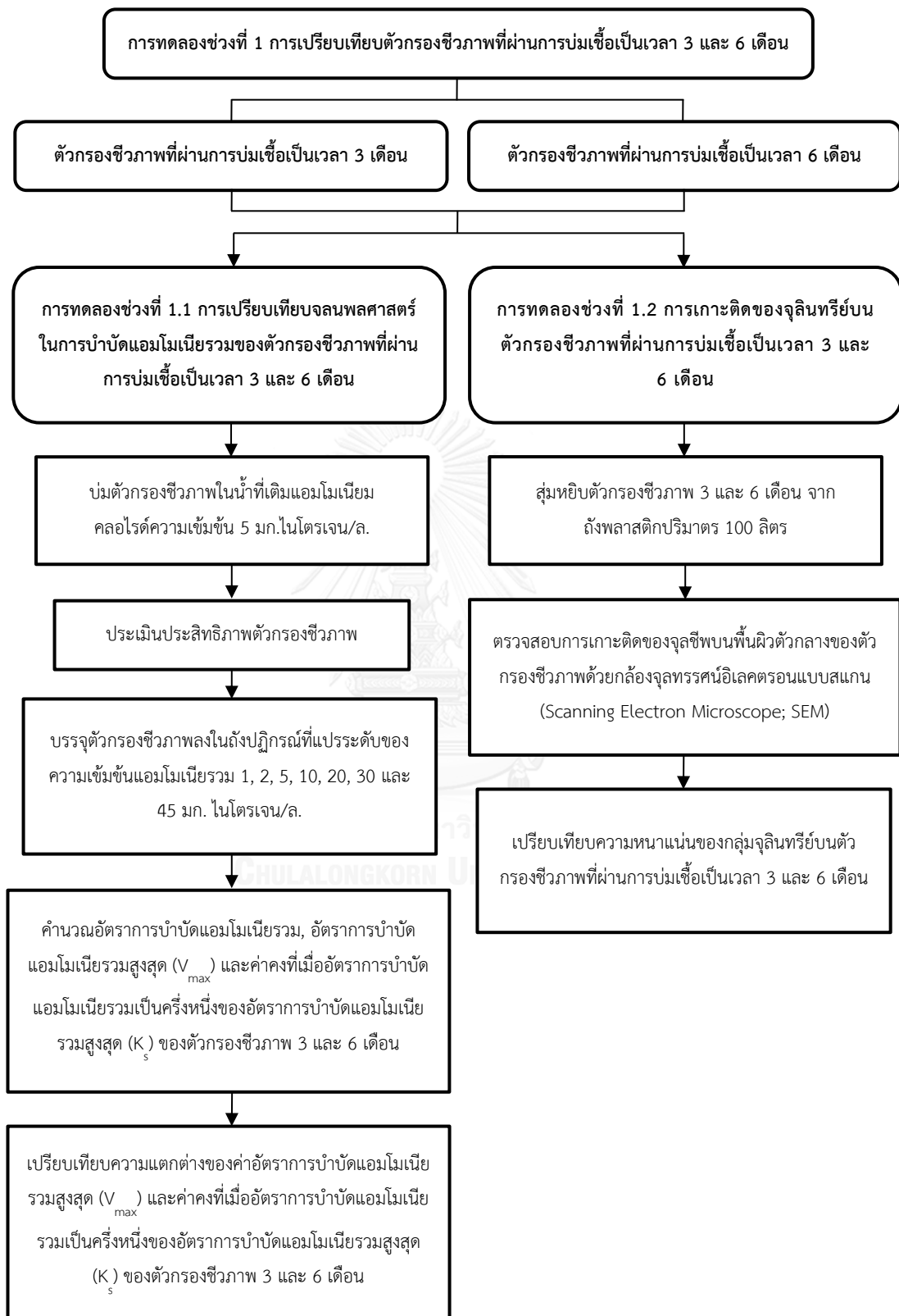
ช่วงที่ 2) เติบโตแบบต่อเนื่องด้วยน้ำเสียจริงจากระบบเลี้ยงปลาในระดับความหนาแน่นต่ำ โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำเป็นเวลา 60 วัน ดังแสดงรายละเอียดการทดลองในแผนผังรูปที่ 3.4

การทดลองช่วงที่ 4 เป็นการประเมินประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ชีวภาพระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ภายหลังจากเติบโตด้วยน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน (จากการทดลองช่วงที่ 3) โดยเติบโตแบบต่อเนื่องด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ (เช่นเดียวกับการทดลองช่วงที่ 2) ดังแสดงรายละเอียดการทดลองในแผนผังรูปที่ 3.5

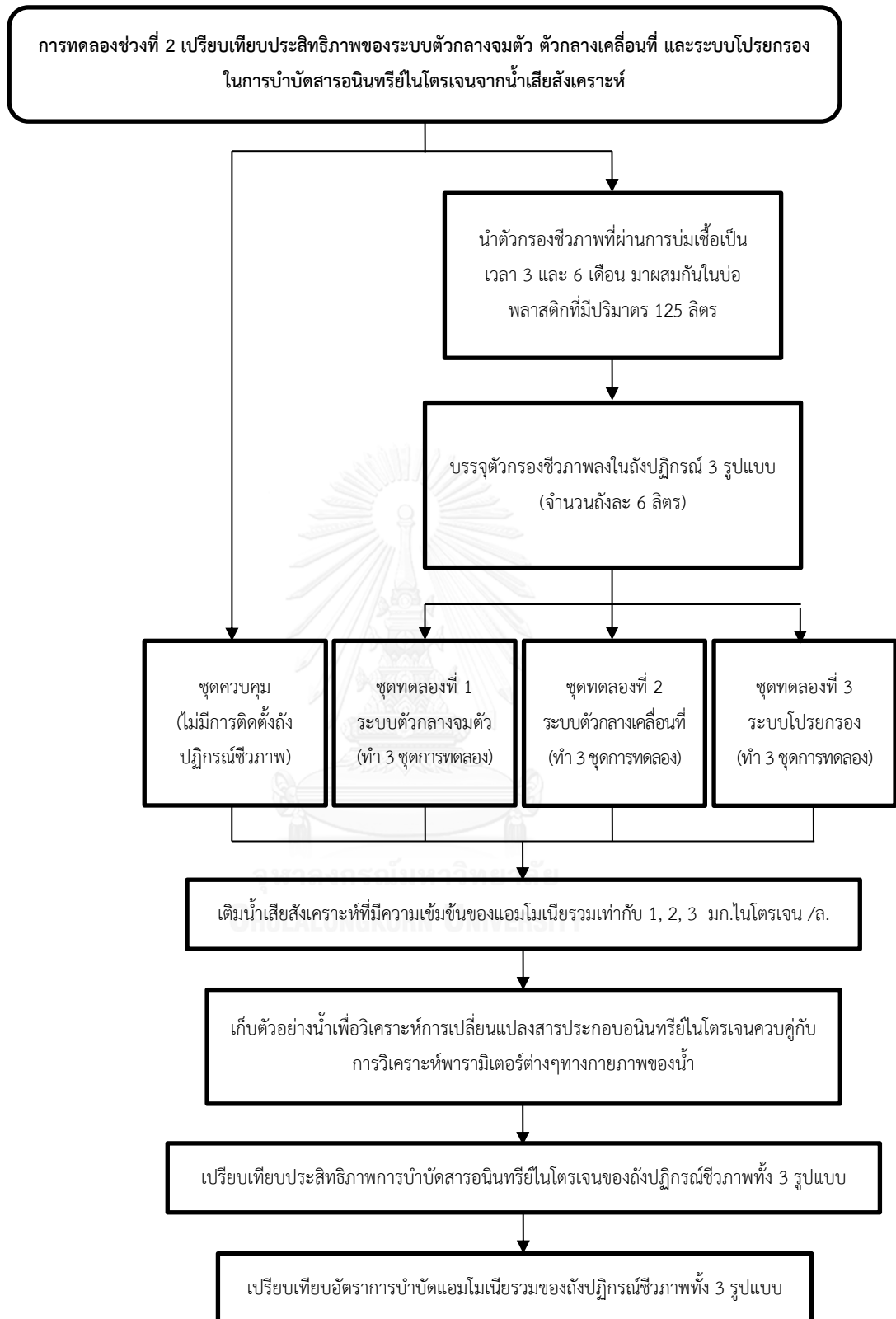




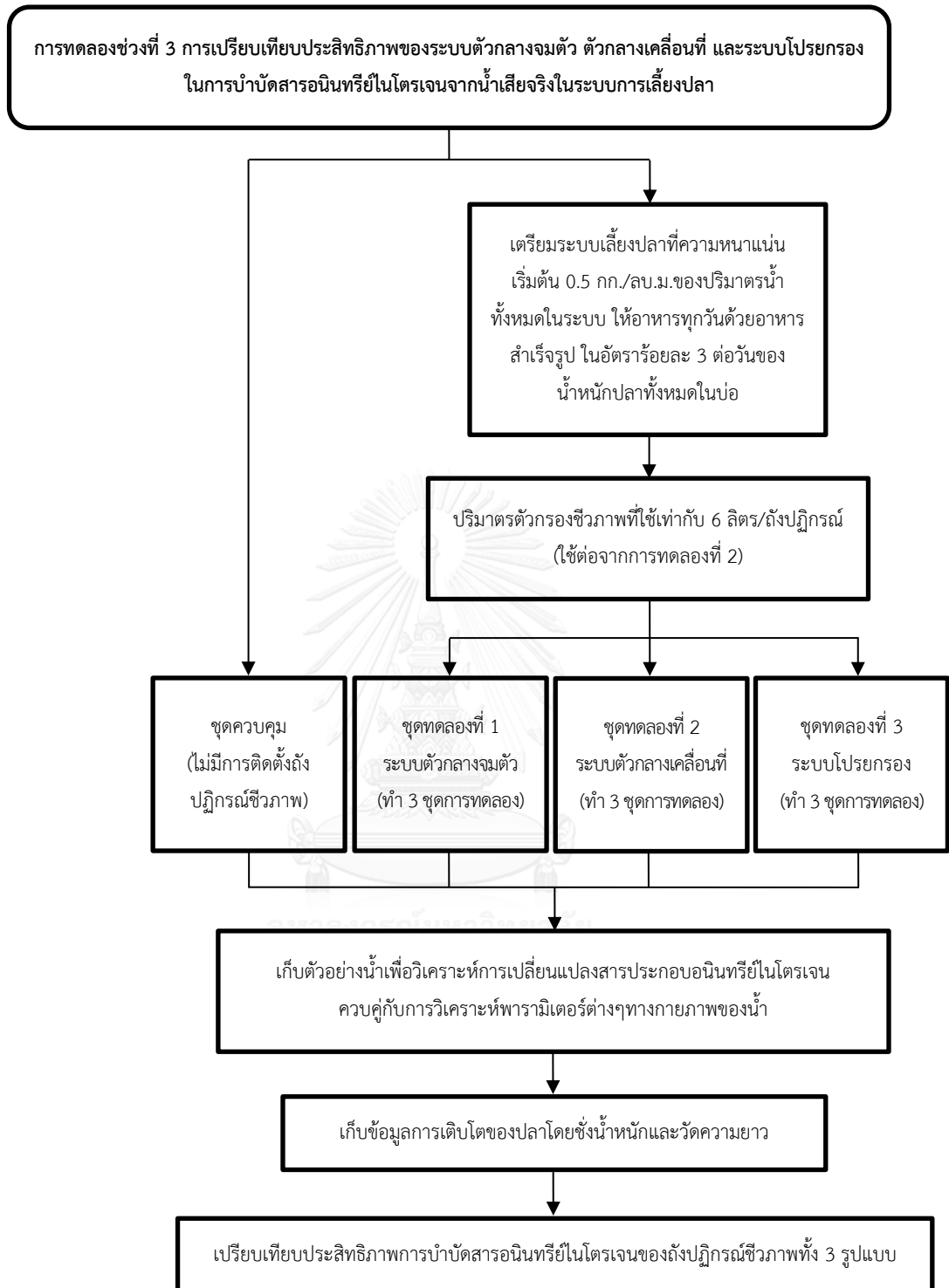
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย



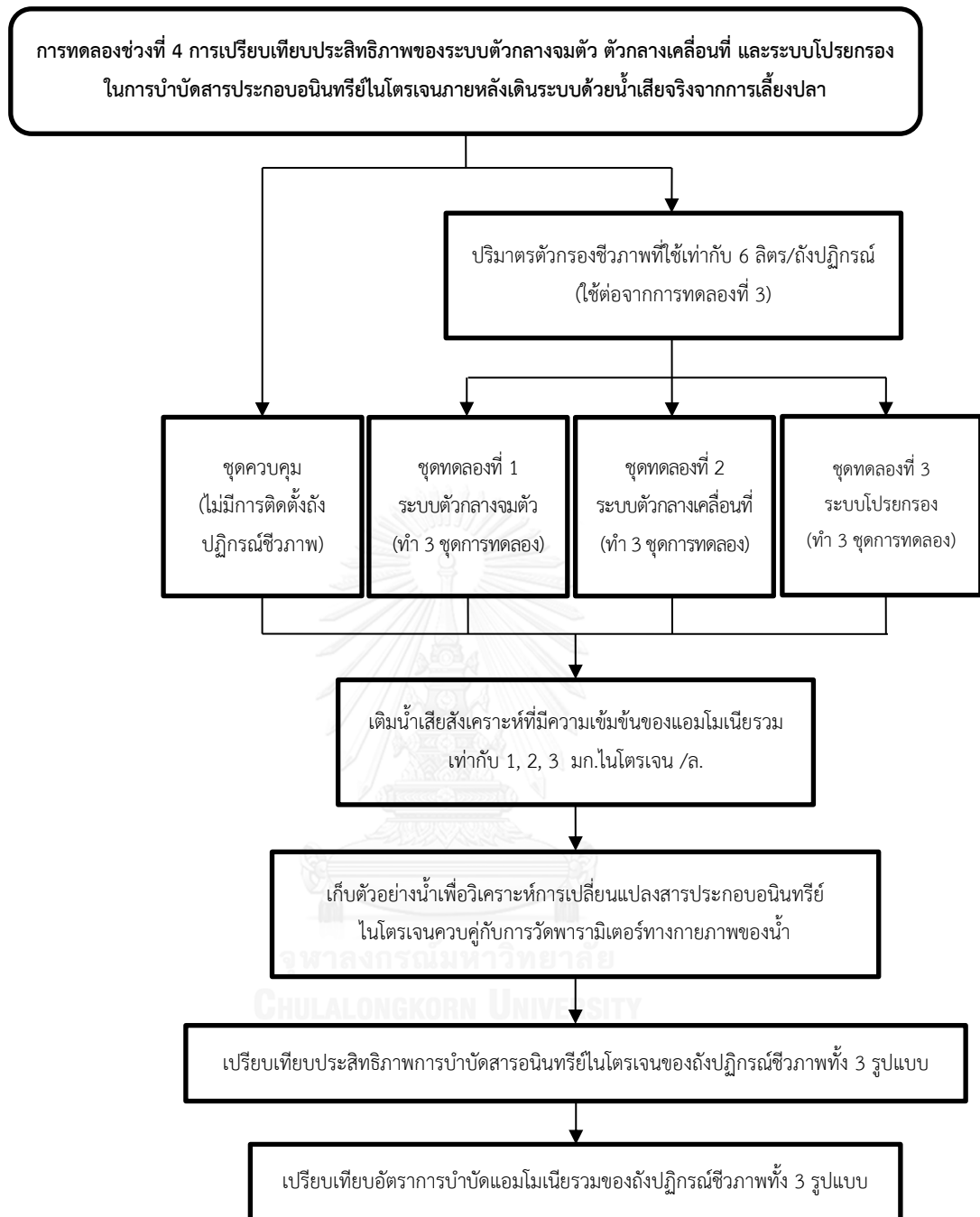
รูปที่ 3.2 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 1



รูปที่ 3.3 แผนผังการดำเนินการทดลองช่วงที่ 2



รูปที่ 3.4 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 3



รูปที่ 3.5 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 4

3.3 การดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การทดลองช่วงที่ 1 การเปรียบเทียบตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน

- การเตรียมและปรับสภาพตัวกรองชีวภาพ BCN-012

วัสดุตัวกลางที่ใช้ในการทดลองผลิตจากพลาสติกโพลีเอทิลีนที่มีค่าความหนาแน่นสูง (HDPE) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 มม. สูง 11 มม. ค่าพื้นที่ผิวในการยึดเกาะของจุลชีพ (Surface area) เท่ากับ 859 ตร.ม./ลบ.ม. ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific density) อยู่ในช่วง 0.95-0.98 และค่าน้ำหนักจำเพาะ (Specific weight) เท่ากับ 150 กก./ลบ.ม. (2H GmbH, Germany) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยก่อนนำวัสดุตัวกลางมาใช้ในการทดลองจะต้องทำการเตรียมและปรับสภาพเบื้องต้น เพื่อให้เกิดการเกาะติดและเพิ่มจำนวนของจุลชีพตามธรรมชาติบนพื้นผิว



รูปที่ 3.6 ตัวกรองชีวภาพรุ่น BCN-012

ในเบื้องต้นจะมีการทำความสะอาดตัวกลางพลาสติกและฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน และนำมาปรับสภาพด้วยการบ่มวัสดุตัวกลางพลาสติก BCN-012 จำนวน 25 ล. ในถังพลาสติกขนาด 100 ล. จำนวน 2 ถัง ที่บรรจุสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เข้มข้น 5 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มไนทริไฟเออร์ (Nitrifier) (Anthonisen และคณะ, 1976) เติมน้ำกึ่ง 1 มก.ไนโตรเจน/ล. เพื่อเป็นธาตุอาหารเสริมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียตามธรรมชาติ ทำการบ่มเชื้อในสภาวะที่มีการเติมอากาศผ่านหัวทรายอย่างเพียงพอ โดยควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายภายในบ่อให้มีความมากกว่า 6 มก./ล. โดยทั่วไปการ

บ่มเชื้อเพื่อให้เกิดฟิล์มชีวภาพบนวัสดุตัวกลางจะใช้เวลาประมาณ 30 วัน จากนั้นจึงนำตัวกรองชีวภาพไปใช้งาน โดยในการเลี้ยงปลาแต่ละรอบจะใช้เวลาประมาณ 3 ถึง 6 เดือน ซึ่งเมื่อผ่านการใช้งานระยะยาวอาจทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพลดลง ดังนั้นในการทดลองช่วงที่ 1 จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน โดยในระหว่างการใช้งานตัวกรองชีวภาพจะมีการเติมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 มก.ไนโตรเจน/ล. สัปดาห์ละ 1 ครั้ง จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 2 สัปดาห์ จะเติมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ทุกๆ 2 วัน เพื่อชดเชยปริมาณแอมโมเนียรวมที่ลดลงจากกระบวนการไนทริฟิเคชัน ทำการปรับค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตทุกๆ 2 วัน เมื่อเวลาผ่านไป 2 สัปดาห์ เพื่อควบคุมให้มีค่าอยู่ในช่วง 100 ถึง 150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. และเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับแบคทีเรียกลุ่มออกโตโทรฟ นอกจากนี้ยังควบคุมพีเอชให้มีค่าอยู่ในช่วง 7.5 ถึง 8.5 เนื่องจากหากระดับพีเอชในระบบมีค่าต่ำกว่า 6 อาจส่งผลยับยั้งกระบวนการไนทริฟิเคชันได้ (Nootong, 2006) ในขณะที่ระดับพีเอชสูงกว่า 8.5 สามารถยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มไนไตรต์ออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย (Nitrite Oxidizing Bacteria: NOB) (Fenchel และ Blackburn, 1979)



(ก)

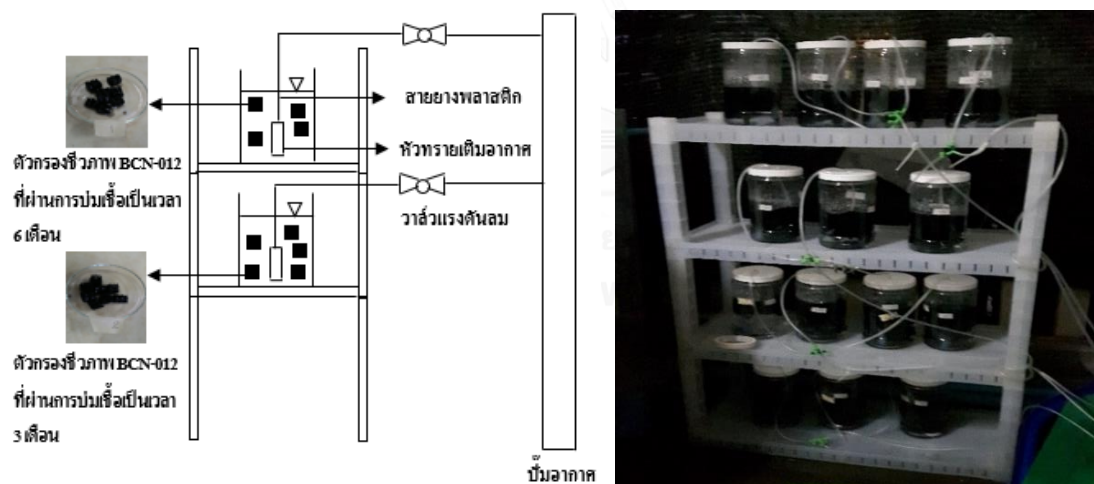


(ข)

รูปที่ 3.7 การบ่มเชื้อของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันเป็นเวลา (ก) 3 เดือน และ (ข) 6 เดือน

- การทดลองช่วงที่ 1.1 การเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์ในการบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน

บรรจุตัวกรองชีวภาพ BCN-012 ปริมาตร 0.5 ลิตรที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน ลงในถังปฏิกรณ์ทรงกระบอกปริมาตร 2.8 ล. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 ซม. สูง 25 ซม. (ทำการทดลองอย่างละ 3 ซ้ำ) เติมสารละลายที่แปรค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมเริ่มต้นแตกต่างกัน 7 ระดับ ได้แก่ 1, 2, 5, 10, 20, 30 และ 45 มก.ไนโตรเจน/ล. ติดตั้งเครื่องเติมอากาศเพื่อควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายอย่างเพียงพอตลอดเวลา (ดังแสดงในรูปที่ 3.8) ควบคุมค่าสภาพความเป็นด่างให้อยู่ในช่วง 100 ถึง 150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. เดินระบบการทดลองแบบที่ละเท่งทั้งหมด 3 รอบ โดยแต่ละรอบใช้เวลา 3 วัน ตรวจวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำ ได้แก่ ค่าสภาพความเป็นด่าง พีเอช และอุณหภูมิ ควบคุมกับการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวมตามวิธีมาตรฐานของ APHA (2005) ทั้งนี้ตัวแปรและพารามิเตอร์/เครื่องมือวิเคราะห์ที่ทำการศึกษา แสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 การติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพสำหรับการเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์ในการบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในการศึกษาจลนพลศาสตร์ในการบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน

| ตัวแปรอิสระ | ค่าที่ใช้ในการทดลอง |
|-------------------------------------|---|
| ระยะเวลาบ่มตัวกรองชีวภาพ | 3 และ 6 เดือน |
| ความเข้มข้นแอมโมเนียมคลอไรด์ | 1, 2, 5, 10, 20, 30 และ 45 มก.ไนโตรเจน/ล. ปริมาตร 1.5 ล. |
| ตัวแปรควบคุม | ค่าที่ใช้ในการทดลอง |
| ชนิดตัวกรองชีวภาพ | BCN-012 |
| ปริมาตรของตัวกรองชีวภาพ | 0.5 ลิตร |
| ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ | 2.8 ลิตร |
| ระยะเวลาในการเดินระบบ | 3 วัน หรือจนกว่าอัตราการบำบัดคงที่ |
| ตัวแปรตาม | พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ |
| ประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกรองชีวภาพ | ปริมาณแอมโมเนียรวม |
| พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ | ค่าสภาพความเป็นต่าง พีเอช ออกซิเจนละลาย และอุณหภูมิ |

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์และเครื่องมือวิเคราะห์สำหรับการทดลองช่วงที่ 1

| พารามิเตอร์ | วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์ | จุดเก็บตัวอย่าง | ความถี่ในการวิเคราะห์ |
|--------------------------------------|--|-----------------|-----------------------|
| <i>พารามิเตอร์คุณภาพน้ำทางเคมี</i> | | | |
| แอมโมเนียรวม | Salicylate – Hypochlorite method | ในถังปฏิกรณ์ | ทุก ½ ถึง 4 ชั่วโมง |
| <i>พารามิเตอร์คุณภาพน้ำทางกายภาพ</i> | | | |
| ความเป็นต่าง | Test kit (AQUA-VBC ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) | ในถังปฏิกรณ์ | ทุกวัน |
| พีเอช | pH Meter (HANNA, HI 9125) | ในถังปฏิกรณ์ | ทุกวัน |
| ออกซิเจนละลาย | DO Meter (HANNA, HI 9147) | ในถังปฏิกรณ์ | ทุกวัน |
| อุณหภูมิ | Thermometer (HANNA, HI 9147) | ในถังปฏิกรณ์ | ทุกวัน |

- การคำนวณอัตราไนโตรฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ BCN-012

การคำนวณอัตราการลดลงของแอมโมเนียรวมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ถูกบำบัดโดยตัวกรองชีวภาพ BCN-012 ผ่านกระบวนการไนโตรฟิเคชัน เพื่อใช้ในประเมินค่าจลนพลศาสตร์ในการบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.1) (3.2) (3.3) และ (3.4) ดังนี้

อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมต่อปริมาตรน้ำต่อวัน (มก.ไนโตรเจน/ล./วัน)

$$= \frac{(\text{ความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมตอนหลัง})(\text{มก.ไนโตรเจน/ล.})}{\text{ระยะเวลาที่ทำให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมลดลง (วัน)}} \quad (3.1)$$

หรือ คำนวณจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมกับเวลา

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

อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมต่อปริมาตรตัวกรองต่อวัน (มก.ไนโตรเจน/ล.ตัวกรอง/วัน)

$$= \frac{\text{อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมต่อปริมาตรน้ำต่อวัน (มก.ไนโตรเจน/ล./วัน)} \times \text{ปริมาตรน้ำ (ล.)}{\text{ปริมาตรตัวกรอง (ล.ตัวกรอง)}} \quad (3.3)$$

อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมต่อพื้นที่ผิวตัวกรองต่อวัน (มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน)

$$= \frac{\text{อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมต่อปริมาตรตัวกรองต่อวัน} \times 1000 \text{ (ล./ลบ.ม.)}}{\text{พื้นที่ผิวจำเพาะของ BCN-012 (ตร.ม./ลบ.ม.)}} \quad (3.4)$$

- การคำนวณอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (V_{max}) และค่าคงที่เมื่ออัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (K_s) ของตัวกรองชีวภาพ BCN-012

การคำนวณค่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (V_{max}) และค่าคงที่เมื่ออัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (K_s) ของตัวกรองชีวภาพ BCN-012 สามารถคำนวณได้จากการนำค่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมต่อวันของแต่ละความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมที่ 1, 2, 5, 10, 20, 30 และ 45 มก.ไนโตรเจน/ล. เข้าสู่โปรแกรม Sigma Plot Version 11 ตามสมการของ Monod (Monod, 1949) ดังสมการที่ (3.5) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์การบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน และนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณออกแบบระบบบำบัดแอมโมเนียรวมเพื่อการเลี้ยงปลาต่อไป

$$V = \frac{V_{max}S}{K_s + S} \quad (3.5)$$

| | | |
|-----------|---|--|
| V | = | อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวม (มก.ไนโตรเจน/ล./วัน) |
| V_{max} | = | อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (มก.ไนโตรเจน/ล./วัน) |
| K_s | = | ค่าคงที่ เมื่อ $V = V_{max} / 2$ (มก.ไนโตรเจน/ล.) |
| S | = | ความเข้มข้นของสารตั้งต้น (มก.ไนโตรเจน/ล.) |

- การทดลองช่วงที่ 1.2 การเกาะติดของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน

นำตัวกรองชีวภาพ BCN-012 ที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นระยะเวลา 3 และ 6 เดือน ตัวอย่างละ 20 ชิ้น บรรจุลงในขวดพลาสติกปริมาตร 600 มล. โดยมีการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเท่ากับ 5 มก.ไนโตรเจน/ล. ปรับค่าสภาพต่างเท่ากับ 150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. และเติมอากาศอย่างเพียงพอด้วยหัวทรายเติมอากาศเพื่อให้ภายในขวดพลาสติกมีสภาวะเดียวกันกับการใช้งานภายในบ่อ (ดังแสดงในรูปที่ 3.9) จากนั้นนำตัวกรองชีวภาพไปตรวจสอบการเกาะติดของจุลินทรีย์บนพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron

Microscope ; SEM) ที่กำลังขยาย 500 และ 1,000 เท่า เพื่อสังเกตและเปรียบเทียบความหนาแน่นของกลุ่มจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพ



รูปที่ 3.9 การเติมอากาศก่อนนำตัวกรองชีวภาพไปตรวจสอบการเกาะติดของจุลชีพบนพื้นผิวด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

3.3.2 การทดลองช่วงที่ 2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์

การทดลองส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพไนทริฟิเคชันในการบำบัดไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ เปรียบเทียบกันระหว่างชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งถังปฏิกรณ์และตัวกรองชีวภาพ และชุดทดลองที่ติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพ 3 รูปแบบ ได้แก่ ชุดการทดลองที่ 1 เป็นระบบตัวกลางจมตัว (ตัวกรองชีวภาพถูกยึดอยู่กับที่และจมอยู่ในน้ำ) ชุดการทดลองที่ 2 เป็นระบบตัวกลางเคลื่อนที่ (ตัวกรองชีวภาพจะเคลื่อนที่แบบหมุนเวียนตามการไหลของน้ำ) และชุดการทดลองที่ 3 เป็นระบบโปรยกรอง (ตัวกรองชีวภาพถูกยึดอยู่กับที่และมีการปล่อยหยดน้ำแบบฟุ้งกระจายเพื่อให้เกิดการสัมผัสกับวัสดุตัวกรอง) โดยรายละเอียดของแต่ละชุดการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

ชุดควบคุม ประกอบด้วยบ่อพลาสติกปริมาตร 240 ล. ขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 64 x 104 x 42 ลบ.ซม. ซึ่งมีการติดตั้งเชื่อมต่อกับถังตกตะกอนทรงกระบอกปริมาตร 50 ล. ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 43 ซม. สูง 52 ซม. หมุนเวียนน้ำระหว่างบ่อพลาสติกและถังตกตะกอนด้วยท่อ

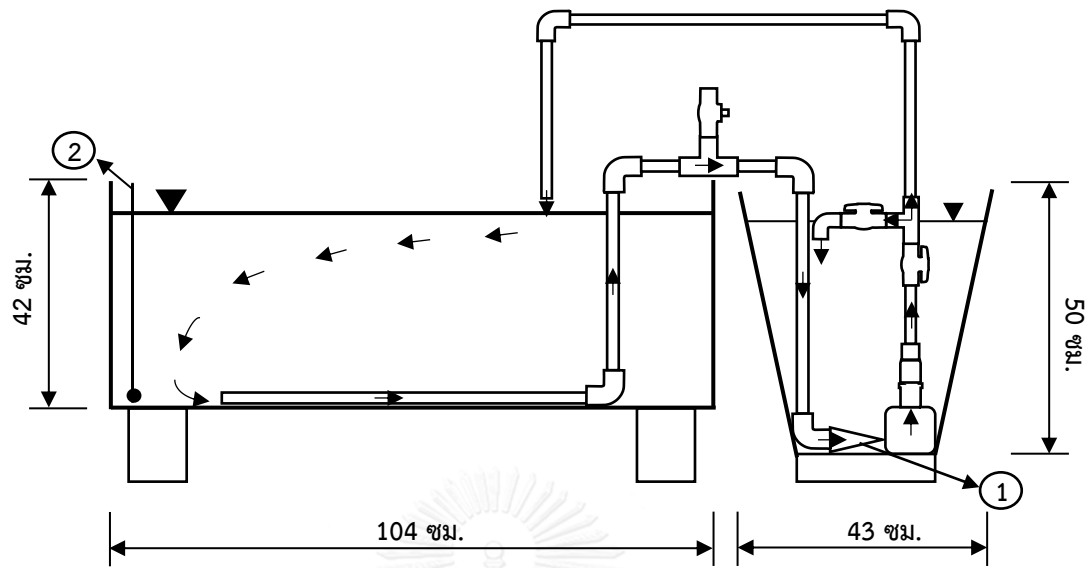
PVC ขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว จำนวน 2 ท่อ โดยใช้ระบบกาลักน้ำ ที่บริเวณด้านปลายของท่อจะมีการติดตั้งถุงกรองตาข่ายขนาดรูกรอง 186 ไมครอน เพื่อดักเศษตะกอนแขวนลอยที่อาจเกิดขึ้นเมื่อนำระบบไปใช้กับน้ำเสียจริงในการเลี้ยงปลา (การทดลองช่วงที่ 3) ภายในถังตกตะกอนติดตั้งเครื่องสูบน้ำเพื่อสูบน้ำใสที่ผ่านการกรองเวียนกลับเข้าสู่บ่อพลาสติกอีกครั้งหนึ่ง การหมุนเวียนของน้ำและการติดตั้งระบบสำหรับชุดควบคุม ดังรูปแสดงในรูปที่ 3.10

ชุดการทดลองที่ 1: ระบบตัวกลางจมตัว ประกอบด้วยบ่อพลาสติก ถังตกตะกอน และเดินท่อด้วยระบบกาลักน้ำ (เช่นเดียวกับชุดควบคุม) ภายในถังตกตะกอนติดตั้งเครื่องสูบน้ำเพื่อสูบน้ำใสที่ผ่านการกรองเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ผ่านท่อน้ำเข้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{1}{2}$ นิ้ว ถังปฏิกรณ์ชีวภาพไนทริไฟเคชันของระบบตัวกลางจมตัวมีลักษณะเป็นท่อพลาสติก PVC ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 93 ซม. สามารถกักปริมาตรน้ำได้ 10 ล. ภายในบรรจุตัวกรองชีวภาพ BCN-012 ปริมาตรรวม 6 ล. โดยทำการผสมวัสดุตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน (จากการทดลองช่วงที่ 1) ปริมาตร 5.4 ล. และตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการใช้งานในบ่อเลี้ยงปลาจริงปริมาตร 0.6 ล. ทำการติดตั้งตะแกรงพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู 1 ซม. และขอบยางพลาสติกเสริมความแข็งแรงเพื่อกันไม่ให้ตัวกรองชีวภาพไหลตามแรงดันน้ำขึ้นมาและหลุดออกนอกถังปฏิกรณ์ ติดตั้งหัวทรายเติมอากาศภายในถังปฏิกรณ์เพื่อควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายให้มีค่าเหมาะสมต่อการเกิดกระบวนการไนทริไฟเคชันสำหรับการไหลเวียนของน้ำภายในถังปฏิกรณ์จะเริ่มต้นจากการสูบน้ำจากถังตกตะกอนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพทางด้านล่าง จนน้ำไหลผ่านและท่วมชั้นตัวกรองหมุนเวียนน้ำเสียเพื่อให้เกิดการสัมผัสของน้ำกับจุลินทรีย์บนวัสดุตัวกลางอย่างทั่วถึง จากนั้นน้ำจะไหลขึ้นและออกจากถังปฏิกรณ์ผ่านทางท่อน้ำออกทางด้านข้างของถังปฏิกรณ์ลงสู่อบ่อพลาสติก ดังรูปแสดงการติดตั้งระบบสำหรับชุดการทดลองที่ 1 ในรูปที่ 3.11

ชุดการทดลองที่ 2: ระบบตัวกลางเคลื่อนที่ ประกอบด้วยบ่อพลาสติก ถังตกตะกอน และเดินท่อด้วยระบบกาลักน้ำ (เช่นเดียวกับชุดควบคุม) ภายในถังตกตะกอนติดตั้งเครื่องสูบน้ำเพื่อสูบน้ำใสที่ผ่านการกรองเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ผ่านท่อน้ำเข้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{1}{2}$ นิ้ว ถังปฏิกรณ์ชีวภาพไนทริไฟเคชันของระบบตัวกลางเคลื่อนที่มีลักษณะเป็นท่อพลาสติก PVC ทรงกระบอก 2 ชั้น ชั้นนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 93 ซม. และชั้นในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 ซม. สูง 63 ซม. สามารถกักปริมาตรน้ำได้ 10 ล. ภายในบรรจุตัวกรองชีวภาพ BCN-012 ปริมาตรรวม 6 ล.

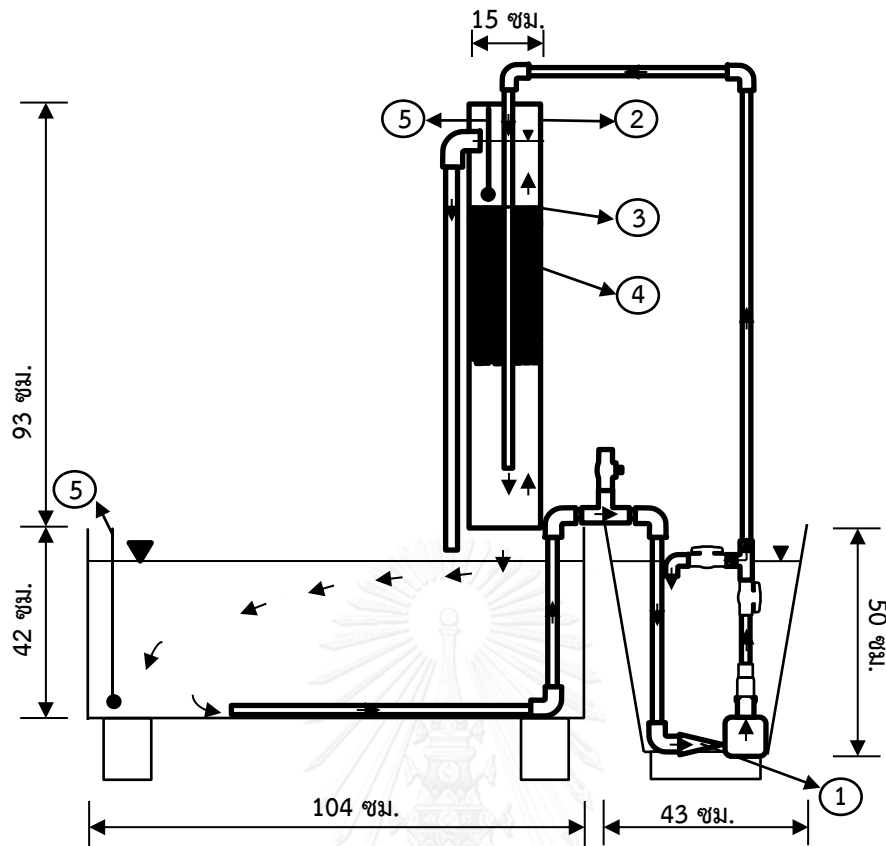
(เช่นเดียวกับชุดการทดลองที่ 1) ทำการติดตั้งหัวทรายเติมอากาศบริเวณด้านล่างของถังปฏิกรณ์เพื่อควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายให้มีค่าเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลชีพกลุ่มไนโตรฟายอิง และเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของตัวกรองชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพภายในถังปฏิกรณ์ การไหลเวียนของน้ำภายในถังปฏิกรณ์จะเริ่มต้นจากการสูบน้ำจากถังตกตะกอนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเข้าทางด้านบนบริเวณทรงกระบอกชั้นนอก จากนั้นน้ำและตัวกรองชีวภาพมีการเคลื่อนที่พร้อมกัน นั่นคือไหลเวียนลงสู่ด้านล่างและเข้าสู่ทรงกระบอกชั้นในของถังปฏิกรณ์ ระหว่างการเคลื่อนที่ของตัวกรองชีวภาพภายในถังปฏิกรณ์จะเกิดการสัมผัสของน้ำกับจุลชีพบนวัสดุตัวกลางอย่างทั่วถึง จากนั้นน้ำจะไหลเวียนลงสู่ด้านล่างอีกครั้งและออกจากถังปฏิกรณ์ผ่านทางท่อน้ำออกที่มีลักษณะเป็นรูปตัวยูลงสู่บ่อพลาสติก โดยการหมุนเวียนน้ำและการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับชุดการทดลองที่ 2 แสดงดังในรูปที่ 3.12

ชุดการทดลองที่ 3: ระบบโปรยกรอง ประกอบด้วยบ่อพลาสติก ถังตกตะกอน และเดินท่อด้วยระบบกาลักน้ำ (เช่นเดียวกับชุดควบคุม) ภายในถังตกตะกอนมีการติดตั้งเครื่องสูบน้ำเพื่อสูบน้ำใสที่ผ่านการกรองเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ผ่านท่อเข้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว ถังปฏิกรณ์ชีวภาพไนโตรฟิเคชันของระบบโปรยกรองมีลักษณะเป็นบ่อพลาสติก PVC ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 93 ซม. ภายในติดตั้งถังทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 ซม. สูง 60 ซม. ซึ่งประยุกต์มาจากกระป๋องพลาสติก ทำหน้าที่ในการบรรจุตัวกรองชีวภาพ BCN-012 ปริมาตรรวม 6 ล. (เช่นเดียวกับชุดการทดลองที่ 1 และ 2) กระป๋องพลาสติกเจาะรูที่ติดตั้งอยู่บริเวณด้านบนของถังปฏิกรณ์จะช่วยควบคุมให้น้ำที่เข้าสู่ระบบเกิดเป็นหยดน้ำขนาดเล็ก และเมื่อหยดน้ำไหลผ่านพัดลมหอยโข่งที่ติดตั้งไว้จะเกิดการฟุ้งกระจายของละอองน้ำอย่างทั่วถึงบนตัวกรองชีวภาพ สำหรับการไหลเวียนของน้ำภายในถังปฏิกรณ์จะเริ่มต้นจากการสูบน้ำจากถังตกตะกอนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพทางด้านบน ผ่านกระป๋องพลาสติกเจาะรูและพัดลมกระจายน้ำ เพื่อให้เกิดการสัมผัสของละอองน้ำกับฟิล์มชีวภาพบนวัสดุตัวกลางอย่างทั่วถึง จากนั้นน้ำจะไหลผ่านชั้นตัวกรองชีวภาพลงสู่ด้านล่างและออกจากถังปฏิกรณ์ผ่านทางท่อน้ำออกลงสู่บ่อพลาสติก โดยการติดตั้งระบบสำหรับชุดการทดลองที่ 3 แสดงดังในรูปที่ 3.13

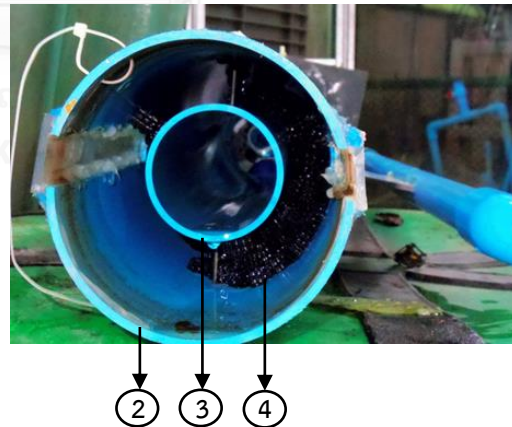
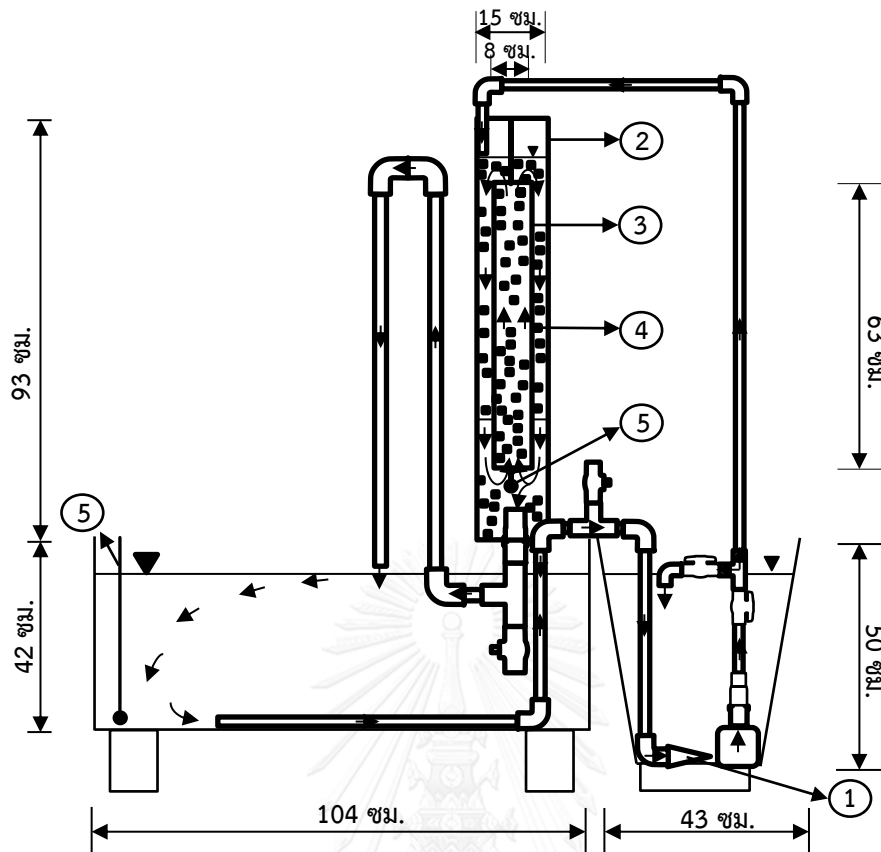


① ถังกรอง ② หัวทรายเติมอากาศ

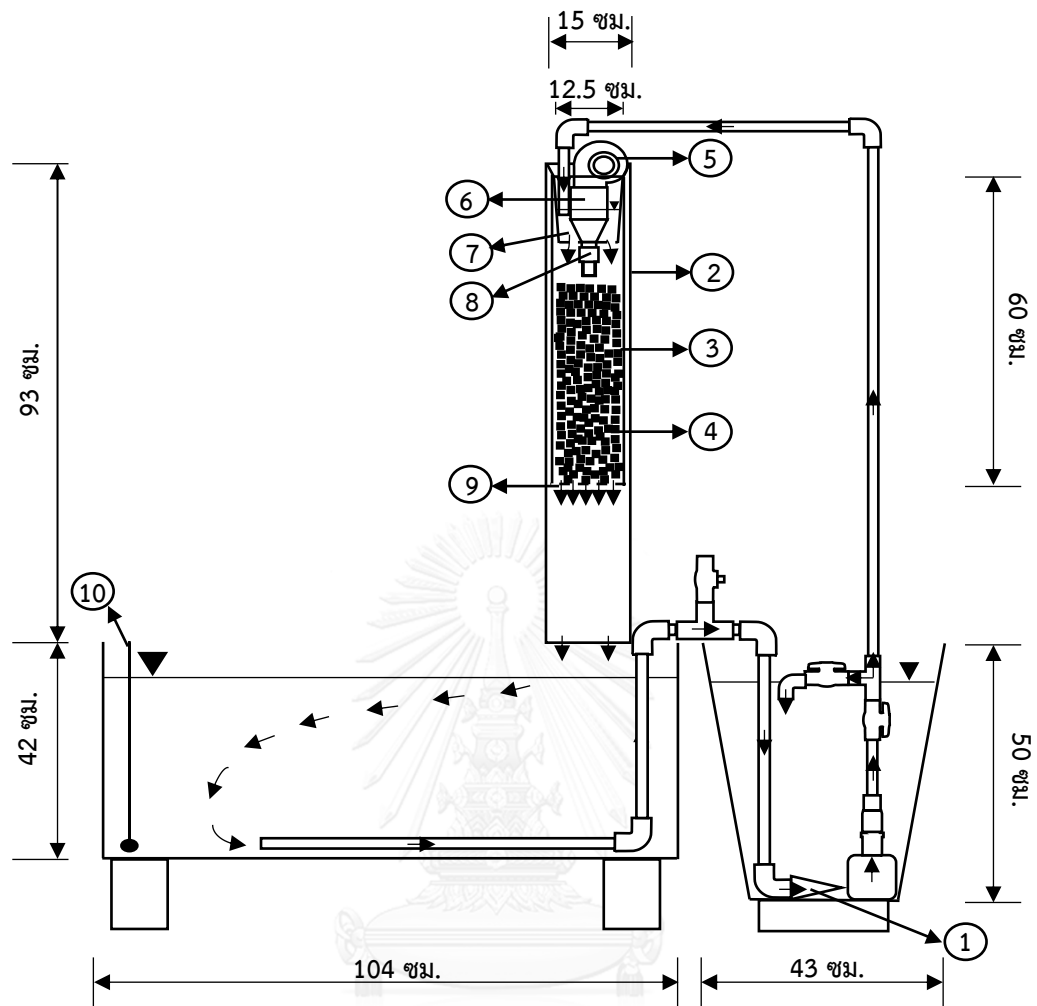
รูปที่ 3.10 แผนภาพการหมุนเวียนน้ำและการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับชุดควบคุม



① ถังกรอง ② ท่อพีวีซีภายนอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ③ ตะแกรงพลาสติก และขอบยางพลาสติก ④ ตัวกรองชีวภาพ BCN-012 ⑤ หัวทรายเติมอากาศ
รูปที่ 3.11 แผนภาพการหมุนเวียนน้ำและการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับระบบตัวกลางจมตัว



- ① ถังกรอง ② ท่อพีวีซีภายนอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว
 ③ ท่อพีวีซีภายในเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ④ ตัวกรองชีวภาพ BCN-012 ⑤ หัวทรายเติมอากาศ
- รูปที่ 3.12 แผนภาพการหมุนเวียนน้ำและการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับระบบตัวกลางเคลื่อนที่



- รูปที่ 3.13 แผนภาพการหมุนเวียนน้ำและการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับระบบโปรยกรอง
- ① ถังกรอง ② ท่อพีวีซีภายนอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ③ กระบอ่งพลาสติก
 ④ ตัวกรองชีวภาพ BCN-012 ⑤ พัดลมหอยโข่ง ⑥ ข้อลด 2 นิ้ว x 1/2 นิ้ว
 ⑦ กระบอ่งพลาสติกเจาะรู ⑧ ตัวกระจายลม ⑨ ตะแกรงพลาสติก ⑩ หัวทรายเติมอากาศ

เดินระบบการทดลองชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพทั้ง 3 รูปแบบ (ทำการทดลอง 3 ซ้ำสำหรับแต่ละชุดทดลอง) โดยบรรจุน้ำปริมาตร 250 ล. แบ่งเป็นปริมาตรน้ำในบ่อพลาสติก 200 ล. ภายในบ่อตกตะกอน 40 ล. และภายในถังปฏิกรณ์ 10 ล. (ยกเว้นชุดควบคุมและระบบโปรยกรองที่มีปริมาตรน้ำภายในบ่อพลาสติก 210 ล. และภายในบ่อตกตะกอน 40 ล.) เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ลงในน้ำเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของแอมโมเนียมเริ่มต้น เท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ปรับสภาพความเป็นด่างด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตให้มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายในระบบให้มากกว่า 5 มก./ล. ด้วยการติดตั้งหัวทรายเติมอากาศจำนวน 2 จุดภายในบ่อทดลอง และควบคุมอัตราการไหลของน้ำทั้งระบบให้มีค่าเท่ากับ 10,886.4 ล./วัน หรือคิดเป็นอัตราการหมุนเวียนน้ำร้อยละ 4,355 ต่อวัน เดินระบบแบบต่อเนื่อง จนกว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียมรวมครั้งที่ และเมื่อเสร็จสิ้นการทดลองรอบที่ 1 จะทำการถ่ายน้ำครึ่งหนึ่งของปริมาตรน้ำในแต่ละบ่อออกมาผสมรวมกัน จากนั้นเติมน้ำกลับเข้าสู่แต่ละระบบเช่นเดิม (ทำเช่นนี้ 3 รอบ) เพื่อให้มวลน้ำในแต่ละระบบมีค่าพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำใกล้เคียงกัน เดินระบบการทดลองเช่นเดิมในรอบที่ 2 โดยเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียมเริ่มต้นเท่ากับ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. จนกว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียมรวมครั้งที่ และสุดท้ายเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียมเริ่มต้นที่ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. จนกว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียมรวมครั้งที่ เก็บตัวอย่างน้ำภายในบ่อพลาสติกและบริเวณท่อน้ำออกของถังตกตะกอน (สำหรับชุดควบคุม) หรือบริเวณท่อน้ำออกของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (สำหรับชุดทดลอง) เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ควบคู่กับการวัดพารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำ ทั้งนี้ตัวแปรและพารามิเตอร์/เครื่องมือวิเคราะห์ ที่ทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.3 และ 3.4

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์

| ตัวแปรอิสระ | ค่าที่ใช้ในการทดลอง |
|-------------------------------------|---|
| รูปแบบระบบบำบัด | ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบจมตัว ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางเคลื่อนที่ ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบโปรยกรอง |
| ความเข้มข้นแอมโมเนียมคลอไรด์ | 1, 2, 3 มก.ไนโตรเจน/ล. |
| ตัวแปรควบคุม | ค่าที่ใช้ในการทดลอง |
| ชนิดตัวกรองชีวภาพ | BCN-012 |
| อัตราการไหลของน้ำเสีย | 10,886.4 ลิตร/วัน |
| ปริมาตรของตัวกรองชีวภาพ | 6 ลิตร |
| ปริมาตรน้ำทั้งระบบ | 250 ลิตร |
| ระยะเวลาในการเดินระบบ | จนกว่าอัตราการบำบัดคงที่ |
| ตัวแปรตาม | พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ |
| ประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกรองชีวภาพ | ปริมาณแอมโมเนียมรวม ไนไตรต์ และไนเทรต |
| พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ | ค่าสภาพความเป็นด่าง พีเอช ออกซิเจนละลาย และอุณหภูมิ |

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์และเครื่องมือวิเคราะห์สำหรับการทดลองช่วงที่ 2

| พารามิเตอร์ | วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์ | จุดเก็บตัวอย่าง บ่อทดลอง ท่อน้ำออก | | ความถี่ใน การวิเคราะห์ |
|--------------------------------------|---|---------------------------------------|---|---------------------------|
| <i>พารามิเตอร์คุณภาพน้ำทางเคมี</i> | | | | |
| แอมโมเนียรวม | Salicylate – Hypochlorite method | ✓ | ✓ | ทุกวัน |
| ไนไตรต์ | Colorimetric and Spectrophotometric Method | ✓ | ✓ | ทุกวัน |
| ไนเตรต | Ultraviolet Spectrophotometric Method | ✓ | ✓ | ทุกวัน |
| <i>พารามิเตอร์คุณภาพน้ำทางกายภาพ</i> | | | | |
| ความเป็นต่าง | Test kit (AQUA-VBC ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) | ✓ | | ทุกวัน |
| พีเอช | pH Meter (HANNA, HI 9125) | ✓ | | ทุกวัน |
| ออกซิเจนละลาย | DO Meter (HANNA, HI 9147) | ✓ | | ทุกวัน |
| อุณหภูมิ | Thermometer (HANNA, HI 9147) | ✓ | | ทุกวัน |

3.3.3 การทดลองช่วงที่ 3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลา

การทดลองส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพไนทริฟิเคชันในการบำบัดไนโตรเจนในน้ำเสียจริงจากระบบการเลี้ยงปลาแบบปิดของชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพ และชุดทดลองที่ติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพ 3 รูปแบบ นั่นคือ ระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง โดยอาศัยบ่อเลี้ยงปลา ถึงตกตะกอน และถังปฏิกรณ์ชีวภาพ จากการทดลองช่วงที่ 2 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- การเตรียมปลานิล

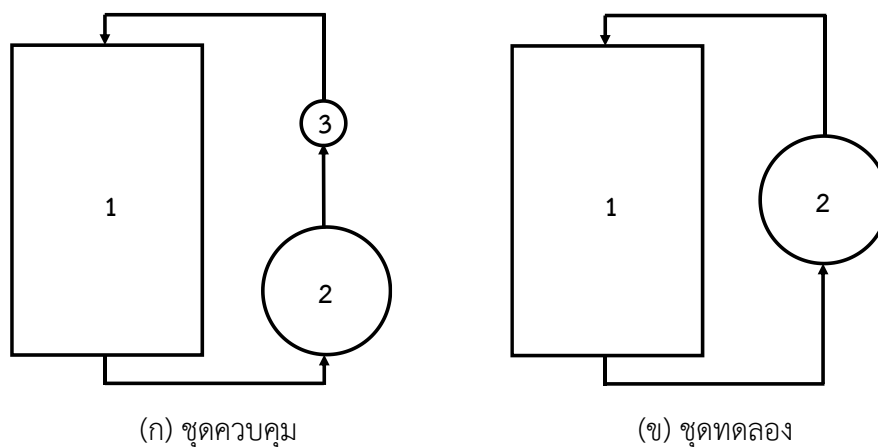
ปลานิลที่ใช้ในการทดลองมาจากบริษัท ป.เจริญฟาร์ม ตำบลวังตะเคียน อำเภอเมือง จังหวัด ฉะเชิงเทรา เมื่อขนส่งพันธุ์ปลามาถึงห้องปฏิบัติการจะทำการปรับอุณหภูมิด้วยการลอยถุงบรรจุปลานิลในบ่อพักประมาณ 30 นาที จากนั้นเปิดปากถุง และค่อยๆ เทปลานิลลงในบ่อพักซึ่งเป็นบ่อพลาสติกทรงกระบอกกลมปริมาตร 1,000 ลิตร ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 134 ซม. สูง 90 ซม. (ดังแสดงในรูปที่ 3.14) ปรับค่าสภาพต่างของน้ำภายในบ่อให้เท่ากับ 150 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. และต่อสายเครื่องเติมอากาศเพื่อสร้างสภาวะเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลานิลเพื่อที่จะเตรียมใช้ในการทดลองช่วงที่ 3



รูปที่ 3.14 การเตรียมและปรับสภาพปลานิลในบ่อพักน้ำก่อนการทดลอง

- การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับชุดควบคุมและชุดทดลอง

แผนภาพการติดตั้งบ่อปลา ดังตกตะกอน และถังปฏิกรณ์ชีวภาพ จะแสดงดังรูปที่ 3.15 ซึ่งมีลักษณะเดียวกับการทดลองช่วงที่ 2 (รูปที่ 3.10-3.13) โดยทำการทดลองต่อเนื่อง แต่มีการบรรจุปลานิลลงในบ่อพลาสติกปริมาตร 240 ล. และทำการทดลองเป็นระยะเวลา 60 วัน



รูปที่ 3.15 แผนภาพการติดตั้งบ่อปลา ถึงตกตะกอน และถึงปฏิกรณ์ชีวภาพของการทดลองช่วงที่ 3 เมื่อ (ก) ชุดควบคุม และ (ข) ชุดทดลอง โดย 1 แทน บ่อปลา , 2 แทน ถังตกตะกอน และ 3 แทน ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบ ไพรยกรอง ในการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลา

เริ่มต้นเลี้ยงปลานิลด้วยระบบปิดภายใต้สภาวะจำลองของบ่อไร้ดินภายในโรงเรือนที่ความหนาแน่นเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 กก./ลบ.ม. และสิ้นสุดที่ความหนาแน่นเท่ากับ 1 กก./ลบ.ม. ของปริมาณน้ำทั้งหมดในระบบ (ปริมาตรรวม 250 ล.) ให้อาหารปลานิลทุกวันด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปสำหรับปลา กินพีชขนาดเล็กยี่ห้อซีพี สูตร 9931 ซึ่งมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 15.875 โดยปริมาณการให้อาหารคำนวณจากร้อยละ 3 ของน้ำหนักปลาทั้งหมดในรอบต่อวัน ปรับสภาพความเป็นต่างภายในบ่อเลี้ยงปลาด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตให้มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายให้มีค่ามากกว่า 5 มก./ล. ด้วยการติดตั้งหัวทรายเติมอากาศจำนวน 2 จุดภายในบ่อทดลอง และควบคุมอัตราการไหลของน้ำทั้งระบบให้เท่ากับ 10,886.4 ล./วัน คิดเป็นอัตราการหมุนเวียนน้ำร้อยละ 4,355 ต่อวัน เดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยน้ำเสียจริงจากระบบเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ แต่จะมีการเติมน้ำเพื่อชดเชยการระเหยและชดเชยปริมาณน้ำที่ถูกเก็บไปวิเคราะห์ หลังจากเดินระบบเลี้ยงปลานิลเป็นเวลา 30 วันจะทำการเปลี่ยนอุปกรณ์ภายในถังตกตะกอนทุกๆ 6 วัน หรือเมื่อพบว่าระดับน้ำในถังตกตะกอนเริ่มลดต่ำลงเนื่องจากการอุดตันของเศษตะกอนแขวนลอย โดยจะทำการถอดอุปกรณ์เพื่อนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 °ซ เป็นเวลา 1 ชม. และชั่งน้ำหนักแห้งของตะกอนภายในถังกอง จากนั้นจะทำความสะอาดถังกองแล้ว

หมุนเวียนกลับไปใช้ใหม่ภายในถึงตกตะกอน เก็บตัวอย่างน้ำในบ่อเลี้ยงปลา และบริเวณท่อน้ำออกของถึงตกตะกอน (สำหรับชุดควบคุม) หรือบริเวณท่อน้ำออกของถึงปฏิกรณ์ชีวภาพ (สำหรับชุดทดลอง) เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนและประเมินสมดุลสารอินทรีย์ไนโตรเจน ควบคู่กับการวัดพารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำ รวมถึงทำการเก็บข้อมูลการเติบโตของปลานิลด้วยการชั่งน้ำหนัก วัดความยาว และนับจำนวนปลานิลในบ่อก่อนและหลังการทดลอง ทั้งนี้ตัวแปรและพารามิเตอร์/เครื่องมือวิเคราะห์ ที่ทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.5 และ 3.6

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบบ่อเลี้ยงปลา

| ตัวแปรอิสระ | ค่าที่ใช้ในการทดลอง |
|-------------------------------------|---|
| รูปแบบระบบบำบัด | ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบจมตัว ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางเคลื่อนที่ ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบโปรยกรอง |
| ตัวแปรควบคุม | ค่าที่ใช้ในการทดลอง |
| ตัวกรองชีวภาพ | BCN-012 |
| ปริมาตรของตัวกรองชีวภาพ | 6 ลิตร ใช้ต่อจากการทดลองช่วงที่ 2 |
| ปริมาตรน้ำในระบบ | 250 ลิตร |
| ชนิดของปลา | ปลานิล |
| ความหนาแน่นเริ่มต้นของปลา | 0.5 กก./ลบ.ม.ของปริมาตรน้ำทั้งระบบ |
| อาหารปลา | อาหารเม็ดสำเร็จรูป |
| ปริมาณการให้อาหารปลา | อัตราร้อยละ 3 ต่อวันของน้ำหนักปลาทั้งหมด |
| ระยะเวลาในการเดินระบบ | 60 วัน |
| ตัวแปรตาม | พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ |
| ประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกรองชีวภาพ | ปริมาณแอมโมเนียรวม ไนไตรต์ และไนเตรต |
| พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ | ค่าสภาพความเป็นด่าง พีเอช ออกซิเจนละลาย และอุณหภูมิ |
| การเติบโตของปลา | ชั่งน้ำหนัก วัดความยาว และนับจำนวนปลานิล |

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์และเครื่องมือวิเคราะห์สำหรับการทดลองช่วงที่ 3

| พารามิเตอร์ | วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์ | จุดเก็บตัวอย่าง บ่อปลา ท่อน้ำออก | ความถี่ใน การวิเคราะห์ |
|--------------------------------------|---|-------------------------------------|---------------------------|
| <i>พารามิเตอร์คุณภาพน้ำทางเคมี</i> | | | |
| แอมโมเนียรวม | Salicylate – Hypochlorite method | ✓ ✓ | ทุกวัน |
| ไนไตรต์ | Colorimetric and Spectrophotometric Method | ✓ ✓ | ทุกวัน |
| ไนเตรต | Ultraviolet Spectrophotometric Method | ✓ ✓ | ทุกวัน |
| <i>พารามิเตอร์คุณภาพน้ำทางกายภาพ</i> | | | |
| ความเป็นต่าง | Test kit (AQUA-VBC ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) | ✓ | ทุกวัน |
| พีเอช | pH Meter (HANNA, HI 9125) | ✓ | ทุกวัน |
| ออกซิเจนละลาย | DO Meter (HANNA, HI 9147) | ✓ | ทุกวัน |
| อุณหภูมิ | Thermometer (HANNA, HI 9147) | ✓ | ทุกวัน |
| ตะกอนแขวนลอย | Total Suspended Solid Dried at 103-105°C | ✓ | ทุก 7 วัน |
| <i>พารามิเตอร์ทางคุณภาพสัตว์น้ำ</i> | | | |
| น้ำหนักรูปปลา | เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง | ✓ | ทุก 20 วัน |
| ความยาวปลา | อุปกรณ์วัดความยาว | ✓ | ทุก 20 วัน |
| อัตราการเติบโต | เปรียบเทียบน้ำหนักปลากับระยะเวลาการเลี้ยง | ✓ | ทุก 20 วัน |
| อัตราการแลกเนื้อ | เปรียบเทียบปริมาณอาหารที่ให้ กับผลผลิตปลาทั้งหมด | ✓ | ทุก 20 วัน |

- การประเมินประสิทธิภาพของระบบเลี้ยงปลา

ทำการชั่งน้ำหนัก วัดความยาว และนับจำนวนสัตว์น้ำ ในช่วงเริ่มต้นการทดลอง ระหว่างการทดลองทุก 20 วัน และวันสุดท้ายของการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.16 (ก) และ (ข) ตามลำดับ เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการคำนวณหาน้ำหนักและความยาวเฉลี่ยของปลานิล อัตราการเจริญเติบโตของปลานิลเฉลี่ยต่อวัน (Daily Weight Gain: DWG) และอัตราการแลกเนื้อของปลานิล (Feed Conversion Ratio: FCR) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.6) ถึง (3.9) ดังนี้

น้ำหนักปลานิลเฉลี่ย (ก./ตัว)

$$= \frac{\text{น้ำหนักปลานิลทั้งหมด (ก./บ่อ)}}{\text{จำนวนปลานิล (ตัว/บ่อ)}} \quad (3.6)$$

ความยาวปลานิลเฉลี่ย (ซม./ตัว)

$$= \frac{\text{ความยาวปลานิลทั้งหมด (ซม./บ่อ)}}{\text{จำนวนปลานิล (ตัว/บ่อ)}} \quad (3.7)$$

อัตราการเจริญเติบโตของปลานิลต่อวัน (ก./ตัว/วัน)

$$= \frac{\text{น้ำหนักปลานิลเฉลี่ยสิ้นสุด (ก./ตัว) - น้ำหนักปลานิลเฉลี่ยเริ่มต้น (ก./ตัว)}}{\text{จำนวนวันที่ทำการทดลอง (วัน)}} \quad (3.8)$$

อัตราการแลกเนื้อ

$$= \frac{\text{น้ำหนักรวมของอาหารปลานิลที่ให้ในการทดลองทั้งหมด (ก.)}}{\text{น้ำหนักรวมของปลานิลที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด (ก.)}} \quad (3.9)$$



รูปที่ 3.16 ชั่งน้ำหนักและการวัดความยาวปลาชนิดเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบเลี้ยงปลานิล

3.3.4 การทดลองช่วงที่ 4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ภายหลังเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลา

เนื่องจากระหว่างการเดินระบบบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนด้วยน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลา (การทดลองช่วงที่ 3) ยังเห็นความแตกต่างของอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมในแต่ละระบบไม่ชัดเจนเท่าที่ควร ดังนั้นการทดลองในส่วนนี้จึงเดินระบบต่อเนื่องเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดไนทรีฟิเคชันของชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์และตัวกรองชีวภาพ และชุดทดลองที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพ 3 รูปแบบ ได้แก่ ระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และโปรยกรอง ด้วยการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยใช้บ่อพลาสติก ถังตกตะกอน และถังปฏิกรณ์ชีวภาพ จากการทดลองช่วงที่ 2 และ 3 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ภายหลังเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลา

แยกปลานิลออกจากบ่อพลาสติกแล้วเดินระบบการทดลองชุดควบคุมและชุดทดลองที่ติดตั้งถังปฏิกรณ์และตัวกรองชีวภาพทั้ง 3 รูปแบบ ด้วยการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ปรับสภาพความเป็นด่างภายในระบบเท่ากับ 150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายให้มีค่ามากกว่า 5 มก./ล. ด้วยการติดตั้ง

หัวทรายเติมอากาศภายในบ่อทดลอง และควบคุมอัตราการไหลของน้ำทั้งระบบให้มีค่าเท่ากับ 10,886.4 ล./วัน ซึ่งคิดเป็นอัตราการหมุนเวียนน้ำร้อยละ 4,355 ต่อวัน เดินระบบแบบต่อเนื่องจนกว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมคงที่ และเมื่อเสร็จสิ้นการทดลองรอบที่ 1 จะทำการถ่ายน้ำครึ่งหนึ่งของปริมาตรน้ำในแต่ละบ่อออกมาผสมรวมกัน จากนั้นทำการเติมน้ำกลับเข้าสู่แต่ละระบบเช่นเดิม (ทำซ้ำ 3 รอบ) เพื่อให้มวลน้ำในแต่ละระบบมีคุณภาพน้ำใกล้เคียงกัน เดินระบบการทดลองเช่นเดิมในรอบที่ 2 โดยเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. จนกว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมคงที่ และสุดท้ายเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมเริ่มต้นที่ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. จนกว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมคงที่ เก็บตัวอย่างน้ำภายในบ่อพลาสติก และบริเวณท่อน้ำออกของถังตกตะกอน (สำหรับชุดควบคุม) หรือบริเวณท่อน้ำออกของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (สำหรับชุดทดลอง) เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ควบคู่กับการวัดพารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำ ทั้งนี้ตัวแปรและพารามิเตอร์/เครื่องมือวิเคราะห์ที่ทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.7 และ 3.8

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ภายหลังจากเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลา

| ตัวแปรอิสระ | ค่าที่ใช้ในการทดลอง |
|-------------------------------------|---|
| รูปแบบระบบบำบัด | ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบจมตัว ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางเคลื่อนที่ ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบโปรยกรอง |
| ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมคลอไรด์ | 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. |
| ตัวแปรควบคุม | ค่าที่ใช้ในการทดลอง |
| ชนิดตัวกรองชีวภาพ | BCN-012 |
| อัตราการไหลของน้ำเสีย | 10,886.4 ลิตร/วัน |
| ปริมาณของตัวกรองชีวภาพ | 6 ลิตร |
| ปริมาณน้ำทั้งระบบ | 250 ลิตร |
| ระยะเวลาในการเดินระบบ | จนกว่าอัตราการบำบัดคงที่ |
| ตัวแปรตาม | พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ |
| ประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกรองชีวภาพ | ปริมาณแอมโมเนียรวม ไนไตรต์ และไนเตรต |
| พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ | ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช ค่าสภาพความเป็นต่าง และอุณหภูมิ |

ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์และเครื่องมือวิเคราะห์สำหรับการทดลองช่วงที่ 4

| พารามิเตอร์ | วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์ | จุดเก็บตัวอย่าง บ่อทดลอง ท่อน้ำออก | | ความถี่ในการวิเคราะห์ |
|--------------------------------------|--|---------------------------------------|---|-----------------------|
| <i>พารามิเตอร์คุณภาพน้ำทางเคมี</i> | | | | |
| แอมโมเนียรวม | Salicylate – Hypochlorite method | ✓ | ✓ | ทุกวัน |
| ไนไตรต์ | Colorimetric and Spectrophotometric Method | ✓ | ✓ | ทุกวัน |
| ไนเตรต | Ultraviolet Spectrophotometric Method | ✓ | ✓ | ทุกวัน |
| <i>พารามิเตอร์คุณภาพน้ำทางกายภาพ</i> | | | | |
| ความเป็นต่าง | Test kit (AQUA-VBC ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) | ✓ | | ทุกวัน |
| พีเอช | pH Meter (HANNA, HI 9125) | ✓ | | ทุกวัน |
| ออกซิเจนละลายน้ำ | DO Meter (HANNA, HI 9147) | ✓ | | ทุกวัน |
| อุณหภูมิ | Thermometer (HANNA, HI 9147) | ✓ | | ทุกวัน |

- การเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันทางสถิติ

ทำการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง เพื่อศึกษาว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของถังปฏิกรณ์ชีวภาพทั้ง 3 รูปแบบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญตามหลักสถิติหรือไม่ ($P < 0.05$, $P > 0.05$) ด้วยโปรแกรม Excel เพื่อให้ได้ระบบที่สามารถบำบัดแอมโมเนียรวมได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังใช้โปรแกรมดังกล่าวในการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของแต่ละระบบในการทดลองช่วงที่ 2 (เดินระบบด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการเลี้ยงปลา) และการทดลองช่วงที่ 4 (เดินระบบด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ภายหลังจากการเลี้ยงปลา) ว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญตามหลักสถิติหรือไม่เช่นเดียวกัน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

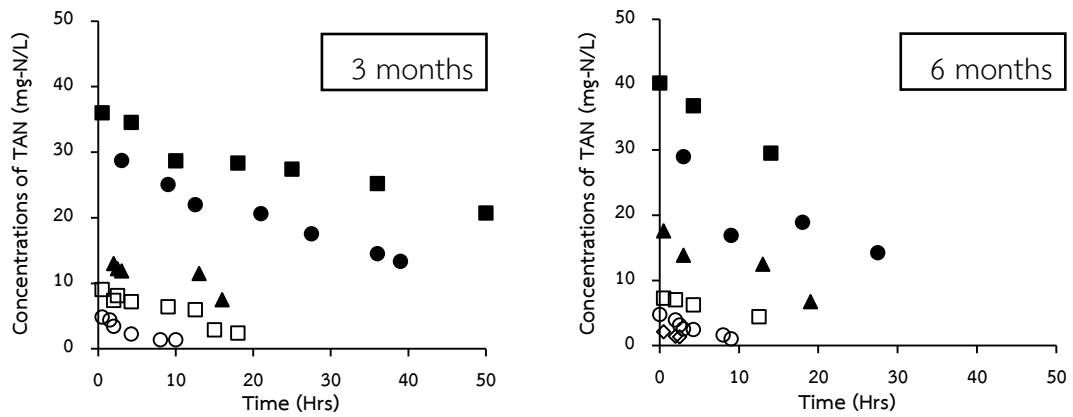
4.1 การเปรียบเทียบตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน

4.1.1 จลนพลศาสตร์ในการบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน

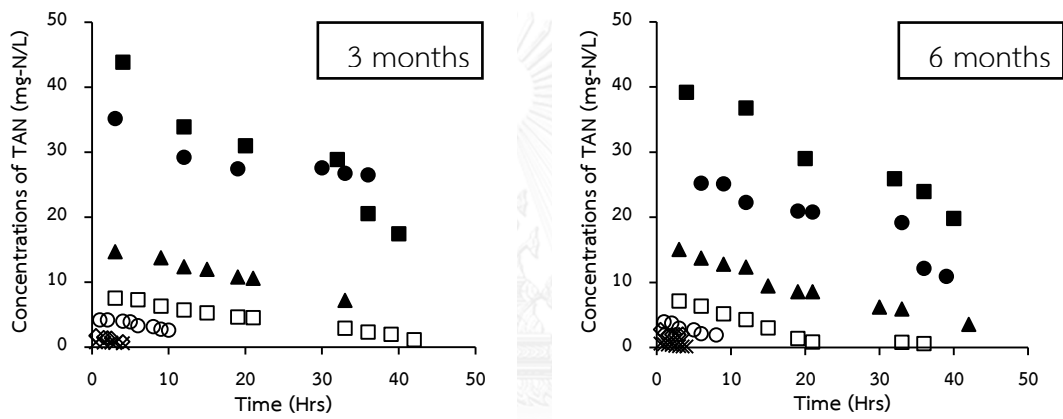
การทดลองช่วงนี้เป็นการศึกษาจลนพลศาสตร์ เพื่อให้ได้ข้อมูลอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมและอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุดของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน โดยทำการติดตั้งวัสดุตัวกลางพลาสติกชนิด BCN-012 ลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพและเติมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เพื่อแปรระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมเริ่มต้นในระบบแตกต่างกัน 7 ระดับ ได้แก่ 1, 2, 5, 10, 20, 30 และ 45 มก.ไนโตรเจน/ล. เก็บน้ำตัวอย่างเพื่อตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน ผลการทดลองมีดังนี้

- อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน

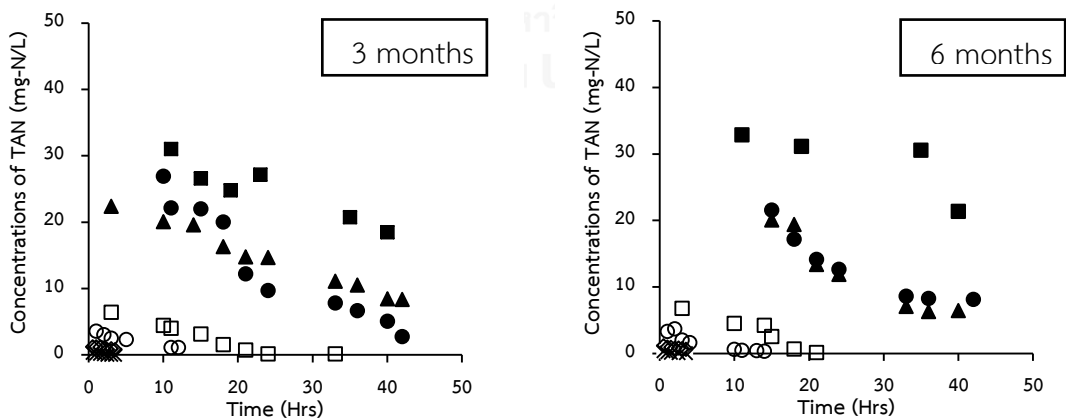
การเปลี่ยนแปลงแอมโมเนียรวมในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน แสดงในรูปที่ 4.1 จากการทดลองพบว่าในระบบที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมเริ่มต้นสูงจะให้ค่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันสูงกว่าระบบที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมเริ่มต้นต่ำ โดยค่าจลนพลศาสตร์การบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน ที่ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 1, 2, 5, 10, 20, 30 และ 45 มก.ไนโตรเจน/ล. แสดงในตารางที่ 4.1 (มีรายละเอียดการคำนวณดังแสดงในตารางที่ ข-7 และ ข-8 ในภาคผนวก) แสดงให้เห็นว่าตัวกรองชีวภาพมีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียรวมและมีความพร้อมที่จะนำไปใช้ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพไนตริฟิเคชันสำหรับการทดลองช่วงต่อไป ส่วนค่าพีเอชระหว่างการเดินระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.03 ± 0.33 และ 7.94 ± 0.29 ตามลำดับ โดยอยู่ในช่วง 7.5 ถึง 8.5 ซึ่งเป็นระดับพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของไนตริฟายอิงแบคทีเรีย (Nootong, 2006)



(ก) การทดลองรอบที่ 1



(ข) การทดลองรอบที่ 2



(ค) การทดลองรอบที่ 3

× 1 mg/l ◇ 2 mg/l ○ 5 mg/l □ 10 mg/l ▲ 20 mg/l ● 30 mg/l ■ 45 mg/l

รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงแอมโมเนียรวมในน้ำผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน

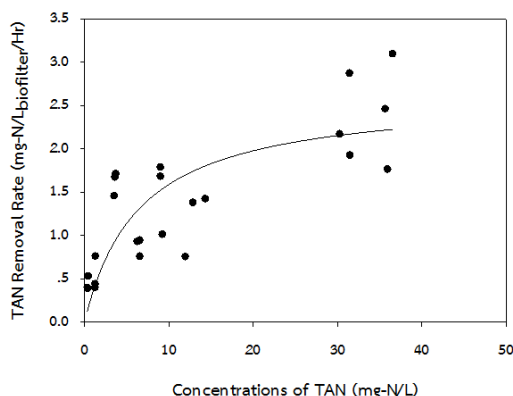
- อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (V_{max}) และค่าคงที่เมื่ออัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (K_s)

ค่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (V_{max}) และค่าคงที่เมื่ออัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (K_s) ของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน คำนวณได้จากอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพ (ตารางที่ ข-7 และ ข-8 ในภาคผนวก) โดยวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม Sigma plot version 11 ได้ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4.1

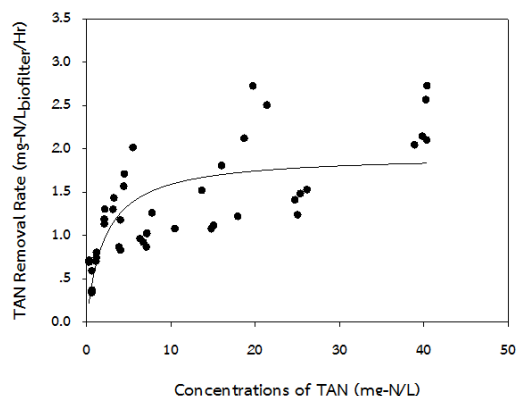
ตารางที่ 4.1 อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (V_{max}) และค่าคงที่เมื่ออัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (K_s)

| ระยะเวลาการบ่มเชื้อตัวกรองชีวภาพ (months) | V_{max} (mg-N/L _{biofilter} /Hr) | K_s (mg-N/L) |
|--|--|-------------------|
| 3 | 2.62±0.37 | 6.47±2.79 |
| 6 | 1.93±0.15 | 2.15±0.72 |

จากการทดลองพบว่าตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 เดือน จะให้ค่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (V_{max}) และค่าคงที่ K_s สูงกว่าตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 6 เดือน ทั้งนี้เมื่อนำค่า V_{max} และ K_s มาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมและอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพด้วยโปรแกรม Sigma plot version 11 จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งจะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นในระบบเพิ่มขึ้น อัตราการบำบัดจะมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง อัตราในการบำบัดสารจะเริ่มช้าลงและเข้าสู่สภาวะคงที่ ซึ่งสอดคล้องตามหลักทฤษฎีของโมนอด (Monod, 1949)



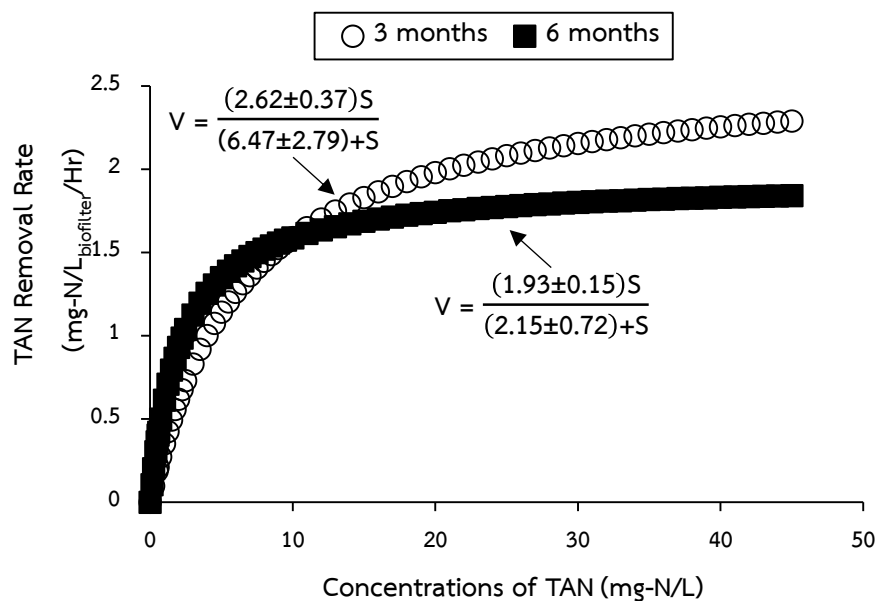
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแอมโมเนียรวมในระบบและอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา (ก) 3 เดือน และ (ข) 6 เดือน

เมื่อนำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมและอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน ดังรูปที่ 4.2 (ก) และ 4.2 (ข) มาพล็อตในแกนเดียวกันตามสมการโมนอดจะได้กราฟดังรูปที่ 4.3 ซึ่งพบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (V_{max}) ของตัวกรองชีวภาพที่บ่มเชื้อเป็นเวลา 6 เดือนมีค่าต่ำกว่าตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 เดือนประมาณร้อยละ 26 โดยอัตราการบำบัดสูงสุดของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 เดือนใกล้เคียงกับอัตราการบำบัดสูงสุดของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 6 เดือน ในขณะที่ค่าคงที่ K_s มีค่าต่ำกว่าประมาณร้อยละ 67 นอกจากนี้ในการประยุกต์ใช้ตัวกรองชีวภาพกับระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำจริงพบว่า เมื่อเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลานานจะเกิดการสะสมของแอมโมเนียรวมในระบบสูงขึ้น ดังนั้นในการคำนวณค่าความปลอดภัย (Safety factor) ของประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพในระบบบำบัดจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยดังกล่าว และต้องเพิ่มปริมาณตัวกรองชีวภาพให้เพียงพอเพื่อชดเชยอัตราการบำบัดที่ลดลง ทั้งนี้สาเหตุที่ทำให้ตัวกรองชีวภาพมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมลดลงเมื่อผ่านการใช้งานเป็นเวลานาน อาจเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของชั้นฟิล์มชีวภาพและตะกอนที่เกิดขึ้นจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ ทำให้เกิดสภาวะไร้อากาศภายในวัสดุตัวกรอง ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์เติบโตและการทำงานของไนทริฟายอิงแบคทีเรีย

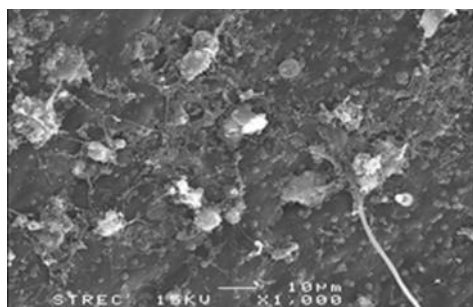


รูปที่ 4.3 จลนพลศาสตร์อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน

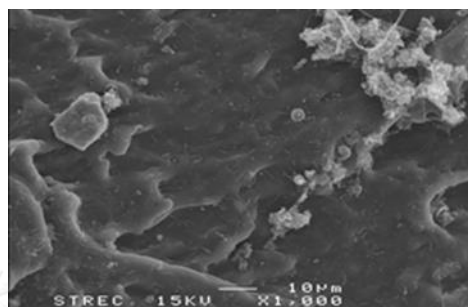
สำหรับค่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (V_{max}) จากตารางที่ 4.1 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมเพื่อออกแบบระบบบำบัดไนทริฟิเคชันสำหรับการใช้งานจริงในหน่วยของอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมต่อพื้นที่ผิวของตัวกรอง (ตร.ม.) ต่อเวลา (วัน) โดยพบว่าตัวกรองชีวภาพชนิด BCN-012 ที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน จะมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุดเท่ากับ 73.20 และ 53.92 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน ตามลำดับ โดยตัวเลขดังกล่าวเป็นค่าที่สูงกว่าในรายงานของมนต์วิภากร์ ขจรบุญ (2551) ซึ่งมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุดของตัวกรองชีวภาพชนิด BCN-009 เท่ากับ 47.20 ± 1.86 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน อย่างไรก็ตามปริมาณแอมโมเนียรวมที่เกิดขึ้นจริงในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดทั่วไปที่ความหนาแน่นสัตว์น้ำ 1 กก./ลบ.ม. จะมีความเข้มข้นไม่เกิน 0.57 มก.ไนโตรเจน/ล. (ค่าจากการคำนวณตามภาคผนวก ข ของการทดลองช่วงที่ 2) ดังนั้นเมื่อนำระดับความเข้มข้นดังกล่าวมาคำนวณหาอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมต่อพื้นที่ผิวของตัวกรองชีวภาพต่อวัน ตามสมการจลนพลศาสตร์ (รูปที่ 4.3) จะพบว่าอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันมีค่าอยู่ระหว่าง 6 ถึง 11 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาปริมาณตัวกรองชีวภาพที่เหมาะสมสำหรับบรจุในระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพไนทริฟิเคชันต่อไป

4.1.2 การเกาะติดของจุลินทรีย์บนตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน

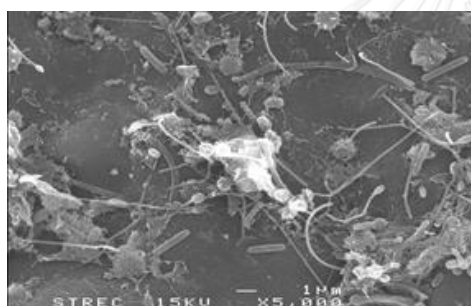
การทดลองช่วงนี้ศึกษาการเกาะติดของจุลินทรีย์บนพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope; SEM) ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4



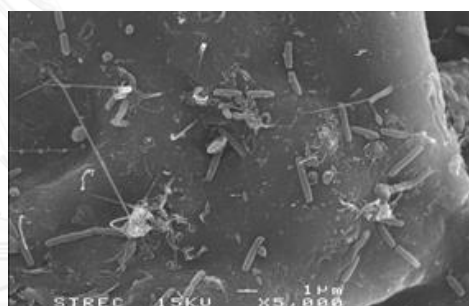
3 เดือน (x1,000 เท่า)



6 เดือน (x1,000 เท่า)



3 เดือน (x5,000 เท่า)



6 เดือน (x5,000 เท่า)

รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนแสดงจุลินทรีย์บนพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน (กำลังขยาย 1,000 และ 5,000 เท่า)

จากการตรวจสอบพบว่าตัวกลางพลาสติกชนิด BCN-012 ภายหลังจากการใช้งานในถังพลาสติกที่บรรจุแอมโมเนียมคลอไรด์เป็นระยะเวลา 3 และ 6 เดือน เกิดการเกาะติดของชั้นฟิล์มชีวภาพเป็นชั้นบางๆ ซึ่งไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ในทางปฏิบัติจึงไม่สามารถใช้การประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพด้วยสายตาได้ จึงต้องพิจารณาจากประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียรวมเป็นหลัก ทั้งนี้ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นว่าตัวกรองชีวภาพไนทริไฟเคชันที่ผ่านการบ่มเชื้อ 3 เดือนจะมีความหนาแน่นของกลุ่มจุลินทรีย์ไม่แตกต่างกับตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 6 เดือน

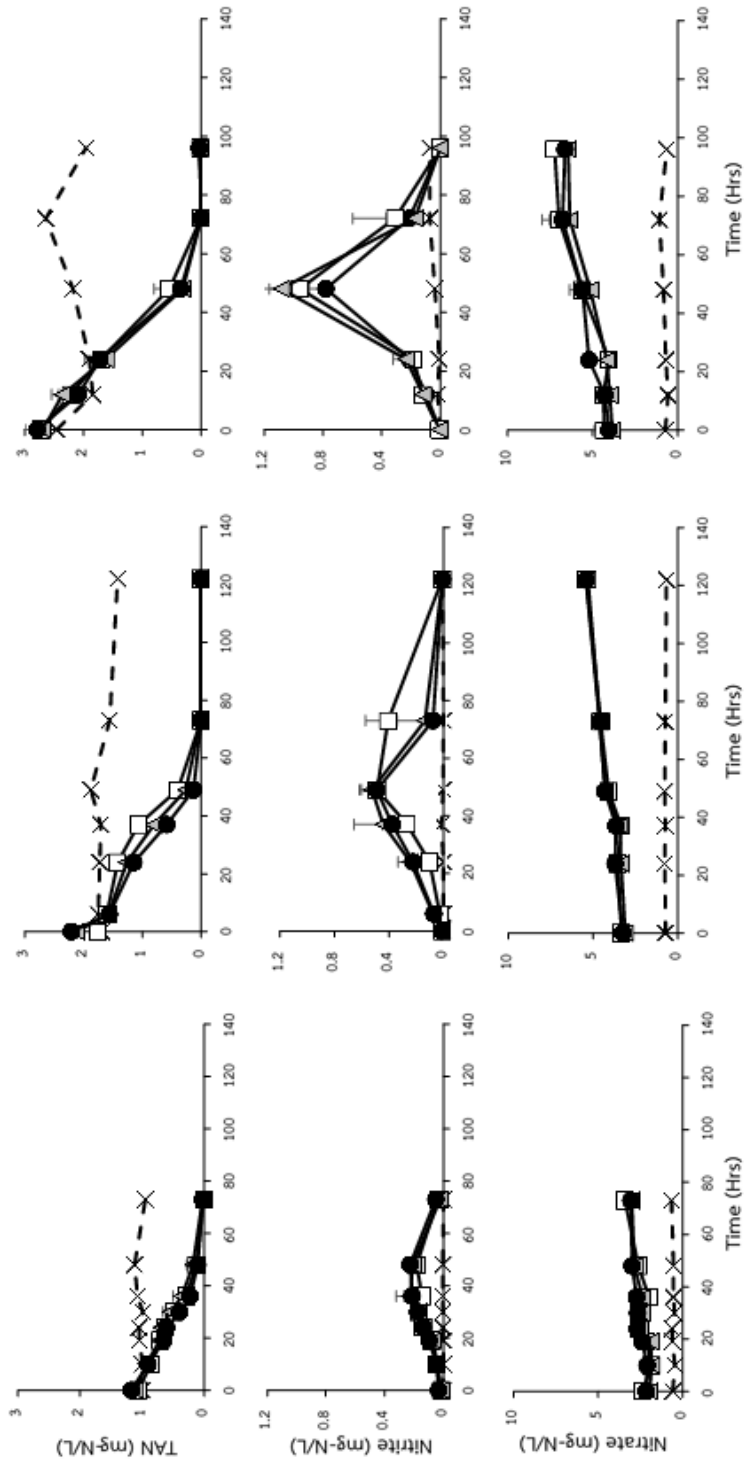
4.2 ประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์

การทดลองนี้ประกอบด้วย 3 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดการทดลองที่ 1 เป็นระบบตัวกลางจมตัว (ตัวกรองชีวภาพถูกยึดอยู่กับที่และจมอยู่ในน้ำ) ชุดการทดลองที่ 2 เป็นระบบตัวกลางเคลื่อนที่ (ตัวกรองชีวภาพเคลื่อนที่ตามการไหลของน้ำ) และชุดการทดลองที่ 3 เป็นระบบโปรยกรอง (ตัวกรองชีวภาพถูกยึดอยู่กับที่และมีการปล่อยน้ำแบบฟุ้งกระจายเพื่อให้สัมผัสกับวัสดุตัวกรอง) ซึ่งแต่ละชุดการทดลองจะบรรจุตัวกรองชีวภาพชนิด BCN-012 ปริมาตร 6 ล.ลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ซึ่งติดตั้งเชื่อมต่อกับบ่อเลี้ยงปลาที่มีปริมาตรรวม 250 ล. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ เก็บตัวอย่างน้ำเพื่อตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวม เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์และตัวกรองชีวภาพ

ผลการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนบริเวณท่อน้ำออกของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ และภายในบ่อเลี้ยงปลาแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ไนโตรเจนบริเวณ 2 จุดเก็บตัวอย่าง คือ บริเวณบ่อปลา และท่อน้ำออกจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพ มีค่าไม่แตกต่างกันในแต่ละชุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่ามวลน้ำในแต่ละชุดการทดลองมีการกวนผสมและหมุนเวียนระหว่างบ่อเลี้ยงปลา ถังตกตะกอน และถังปฏิกรณ์ชีวภาพอย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ชุดทดลองที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์และตัวกรองชีวภาพยังสามารถบำบัดแอมโมเนียรวมผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ โดยถังปฏิกรณ์ชีวภาพทั้ง 3 รูปแบบสามารถบำบัดแอมโมเนียรวมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. หมดภายในเวลา 73, 73 และ 72 ชม. ตามลำดับ จากกราฟการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนบริเวณท่อน้ำออกของถังปฏิกรณ์ชีวภาพระหว่างการทดลองที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ดังรูปที่ 4.5 (ก) พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดไนตริฟิเคชันของแต่ละระบบมีค่าไม่แตกต่างกัน นั่นคือภายในเวลา 48 ชม. ความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมในระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง มีค่าลดลงต่ำกว่า 0.2 มก.ไนโตรเจน/ล. ในทุกชุดการทดลอง

ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงไนไตรต์ระหว่างกระบวนการไนทริฟิเคชันพบว่า ความเข้มข้นของไนไตรต์ที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้น นั่นคือที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. พบการสะสมตัวของไนไตรต์สูงสุดในระบบตัวกลางเคลื่อนที่ที่เวลา 36 ชม. เท่ากับ 0.23 ± 0.10 มก.ไนโตรเจน/ล. ในขณะที่ระบบตัวกลางจมตัว และระบบโปรยกรองพบการสะสมตัวของไนไตรต์สูงสุดที่เวลา 48 ชม. เท่ากับ 0.18 ± 0.04 และ 0.23 ± 0.02 ชม. ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเป็น 2 มก.ไนโตรเจน/ล. พบการสะสมตัวของไนไตรต์ในระบบสูงขึ้น โดยมีความเข้มข้นสูงสุดใกล้เคียงกันที่เวลา 49 ชม. เท่ากับ 0.49 ± 0.11 , 0.53 ± 0.09 และ 0.49 ± 0.06 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ในช่วงโม่งสุดท้ายของการทดลอง นั่นคือถึงปฏิกรณ์ชีวภาพทั้ง 3 ระบบมีความสามารถในการบำบัดไนไตรต์ผ่านกระบวนการไนเตรเตชัน (Nitrataion) ได้อย่างสมบูรณ์ ดังจะเห็นได้จากการลดลงของไนไตรต์และการเพิ่มขึ้นของไนเตรตอย่างต่อเนื่อง ซึ่งความเข้มข้นของไนเตรตที่เพิ่มขึ้นในช่วงโม่งสุดท้ายของการทดลองเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเช่นกัน นั่นคือปริมาณไนเตรตคงเหลือที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง มีค่าเท่ากับ 3.36 ± 0.07 , 3.37 ± 0.23 และ 3.40 ± 0.21 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ในขณะที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. พบไนเตรตคงเหลือในปริมาณที่สูงขึ้นเท่ากับ 5.39 ± 0.19 , 5.28 ± 0.14 และ 5.40 ± 0.25 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ขณะที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้น 3 มก.ไนโตรเจน/ล. พบความเข้มข้นไนเตรตสูงสุดเท่ากับ 7.26 ± 0.33 , 6.46 ± 1.05 และ 6.64 ± 0.69 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่าระบบโปรยกรองมีแนวโน้มที่จะบำบัดแอมโมเนียรวมและลดการสะสมตัวของไนไตรต์ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไนทริฟิเคชันได้ดีกว่าระบบอื่น และเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพพบว่า ปริมาณแอมโมเนียรวม ไนไตรต์ และไนเตรต มีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีกระบวนการบำบัดไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นภายในบ่อควบคุม



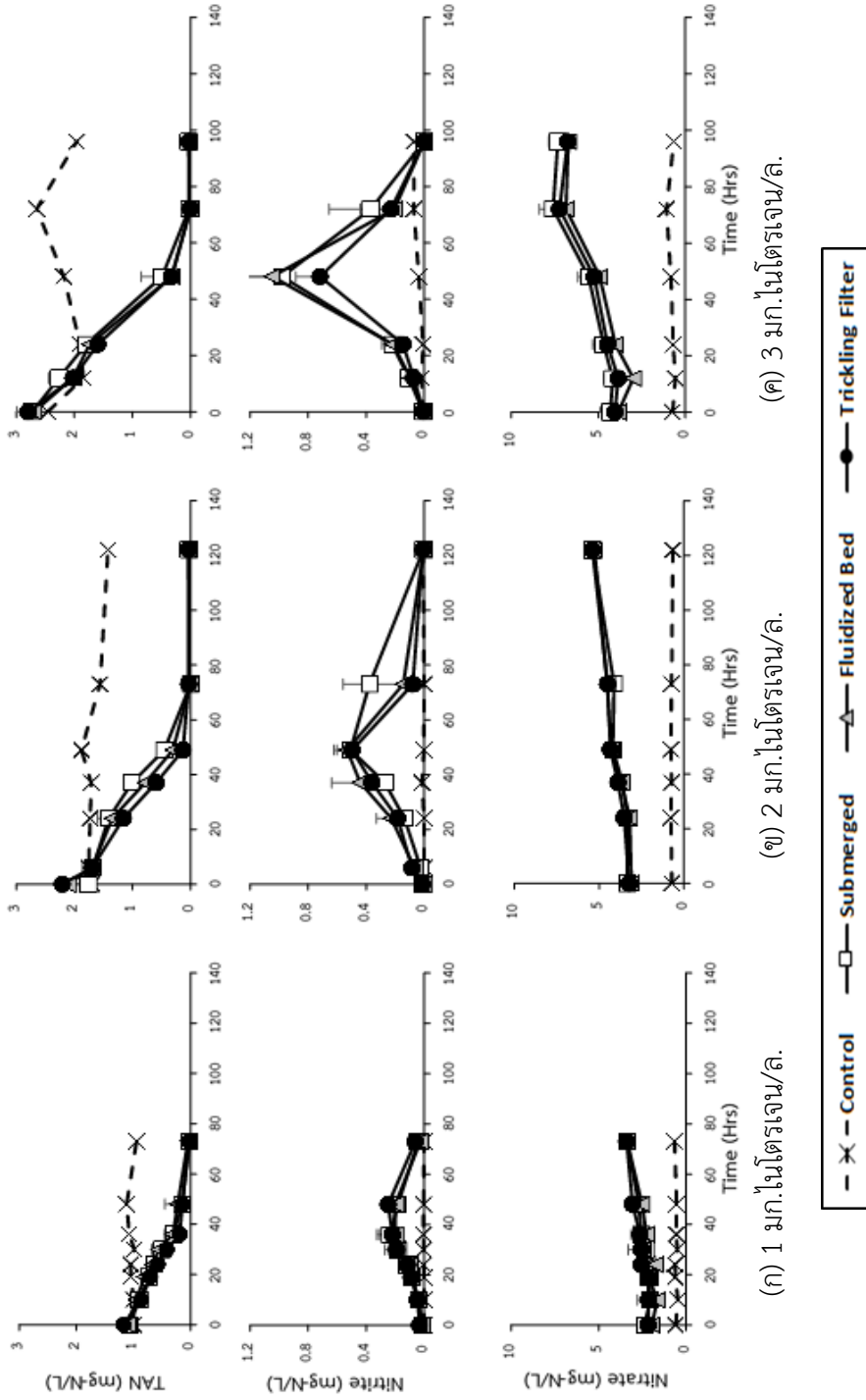
(ก) 1 มก.ไนโตรเจน/ล.

(ข) 2 มก.ไนโตรเจน/ล.

(ค) 3 มก.ไนโตรเจน/ล.



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ไนไตรต์ และไนเตรต จากหน้าออกของถังปฏิกรณ์ชีวภาพในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้น เท่ากับ 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล.

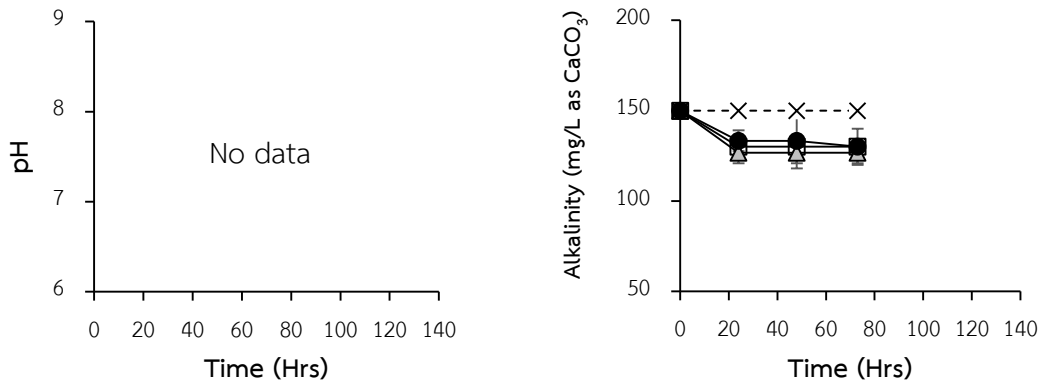


รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ไนไตรต์ และไนเตรตของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาระหว่างการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน จากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้น เท่ากับ 1, 2 และ 3 มก. ไนโตรเจน/ล.

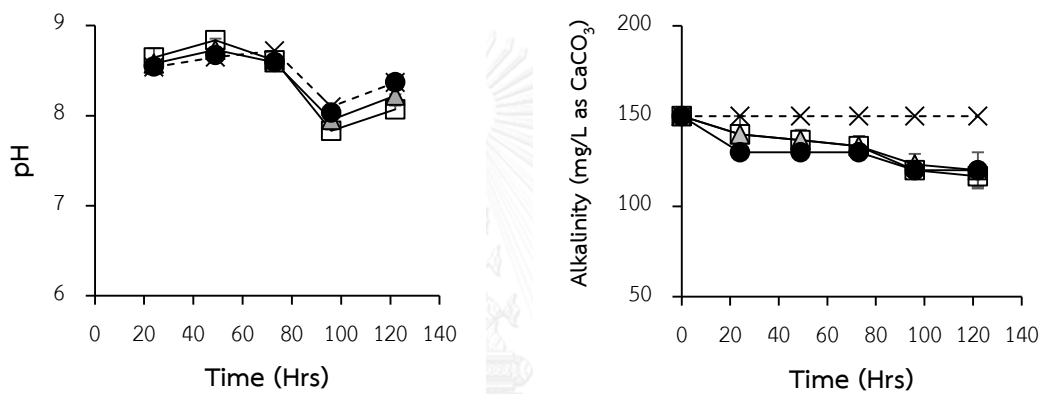
- ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ

ค่าสภาพความเป็นด่างและพีเอชระหว่างการเดินระบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพไนทริฟิเคชันในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. แสดงดังในรูปที่ 4.7 จากการตรวจวัดพบว่า ค่าสภาพต่างเริ่มต้นของทุกชุดการทดลองอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการไนทริฟิเคชัน นั่นคือไม่น้อยกว่า 100 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. (O'Sullivan และคณะ, 1993) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสภาพความเป็นด่างของทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการผลิตกรดที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไนทริฟิเคชัน (Wheaton, 1977) ในขณะที่ชุดควบคุมมีค่าคงที่ตลอดการทดลองเท่ากับ 150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. แสดงให้เห็นว่าภายในชุดควบคุมไม่มีกระบวนการบำบัดเกิดขึ้น จึงไม่มีการใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนในการสร้างเซลล์ของไนทริฟายอิงแบคทีเรีย (Timmons และคณะ, 1994) สำหรับพีเอชของน้ำในระหว่างการทดลองมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 8.43 ± 0.28 , 8.42 ± 0.36 , 8.43 ± 0.28 และ 8.46 ± 0.24 สำหรับชุดควบคุม ชุดทดลองตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และโปรยกรอง ตามลำดับ

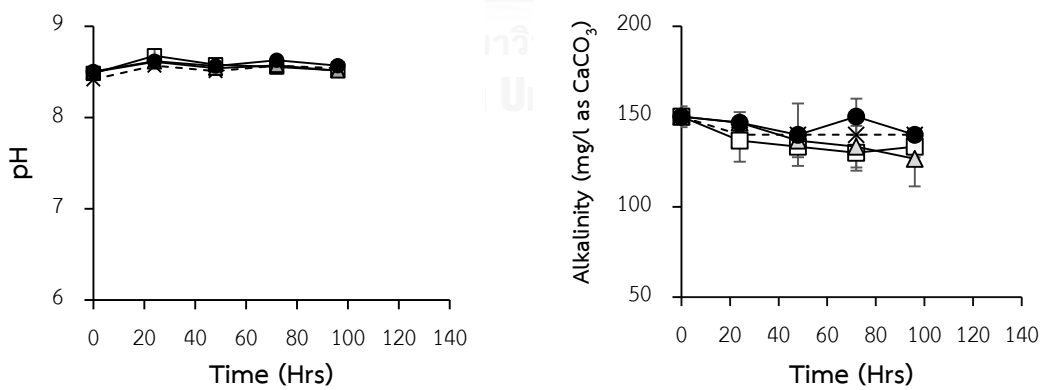
ผลการตรวจวัดค่าออกซิเจนละลายน้ำแสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่ามีค่าออกซิเจนละลายน้ำเฉลี่ยมากกว่า 7 มก.-ออกซิเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามากเกินพอ ทั้งนี้มีรายงานว่าปริมาณออกซิเจนละลายที่เหมาะสมต่อกระบวนการไนทริฟิเคชันตามทฤษฎีควรมีค่ามากกว่า 2 มก./ล. (Timmons และคณะ, 2002) ส่วนการตรวจวัดอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงปลาของชุดควบคุมและชุดทดลอง พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 26.5°C โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกระบวนการไนทริฟิเคชันควรมีค่าระหว่าง $25-30^{\circ}\text{C}$ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)



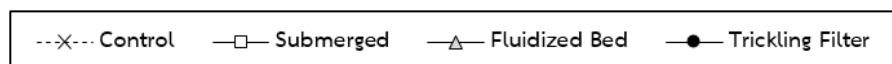
(ก) 1 มก.ไนโตรเจน/ล.



(ข) 2 มก.ไนโตรเจน/ล.



(ค) 3 มก.ไนโตรเจน/ล.



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงพีเอชและค่าสภาพต่างของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาระหว่างการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล.

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำในชุดควบคุมและชุดทดลองในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นแอมโมเนีย รวมเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล.

| พารามิเตอร์ | ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด - ค่าสูงสุด) | | | |
|--|---|----------------------|---------------------------|------------------|
| | ความเข้มข้นแอมโมเนียรวม 2 มก.ไนโตรเจน/ล. | | | |
| | ชุดควบคุม | ระบบตัวกลาง จมตัว | ระบบตัวกลาง เคลื่อนที่ | ระบบ โปรยกรอง |
| ออกซิเจนละลายน้ำ | 7.68 | 7.56±0.39 | 7.81±0.27 | 7.74±0.34 |
| (มก.ออกซิเจน/ล.) | (7.00-8.13) | (7.13-8.15) | (7.52-8.24) | (7.32-8.31) |
| อุณหภูมิ (°ซ) | 27.75 | 28.18±0.90 | 28.08±0.73 | 27.49±0.58 |
| | (26.50-28.70) | (26.70-28.90) | (27.00-28.80) | (26.77-28.17) |
| ความเข้มข้นแอมโมเนียรวม 3 มก.ไนโตรเจน/ล. | | | | |
| ออกซิเจนละลายน้ำ | 7.28 | 7.15±0.43 | 7.26±0.49 | 7.45±0.51 |
| (มก.ออกซิเจน/ล.) | (6.70-7.70) | (6.67-7.53) | (6.63-7.67) | (6.87-7.97) |
| อุณหภูมิ (°ซ) | 29.42 | 29.47±0.28 | 29.26±0.28 | 28.11±0.45 |
| | (29.20-29.70) | (29.07-29.87) | (28.80-29.57) | (27.40-28.47) |

4.3 ประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลา

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบเลี้ยงปลาของถังปฏิกรณ์ชีวภาพทั้ง 3 รูปแบบ นั่นคือ ระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง โดยมีการติดตั้งถังตกตะกอนและถุงตาข่ายกรองตะกอนเพื่อดักเศษอนุภาคจากบ่อเลี้ยงปลาก่อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ เพื่อลดการอุดตันที่จะเกิดขึ้นภายในระบบ เติมน้ำในระบบการทดลองเลี้ยงปลานิลแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 60 วัน ในสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ เปรียบเทียบกับชุดควบคุมซึ่งมีการติดตั้งถังตกตะกอนและถุงตาข่ายกรองตะกอนเช่นกัน แต่ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีดังต่อไปนี้

- การเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน

(1) ชุดควบคุม

การเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากที่น้ำออกของถังตกตะกอนและภายในบ่อเลี้ยงปลาแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าในช่วงแรกของการทดลองเกิดการสะสมตัวของแอมโมเนียรวมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายเศษอาหารที่ตกค้างในระบบซึ่งอยู่ในรูปของโปรตีน และของเสียจากการขับถ่ายของปลาซึ่งอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ไนโตรเจนโดยจุลินทรีย์ตามธรรมชาติผ่านกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) โดยพบความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมสูงสุดบริเวณที่น้ำออกจากถังตกตะกอนเท่ากับ 0.36 มก.ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 2 ของการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก) หลังจากนั้นแอมโมเนียรวมที่เกิดขึ้นถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไนไตรต์ผ่านกระบวนการไนไตรเตชัน (Nitrification) โดยแบคทีเรียกลุ่มออกซิไดซ์แอมโมเนีย (Ammonia oxidizing bacteria; AOB) ดังจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของไนไตรต์ระหว่างวันที่ 0 ถึง 10 ของการทดลอง และพบการสะสมตัวของไนไตรต์ที่ระดับความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 1.02 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยทั่วไปแบคทีเรียกลุ่มออกซิไดซ์ไนไตรต์ (Nitrite oxidizing bacteria; NOB) จะทำหน้าที่หลักในการดึงเอาแหล่งพลังงานจากไนไตรต์มาใช้ในการเจริญเติบโต ซึ่งใช้เวลาประมาณ 10 วัน (Lawson, 1995) จึงทำให้แบคทีเรียกลุ่มนี้เจริญเติบโตไม่ทันและพบการสะสมตัวของไนไตรต์ในระบบในช่วงแรกของการทดลอง ต่อมาเมื่อเดินระบบเป็นระยะเวลาหนึ่งแบคทีเรียกลุ่ม NOB สามารถเพิ่มจำนวนภายในบ่อเลี้ยงปลาตามธรรมชาติ และทำหน้าที่ในการเปลี่ยนไนไตรต์ไปอยู่ในรูปของไนเตรตผ่านกระบวนการไนเตรเตชัน (Nitrification) ดังจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของไนเตรตอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วันที่ 20 จนถึงระดับความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 12.88 มก.ไนโตรเจน/ล. ในวันสุดท้ายของการทดลอง ทั้งนี้การที่บ่อเลี้ยงปลาของชุดควบคุมสามารถบำบัดแอมโมเนียรวมและไนไตรต์ให้อยู่ในรูปไนเตรต โดยที่ไม่มีการสะสมตัวของแอมโมเนียรวมและไนไตรต์หลังจากวันที่ 20 ของการทดลองได้นั้น ยืนยันว่าภายในบ่อเลี้ยงปลาเกิดกระบวนการไนไตรฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากเมื่อเลี้ยงปลาไประยะหนึ่ง สภาพภายในบ่อจะมีความเหมาะสมต่อการบ่มเชื้อกลุ่มไนไตรฟายอิงแบคทีเรียตามธรรมชาติ ทำให้แบคทีเรียกลุ่มนี้เจริญเติบโตแบบแขวนลอย (Suspended growth) รวมถึงยึดเกาะเป็นไบโอฟิล์มบริเวณผนังของบ่อเลี้ยงปลาและทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

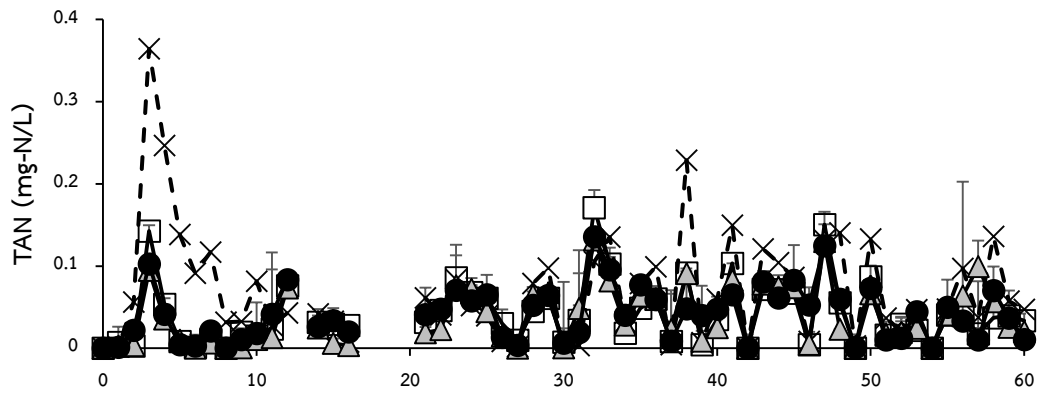
อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาระดับความเข้มข้นของสารอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เป็นอันตรายต่อปลา พบว่าหากมีการสะสมแอมโมเนียรวมเพียง 0.1 มก.ไนโตรเจน/ล. จะส่งผลให้ปลาเกิดความเครียดและเพิ่มโอกาสในการติดเชื้อของปลาได้ (มันสิน ตันจุลเวศม์ และคณะ, 2538) นอกจากนี้ในช่วงที่เกิดการสะสมตัวของไนไตรต์สูงสุดในระบบ (1.02 มก.ไนโตรเจน/ล.) หากเกิดขึ้นเป็นเวลานานจะส่งผลให้องค์ประกอบของฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) ในเลือดของปลาเปลี่ยนเป็นเมทฮีโมโกลบิน (Methemoglobin) ซึ่งมีความสามารถในการรับออกซิเจนต่ำกว่าปกติ หรือเรียกว่าอาการเลือดน้ำตาล (Brown blood disease) ได้ (มันสิน ตันจุลเวศม์ และคณะ, 2538) ดังนั้นเพื่อลดความเสี่ยงในการติดเชื้อของปลาจึงควรมีการปรับสภาพบ่อก่อนการเลี้ยงประมาณ 4 สัปดาห์ โดยการบ่มเชื้อ AOB และ NOB ก่อนล่วงหน้า หรืออาจทำการเลี้ยงปลาที่ความหนาแน่นต่ำเพื่อให้เกิดแบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายอิงตามธรรมชาติแล้วจึงค่อยเพิ่มความหนาแน่นสูงขึ้น อย่างไรก็ตามบ่อเลี้ยงปลาที่ไม่ติดตั้งระบบบำบัดนั้นไม่เหมาะสมกับการเพาะเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นสูงเพื่อการค้า เนื่องจากจุลินทรีย์แบบแขวนลอยตามธรรมชาติภายในบ่ออาจไม่เพียงพอต่อการบำบัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนปริมาณมากที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงปลาในระดับความหนาแน่นสูงเป็นเวลานานได้

(2) ชุดทดลอง

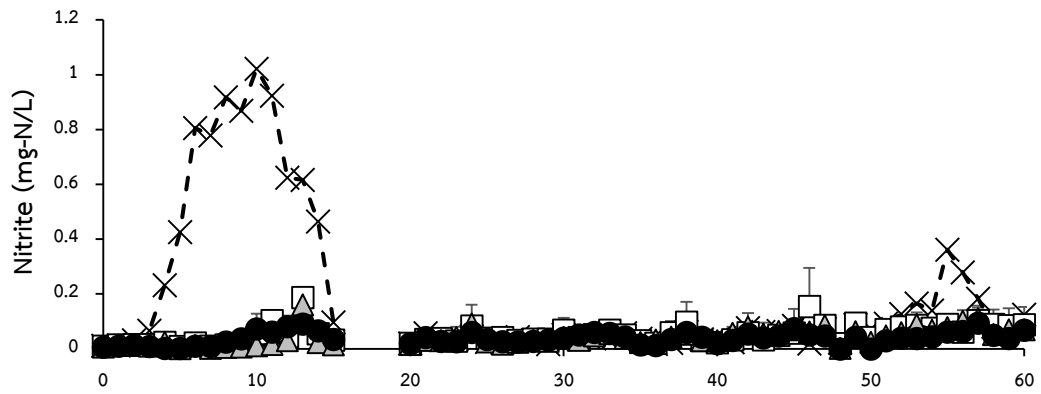
เมื่อพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากท่อน้ำออกของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (รูปที่ 4.8) และภายในบ่อเลี้ยงปลา (รูปที่ 4.9) พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารอนินทรีย์ไนโตรเจนบริเวณ 2 จุดเก็บตัวอย่างมีค่าไม่แตกต่างกันในแต่ละชุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่ามวลน้ำในแต่ละชุดการทดลองมีการกวนผสมและหมุนเวียนระหว่างบ่อเลี้ยงปลา ถึงตกตะกอน และถังปฏิกรณ์ชีวภาพเป็นอย่างดี ซึ่งวัสดุตัวกลางชนิด BCN-012 ที่ผ่านการบ่มเชื้อและบรรจุลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพทั้ง 3 รูปแบบ (ระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง) สามารถบำบัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียรวมผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ โดยมีปริมาณแอมโมเนียรวมคงเหลือจากท่อน้ำออกของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 0.044 ± 0.042 , 0.039 ± 0.043 และ 0.042 ± 0.037 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก) นอกจากนี้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพยังสามารถบำบัดไนไตรต์ที่เกิดขึ้นและสะสมระหว่างกระบวนการไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์เช่นกัน โดยมีปริมาณไนไตรต์เฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 0.053 ± 0.044 , 0.043 ± 0.037 และ 0.039 ± 0.031 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.8 (ข) และเมื่อพิจารณาปริมาณไนเตรต พบว่าไนเตรต

มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วันแรกจนถึงวันสุดท้ายของการทดลอง โดยในแต่ละชุดการทดลองปริมาณไนเทรตมีค่าสูงสุดในวันสุดท้ายของการทดลอง เท่ากับ 15.108 ± 0.877 , 12.883 ± 3.999 และ 17.076 ± 2.222 มก.ไนโตรเจน/ล. ดังรูปที่ 4.9 (ค) อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าปริมาณไนเทรตสะสมมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในการประยุกต์ใช้ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพไนทริฟิเคชันในการเลี้ยงปลาที่ความหนาแน่นสูงอาจเกิดปัญหาการสะสมตัวของไนเทรตในระดับที่เป็นอันตรายต่อปลาได้ โดยในงานวิจัยของ Camargo และคณะ (2005) ระบุว่าความเข้มข้นไนเทรตเท่ากับ 500 มก.ไนโตรเจน/ล. สามารถส่งผลให้ปลาอ่อนแอ เจริญเติบโตช้า และตายได้ในที่สุด ในขณะที่งานวิจัยอื่นแนะนำให้ควรมีการควบคุมปริมาณไนเทรตที่ระดับความเข้มข้นไม่เกิน 50 มก.ไนโตรเจน/ล. เพื่อป้องกันการติดเชื้อที่จะเกิดขึ้นในปลา (กษิติศ หนูทอง, 2551) ดังนั้นในการประยุกต์ใช้ระบบบำบัดในอนาคตอาจจะต้องมีการติดตั้งระบบถึงปฏิกรณ์ชีวภาพดีไนทริฟิเคชันควบคู่กันเพื่อลดอันตรายที่จะเกิดขึ้นจากการสะสมตัวของไนเทรต

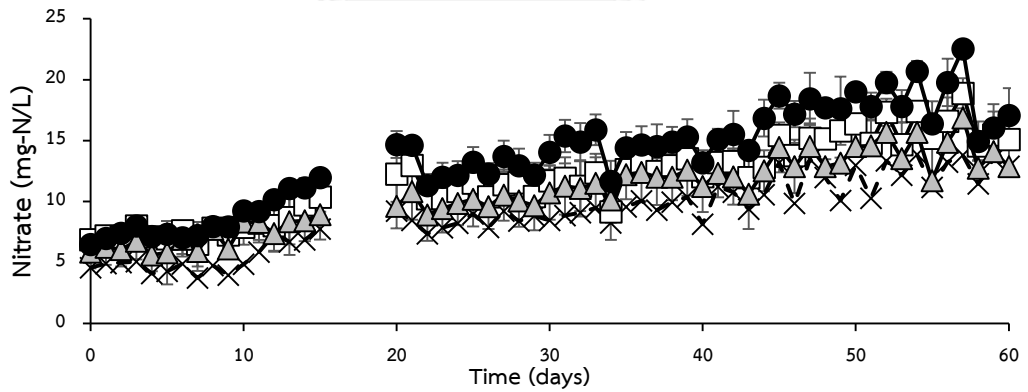
อย่างไรก็ตาม ในช่วง 10 วันแรกของการทดลอง (รูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9) เกิดปัญหาปลาฉลามตายอย่างต่อเนื่องติดต่อกันเกือบทุกวัน จึงได้นำปลาที่ตายไปตรวจหาสาเหตุที่ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าปลาฉลามที่นำมาใช้ในการทดลองติดเชื้อปรสิต โดยโรคนี้นักแพร่ระบาดในปลาฉลาม ทั้งนี้ลักษณะของปรสิตแบ่งเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกคือปลิงใสที่ผิวหนัง (Gyrodactylus) และกลุ่มที่สองคือปลิงใสที่เหงือก (Dactylogyrus) ซึ่งปลาทดลองที่นำไปตรวจโรคพบว่ามีอาการของ Dactylogyrus ที่มีลักษณะเป็นรอยแดงบริเวณเหงือก โดยปลาที่มีปลิงใสเกาะอยู่มักจะแสดงอาการโดยการว่ายน้ำและเอาแผ่นปิดเหงือกถูกับขอบบ่อ โดยทั่วไปกลุ่มของปรสิตปลิงใสไม่ได้ทำให้ปลาตายโดยตรง แต่จะทำให้ปลาที่มีลักษณะความผิดปกติ เช่น เป็นรอยแผลที่เกิดจากการเกาะของปลิงใส ซึ่งจะเพิ่มโอกาสในการติดเชื้อจากเชื้อราและแบคทีเรียชนิดก่อโรค ทำให้ปลาฉลามมีภูมิต้านทานลดลง ติดโรค และตายในที่สุด (กมลพร ภาวภูตานนท์, 2517; Thoney และ Hargis, 1991)



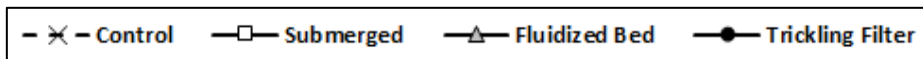
(ก) แอมโมเนียรวม



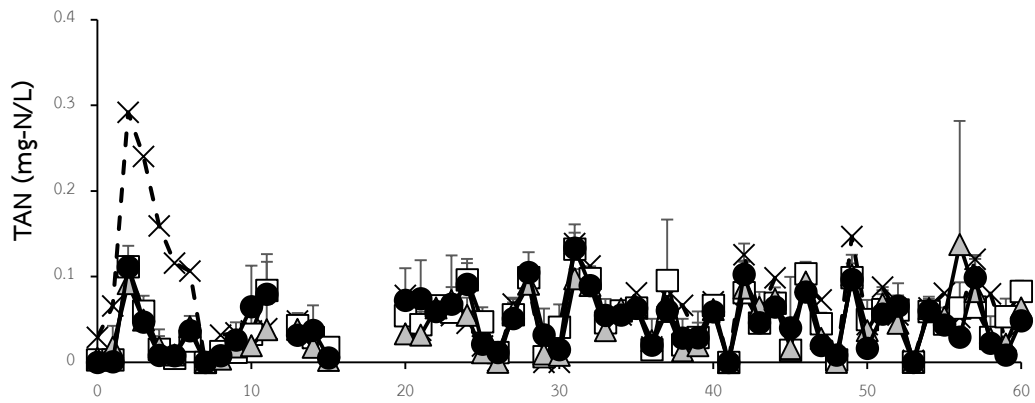
(ข) ไนไตรต์



(ค) ไนเตรต



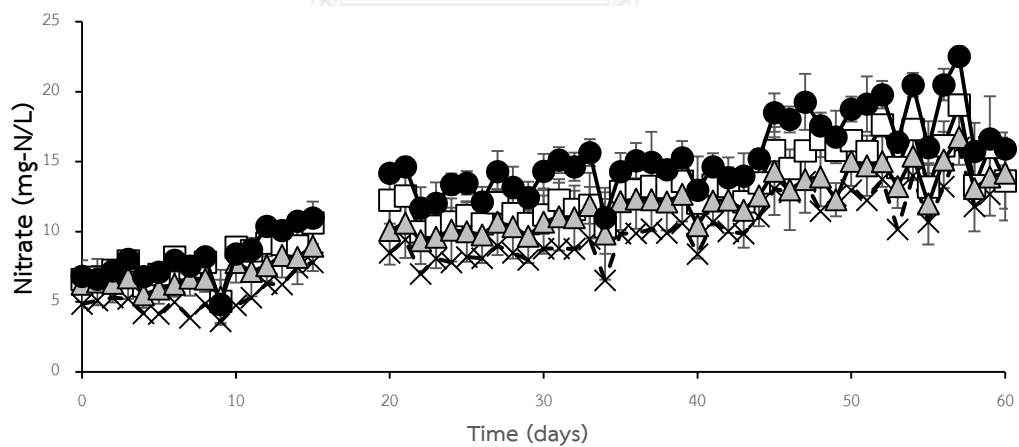
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ไนไตรต์ และไนเตรต จากท่อน้ำออกของชุดควบคุมและถังปฏิกรณ์ชีวภาพในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน



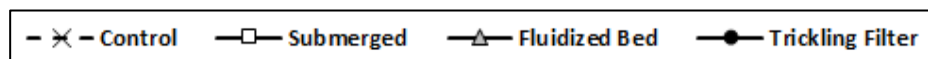
(ก) แอมโมเนียรวม



(ข) ไนไตรต์



(ค) ไนเตรต



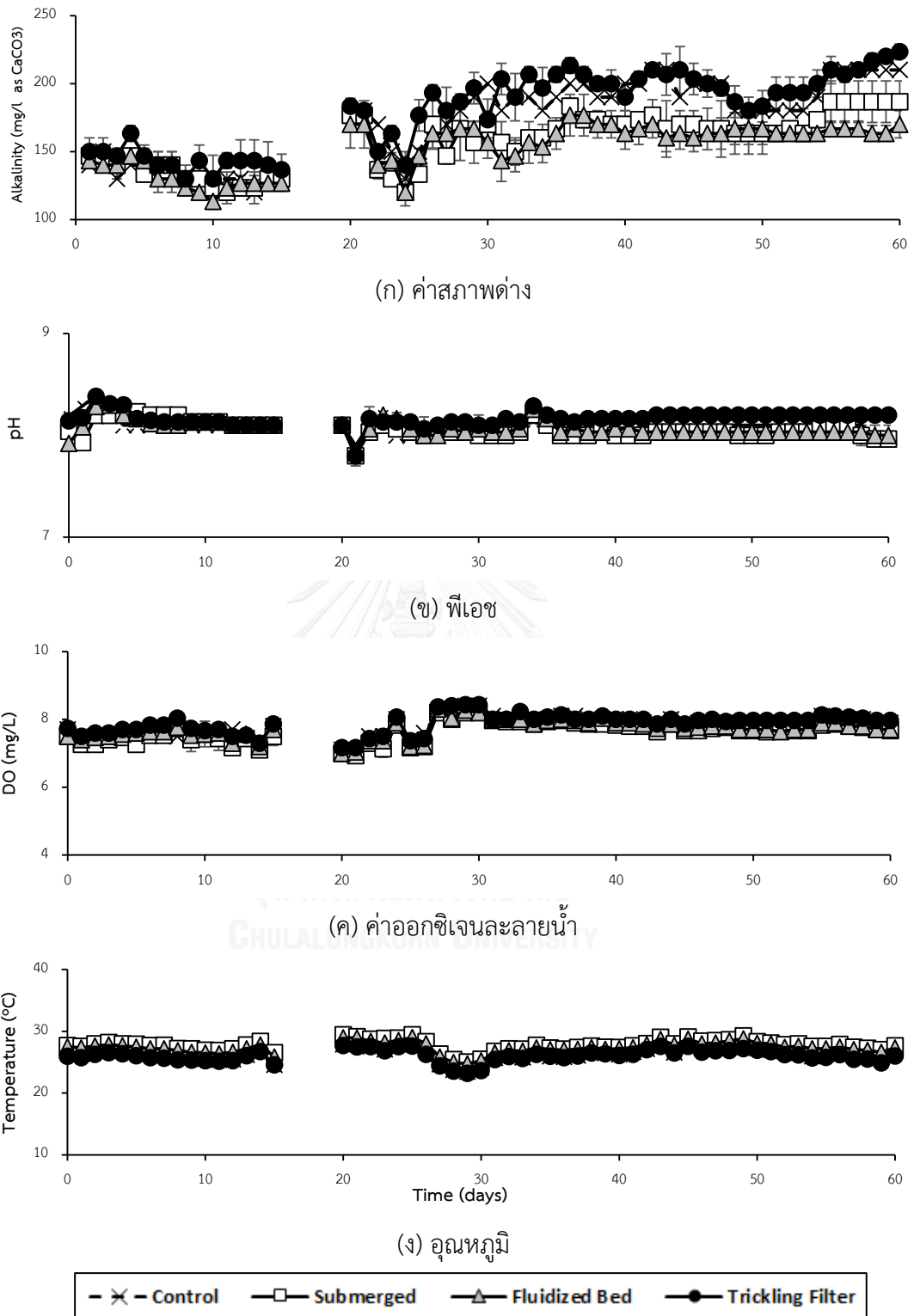
รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ไนไตรต์ และไนเตรตของน้ำในบ่อเลี้ยงปลา ระหว่างการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน

หลังจากพบสาเหตุการตายของปลาแล้ว ในวันที่ 16 ของการทดลองจึงทำการนำปลาในทุกชุด การทดลองออกจากบ่อเนื่องจากเป็นปลาที่นำมาจากฟาร์มชุดเดียวกัน แล้วนำปลาทั้งหมดใส่ถังขนาด ใหญ่ปริมาตร 500 ล. ที่มีการเติมฟอร์มาลินความเข้มข้น 25 มก./ล. (กรมประมง, 2553) แช่ปลาไว้ เป็นเวลา 24 ชม. ทำการเปลี่ยนน้ำแล้วเติมฟอร์มาลินซ้ำลงในน้ำ ทำเช่นนี้ต่อกันเป็นเวลา 3 วัน และ เมื่อครบกำหนดจึงทำการปล่อยปลาลงสู่อบอดทดลองเช่นเดิมในวันที่ 20 ของการทดลอง ซึ่งหลังจากนั้นก็ ไม่พบการตายของปลาเกิดขึ้นในชุดการทดลองอีก

- การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ

ผลการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงปลา ซึ่งได้แก่ ค่าสภาพความเป็น ต่าง พีเอช ปริมาณออกซิเจนละลาย และอุณหภูมิ ตลอดจนการเดินระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพไนทริฟิเคชันในน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ ในบ่อเลี้ยงปลา ซึ่งมีการติดตั้งเครื่องสูบน้ำเพื่อให้เกิดการกวนผสมและหมุนเวียนน้ำในระบบ ระหว่าง บ่อเลี้ยงปลา ถึงตกตะกอน และถังปฏิกรณ์ชีวภาพอย่างสมบูรณ์ โดยในวันแรกของการทดลองจะทำการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อปรับค่าความเป็นต่างให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของ ปลาและการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายอิงเท่ากับ 150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ต่อมา เมื่อเริ่มเดินระบบเป็นระยะเวลาประมาณ 15 วัน พบว่าค่าความเป็นต่างของชุดควบคุมและชุดทดลอง มีการลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังรูปที่ 4.10 (ก) ซึ่งมีสาเหตุมาจากแบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายอิงนำคาร์บอน จากไบคาร์บอเนตมาใช้ในการเจริญเติบโต และการออกซิโดซ์แอมโมเนียผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน โดยค่าความเป็นต่างในวันที่ 15 ของการทดลองในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ ชีวภาพแบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรองมีค่าเท่ากับ 130.00, 130±0.00, 126.67±5.77 และ 136.67±11.55 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ตามลำดับ จากนั้นได้มีการหยุดเดิน ระบบ (ปิดเครื่องเติมอากาศภายในบ่อเลี้ยงปลา แต่ยังไม่เปิดเครื่องสูบน้ำหมุนเวียนน้ำเช่นเดิม) ในช่วง วันที่ 16 ถึง 19 ของการทดลอง เนื่องจากเกิดการติดเชื้อปลิงใสในปลาทดลองตามที่กล่าวไปข้างต้น และ เริ่มเดินระบบอีกครั้งในวันที่ 20 ซึ่งพบว่าในแต่ละชุดการทดลองมีค่าความเป็นต่าง สูงขึ้นเท่ากับ 180.00, 176.67±5.77, 170.00±17.32 และ 183.33±5.77 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปได้ว่าระหว่างที่มีการหยุดเดินระบบอาจเกิดสภาวะการขาดอากาศภายในบ่อตกตะกอนและ บริเวณชั้นตัวกรองชีวภาพ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันขึ้นในระบบ อย่างไรก็ตาม

ตามต่อมาในวันที่ 20 ถึง 24 ของการทดลอง พบการลดลงของค่าความเป็นต่างจากระบบไนทรีฟิเคชันอีกครั้งหนึ่ง โดยค่าความเป็นต่างในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 130.00, 120.00 ± 10.00 , 120.00 ± 0.00 และ 140.00 ± 10.00 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ตามลำดับ หลังจากนั้นค่าความเป็นต่างในแต่ละระบบมีค่าเพิ่มขึ้นและเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอยู่ในช่วงค่อนข้างคงที่ โดยตารางที่ 4.3 แสดงค่าความเป็นต่างเฉลี่ยของแต่ละระบบในวันที่ 30 ถึง 60 ของการทดลอง ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณทางสถิติพบว่า ทุกชุดการทดลองมีค่าสภาพความเป็นต่างแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ทั้งนี้ในวันสุดท้ายของการทดลองพบว่า ระบบโปรยกรองมีความเป็นต่างสูงสุดเท่ากับ 223.33 ± 5.77 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ตามด้วยชุดควบคุมเท่ากับ 210 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. และระบบตัวกลางจมตัวเท่ากับ 186.67 ± 15.28 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ในขณะที่ระบบตัวกลางเคลื่อนที่พบค่าความเป็นต่างต่ำสุดเท่ากับ 170.00 ± 10.00 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ทั้งนี้จะเห็นว่าค่าความเป็นต่างของทุกระบบมีค่าสูงขึ้นกว่าวันแรกของการทดลอง ซึ่งเป็นไปได้ว่าเมื่อเดินระบบเป็นเวลานานอาจเกิดการสะสมตัวของอนุภาคแขวนลอยที่เกิดจากเศษอาหาร ของเสียจากการขับถ่ายของปลา และตะกอนจุลชีพภายในถังกรองดักตะกอนและบริเวณชั้นตัวกรองชีวภาพ จึงทำให้บริเวณดังกล่าวขาดออกซิเจนและเกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน ทำให้ความเป็นต่างเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระบบตัวกลางเคลื่อนที่มีการติดตั้งปั๊มเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของตัวกรองภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ซึ่งช่วยลดโอกาสในการเกิดบริเวณที่ขาดอากาศ หรือ Dead zone ได้มากกว่าระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพประเภทอื่น อย่างไรก็ตามค่าสภาพความเป็นต่างภายในบ่อเลี้ยงปลาของแต่ละชุดการทดลองยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลา นั่นคือ มีค่าอยู่ระหว่าง 50 ถึง 300 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. (Timmons และคณะ, 2002)



รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต่าง พีเอช ค่าออกซิเจนละลายน้ำ และอุณหภูมิของน้ำ ในบ่อเลี้ยงปลาระหว่างการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริง ในระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน

ตารางที่ 4.3 ค่าสภาพความเป็นต่างระหว่างการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน โดยตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

| ระบบการทดลอง | สภาพต่างเฉลี่ย 60 วัน (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.) | สภาพต่างเฉลี่ยวันที่ 30-60 (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.) | สภาพต่างวันที่ 60 (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.) |
|-----------------------|--|---|--|
| ชุดควบคุม | 172.63±29.91 | 195.16±11.51 ^c | 210 |
| ระบบตัวกลางจมตัว | 156.78±22.14 | 170.97±13.91 ^b | 186.67±15.28 |
| ระบบตัวกลางเคลื่อนที่ | 152.75±19.31 | 163.66±11.01 ^a | 170±10 |
| ระบบโปรยกรอง | 179.88±29.57 | 201.08±14.02 ^d | 223.33±5.77 |

สำหรับการเปลี่ยนแปลงพีเอชตลอดการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ข) พบว่าในช่วงแรกค่าพีเอชในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพทั้ง 3 รูปแบบ มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการปรับค่าสภาพความต่างด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตในวันแรกของการทดลอง ต่อมาค่าพีเอชมีการลดลงอย่างต่อเนื่องในวันที่ 2 ถึง 5 ของการทดลอง เนื่องจากการสร้างกรดระหว่างกระบวนการไนทริฟิเคชัน ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของค่าสภาพความเป็นต่างในรูปที่ 4.10 (ก) จากนั้นพีเอชในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำของแต่ละชุดการทดลองมีค่าค่อนข้างคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลา นั่นคือระหว่าง 7.2 ถึง 8.3 (อุตม เรืองนพคุณ, 2550)

ตารางที่ 4.4 ค่าพีเอชระหว่างการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน

| ระบบการทดลอง | ค่าพีเอชเฉลี่ย 60 วัน | ค่าพีเอชต่ำสุด-สูงสุด |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| ชุดควบคุม | 8.09±0.08 | 7.9–8.39 |
| ระบบตัวกลางจมตัว | 8.06±0.09 | 7.8–8.24 |
| ระบบตัวกลางเคลื่อนที่ | 8.07±0.09 | 7.8–8.32 |
| ระบบโปรยกรอง | 8.16±0.08 | 7.8–8.40 |

ค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำตลอดการเดินระบบเป็นเวลา 60 วัน แสดงดังในรูปที่ 4.10 (ค) โดยค่าปริมาณออกซิเจนละลายที่เหมาะสมในการเกิดไนตริฟิเคชันตามทฤษฎีควรมากกว่า 2 มก./ล. (Timmons และคณะ, 2002) ในขณะที่ค่าปริมาณออกซิเจนละลายที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลาชนิดครีจะมากกว่า 5 มก./ล. (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536) ซึ่งผลการวิเคราะห์ค่าออกซิเจนละลายในบ่อเลี้ยงปลาของชุดควบคุมและชุดการทดลองที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพทั้ง 3 รูปแบบ (ระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง) มีค่าเฉลี่ยตลอดการเดินระบบเท่ากับ 7.81 ± 0.29 , 7.64 ± 0.32 , 7.71 ± 0.28 และ 7.87 ± 0.3 มก./ล. ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.5 ซึ่งถือว่ามากเกินไปพอต่อการเลี้ยงปลาและการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 4.5 ค่าออกซิเจนละลายน้ำระหว่างการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน

| ระบบการทดลอง | ค่าออกซิเจนละลายเฉลี่ย 60 วัน (มก./ล.) | ค่าออกซิเจนละลายต่ำสุด-สูงสุด (มก./ล.) |
|-----------------------|---|---|
| ชุดควบคุม | 7.81 ± 0.29 | 7.0–8.4 |
| ระบบตัวกลางจมตัว | 7.64 ± 0.32 | 6.8–8.3 |
| ระบบตัวกลางเคลื่อนที่ | 7.71 ± 0.28 | 6.9–8.3 |
| ระบบโปรยกรอง | 7.87 ± 0.30 | 7.0–8.5 |

การเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงปลาตลอดการทดลอง แสดงดังในรูปที่ 4.10 (ง) เนื่องจากบ่อเลี้ยงปลาที่ทำการทดลองเป็นบ่อที่ตั้งอยู่นอกอาคารโดยมีหลังคาคลุมเพื่อป้องกันน้ำฝน อุณหภูมิของน้ำในบ่อจึงมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงไม่คงที่ตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ โดยจะเห็นว่าทุกชุดการทดลองมีอุณหภูมิในแต่ละวันเฉลี่ยใกล้เคียงกัน แต่สำหรับบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบโปรยกรองพบว่า อุณหภูมิในบ่อมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 26.09 ± 1 °C (ตารางที่ 4.6) ซึ่งต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นเล็กน้อย โดยอาจมีสาเหตุมาจากระบบโปรยกรองมีการติดตั้งพัดลมบริเวณด้านบนของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเพื่อช่วยในการกระจายน้ำให้เกิดการสัมผัสกับวัสดุตัวกลางได้อย่างทั่วถึง ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าการเป่าอากาศในถังบำบัดอาจมีผลทำให้อุณหภูมิของน้ำที่เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพมีค่าลดลงได้บ้าง อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของทุกชุดการทดลองยังอยู่ในช่วงที่

เหมาะต่อการเลี้ยงปลาชนิด นั้นคือระหว่าง 19 ถึง 28 °ซ (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536) และ
เหมาะสมต่อการเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชัน นั้นคือระหว่าง 25 ถึง 30 °ซ

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิระหว่างการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบ
การเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน

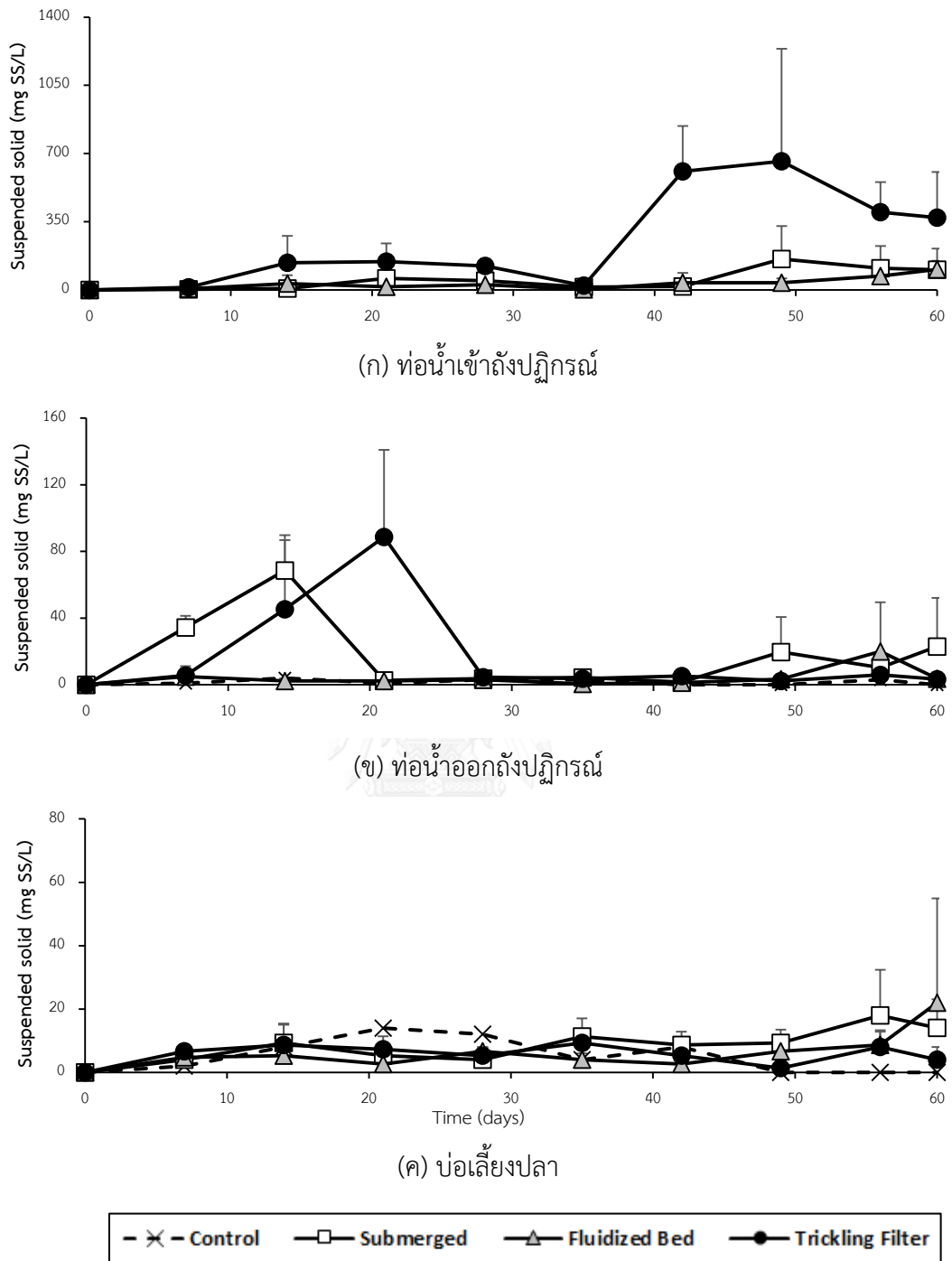
| ระบบการทดลอง | อุณหภูมิของน้ำเฉลี่ย 60 วัน (°ซ) | อุณหภูมิของน้ำต่ำสุด-สูงสุด (°ซ) |
|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| ชุดควบคุม | 26.51±1.00 | 23.5–28.0 |
| ระบบตัวกลางจมตัว | 27.73±1.01 | 24.8–30.1 |
| ระบบตัวกลางเคลื่อนที่ | 27.35±0.93 | 24.6–29.2 |
| ระบบโปรยกรอง | 26.09±1.00 | 23.1–28.0 |

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอยจากท่อน้ำเข้าถึงปฏิกรณ์ ท่อน้ำออก
จากถึงปฏิกรณ์ และในบ่อเลี้ยงปลาของชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการติดตั้งถึงปฏิกรณ์ชีวภาพทั้ง 3
รูปแบบ แสดงดังในรูปที่ 4.11 พบว่าตัวอย่างจากท่อน้ำเข้าถึงปฏิกรณ์ในระบบโปรยกรองมีปริมาณ
ตะกอนแขวนลอยสูงขึ้นหลังจากวันที่ 7 ของการทดลอง สาเหตุเนื่องจากการสะสมตัวของตะกอนชีวภาพ
จากเศษอาหารตกค้างและของเสียจากการขับถ่ายของปลาภายในบ่อตกตะกอน ซึ่งเมื่อเดินระบบเป็น
เวลานานอาจเกิดการหลุดรอดของตะกอนจากถักตะกอนเข้าสู่ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพ โดยเฉพาะในช่วง
วันที่ 42 ถึง 49 ของการทดลอง จึงพบปริมาณตะกอนแขวนลอยบริเวณท่อน้ำเข้าถึงปฏิกรณ์สูงกว่าวัน
อื่นๆ โดยระบบโปรยกรองพบการหลุดรอดของเศษตะกอนสูงสุดถึง 660.00 ± 577.16 มก.ของแข็ง
แขวนลอย/ล. ดังรูปที่ 4.11 (ก) ส่วนระบบตัวกลางจมตัวและตัวกลางเคลื่อนที่พบปริมาณตะกอน
แขวนลอยบริเวณท่อน้ำเข้าสู่ถึงปฏิกรณ์ต่ำกว่าระบบโปรยกรอง โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการ
เดินระบบ และมีค่าสูงสุดในวันที่ 49 และ 60 ของการทดลองเท่ากับ 159.33 ± 169.12 และ
 106.00 ± 106.71 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. ตามลำดับ

สำหรับปริมาณตะกอนแขวนลอยจากท่อน้ำออกจากถึงปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 4.11 (ข) พบว่า
ระบบตัวกลางจมตัวและระบบโปรยกรองมีปริมาณตะกอนชีวภาพปะปนออกมาทางท่อน้ำออกจากถึง
ปฏิกรณ์ในช่วงแรกของการทดลอง โดยในระบบตัวกลางจมตัวพบปริมาณตะกอนเพิ่มขึ้นจากวันที่ 0 จน
มีค่าสูงสุดในวันที่ 14 ของการทดลองเท่ากับ 68.67 ± 21.08 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. และในระบบโปรย

กรองพบปริมาณตะกอนเพิ่มขึ้นจากวันที่ 7 จนมีค่าสูงสุดในวันที่ 21 ของการทดลองเท่ากับ 88.67 ± 52.32 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. จากนั้นปริมาณตะกอนแขวนลอยบริเวณท่อน้ำออกของทั้ง 2 ระบบมีค่าลดลงและเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงไม่เกิน 25 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเดินระบบไปเป็นระยะเวลาหนึ่ง ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพไนทริฟิเคชันจะมีความสามารถในการดักตะกอนบางส่วนที่หลุดรอดผ่านถังตกตะกอนออกมาได้มากขึ้น โดยเฉพาะในระบบโปรยกรองซึ่งในวันที่ 49 ของการทดลองมีปริมาณตะกอนเข้าสู่ระบบสูงถึง 660.00 ± 577.16 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. แต่กลับพบปริมาณตะกอนบริเวณท่อน้ำออกเพียง 2.33 ± 2.31 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. ซึ่งปริมาณตะกอนส่วนใหญ่ที่ถูกกักเก็บอยู่ระหว่างชั้นของวัสดุตัวกลางในถังปฏิกรณ์ชีวภาพอาจทำให้ภายในระบบเกิดสภาวะขาดอากาศและเป็นสาเหตุในการเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน ซึ่งสอดคล้องกับค่าสภาพต่างที่เพิ่มขึ้นในระบบโปรยกรองที่มีค่าสูงสุดถึง 223.33 ± 5.77 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ในช่วงสุดท้ายของการทดลอง ดังรูปที่ 4.10 (ก)

ส่วนปริมาณตะกอนแขวนลอยในบ่อเลี้ยงปลาของชุดควบคุมและชุดทดลอง พบว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าบริเวณอื่น (เมื่อเปรียบเทียบกับท่อน้ำเข้าและออกจากถังปฏิกรณ์) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ค) เนื่องจากตะกอนชีวภาพที่เกิดจากเศษอาหารและของเสียจากการขับถ่ายของปลาจะถูกสูบผ่านระบบกาลักน้ำและเก็บกักไว้ในถังตกตะกอน ซึ่งมีการถอดและนำไปทำความสะอาดทุก 6 วัน ภายหลังจากเดินระบบเป็นเวลา 1 เดือน นอกจากนี้ตะกอนบางส่วนที่หลุดรอดผ่านถังตกตะกอนยังถูกเก็บสะสมไว้ในชั้นของตัวกรองชีวภาพภายในถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน โดยปริมาณตะกอนแขวนลอยในบ่อเลี้ยงปลาของทุกชุดการทดลองมีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลา นั่นคือต่ำกว่า 80 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. (Timmons และคณะ, 2002)



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอยจากท่อน้ำเข้า ท่อน้ำออก และบ่อเลี้ยงปลา ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน

- การประเมินประสิทธิภาพของระบบการเลี้ยงปลา

ระบบเลี้ยงปลาที่ทำการศึกษาแบ่งออกเป็นชุดควบคุมที่ทำการเลี้ยงปลานิลโดยไม่มีถังปฏิกรณ์ชีวภาพกับชุดทดลองที่ทำการเลี้ยงปลานิลและติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพรูปแบบต่างๆ ได้แก่ ระบบตัวกลางจมตัว (จำนวน 3 ชุด) ระบบตัวกลางเคลื่อนที่ (จำนวน 3 ชุด) และระบบโปรยกรอง (จำนวน 3 ชุด) โดยเลี้ยงปลานิลบ่อละ 5-8 ตัว ที่มีน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 20.84 ± 3.40 , 17.53 ± 3.01 , 19.26 ± 3.54 และ 21.33 ± 3.43 ก./ตัว ตามลำดับ และความยาวเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 10.67 ± 0.42 , 10.05 ± 0.46 , 10.28 ± 0.55 และ 10.78 ± 0.55 ซม./ตัว หรือคิดเป็นความหนาแน่นเริ่มต้นเท่ากับ 0.50, 0.49 ± 0.03 , 0.49 ± 0.04 และ 0.48 ± 0.06 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ (คิดปริมาตรน้ำทั้งระบบของการเลี้ยงปลา คือ 250 ล.) โดยมีการให้อาหารเม็ดสำเร็จรูปวันละ 2 มื้อ ในอัตราร้อยละ 3 ของน้ำหนักปลาทั้งหมดต่อวัน ตลอดการทดลองเป็นระยะเวลา 60 วัน โดยจะทำการปรับปริมาณอาหารตามการเจริญเติบโตของปลาที่เพิ่มขึ้น ลดลง หรือตายลง ทุกๆ 20 วัน พร้อมกับการเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของปลาด้วยการชั่งน้ำหนักและวัดความยาวปลา

ผลการตรวจวัดการเจริญเติบโตของปลาในชุดทดลองต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 – 4.11 พบว่า ในช่วง 1-4 วันแรกจะมีการตายของปลานิลจำนวน 1-2 ตัวต่อวันในแต่ละบ่อ เนื่องจากปลาปรับตัวในสภาวะแวดล้อมใหม่ไม่ทัน และปลาบางตัวที่ตายจะมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับปลาตัวอื่นๆ ในบ่อโดยปลาจะมีลักษณะเป็นแผลบริเวณผิวหนังซึ่งนี้อาจเป็นไปได้ว่าถูกปลาที่มีขนาดใหญ่กว่ากัด ซึ่งหากพบปลาตายจะมีการนำปลาใหม่เข้าทดแทน เพื่อรักษาความหนาแน่นของปลาไว้ไม่ให้ลดลง สำหรับระบบโปรยกรอง พบการตายของปลาอย่างต่อเนื่องจากการติดโรคปลิงใส แม้ว่าน้ำในบ่อจะมีคุณภาพน้ำเหมาะสมต่อการเลี้ยงปลา โดยสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรเจน และไนเตรตให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตราย ในวันที่ 16 ของการเลี้ยงปลาจะนำปลาทุกตัวของทุกบ่อออกมาเพื่อชั่งน้ำหนักและวัดความยาวปลา ได้ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักปลาในวันที่ 16 ของการเลี้ยงปลาในชุดควบคุมระบบตัวกลางจมตัว ระบบตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง เท่ากับ 25.66 ± 5.13 , 22.24 ± 6.51 , 23.33 ± 6.14 และ 24.56 ± 4.07 ก./ตัว ตามลำดับ ส่วนค่าเฉลี่ยความยาวปลาในวันเดียวกันวัดได้เท่ากับ 11.22 ± 0.71 , 10.70 ± 0.98 , 10.76 ± 0.74 และ 11.19 ± 1.16 ซม./ตัว ตามลำดับ พบว่าอัตราการเจริญเติบโตของปลาในวันดังกล่าวในบ่อเลี้ยงของระบบโปรยกรองจะต่ำกว่าชุดควบคุม ระบบ

ตัวกลางจมตัว และระบบตัวกลางเคลื่อนที่เนื่องจากปลาเป็นโรค ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับจำนวนปลาที่ตายมากกว่าชุดควบคุมและชุดการทดลองอื่นๆ

ภายหลังที่พบว่าปลาเป็นโรคจึงทำให้วันที่ 16 ต้องนำปลาออกไปปรับสภาพในถังน้ำที่เติมฟอร์มาลินเพื่อฆ่าเชื้อโรคเป็นเวลา 3 วัน แล้วใส่กลับมาในชุดการทดลองในวันที่ 20 ของการทดลอง บ่อละ 5-7 ตัว โดยน้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้นของปลาในวันที่ 20 เท่ากับ 21.61 ± 2.34 , 20.78 ± 4.57 , 23.04 ± 4.86 และ 22.78 ± 6.35 ก./ตัว ตามลำดับ และความยาวเฉลี่ยเริ่มต้น เท่ากับ 10.87 ± 0.37 , 10.74 ± 0.7 , 11.14 ± 0.69 และ 11.01 ± 0.86 ซม./ตัว ตามลำดับ โดยในวันสุดท้ายของการเลี้ยงปลาชุดควบคุม ระบบตัวกลางจมตัว ระบบตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในวันที่ 60 จะมีอัตราการเจริญเติบโตเท่ากับ 0.52 , 0.39 ± 0.02 , 0.47 ± 0.13 และ 0.51 ± 0.04 ก./วัน ตามลำดับ อัตราการแลกเนื้อเท่ากับ 1.73 , 1.99 ± 0.13 , 1.92 ± 0.39 และ 1.67 ± 0.15 ตามลำดับ โดยมีความหนาแน่นสุดท้ายเท่ากับ 0.95 , 0.90 ± 0.02 , 0.92 ± 0.10 และ 0.96 ± 0.04 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ โดยที่ข้อมูลการเจริญเติบโตของปลาจะแสดงดังตารางที่ 4.8-4.11

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบการเลี้ยงปลาของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นที่เลี้ยงปลานิลด้วยระบบปิดภายใต้สภาวะจำลองของระบบบ่อไร่นาภายในโรงเรือน ตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าปลานิลในงานวิจัยนี้มีอัตราการเจริญเติบโตปกติ แต่พบจำนวนปลาตายสูง โดยการตายของปลานิลเป็นผลมาจากการติดโรค ทั้งนี้อัตราการเจริญเติบโตของปลานิลขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ ส่วนประกอบและปริมาณของอาหารที่ให้ในแต่ละวัน คุณภาพน้ำ ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของปลานิลภายใต้สภาวะจำลองของระบบบ่อไร้ดินใน
โรงเรียนของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น

| พารามิเตอร์ | งานวิจัยอ้างอิง | | | งานวิจัยนี้ |
|---|-----------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------|
| | รัชฎาพร ไชยศรี (2556) | เศรษฐศักดิ์ ติวะนนทกร (2556) | เพ็ญพิชา สท้านวัตร (2557) | |
| - ความหนาแน่นเริ่มต้น (กก./ลบ.ม.) | 1.01 | 1.00 | 0.55 | 0.49 |
| - ความหนาแน่นสุดท้าย (กก./ลบ.ม.) | 2.00 | 1.77 | 2.29 | 0.93 |
| - น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น (ก./ตัว) | 64.38 | 24.55 | 18.48 | 19.74 |
| - น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย (ก./ตัว) | 128.71 | 42.60 | 76.40 | 39.44 |
| - อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (ก./วัน) | 1.02 | 0.45 | 0.93 | 0.47 |
| - อัตราการแลกเนื้อ | 3.34 | 2.66 | 2.66 | 1.83 |
| - ระยะเวลาการเลี้ยง (วัน) | 63 | 40 | 100 | 60 |

ตารางที่ 4.8 การเจริญเติบโตของปลาในชุดควบคุม (บ่อเลี้ยงปลาชนิดที่ไม่มีสารติดตั้งถึงปฏิกรณ์ชีวภาพ)

| วันที่ | อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (ก./วัน) | น้ำหนักเฉลี่ย (ก./ตัว) | ความยาวเฉลี่ย (ซม./ตัว) | อัตราการแลกเนื้อ | ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.) |
|--------|---------------------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|
| 0 | | 20.84±3.40 | 10.67±0.42 | | 0.50 |
| 0-16 | 0.30 | 25.66±5.13 | 11.22±0.71 | 1.98 | 0.62 |
| 16-19 | | | | | |
| 20 | | 21.61±2.34 | 10.87±0.37 | | 0.52 |
| 20-40 | 0.38 | 29.11±3.02 | 11.75±0.44 | | 0.70 |
| 40-60 | 0.52 | 39.41±5.75 | 12.83±0.66 | 1.73 | 0.95 |

← ช่วงปรับสภาพปลาในถังน้ำที่เติมฟอรั่มลินเพื่อฆ่าเชื้อโรค →

ตารางที่ 4.9 การเจริญเติบโตของปลาในชุดทดลองระบบตัวกลางจมน้ำ (บ่อเลี้ยงปลาชนิดที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางจมน้ำ)

| วันที่ | อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (ก./วัน) | น้ำหนักเฉลี่ย (ก./ตัว) | ความยาวเฉลี่ย (ซม./ตัว) | อัตราการแลกเนื้อ | ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.) |
|--------|---------------------------------------|---|----------------------------|------------------|----------------------------|
| 0 | | 17.53±3.01 | 10.05±0.46 | | 0.49±0.03 |
| 0-16 | 0.29±0.06 | 22.24±6.51 | 10.70±0.98 | 1.87±0.6 | 0.62±0.08 |
| 16-19 | | ช่วงปรับสภาพปลาชนิดในถังน้ำที่เติมพอร์มาลินเพื่อฆ่าเชื้อโรค | | | |
| 20 | | 20.78±4.57 | 10.74±0.7 | | 0.53±0.00 |
| 20-40 | 0.34±0.01 | 27.66±6.85 | 11.51±0.9 | | 0.70±0.01 |
| 40-60 | 0.39±0.02 | 35.44±8.72 | 11.82±1.08 | 1.99±0.13 | 0.90±0.02 |

ตารางที่ 4.10 การเจริญเติบโตของปลาในกระบบตัวกลางเคลื่อนที่ (ปล่อยปลาในคอกที่มีการติดตั้งปั๊มกรองชีวภาพแบบตัวกลางเคลื่อนที่)

| วันที่ | อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (ก./วัน) | น้ำหนักเฉลี่ย (ก./ตัว) | ความยาวเฉลี่ย (ซม./ตัว) | อัตราการแลกเนื้อ | ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.) |
|--------|---------------------------------------|---|----------------------------|------------------|----------------------------|
| 0 | | 19.26±3.54 | 10.28±0.55 | | 0.49±0.04 |
| 0-16 | 0.25±0.03 | 23.33±6.14 | 10.76±0.74 | 2.28±0.44 | 0.59±0.05 |
| 16-19 | | ↓ ช่วงปรับสภาพปลาในถังน้ำที่เติมฟอรัมาลินเพื่อฆ่าเชื้อโรค | | | |
| 20 | | 23.04±4.86 | 11.14±0.69 | | 0.52±0.01 |
| 20-40 | 0.41±0.07 | 31.08±7.63 | 11.88±1.00 | | 0.70±0.03 |
| 40-60 | 0.47±0.13 | 40.56±9.96 | 12.89±1.06 | 1.92±0.39 | 0.92±0.10 |

ตารางที่ 4.11 การเจริญเติบโตของปลาในชุดทดลองระบบโปรยกรอง (บ่อเลี้ยงปลาที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชีวภาพแบบโปรยกรอง)

| วันที่ | อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (ก./วัน) | น้ำหนักเฉลี่ย (ก./ตัว) | ความยาวเฉลี่ย (ซม./ตัว) | อัตราการแลกเนื้อ | ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.) |
|--------|---------------------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|
| 0 | | 21.33±3.43 | 10.78±0.55 | | 0.48±0.06 |
| 0-16 | 0.20±0.11 | 24.56±4.07 | 11.19±1.16 | 2.48±0.54 | 0.56±0.06 |
| 16-19 | | | | | |
| 20 | | 22.78±6.35 | 11.01±0.86 | | 0.52±0.01 |
| 20-40 | 0.47±0.08 | 32.11±9.40 | 11.55±1.34 | | 0.73±0.03 |
| 40-60 | 0.51±0.04 | 42.34±13.29 | 13.24±1.31 | 1.67±0.15 | 0.96±0.04 |

← ช่วงปรับสภาพปลาในถังน้ำที่เติมพอร์มาลินเพื่อฆ่าเชื้อโรค

4.4 ประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ภายหลังเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลา

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.3 พบว่าถึงปฏิกรณ์ชีวภาพทั้ง 3 รูปแบบสามารถบำบัดของเสียไนโตรเจนได้ดี โดยไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนเนื่องจากระบบสามารถบำบัดไนโตรเจนที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด การทดลองนี้จึงทำการทดลองต่อเนื่องเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนของถังปฏิกรณ์ชีวภาพทั้ง 3 รูปแบบ ภายหลังจากการใช้งานในระบบเลี้ยงปลานิลมาแล้วเป็นเวลา 60 วัน โดยเดินระบบการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ เก็บตัวอย่างน้ำเป็นระยะเพื่อตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวม เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์และตัวกรองชีวภาพ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีดังต่อไปนี้

- การเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน

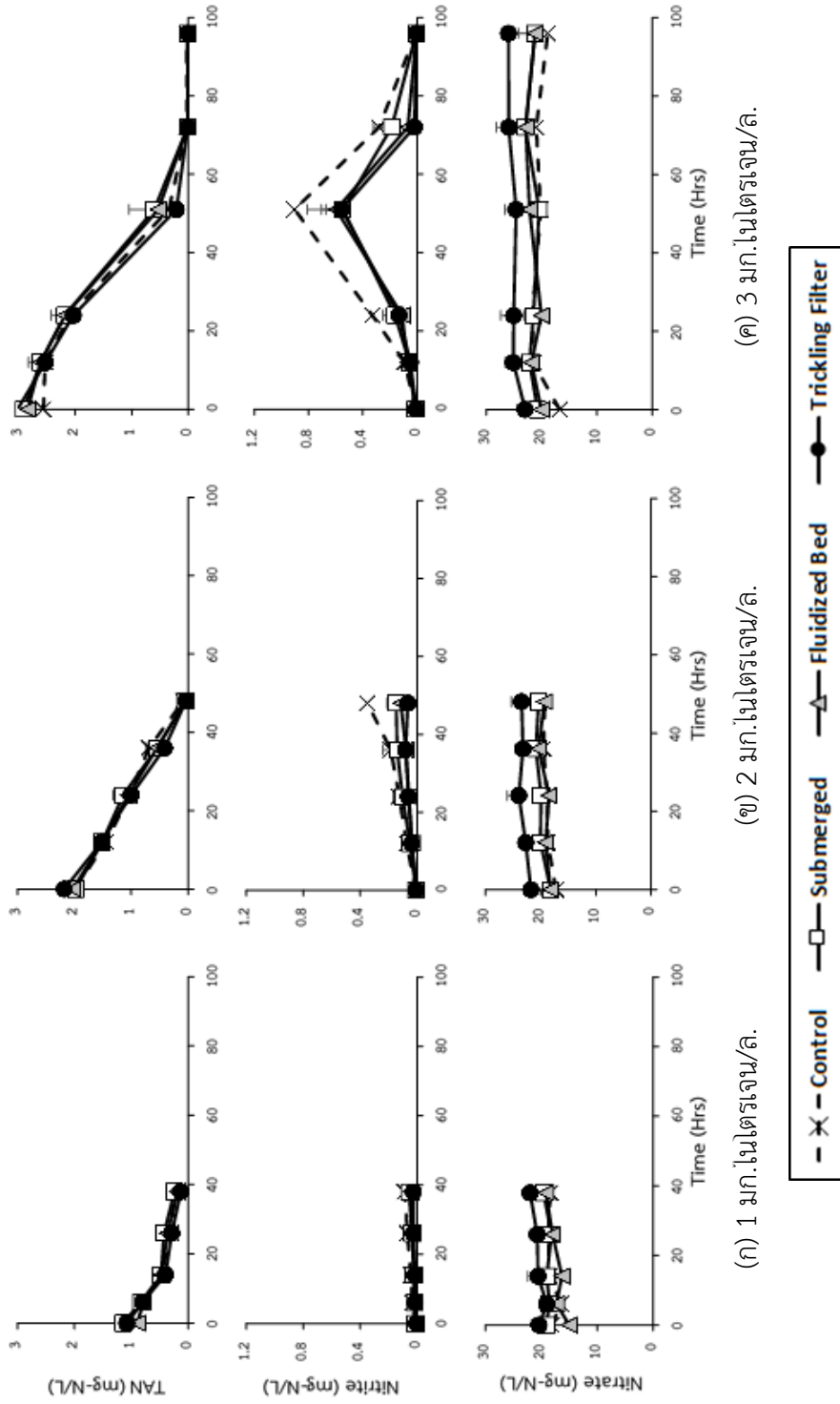
ผลการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากท่อน้ำออกของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ และในบ่อเลี้ยงปลาแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนบริเวณจุดเก็บตัวอย่างทั้งสอง มีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่ามวลน้ำในแต่ละชุด การทดลองมีการกวนผสมและหมุนเวียนระหว่างบ่อเลี้ยงปลา ถึงตกตะกอน และถังปฏิกรณ์ชีวภาพอย่างสมบูรณ์ โดยชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพทั้ง 3 รูปแบบ (ระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง) สามารถบำบัดแอมโมเนียรวมผ่านกระบวนการไนโตรฟิกเคชันได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 38, 48 และ 72 ชม. ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมจากน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการเลี้ยงปลา (หัวข้อที่ 4.2) พบว่าทุกระบบมีความสามารถในการบำบัดไนโตรเจนได้ดีขึ้น โดยชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพมีอัตราการบำบัดที่ใกล้เคียงกันที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. จะเห็นว่าระบบโปรยกรองมีอัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนียรวมเร็วกว่าระบบอื่น นั่นคือที่เวลา 36 ชม. ความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมคงเหลือจากท่อน้ำออกของระบบโปรยกรองมีค่าเท่ากับ 0.41 ± 0.05 มก.ไนโตรเจน/ล. ในขณะที่ชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพ และชุดทดลองที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตัวกลางจมตัว และตัวกลางเคลื่อนที่ มีปริมาณ

แอมโมเนียรวมคงเหลือในระบบเท่ากับ 0.69 , 0.55 ± 0.20 และ 0.55 ± 0.17 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.12 (ข) และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเป็น 3 มก.ไนโตรเจน/ล. ยังคงพบว่าระบบโปรยกรองมีอัตราการบำบัดไนทรีฟิเคชันดีที่สุดใน โดยมีแอมโมเนียรวมคงเหลือในระบบเท่ากับ 0.21 ± 0.11 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่เวลา 51 ชม. ในขณะที่ชุดควบคุม ระบบตัวกลางจมตัว และตัวกลางเคลื่อนที่ มีปริมาณแอมโมเนียรวมคงเหลือในระบบเท่ากับ 0.34 , 0.60 ± 0.45 และ 0.53 ± 0.19 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.12 (ค) ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดลองจากหัวข้อที่ 4.2 ที่ระบุว่าระบบโปรยกรองมีอัตราการบำบัดไนทรีฟิเคชันดีที่สุดใน นอกจากนี้จะเห็นว่าชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพสามารถบำบัดแอมโมเนียรวมในระบบได้เช่นกัน โดยมีความสามารถในการบำบัดใกล้เคียงกับชุดทดลองที่มีการติดตั้งวัสดุตัวกลาง สาเหตุเนื่องจากระหว่างการเลี้ยงปลาจะมีการบ่มเชื้อกลุ่มไนทรีฟายอิงแบคทีเรียตามธรรมชาติ ซึ่งเกิดจากจุลชีพที่ติดมากับตัวปลา รวมถึงจุลชีพที่เกิดขึ้นจากของเสียจากการขับถ่ายของปลา ทำให้แบคทีเรียกลุ่มนี้เจริญเติบโตแบบแขวนลอยภายในบ่อเลี้ยงปลา รวมถึงยึดเกาะเป็นฟิล์มชีวภาพบริเวณผนังของบ่อ และทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

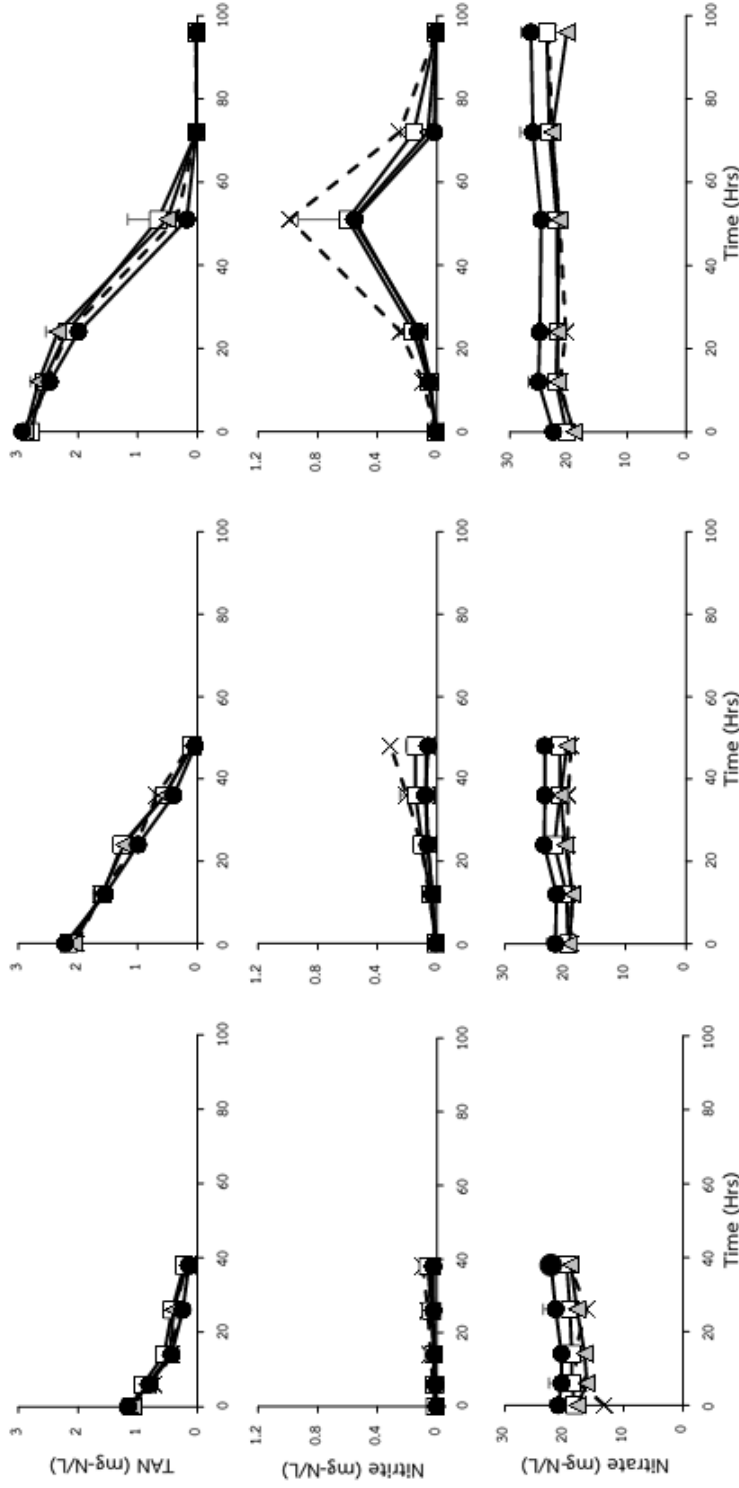
สำหรับการเปลี่ยนแปลงไนไตรต์ระหว่างการเดินระบบที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. พบว่าชุดควบคุมและชุดทดลองสามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียรวมให้อยู่ในรูปของไนเตรตผ่านกระบวนการไนทรีฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่มีการสะสมตัวของไนไตรต์ในระบบ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. พบการสะสมตัวของไนไตรต์ในชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งวัสดุตัวกรอง โดยมีความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 0.35 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่เวลา 48 ชม. ในขณะที่ชุดทดลองที่มีการติดตั้งระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง มีความเข้มข้นไนไตรต์สะสมในระบบสูงสุดเพียง 0.15 ± 0.06 , 0.12 ± 0.05 และ 0.07 ± 0.05 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นแอมโมเนียรวมในระบบเท่ากับ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. พบว่าทุกชุดการทดลองเกิดการสะสมตัวของไนไตรต์ในระบบ โดยที่เวลา 51 ชม. พบความเข้มข้นของไนไตรต์สูงสุดในชุดควบคุม (0.90 มก.ไนโตรเจน/ล.) สำหรับชุดทดลองที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพทั้ง 3 รูปแบบ มีปริมาณไนไตรต์สะสมในระบบใกล้เคียงกัน นั่นคือ 0.55 ± 0.26 , 0.60 ± 0.07 และ 0.56 ± 0.15 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นว่าหลังจากการเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากระบบเลี้ยงปลา ทุกชุดการทดลองสามารถลดการสะสมตัวของไนไตรต์ระหว่างกระบวนการไนทรีฟิเคชันได้ โดยเฉพาะในระบบที่มีความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 1 และ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งเป็น

ปริมาณที่ใกล้เคียงกับแอมโมเนียรวมที่เกิดขึ้นจริงในระบบเลี้ยงปลาที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (เริ่มต้นและสิ้นสุดเท่ากับ 0.5 และ 1 กก./ลบ.ม. ของปริมาตรน้ำทั้งหมดในระบบ)

ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงของไนเตรตระหว่างการเดินระบบ พบว่าไนเตรตของชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพทั้ง 3 รูปแบบ มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเดินระบบ เนื่องมาจากการออกซิไดซ์แอมโมเนียรวมผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน โดยที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการติดตั้งระบบตัวกลางจมตัวตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง พบการสะสมของไนเตรตคงเหลือจากการเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากระบบเลี้ยงปลา (หัวข้อที่ 4.3) เท่ากับ 18.14, 19.10±1.44, 15.00±0.73 และ 20.40±1.40 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากนั้นปริมาณไนเตรตในแต่ละระบบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าเท่ากับ 18.39, 19.62±1.22, 19.17±3.00 และ 21.99±0.99 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ในชั่วโมงสุดท้ายของการทดลอง ทำนองเดียวกันกับการทดลองที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. ตรวจพบการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนเตรตจากกระบวนการไนทริฟิเคชันจนมีค่าสูงสุดในชั่วโมงสุดท้ายของการเท่ากับ 19.24, 20.40±1.98, 19.32±1.72 และ 23.45±1.91 มก.ไนโตรเจน/ล. และ 18.92, 21.18±2.94, 21.19±4.24 และ 26.01±0.98 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ไนไตรต์ และไนเตรต จากก่อนน้ำออกของถังปฏิกรณ์ชีวภาพภายหลังจากการเดินระบบ ด้วยน้ำเสียจริงจากระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้น เท่ากับ 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล.



(ก) 1 มก.ไนโตรเจน/ล.

(ข) 2 มก.ไนโตรเจน/ล.

(ค) 3 มก.ไนโตรเจน/ล.

— x — Control — □ — Submerged — △ — Fluidized Bed — ● — Trickling Filter

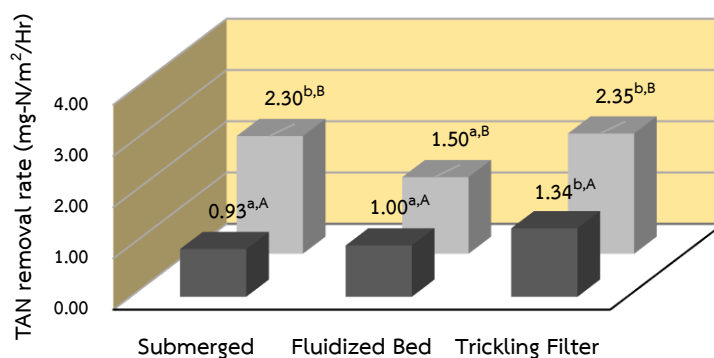
รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ไนไตรต์ และไนเตรตของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาภายหลังจากการเดินระบบด้วยน้ำเสียจริง จากระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียมเริ่มต้น เท่ากับ 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล.

- อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ 3 รูปแบบ ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนก่อนและหลังการเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลา

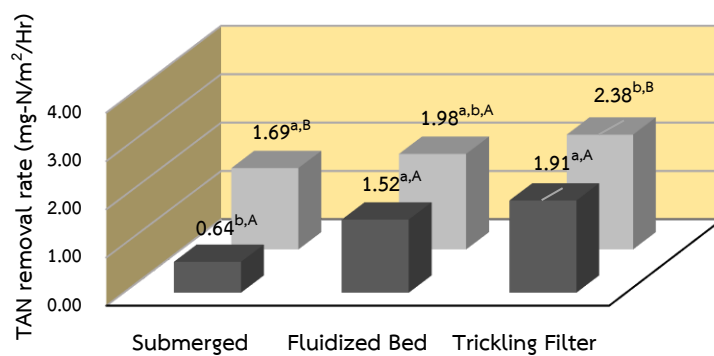
อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ก่อนและหลังการเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากระบบการเลี้ยงปลา เมื่อเก็บตัวอย่างน้ำจากท่อน้ำออกของถังปฏิกรณ์ชีวภาพไนทริฟิเคชัน และในบ่อเลี้ยงปลา ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันพบว่า ที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมเริ่มต้นต่างกัน จะให้ผลของอัตราการบำบัดไม่เท่ากัน นั่นคือที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ผ่านการใช้งานในน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลายังมีค่าสูงกว่าระบบเริ่มต้นก่อนการเลี้ยงปลา โดยในระบบที่มีความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ดังรูปที่ 4.14 (ก) พบว่าก่อนเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากระบบเลี้ยงปลา ระบบโปรยกรองมีประสิทธิภาพการบำบัดไนทริฟิเคชันดีที่สุด เท่ากับ 1.34 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./ชม. (1.15 มก.ไนโตรเจน/ล.ตัวกรอง/ชม.) ในขณะที่ระบบตัวกลางจมตัวและตัวกลางเคลื่อนที่มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมร้อยละ 70 และ 75 ของระบบโปรยกรอง ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของระบบโปรยกรองยังมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับระบบตัวกลางจมตัวและตัวกลางเคลื่อนที่ ซึ่งสอดคล้องกับผลของอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล.ที่ระบุว่าระบบโปรยกรองมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 1.91 และ 2.78 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./ชม. (1.64 และ 2.39 มก.ไนโตรเจน/ล.ตัวกรอง/ชม.) ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ข) และ 4.14 (ค) ตามลำดับ ต่อมาหลังจากเดินระบบเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน พบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของระบบโปรยกรองยังคงมีค่าสูงที่สุดที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้น 1 มก.ไนโตรเจน/ล. เท่ากับ 2.35 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./ชม. (2.02 มก.ไนโตรเจน/ล.ตัวกรอง/ชม.) เช่นเดียวกับที่ความเข้มข้น 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. เท่ากับ 2.38 และ 3.28 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./ชม. (2.04 และ 2.81 มก.ไนโตรเจน/ล.ตัวกรอง/ชม.) จะเห็นว่าเมื่อผ่านการเดินระบบบำบัดในน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลา ทุกชุดการทดลองมีประสิทธิภาพการบำบัดไนทริฟิเคชันสูงขึ้น โดยค่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของทุกระบบก่อนและหลังการเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงปลาที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้น 1 และ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. จะมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ความ

เข้มข้นของแอมโมเนียรวมสูงขึ้น (3 มก.ไนโตรเจน/ล.) อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมจะมีค่าไม่แตกต่างกัน ($P>0.05$)

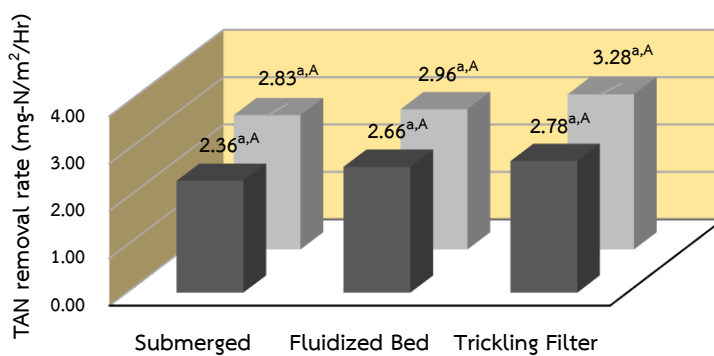
สำหรับผลของอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมในบ่อเลี้ยงปลาให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับบริเวณท่อน้ำออก นั่นคืออัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของระบบโปรยกรองก่อนการเลี้ยงปลาที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้น 1 มก.ไนโตรเจน/ล. มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.22 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./ชม. (1.05 มก.ไนโตรเจน/ล.ตัวกรอง/ชม.) ดังรูปที่ 4.15 (ก) ในขณะที่ระบบตัวกลางจมตัวและตัวกลางเคลื่อนที่มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมร้อยละ 70 และ 63 ของระบบโปรยกรอง นอกจากนี้ค่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของระบบโปรยกรองยังมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เมื่อเทียบกับระบบตัวกลางจมตัวและตัวกลางเคลื่อนที่ ซึ่งสอดคล้องกับผลของอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ระบุว่าระบบโปรยกรองมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 1.98 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./ชม. (1.70 มก.ไนโตรเจน/ล.ตัวกรอง/ชม.) ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ข) และเมื่อผ่านการเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากระบบเลี้ยงปลาพบว่า อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของระบบโปรยกรองยังคงมีค่าสูงสุด (ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้น 1 มก.ไนโตรเจน/ล.) เท่ากับ 2.51 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./ชม. (2.16 มก.ไนโตรเจน/ล.ตัวกรอง/ชม.) ในขณะที่ระบบตัวกลางจมตัวและตัวกลางเคลื่อนที่มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 76 และ 86 ของระบบโปรยกรอง นอกจากนี้ค่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของทั้ง 3 ระบบยังมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) และสอดคล้องกับผลการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยระบบโปรยกรองมีประสิทธิภาพสูงสุด เท่ากับ 2.47 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./ชม. (2.12 มก.ไนโตรเจน/ล.ตัวกรอง/ชม.) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. พบว่าระบบตัวกลางเคลื่อนที่มีค่าอัตราไนทรีฟิเคชันสูงสุดทั้งก่อนและหลังการเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากระบบเลี้ยงปลา โดยมีค่าเท่ากับ 2.47 และ 3.27 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./ชม. (2.12 และ 2.81 มก.ไนโตรเจน/ล.ตัวกรอง/ชม.) ตามลำดับ (รูปที่ 4.15 (ค)) แต่ทว่าเมื่อเปรียบเทียบทางสถิติพบว่าอัตราการบำบัดไนทรีฟิเคชันของถังปฏิกรณ์ชีวภาพทั้ง 3 รูปแบบ ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้น 3 มก.ไนโตรเจน/ล. มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$)



(ก) 1 มก.ไนโตรเจน/ล.



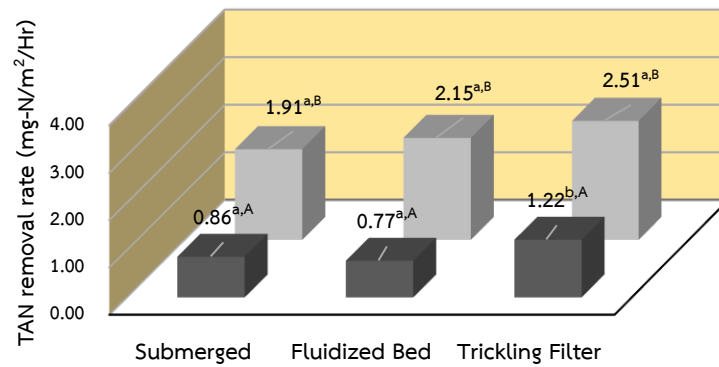
(ข) 2 มก.ไนโตรเจน/ล.



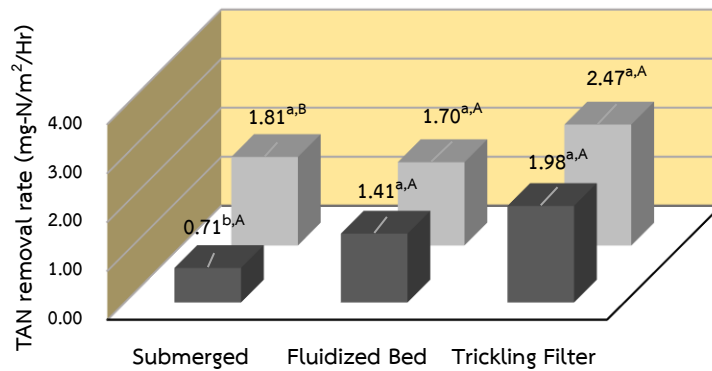
(ค) 3 มก.ไนโตรเจน/ล.



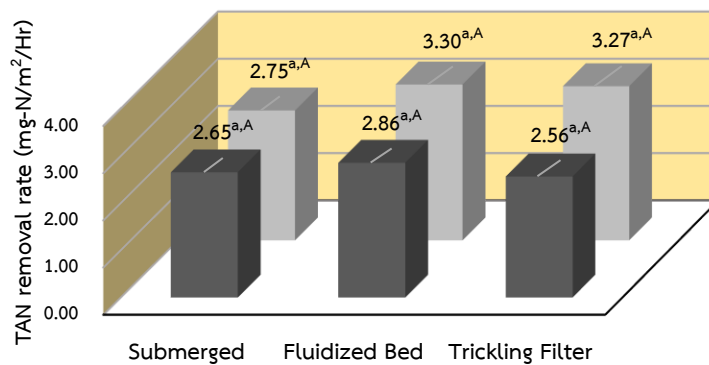
รูปที่ 4.14 อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ก่อนและหลังการเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากระบบการเลี้ยงปลา (น้ำจากท่อปล่อยของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ)



(ก) 1 มก.ไนโตรเจน/ล.



(ข) 2 มก.ไนโตรเจน/ล.



(ค) 3 มก.ไนโตรเจน/ล.



รูปที่ 4.15 อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ก่อนและหลังการเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงจากระบบการเลี้ยงปลา (น้ำในบ่อเลี้ยงปลา)

ภายหลังการเลี้ยงปลานิลเป็นเวลา 60 วันพบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของทุกระบบจะสูงขึ้นเนื่องจากมีแบคทีเรียเจริญเติบโตขึ้นเองตามธรรมชาติด้วยสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม และจะยึดเกาะเป็นไบโอฟิล์มอยู่ตามพื้นที่ต่างๆในระบบ ไม่ว่าจะเป็นที่ผนังและพื้นถัง บริเวณผิวของท่อน้ำและวัสดุอื่นภายในถัง ซึ่งการเปรียบเทียบพื้นที่ภายในแต่ละระบบและพื้นที่ของตัวกลางชีวภาพรุ่น BCN-012 จะแสดงดังตารางที่ 4.12 (วิธีการคำนวณพื้นที่ในระบบจะปรากฏอยู่ในภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.12 พื้นที่ผิวที่สามารถเกิดการเกาะติดของไบโอฟิล์มได้ในแต่ละระบบและพื้นที่ของตัวกลางชีวภาพรุ่น BCN-012

| ระบบ พื้นที่ | ชุดควบคุม (ตร.ซม.) | ระบบตัวกลาง จมตัว (ตร.ซม.) | ระบบตัวกลาง เคลื่อนที่ (ตร.ซม.) | ระบบโปรยกรอง (ตร.ซม.) |
|---|-----------------------|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| บ่อปลา | 23,059 (72.6%) | 16,752 (19.6%) | 16,752 (18.9%) | 23,059 (26%) |
| ถังตกตะกอน | 5,272 (16.6%) | 5,272 (6.2%) | 5,272 (5.9%) | 5,272 (6%) |
| ถังปฏิกรณ์ | 0 | 4,043 (4.7%) | 7,212 (8.1%) | 1,947 (2.2%) |
| ท่อต่างๆ | 3,419 (10.8%) | 7,837 (9.2%) | 7,945 (9%) | 6,609 (7.5%) |
| พื้นที่ของ ระบบ | 31,750 (100%) | 33,904 (39.7%) | 37,181 (41.9%) | 36,887 (41.7%) |
| ตัวกรอง | 0 | 51,540 (60.3%) | 51,540 (58.1%) | 51,540 (58.3%) |
| พื้นที่ทั้งหมด ของระบบ รวมตัวกรอง | 31,750 (100%) | 85,444 (100%) | 88,721 (100%) | 88,427 (100%) |

จากการทดลองช่วงที่ 2 และ ช่วงที่ 4 พบว่า ระบบโปรยกรองมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด สาเหตุหนึ่งอาจมาจากระบบโปรยกรองมีการเป่าอากาศด้วยพัดลมทำให้ปริมาณออกซิเจนในถังปฏิกรณ์ชีวภาพสูงกว่าระบบอื่น โดยที่ปริมาณออกซิเจนจะมีผลโดยตรงต่ออัตราการบำบัดแอมโมเนียรวม กล่าวคือ ถ้าปริมาณออกซิเจนสูงอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมก็จะสูงตาม (Kikuchi และคณะ, 1999) ส่วนระบบตัวกลางจมตัวมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมต่ำสุด เนื่องจากตัวกรอง

ชีวภาพจะถูกยึดกับที่เป็นชั้นหนาจึงทำให้น้ำไหลผ่านพื้นที่ผิวด้านในของตัวกรองชีวภาพได้ยาก ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่จะแพร่เข้าไปพื้นที่ผิวด้านในของตัวกรองชีวภาพได้น้อยกว่าระบบอื่นจึงอาจส่งผลให้อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของระบบตัวกลางจมตัวต่ำกว่าระบบอื่น (ตารางที่ 4.13)



ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และโปรยกรอง จากงานวิจัยนี้

| ประเด็นเปรียบเทียบ | ระบบตัวกลางจมตัว | ระบบตัวกลางเคลื่อนที่ | ระบบโปรยกรอง |
|--|--|--|--|
| อัตราการบำบัด แอมโมเนียรวม ภายหลังการเลี้ยงปลา | 2.30 มก.ไนโตรเจน/ตร. ม./ชม. หรือ ร้อยละ 98 เมื่อเทียบกับระบบโปรย กรอง | 1.50 มก.ไนโตรเจน/ตร. ม./ชม. หรือ ร้อยละ 64 เมื่อเทียบกับระบบโปรย กรอง | 2.35 มก.ไนโตรเจน/ตร. ม./ชม. หรือ ร้อยละ 100 เมื่อเทียบกับระบบโปรย กรอง |
| การดูแลระบบ | ไม่ซับซ้อน | ไม่ซับซ้อน | ไม่ซับซ้อน |
| การทำงานของระบบ | ตัวกรองชีวภาพยึดติด อยู่กับที่ด้วยแผ่น พลาสติก | ตัวกรองชีวภาพเคลื่อนที่ ไปตามการไหลของน้ำ | ตัวกรองชีวภาพอยู่กับที่ โดยมีการกระจายน้ำให้ สัมผัสทั่วพื้นที่ผิว |
| การติดตั้ง | การติดตั้งระบบง่าย เนื่องจากไม่ซับซ้อนและ ใช้อุปกรณ์ไม่มาก | การติดตั้งระบบง่ายปาน กลาง เนื่องจากต้องติดตั้ง ท่อซ้อนกัน | การติดตั้งระบบซับซ้อน เนื่องจากต้องติดตั้งพัด ลมเพื่อกระจายน้ำทั่ว พื้นที่ตัวกรอง |
| ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มี ผลต่อระบบ | ค่าสภาพต่างสูงสุด | ค่าสภาพต่างปานกลาง | ค่าสภาพต่างต่ำสุด |
| ปัญหาที่เกิดขึ้น | เกิดการสะสมของ ปริมาณตะกอน | ตัวกลางในถังปฏิกรณ์ ค่อนข้างแน่น | เกิดการสะสมของ ปริมาณตะกอน |

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียรวมจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำที่ดำเนินการภายใต้ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด ผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันด้วยตัวกรองชีวภาพชนิด BCN-012 ที่ได้รับความนิยมในการใช้เป็นวัสดุตัวกลางในการบำบัดคุณภาพน้ำ เนื่องจากมีพื้นผิวจำเพาะสำหรับการยึดเกาะของจุลินทรีย์มาก การทดลองช่วงแรกจะเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างตัวกรองชีวภาพที่มีการผ่านการบ่มเชื้อระยะเวลาเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน โดยศึกษาจลนพลศาสตร์อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพ 3 และ 6 เดือน จากนั้นจะทำการบรรจุตัวกรองชีวภาพลงในถังปฏิกรณ์ 3 รูปแบบ ได้แก่ ถังปฏิกรณ์แบบตัวกลางจมตัว ถังปฏิกรณ์แบบตัวกลางเคลื่อนที่ และถังปฏิกรณ์แบบโปรยกรอง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นแอมโมเนียรวม 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. ต่อมาทำการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ชีวภาพทั้งสามรูปแบบ ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบเลี้ยงปลา และภายหลังสิ้นสุดการเดินระบบด้วยน้ำเสียจริงในระบบเลี้ยงปลา ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

การศึกษาเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์ในการบำบัดแอมโมเนียรวมของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 และ 6 เดือน พบว่าตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 เดือน มีค่าอัตราการบำบัดสูงสุดของแอมโมเนียรวม (V_{max}) เท่ากับ 73.20 มก.ไนโตรเจน/ตรม./วัน และค่าคงที่เมื่ออัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (K_s) เท่ากับ 6.47 มก.ไนโตรเจน/ล. ส่วนตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 6 เดือนจะมีค่าอัตราการบำบัดสูงสุดของแอมโมเนียรวม (V_{max}) เท่ากับ 53.92 มก.ไนโตรเจน/ตรม./วัน และค่าคงที่เมื่ออัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมสูงสุด (K_s) เท่ากับ 2.15 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 6 เดือนจะมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมลดลง โดยมีค่า V_{max} และ K_s ลดลงกว่าตัวกรองที่ผ่านการบ่มเชื้อเป็นเวลา 3 เดือน เท่ากับร้อยละ

26 และ 67 ตามลำดับ ซึ่งปัจจัยนี้มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัดไนทรีฟิเคชัน ดังนั้นในการออกแบบระบบบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ ผู้ออกแบบจึงมีความจำเป็นต้องทำการเผื่อค่าความปลอดภัยไว้ให้เพียงพอ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นแอมโมเนียรวม 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. พบว่า แต่ละชุดการทดลองมีการกวนผสมและหมุนเวียนระหว่างบ่อเลี้ยงปลา ถังตกตะกอน และถังปฏิกรณ์ชีวภาพได้เป็นอย่างดี ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้น 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียรวมของแต่ละระบบมีค่าไม่แตกต่างกัน ส่วนความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้น 2 มก.ไนโตรเจน/ล. ระบบโปรยกรองสามารถบำบัดแอมโมเนียรวมได้ดีกว่าระบบตัวกลางจมตัวและตัวกลางเคลื่อนที่ โดยมีแอมโมเนียรวมคงเหลือในระบบโปรยกรองเท่ากับ 0.13 ± 0.07 มก.ไนโตรเจน/ล. และที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้น 3 มก.ไนโตรเจน/ล. พบว่าระบบโปรยกรองและตัวกลางเคลื่อนที่ที่มีความสามารถในการบำบัดแอมโมเนียรวมใกล้เคียงกันโดยที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมคงเหลือในระบบมีค่าเท่ากับ 0.33 ± 0.14 และ 0.32 ± 0.22 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ และระบบโปรยกรองมีประสิทธิภาพไนทรีฟิเคชันดีที่สุดในลำดับที่ 1.34, 1.91 และ 2.78 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./ชม. (1.15, 1.64 และ 2.39 มก.ไนโตรเจน/ล.ตัวกรอง/ชม.) เมื่อความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. ในขณะที่ระบบตัวกลางจมตัวจะมีความสามารถในการบำบัดแอมโมเนียรวมต่ำที่สุดและมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียรวม เท่ากับ 0.93, 0.64 และ 2.36 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./ชม. (0.80, 0.55 และ 2.03 มก.ไนโตรเจน/ล.ตัวกรอง/ชม.) เมื่อความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเริ่มต้นเท่ากับ 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. ในส่วนของปริมาณไนไตรต์และไนเตรตที่เพิ่มสูงขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมเริ่มต้น นอกจากนี้ระบบโปรยกรองมีความสามารถในการบำบัดแอมโมเนียรวมและลดการสะสมตัวของไนไตรต์ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ไนโตรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไนทรีฟิเคชันได้ดีกว่าระบบอื่น โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. แต่อย่างไรก็ตามทั้ง 3 ระบบจะสามารถบำบัดแอมโมเนียรวมและไนไตรต์ได้ด้วยกระบวนการไนทรีฟิเคชันอย่างสมบูรณ์

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วันโดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำที่ความหนาแน่นปลานิลเริ่มต้น 0.5 กก./ลบ.ม. พบว่าชุดควบคุมจะมีการสะสมของแอมโมเนียรวมและไนไตรต์ที่มากกว่าชุดทดลองอย่างชัดเจน ในขณะที่ระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ที่บรรจุตัวกรองชีวภาพ BCN-012 จะควบคุมปริมาณแอมโมเนียรวม ไนไตรต์ และไนเทรต ให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อปลาได้ตั้งแต่วันแรกของการทดลอง โดยระบบตัวกลางจมตัวจะมีความเข้มข้นแอมโมเนียรวมและไนไตรต์เฉลี่ยเท่ากับ 0.044 ± 0.042 และ 0.053 ± 0.044 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นไนเทรตในวันสุดท้ายของการทดลองจะมีค่าเท่ากับ 15.108 ± 0.877 มก.ไนโตรเจน/ล. ระบบตัวกลางเคลื่อนที่ จะมีความเข้มข้นแอมโมเนียรวมและไนไตรต์เฉลี่ยเท่ากับ 0.039 ± 0.043 และ 0.043 ± 0.037 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นไนเทรตในวันสุดท้ายของการทดลองจะมีค่าเท่ากับ 12.883 ± 3.999 มก.ไนโตรเจน/ล. ระบบโปรยกรองจะมีความเข้มข้นแอมโมเนียรวมและไนไตรต์เฉลี่ยเท่ากับ 0.042 ± 0.037 และ 0.039 ± 0.031 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นไนเทรตในวันสุดท้ายของการทดลองจะมีค่าเท่ากับ 17.076 ± 2.222 มก.ไนโตรเจน/ล. นอกจากนี้เมื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบเลี้ยงปลา พบว่าชุดควบคุม ระบบตัวกลางจมตัว ระบบตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง มีอัตราการเจริญเติบโตของปลานิล ในช่วง 40-60 วัน เท่ากับ 0.52, 0.39 ± 0.02 , 0.47 ± 0.13 และ 0.51 ± 0.04 ก./วัน ตามลำดับ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ภายหลังสิ้นสุดการเลี้ยงปลาเป็นเวลา 60 วัน พบว่า ชุดควบคุมจะบำบัดแอมโมเนียรวมที่มีความเข้มข้น 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้ใกล้เคียงกับระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง โดยเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียรวมของระบบทั้ง 3 ระบบในการบำบัดน้ำเสียสุดท้ายที่ปรับความเข้มข้นแอมโมเนียรวมเท่ากับ 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. พบว่า ระบบโปรยกรองจะมีความสามารถในการบำบัดแอมโมเนียรวมดีที่สุด โดยที่ความเข้มข้นแอมโมเนียรวม 3 มก.ไนโตรเจน/ล. อัตราการบำบัดแอมโมเนียรวมของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง จะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากมีกลุ่มไนทริฟายอิงแบคทีเรียเจริญเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติยึดเกาะอยู่ตามพื้นที่ต่างๆ ในระบบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรองด้วยตัวกรองชีวภาพ BCN-012 ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน และควบคุมปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงปลาความหนาแน่นสูง ซึ่งจะมีอัตราการผลิตของเสียในรูปของแอมโมเนียรวม ไนไตรต์ และ ไนเตรต สูงขึ้น เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค และการใช้งานจริงให้กับกลุ่มเกษตรกรได้

5.2.2 ควรปรับปรุงรูปแบบการติดตั้งตัวกรองชีวภาพ BCN-012 ในระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง เพื่อให้ทุกระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น ถังปฏิกรณ์ของตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และโปรยกรอง ควรลดความสูงของถังปฏิกรณ์ลงและเพิ่มพื้นที่เส้นผ่านศูนย์กลางให้มากขึ้น เพื่อป้องกันการเกิดจุดอับอากาศในถังปฏิกรณ์และลดโอกาสเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน ในส่วนถังตกตะกอนควรปรับปรุงการแยกตะกอน เช่น ถังกรองควรมีพื้นที่ในการกรองมากขึ้น เป็นต้น ส่วนที่น้ำเข้าควรมีการติดตุ้กรองเพื่อตัดปริมาณตะกอนแขวนลอยให้ได้มากขึ้นซึ่งจะลดโอกาสในการอุดตันของสารอินทรีย์ในตัวกรองชีวภาพ ตลอดจนควรหาวิธีการล้างตุ้กรองที่สะดวกและรวดเร็วกว่าการที่จะถอดตุ้กรองทีละอันของแต่ละระบบแล้วนำออกมาล้างเนื่องจากตุ้กรองมีจำนวนมาก

5.2.3 ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับโรคที่เกิดขึ้นในปลา โดยการกักปลาในบ่อพักเพื่อสังเกตอาการและการเกิดโรคระบาดก่อนเริ่มการทดลองเป็นระยะเวลาหนึ่ง หากพบว่าปลามีอาการป่วยควรแยกออกมาและส่งศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ เพื่อให้ได้ข้อมูลอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการรอดตายของปลาที่ถูกต้องระหว่างการทดลอง

5.2.4 ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับประชากรจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ร่วมกันในตัวกรอง ชีวภาพด้วยเทคนิคทางด้านชีววิทยาระดับโมเลกุล โดยศึกษาหาความหลากหลายของการอยู่ร่วมกัน ของแบคทีเรียกลุ่มต่างๆ ได้แก่ แบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายอิง แบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟายอิง แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ หรือแบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ ที่อาศัยอยู่บริเวณ BCN-012 เพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะช่วยอธิบายกลไกการบำบัดทางชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ของแต่ละระบบได้อย่างถูกต้อง

รายการอ้างอิง

- Al-Hafedh, Y. S., Alam, A. and Alam, M. A. 2003. Performance of plastic biofilter media with different configuration in a water recirculation system for the culture of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Aquacultural Engineering. 29(3-4): 139-154.
- 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 and WPCF. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st ed. Washington DC: American Public Health Association.
- Balarin, J. D. and Haller, J. P. 1979. Tilapia: A guide to their Biology and Culture in Africa. University of Stirling, Stirling, Scotland.
- Bitton, G. 1994. Wastewater Microbiology. Chichester: John Wiley & Sons.
- Bock, E., Koop, H. P., Anlers, B. and Harms, H. 1992. Oxidation of inorganic nitrogen compounds. In Balows' A et al. (eds.), The Prokaryotes. New York: Springer-Verlag.
- Boyd, C. E. 1996. Water Quality in Ponds for Aquaculture. Hatyai: Shrimp Mart Company.
- Camargo, J. A. and Alonso, A. 2006. 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.
- Chen, S., Ling, J. and Blancheton, J. P. 2006. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. Aquacultural Engineering. 34: 179-197.
- Crab, R., Avnimelech, Y., Defoirdt, T., Bossier, P. and Verstraete, W. (2007). Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production. Aquaculture. 270(1-4): 1-14.

- Eding, E. H., Kamstra, A., Verreth, J. A. J., Huisman, E. A. and Klapwijk, A. 2006. Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: A review. Aquacultural Engineering. 34(3): 234-260.
- El - Sayed, A.-F. M. 2006. Tilapia Culture. UK: CABI Publishing.
- Empananza, E. J. M. 2009. Problems affecting nitrification in commercial RAS with fixed-bed biofilters for salmonids in Chile. Aquacultural Engineering. 41(2): 91-96.
- 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. and Blackburn, T. H. 1979. Bacteria and Mineral Cycling. Academic Press London. 143(3): 367.
- Greiner, D. A. and Timmons, B. M. 1998. Evaluation of the nitrification rates of microbead and trickling filters in an intensive recirculating tilapia production facility. Aquacultural Engineering. 18: 189-200.
- Hegazi, M. M. and 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. 151: 420-425.
- Kikuchi T., Saito T. and Tanaka K. 1999. Study on Simultaneous Nitrification and Denitrification Using Immobilized Pellets. Preprint 7th IAWQ Asia-Pacific Reg. Conf., 18-20 Oct., Taipei, 505-510
- Landau, M. 1992. Introduction to Aquaculture. John Wiley and Sons, Inc.
- Lawson, T. B. 1995. Fundamentals of aquacultural engineering. Aquacultural Engineering. 8: 357-368.
- Lekang, O. I. and Kleppe, H. 2000. Efficiency of nitrification in trickling filters using different filter media. Aquacultural Engineering. 21: 181-199.
- Losordo, T. M., Masser, M. P. and Rakocy, J.E. 1999. Recirculating aquaculture tank production systems -A Review of component Options. SRAC Publication. vol. 453.
- 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.

- Monod, Jacques. 1949. The Growth of Bacterial Cultures. Annu Rev Microbiol. 3: 371-394.
- Myrold, D. D. 2005. Transformations of nitrogen. Principles and applications of soil microbiology. New Jersey: Pearson Education.
- Neori, A., Chopin, T., Troell, M., Buschmann, A. H., Kraemer, G. P., Halling, C., Shpigel, M. and Yarish, C. 2004. Evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. Aquaculture. 231: 361-391.
- Nootong, K. 2006. Performance and kinetic evaluations of a novel bioreactor system in the low-oxygen/low-fluid shear reaction environments. Doctoral dissertation University of Pennsylvania.
- O'Sullivan, E. A., Duggal, M. S., Bailey, C. C., Curzon, M. E. J. and Hart, P. (1993). Changes in the oral microflora during cytotoxic chemotherapy in children being treated for acute leukemia. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology. 76(2): 161-168.
- Paul, E. A. and Clark, F. E. 1996. Soil Microbiology and Biochemistry. 2nd ed. San Diego: Academic Press.
- Reyes, A. A. Jr. and Lawson, B. L. 1996. Combination of bead filter and rotating biological filter contactor in recirculating fish culture system. Aquacultural Engineering. 15: 27-39
- Ridha, M. T. and Cruz, E. M. 2001. Effect of biofilter media on water quality and biological performance of the Nile tilapia *Oreochromis niloticus* L. reared in a simple recirculating system. Aquacultural Engineering. 24: 157-166.
- Rogers, G. L. and Klemeston, S. L. 1985. Ammonia removal in selected aquaculture water reuse biofilter. Aquacultural Engineering. 4: 135-154.
- Sanchez, I.A. and Mastsumoto, T. 2011. Hydrodynamic characterization and performance evaluation of an aerobic three phase airlift fluidized bed reactor in a recirculation aquaculture system for Nile Tilapia production. Aquacultural Engineering. 47: 16-26
- Sandu, S. I., Boardman, G. D., Watten, B. J. and Brazil, B. L. 2002. Factors influencing the nitrification efficiency of fluidized bed filter with plastic bead medium. Aquacultural Engineering. 26: 41-59.

- Sawyer, C. N. and McCarty, P. L. 1978. Chemistry for Sanitary Engineers.3rd Edition. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Schroeder, J. P., Klatt, S. F., Schlachter, M., Zablotzki, Y., Keuter, S., Spieck, E. and Schulz, C. 2015. Impact of ozonation and residual ozone-produced oxidants on the nitrification performance of moving-bed biofilters from marine recirculating aquaculture systems. Aquacultural Engineering. 65: 27-36.
- Sesuk, T., Powtongsook, S. and Nootong, K. 2009. Inorganic nitrogen control in a novel zero-water exchanged aquaculture system integrated with airlift-submerged fibrous nitrifying biofilters. Bioresource Technology. 100(6): 2088-2094.
- Shieh, W. K. and Keenan, J. D. 1987. Fluidized Bed Biofilm Reactor for Wastewater Treatment. Berlin: Springer.
- Silapakul, S., Powtongsook, S. and Pavasant, P. Nitrogen Compounds Removal in a Packed Bed External Loop Airlift Bioreactor. Korean Journal of Chemical Engineering. 22(2005): 393-398.
- Suhr, K. I. and Pedersen, P. B. 2010. Nitrification in moving bed and fixed bed biofilters treating effluent water from a large commercial outdoor rainbow trout RAS. Aquacultural Engineering. 42: 31-37.
- Summerfelt, S. T. 2006. Design and management of conventional fluidized-sand biofilters. Aquacultural Engineering. 34: 275-302.
- Summerfelt, S. T. and Sharrer, M. J. 2004. Design implication of carbon dioxide production within biofilters contained in recirculating salmonid culture system. Aquacultural Engineering. 32: 171-182.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L. and Stensel, H. D. 2003. Water reuse.Wastewater engineering:treatment and reuse.4 eds.NY: Metcalf & Eddy,Inc.,McGrawHill.
- Thoney, D.A. and W.J. Hargis. 1991. Monogenea (Platyhelminthes) as hazards for fish in confinement. In Annual Rev. of Fish Diseases. Pergamon Press, U.S.A.
- Timmons, B. M. and Losordo, T. M. 1994. Aquaculture water reuse system: Engineering design and management. Amsterdam: Elsevier.

- Timmons, M. B., Ebeling, J. M., Wheaton, F. W., Summerfelt, S. T. and Vinci, B. J. 2002. Recirculating Aquaculture Systems (Vol. 2nd ed. Ithaca). New York: Cayuga Aqua Ventures.
- Timmons, M. B., Holder, J. L. and Ebeling, J. M. 2006. Application of microbead biological filters. Aquacultural Engineering. 34: 332-343.
- Tseng, K. F. and Wu, K. L. 2004. The ammonia removal cycle for a submerged biofilter used in a recirculating eel culture system. Aquacultural Engineering. 31: 17-30.
- Watson, S. W., Bock, E., Harms, H. P., Koops, P. and Hooper, R. A. 1989. Nitrifying bacteria. Paper presented at the Bergey's Manual of Systematic Bacteriology.
- Wheaton, F. W., Hochheimer, J. N., Kaiser, G. E., Malone, R. F., Krones, M. J., Libey, G. S. and Easter, C. 1994. Nitrification filter design method. In M.B. Timmon and T.M. Losordo (eds.), Aquaculture water reuse systems: engineering design and management. Amsterdam: Elsevier
- Wheaton, W. F. 1977. Aquacultural Engineering. Canada : Wiley & Sons.
- Zhu, S. and Chen, S. 2001. Effects of organic carbon on nitrification rate in fixed film biofilters. Aquacultural Engineering. 25: 1-11.

ภาษาไทย

- กชพร กฤตยานันต์. 2554. การพัฒนาระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กสำหรับการเลี้ยงปลาน้ำจืด. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กมลพร ภวภูตานนท์. 2517. มารู้จักโรคปลากันเถอะ. กสิกร 47(3): 24-225.
- กรมประมง. 2535. ภาพปลาและสัตว์น้ำของไทย. กรุงเทพมหานคร : กรมประมง.
- กรมประมง, กระทรวงเกษตร และสหกรณ์. 2553. การป้องกันและกำจัดโรคปลา. กรุงเทพมหานคร: ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.
- กรรณิการ์ สิริสิงห์. 2522. เคมีของน้ำ น้ำโสโครก และการวิเคราะห์. กรุงเทพมหานคร: บริษัท ประยูร.
- กษิตศ หนูทอง. 2551. การบำบัดไนโตรเจนในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง. 16(เมษายน), 11-12.
- เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน. 2549. การเลี้ยงสัตว์น้ำ. Retrieved 20 มิถุนายน 2558, from <http://coursewares.mju.ac.th:81/e-learning47/section2/fa301/Lession/lesson8.htm>

- คณิต ไชยาคำ และยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร. 2537. แนวทางการป้องกันเพื่อลดผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมจากการพัฒนาการเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนา: สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งสงขลา. กรมประมง. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 27 หน้า.
- ชนินทร์ ทับทอง. 2554. วัสดุตัวกลางที่ใช้ในชุดบำบัดน้ำแบบตัวกลางเคลื่อนที่ รุ่นBCN-012 KLL. Retrieved 20 มิถุนายน 2558, from www.wassercare.com/fischcare/BCN012KLL.pdf
- ชลอ ลีมสุวรรณ และพรเลิศ จันทรรัชชกุล. 2547. อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- โชคชัย เหลืองรุจปราณีต. 2548. หลักการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โพรเพช. ทยากร สุวรรณรัตน์. 2552. การพัฒนาระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดความหนาแน่นสูงโดยผสมผสานตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 703 หน้า.
- ธีระ เกรอด. 2539. วิศวกรรมน้ำเสีย: การบำบัดทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นภาพร กิติมศักดิ์. 2541. การศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพน้ำระหว่างระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดที่มีตัวกรองชีวภาพแบบโอโอเดรัมและแบบได้น้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นฤภู จูประจักษ์. 2547. ประสิทธิภาพของการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกสำหรับเลี้ยงกุ้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นฤมล อัครเกษมณี. 2556. การเลี้ยงปลา. กรุงเทพมหานคร: โอเดียนสโตร์.
- นุกูล เจนประจักษ์. 2545. การเลี้ยงปลานิล. กรุงเทพมหานคร: โครงการหนังสือเกษตรชุมชน.
- พิทยา สมุทรเวช. 2537. คู่มือการเพาะเลี้ยงและการขยายพันธุ์ปลาจืด. กรุงเทพมหานคร: ส่งเสริมอาชีพธุรกิจ เพชรกระรัต.
- เพ็ญพิชญา พินิจธนาภักย์. 2556. การพัฒนาถังปฏิกรณ์ร่วมไนตริฟิเคชัน-ดีไนตริฟิเคชัน เพื่อบำบัดไนโตรเจนจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- เพ็ญพิชา สท้านวัตร. 2557. การบำบัดไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดผ่านกระบวนการร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน ด้วยตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภาณุ เทวรัตน์มณีกุล, สุจินต์ หนูขวัญ, และวีระ วัชรกรโยธิน. 2545. การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด. สมุทรปราการ: ศูนย์พัฒนาการประมงแห่งเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ สำนักงานฝ่ายฝึกอบรม.
- มนวิกานต์ ขจรบุญ. 2551. การคัดเลือกหัวเชื้อไนทริไฟอิงแบคทีเรียเพื่อการประยุกต์ใช้กับตัวกรองชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มนวิกานต์ ขจรบุญ, วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์, ตะวัน ลิ้มปิยากร, และสรวิศ เผ่าทองสุข. 2551. การคัดแยกหัวเชื้อไนทริไฟอิงแบคทีเรียและการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเค็ม. ในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 7, 1-9. 14-16 มีนาคม 2551 ณ สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย กรุงเทพมหานคร.
- มันสิน ตันตุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา. 2538. การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ. เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มานพ ตั้งตรงไพโรจน์, ภาณุ เทวรัตน์มณีกุล, พรรณศรี จริโมภาส, สุจินต์ หนูขวัญ, กำชัย ลาวัลย์วุฒิ, วีระ วัชรกรโยธิน , และวิมล จันทโรทัย. 2536. การพัฒนาการเพาะเลี้ยงปลานิล. เอกสารวิชาการฉบับที่ 23, 96 หน้า.
- ไมตรี ดวงสวัสดิ์ และจากรุวรรณ สมศิริ. 2528. คุณสมบัติน้ำและวิธีการวิเคราะห์สำหรับการวิจัยทางการประมง. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- รัชฎาพร ไชยศรี. 2556. คอลัมน์ร่วมย่อยตะกอน-ดีไนทริฟิเคชันสำหรับระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รุ่งนภา สุทธิศรี. 2549. ประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับการเลี้ยงกุ้งความหนาแน่นสูงในโรงเรือน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิรัช จิวแหยม. 2544. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคุณภาพน้ำและการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- วิลาสินี ไตรยราช. 2546. สภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดไนเตรตในน้ำทะเลด้วยระบบบำบัดไนเตรตแบบท่อสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิริวรรณ ศิลาภากุล. 2545. การกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้งโดยถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกที่มีการไหลวนแบบภายนอก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เศรษฐศักดิ์ ติวะนันท์. 2556. การกรองตะกอนแขวนลอยในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยแผ่นกรองชนิดวางเอียง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุธาสินี อ่วมจันทร์. 2546. การเปลี่ยนแปลงของกลุ่มแบคทีเรียในตัวกรองชีวภาพแบบไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันสำหรับการเพาะเลี้ยงทางน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุบัณฑิต นิมรัตน์. 2548. จุลชีววิทยาของน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อุดม เรืองนพคุณ. 2550. การเพาะพันธุ์และการเลี้ยงปลาไนล์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: อักษรสยามการพิมพ์.
- เอกชัย มาลาพล. 2551. การบำบัดไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้งโดยตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ก.1 วิธีวิเคราะห์แอมโมเนียรวม

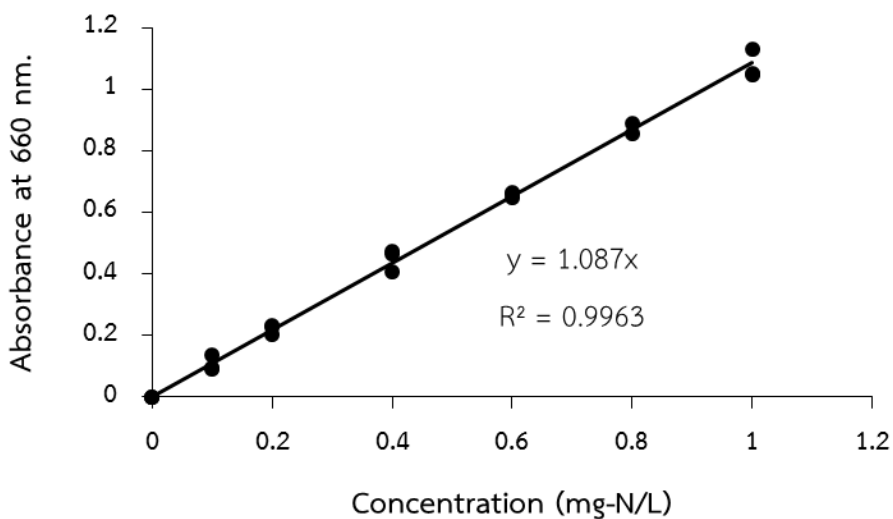
ในการวิเคราะห์แอมโมเนียรวมในน้ำ คือ การดัดแปลงวิธีการวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงจากวิธีของ Bower และ Holm- Hansen (1980) โดยมีขั้นตอนคือ เก็บตัวอย่างน้ำ 30 มล. มาทำการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C บรรจุและเก็บตัวอย่างน้ำที่กรองได้ในขวดพลาสติก ต่อมาจึงทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ โดยขั้นตอนในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำนั้นสามารถดำเนินการวิเคราะห์ได้ทันทีหลังจากเก็บตัวอย่างน้ำ หรือกรณีที่ไม่สามารถดำเนินการวิเคราะห์ได้ทันที ให้เก็บตัวอย่างน้ำแช่แข็งโดยควบคุมอุณหภูมิที่ -15°C

- การเตรียมสาร

1. สารละลายอัลคาไลน์ซิเตรต (Alkaline – citrate solution) อัตราส่วนที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย คือ ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH) ปริมาณ 18.5 ก. กับโซเดียมซิเตรต (Sodium citratedehydrate; $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ปริมาณ 100 ก. ในน้ำปราศจากไอออน (De-ionized water) โดยปรับปริมาตรเป็น 1 ล.
2. สารละลายซาลิไซเลตคะตะลิสต์ (Salicylate – catalyst solution) อัตราส่วนที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย คือ ละลายโซเดียมซาลิไซเลต (Sodium salicylate; $\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})\text{COONa}$) ปริมาณ 440 ก. กับโซเดียมไนโตรพรัสไซด์ (Sodium nitroprusside dehydrate; $\text{Na}_2\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ปริมาณ 0.28 ก. ลงในน้ำปราศจากไอออน โดยปรับปริมาตรเป็น 1 ล.
3. สารละลายอัลคาไลน์ไฮโปคลอไรต์ (Alkaline-hypochlorite solution) อัตราส่วนที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย คือผสมสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์กับสารละลายอัลคาไลน์ซิเตรต ในอัตราส่วน 1 ต่อ 9
4. สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodium hypochlorite solution) อัตราส่วนที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย คือ ใช้สารละลายไฮโปคลอไรต์ที่มีความเข้มข้น 1.5 นอร์มอล

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

เก็บปิเปตตัวอย่างน้ำปริมาตร 5 มล. ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมสารละลายซาลิไซเลตคะตะลิสต์ ปริมาตร 0.6 มล. และเติมสารละลายอัลคาไลน์ไฮโปคลอไรต์ ปริมาตร 1.0 มล. ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเขย่าให้สารทั้ง 2 ชนิดเข้ากัน นำหลอดทดลองเก็บไว้ในที่มืดและตั้งทิ้งไว้ 1 ชม. หรือไม่เกิน 3 ชม. ที่อุณหภูมิห้อง โดยที่แบลงค์ (Blank) จะใช้น้ำปราศจากไอออนที่มีการใส่สารเคมีเหมือนตัวอย่างน้ำ และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 640 หรือ 660 นาโนเมตร โดยตัวอย่างน้ำเป็นน้ำเค็มและน้ำจืดตามลำดับ ต่อมาเตรียมสารละลายแอมโมเนียมาตรฐาน (Standard ammonia solution) ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 และ 1.0 มก. ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากสารละลายสต็อกแอมโมเนีย (Stock ammonia solution) ที่ความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้กราฟมาตรฐานแสดงดังรูป ก-1



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานแอมโมเนียรวม

ก.2 วิธีวิเคราะห์ไนไตรต์

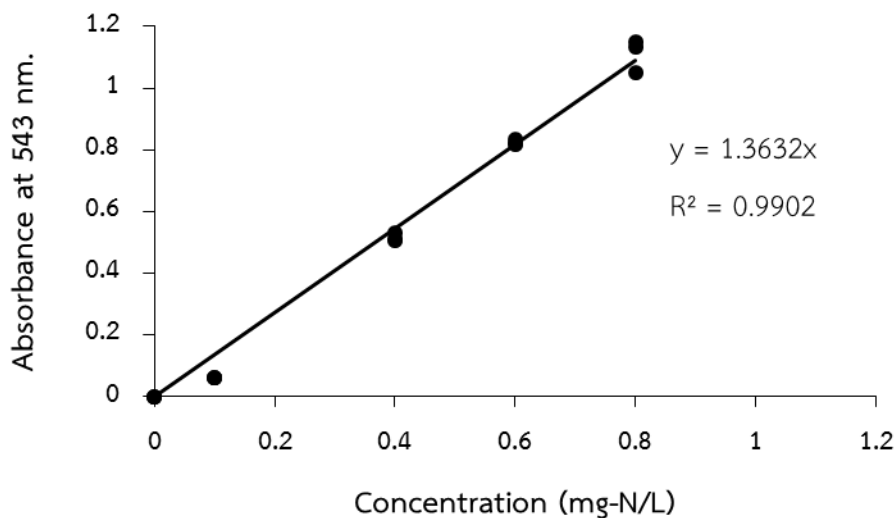
การวิเคราะห์ไนไตรต์ในน้ำ คือ การดัดแปลงวิธีการวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงจาก วิธีของ Strickland และ Parsons (1972) โดยมีขั้นตอนคือ เก็บตัวอย่างน้ำ 30 มล. มาทำการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C บรรจุและเก็บตัวอย่างน้ำที่กรองได้ในขวดพลาสติก ต่อมาจึงทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ โดยขั้นตอนในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำนั้นสามารถดำเนินการวิเคราะห์ได้ทันทีหลังจากเก็บตัวอย่างน้ำ หรือกรณีที่ไม่สามารถดำเนินการวิเคราะห์ได้ทันที ให้เก็บตัวอย่างน้ำแช่แข็งโดยควบคุมอุณหภูมิที่ -15°C

- การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายซัลฟานิลาไมด์ (Sulfanilamide solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายซัลฟานิลาไมด์ (Sulphanilamide; $\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2\text{O}$) ปริมาณ 5 ก. ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 50 มล. โดยปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน เป็น 500 มล.
2. สารละลายเอ็นเอ็นอีดี (Naphthylethylenediamine solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายเอ็นเอ็นอีดี (NED; N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride) 0.5 ก. ในน้ำปราศจากไอออน โดยปรับปริมาตรเป็น 500 มล.

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

เก็บปิเปตตัวอย่างน้ำปริมาตร 5 มล. ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมสารละลายซัลฟานิลาไมด์ ปริมาตร 0.1 มล. ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเขย่าให้สารเข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 2 นาทีแต่ไม่เกิน 10 นาที ต่อมาเติมสารละลายเอ็นเอ็นอีดีปริมาตร 0.1 มล. ลงในหลอดทดลอง จากนั้นเขย่าให้สารเข้ากัน และตั้งทิ้งไว้ 30 นาทีหรือไม่เกิน 2 ชม. ที่อุณหภูมิห้อง โดยที่แบลงค์ (Blank) จะใช้น้ำปราศจากไอออนที่มีการใส่สารเคมีเหมือนตัวอย่างน้ำและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 534 นาโนเมตร ต่อมาเตรียมสารละลายไนไตรต์มาตรฐาน (Standard nitrite solution) ที่ความเข้มข้น 0.06, 0.12, 0.18, 0.24 และ 0.30 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากสารละลายสต็อกไนไตรต์ (Stock nitrite solution) ที่ความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้กราฟมาตรฐานแสดงดังรูป ก-2

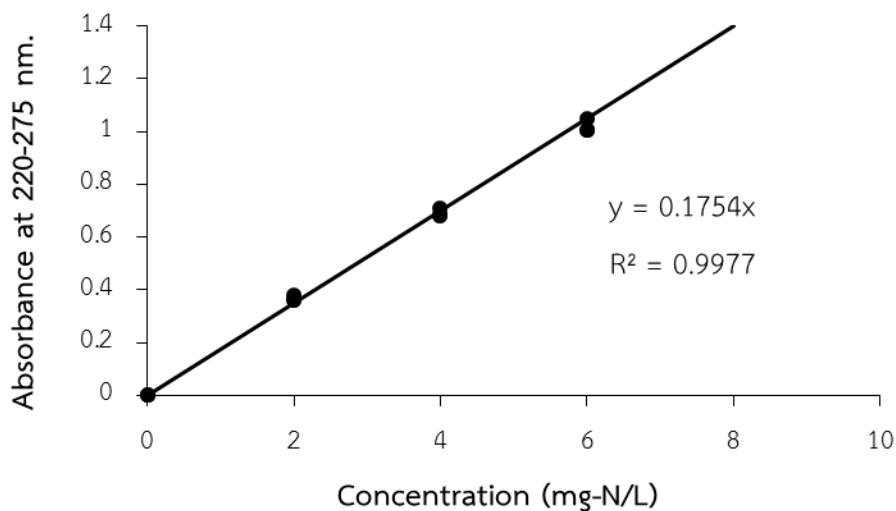


รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานไนโตรต์

ก.4 วิธีวิเคราะห์ไนเตรต

การวิเคราะห์ไนเตรตในน้ำ คือ การดัดแปลงวิธีการวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงจาก วิธีของ Standard Method (2005) โดยมีขั้นตอนคือ เก็บตัวอย่างน้ำ 30 มล. มาทำการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C บรรจุและเก็บตัวอย่างน้ำที่กรองได้ในขวดพลาสติก ต่อมาจึงทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ โดยขั้นตอนในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำนั้นสามารถดำเนินการวิเคราะห์ได้ทันทีหลังจากเก็บตัวอย่างน้ำ หรือกรณีที่ไม่สามารถดำเนินการวิเคราะห์ได้ทันที ให้เก็บตัวอย่างน้ำแช่แข็งโดยควบคุมอุณหภูมิที่ -15°C

การวิเคราะห์ไนเตรตในน้ำ โดยนำตัวอย่างน้ำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 220 และ 275 นาโนเมตร โดยที่แบลนค์ (Blank) จะใช้น้ำปราศจากไอออน ที่ไม่มีการเติมสารเคมีลงไปจากนั้นนำผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงทั้งสองค่าไปใช้คำนวณหาปริมาณไนเตรต ซึ่งค่าไนเตรตที่คำนวณได้ต้องนำไปลบด้วยปริมาณไนโตรต์ที่วิเคราะห์จากตัวอย่างน้ำเดียวกัน การวิเคราะห์ไนเตรตด้วยวิธีนี้จะมีปริมาณไนโตรต์รวมอยู่ด้วยและทำการเตรียมสารละลายไนเตรตมาตรฐาน (Standard nitrate solution) ที่ความเข้มข้น 0.8, 1.6, 2.4, 3.2 และ 4.0 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากสารละลายสต็อกไนเตรต (Stock nitrate solution) ที่ความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้กราฟมาตรฐานแสดงดังรูป ก-3



รูปที่ ก-3 กราฟมาตรฐานไนเตรต

ก.5 วิธีวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ

การวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ คือ การใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงจาก วิธีของ Standard Method (2005) โดยมีขั้นตอนคือ นำกระดาษกรอง GF/C ขนาด 47 มม. มาอบและชั่งน้ำหนักจนคงที่ ต่อมานำตัวอย่างน้ำมากรองผ่านกระดาษกรองและจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 – 105 °ซ เป็นเวลา 24 ชม. นำกระดาษกรองออกจากตู้อบและใส่ลงในโถดูดความชื้นจนกระดาษกรองเย็นตัวและชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่งจนได้น้ำหนักคงที่ เพื่อนำน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมาคำนวณหาปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำดังสมการที่ ก-1 ต่อไปนี้

ปริมาณความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยทั้งหมด (มก.ของแข็งแขวนลอย/ล.)

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

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพน้ำสำหรับการทดลองช่วงที่ 1 เพื่อศึกษาการเปรียบเทียบ
จลนพลศาสตร์อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกลางชีวภาพไนทริไฟเคชัน ที่มีการผ่านการใช้งานเป็น
ระยะเวลา 3 เดือน กับ ระยะเวลา 6 เดือน

ตารางที่ ข-1 การลดลงของแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 1, 2, 5, 10, 20, 30 และ 45 มก.ไนโตรเจน/ล.
โดยตัวกรองชีวภาพที่ใช้งานเป็นระยะเวลา 3 เดือนของครั้งที่ 1 (แต่ละความเข้มข้น
จะมีการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|-------|------------------|-------------------------------------|------|--------------|-------|------------------|-------------------------------------|------|
| | | | 5 มก.ไนโตรเจน/ล. | | | | | 10 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 24/12/2558 | 1830น | 0.50 | 4.86 | 0.26 | 24/12/2558 | 1830น | 0.50 | 9.06 | 0.13 |
| 24/12/2558 | 1930น | 1.50 | 4.39 | 0.57 | 24/12/2558 | 2000น | 2.00 | 7.38 | 0.51 |
| 24/12/2558 | 2000น | 2.00 | 3.42 | 0.24 | 24/12/2558 | 2030น | 2.50 | 8.13 | 0.65 |
| 24/12/2558 | 2215น | 4.25 | 2.28 | 0.53 | 24/12/2558 | 2215น | 4.25 | 7.18 | 0.66 |
| 25/12/2558 | 200น | 8.00 | 1.39 | 0.37 | 25/12/2558 | 300น | 9.00 | 6.43 | 0.32 |
| 25/12/2558 | 400น | 10.00 | 1.39 | 0.39 | 25/12/2558 | 630น | 12.50 | 5.98 | 0.24 |
| | | | | | 25/12/2558 | 900น | 15.00 | 2.88 | 0.22 |
| | | | | | 25/12/2558 | 1200น | 18.00 | 2.39 | 0.11 |

ตารางที่ ข-1 การลดลงของแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 1, 2, 5, 10, 20, 30 และ 45 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยตัวกรองชีวภาพที่ใช้งานเป็นระยะเวลา 3 เดือนของครั้งที่ 1 (แต่ละความเข้มข้นจะมีการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ) (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|-------|
| | | | 20 มก.ไนโตรเจน/ล. | | | | | 30 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 24/12/2558 | 20:00 น. | 2.00 | 13.02 | 1.20 | 24/12/2558 | 21:00 น. | 3.00 | 28.75 | 10.70 |
| 24/12/2558 | 20:30 น. | 2.50 | 12.21 | 1.45 | 25/12/2558 | 3:00 น. | 9.00 | 25.06 | 6.84 |
| 24/12/2558 | 21:00 น. | 3.00 | 11.90 | 1.07 | 25/12/2558 | 6:30 น. | 12.50 | 21.97 | 1.71 |
| 25/12/2558 | 7:00 น. | 13.00 | 11.48 | 3.08 | 25/12/2558 | 15:00 น. | 21.00 | 20.62 | 0.38 |
| 25/12/2558 | 10:00 น. | 16.00 | 7.48 | 1.02 | 25/12/2558 | 21:30 น. | 27.50 | 17.53 | 1.71 |
| | | | | | 26/12/2558 | 6:00 น. | 36.00 | 14.51 | 0.95 |
| | | | | | 26/12/2558 | 9:00 น. | 39.00 | 13.32 | 0.84 |
| 24/12/2558 | 20:00 น. | 2.00 | 13.02 | 1.20 | 24/12/2558 | 21:00 น. | 3.00 | 28.75 | 10.70 |

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|
| | | | 45 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 24/12/2558 | 18:30 น. | 0.50 | 36.02 | 0.45 |
| 24/12/2558 | 22:15 น. | 4.25 | 34.56 | 0.63 |
| 25/12/2558 | 4:00 น. | 10.00 | 28.68 | 1.74 |
| 25/12/2558 | 12:00 น. | 18.00 | 28.36 | 1.31 |
| 25/12/2558 | 19:00 น. | 25.00 | 27.43 | 1.55 |
| 26/12/2558 | 6:00 น. | 36.00 | 25.19 | 2.15 |
| 26/12/2558 | 20:00 น. | 50.00 | 20.73 | 2.70 |

ตารางที่ ข-2 การลดลงของแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 1, 2, 5, 10, 20, 30 และ 45 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยตัวกรองชีวภาพที่ใช้งานเป็นระยะเวลา 3 เดือนของครั้งที่ 2 (แต่ละความเข้มข้นจะมีการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|---------|-------------------|-------------------------------------|------|--------------|---------|-------------------|-------------------------------------|------|
| | | | 1 มก.ไนโตรเจน/ล. | | | | | 2 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 28/12/2558 | 2:30 น. | 0.50 | 0.74 | 0.03 | 28/12/2558 | 2:30 น. | 0.50 | 1.78 | 0.02 |
| 28/12/2558 | 3:30 น. | 1.50 | 0.69 | 0.01 | 28/12/2558 | 3:30 น. | 1.50 | 1.46 | 0.04 |
| 28/12/2558 | 4:30 น. | 2.50 | 0.68 | 0.01 | 28/12/2558 | 4:00 น. | 2.00 | 1.45 | 0.05 |
| 28/12/2558 | 5:00 น. | 3.00 | 0.65 | 0.09 | 28/12/2558 | 4:30 น. | 2.50 | 1.38 | 0.04 |
| 28/12/2558 | 6:00 น. | 4.00 | 0.61 | 0.04 | 28/12/2558 | 6:00 น. | 4.00 | 0.85 | 0.07 |

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|
| | | | 5 มก.ไนโตรเจน/ล. | | | | | 10 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 28/12/2558 | 3:00 น. | 1.00 | 4.21 | 0.20 | 28/12/2558 | 3:00 น. | 3.00 | 7.55 | 0.19 |
| 28/12/2558 | 4:00 น. | 2.00 | 4.20 | 0.05 | 28/12/2558 | 8:00 น. | 6.00 | 7.28 | 0.36 |
| 28/12/2558 | 6:00 น. | 4.00 | 4.00 | 0.07 | 28/12/2558 | 11:00 น. | 9.00 | 6.29 | 0.05 |
| 28/12/2558 | 7:00 น. | 5.00 | 3.90 | 0.29 | 28/12/2558 | 14:00 น. | 12.00 | 5.71 | 0.27 |
| 28/12/2558 | 8:00 น. | 6.00 | 3.28 | 0.09 | 28/12/2558 | 17:00 น. | 15.00 | 5.29 | 0.17 |
| 28/12/2558 | 10:00 น. | 8.00 | 3.13 | 0.15 | 28/12/2558 | 21:00 น. | 19.00 | 4.63 | 0.09 |
| 28/12/2558 | 11:00 น. | 9.00 | 2.76 | 0.15 | 28/12/2558 | 23:00 น. | 21.00 | 4.54 | 0.69 |
| 28/12/2558 | 12:00 น. | 10.00 | 2.59 | 0.10 | 29/12/2558 | 11:00 น. | 33.00 | 2.90 | 0.33 |
| | | | | | 29/12/2558 | 14:00 น. | 36.00 | 2.32 | 0.64 |
| | | | | | 29/12/2558 | 17:00 น. | 39.00 | 1.95 | 0.04 |
| | | | | | 29/12/2558 | 20:00 น. | 42.00 | 1.13 | 0.20 |

ตารางที่ ข-2 การลดลงของแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 1, 2, 5, 10, 20, 30 และ 45 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยตัวกรองชีวภาพที่ใช้งานเป็นระยะเวลา 3 เดือนของครั้งที่ 2 (แต่ละความเข้มข้นจะมีการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ) (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|-------|
| | | | 20 มก.ไนโตรเจน/ล. | | | | | 30 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 28/12/2558 | 3:00 น. | 3.00 | 14.69 | 0.70 | 28/12/2558 | 3:00 น. | 3.00 | 35.16 | 2.61 |
| 28/12/2558 | 11:00 น. | 9.00 | 13.74 | 0.52 | 28/12/2558 | 14:00 น. | 12.00 | 29.20 | 0.71 |
| 28/12/2558 | 14:00 น. | 12.00 | 12.35 | 0.59 | 28/12/2558 | 21:00 น. | 19.00 | 27.43 | 2.51 |
| 28/12/2558 | 17:00 น. | 15.00 | 11.99 | 1.77 | 29/12/2558 | 8:00 น. | 30.00 | 27.57 | 8.84 |
| 28/12/2558 | 21:00 น. | 19.00 | 10.80 | 0.33 | 29/12/2558 | 11:00 น. | 33.00 | 26.77 | 6.19 |
| 28/12/2558 | 23:00 น. | 21.00 | 10.58 | 0.29 | 29/12/2558 | 14:00 น. | 36.00 | 26.48 | 11.24 |
| 29/12/2558 | 11:00 น. | 33.00 | 7.18 | 0.29 | | | | | |

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|
| | | | 45 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 28/12/2558 | 6:00 น. | 4.00 | 43.83 | 3.71 |
| 28/12/2558 | 14:00 น. | 12.00 | 33.87 | 0.74 |
| 28/12/2558 | 22:00 น. | 20.00 | 31.01 | 3.25 |
| 29/12/2558 | 10:00 น. | 32.00 | 28.87 | 1.16 |
| 29/12/2558 | 14:00 น. | 36.00 | 20.52 | 3.66 |
| 29/12/2558 | 18:00 น. | 40.00 | 17.43 | 2.21 |

ตารางที่ ข-3 การลดลงของแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 1, 2, 5, 10, 20, 30 และ 45 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยตัวกรองชีวภาพที่ใช้งานเป็นระยะเวลา 3 เดือนของครั้งที่ 3 (แต่ละความเข้มข้นจะมีการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|---------|-------------------|-------------------------------------|------|--------------|---------|-------------------|-------------------------------------|------|
| | | | 1 มก.ไนโตรเจน/ล. | | | | | 2 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/1/2559 | 2:30 น. | 0.50 | 0.31 | 0.05 | 1/1/2559 | 2:30 น. | 0.50 | 1.24 | 0.02 |
| 1/1/2559 | 3:00 น. | 1.00 | 0.22 | 0.02 | 1/1/2559 | 3:00 น. | 1.00 | 1.21 | 0.03 |
| 1/1/2559 | 3:30 น. | 1.50 | 0.16 | 0.01 | 1/1/2559 | 3:30 น. | 1.50 | 1.17 | 0.03 |
| 1/1/2559 | 4:00 น. | 2.00 | 0.10 | 0.02 | 1/1/2559 | 4:00 น. | 2.00 | 0.95 | 0.08 |
| 1/1/2559 | 4:30 น. | 2.50 | 0.03 | 0.03 | 1/1/2559 | 4:30 น. | 2.50 | 0.77 | 0.04 |
| 1/1/2559 | 5:00 น. | 3.00 | 0.00 | 0.01 | 1/1/2559 | 5:00 น. | 3.00 | 0.95 | 0.12 |
| 1/1/2559 | 5:30 น. | 3.50 | 0.00 | 0.01 | 1/1/2559 | 5:30 น. | 3.50 | 0.80 | 0.05 |

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|
| | | | 5 มก.ไนโตรเจน/ล. | | | | | 10 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/1/2559 | 3:00 น. | 1.00 | 3.59 | 0.10 | 1/1/2559 | 5:00 น. | 3.00 | 6.44 | 0.18 |
| 1/1/2559 | 4:00 น. | 2.00 | 3.06 | 0.22 | 1/1/2559 | 12:00 น. | 10.00 | 4.45 | 0.32 |
| 1/1/2559 | 5:00 น. | 3.00 | 2.52 | 0.04 | 1/1/2559 | 13:00 น. | 11.00 | 4.04 | 0.49 |
| 1/1/2559 | 7:00 น. | 5.00 | 2.34 | 0.01 | 1/1/2559 | 17:00 น. | 15.00 | 3.14 | 0.21 |
| 1/1/2559 | 13:00 น. | 11.00 | 1.13 | 0.10 | 1/1/2559 | 20:00 น. | 18.00 | 1.56 | 0.26 |
| 1/1/2559 | 14:00 น. | 12.00 | 1.11 | 0.13 | 1/1/2559 | 23:00 น. | 21.00 | 0.74 | 0.39 |
| | | | | | 2/1/2559 | 2:00 น. | 24.00 | 0.19 | 0.30 |
| | | | | | 2/1/2559 | 11:00 น. | 33.00 | 0.18 | 0.18 |

ตารางที่ ข-3 การลดลงของแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 1, 2, 5, 10, 20, 30 และ 45 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยตัวกรองชีวภาพที่ใช้งานเป็นระยะเวลา 3 เดือนของครั้งที่ 3 (แต่ละความเข้มข้นจะมีการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ) (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|
| | | | 20 มก.ไนโตรเจน/ล. | | | | | 30 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/1/2559 | 12:00 น. | 10.00 | 26.92 | 0.81 | 1/1/2559 | 5:00 น. | 3.00 | 22.38 | 0.86 |
| 1/1/2559 | 13:00 น. | 11.00 | 22.16 | 1.52 | 1/1/2559 | 12:00 น. | 10.00 | 20.08 | 1.15 |
| 1/1/2559 | 17:00 น. | 15.00 | 22.00 | 1.46 | 1/1/2559 | 16:00 น. | 14.00 | 19.58 | 1.04 |
| 1/1/2559 | 20:00 น. | 18.00 | 20.05 | 2.47 | 1/1/2559 | 20:00 น. | 18.00 | 16.30 | 0.85 |
| 1/1/2559 | 23:00 น. | 21.00 | 12.22 | 1.71 | 1/1/2559 | 23:00 น. | 21.00 | 14.78 | 0.33 |
| 2/1/2559 | 2:00 น. | 24.00 | 9.74 | 1.25 | 2/1/2559 | 2:00 น. | 24.00 | 14.68 | 0.70 |
| 2/1/2559 | 11:00 น. | 33.00 | 7.84 | 0.71 | 2/1/2559 | 11:00 น. | 33.00 | 11.12 | 0.47 |
| 2/1/2559 | 14:00 น. | 36.00 | 6.66 | 0.98 | 2/1/2559 | 14:00 น. | 36.00 | 10.52 | 0.43 |
| 2/1/2559 | 18:00 น. | 40.00 | 5.07 | 1.65 | 2/1/2559 | 18:00 น. | 40.00 | 8.48 | 0.79 |
| 2/1/2559 | 20:00 น. | 42.00 | 2.77 | 0.12 | 2/1/2559 | 20:00 น. | 42.00 | 8.38 | 1.79 |

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|
| | | | 45 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/1/2559 | 13:00 น. | 11.00 | 31.02 | 0.69 |
| 1/1/2559 | 17:00 น. | 15.00 | 26.60 | 1.49 |
| 1/1/2559 | 21:00 น. | 19.00 | 24.83 | 1.33 |
| 2/1/2559 | 1:00 น. | 23.00 | 27.16 | 3.37 |
| 2/1/2559 | 13:00 น. | 35.00 | 20.76 | 0.44 |
| 2/1/2559 | 18:00 น. | 40.00 | 18.47 | 0.91 |

ตารางที่ ข-4 การลดลงของแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 1, 2, 5, 10, 20, 30 และ 45 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยตัวกรองชีวภาพที่ใช้งานเป็นระยะเวลา 6 เดือนของครั้งที่ 1 (แต่ละความเข้มข้นจะมีการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|
| | | | 2 มก.ไนโตรเจน/ล. | | | | | 5 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 24/12/2558 | 18:30 น. | 0.50 | 2.12 | 0.03 | 24/12/2558 | 18:00 น. | 0.00 | 4.80 | 0.61 |
| 24/12/2558 | 20:00 น. | 2.00 | 1.46 | 0.04 | 24/12/2558 | 20:00 น. | 2.00 | 3.93 | 0.78 |
| 24/12/2558 | 20:30 น. | 2.50 | 1.33 | 0.06 | 24/12/2558 | 20:30 น. | 2.50 | 3.17 | 0.28 |
| | | | | | 24/12/2558 | 21:00 น. | 3.00 | 2.55 | 0.35 |
| | | | | | 24/12/2558 | 22:15 น. | 4.25 | 2.48 | 0.26 |
| | | | | | 25/12/2558 | 2:00 น. | 8.00 | 1.66 | 0.57 |
| | | | | | 25/12/2558 | 3:00 น. | 9.00 | 1.06 | 0.11 |

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|
| | | | 10 มก.ไนโตรเจน/ล. | | | | | 20 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 24/12/2558 | 18:30 น. | 0.50 | 7.29 | 0.44 | 24/12/2558 | 18:30 น. | 0.50 | 17.58 | 0.48 |
| 24/12/2558 | 20:00 น. | 2.00 | 7.05 | 0.43 | 24/12/2558 | 21:00 น. | 3.00 | 13.86 | 2.00 |
| 24/12/2558 | 22:15 น. | 4.25 | 6.23 | 0.30 | 25/12/2558 | 7:00 น. | 13.00 | 12.50 | 0.60 |
| 25/12/2558 | 6:30 น. | 12.50 | 4.42 | 0.16 | 25/12/2558 | 13:00 น. | 19.00 | 6.74 | 2.70 |

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|
| | | | 30 มก.ไนโตรเจน/ล. | | | | | 45 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 24/12/2558 | 21:00 น. | 3.00 | 28.97 | 5.62 | 24/12/2558 | 18:00 น. | 0.00 | 40.23 | 0.38 |
| 25/12/2558 | 3:00 น. | 9.00 | 16.90 | 1.88 | 24/12/2558 | 22:15 น. | 4.25 | 36.74 | 1.52 |
| 25/12/2558 | 12:00 น. | 18.00 | 18.89 | 0.40 | 25/12/2558 | 8:00 น. | 14.00 | 29.49 | 0.98 |
| 25/12/2558 | 21:30 น. | 27.50 | 14.27 | 1.67 | | | | | |

ตารางที่ ข-5 การลดลงของแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 1, 2, 5, 10, 20, 30 และ 45 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยตัวกรองชีวภาพที่ใช้งานเป็นระยะเวลา 6 เดือนของครั้งที่ 2 (แต่ละความเข้มข้นจะมีการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|
| | | | 1 มก.ไนโตรเจน/ล. | | | | | 2 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 28/12/2558 | 2:30 น. | 0.50 | 0.62 | 0.01 | 28/12/2558 | 2:30 น. | 0.50 | 2.75 | 0.02 |
| 28/12/2558 | 3:00 น. | 1.00 | 0.51 | 0.03 | 28/12/2558 | 3:00 น. | 1.00 | 2.14 | 0.11 |
| 28/12/2558 | 3:30 น. | 1.50 | 0.45 | 0.05 | 28/12/2558 | 3:30 น. | 1.50 | 1.99 | 0.03 |
| 28/12/2558 | 4:00 น. | 2.00 | 0.40 | 0.07 | 28/12/2558 | 4:00 น. | 2.00 | 1.97 | 0.08 |
| 28/12/2558 | 4:30 น. | 2.50 | 0.23 | 0.01 | 28/12/2558 | 4:30 น. | 2.50 | 1.98 | 0.03 |
| 28/12/2558 | 5:00 น. | 3.00 | 0.21 | 0.04 | 28/12/2558 | 5:00 น. | 3.00 | 1.96 | 0.04 |
| 28/12/2558 | 5:30 น. | 3.50 | 0.17 | 0.01 | 28/12/2558 | 5:30 น. | 3.50 | 2.09 | 0.12 |
| 28/12/2558 | 6:00 น. | 4.00 | 0.15 | 0.11 | | | | | |
| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | 5 มก.ไนโตรเจน/ล. | | | | | 10 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 28/12/2558 | 3:00 น. | 1.00 | 3.96 | 0.09 | 28/12/2558 | 5:00 น. | 3.00 | 7.11 | 0.02 |
| 28/12/2558 | 4:00 น. | 2.00 | 3.75 | 0.05 | 28/12/2558 | 8:00 น. | 6.00 | 6.37 | 0.19 |
| 28/12/2558 | 5:00 น. | 3.00 | 2.96 | 0.20 | 28/12/2558 | 11:00 น. | 9.00 | 5.15 | 0.10 |
| 28/12/2558 | 7:00 น. | 5.00 | 2.71 | 0.24 | 28/12/2558 | 14:00 น. | 12.00 | 4.28 | 0.32 |
| 28/12/2558 | 8:00 น. | 6.00 | 2.14 | 0.09 | 28/12/2558 | 17:00 น. | 15.00 | 2.99 | 0.55 |
| 28/12/2558 | 10:00 น. | 8.00 | 1.91 | 0.01 | 28/12/2558 | 21:00 น. | 19.00 | 1.38 | 0.18 |
| | | | | | 28/12/2558 | 23:00 น. | 21.00 | 0.85 | 0.34 |
| | | | | | 29/12/2558 | 11:00 น. | 33.00 | 0.80 | 0.32 |
| | | | | | 29/12/2558 | 14:00 น. | 36.00 | 0.61 | 0.08 |

ตารางที่ ข-5 การลดลงของแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 1, 2, 5, 10, 20, 30 และ 45 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยตัวกรองชีวภาพที่ใช้งานเป็นระยะเวลา 6 เดือนของครั้งที่ 2 (แต่ละความเข้มข้นจะมีการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ) (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|
| | | | 20 มก.ไนโตรเจน/ล. | | | | | 30 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 28/12/2558 | 5:00 น. | 3.00 | 15.05 | 0.25 | 28/12/2558 | 8:00 น. | 6.00 | 25.21 | 0.65 |
| 28/12/2558 | 8:00 น. | 6.00 | 13.70 | 0.51 | 28/12/2558 | 11:00 น. | 9.00 | 25.14 | 6.52 |
| 28/12/2558 | 11:00 น. | 9.00 | 12.79 | 0.14 | 28/12/2558 | 14:00 น. | 12.00 | 22.26 | 1.56 |
| 28/12/2558 | 14:00 น. | 12.00 | 12.34 | 0.50 | 28/12/2558 | 21:00 น. | 19.00 | 20.95 | 1.27 |
| 28/12/2558 | 17:00 น. | 15.00 | 9.44 | 0.14 | 28/12/2558 | 23:00 น. | 21.00 | 20.79 | 5.06 |
| 28/12/2558 | 21:00 น. | 19.00 | 8.55 | 0.18 | 29/12/2558 | 11:00 น. | 33.00 | 19.16 | 3.44 |
| 28/12/2558 | 23:00 น. | 21.00 | 8.54 | 0.49 | 29/12/2558 | 14:00 น. | 36.00 | 12.15 | 0.41 |
| 29/12/2558 | 8:00 น. | 30.00 | 6.22 | 0.43 | 29/12/2558 | 17:00 น. | 39.00 | 10.92 | 3.17 |
| 29/12/2558 | 11:00 น. | 33.00 | 5.88 | 2.49 | | | | | |
| 29/12/2558 | 20:00 น. | 42.00 | 3.53 | 0.40 | | | | | |

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|
| | | | 45 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 28/12/2558 | 6:00 น. | 4.00 | 39.17 | 1.07 |
| 28/12/2558 | 14:00 น. | 12.00 | 36.77 | 2.48 |
| 28/12/2558 | 22:00 น. | 20.00 | 29.02 | 3.87 |
| 29/12/2558 | 10:00 น. | 32.00 | 25.89 | 1.03 |
| 29/12/2558 | 14:00 น. | 36.00 | 23.92 | 3.23 |
| 29/12/2558 | 18:00 น. | 40.00 | 19.83 | 2.63 |

ตารางที่ ข-6 การลดลงของแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 1, 2, 5, 10, 20, 30 และ 45 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยตัวกรองชีวภาพที่ใช้งานเป็นระยะเวลา 6 เดือนของครั้งที่ 3 (แต่ละความเข้มข้นจะมีการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|---------|-------------------|-------------------------------------|------|--------------|---------|-------------------|-------------------------------------|------|
| | | | 1 มก.ไนโตรเจน/ล. | | | | | 2 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/1/2559 | 2:30 น. | 0.50 | 0.29 | 0.02 | 1/1/2559 | 2:30 น. | 0.50 | 1.15 | 0.03 |
| 1/1/2559 | 3:00 น. | 1.00 | 0.18 | 0.05 | 1/1/2559 | 3:00 น. | 1.00 | 0.94 | 0.03 |
| 1/1/2559 | 3:30 น. | 1.50 | 0.06 | 0.02 | 1/1/2559 | 3:30 น. | 1.50 | 0.88 | 0.05 |
| 1/1/2559 | 4:30 น. | 2.50 | 0.00 | 0.01 | 1/1/2559 | 4:00 น. | 2.00 | 0.76 | 0.01 |
| 1/1/2559 | 5:00 น. | 3.50 | 0.03 | 0.06 | 1/1/2559 | 4:30 น. | 2.50 | 0.78 | 0.05 |

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|
| | | | 5 มก.ไนโตรเจน/ล. | | | | | 10 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/1/2559 | 3:00 น. | 1.00 | 3.30 | 3.19 | 1/1/2559 | 5:00 น. | 3.00 | 6.75 | 0.43 |
| 1/1/2559 | 4:00 น. | 2.00 | 3.70 | 3.70 | 1/1/2559 | 12:00 น. | 10.00 | 4.51 | 0.19 |
| 1/1/2559 | 5:00 น. | 3.00 | 2.02 | 1.99 | 1/1/2559 | 16:00 น. | 14.00 | 4.24 | 0.25 |
| 1/1/2559 | 6:00 น. | 4.00 | 1.62 | 1.89 | 1/1/2559 | 17:00 น. | 15.00 | 2.51 | 0.51 |
| 1/1/2559 | 12:00 น. | 10.00 | 0.62 | 0.62 | 1/1/2559 | 20:00 น. | 18.00 | 0.67 | 0.63 |
| 1/1/2559 | 13:00 น. | 11.00 | 0.45 | 0.38 | 1/1/2559 | 23:00 น. | 21.00 | 0.12 | 0.21 |
| 1/1/2559 | 15:00 น. | 13.00 | 0.39 | 0.34 | | | | | |
| 1/1/2559 | 16:00 น. | 14.00 | 0.33 | 1.77 | | | | | |

ตารางที่ ข-6 การลดลงของแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 1, 2, 5, 10, 20, 30 และ 45 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยตัวกรองชีวภาพที่ใช้งานเป็นระยะเวลา 6 เดือนของครั้งที่ 3 (แต่ละความเข้มข้นจะมีการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ) (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|
| | | | 20 มก.ไนโตรเจน/ล. | | | | | 30 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/1/2559 | 17:00 น. | 15.00 | 20.07 | 7.21 | 1/1/2559 | 17:00 น. | 15.00 | 21.57 | 1.91 |
| 1/1/2559 | 20:00 น. | 18.00 | 19.36 | 4.90 | 1/1/2559 | 20:00 น. | 18.00 | 17.17 | 0.90 |
| 1/1/2559 | 23:00 น. | 21.00 | 13.37 | 2.77 | 1/1/2559 | 23:00 น. | 21.00 | 14.15 | 1.19 |
| 2/1/2559 | 2:00 น. | 24.00 | 11.85 | 0.34 | 2/1/2559 | 2:00 น. | 24.00 | 12.66 | 0.76 |
| 2/1/2559 | 11:00 น. | 33.00 | 7.04 | 0.24 | 2/1/2559 | 11:00 น. | 33.00 | 8.58 | 0.48 |
| 2/1/2559 | 14:00 น. | 36.00 | 6.27 | 0.49 | 2/1/2559 | 14:00 น. | 36.00 | 8.24 | 0.93 |
| 2/1/2559 | 18:00 น. | 40.00 | 6.42 | 0.62 | 2/1/2559 | 20:00 น. | 42.00 | 8.13 | 0.73 |

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | ปริมาณแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|----------|-------------------|-------------------------------------|------|
| | | | 45 มก.ไนโตรเจน/ล. | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/1/2559 | 13:00 น. | 11.00 | 32.85 | 1.69 |
| 1/1/2559 | 21:00 น. | 19.00 | 31.16 | 1.40 |
| 2/1/2559 | 13:00 น. | 35.00 | 30.55 | 6.99 |
| 2/1/2559 | 18:00 น. | 40.00 | 21.36 | 0.74 |

ตารางที่ ข-7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณน้ำ อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณตัวกรองชีวภาพและความเข้มข้นของแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ใช้งานเป็นระยะเวลา 3 เดือน ทั้ง 3 ครั้ง

| | ครั้งที่ 1 | | | | | ครั้งที่ 2 | | | | | ครั้งที่ 3 | | | | |
|------|---|---|--|---|---|--|---|---|--|---|---|--|---|---|--|
| | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณน้ำ (มก.ไนโตรเจน/ลิตรของน้ำ) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณตัวกรอง (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) | ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณน้ำ (มก.ไนโตรเจน/ลิตรของน้ำ) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณตัวกรอง (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) | ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณน้ำ (มก.ไนโตรเจน/ลิตรของน้ำ) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณตัวกรอง (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) | ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณน้ำ (มก.ไนโตรเจน/ลิตรของน้ำ) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณตัวกรอง (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) | ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณน้ำ (มก.ไนโตรเจน/ลิตรของน้ำ) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณตัวกรอง (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) | ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) |
| 0.56 | 1.68 | 8.98 | 0.13 | 0.40 | 0.33 | 0.04 | 0.11 | 0.72 | | | | | | | |
| 0.60 | 1.79 | 8.99 | 0.13 | 0.39 | 0.34 | 0.07 | 0.21 | 0.72 | | | | | | | |
| 0.34 | 1.01 | 9.21 | 0.18 | 0.53 | 0.42 | 0.07 | 0.21 | 0.77 | | | | | | | |
| 0.25 | 0.76 | 11.93 | 0.13 | 0.40 | 1.21 | 0.17 | 0.50 | 1.76 | | | | | | | |
| 0.46 | 1.38 | 12.84 | 0.15 | 0.44 | 1.24 | 0.21 | 0.62 | 1.78 | | | | | | | |
| 0.47 | 1.42 | 14.30 | 0.25 | 0.76 | 1.26 | 0.22 | 0.67 | 1.80 | | | | | | | |
| 0.82 | 2.46 | 35.63 | 0.49 | 1.46 | 3.50 | 0.11 | 0.32 | 4.08 | | | | | | | |
| 1.03 | 3.10 | 36.51 | 0.56 | 1.67 | 3.58 | 0.07 | 0.22 | 4.11 | | | | | | | |
| 0.59 | 1.77 | 35.91 | 0.57 | 1.71 | 3.69 | 0.06 | 0.19 | 4.44 | | | | | | | |
| | | | 0.31 | 0.93 | 6.23 | 0.18 | 0.54 | 7.33 | | | | | | | |

ตารางที่ ข-7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณน้ำ อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณตัวกรองชีวภาพและความเข้มข้นของแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ใช้งานเป็นระยะเวลา 3 เดือน ทั้ง 3 ครั้ง (ต่อ)

| ครั้งที่ 1 | | ครั้งที่ 2 | | ครั้งที่ 3 | |
|---|---|---|---|---|---|
| อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณตัวกรอง (มก.ไนโตรเจน/ลิตรของตัวกรอง) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณตัวกรอง (มก.ไนโตรเจน/ลิตรของตัวกรอง) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณตัวกรอง (มก.ไนโตรเจน/ลิตรของตัวกรอง) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณตัวกรอง (มก.ไนโตรเจน/ลิตรของตัวกรอง) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณตัวกรอง (มก.ไนโตรเจน/ลิตรของตัวกรอง) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณตัวกรอง (มก.ไนโตรเจน/ลิตรของตัวกรอง) |
| ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) | ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) | ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) | ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) | ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) | ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) |
| 0.32 | 0.95 | 0.32 | 0.95 | 0.23 | 0.68 |
| 0.25 | 0.76 | 0.25 | 0.76 | 0.22 | 0.67 |
| 0.72 | 2.17 | 0.72 | 2.17 | 0.14 | 0.42 |
| 0.96 | 2.87 | 0.96 | 2.87 | 0.26 | 0.79 |
| 0.64 | 1.93 | 0.64 | 1.93 | 0.33 | 0.99 |
| | | | | 0.46 | 1.39 |
| | | | | 0.36 | 1.07 |
| | | | | 0.65 | 1.96 |
| | | | | 0.88 | 2.65 |
| | | | | 0.57 | 1.70 |
| | | | | 0.95 | 2.86 |
| | | | | | 7.64 |
| | | | | | 7.67 |
| | | | | | 14.23 |
| | | | | | 14.34 |
| | | | | | 15.49 |
| | | | | | 32.45 |
| | | | | | 35.33 |
| | | | | | 37.67 |
| | | | | | 41.39 |
| | | | | | 42.00 |
| | | | | | 48.09 |

ตารางที่ ข-8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณน้ำ อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณตัวกรองชีวภาพและความเข้มข้นของแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ใช้งานเป็นระยะเวลา 6 เดือน ทั้ง 3 ครั้ง

| อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณน้ำ (มก.ไนโตรเจน/ลิตรของน้ำ) | ครั้งที่ 1 | | | ครั้งที่ 2 | | | ครั้งที่ 3 | | |
|---|---|--|---|---|--|---|---|--|--|
| | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณตัวกรอง (มก.ไนโตรเจน/ลิตรของตัวกรอง) | ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณน้ำ (มก.ไนโตรเจน/ลิตรของน้ำ) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณตัวกรอง (มก.ไนโตรเจน/ลิตรของตัวกรอง) | ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณน้ำ (มก.ไนโตรเจน/ลิตรของน้ำ) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณตัวกรอง (มก.ไนโตรเจน/ลิตรของตัวกรอง) | ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) | |
| 0.40 | 1.19 | 2.10 | 0.11 | 0.34 | 0.61 | 0.23 | 0.70 | 0.28 | |
| 0.38 | 1.13 | 2.11 | 0.20 | 0.59 | 0.62 | 0.23 | 0.69 | 0.29 | |
| 0.43 | 1.30 | 2.15 | 0.12 | 0.37 | 0.62 | 0.24 | 0.71 | 0.31 | |
| 0.52 | 1.57 | 4.41 | 0.29 | 0.87 | 3.85 | 0.23 | 0.70 | 1.12 | |
| 0.57 | 1.71 | 4.48 | 0.39 | 1.18 | 4.00 | 0.25 | 0.74 | 1.15 | |
| 0.67 | 2.02 | 5.50 | 0.28 | 0.83 | 4.02 | 0.27 | 0.80 | 1.18 | |
| 0.34 | 1.02 | 7.25 | 0.29 | 0.87 | 7.09 | 0.43 | 1.30 | 3.14 | |
| 0.42 | 1.26 | 7.74 | 0.34 | 1.03 | 7.12 | 0.48 | 1.43 | 3.24 | |
| 0.30 | 0.89 | 17.04 | 0.34 | 1.02 | 7.12 | 0.32 | 0.96 | 6.33 | |
| 0.29 | 0.86 | 17.80 | 0.36 | 1.08 | 14.80 | 0.31 | 0.92 | 6.72 | |

ตารางที่ ข-8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณน้ำ อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณตัวกรองชีวภาพและความเข้มข้นของแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ใช้งานเป็นระยะเวลา 6 เดือน ทั้ง 3 ครั้ง (ต่อ)

| ครั้งที่ 1 | | ครั้งที่ 2 | | ครั้งที่ 3 | |
|---|---|--|---|---|--|
| อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณน้ำ (มก.ไนโตรเจน/ลิตรของน้ำ) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณตัวกรอง (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) | ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณน้ำ (มก.ไนโตรเจน/ลิตรของน้ำ) | อัตราการบำบัดแอมโมเนียต่อปริมาณตัวกรอง (มก.ไนโตรเจน/ลิตรของตัวกรอง) | ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ลิตร) |
| 0.41 | 1.22 | 17.92 | 0.37 | 1.12 | 15.05 |
| 0.49 | 1.48 | 25.33 | 0.47 | 1.41 | 24.69 |
| 0.51 | 1.53 | 26.14 | 0.41 | 1.24 | 25.01 |
| 0.72 | 2.15 | 39.81 | 0.68 | 2.05 | 38.88 |
| 0.86 | 2.57 | 40.23 | 0.91 | 2.73 | 40.35 |
| 0.70 | 2.10 | 40.33 | 0.83 | 2.50 | 40.33 |
| | | | 1.08 | 1.52 | 10.47 |
| | | | 1.81 | 2.12 | 13.66 |
| | | | 2.73 | 2.73 | 16.00 |
| | | | 2.50 | 2.73 | 18.68 |
| | | | 2.50 | 2.73 | 19.72 |
| | | | 2.50 | 2.50 | 21.37 |

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพน้ำสำหรับการทดลองช่วงที่ 2 เพื่อศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และ ไพรยกรอง ในการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์

ตารางที่ค-1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ของการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นแอมโมเนีย 1, 2 และ 3 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ของชุดควบคุม

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|----|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 29/10/2559 | 11:40 น. | 0 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.59 | | |
| 29/10/2559 | 21:40 น. | 10 | 0.99 | 0.00 | 0.00 | 0.45 | | |
| 30/10/2559 | 6:40 น. | 19 | 1.04 | 0.00 | 0.00 | 0.61 | | |
| 30/10/2559 | 11:40 น. | 24 | 1.05 | 0.00 | 0.00 | 0.62 | | |
| 30/10/2559 | 17:40 น. | 30 | 0.99 | 0.00 | 0.00 | 0.49 | | |
| 30/10/2559 | 23:40 น. | 36 | 1.07 | 0.01 | 0.01 | 0.55 | | |
| 1/11/2559 | 11:40 น. | 48 | 1.12 | 0.00 | 0.00 | 0.54 | | |
| 2/11/2559 | 12:40 น. | 73 | 0.95 | 0.00 | 0.00 | 0.66 | | |
| 7/11/2559 | 16:30 น. | 0 | 1.69 | 0.00 | 0.00 | 0.73 | | |
| 7/11/2559 | 22:30 น. | 6 | 1.75 | 0.00 | 0.00 | | | |
| 8/11/2559 | 16:30 น. | 24 | 1.73 | 0.00 | 0.00 | 0.77 | | |
| 9/11/2559 | 5:30 น. | 37 | 1.71 | 0.02 | 0.02 | 0.73 | | |
| 9/11/2559 | 17:30 น. | 49 | 1.88 | 0.00 | 0.00 | 0.77 | | |
| 10/11/2559 | 17:30 น. | 73 | 1.56 | 0.00 | 0.00 | 0.74 | | |
| 12/11/2559 | 18:30 น. | 122 | 1.42 | 0.01 | 0.01 | 0.66 | | |
| 21/11/2559 | 13:30 น. | 0 | 2.46 | 0.01 | 0.01 | 0.75 | | |
| 21/11/2559 | 1:30 น. | 12 | 1.84 | 0.02 | 0.02 | 0.58 | | |
| 22/11/2559 | 13:30 น. | 24 | 1.90 | 0.01 | 0.01 | 0.71 | | |
| 23/11/2559 | 13:30 น. | 48 | 2.18 | 0.04 | 0.04 | 0.84 | | |
| 24/11/2559 | 13:30 น. | 72 | 2.64 | 0.07 | 0.07 | 1.09 | | |
| 25/11/2559 | 13:30 น. | 96 | 1.96 | 0.07 | 0.07 | 0.67 | | |

ตารางที่ ค-2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรต์ และไนเตรต ของการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นแอมโมเนีย 1, 2 และ 3 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับของระบบตัวกลางจมตัว ที่ท่อน้ำออก จำนวน 3 ถึงปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถึงปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | แอมโมเนีย | | ไนโตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 29/10/2559 | 11:40 น. | 0 | 1.07 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 2.36 | 0.20 |
| 29/10/2559 | 21:40 น. | 10 | 0.85 | 0.03 | 0.04 | 0.01 | 1.86 | 0.14 |
| 30/10/2559 | 6:40 น. | 19 | 0.70 | 0.05 | 0.08 | 0.01 | 2.15 | 0.57 |
| 30/10/2559 | 11:40 น. | 24 | 0.63 | 0.07 | 0.14 | 0.03 | 2.60 | 0.14 |
| 30/10/2559 | 17:40 น. | 30 | 0.48 | 0.11 | 0.17 | 0.04 | 2.58 | 0.06 |
| 30/10/2559 | 23:40 น. | 36 | 0.29 | 0.10 | 0.15 | 0.06 | 2.00 | 0.22 |
| 1/11/2559 | 11:40 น. | 48 | 0.12 | 0.11 | 0.18 | 0.04 | 2.63 | 0.36 |
| 2/11/2559 | 12:40 น. | 73 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.06 | 3.42 | 0.30 |
| 7/11/2559 | 16:30 น. | 0 | 1.76 | 0.10 | 0.01 | 0.00 | 3.33 | 0.01 |
| 7/11/2559 | 22:30 น. | 6 | 1.61 | 0.09 | 0.03 | 0.01 | | |
| 8/11/2559 | 16:30 น. | 24 | 1.42 | 0.07 | 0.10 | 0.03 | 3.54 | 0.12 |
| 9/11/2559 | 5:30 น. | 37 | 1.07 | 0.06 | 0.27 | 0.05 | 3.35 | 0.39 |
| 9/11/2559 | 17:30 น. | 49 | 0.40 | 0.10 | 0.49 | 0.11 | 4.09 | 0.31 |
| 10/11/2559 | 17:30 น. | 73 | 0.00 | 0.00 | 0.41 | 0.16 | 4.56 | 0.20 |
| 12/11/2559 | 18:30 น. | 122 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 5.41 | 0.18 |
| 21/11/2559 | 13:30 น. | 0 | 2.72 | 0.07 | 0.01 | 0.00 | 4.32 | 0.49 |
| 21/11/2559 | 1:30 น. | 12 | 2.22 | 0.20 | 0.12 | 0.01 | 4.39 | 0.40 |
| 22/11/2559 | 13:30 น. | 24 | 1.71 | 0.27 | 0.18 | 0.05 | 4.04 | 0.94 |
| 23/11/2559 | 13:30 น. | 48 | 0.54 | 0.27 | 0.96 | 0.21 | 5.64 | 0.44 |
| 24/11/2559 | 13:30 น. | 72 | 0.00 | 0.00 | 0.31 | 0.29 | 6.99 | 1.01 |
| 25/11/2559 | 13:30 น. | 96 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 7.26 | 0.33 |

ตารางที่ ค-3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรต์ และไนเตรต ของการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นแอมโมเนีย 1, 2 และ 3 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับของระบบตัวกลางเคลื่อนที่ ที่ท่อน้ำออก จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ ละ 3 ชั่วโมง)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | แอมโมเนีย | | ไนโตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 29/10/2559 | 11:40 น. | 0 | 1.11 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 1.96 | 0.06 |
| 29/10/2559 | 21:40 น. | 10 | 0.93 | 0.04 | 0.04 | 0.02 | 1.82 | 0.55 |
| 30/10/2559 | 6:40 น. | 19 | 0.71 | 0.03 | 0.07 | 0.03 | 1.92 | 0.46 |
| 30/10/2559 | 11:40 น. | 24 | 0.69 | 0.07 | 0.14 | 0.04 | 2.48 | 0.13 |
| 30/10/2559 | 17:40 น. | 30 | 0.54 | 0.13 | 0.17 | 0.05 | 2.43 | 0.53 |
| 30/10/2559 | 23:40 น. | 36 | 0.36 | 0.14 | 0.23 | 0.10 | 2.37 | 0.36 |
| 1/11/2559 | 11:40 น. | 48 | 0.18 | 0.10 | 0.21 | 0.05 | 2.87 | 0.13 |
| 2/11/2559 | 12:40 น. | 73 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 3.02 | 0.66 |
| 7/11/2559 | 16:30 น. | 0 | 2.12 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 3.11 | 0.10 |
| 7/11/2559 | 22:30 น. | 6 | 1.58 | 0.07 | 0.08 | 0.04 | | |
| 8/11/2559 | 16:30 น. | 24 | 1.27 | 0.22 | 0.24 | 0.09 | 3.36 | 0.16 |
| 9/11/2559 | 5:30 น. | 37 | 0.80 | 0.34 | 0.44 | 0.22 | 3.41 | 0.44 |
| 9/11/2559 | 17:30 น. | 49 | 0.26 | 0.25 | 0.53 | 0.09 | 4.28 | 0.29 |
| 10/11/2559 | 17:30 น. | 73 | 0.01 | 0.01 | 0.14 | 0.21 | 4.60 | 0.26 |
| 12/11/2559 | 18:30 น. | 122 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 5.31 | 0.13 |
| 21/11/2559 | 13:30 น. | 0 | 2.69 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 3.87 | 0.74 |
| 21/11/2559 | 1:30 น. | 12 | 2.36 | 0.19 | 0.12 | 0.02 | 4.00 | 0.38 |
| 22/11/2559 | 13:30 น. | 24 | 1.63 | 0.12 | 0.24 | 0.09 | 4.17 | 1.00 |
| 23/11/2559 | 13:30 น. | 48 | 0.31 | 0.22 | 1.08 | 0.30 | 5.16 | 1.21 |
| 24/11/2559 | 13:30 น. | 72 | 0.00 | 0.00 | 0.17 | 0.17 | 6.36 | 1.18 |
| 25/11/2559 | 13:30 น. | 96 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 6.46 | 1.05 |

ตารางที่ ค-4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ของการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นแอมโมเนีย 1,2 และ 3 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับของระบบไปรยกรองที่ท่อน้ำออก จำนวน 3 ถึงปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถึงปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 29/10/2559 | 11:40 น. | 0 | 1.17 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 2.16 | 0.37 |
| 29/10/2559 | 21:40 น. | 10 | 0.90 | 0.03 | 0.05 | 0.01 | 2.12 | 0.34 |
| 30/10/2559 | 6:40 น. | 19 | 0.65 | 0.04 | 0.10 | 0.03 | 2.40 | 0.32 |
| 30/10/2559 | 11:40 น. | 24 | 0.61 | 0.02 | 0.14 | 0.03 | 2.68 | 0.06 |
| 30/10/2559 | 17:40 น. | 30 | 0.40 | 0.06 | 0.18 | 0.03 | 2.67 | 0.06 |
| 30/10/2559 | 23:40 น. | 36 | 0.23 | 0.06 | 0.21 | 0.06 | 2.72 | 0.35 |
| 1/11/2559 | 11:40 น. | 48 | 0.10 | 0.03 | 0.23 | 0.02 | 2.99 | 0.18 |
| 2/11/2559 | 12:40 น. | 73 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 3.06 | 0.18 |
| 7/11/2559 | 16:30 น. | 0 | 2.21 | 0.06 | 0.01 | 0.00 | 3.24 | 0.27 |
| 7/11/2559 | 22:30 น. | 6 | 1.56 | 0.09 | 0.07 | 0.02 | | |
| 8/11/2559 | 16:30 น. | 24 | 1.15 | 0.05 | 0.22 | 0.04 | 3.71 | 0.33 |
| 9/11/2559 | 5:30 น. | 37 | 0.58 | 0.12 | 0.38 | 0.07 | 3.65 | 0.30 |
| 9/11/2559 | 17:30 น. | 49 | 0.13 | 0.07 | 0.49 | 0.06 | 4.29 | 0.42 |
| 10/11/2559 | 17:30 น. | 73 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.04 | 4.62 | 0.26 |
| 12/11/2559 | 18:30 น. | 122 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 5.42 | 0.24 |
| 21/11/2559 | 13:30 น. | 0 | 2.79 | 0.30 | 0.01 | 0.00 | 4.06 | 0.85 |
| 21/11/2559 | 1:30 น. | 12 | 2.09 | 0.20 | 0.10 | 0.02 | 4.30 | 0.56 |
| 22/11/2559 | 13:30 น. | 24 | 1.72 | 0.13 | 0.21 | 0.03 | 5.22 | 0.22 |
| 23/11/2559 | 13:30 น. | 48 | 0.35 | 0.09 | 0.78 | 0.11 | 5.60 | 0.26 |
| 24/11/2559 | 13:30 น. | 72 | 0.00 | 0.00 | 0.21 | 0.16 | 6.78 | 0.54 |
| 25/11/2559 | 13:30 น. | 96 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 6.64 | 0.69 |

ตารางที่ ค-5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ของการบำบัดสารประกอบ
อนินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นแอมโมเนีย 1, 2 และ 3 มก.
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ของชุดควบคุมที่บ่อปลา

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|----|------------------|----|------------------|----|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 29/10/2559 | 11:40 น. | 0 | 1.00 | | 0.00 | | 0.59 | |
| 29/10/2559 | 21:40 น. | 10 | 0.99 | | 0.00 | | 0.45 | |
| 30/10/2559 | 6:40 น. | 19 | 1.04 | | 0.00 | | 0.61 | |
| 30/10/2559 | 11:40 น. | 24 | 1.05 | | 0.00 | | 0.62 | |
| 30/10/2559 | 17:40 น. | 30 | 0.99 | | 0.00 | | 0.49 | |
| 30/10/2559 | 23:40 น. | 36 | 1.07 | | 0.01 | | 0.55 | |
| 1/11/2559 | 11:40 น. | 48 | 1.12 | | 0.00 | | 0.54 | |
| 2/11/2559 | 12:40 น. | 73 | 0.95 | | 0.00 | | 0.66 | |
| 7/11/2559 | 16:30 น. | 0 | 1.69 | | 0.00 | | 0.73 | |
| 7/11/2559 | 22:30 น. | 6 | 1.75 | | 0.00 | | | |
| 8/11/2559 | 16:30 น. | 24 | 1.73 | | 0.00 | | 0.77 | |
| 9/11/2559 | 5:30 น. | 37 | 1.71 | | 0.02 | | 0.73 | |
| 9/11/2559 | 17:30 น. | 49 | 1.88 | | 0.00 | | 0.77 | |
| 10/11/2559 | 17:30 น. | 73 | 1.56 | | 0.00 | | 0.74 | |
| 12/11/2559 | 18:30 น. | 122 | 1.42 | | 0.01 | | 0.66 | |
| 21/11/2559 | 13:30 น. | 0 | 2.46 | | 0.01 | | 0.75 | |
| 21/11/2559 | 1:30 น. | 12 | 1.84 | | 0.02 | | 0.58 | |
| 22/11/2559 | 13:30 น. | 24 | 1.90 | | 0.01 | | 0.71 | |
| 23/11/2559 | 13:30 น. | 48 | 2.18 | | 0.04 | | 0.84 | |
| 24/11/2559 | 13:30 น. | 72 | 2.64 | | 0.07 | | 1.09 | |
| 25/11/2559 | 13:30 น. | 96 | 1.96 | | 0.07 | | 0.67 | |

ตารางที่ ค-6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรต์ และไนเตรต ของการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นแอมโมเนีย 1, 2 และ 3 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ของระบบตัวกลางจมตัว ที่บ่อปลาจำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | แอมโมเนีย | | ไนโตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 29/10/2559 | 11:40 น. | 0 | 1.07 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 2.36 | 0.20 |
| 29/10/2559 | 21:40 น. | 10 | 0.90 | 0.03 | 0.04 | 0.00 | 2.06 | 0.31 |
| 30/10/2559 | 6:40 น. | 19 | 0.73 | 0.05 | 0.08 | 0.03 | 2.10 | 0.45 |
| 30/10/2559 | 11:40 น. | 24 | 0.64 | 0.07 | 0.12 | 0.04 | 2.20 | 0.30 |
| 30/10/2559 | 17:40 น. | 30 | 0.49 | 0.10 | 0.18 | 0.04 | 2.30 | 1.02 |
| 30/10/2559 | 23:40 น. | 36 | 0.29 | 0.16 | 0.24 | 0.09 | 2.54 | 0.27 |
| 1/11/2559 | 11:40 น. | 48 | 0.15 | 0.13 | 0.18 | 0.00 | 2.71 | 0.52 |
| 2/11/2559 | 12:40 น. | 73 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.07 | 3.36 | 0.07 |
| 7/11/2559 | 16:30 น. | 0 | 1.76 | 0.10 | 0.01 | 0.00 | 3.33 | 0.01 |
| 7/11/2559 | 22:30 น. | 6 | 1.68 | 0.06 | 0.02 | 0.01 | | |
| 8/11/2559 | 16:30 น. | 24 | 1.41 | 0.13 | 0.14 | 0.04 | 3.33 | 0.30 |
| 9/11/2559 | 5:30 น. | 37 | 1.00 | 0.09 | 0.27 | 0.05 | 3.63 | 0.04 |
| 9/11/2559 | 17:30 น. | 49 | 0.45 | 0.10 | 0.51 | 0.09 | 4.19 | 0.13 |
| 10/11/2559 | 17:30 น. | 73 | 0.00 | 0.00 | 0.38 | 0.18 | 4.12 | 0.26 |
| 12/11/2559 | 18:30 น. | 122 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 5.39 | 0.19 |
| 21/11/2559 | 13:30 น. | 0 | 2.72 | 0.07 | 0.01 | 0.00 | 4.32 | 0.49 |
| 21/11/2559 | 1:30 น. | 12 | 2.26 | 0.18 | 0.11 | 0.02 | 4.19 | 0.47 |
| 22/11/2559 | 13:30 น. | 24 | 1.80 | 0.13 | 0.22 | 0.07 | 4.69 | 0.16 |
| 23/11/2559 | 13:30 น. | 48 | 0.49 | 0.36 | 0.98 | 0.26 | 5.57 | 0.62 |
| 24/11/2559 | 13:30 น. | 72 | 0.03 | 0.03 | 0.37 | 0.29 | 7.60 | 0.25 |
| 25/11/2559 | 13:30 น. | 96 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 7.34 | 0.10 |

ตารางที่ ค-7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรต์ และไนเตรต ของการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นแอมโมเนีย 1, 2 และ 3 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ของระบบตัวกลางเคลื่อนที่ ที่บ่อปลาจำนวน 3 ถึงปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถึงปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | แอมโมเนีย | | ไนโตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 29/10/2559 | 11:40 น. | 0 | 1.11 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 1.96 | 0.06 |
| 29/10/2559 | 21:40 น. | 10 | 0.96 | 0.03 | 0.04 | 0.01 | 1.63 | 0.21 |
| 30/10/2559 | 6:40 น. | 19 | 0.80 | 0.06 | 0.09 | 0.02 | 2.13 | 0.34 |
| 30/10/2559 | 11:40 น. | 24 | 0.66 | 0.04 | 0.10 | 0.06 | 1.75 | 0.55 |
| 30/10/2559 | 17:40 น. | 30 | 0.55 | 0.13 | 0.18 | 0.07 | 2.43 | 0.27 |
| 30/10/2559 | 23:40 น. | 36 | 0.31 | 0.13 | 0.20 | 0.08 | 2.26 | 0.63 |
| 1/11/2559 | 11:40 น. | 48 | 0.22 | 0.23 | 0.20 | 0.08 | 2.52 | 0.79 |
| 2/11/2559 | 12:40 น. | 73 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 3.37 | 0.23 |
| 7/11/2559 | 16:30 น. | 0 | 2.12 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 3.11 | 0.10 |
| 7/11/2559 | 22:30 น. | 6 | 1.70 | 0.16 | 0.07 | 0.03 | | |
| 8/11/2559 | 16:30 น. | 24 | 1.35 | 0.25 | 0.23 | 0.10 | 3.20 | 0.26 |
| 9/11/2559 | 5:30 น. | 37 | 0.78 | 0.32 | 0.44 | 0.20 | 3.70 | 0.18 |
| 9/11/2559 | 17:30 น. | 49 | 0.30 | 0.27 | 0.53 | 0.09 | 4.28 | 0.28 |
| 10/11/2559 | 17:30 น. | 73 | 0.00 | 0.00 | 0.14 | 0.22 | 4.54 | 0.23 |
| 12/11/2559 | 18:30 น. | 122 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.28 | 0.14 |
| 21/11/2559 | 13:30 น. | 0 | 2.69 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 3.87 | 0.74 |
| 21/11/2559 | 1:30 น. | 12 | 2.02 | 0.13 | 0.09 | 0.03 | 3.00 | 0.70 |
| 22/11/2559 | 13:30 น. | 24 | 1.73 | 0.21 | 0.22 | 0.05 | 4.02 | 0.77 |
| 23/11/2559 | 13:30 น. | 48 | 0.32 | 0.22 | 1.05 | 0.29 | 4.93 | 0.64 |
| 24/11/2559 | 13:30 น. | 72 | 0.00 | 0.00 | 0.21 | 0.23 | 6.87 | 1.54 |
| 25/11/2559 | 13:30 น. | 96 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 6.72 | 1.13 |

ตารางที่ ค-8 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ของการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นแอมโมเนีย 1, 2 และ 3 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ของระบบปฏิกิริยา ที่บ่อปลา จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 29/10/2559 | 11:40 น. | 0 | 1.17 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 2.16 | 0.37 |
| 29/10/2559 | 21:40 น. | 10 | 0.87 | 0.01 | 0.05 | 0.02 | 2.13 | 0.65 |
| 30/10/2559 | 6:40 น. | 19 | 0.70 | 0.04 | 0.09 | 0.02 | 2.18 | 0.35 |
| 30/10/2559 | 11:40 น. | 24 | 0.57 | 0.06 | 0.12 | 0.00 | 2.54 | 0.21 |
| 30/10/2559 | 17:40 น. | 30 | 0.42 | 0.06 | 0.19 | 0.08 | 2.55 | 0.32 |
| 30/10/2559 | 23:40 น. | 36 | 0.19 | 0.14 | 0.22 | 0.09 | 2.62 | 0.52 |
| 1/11/2559 | 11:40 น. | 48 | 0.14 | 0.12 | 0.25 | 0.03 | 3.06 | 0.03 |
| 2/11/2559 | 12:40 น. | 73 | 0.03 | 0.00 | 0.06 | 0.02 | 3.40 | 0.21 |
| 7/11/2559 | 16:30 น. | 0 | 2.21 | 0.06 | 0.01 | 0.00 | 3.24 | 0.27 |
| 7/11/2559 | 22:30 น. | 6 | 1.69 | 0.10 | 0.08 | 0.02 | | |
| 8/11/2559 | 16:30 น. | 24 | 1.15 | 0.05 | 0.18 | 0.05 | 3.53 | 0.39 |
| 9/11/2559 | 5:30 น. | 37 | 0.59 | 0.08 | 0.36 | 0.07 | 3.90 | 0.27 |
| 9/11/2559 | 17:30 น. | 49 | 0.13 | 0.07 | 0.50 | 0.06 | 4.34 | 0.22 |
| 10/11/2559 | 17:30 น. | 73 | 0.03 | 0.01 | 0.08 | 0.03 | 4.51 | 0.27 |
| 12/11/2559 | 18:30 น. | 122 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 5.40 | 0.25 |
| 21/11/2559 | 13:30 น. | 0 | 2.79 | 0.30 | 0.01 | 0.00 | 4.06 | 0.85 |
| 21/11/2559 | 1:30 น. | 12 | 2.02 | 0.12 | 0.07 | 0.01 | 3.86 | 0.07 |
| 22/11/2559 | 13:30 น. | 24 | 1.60 | 0.24 | 0.15 | 0.05 | 4.48 | 0.86 |
| 23/11/2559 | 13:30 น. | 48 | 0.33 | 0.14 | 0.72 | 0.17 | 5.25 | 0.75 |
| 24/11/2559 | 13:30 น. | 72 | 0.00 | 0.01 | 0.23 | 0.16 | 7.23 | 0.20 |
| 25/11/2559 | 13:30 น. | 96 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 6.78 | 0.86 |

ตารางที่ ค-9 ค่าสภาพความเป็นต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ของการบำบัด
สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นแอมโมเนีย 1, 2 และ 3 มก.
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ของชุดควบคุม ที่บ่อปลา

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | ค่าความเป็นต่าง (มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.) | | ปริมาณออกซิเจน ละลาย | | พีเอช | | อุณหภูมิ (^o ซ) | |
|--------------|----------|-------------------|--|----|-------------------------|----|-----------|----|-------------------------------|----|
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 7/11/2559 | 17:00 น. | 0 | 150.00 | | 7.00 | | 7.75 | | 26.90 | |
| 8/11/2559 | 17:00 น. | 1 | 120.00 | | 7.89 | | 8.54 | | 26.50 | |
| 9/11/2559 | 17:00 น. | 2 | 130.00 | | 8.13 | | 8.65 | | 28.00 | |
| 10/11/2559 | 17:00 น. | 3 | 120.00 | | 7.64 | | 8.72 | | 28.70 | |
| 11/11/2559 | 17:00 น. | 4 | 120.00 | | 8.06 | | 8.10 | | 28.10 | |
| 12/11/2559 | 17:00 น. | 5 | 120.00 | | 7.36 | | 8.37 | | 28.30 | |
| 21/11/2559 | 17:00 น. | 14 | 150.00 | | 7.60 | | 8.42 | | 29.40 | |
| 22/11/2559 | 17:00 น. | 15 | 140.00 | | 7.70 | | 8.57 | | 29.20 | |
| 23/11/2559 | 17:00 น. | 16 | 140.00 | | 7.60 | | 8.51 | | 29.60 | |
| 24/11/2559 | 17:00 น. | 17 | 150.00 | | 6.80 | | 8.57 | | 29.70 | |
| 25/11/2559 | 17:00 น. | 18 | 120.00 | | 6.70 | | 8.54 | | 29.20 | |

ตารางที่ ค-10 ค่าสภาพความเป็นต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ของการบำบัด
 สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นแอมโมเนีย 1, 2 และ 3 มก.
 แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ของระบบตัวกลางจมตัว ที่บ่อปลาจำนวน 3 ถังปฏิกรณ์
 (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | ค่าความเป็นต่าง (มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.) | | ปริมาณออกซิเจน ละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.) | | พีเอช | | อุณหภูมิ (°ซ) | |
|--------------|----------|-------------------|--|-------|---|------|-----------|------|------------------|------|
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 7/11/2559 | 17:00 น. | 0 | 150.00 | | 7.56 | 0.15 | 7.78 | 0.10 | 27.43 | 0.06 |
| 8/11/2559 | 17:00 น. | 1 | 140.00 | 10.00 | 7.53 | 0.22 | 8.65 | 0.02 | 26.70 | 0.26 |
| 9/11/2559 | 17:00 น. | 2 | 113.33 | 15.28 | 7.81 | 0.18 | 8.84 | 0.03 | 28.80 | 0.20 |
| 10/11/2559 | 17:00 น. | 3 | 133.33 | 5.77 | 7.17 | 0.16 | 8.61 | 0.01 | 28.73 | 0.06 |
| 11/11/2559 | 17:00 น. | 4 | 120.00 | 0.00 | 8.15 | 0.07 | 7.83 | 0.04 | 28.90 | 0.10 |
| 12/11/2559 | 17:00 น. | 5 | 116.67 | 5.77 | 7.13 | 0.23 | 8.07 | 0.02 | 28.53 | 0.23 |
| 21/11/2559 | 17:00 น. | 14 | 150.00 | 0.00 | 7.33 | 0.21 | 8.49 | 0.02 | 29.43 | 0.32 |
| 22/11/2559 | 17:00 น. | 15 | 136.67 | 11.55 | 7.50 | 0.26 | 8.68 | 0.07 | 29.07 | 0.31 |
| 23/11/2559 | 17:00 น. | 16 | 133.33 | 5.77 | 7.53 | 0.23 | 8.58 | 0.02 | 29.50 | 0.36 |
| 24/11/2559 | 17:00 น. | 17 | 130.00 | 10.00 | 6.70 | 0.17 | 8.56 | 0.08 | 29.87 | 0.47 |
| 25/11/2559 | 17:00 น. | 18 | 136.67 | 11.55 | 6.67 | 0.21 | 8.52 | 0.04 | 29.47 | 0.38 |

ตารางที่ ค-11 ค่าสภาพความเป็นต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ของการบำบัด
สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นแอมโมเนีย 1, 2 และ 3 มก.
แอมโมเนียไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ของระบบตัวกลางเคลื่อนที่ ที่บ่อปลาจำนวน 3 ถังปฏิกรณ์
(วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | ค่าความเป็นต่าง (มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.) | | ปริมาณออกซิเจน ละลาย | | พีเอช | | อุณหภูมิ (°ซ) | |
|--------------|----------|-------------------|--|-------|-------------------------|------|-----------|------|-------------------|------|
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 7/11/2559 | 17:00 น. | 0 | 150.00 | | 7.69 | 0.08 | 7.89 | 0.02 | 27.33 | 0.12 |
| 8/11/2559 | 17:00 น. | 1 | 140.00 | 10.00 | 7.82 | 0.05 | 8.58 | 0.01 | 27.00 | 0.10 |
| 9/11/2559 | 17:00 น. | 2 | 126.67 | 11.55 | 7.97 | 0.09 | 8.73 | 0.03 | 28.40 | 0.17 |
| 10/11/2559 | 17:00 น. | 3 | 133.33 | 5.77 | 7.59 | 0.13 | 8.59 | 0.01 | 28.57 | 0.23 |
| 11/11/2559 | 17:00 น. | 4 | 123.33 | 5.77 | 8.24 | 0.11 | 7.95 | 0.02 | 28.37 | 0.15 |
| 12/11/2559 | 17:00 น. | 5 | 120.00 | 10.00 | 7.52 | 0.06 | 8.22 | 0.08 | 28.80 | 0.46 |
| 21/11/2559 | 17:00 น. | 14 | 150.00 | 0.00 | 7.57 | 0.06 | 8.50 | 0.01 | 29.33 | 0.15 |
| 22/11/2559 | 17:00 น. | 15 | 146.67 | 5.77 | 7.67 | 0.21 | 8.61 | 0.03 | 28.80 | 0.20 |
| 23/11/2559 | 17:00 น. | 16 | 136.67 | 5.77 | 7.60 | 0.40 | 8.54 | 0.02 | 29.30 | 0.17 |
| 24/11/2559 | 17:00 น. | 17 | 133.33 | 11.55 | 6.63 | 0.06 | 8.57 | 0.02 | 29.57 | 0.12 |
| 25/11/2559 | 17:00 น. | 18 | 126.67 | 15.28 | 6.83 | 0.00 | 8.51 | 0.05 | 29.30 | 0.10 |

ตารางที่ ค-12 ค่าสภาพความเป็นต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ของการบำบัด
 สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นแอมโมเนีย 1, 2 และ 3 มก.
 แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ของระบบโปรยกรอง ที่บ่อปลาจำนวน 3 ถึงปฏิกรณ์
 (วิเคราะห์ถึงปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | ค่าความเป็นต่าง (มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.) | | ปริมาณออกซิเจน ละลาย | | พีเอช | | อุณหภูมิ (°ซ) | |
|--------------|----------|-------------------|--|-------|-------------------------|------|-----------|------|------------------|------|
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 7/11/2559 | 17:00 น. | 0 | 150.00 | | 7.54 | 0.02 | 7.96 | 0.01 | 26.80 | 0.10 |
| 8/11/2559 | 17:00 น. | 1 | 130.00 | 0.00 | 7.82 | 0.06 | 8.55 | 0.01 | 26.77 | 0.21 |
| 9/11/2559 | 17:00 น. | 2 | 130.00 | 0.00 | 7.85 | 0.04 | 8.67 | 0.01 | 28.17 | 0.12 |
| 10/11/2559 | 17:00 น. | 3 | 130.00 | 0.00 | 7.59 | 0.03 | 8.60 | 0.02 | 27.83 | 0.15 |
| 11/11/2559 | 17:00 น. | 4 | 120.00 | 0.00 | 8.31 | 0.07 | 8.03 | 0.03 | 27.60 | 0.10 |
| 12/11/2559 | 17:00 น. | 5 | 123.33 | 5.77 | 7.32 | 0.20 | 8.37 | 0.01 | 27.80 | 0.26 |
| 21/11/2559 | 17:00 น. | 14 | 150.00 | 0.00 | 7.60 | 0.10 | 8.51 | 0.03 | 28.23 | 0.15 |
| 22/11/2559 | 17:00 น. | 15 | 146.67 | 5.77 | 7.97 | 0.06 | 8.62 | 0.00 | 27.40 | 0.26 |
| 23/11/2559 | 17:00 น. | 16 | 140.00 | 0.00 | 7.87 | 0.21 | 8.57 | 0.02 | 27.97 | 0.21 |
| 24/11/2559 | 17:00 น. | 17 | 150.00 | 17.32 | 6.87 | 0.15 | 8.63 | 0.02 | 28.47 | 0.12 |
| 25/11/2559 | 17:00 น. | 18 | 140.00 | 10.00 | 6.97 | 0.12 | 8.57 | 0.01 | 28.47 | 0.12 |

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพน้ำสำหรับการทดลองช่วงที่ 3 เพื่อศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และ โปรงกรอง ในการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ตารางที่ ง-1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตที่ท่อน้ำออกก่อนลงสู่บ่อเลี้ยงปลาในลของชุดควบคุม (ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพ) เป็นระยะเวลา 60 วัน

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|----|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/12/2559 | 11:30 น. | 0 | 0.00 | 0.01 | | 4.58 | | |
| 2/12/2559 | 11:30 น. | 1 | 0.06 | 0.01 | | 4.90 | | |
| 3/12/2559 | 11:30 น. | 2 | 0.36 | 0.03 | | 4.99 | | |
| 4/12/2559 | 11:30 น. | 3 | 0.25 | 0.07 | | 5.06 | | |
| 5/12/2559 | 11:30 น. | 4 | 0.14 | 0.23 | | 4.11 | | |
| 6/12/2559 | 11:30 น. | 5 | 0.09 | 0.43 | | 4.28 | | |
| 7/12/2559 | 11:30 น. | 6 | 0.12 | 0.81 | | 4.90 | | |
| 8/12/2559 | 11:30 น. | 7 | 0.03 | 0.78 | | 3.72 | | |
| 9/12/2559 | 11:30 น. | 8 | 0.03 | 0.92 | | 4.76 | | |
| 10/12/2559 | 11:30 น. | 9 | 0.08 | 0.87 | | 3.98 | | |
| 11/12/2559 | 11:30 น. | 10 | 0.03 | 1.02 | | 4.86 | | |
| 12/12/2559 | 11:30 น. | 11 | 0.04 | 0.92 | | 5.87 | | |
| 13/12/2559 | 11:30 น. | 12 | | 0.62 | | 7.33 | | |
| 14/12/2559 | 11:30 น. | 13 | 0.04 | 0.62 | | 6.71 | | |
| 15/12/2559 | 11:30 น. | 14 | 0.03 | 0.47 | | 6.85 | | |
| 16/12/2559 | 11:30 น. | 15 | 0.01 | 0.10 | | 7.76 | | |
| 17/12/2559 | 11:30 น. | 16 | | | | | | |
| 18/12/2559 | 11:30 น. | 17 | | | | | | |
| 19/12/2559 | 11:30 น. | 18 | | | | | | |
| 20/12/2559 | 11:30 น. | 19 | | | | | | |
| 21/12/2559 | 11:30 น. | 20 | 0.06 | 0.02 | | 9.24 | | |

ตารางที่ ง-1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรดที่ท่อน้ำออกก่อนลงสู่บ่อเลี้ยงปลาในของชุดควบคุม (ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพ) เป็นระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรด | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|----|------------------|----|------------------|----|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 22/12/2559 | 11:30 น. | 21 | 0.04 | | 0.06 | | 8.47 | |
| 23/12/2559 | 11:30 น. | 22 | 0.08 | | 0.03 | | 7.36 | |
| 24/12/2559 | 11:30 น. | 23 | 0.05 | | 0.04 | | 7.85 | |
| 25/12/2559 | 11:30 น. | 24 | 0.04 | | 0.04 | | 8.24 | |
| 26/12/2559 | 11:30 น. | 25 | 0.01 | | 0.03 | | 8.99 | |
| 27/12/2559 | 11:30 น. | 26 | 0.00 | | 0.02 | | 7.90 | |
| 28/12/2559 | 11:30 น. | 27 | 0.08 | | 0.04 | | 9.22 | |
| 29/12/2559 | 11:30 น. | 28 | 0.10 | | 0.03 | | 8.42 | |
| 30/12/2559 | 11:30 น. | 29 | 0.00 | | 0.02 | | 8.82 | |
| 31/12/2559 | 11:30 น. | 30 | 0.00 | | 0.05 | | 8.45 | |
| 1/1/2560 | 11:30 น. | 31 | 0.11 | | 0.03 | | 8.87 | |
| 2/1/2560 | 11:30 น. | 32 | 0.14 | | 0.04 | | 9.10 | |
| 3/1/2560 | 11:30 น. | 33 | 0.03 | | 0.04 | | 9.49 | |
| 4/1/2560 | 11:30 น. | 34 | 0.08 | | 0.06 | | 8.26 | |
| 5/1/2560 | 11:30 น. | 35 | 0.10 | | 0.04 | | 9.55 | |
| 6/1/2560 | 11:30 น. | 36 | 0.00 | | 0.02 | | 10.05 | |
| 7/1/2560 | 11:30 น. | 37 | 0.23 | | 0.02 | | 9.31 | |
| 8/1/2560 | 11:30 น. | 38 | 0.01 | | 0.06 | | 9.97 | |
| 9/1/2560 | 11:30 น. | 39 | 0.06 | | 0.03 | | 10.39 | |
| 10/1/2560 | 11:30 น. | 40 | 0.15 | | 0.04 | | 8.13 | |
| 11/1/2560 | 11:30 น. | 41 | 0.00 | | 0.02 | | 11.21 | |
| 12/1/2560 | 11:30 น. | 42 | 0.12 | | 0.07 | | 10.78 | |
| 13/1/2560 | 11:30 น. | 43 | 0.10 | | 0.06 | | 9.39 | |
| 14/1/2560 | 11:30 น. | 44 | 0.09 | | 0.06 | | 10.56 | |
| 15/1/2560 | 11:30 น. | 45 | 0.01 | | 0.08 | | 13.19 | |

ตารางที่ ง-1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรต์ และไนเตรตที่พ่น้ำออกก่อนลงสู่บ่อเลี้ยง
ปลาในของชุดควบคุม (ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพ) เป็นระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนโตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|-------|------------------|----|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 16/1/2560 | 11:30 น. | 46 | 0.13 | 0.02 | | 9.86 | | |
| 17/1/2560 | 11:30 น. | 47 | 0.14 | 0.07 | | 13.48 | | |
| 18/1/2560 | 11:30 น. | 48 | 0.00 | 0.02 | | 11.97 | | |
| 19/1/2560 | 11:30 น. | 49 | 0.13 | 0.09 | | 10.09 | | |
| 20/1/2560 | 11:30 น. | 50 | 0.04 | 0.07 | | 12.98 | | |
| 21/1/2560 | 11:30 น. | 51 | 0.02 | 0.09 | | 10.27 | | |
| 22/1/2560 | 11:30 น. | 52 | 0.05 | 0.13 | | 13.35 | | |
| 23/1/2560 | 11:30 น. | 53 | 0.00 | 0.17 | | 12.17 | | |
| 24/1/2560 | 11:30 น. | 54 | 0.05 | 0.14 | | 13.86 | | |
| 25/1/2560 | 11:30 น. | 55 | 0.10 | 0.36 | | 11.16 | | |
| 26/1/2560 | 11:30 น. | 56 | 0.04 | 0.28 | | 13.24 | | |
| 27/1/2560 | 11:30 น. | 57 | 0.14 | 0.18 | | 13.83 | | |
| 28/1/2560 | 11:30 น. | 58 | 0.06 | 0.08 | | 11.45 | | |
| 29/1/2560 | 11:30 น. | 59 | 0.05 | 0.08 | | 13.54 | | |
| 30/1/2560 | 11:30 น. | 60 | 0.07 | 0.12 | | 12.90 | | |

ตารางที่ ง-2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรต์ และไนเตรต ที่ท่อน้ำออกก่อนลงสู่บ่อเลี้ยง
ปลาในของระบบตัวกลางจมตัว จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็น
ระยะเวลา 60 วัน

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนโตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/12/2559 | 11:30 น. | 0 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 6.89 | 0.25 |
| 2/12/2559 | 11:30 น. | 1 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 7.20 | 0.22 |
| 3/12/2559 | 11:30 น. | 2 | 0.14 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 7.11 | 0.35 |
| 4/12/2559 | 11:30 น. | 3 | 0.05 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 8.01 | 0.10 |
| 5/12/2559 | 11:30 น. | 4 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 7.12 | 0.54 |
| 6/12/2559 | 11:30 น. | 5 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 6.95 | 0.53 |
| 7/12/2559 | 11:30 น. | 6 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 7.62 | 0.51 |
| 8/12/2559 | 11:30 น. | 7 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 6.50 | 1.83 |
| 9/12/2559 | 11:30 น. | 8 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 7.84 | 0.33 |
| 10/12/2559 | 11:30 น. | 9 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 7.27 | 0.46 |
| 11/12/2559 | 11:30 น. | 10 | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.01 | 7.91 | 1.45 |
| 12/12/2559 | 11:30 น. | 11 | 0.08 | 0.02 | 0.10 | 0.01 | 8.26 | 1.61 |
| 13/12/2559 | 11:30 น. | 12 | | | 0.04 | 0.03 | 8.05 | 2.16 |
| 14/12/2559 | 11:30 น. | 13 | 0.03 | 0.01 | 0.19 | 0.01 | 8.71 | 3.09 |
| 15/12/2559 | 11:30 น. | 14 | 0.03 | 0.01 | 0.06 | 0.02 | 9.74 | 1.03 |
| 16/12/2559 | 11:30 น. | 15 | 0.03 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 10.37 | 1.21 |
| 17/12/2559 | 11:30 น. | 16 | | | | | | |
| 18/12/2559 | 11:30 น. | 17 | | | | | | |
| 19/12/2559 | 11:30 น. | 18 | | | | | | |
| 20/12/2559 | 11:30 น. | 19 | | | | | | |
| 21/12/2559 | 11:30 น. | 20 | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 12.27 | 2.28 |
| 22/12/2559 | 11:30 น. | 21 | 0.05 | 0.02 | 0.04 | 0.01 | 12.97 | 2.20 |
| 23/12/2559 | 11:30 น. | 22 | 0.09 | 0.00 | 0.04 | 0.01 | 10.24 | 0.81 |
| 24/12/2559 | 11:30 น. | 23 | 0.07 | 0.03 | 0.03 | 0.01 | 10.28 | 1.20 |
| 25/12/2559 | 11:30 น. | 24 | 0.06 | 0.01 | 0.08 | 0.02 | 10.85 | 0.70 |

ตารางที่ ง-2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ที่ท่อน้ำออกก่อนลงสู่บ่อเลี้ยง
ปลาในของระบบตัวกลางจมตัว จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็น
ระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 26/12/2559 | 11:30 น. | 25 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.01 | 11.54 | 0.71 |
| 27/12/2559 | 11:30 น. | 26 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.01 | 10.41 | 0.76 |
| 28/12/2559 | 11:30 น. | 27 | 0.05 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 11.41 | 1.07 |
| 29/12/2559 | 11:30 น. | 28 | 0.06 | 0.00 | 0.04 | 0.01 | 11.55 | 1.19 |
| 30/12/2559 | 11:30 น. | 29 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 10.42 | 0.94 |
| 31/12/2559 | 11:30 น. | 30 | 0.03 | 0.01 | 0.07 | 0.04 | 11.73 | 1.26 |
| 1/1/2560 | 11:30 น. | 31 | 0.17 | 0.08 | 0.04 | 0.01 | 11.92 | 1.22 |
| 2/1/2560 | 11:30 น. | 32 | 0.10 | 0.02 | 0.05 | 0.01 | 11.27 | 2.06 |
| 3/1/2560 | 11:30 น. | 33 | 0.02 | 0.01 | 0.07 | 0.02 | 12.38 | 1.55 |
| 4/1/2560 | 11:30 น. | 34 | 0.05 | 0.01 | 0.05 | 0.02 | 9.17 | 2.30 |
| 5/1/2560 | 11:30 น. | 35 | 0.06 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 12.65 | 0.73 |
| 6/1/2560 | 11:30 น. | 36 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 13.05 | 0.99 |
| 7/1/2560 | 11:30 น. | 37 | 0.09 | 0.06 | 0.06 | 0.04 | 12.48 | 1.08 |
| 8/1/2560 | 11:30 น. | 38 | 0.00 | 0.01 | 0.10 | 0.07 | 12.94 | 0.69 |
| 9/1/2560 | 11:30 น. | 39 | 0.04 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 13.53 | 0.44 |
| 10/1/2560 | 11:30 น. | 40 | 0.10 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 12.07 | 1.46 |
| 11/1/2560 | 11:30 น. | 41 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 13.22 | 0.63 |
| 12/1/2560 | 11:30 น. | 42 | 0.07 | 0.02 | 0.06 | 0.01 | 13.29 | 1.07 |
| 13/1/2560 | 11:30 น. | 43 | 0.07 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 11.99 | 0.83 |
| 14/1/2560 | 11:30 น. | 44 | 0.07 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 12.81 | 0.29 |
| 15/1/2560 | 11:30 น. | 45 | 0.00 | 0.01 | 0.06 | 0.02 | 15.45 | 0.37 |
| 16/1/2560 | 11:30 น. | 46 | 0.15 | 0.02 | 0.15 | 0.14 | 13.80 | 1.03 |
| 17/1/2560 | 11:30 น. | 47 | 0.06 | 0.02 | 0.09 | 0.02 | 15.21 | 1.22 |
| 18/1/2560 | 11:30 น. | 48 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 15.17 | 0.72 |
| 19/1/2560 | 11:30 น. | 49 | 0.09 | 0.01 | 0.09 | 0.03 | 15.81 | 1.15 |

ตารางที่ ง-2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรต์ และไนเตรต ที่ท่อน้ำออกก่อนลงสู่บ่อเลี้ยง
ปลาในของระบบตัวกลางจมตัว จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็น
ระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนโตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 20/1/2560 | 11:30 น. | 50 | 0.02 | 0.01 | 0.04 | 0.03 | 16.39 | 0.37 |
| 21/1/2560 | 11:30 น. | 51 | 0.03 | 0.01 | 0.07 | 0.02 | 14.78 | 0.86 |
| 22/1/2560 | 11:30 น. | 52 | 0.02 | 0.01 | 0.08 | 0.03 | 17.33 | 1.11 |
| 23/1/2560 | 11:30 น. | 53 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.03 | 14.68 | 1.81 |
| 24/1/2560 | 11:30 น. | 54 | 0.04 | 0.01 | 0.08 | 0.03 | 17.42 | 0.59 |
| 25/1/2560 | 11:30 น. | 55 | 0.04 | 0.02 | 0.09 | 0.03 | 15.21 | 0.79 |
| 26/1/2560 | 11:30 น. | 56 | 0.02 | 0.02 | 0.06 | 0.05 | 16.61 | 1.94 |
| 27/1/2560 | 11:30 น. | 57 | 0.04 | 0.01 | 0.10 | 0.05 | 18.88 | 1.24 |
| 28/1/2560 | 11:30 น. | 58 | 0.04 | 0.02 | 0.09 | 0.05 | 14.59 | 1.19 |
| 29/1/2560 | 11:30 น. | 59 | 0.03 | 0.03 | 0.08 | 0.06 | 15.48 | 0.63 |
| 30/1/2560 | 11:30 น. | 60 | 0.07 | 0.01 | 0.09 | 0.06 | 15.11 | 0.88 |

ตารางที่ ง-3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ที่ท่อน้ำออกก่อนลงสู่บ่อเลี้ยงปลา
 ปลานิลของระบบตัวกลางเคลื่อนที่จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็น
 ระยะเวลา 60 วัน

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/12/2559 | 11:30 น. | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 5.87 | 1.36 |
| 2/12/2559 | 11:30 น. | 1 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 6.26 | 1.45 |
| 3/12/2559 | 11:30 น. | 2 | 0.09 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 6.08 | 1.41 |
| 4/12/2559 | 11:30 น. | 3 | 0.04 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 6.76 | 1.51 |
| 5/12/2559 | 11:30 น. | 4 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 5.63 | 1.33 |
| 6/12/2559 | 11:30 น. | 5 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.80 | 2.60 |
| 7/12/2559 | 11:30 น. | 6 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 6.90 | 1.41 |
| 8/12/2559 | 11:30 น. | 7 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.92 | 1.61 |
| 9/12/2559 | 11:30 น. | 8 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 7.73 | 0.73 |
| 10/12/2559 | 11:30 น. | 9 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 6.13 | 0.12 |
| 11/12/2559 | 11:30 น. | 10 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 8.32 | 1.13 |
| 12/12/2559 | 11:30 น. | 11 | 0.07 | 0.10 | 0.02 | 0.02 | 8.30 | 1.45 |
| 13/12/2559 | 11:30 น. | 12 | 0.03 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 7.38 | 1.42 |
| 14/12/2559 | 11:30 น. | 13 | 0.02 | 0.01 | 0.16 | 0.01 | 8.35 | 1.87 |
| 15/12/2559 | 11:30 น. | 14 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 8.42 | 1.66 |
| 16/12/2559 | 11:30 น. | 15 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 8.94 | 2.05 |
| 17/12/2559 | 11:30 น. | 16 | | | | | | |
| 18/12/2559 | 11:30 น. | 17 | | | | | | |
| 19/12/2559 | 11:30 น. | 18 | | | | | | |
| 20/12/2559 | 11:30 น. | 19 | | | | | | |
| 21/12/2559 | 11:30 น. | 20 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.00 | 9.62 | 1.81 |
| 22/12/2559 | 11:30 น. | 21 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 10.82 | 2.29 |
| 23/12/2559 | 11:30 น. | 22 | 0.08 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 8.92 | 2.15 |
| 24/12/2559 | 11:30 น. | 23 | 0.07 | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 9.43 | 1.97 |
| 25/12/2559 | 11:30 น. | 24 | 0.04 | 0.01 | 0.09 | 0.07 | 9.84 | 1.78 |

ตารางที่ ง-3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ที่ท่อน้ำออกก่อนลงสู่บ่อเลี้ยงปลา
 ปลาไนของระบบตัวกลางเคลื่อนที่จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็น
 ระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 26/12/2559 | 11:30 น. | 25 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 10.18 | 2.23 |
| 27/12/2559 | 11:30 น. | 26 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 9.60 | 1.84 |
| 28/12/2559 | 11:30 น. | 27 | 0.06 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 10.54 | 2.10 |
| 29/12/2559 | 11:30 น. | 28 | 0.07 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 10.07 | 2.14 |
| 30/12/2559 | 11:30 น. | 29 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 9.68 | 2.03 |
| 31/12/2559 | 11:30 น. | 30 | 0.05 | 0.08 | 0.04 | 0.01 | 10.73 | 2.22 |
| 1/1/2560 | 11:30 น. | 31 | 0.13 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 11.28 | 2.35 |
| 2/1/2560 | 11:30 น. | 32 | 0.08 | 0.01 | 0.05 | 0.02 | 11.10 | 2.31 |
| 3/1/2560 | 11:30 น. | 33 | 0.03 | 0.02 | 0.06 | 0.01 | 11.51 | 2.13 |
| 4/1/2560 | 11:30 น. | 34 | 0.06 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 10.13 | 1.86 |
| 5/1/2560 | 11:30 น. | 35 | 0.06 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 12.23 | 2.03 |
| 6/1/2560 | 11:30 น. | 36 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 12.40 | 2.37 |
| 7/1/2560 | 11:30 น. | 37 | 0.09 | 0.04 | 0.04 | 0.02 | 12.00 | 2.28 |
| 8/1/2560 | 11:30 น. | 38 | 0.01 | 0.00 | 0.05 | 0.01 | 12.00 | 1.89 |
| 9/1/2560 | 11:30 น. | 39 | 0.03 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 12.59 | 2.11 |
| 10/1/2560 | 11:30 น. | 40 | 0.08 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 11.24 | 2.09 |
| 11/1/2560 | 11:30 น. | 41 | 0.00 | 0.00 | 0.06 | 0.02 | 12.32 | 1.97 |
| 12/1/2560 | 11:30 น. | 42 | 0.08 | 0.01 | 0.08 | 0.05 | 12.05 | 2.30 |
| 13/1/2560 | 11:30 น. | 43 | 0.07 | 0.01 | 0.05 | 0.04 | 10.62 | 2.86 |
| 14/1/2560 | 11:30 น. | 44 | 0.07 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 12.54 | 1.68 |
| 15/1/2560 | 11:30 น. | 45 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.03 | 14.45 | 2.05 |
| 16/1/2560 | 11:30 น. | 46 | 0.13 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 12.88 | 2.19 |
| 17/1/2560 | 11:30 น. | 47 | 0.02 | 0.02 | 0.09 | 0.04 | 14.52 | 2.29 |
| 18/1/2560 | 11:30 น. | 48 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 12.87 | 0.60 |
| 19/1/2560 | 11:30 น. | 49 | 0.07 | 0.02 | 0.06 | 0.02 | 13.16 | 0.46 |

ตารางที่ ง-3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรต์ และไนเตรต ที่ท่อน้ำออกก่อนลงสู่บ่อเลี้ยงปลา
 ปลาไนของระบบตัวกลางเคลื่อนที่จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็น
 ระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนโตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 20/1/2560 | 11:30 น. | 50 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 14.52 | 1.87 |
| 21/1/2560 | 11:30 น. | 51 | 0.02 | 0.02 | 0.05 | 0.04 | 14.59 | 2.18 |
| 22/1/2560 | 11:30 น. | 52 | 0.02 | 0.01 | 0.06 | 0.04 | 15.68 | 1.97 |
| 23/1/2560 | 11:30 น. | 53 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.04 | 13.53 | 1.35 |
| 24/1/2560 | 11:30 น. | 54 | 0.04 | 0.01 | 0.07 | 0.03 | 15.68 | 1.52 |
| 25/1/2560 | 11:30 น. | 55 | 0.06 | 0.04 | 0.08 | 0.04 | 11.73 | 2.90 |
| 26/1/2560 | 11:30 น. | 56 | 0.10 | 0.14 | 0.10 | 0.04 | 14.88 | 1.92 |
| 27/1/2560 | 11:30 น. | 57 | 0.06 | 0.03 | 0.11 | 0.01 | 16.85 | 1.64 |
| 28/1/2560 | 11:30 น. | 58 | 0.03 | 0.01 | 0.05 | 0.03 | 12.75 | 2.84 |
| 29/1/2560 | 11:30 น. | 59 | 0.02 | 0.01 | 0.07 | 0.02 | 14.11 | 3.28 |
| 30/1/2560 | 11:30 น. | 60 | 0.06 | 0.01 | 0.07 | 0.02 | 12.88 | 4.00 |

ตารางที่ ง-4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ที่ท่อน้ำออกก่อนลงสู่บ่อเลี้ยง
ปลาในของระบบโปรยกรองจำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็น
ระยะเวลา 60 วัน

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/12/2559 | 11:30 น. | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 6.49 | 0.35 |
| 2/12/2559 | 11:30 น. | 1 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 6.99 | 0.22 |
| 3/12/2559 | 11:30 น. | 2 | 0.10 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 7.41 | 0.44 |
| 4/12/2559 | 11:30 น. | 3 | 0.04 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 8.01 | 0.22 |
| 5/12/2559 | 11:30 น. | 4 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 7.14 | 0.71 |
| 6/12/2559 | 11:30 น. | 5 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 7.34 | 0.53 |
| 7/12/2559 | 11:30 น. | 6 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 7.05 | 1.35 |
| 8/12/2559 | 11:30 น. | 7 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 7.23 | 1.11 |
| 9/12/2559 | 11:30 น. | 8 | 0.01 | 0.00 | 0.03 | 0.02 | 7.97 | 0.22 |
| 10/12/2559 | 11:30 น. | 9 | 0.02 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 7.94 | 0.32 |
| 11/12/2559 | 11:30 น. | 10 | 0.04 | 0.04 | 0.07 | 0.06 | 9.26 | 0.36 |
| 12/12/2559 | 11:30 น. | 11 | 0.08 | 0.05 | 0.06 | 0.03 | 9.20 | 0.12 |
| 13/12/2559 | 11:30 น. | 12 | 0.08 | 0.04 | 0.08 | 0.04 | 10.16 | 0.71 |
| 14/12/2559 | 11:30 น. | 13 | 0.03 | 0.01 | 0.09 | 0.08 | 11.08 | 0.48 |
| 15/12/2559 | 11:30 น. | 14 | 0.03 | 0.02 | 0.07 | 0.03 | 11.14 | 0.79 |
| 16/12/2559 | 11:30 น. | 15 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 11.97 | 0.47 |
| 17/12/2559 | 11:30 น. | 16 | | | | | | |
| 18/12/2559 | 11:30 น. | 17 | | | | | | |
| 19/12/2559 | 11:30 น. | 18 | | | | | | |
| 20/12/2559 | 11:30 น. | 19 | | | | | | |
| 21/12/2559 | 11:30 น. | 20 | 0.04 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 14.69 | 1.11 |
| 22/12/2559 | 11:30 น. | 21 | 0.05 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 14.65 | 0.56 |
| 23/12/2559 | 11:30 น. | 22 | 0.07 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 11.33 | 0.94 |
| 24/12/2559 | 11:30 น. | 23 | 0.06 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 12.01 | 1.18 |
| 25/12/2559 | 11:30 น. | 24 | 0.07 | 0.02 | 0.06 | 0.01 | 12.17 | 1.15 |

ตารางที่ ง-4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ที่ท่อน้ำออกก่อนลงสู่บ่อเลี้ยง
ปลาในของระบบโปรยกรองจำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็น
ระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 26/12/2559 | 11:30 น. | 25 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 13.25 | 1.23 |
| 27/12/2559 | 11:30 น. | 26 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.02 | 12.26 | 0.89 |
| 28/12/2559 | 11:30 น. | 27 | 0.05 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 13.71 | 1.29 |
| 29/12/2559 | 11:30 น. | 28 | 0.06 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 12.94 | 1.39 |
| 30/12/2559 | 11:30 น. | 29 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 12.20 | 0.98 |
| 31/12/2559 | 11:30 น. | 30 | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.01 | 14.05 | 1.42 |
| 1/1/2560 | 11:30 น. | 31 | 0.14 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 15.38 | 1.34 |
| 2/1/2560 | 11:30 น. | 32 | 0.10 | 0.01 | 0.06 | 0.03 | 14.88 | 1.57 |
| 3/1/2560 | 11:30 น. | 33 | 0.04 | 0.03 | 0.06 | 0.02 | 15.89 | 1.26 |
| 4/1/2560 | 11:30 น. | 34 | 0.08 | 0.00 | 0.04 | 0.01 | 11.67 | 1.67 |
| 5/1/2560 | 11:30 น. | 35 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 14.43 | 1.29 |
| 6/1/2560 | 11:30 น. | 36 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 14.66 | 1.52 |
| 7/1/2560 | 11:30 น. | 37 | 0.05 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 14.53 | 1.79 |
| 8/1/2560 | 11:30 น. | 38 | 0.04 | 0.03 | 0.06 | 0.01 | 14.90 | 1.22 |
| 9/1/2560 | 11:30 น. | 39 | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.02 | 15.32 | 1.44 |
| 10/1/2560 | 11:30 น. | 40 | 0.07 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 13.18 | 1.03 |
| 11/1/2560 | 11:30 น. | 41 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 15.12 | 0.85 |
| 12/1/2560 | 11:30 น. | 42 | 0.08 | 0.00 | 0.05 | 0.01 | 15.52 | 1.92 |
| 13/1/2560 | 11:30 น. | 43 | 0.06 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 14.22 | 0.64 |
| 14/1/2560 | 11:30 น. | 44 | 0.08 | 0.02 | 0.05 | 0.00 | 16.85 | 1.52 |
| 15/1/2560 | 11:30 น. | 45 | 0.05 | 0.04 | 0.07 | 0.07 | 18.69 | 1.07 |
| 16/1/2560 | 11:30 น. | 46 | 0.12 | 0.02 | 0.05 | 0.02 | 17.19 | 1.08 |
| 17/1/2560 | 11:30 น. | 47 | 0.06 | 0.01 | 0.05 | 0.02 | 18.43 | 2.14 |
| 18/1/2560 | 11:30 น. | 48 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 17.71 | 0.69 |
| 19/1/2560 | 11:30 น. | 49 | 0.07 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 17.63 | 2.63 |

ตารางที่ ง-4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรต์ และไนเตรต ที่ท่อน้ำออกก่อนลงสู่บ่อเลี้ยง
ปลาในของระบบโปรยกรองจำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็น
ระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนโตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 20/1/2560 | 11:30 น. | 50 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 19.01 | 0.54 |
| 21/1/2560 | 11:30 น. | 51 | 0.01 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 17.80 | 1.15 |
| 22/1/2560 | 11:30 น. | 52 | 0.04 | 0.03 | 0.04 | 0.01 | 19.77 | 0.87 |
| 23/1/2560 | 11:30 น. | 53 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.01 | 17.82 | 1.33 |
| 24/1/2560 | 11:30 น. | 54 | 0.05 | 0.01 | 0.04 | 0.03 | 20.69 | 0.86 |
| 25/1/2560 | 11:30 น. | 55 | 0.03 | 0.00 | 0.06 | 0.05 | 16.40 | 1.83 |
| 26/1/2560 | 11:30 น. | 56 | 0.01 | 0.00 | 0.06 | 0.05 | 19.78 | 1.94 |
| 27/1/2560 | 11:30 น. | 57 | 0.07 | 0.07 | 0.09 | 0.06 | 22.53 | 0.66 |
| 28/1/2560 | 11:30 น. | 58 | 0.04 | 0.03 | 0.05 | 0.03 | 14.96 | 1.62 |
| 29/1/2560 | 11:30 น. | 59 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.02 | 16.04 | 1.95 |
| 30/1/2560 | 11:30 น. | 60 | 0.07 | 0.01 | 0.07 | 0.05 | 17.08 | 2.22 |

ตารางที่ ง-5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ที่บ่อปลาของชุดควบคุม (ไม่มี การติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพ) เป็นระยะเวลา 60 วัน

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|----|------------------|----|------------------|----|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/12/2559 | 11:30 น. | 0 | 0.03 | | 0.01 | | 4.85 | |
| 2/12/2559 | 11:30 น. | 1 | 0.07 | | 0.01 | | 5.08 | |
| 3/12/2559 | 11:30 น. | 2 | 0.29 | | 0.03 | | 5.28 | |
| 4/12/2559 | 11:30 น. | 3 | 0.24 | | 0.07 | | 5.21 | |
| 5/12/2559 | 11:30 น. | 4 | 0.16 | | 0.21 | | 4.17 | |
| 6/12/2559 | 11:30 น. | 5 | 0.12 | | 0.50 | | 4.12 | |
| 7/12/2559 | 11:30 น. | 6 | 0.11 | | 0.72 | | 4.98 | |
| 8/12/2559 | 11:30 น. | 7 | 0.00 | | 0.85 | | 3.85 | |
| 9/12/2559 | 11:30 น. | 8 | 0.03 | | 0.87 | | 4.87 | |
| 10/12/2559 | 11:30 น. | 9 | 0.03 | | 0.92 | | 3.60 | |
| 11/12/2559 | 11:30 น. | 10 | 0.04 | | 1.01 | | 4.74 | |
| 12/12/2559 | 11:30 น. | 11 | 0.04 | | 0.89 | | 5.30 | |
| 13/12/2559 | 11:30 น. | 12 | | | 0.99 | | 6.30 | |
| 14/12/2559 | 11:30 น. | 13 | 0.05 | | 1.18 | | 6.23 | |
| 15/12/2559 | 11:30 น. | 14 | 0.03 | | 0.61 | | 7.43 | |
| 16/12/2559 | 11:30 น. | 15 | 0.01 | | | | 7.82 | |
| 17/12/2559 | 11:30 น. | 16 | | | | | | |
| 18/12/2559 | 11:30 น. | 17 | | | | | | |
| 19/12/2559 | 11:30 น. | 18 | | | | | | |
| 20/12/2559 | 11:30 น. | 19 | | | | | | |
| 21/12/2559 | 11:30 น. | 20 | 0.08 | | 0.02 | | 8.50 | |
| 22/12/2559 | 11:30 น. | 21 | 0.04 | | 0.03 | | 9.44 | |
| 23/12/2559 | 11:30 น. | 22 | 0.06 | | 0.03 | | 7.00 | |
| 24/12/2559 | 11:30 น. | 23 | 0.05 | | 0.03 | | 8.09 | |
| 25/12/2559 | 11:30 น. | 24 | 0.05 | | 0.02 | | 7.82 | |

ตารางที่ ง-5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ที่บ่อปลาของชุดควบคุม (ไม่มี การติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพ) เป็นระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|----|------------------|----|------------------|----|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 26/12/2559 | 11:30 น. | 25 | 0.02 | | 0.02 | | 8.20 | |
| 27/12/2559 | 11:30 น. | 26 | 0.00 | | 0.02 | | 8.11 | |
| 28/12/2559 | 11:30 น. | 27 | 0.07 | | 0.02 | | 9.00 | |
| 29/12/2559 | 11:30 น. | 28 | 0.09 | | 0.03 | | 8.50 | |
| 30/12/2559 | 11:30 น. | 29 | 0.00 | | 0.03 | | 7.99 | |
| 31/12/2559 | 11:30 น. | 30 | 0.00 | | 0.04 | | 8.80 | |
| 1/1/2560 | 11:30 น. | 31 | 0.14 | | 0.03 | | 8.81 | |
| 2/1/2560 | 11:30 น. | 32 | 0.11 | | 0.03 | | 8.76 | |
| 3/1/2560 | 11:30 น. | 33 | 0.05 | | 0.04 | | 9.48 | |
| 4/1/2560 | 11:30 น. | 34 | 0.05 | | 0.04 | | 6.54 | |
| 5/1/2560 | 11:30 น. | 35 | 0.08 | | 0.03 | | 9.86 | |
| 6/1/2560 | 11:30 น. | 36 | 0.02 | | 0.01 | | 9.89 | |
| 7/1/2560 | 11:30 น. | 37 | 0.08 | | 0.02 | | 10.19 | |
| 8/1/2560 | 11:30 น. | 38 | 0.07 | | 0.04 | | 9.92 | |
| 9/1/2560 | 11:30 น. | 39 | 0.03 | | 0.03 | | 10.59 | |
| 10/1/2560 | 11:30 น. | 40 | 0.07 | | 0.02 | | 8.41 | |
| 11/1/2560 | 11:30 น. | 41 | 0.00 | | 0.03 | | 10.68 | |
| 12/1/2560 | 11:30 น. | 42 | 0.13 | | 0.04 | | 10.03 | |
| 13/1/2560 | 11:30 น. | 43 | 0.06 | | 0.07 | | 9.86 | |
| 14/1/2560 | 11:30 น. | 44 | 0.10 | | 0.05 | | 11.09 | |
| 15/1/2560 | 11:30 น. | 45 | 0.03 | | 0.06 | | 13.06 | |
| 16/1/2560 | 11:30 น. | 46 | 0.09 | | 0.02 | | 12.82 | |
| 17/1/2560 | 11:30 น. | 47 | 0.07 | | 0.06 | | 13.58 | |
| 18/1/2560 | 11:30 น. | 48 | 0.00 | | 0.01 | | 11.48 | |
| 19/1/2560 | 11:30 น. | 49 | 0.15 | | 0.10 | | 12.56 | |

ตารางที่ ง-5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรต์ และไนเตรต ที่บ่อปลาของชุดควบคุม (ไม่มี การติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพ) เป็นระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนโตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|----|------------------|----|------------------|----|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 20/1/2560 | 11:30 น. | 50 | 0.04 | | 0.06 | | 12.99 | |
| 21/1/2560 | 11:30 น. | 51 | 0.09 | | 0.08 | | 12.25 | |
| 22/1/2560 | 11:30 น. | 52 | 0.06 | | 0.11 | | 13.74 | |
| 23/1/2560 | 11:30 น. | 53 | 0.00 | | 0.14 | | 10.16 | |
| 24/1/2560 | 11:30 น. | 54 | 0.06 | | 0.13 | | 14.00 | |
| 25/1/2560 | 11:30 น. | 55 | 0.08 | | 0.20 | | 10.69 | |
| 26/1/2560 | 11:30 น. | 56 | 0.05 | | 0.12 | | 13.22 | |
| 27/1/2560 | 11:30 น. | 57 | 0.12 | | 0.15 | | 16.01 | |
| 28/1/2560 | 11:30 น. | 58 | 0.08 | | 0.08 | | 11.81 | |
| 29/1/2560 | 11:30 น. | 59 | 0.03 | | 0.07 | | 12.68 | |
| 30/1/2560 | 11:30 น. | 60 | | | | | | |

ตารางที่ ง-6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ที่บ่อปลาของระบบตัวกลางจม
ตัว จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็นระยะเวลา 60 วัน

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/12/2559 | 11:30 น. | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 6.59 | 0.55 |
| 2/12/2559 | 11:30 น. | 1 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 6.77 | 0.80 |
| 3/12/2559 | 11:30 น. | 2 | 0.11 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 7.27 | 0.44 |
| 4/12/2559 | 11:30 น. | 3 | 0.06 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 7.92 | 0.35 |
| 5/12/2559 | 11:30 น. | 4 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 6.15 | 0.74 |
| 6/12/2559 | 11:30 น. | 5 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 6.96 | 0.15 |
| 7/12/2559 | 11:30 น. | 6 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 8.19 | 0.15 |
| 8/12/2559 | 11:30 น. | 7 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 7.37 | 0.58 |
| 9/12/2559 | 11:30 น. | 8 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 7.84 | 0.86 |
| 10/12/2559 | 11:30 น. | 9 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 5.04 | 1.54 |
| 11/12/2559 | 11:30 น. | 10 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.01 | 8.91 | 0.46 |
| 12/12/2559 | 11:30 น. | 11 | 0.08 | 0.03 | 0.09 | 0.05 | 8.66 | 0.46 |
| 13/12/2559 | 11:30 น. | 12 | | | 0.24 | 0.01 | 9.21 | 0.97 |
| 14/12/2559 | 11:30 น. | 13 | 0.04 | 0.01 | 0.16 | 0.00 | 9.11 | 0.87 |
| 15/12/2559 | 11:30 น. | 14 | 0.03 | 0.01 | 0.05 | 0.01 | 9.00 | 1.89 |
| 16/12/2559 | 11:30 น. | 15 | 0.02 | 0.01 | | | 10.65 | 1.52 |
| 17/12/2559 | 11:30 น. | 16 | | | | | | |
| 18/12/2559 | 11:30 น. | 17 | | | | | | |
| 19/12/2559 | 11:30 น. | 18 | | | | | | |
| 20/12/2559 | 11:30 น. | 19 | | | | | | |
| 21/12/2559 | 11:30 น. | 20 | 0.05 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 12.26 | 1.68 |
| 22/12/2559 | 11:30 น. | 21 | 0.04 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 12.57 | 2.34 |
| 23/12/2559 | 11:30 น. | 22 | 0.07 | 0.00 | 0.04 | 0.01 | 10.00 | 0.96 |
| 24/12/2559 | 11:30 น. | 23 | 0.06 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 10.42 | 1.02 |
| 25/12/2559 | 11:30 น. | 24 | 0.10 | 0.02 | 0.10 | 0.02 | 10.72 | 1.00 |

ตารางที่ ง-6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ที่บ่อปลาของระบบตัวกลางจม
ตัว จำนวน 3 ถึงปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถึงปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็นระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 26/12/2559 | 11:30 น. | 25 | 0.05 | 0.02 | 0.05 | 0.02 | 11.17 | 0.94 |
| 27/12/2559 | 11:30 น. | 26 | 0.01 | 0.01 | 0.05 | 0.02 | 10.58 | 0.68 |
| 28/12/2559 | 11:30 น. | 27 | 0.06 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 12.08 | 0.87 |
| 29/12/2559 | 11:30 น. | 28 | 0.10 | 0.03 | 0.04 | 0.01 | 11.31 | 1.08 |
| 30/12/2559 | 11:30 น. | 29 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 10.59 | 0.93 |
| 31/12/2559 | 11:30 น. | 30 | 0.04 | 0.03 | 0.06 | 0.02 | 11.21 | 1.37 |
| 1/1/2560 | 11:30 น. | 31 | 0.13 | 0.02 | 0.06 | 0.05 | 12.26 | 1.49 |
| 2/1/2560 | 11:30 น. | 32 | 0.10 | 0.01 | 0.06 | 0.03 | 11.61 | 1.32 |
| 3/1/2560 | 11:30 น. | 33 | 0.05 | 0.02 | 0.07 | 0.03 | 11.89 | 1.32 |
| 4/1/2560 | 11:30 น. | 34 | 0.06 | 0.01 | 0.08 | 0.02 | 10.38 | 1.96 |
| 5/1/2560 | 11:30 น. | 35 | 0.06 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 12.89 | 0.86 |
| 6/1/2560 | 11:30 น. | 36 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 13.01 | 0.77 |
| 7/1/2560 | 11:30 น. | 37 | 0.10 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 13.24 | 0.60 |
| 8/1/2560 | 11:30 น. | 38 | 0.02 | 0.01 | 0.09 | 0.07 | 13.19 | 0.49 |
| 9/1/2560 | 11:30 น. | 39 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.01 | 13.62 | 0.55 |
| 10/1/2560 | 11:30 น. | 40 | 0.07 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 12.06 | 0.99 |
| 11/1/2560 | 11:30 น. | 41 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.02 | 13.34 | 0.75 |
| 12/1/2560 | 11:30 น. | 42 | 0.08 | 0.04 | 0.06 | 0.01 | 13.24 | 0.32 |
| 13/1/2560 | 11:30 น. | 43 | 0.05 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 12.16 | 0.43 |
| 14/1/2560 | 11:30 น. | 44 | 0.07 | 0.00 | 0.04 | 0.01 | 13.49 | 1.17 |
| 15/1/2560 | 11:30 น. | 45 | 0.01 | 0.01 | 0.05 | 0.01 | 15.81 | 0.93 |
| 16/1/2560 | 11:30 น. | 46 | 0.10 | 0.01 | 0.06 | 0.00 | 14.52 | 0.50 |
| 17/1/2560 | 11:30 น. | 47 | 0.05 | 0.01 | 0.09 | 0.01 | 15.79 | 0.59 |
| 18/1/2560 | 11:30 น. | 48 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 16.62 | 1.30 |
| 19/1/2560 | 11:30 น. | 49 | 0.10 | 0.03 | 0.10 | 0.01 | 15.83 | 0.46 |

ตารางที่ ง-6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรต์ และไนเตรต ที่บ่อปลาของระบบตัวกลางจม
ตัว จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็นระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนโตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 20/1/2560 | 11:30 น. | 50 | 0.05 | 0.02 | 0.04 | 0.03 | 16.51 | 0.28 |
| 21/1/2560 | 11:30 น. | 51 | 0.06 | 0.02 | 0.06 | 0.02 | 15.73 | 0.33 |
| 22/1/2560 | 11:30 น. | 52 | 0.06 | 0.02 | 0.08 | 0.03 | 17.64 | 0.57 |
| 23/1/2560 | 11:30 น. | 53 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.04 | 14.61 | 0.43 |
| 24/1/2560 | 11:30 น. | 54 | 0.06 | 0.01 | 0.07 | 0.03 | 17.33 | 0.66 |
| 25/1/2560 | 11:30 น. | 55 | 0.04 | 0.01 | 0.07 | 0.03 | 13.20 | 1.56 |
| 26/1/2560 | 11:30 น. | 56 | 0.06 | 0.03 | 0.07 | 0.03 | 16.16 | 1.72 |
| 27/1/2560 | 11:30 น. | 57 | 0.06 | 0.06 | 0.11 | 0.03 | 19.06 | 0.75 |
| 28/1/2560 | 11:30 น. | 58 | 0.03 | 0.01 | 0.09 | 0.03 | 13.30 | 0.32 |
| 29/1/2560 | 11:30 น. | 59 | 0.05 | 0.02 | 0.08 | 0.03 | 16.03 | 0.50 |
| 30/1/2560 | 11:30 น. | 60 | 0.08 | 0.01 | 0.10 | 0.05 | 13.64 | 2.84 |

ตารางที่ ง-7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ที่บ่อปลาของระบบตัวกลาง
เคลื่อนที่จำนวน 3 ถึงปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถึงปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็นระยะเวลา 60 วัน

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/12/2559 | 11:30 น. | 0 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 6.26 | 1.70 |
| 2/12/2559 | 11:30 น. | 1 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 6.41 | 1.66 |
| 3/12/2559 | 11:30 น. | 2 | 0.09 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 6.32 | 1.38 |
| 4/12/2559 | 11:30 น. | 3 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 6.70 | 1.49 |
| 5/12/2559 | 11:30 น. | 4 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 5.49 | 0.93 |
| 6/12/2559 | 11:30 น. | 5 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 5.92 | 1.05 |
| 7/12/2559 | 11:30 น. | 6 | 0.04 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 6.26 | 0.89 |
| 8/12/2559 | 11:30 น. | 7 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 6.68 | 1.26 |
| 9/12/2559 | 11:30 น. | 8 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 6.63 | 0.93 |
| 10/12/2559 | 11:30 น. | 9 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 5.32 | 1.96 |
| 11/12/2559 | 11:30 น. | 10 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 7.82 | 1.45 |
| 12/12/2559 | 11:30 น. | 11 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 7.16 | 1.79 |
| 13/12/2559 | 11:30 น. | 12 | | | 0.03 | 0.01 | 7.59 | 1.09 |
| 14/12/2559 | 11:30 น. | 13 | 0.04 | 0.02 | 0.07 | 0.07 | 8.31 | 1.57 |
| 15/12/2559 | 11:30 น. | 14 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 8.18 | 1.93 |
| 16/12/2559 | 11:30 น. | 15 | 0.00 | 0.00 | | | 8.97 | 1.78 |
| 17/12/2559 | 11:30 น. | 16 | | | | | | |
| 18/12/2559 | 11:30 น. | 17 | | | | | | |
| 19/12/2559 | 11:30 น. | 18 | | | | | | |
| 20/12/2559 | 11:30 น. | 19 | | | | | | |
| 21/12/2559 | 11:30 น. | 20 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 10.09 | 2.45 |
| 22/12/2559 | 11:30 น. | 21 | 0.03 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 10.62 | 2.50 |
| 23/12/2559 | 11:30 น. | 22 | 0.06 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 9.35 | 1.66 |
| 24/12/2559 | 11:30 น. | 23 | 0.07 | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 9.61 | 2.22 |
| 25/12/2559 | 11:30 น. | 24 | 0.05 | 0.02 | 0.11 | 0.08 | 10.12 | 2.26 |

ตารางที่ ง-7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ที่บ่อปลาของระบบตัวกลาง เคลื่อนที่จำนวน 3 ถึงปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถึงปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็นระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 26/12/2559 | 11:30 น. | 25 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 10.01 | 2.16 |
| 27/12/2559 | 11:30 น. | 26 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 9.78 | 2.01 |
| 28/12/2559 | 11:30 น. | 27 | 0.06 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 10.69 | 2.36 |
| 29/12/2559 | 11:30 น. | 28 | 0.09 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 10.37 | 2.29 |
| 30/12/2559 | 11:30 น. | 29 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 9.67 | 1.92 |
| 31/12/2559 | 11:30 น. | 30 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 10.70 | 2.27 |
| 1/1/2560 | 11:30 น. | 31 | 0.10 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 11.08 | 2.43 |
| 2/1/2560 | 11:30 น. | 32 | 0.09 | 0.01 | 0.05 | 0.02 | 11.02 | 2.29 |
| 3/1/2560 | 11:30 น. | 33 | 0.04 | 0.00 | 0.05 | 0.02 | 11.87 | 2.35 |
| 4/1/2560 | 11:30 น. | 34 | 0.06 | 0.00 | 0.05 | 0.02 | 9.85 | 3.28 |
| 5/1/2560 | 11:30 น. | 35 | 0.06 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 12.16 | 2.04 |
| 6/1/2560 | 11:30 น. | 36 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 12.34 | 2.12 |
| 7/1/2560 | 11:30 น. | 37 | 0.06 | 0.01 | 0.04 | 0.02 | 12.29 | 2.26 |
| 8/1/2560 | 11:30 น. | 38 | 0.01 | 0.01 | 0.05 | 0.02 | 12.12 | 2.01 |
| 9/1/2560 | 11:30 น. | 39 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 12.67 | 1.93 |
| 10/1/2560 | 11:30 น. | 40 | 0.06 | 0.01 | 0.04 | 0.00 | 10.44 | 2.35 |
| 11/1/2560 | 11:30 น. | 41 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.02 | 12.19 | 1.76 |
| 12/1/2560 | 11:30 น. | 42 | 0.09 | 0.03 | 0.09 | 0.05 | 12.26 | 2.35 |
| 13/1/2560 | 11:30 น. | 43 | 0.06 | 0.02 | 0.06 | 0.04 | 11.54 | 2.67 |
| 14/1/2560 | 11:30 น. | 44 | 0.07 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 12.56 | 2.16 |
| 15/1/2560 | 11:30 น. | 45 | 0.02 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 14.33 | 3.14 |
| 16/1/2560 | 11:30 น. | 46 | 0.09 | 0.01 | 0.05 | 0.01 | 13.00 | 2.88 |
| 17/1/2560 | 11:30 น. | 47 | 0.03 | 0.01 | 0.08 | 0.03 | 13.73 | 2.38 |
| 18/1/2560 | 11:30 น. | 48 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 13.91 | 2.10 |
| 19/1/2560 | 11:30 น. | 49 | 0.10 | 0.01 | 0.05 | 0.02 | 12.29 | 1.20 |

ตารางที่ ง-7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรต์ และไนเตรต ที่บ่อปลาของระบบตัวกลางเคลื่อนที่จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็นระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนโตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 20/1/2560 | 11:30 น. | 50 | 0.04 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 15.04 | 1.77 |
| 21/1/2560 | 11:30 น. | 51 | 0.07 | 0.02 | 0.05 | 0.03 | 14.71 | 2.14 |
| 22/1/2560 | 11:30 น. | 52 | 0.05 | 0.01 | 0.06 | 0.03 | 15.00 | 1.79 |
| 23/1/2560 | 11:30 น. | 53 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.04 | 13.23 | 1.54 |
| 24/1/2560 | 11:30 น. | 54 | 0.06 | 0.01 | 0.07 | 0.03 | 15.40 | 1.72 |
| 25/1/2560 | 11:30 น. | 55 | 0.05 | 0.01 | 0.08 | 0.04 | 11.99 | 2.90 |
| 26/1/2560 | 11:30 น. | 56 | 0.14 | 0.14 | 0.10 | 0.05 | 15.12 | 2.01 |
| 27/1/2560 | 11:30 น. | 57 | 0.08 | 0.04 | 0.09 | 0.02 | 16.75 | 1.97 |
| 28/1/2560 | 11:30 น. | 58 | 0.03 | 0.01 | 0.07 | 0.01 | 13.09 | 3.06 |
| 29/1/2560 | 11:30 น. | 59 | 0.02 | 0.01 | 0.05 | 0.02 | 13.91 | 2.77 |
| 30/1/2560 | 11:30 น. | 60 | 0.06 | 0.02 | 0.07 | 0.01 | 14.18 | 2.54 |

ตารางที่ ง-8 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ที่บ่อปลาของระบบโปรยกรอง
จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็นระยะเวลา 60 วัน

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/12/2559 | 11:30 น. | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 6.82 | 0.10 |
| 2/12/2559 | 11:30 น. | 1 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 6.61 | 0.74 |
| 3/12/2559 | 11:30 น. | 2 | 0.11 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 7.22 | 0.46 |
| 4/12/2559 | 11:30 น. | 3 | 0.05 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 8.04 | 0.14 |
| 5/12/2559 | 11:30 น. | 4 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 6.81 | 0.49 |
| 6/12/2559 | 11:30 น. | 5 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 7.13 | 0.64 |
| 7/12/2559 | 11:30 น. | 6 | 0.04 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 7.96 | 0.44 |
| 8/12/2559 | 11:30 น. | 7 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 7.56 | 0.32 |
| 9/12/2559 | 11:30 น. | 8 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 8.22 | 0.31 |
| 10/12/2559 | 11:30 น. | 9 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 4.81 | 0.73 |
| 11/12/2559 | 11:30 น. | 10 | 0.06 | 0.05 | 0.06 | 0.05 | 8.43 | 1.05 |
| 12/12/2559 | 11:30 น. | 11 | 0.08 | 0.05 | 0.07 | 0.05 | 8.73 | 0.85 |
| 13/12/2559 | 11:30 น. | 12 | | | 0.05 | 0.01 | 10.40 | 0.45 |
| 14/12/2559 | 11:30 น. | 13 | 0.03 | 0.01 | 0.10 | 0.06 | 10.09 | 0.61 |
| 15/12/2559 | 11:30 น. | 14 | 0.04 | 0.03 | 0.06 | 0.03 | 10.75 | 0.34 |
| 16/12/2559 | 11:30 น. | 15 | 0.01 | 0.01 | | | 10.99 | 0.27 |
| 17/12/2559 | 11:30 น. | 16 | | | | | | |
| 18/12/2559 | 11:30 น. | 17 | | | | | | |
| 19/12/2559 | 11:30 น. | 18 | | | | | | |
| 20/12/2559 | 11:30 น. | 19 | | | | | | |
| 21/12/2559 | 11:30 น. | 20 | 0.07 | 0.04 | 0.02 | 0.00 | 14.18 | 0.54 |
| 22/12/2559 | 11:30 น. | 21 | 0.07 | 0.04 | 0.04 | 0.01 | 14.65 | 0.63 |
| 23/12/2559 | 11:30 น. | 22 | 0.06 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 11.70 | 1.49 |
| 24/12/2559 | 11:30 น. | 23 | 0.07 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 12.03 | 1.49 |
| 25/12/2559 | 11:30 น. | 24 | 0.09 | 0.03 | 0.06 | 0.01 | 13.40 | 0.76 |

ตารางที่ ง-8 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรต์ และไนเตรต ที่บ่อปลาของชุมชนบ่อพรุกรอง
จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็นระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนโตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 26/12/2559 | 11:30 น. | 25 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 13.49 | 0.84 |
| 27/12/2559 | 11:30 น. | 26 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 12.12 | 1.09 |
| 28/12/2559 | 11:30 น. | 27 | 0.05 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 14.30 | 1.45 |
| 29/12/2559 | 11:30 น. | 28 | 0.10 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 13.18 | 1.47 |
| 30/12/2559 | 11:30 น. | 29 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 12.46 | 1.10 |
| 31/12/2559 | 11:30 น. | 30 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.02 | 14.32 | 1.24 |
| 1/1/2560 | 11:30 น. | 31 | 0.13 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 15.12 | 0.92 |
| 2/1/2560 | 11:30 น. | 32 | 0.09 | 0.01 | 0.06 | 0.02 | 14.64 | 1.01 |
| 3/1/2560 | 11:30 น. | 33 | 0.05 | 0.02 | 0.06 | 0.03 | 15.65 | 0.96 |
| 4/1/2560 | 11:30 น. | 34 | 0.06 | 0.00 | 0.04 | 0.01 | 11.01 | 1.81 |
| 5/1/2560 | 11:30 น. | 35 | 0.06 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 14.29 | 1.34 |
| 6/1/2560 | 11:30 น. | 36 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 15.08 | 1.25 |
| 7/1/2560 | 11:30 น. | 37 | 0.06 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 14.97 | 2.16 |
| 8/1/2560 | 11:30 น. | 38 | 0.03 | 0.02 | 0.05 | 0.00 | 14.43 | 0.59 |
| 9/1/2560 | 11:30 น. | 39 | 0.03 | 0.02 | 0.04 | 0.02 | 15.28 | 1.20 |
| 10/1/2560 | 11:30 น. | 40 | 0.06 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 12.97 | 2.41 |
| 11/1/2560 | 11:30 น. | 41 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.02 | 14.65 | 0.95 |
| 12/1/2560 | 11:30 น. | 42 | 0.10 | 0.04 | 0.04 | 0.01 | 13.88 | 1.44 |
| 13/1/2560 | 11:30 น. | 43 | 0.05 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 13.99 | 1.62 |
| 14/1/2560 | 11:30 น. | 44 | 0.06 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 15.22 | 0.67 |
| 15/1/2560 | 11:30 น. | 45 | 0.04 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 18.51 | 1.37 |
| 16/1/2560 | 11:30 น. | 46 | 0.08 | 0.01 | 0.04 | 0.03 | 18.02 | 0.93 |
| 17/1/2560 | 11:30 น. | 47 | 0.02 | 0.01 | 0.05 | 0.02 | 19.26 | 2.00 |
| 18/1/2560 | 11:30 น. | 48 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 17.57 | 0.95 |
| 19/1/2560 | 11:30 น. | 49 | 0.10 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 16.77 | 1.87 |

ตารางที่ ง-8 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรต์ และไนเตรต ที่บ่อปลาของระบบโปรยกรอง
จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็นระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนโตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 20/1/2560 | 11:30 น. | 50 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 18.75 | 0.90 |
| 21/1/2560 | 11:30 น. | 51 | 0.06 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 19.12 | 1.97 |
| 22/1/2560 | 11:30 น. | 52 | 0.07 | 0.03 | 0.04 | 0.01 | 19.78 | 0.98 |
| 23/1/2560 | 11:30 น. | 53 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.01 | 16.41 | 0.71 |
| 24/1/2560 | 11:30 น. | 54 | 0.06 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 20.49 | 0.85 |
| 25/1/2560 | 11:30 น. | 55 | 0.04 | 0.01 | 0.05 | 0.02 | 16.02 | 1.86 |
| 26/1/2560 | 11:30 น. | 56 | 0.03 | 0.01 | 0.06 | 0.03 | 20.51 | 1.12 |
| 27/1/2560 | 11:30 น. | 57 | 0.10 | 0.03 | 0.06 | 0.03 | 22.52 | 0.69 |
| 28/1/2560 | 11:30 น. | 58 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 15.74 | 2.04 |
| 29/1/2560 | 11:30 น. | 59 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.02 | 16.64 | 3.04 |
| 30/1/2560 | 11:30 น. | 60 | 0.05 | 0.01 | 0.05 | 0.03 | 15.91 | 1.18 |

ตารางที่ ง-9 ค่าสภาพความเป็นต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ที่บ่อปลาของ
ชุดควบคุม (ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพ) เป็นระยะเวลา 60 วัน

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|----|------------------|----|------------------|----|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/12/2559 | 12:00 น. | 0 | 110.00 | | 7.70 | | 8.19 | |
| 2/12/2559 | 12:00 น. | 1 | 140.00 | | 7.30 | | 8.29 | |
| 3/12/2559 | 12:00 น. | 2 | 150.00 | | 7.50 | | 8.39 | |
| 4/12/2559 | 12:00 น. | 3 | 130.00 | | 7.50 | | 8.23 | |
| 5/12/2559 | 12:00 น. | 4 | 140.00 | | 7.50 | | 8.10 | |
| 6/12/2559 | 12:00 น. | 5 | 140.00 | | 7.60 | | 8.10 | |
| 7/12/2559 | 12:00 น. | 6 | 140.00 | | 7.60 | | 8.10 | |
| 8/12/2559 | 12:00 น. | 7 | 140.00 | | 7.60 | | 8.10 | |
| 9/12/2559 | 12:00 น. | 8 | 130.00 | | 7.50 | | 8.10 | |
| 10/12/2559 | 12:00 น. | 9 | 130.00 | | 7.60 | | 8.10 | |
| 11/12/2559 | 12:00 น. | 10 | 130.00 | | 7.60 | | 8.10 | |
| 12/12/2559 | 12:00 น. | 11 | 130.00 | | 7.50 | | 8.10 | |
| 13/12/2559 | 12:00 น. | 12 | 130.00 | | 7.70 | | 8.10 | |
| 14/12/2559 | 12:00 น. | 13 | 120.00 | | 7.40 | | 8.10 | |
| 15/12/2559 | 12:00 น. | 14 | 130.00 | | 7.40 | | 8.10 | |
| 16/12/2559 | 12:00 น. | 15 | 130.00 | | 7.80 | | 8.10 | |
| 17/12/2559 | 12:00 น. | 16 | | | | | | |
| 18/12/2559 | 12:00 น. | 17 | | | | | | |
| 19/12/2559 | 12:00 น. | 18 | | | | | | |
| 20/12/2559 | 12:00 น. | 19 | | | | | | |
| 21/12/2559 | 12:00 น. | 20 | 180.00 | | 7.10 | | 8.10 | |
| 22/12/2559 | 12:00 น. | 21 | 180.00 | | 7.00 | | 7.90 | |
| 23/12/2559 | 12:00 น. | 22 | 170.00 | | 7.50 | | 8.10 | |
| 24/12/2559 | 12:00 น. | 23 | 150.00 | | 7.50 | | 8.20 | |
| 25/12/2559 | 12:00 น. | 24 | 130.00 | | 8.00 | | 8.00 | |

ตารางที่ ง-9 ค่าสภาพความเป็นต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ที่บ่อปลาของ
ชุดควบคุม (ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพ) เป็นระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|----|------------------|----|------------------|----|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 26/12/2559 | 12:00 น. | 25 | 150.00 | | 7.40 | | 8.00 | |
| 27/12/2559 | 12:00 น. | 26 | 170.00 | | 7.60 | | 8.00 | |
| 28/12/2559 | 12:00 น. | 27 | 170.00 | | 8.20 | | 8.00 | |
| 29/12/2559 | 12:00 น. | 28 | 180.00 | | 8.20 | | 8.10 | |
| 30/12/2559 | 12:00 น. | 29 | 190.00 | | 8.40 | | 8.10 | |
| 31/12/2559 | 12:00 น. | 30 | 200.00 | | 8.40 | | 8.00 | |
| 1/1/2560 | 12:00 น. | 31 | 180.00 | | 8.10 | | 8.00 | |
| 2/1/2560 | 12:00 น. | 32 | 190.00 | | 8.00 | | 8.00 | |
| 3/1/2560 | 12:00 น. | 33 | 190.00 | | 8.00 | | 8.10 | |
| 4/1/2560 | 12:00 น. | 34 | 180.00 | | 8.00 | | 8.13 | |
| 5/1/2560 | 12:00 น. | 35 | 190.00 | | 8.00 | | 8.10 | |
| 6/1/2560 | 12:00 น. | 36 | 200.00 | | 8.10 | | 8.00 | |
| 7/1/2560 | 12:00 น. | 37 | 200.00 | | 8.10 | | 8.00 | |
| 8/1/2560 | 12:00 น. | 38 | 190.00 | | 8.00 | | 8.00 | |
| 9/1/2560 | 12:00 น. | 39 | 190.00 | | 8.00 | | 8.00 | |
| 10/1/2560 | 12:00 น. | 40 | 200.00 | | 8.00 | | 8.00 | |
| 11/1/2560 | 12:00 น. | 41 | 200.00 | | 8.00 | | 8.00 | |
| 12/1/2560 | 12:00 น. | 42 | 210.00 | | 7.90 | | 8.10 | |
| 13/1/2560 | 12:00 น. | 43 | 210.00 | | 7.80 | | 8.10 | |
| 14/1/2560 | 12:00 น. | 44 | 190.00 | | 8.00 | | 8.10 | |
| 15/1/2560 | 12:00 น. | 45 | 200.00 | | 7.90 | | 8.10 | |
| 16/1/2560 | 12:00 น. | 46 | 200.00 | | 7.90 | | 8.10 | |
| 17/1/2560 | 12:00 น. | 47 | 200.00 | | 7.90 | | 8.10 | |
| 18/1/2560 | 12:00 น. | 48 | 180.00 | | 7.90 | | 8.10 | |
| 19/1/2560 | 12:00 น. | 49 | 180.00 | | 7.90 | | 8.10 | |

ตารางที่ ง-9 ค่าสภาพความเป็นต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ที่บ่อปลาของ
ชุดควบคุม (ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ชีวภาพ) เป็นระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|----|------------------|----|------------------|----|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 20/1/2560 | 12:00 น. | 50 | 180.00 | | 7.90 | | 8.10 | |
| 21/1/2560 | 12:00 น. | 51 | 180.00 | | 7.90 | | 8.10 | |
| 22/1/2560 | 12:00 น. | 52 | 180.00 | | 7.90 | | 8.10 | |
| 23/1/2560 | 12:00 น. | 53 | 180.00 | | 7.90 | | 8.10 | |
| 24/1/2560 | 12:00 น. | 54 | 190.00 | | 7.90 | | 8.10 | |
| 25/1/2560 | 12:00 น. | 55 | 210.00 | | 8.10 | | 8.20 | |
| 26/1/2560 | 12:00 น. | 56 | 210.00 | | 8.00 | | 8.20 | |
| 27/1/2560 | 12:00 น. | 57 | 210.00 | | 8.00 | | 8.10 | |
| 28/1/2560 | 12:00 น. | 58 | 210.00 | | 8.00 | | 8.10 | |
| 29/1/2560 | 12:00 น. | 59 | 210.00 | | 7.90 | | 8.00 | |
| 30/1/2560 | 12:00 น. | 60 | 210.00 | | 7.90 | | 8.00 | |

ตารางที่ ง-10 ค่าสภาพความเป็นต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ที่บ่อปลา
ของระบบตัวกลางจมตัว จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็น
ระยะเวลา 60 วัน

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|-------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/12/2559 | 12:00 น. | 0 | 123.33 | 5.77 | 7.50 | 0.00 | 8.04 | 0.03 |
| 2/12/2559 | 12:00 น. | 1 | 146.67 | 5.77 | 7.27 | 0.15 | 7.93 | 0.07 |
| 3/12/2559 | 12:00 น. | 2 | 143.33 | 5.77 | 7.27 | 0.21 | 8.20 | 0.05 |
| 4/12/2559 | 12:00 น. | 3 | 140.00 | 0.00 | 7.40 | 0.10 | 8.20 | 0.04 |
| 5/12/2559 | 12:00 น. | 4 | 146.67 | 5.77 | 7.47 | 0.12 | 8.20 | 0.00 |
| 6/12/2559 | 12:00 น. | 5 | 133.33 | 5.77 | 7.27 | 0.21 | 8.23 | 0.06 |
| 7/12/2559 | 12:00 น. | 6 | 140.00 | 10.00 | 7.53 | 0.21 | 8.20 | 0.00 |
| 8/12/2559 | 12:00 น. | 7 | 140.00 | 10.00 | 7.53 | 0.21 | 8.20 | 0.00 |
| 9/12/2559 | 12:00 น. | 8 | 130.00 | 0.00 | 7.73 | 0.12 | 8.20 | 0.00 |
| 10/12/2559 | 12:00 น. | 9 | 130.00 | 0.00 | 7.40 | 0.35 | 8.13 | 0.06 |
| 11/12/2559 | 12:00 น. | 10 | 123.33 | 5.77 | 7.57 | 0.38 | 8.13 | 0.06 |
| 12/12/2559 | 12:00 น. | 11 | 120.00 | 0.00 | 7.43 | 0.35 | 8.13 | 0.06 |
| 13/12/2559 | 12:00 น. | 12 | 123.33 | 5.77 | 7.17 | 0.15 | 8.10 | 0.00 |
| 14/12/2559 | 12:00 น. | 13 | 123.33 | 11.55 | 7.43 | 0.21 | 8.10 | 0.00 |
| 15/12/2559 | 12:00 น. | 14 | 130.00 | 0.00 | 7.10 | 0.10 | 8.10 | 0.00 |
| 16/12/2559 | 12:00 น. | 15 | 130.00 | 0.00 | 7.50 | 0.26 | 8.10 | 0.00 |
| 17/12/2559 | 12:00 น. | 16 | | | | | | |
| 18/12/2559 | 12:00 น. | 17 | | | | | | |
| 19/12/2559 | 12:00 น. | 18 | | | | | | |
| 20/12/2559 | 12:00 น. | 19 | | | | | | |
| 21/12/2559 | 12:00 น. | 20 | 176.67 | 5.77 | 7.00 | 0.17 | 8.10 | 0.00 |
| 22/12/2559 | 12:00 น. | 21 | 176.67 | 5.77 | 6.93 | 0.15 | 7.80 | 0.10 |
| 23/12/2559 | 12:00 น. | 22 | 136.67 | 5.77 | 7.30 | 0.17 | 8.03 | 0.06 |
| 24/12/2559 | 12:00 น. | 23 | 130.00 | 0.00 | 7.13 | 0.25 | 8.10 | 0.00 |
| 25/12/2559 | 12:00 น. | 24 | 120.00 | 10.00 | 7.83 | 0.12 | 8.07 | 0.06 |

ตารางที่ ง-10 ค่าสภาพความเป็นต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ที่บ่อปลาของระบบตัวกลางจมตัว จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ) เป็นระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|-------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 26/12/2559 | 12:00 น. | 25 | 133.33 | 5.77 | 7.17 | 0.06 | 8.03 | 0.06 |
| 27/12/2559 | 12:00 น. | 26 | 170.00 | 17.32 | 7.20 | 0.00 | 8.00 | 0.00 |
| 28/12/2559 | 12:00 น. | 27 | 146.67 | 5.77 | 8.20 | 0.10 | 8.03 | 0.06 |
| 29/12/2559 | 12:00 น. | 28 | 166.67 | 5.77 | 8.00 | 0.17 | 8.03 | 0.06 |
| 30/12/2559 | 12:00 น. | 29 | 156.67 | 15.28 | 8.20 | 0.00 | 8.03 | 0.06 |
| 31/12/2559 | 12:00 น. | 30 | 170.00 | 10.00 | 8.23 | 0.06 | 8.00 | 0.00 |
| 1/1/2560 | 12:00 น. | 31 | 156.67 | 15.28 | 7.97 | 0.06 | 8.00 | 0.00 |
| 2/1/2560 | 12:00 น. | 32 | 150.00 | 10.00 | 7.93 | 0.06 | 8.00 | 0.00 |
| 3/1/2560 | 12:00 น. | 33 | 160.00 | 0.00 | 7.93 | 0.06 | 8.03 | 0.06 |
| 4/1/2560 | 12:00 น. | 34 | 160.00 | 10.00 | 7.87 | 0.06 | 8.20 | 0.03 |
| 5/1/2560 | 12:00 น. | 35 | 166.67 | 5.77 | 7.93 | 0.06 | 8.10 | 0.00 |
| 6/1/2560 | 12:00 น. | 36 | 183.33 | 5.77 | 7.97 | 0.06 | 8.00 | 0.00 |
| 7/1/2560 | 12:00 น. | 37 | 173.33 | 5.77 | 7.90 | 0.00 | 8.00 | 0.00 |
| 8/1/2560 | 12:00 น. | 38 | 173.33 | 5.77 | 7.87 | 0.06 | 8.00 | 0.00 |
| 9/1/2560 | 12:00 น. | 39 | 170.00 | 0.00 | 7.87 | 0.12 | 8.03 | 0.06 |
| 10/1/2560 | 12:00 น. | 40 | 170.00 | 10.00 | 7.83 | 0.06 | 8.00 | 0.00 |
| 11/1/2560 | 12:00 น. | 41 | 173.33 | 5.77 | 7.80 | 0.00 | 8.00 | 0.00 |
| 12/1/2560 | 12:00 น. | 42 | 176.67 | 11.55 | 7.80 | 0.10 | 8.00 | 0.00 |
| 13/1/2560 | 12:00 น. | 43 | 166.67 | 20.82 | 7.63 | 0.06 | 8.03 | 0.06 |
| 14/1/2560 | 12:00 น. | 44 | 170.00 | 10.00 | 7.87 | 0.06 | 8.03 | 0.06 |
| 15/1/2560 | 12:00 น. | 45 | 170.00 | 10.00 | 7.67 | 0.06 | 8.03 | 0.06 |
| 16/1/2560 | 12:00 น. | 46 | 166.67 | 15.28 | 7.67 | 0.06 | 8.03 | 0.06 |
| 17/1/2560 | 12:00 น. | 47 | 166.67 | 20.82 | 7.73 | 0.06 | 8.03 | 0.06 |
| 18/1/2560 | 12:00 น. | 48 | 163.33 | 15.28 | 7.77 | 0.06 | 8.03 | 0.06 |
| 19/1/2560 | 12:00 น. | 49 | 163.33 | 15.28 | 7.67 | 0.06 | 8.00 | 0.00 |

ตารางที่ ง-10 ค่าสภาพความเป็นต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ที่บ่อปลา
ของระบบตัวกลางจมตัว จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ) เป็น
ระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|-------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 20/1/2560 | 12:00 น. | 50 | 163.33 | 15.28 | 7.67 | 0.06 | 8.00 | 0.00 |
| 21/1/2560 | 12:00 น. | 51 | 163.33 | 5.77 | 7.63 | 0.06 | 8.00 | 0.00 |
| 22/1/2560 | 12:00 น. | 52 | 166.67 | 5.77 | 7.70 | 0.00 | 8.03 | 0.06 |
| 23/1/2560 | 12:00 น. | 53 | 163.33 | 5.77 | 7.67 | 0.06 | 8.03 | 0.06 |
| 24/1/2560 | 12:00 น. | 54 | 173.33 | 5.77 | 7.67 | 0.06 | 8.03 | 0.06 |
| 25/1/2560 | 12:00 น. | 55 | 186.67 | 15.28 | 7.83 | 0.06 | 8.07 | 0.06 |
| 26/1/2560 | 12:00 น. | 56 | 186.67 | 15.28 | 7.87 | 0.06 | 8.07 | 0.06 |
| 27/1/2560 | 12:00 น. | 57 | 186.67 | 15.28 | 7.80 | 0.00 | 8.07 | 0.06 |
| 28/1/2560 | 12:00 น. | 58 | 186.67 | 15.28 | 7.77 | 0.06 | 8.00 | 0.10 |
| 29/1/2560 | 12:00 น. | 59 | 186.67 | 15.28 | 7.70 | 0.00 | 7.97 | 0.06 |
| 30/1/2560 | 12:00 น. | 60 | 186.67 | 15.28 | 7.67 | 0.06 | 7.97 | 0.06 |

ตารางที่ ง-11 ค่าสภาพความเป็นต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ที่บ่อปลา
ของระบบตัวกลางเคลื่อนที่จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็น
ระยะเวลา 60 วัน

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|-------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/12/2559 | 12:00 น. | 0 | 123.33 | 5.77 | 7.50 | 0.10 | 7.92 | 0.06 |
| 2/12/2559 | 12:00 น. | 1 | 143.33 | 5.77 | 7.40 | 0.10 | 8.08 | 0.02 |
| 3/12/2559 | 12:00 น. | 2 | 140.00 | 0.00 | 7.47 | 0.06 | 8.28 | 0.03 |
| 4/12/2559 | 12:00 น. | 3 | 140.00 | 10.00 | 7.50 | 0.10 | 8.30 | 0.02 |
| 5/12/2559 | 12:00 น. | 4 | 146.67 | 5.77 | 7.57 | 0.06 | 8.20 | 0.00 |
| 6/12/2559 | 12:00 น. | 5 | 143.33 | 11.55 | 7.60 | 0.00 | 8.17 | 0.06 |
| 7/12/2559 | 12:00 น. | 6 | 130.00 | 10.00 | 7.63 | 0.06 | 8.12 | 0.03 |
| 8/12/2559 | 12:00 น. | 7 | 130.00 | 10.00 | 7.63 | 0.06 | 8.10 | 0.00 |
| 9/12/2559 | 12:00 น. | 8 | 123.33 | 5.77 | 7.77 | 0.06 | 8.10 | 0.00 |
| 10/12/2559 | 12:00 น. | 9 | 120.00 | 0.00 | 7.53 | 0.06 | 8.13 | 0.06 |
| 11/12/2559 | 12:00 น. | 10 | 113.33 | 5.77 | 7.57 | 0.06 | 8.13 | 0.06 |
| 12/12/2559 | 12:00 น. | 11 | 123.33 | 11.55 | 7.60 | 0.00 | 8.13 | 0.06 |
| 13/12/2559 | 12:00 น. | 12 | 126.67 | 5.77 | 7.30 | 0.00 | 8.10 | 0.00 |
| 14/12/2559 | 12:00 น. | 13 | 126.67 | 5.77 | 7.57 | 0.06 | 8.10 | 0.00 |
| 15/12/2559 | 12:00 น. | 14 | 126.67 | 5.77 | 7.20 | 0.10 | 8.10 | 0.00 |
| 16/12/2559 | 12:00 น. | 15 | 126.67 | 5.77 | 7.70 | 0.10 | 8.10 | 0.00 |
| 17/12/2559 | 12:00 น. | 16 | | | | | | |
| 18/12/2559 | 12:00 น. | 17 | | | | | | |
| 19/12/2559 | 12:00 น. | 18 | | | | | | |
| 20/12/2559 | 12:00 น. | 19 | | | | | | |
| 21/12/2559 | 12:00 น. | 20 | 170.00 | 17.32 | 7.00 | 0.10 | 8.10 | 0.00 |
| 22/12/2559 | 12:00 น. | 21 | 170.00 | 17.32 | 7.03 | 0.06 | 7.83 | 0.06 |
| 23/12/2559 | 12:00 น. | 22 | 140.00 | 10.00 | 7.37 | 0.06 | 8.07 | 0.06 |
| 24/12/2559 | 12:00 น. | 23 | 143.33 | 5.77 | 7.37 | 0.06 | 8.20 | 0.00 |
| 25/12/2559 | 12:00 น. | 24 | 120.00 | 0.00 | 7.90 | 0.00 | 8.17 | 0.06 |

ตารางที่ ง-11 ค่าสภาพความเป็นต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ที่บ่อปลา
ของระบบตัวกลางเคลื่อนที่จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็น
ระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|-------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 26/12/2559 | 12:00 น. | 25 | 146.67 | 5.77 | 7.20 | 0.10 | 8.07 | 0.06 |
| 27/12/2559 | 12:00 น. | 26 | 163.33 | 11.55 | 7.23 | 0.06 | 8.00 | 0.00 |
| 28/12/2559 | 12:00 น. | 27 | 163.33 | 11.55 | 8.30 | 0.00 | 8.00 | 0.00 |
| 29/12/2559 | 12:00 น. | 28 | 166.67 | 23.09 | 8.03 | 0.06 | 8.07 | 0.06 |
| 30/12/2559 | 12:00 น. | 29 | 166.67 | 5.77 | 8.27 | 0.06 | 8.03 | 0.06 |
| 31/12/2559 | 12:00 น. | 30 | 156.67 | 11.55 | 8.20 | 0.10 | 8.07 | 0.06 |
| 1/1/2560 | 12:00 น. | 31 | 143.33 | 15.28 | 8.00 | 0.00 | 8.03 | 0.06 |
| 2/1/2560 | 12:00 น. | 32 | 146.67 | 11.55 | 8.00 | 0.00 | 8.03 | 0.06 |
| 3/1/2560 | 12:00 น. | 33 | 156.67 | 15.28 | 8.00 | 0.00 | 8.07 | 0.06 |
| 4/1/2560 | 12:00 น. | 34 | 153.33 | 11.55 | 7.87 | 0.06 | 8.26 | 0.02 |
| 5/1/2560 | 12:00 น. | 35 | 163.33 | 11.55 | 7.97 | 0.06 | 8.17 | 0.06 |
| 6/1/2560 | 12:00 น. | 36 | 176.67 | 15.28 | 8.00 | 0.00 | 8.03 | 0.06 |
| 7/1/2560 | 12:00 น. | 37 | 176.67 | 15.28 | 7.97 | 0.06 | 8.07 | 0.06 |
| 8/1/2560 | 12:00 น. | 38 | 170.00 | 10.00 | 7.90 | 0.00 | 8.03 | 0.06 |
| 9/1/2560 | 12:00 น. | 39 | 170.00 | 10.00 | 8.03 | 0.06 | 8.03 | 0.06 |
| 10/1/2560 | 12:00 น. | 40 | 163.33 | 11.55 | 7.90 | 0.00 | 8.07 | 0.06 |
| 11/1/2560 | 12:00 น. | 41 | 166.67 | 11.55 | 7.90 | 0.00 | 8.07 | 0.06 |
| 12/1/2560 | 12:00 น. | 42 | 170.00 | 10.00 | 7.87 | 0.06 | 8.03 | 0.06 |
| 13/1/2560 | 12:00 น. | 43 | 160.00 | 10.00 | 7.73 | 0.06 | 8.03 | 0.06 |
| 14/1/2560 | 12:00 น. | 44 | 163.33 | 11.55 | 7.87 | 0.06 | 8.03 | 0.06 |
| 15/1/2560 | 12:00 น. | 45 | 160.00 | 10.00 | 7.73 | 0.06 | 8.03 | 0.06 |
| 16/1/2560 | 12:00 น. | 46 | 163.33 | 5.77 | 7.77 | 0.06 | 8.03 | 0.06 |
| 17/1/2560 | 12:00 น. | 47 | 163.33 | 11.55 | 7.80 | 0.00 | 8.03 | 0.06 |
| 18/1/2560 | 12:00 น. | 48 | 166.67 | 11.55 | 7.80 | 0.00 | 8.03 | 0.06 |
| 19/1/2560 | 12:00 น. | 49 | 166.67 | 11.55 | 7.70 | 0.00 | 8.03 | 0.06 |

ตารางที่ ง-11 ค่าสภาพความเป็นต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ที่บ่อปลา
ของระบบตัวกลางเคลื่อนที่จำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ซ้ำ) เป็น
ระยะเวลา 60 วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|-------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 20/1/2560 | 12:00 น. | 50 | 166.67 | 11.55 | 7.70 | 0.00 | 8.03 | 0.06 |
| 21/1/2560 | 12:00 น. | 51 | 163.33 | 5.77 | 7.70 | 0.00 | 8.03 | 0.06 |
| 22/1/2560 | 12:00 น. | 52 | 163.33 | 5.77 | 7.63 | 0.06 | 8.03 | 0.06 |
| 23/1/2560 | 12:00 น. | 53 | 163.33 | 5.77 | 7.70 | 0.00 | 8.03 | 0.06 |
| 24/1/2560 | 12:00 น. | 54 | 163.33 | 5.77 | 7.70 | 0.00 | 8.03 | 0.06 |
| 25/1/2560 | 12:00 น. | 55 | 166.67 | 5.77 | 7.90 | 0.00 | 8.03 | 0.06 |
| 26/1/2560 | 12:00 น. | 56 | 166.67 | 5.77 | 7.90 | 0.00 | 8.03 | 0.06 |
| 27/1/2560 | 12:00 น. | 57 | 166.67 | 5.77 | 7.80 | 0.00 | 8.03 | 0.06 |
| 28/1/2560 | 12:00 น. | 58 | 163.33 | 5.77 | 7.80 | 0.00 | 8.03 | 0.06 |
| 29/1/2560 | 12:00 น. | 59 | 163.33 | 5.77 | 7.70 | 0.00 | 8.00 | 0.10 |
| 30/1/2560 | 12:00 น. | 60 | 170.00 | 10.00 | 7.70 | 0.00 | 8.00 | 0.10 |

ตารางที่ ง-12 ค่าสภาพความเป็นต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ที่บ่อปลาของ
ระบบโปรยกรองจำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็นระยะเวลา 60 วัน

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|-------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/12/2559 | 12:00 น. | 0 | 123.33 | 5.77 | 7.73 | 0.06 | 8.14 | 0.02 |
| 2/12/2559 | 12:00 น. | 1 | 150.00 | 10.00 | 7.50 | 0.20 | 8.17 | 0.04 |
| 3/12/2559 | 12:00 น. | 2 | 150.00 | 10.00 | 7.60 | 0.17 | 8.38 | 0.02 |
| 4/12/2559 | 12:00 น. | 3 | 146.67 | 5.77 | 7.60 | 0.10 | 8.31 | 0.02 |
| 5/12/2559 | 12:00 น. | 4 | 163.33 | 5.77 | 7.70 | 0.10 | 8.30 | 0.00 |
| 6/12/2559 | 12:00 น. | 5 | 146.67 | 5.77 | 7.70 | 0.10 | 8.17 | 0.06 |
| 7/12/2559 | 12:00 น. | 6 | 140.00 | 10.00 | 7.83 | 0.06 | 8.15 | 0.05 |
| 8/12/2559 | 12:00 น. | 7 | 140.00 | 10.00 | 7.83 | 0.06 | 8.13 | 0.06 |
| 9/12/2559 | 12:00 น. | 8 | 130.00 | 10.00 | 8.03 | 0.15 | 8.13 | 0.06 |
| 10/12/2559 | 12:00 น. | 9 | 143.33 | 11.55 | 7.73 | 0.12 | 8.13 | 0.06 |
| 11/12/2559 | 12:00 น. | 10 | 130.00 | 17.32 | 7.67 | 0.15 | 8.13 | 0.06 |
| 12/12/2559 | 12:00 น. | 11 | 143.33 | 5.77 | 7.70 | 0.17 | 8.13 | 0.06 |
| 13/12/2559 | 12:00 น. | 12 | 143.33 | 15.28 | 7.50 | 0.20 | 8.10 | 0.00 |
| 14/12/2559 | 12:00 น. | 13 | 143.33 | 15.28 | 7.53 | 0.15 | 8.10 | 0.00 |
| 15/12/2559 | 12:00 น. | 14 | 140.00 | 17.32 | 7.30 | 0.20 | 8.10 | 0.00 |
| 16/12/2559 | 12:00 น. | 15 | 136.67 | 11.55 | 7.87 | 0.12 | 8.10 | 0.00 |
| 17/12/2559 | 12:00 น. | 16 | | | | | | |
| 18/12/2559 | 12:00 น. | 17 | | | | | | |
| 19/12/2559 | 12:00 น. | 18 | | | | | | |
| 20/12/2559 | 12:00 น. | 19 | | | | | | |
| 21/12/2559 | 12:00 น. | 20 | 183.33 | 5.77 | 7.17 | 0.15 | 8.10 | 0.00 |
| 22/12/2559 | 12:00 น. | 21 | 180.00 | 0.00 | 7.17 | 0.15 | 7.80 | 0.00 |
| 23/12/2559 | 12:00 น. | 22 | 150.00 | 0.00 | 7.43 | 0.06 | 8.17 | 0.12 |
| 24/12/2559 | 12:00 น. | 23 | 163.33 | 5.77 | 7.50 | 0.20 | 8.13 | 0.06 |
| 25/12/2559 | 12:00 น. | 24 | 140.00 | 10.00 | 8.07 | 0.06 | 8.13 | 0.06 |

ตารางที่ ง-12 ค่าสภาพความเป็นต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ที่บ่อปลา
ของระบบโปรยกรองจำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็นระยะเวลา 60
วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|-------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 26/12/2559 | 12:00 น. | 25 | 176.67 | 11.55 | 7.37 | 0.06 | 8.13 | 0.06 |
| 27/12/2559 | 12:00 น. | 26 | 193.33 | 5.77 | 7.43 | 0.12 | 8.07 | 0.12 |
| 28/12/2559 | 12:00 น. | 27 | 180.00 | 17.32 | 8.37 | 0.06 | 8.10 | 0.00 |
| 29/12/2559 | 12:00 น. | 28 | 186.67 | 5.77 | 8.40 | 0.10 | 8.13 | 0.06 |
| 30/12/2559 | 12:00 น. | 29 | 196.67 | 11.55 | 8.43 | 0.06 | 8.13 | 0.06 |
| 31/12/2559 | 12:00 น. | 30 | 173.33 | 15.28 | 8.43 | 0.06 | 8.10 | 0.10 |
| 1/1/2560 | 12:00 น. | 31 | 203.33 | 11.55 | 8.00 | 0.10 | 8.10 | 0.00 |
| 2/1/2560 | 12:00 น. | 32 | 190.00 | 17.32 | 8.00 | 0.00 | 8.17 | 0.06 |
| 3/1/2560 | 12:00 น. | 33 | 206.67 | 5.77 | 8.23 | 0.12 | 8.13 | 0.06 |
| 4/1/2560 | 12:00 น. | 34 | 196.67 | 15.28 | 8.00 | 0.10 | 8.29 | 0.05 |
| 5/1/2560 | 12:00 น. | 35 | 206.67 | 5.77 | 8.07 | 0.06 | 8.20 | 0.00 |
| 6/1/2560 | 12:00 น. | 36 | 213.33 | 5.77 | 8.13 | 0.06 | 8.17 | 0.06 |
| 7/1/2560 | 12:00 น. | 37 | 206.67 | 5.77 | 8.00 | 0.10 | 8.13 | 0.06 |
| 8/1/2560 | 12:00 น. | 38 | 200.00 | 0.00 | 8.00 | 0.00 | 8.17 | 0.06 |
| 9/1/2560 | 12:00 น. | 39 | 200.00 | 10.00 | 8.10 | 0.00 | 8.17 | 0.06 |
| 10/1/2560 | 12:00 น. | 40 | 190.00 | 10.00 | 8.00 | 0.00 | 8.17 | 0.06 |
| 11/1/2560 | 12:00 น. | 41 | 203.33 | 5.77 | 8.00 | 0.00 | 8.17 | 0.06 |
| 12/1/2560 | 12:00 น. | 42 | 210.00 | 0.00 | 8.00 | 0.10 | 8.17 | 0.06 |
| 13/1/2560 | 12:00 น. | 43 | 206.67 | 15.28 | 7.87 | 0.06 | 8.20 | 0.00 |
| 14/1/2560 | 12:00 น. | 44 | 210.00 | 17.32 | 8.00 | 0.00 | 8.20 | 0.00 |
| 15/1/2560 | 12:00 น. | 45 | 203.33 | 11.55 | 7.87 | 0.06 | 8.20 | 0.00 |
| 16/1/2560 | 12:00 น. | 46 | 200.00 | 10.00 | 7.97 | 0.06 | 8.20 | 0.00 |
| 17/1/2560 | 12:00 น. | 47 | 196.67 | 5.77 | 8.00 | 0.00 | 8.20 | 0.00 |
| 18/1/2560 | 12:00 น. | 48 | 186.67 | 11.55 | 7.93 | 0.06 | 8.20 | 0.00 |
| 19/1/2560 | 12:00 น. | 49 | 180.00 | 10.00 | 7.97 | 0.06 | 8.20 | 0.00 |

ตารางที่ ง-12 ค่าสภาพความเป็นต่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ที่บ่อปลา
ของระบบโปรยกรองจำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง) เป็นระยะเวลา 60
วัน (ต่อ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|-------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 20/1/2560 | 12:00 น. | 50 | 183.33 | 11.55 | 7.97 | 0.06 | 8.20 | 0.00 |
| 21/1/2560 | 12:00 น. | 51 | 193.33 | 11.55 | 7.97 | 0.06 | 8.20 | 0.00 |
| 22/1/2560 | 12:00 น. | 52 | 193.33 | 11.55 | 7.97 | 0.06 | 8.20 | 0.00 |
| 23/1/2560 | 12:00 น. | 53 | 193.33 | 11.55 | 7.97 | 0.06 | 8.20 | 0.00 |
| 24/1/2560 | 12:00 น. | 54 | 200.00 | 10.00 | 7.97 | 0.06 | 8.20 | 0.00 |
| 25/1/2560 | 12:00 น. | 55 | 210.00 | 10.00 | 8.13 | 0.06 | 8.20 | 0.00 |
| 26/1/2560 | 12:00 น. | 56 | 206.67 | 5.77 | 8.10 | 0.00 | 8.20 | 0.00 |
| 27/1/2560 | 12:00 น. | 57 | 210.00 | 0.00 | 8.07 | 0.06 | 8.20 | 0.00 |
| 28/1/2560 | 12:00 น. | 58 | 216.67 | 5.77 | 8.03 | 0.06 | 8.20 | 0.00 |
| 29/1/2560 | 12:00 น. | 59 | 220.00 | 0.00 | 7.97 | 0.06 | 8.20 | 0.00 |
| 30/1/2560 | 12:00 น. | 60 | 223.33 | 5.77 | 7.97 | 0.06 | 8.20 | 0.00 |

ตารางที่ ง-13 ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่ท่อน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ของระบบตัวกลางจมตัว ระบบตัวกลางเคลื่อนที่ และ ระบบโปรยกรอง (แต่ละชุดการทดลองจะมี 3 ซ้ำ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | ปริมาณตะกอนแขวนลอย | | | | | | | |
|--------------|----------|-------------------|--------------------|----|---------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|
| | | | (มก./ล.) | | | | | | | |
| | | | ชุดควบคุม | | ชุดทดลองที่ 1 | | ชุดทดลองที่ 2 | | ชุดทดลองที่ 3 | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/12/2559 | 12:20 น. | 0 | | | 0.00 | | 0.00 | | 0.00 | |
| 8/12/2559 | 12:20 น. | 7 | | | 3.33 | 0.58 | 6.50 | 1.48 | 13.67 | 8.96 |
| 15/12/2559 | 12:20 น. | 14 | | | 6.89 | 5.00 | 32.67 | 42.77 | 140.00 | 138.17 |
| 22/12/2559 | 12:20 น. | 21 | | | 59.33 | 63.89 | 16.67 | 8.33 | 146.00 | 93.40 |
| 29/12/2559 | 12:20 น. | 28 | | | 47.33 | 62.94 | 27.33 | 25.01 | 122.67 | 36.07 |
| 5/1/2560 | 12:20 น. | 35 | | | 15.59 | 2.64 | 3.33 | 1.15 | 22.00 | 14.00 |
| 12/1/2560 | 12:20 น. | 42 | | | 18.00 | 17.44 | 36.67 | 51.47 | 608.00 | 234.00 |
| 19/1/2560 | 12:20 น. | 49 | | | 159.33 | 169.12 | 37.33 | 22.74 | 660.00 | 577.16 |
| 26/1/2560 | 12:20 น. | 56 | | | 112.00 | 113.91 | 72.00 | 55.24 | 398.67 | 154.21 |
| 30/1/2560 | 12:20 น. | 60 | | | 103.33 | 46.06 | 106.00 | 106.71 | 371.33 | 234.05 |

ตารางที่ ง-14 ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่ท่อน้ำออกของชุดควบคุม ระบบตัวกลางจมตัว ระบบ
ตัวกลางเคลื่อนที่ และ ระบบโปรยกรอง (แต่ละชุดการทดลองจะมี 3 ซ้ำ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | ปริมาณตะกอนแขวนลอย | | | | | | | |
|--------------|----------|-------------------|--------------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-------|---------------|-------|
| | | | (มก./ล.) | | | | | | | |
| | | | ชุดควบคุม | | ชุดทดลองที่ 1 | | ชุดทดลองที่ 2 | | ชุดทดลองที่ 3 | |
| ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | | | |
| 1/12/2559 | 12:20 น. | 0 | 0.00 | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 8/12/2559 | 12:20 น. | 7 | 1.00 | | 34.33 | 7.09 | 4.88 | 5.09 | 5.67 | 5.51 |
| 15/12/2559 | 12:20 น. | 14 | 4.00 | | 68.67 | 21.08 | 2.33 | 1.53 | 45.33 | 41.49 |
| 22/12/2559 | 12:20 น. | 21 | 1.00 | | 2.67 | 1.15 | 2.33 | 2.52 | 88.67 | 52.32 |
| 29/12/2559 | 12:20 น. | 28 | 3.00 | | 3.67 | 1.53 | 3.00 | 3.61 | 4.67 | 2.31 |
| 5/1/2560 | 12:20 น. | 35 | 3.00 | | 4.33 | 1.15 | 0.67 | 1.15 | 3.67 | 2.31 |
| 12/1/2560 | 12:20 น. | 42 | 0.00 | | 1.67 | 1.15 | 1.33 | 1.15 | 5.33 | 2.89 |
| 19/1/2560 | 12:20 น. | 49 | 0.00 | | 19.67 | 21.08 | 3.33 | 1.15 | 2.33 | 2.31 |
| 26/1/2560 | 12:20 น. | 56 | 3.00 | | 10.33 | 5.51 | 20.00 | 29.46 | 6.00 | 1.73 |
| 30/1/2560 | 12:20 น. | 60 | 0.00 | | 23.00 | 29.10 | 3.67 | 2.89 | 3.33 | 2.52 |

ตารางที่ ง-15 ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่บ่อปลาของชุดควบคุม ระบบตัวกลางจมตัว ระบบตัวกลางเคลื่อนที่ และ ระบบโปรยกรอง (แต่ละชุดการทดลองจะมี 3 ซ้ำ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | ปริมาณตะกอนแขวนลอย (มก./ล.) | | | | | | | |
|--------------|----------|-------------------|--------------------------------|----|---------------|-------|---------------|-------|---------------|------|
| | | | ชุดควบคุม | | ชุดทดลองที่ 1 | | ชุดทดลองที่ 2 | | ชุดทดลองที่ 3 | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/12/2559 | 12:20 น. | 0 | 0.00 | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 8/12/2559 | 12:20 น. | 7 | 2.00 | | 4.00 | 2.65 | 4.77 | 0.63 | 6.67 | 0.58 |
| 15/12/2559 | 12:20 น. | 14 | 8.00 | | 9.33 | 6.11 | 5.33 | 6.11 | 8.67 | 6.43 |
| 22/12/2559 | 12:20 น. | 21 | 14.00 | | 5.33 | 6.11 | 2.67 | 4.62 | 7.33 | 1.15 |
| 29/12/2559 | 12:20 น. | 28 | 12.00 | | 4.00 | 4.00 | 6.67 | 1.15 | 5.33 | 1.15 |
| 5/1/2560 | 12:20 น. | 35 | 4.00 | | 11.33 | 5.77 | 4.00 | 2.00 | 9.33 | 3.06 |
| 12/1/2560 | 12:20 น. | 42 | 8.00 | | 8.67 | 4.16 | 2.67 | 1.15 | 5.33 | 3.06 |
| 19/1/2560 | 12:20 น. | 49 | 0.00 | | 9.33 | 4.16 | 6.67 | 4.62 | 1.33 | 1.15 |
| 26/1/2560 | 12:20 น. | 56 | 0.00 | | 18.00 | 14.42 | 8.67 | 4.16 | 8.00 | 5.29 |
| 30/1/2560 | 12:20 น. | 60 | 0.00 | | 14.06 | 9.07 | 22.00 | 32.92 | 4.00 | 4.00 |

ตารางที่ ง-16 ปริมาณตะกอนของถูกรองในถังตกตะกอนของชุดควบคุม ระบบตัวกลางจมตัว ระบบตัวกลางเคลื่อนที่ และ ระบบโปรยกรอง (แต่ละชุดการทดลองจะมี 3 ซ้ำ)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (วัน) | ปริมาณตะกอนแขวนลอย (มก./ล.) | | | | | | | |
|--------------|----------|-------------------|--------------------------------|----|---------------|------|---------------|------|---------------|------|
| | | | ชุดควบคุม | | ชุดทดลองที่ 1 | | ชุดทดลองที่ 2 | | ชุดทดลองที่ 3 | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 1/12/2559 | 15:00 น. | 0 | 0.00 | | 0.00 | | 0.00 | | 0.00 | |
| 4/1/2560 | 15:00 น. | 34 | 11.36 | | 7.20 | 1.72 | 7.49 | 2.83 | 6.43 | 1.01 |
| 8/1/2560 | 15:00 น. | 38 | 5.15 | | 2.18 | 0.59 | 1.96 | 0.22 | 2.04 | 0.71 |
| 9/1/2560 | 15:00 น. | 39 | 2.25 | | 0.56 | 0.65 | 0.39 | 0.42 | 0.19 | 0.13 |
| 12/1/2560 | 15:00 น. | 42 | 2.91 | | 2.75 | 0.75 | 1.90 | 0.71 | 2.27 | 0.67 |
| 17/1/2560 | 15:00 น. | 47 | 2.23 | | 1.58 | 1.20 | 3.78 | 2.40 | 2.95 | 2.28 |
| 30/1/2560 | 15:00 น. | 60 | 16.48 | | 3.46 | 1.64 | 4.49 | 2.21 | 12.23 | 1.79 |

*หมายเหตุ เนื่องจากว่าถูกรองในถังตกตะกอนจะมีจำนวน 2 ถูกรอง ที่ระยะเวลา 34 กับ 60 วัน จะนำทั้ง 2 ถูกรองไปอบที่ตู้อุณหภูมิ 103 – 105 °ซ แล้วนำไปชั่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งน้ำหนัก ส่วน ระยะเวลา 38, 39, 42 และ 47 วัน จะนำถูกรองจำนวน 1 ถูกรองในถังตกตะกอนไปอบที่ตู้ อุณหภูมิ 103 – 105 °ซ แล้วนำไปชั่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งน้ำหนัก

ตารางที่ ง-17 ข้อมูลการเจริญเติบโตของปลานิลในบ่อปลาของชุดควบคุม(ที่ไม่มีการติดตั้งถัง
 ปฏิกรณ์) ในช่วง 16 วันแรกของการเลี้ยงปลา

| เริ่มการเลี้ยงปลา | | |
|---------------------------|--------------|------------------|
| บ่อควบคุม | | |
| ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) |
| 1 | 19.65 | 10.90 |
| 2 | 25.77 | 11.10 |
| 3 | 19.15 | 10.60 |
| 4 | 22.81 | 10.40 |
| 5 | 21.75 | 11.00 |
| 6 | 15.90 | 10.00 |
| วันที่ 16 ของการเลี้ยงปลา | | |
| บ่อควบคุม | | |
| ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) |
| 1 | 33.70 | 12.30 |
| 2 | 27.70 | 11.50 |
| 3 | 22.95 | 10.60 |
| 4 | 27.28 | 11.40 |
| 5 | 18.67 | 10.30 |
| 6 | 23.64 | 11.20 |

ตารางที่ ง-18 ข้อมูลการเจริญเติบโตของปลานิลในบ่อปลาของชุดควบคุม (ที่ไม่มีการติดตั้งถัง
 ปฏิกรณ์) ตั้งแต่วันที่ 20 จนถึงวันที่ 60 ของการเลี้ยงปลาหลังจากที่มีการเติมฟอสฟอรัส

| วันที่ 20 ของการเลี้ยงปลา | | |
|---------------------------|--------------|------------------|
| บ่อควบคุม | | |
| ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) |
| 1 | 17.82 | 10.40 |
| 2 | 24.75 | 11.40 |
| 3 | 21.50 | 10.80 |
| 4 | 20.81 | 10.60 |
| 5 | 23.20 | 10.80 |
| 6 | 21.55 | 11.20 |
| วันที่ 40 ของการเลี้ยงปลา | | |
| บ่อควบคุม | | |
| ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) |
| 1 | 26.98 | 11.50 |
| 2 | 30.85 | 12.30 |
| 3 | 30.88 | 12.00 |
| 4 | 23.86 | 11.20 |
| 5 | 31.10 | 11.40 |
| 6 | 30.98 | 12.10 |
| วันที่ 60 ของการเลี้ยงปลา | | |
| บ่อควบคุม | | |
| ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) |
| 1 | 34.22 | 12.50 |
| 2 | 43.18 | 13.40 |
| 3 | 46.83 | 13.70 |
| 4 | 39.40 | 12.50 |
| 5 | 41.48 | 13.00 |
| 6 | 31.37 | 11.90 |

ตารางที่ ง-19 ข้อมูลการเจริญเติบโตของปลาในบ่อปลาของระบบตัวกลางจมตัว (แต่ละชุดการทดลองจะมี 3 ซ้ำ) ในช่วง 16 วันแรกของการเลี้ยงปลา

| เริ่มการเลี้ยงปลา | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------------|---------------|-----------------------------|--------------|---------------|-----------------------------|--------------|---------------|
| บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 1) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 2) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 3) | | |
| ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) |
| 1 | 15.88 | 9.50 | 1 | 18.07 | 10.00 | 1.00 | 22.20 | 10.60 |
| 2 | 18.53 | 10.40 | 2 | 18.55 | 10.60 | 2.00 | 17.20 | 10.10 |
| 3 | 17.53 | 10.00 | 3 | 17.02 | 9.90 | 3.00 | 17.50 | 10.10 |
| 4 | 13.06 | 9.60 | 4 | 17.20 | 9.70 | 4.00 | 18.63 | 10.40 |
| 5 | 13.21 | 9.30 | 5 | 10.54 | 9.00 | 5.00 | 17.45 | 10.10 |
| 6 | 14.35 | 9.60 | 6 | 20.40 | 10.50 | 6.00 | 21.02 | 10.40 |
| 7 | 16.60 | 10.10 | 7 | 22.15 | 10.50 | | | |
| 8 | 21.05 | 10.60 | | | | | | |
| วันที่ 16 ของการเลี้ยงปลา | | | | | | | | |
| บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 1) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 2) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 3) | | |
| ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) |
| 1 | 16.10 | 9.70 | 1 | 28.45 | 11.80 | 1 | 26.09 | 11.40 |
| 2 | 20.39 | 10.30 | 2 | 23.45 | 11.00 | 2 | 21.35 | 10.50 |
| 3 | 20.05 | 9.50 | 3 | 23.64 | 11.10 | 3 | 29.89 | 12.00 |
| 4 | 20.95 | 10.80 | 4 | 23.50 | 10.80 | 4 | 19.23 | 10.40 |
| 5 | 20.33 | 10.80 | 5 | 23.42 | 10.70 | 5 | 19.75 | 10.90 |
| 6 | 15.07 | 9.40 | 6 | 19.90 | 10.00 | 6 | 20.97 | 10.60 |
| 7 | 18.56 | 10.60 | 7 | 11.75 | 9.00 | | | |
| 8 | 44.16 | 13.50 | | | | | | |

ตารางที่ ง-20 ข้อมูลการเจริญเติบโตของปลานิลในบ่อปลาของระบบตัวกลางจมตัว (แต่ละชุดการทดลองจะมี 3 ซ้ำ) ตั้งแต่วันที่ 20 จนถึงวันที่ 60 ของการเลี้ยงปลาหลังจากที่มีการเติมฟอร์มาลีน

| เริ่มการเลี้ยงปลา | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------------|---------------|-----------------------------|--------------|---------------|-----------------------------|--------------|---------------|
| บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 1) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 2) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 3) | | |
| ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) |
| 1 | 33.10 | 12.20 | 1 | 27.35 | 12.00 | 1 | 31.12 | 11.80 |
| 2 | 32.52 | 12.20 | 2 | 20.52 | 10.40 | 2 | 44.02 | 13.10 |
| 3 | 16.22 | 9.80 | 3 | 37.41 | 13.00 | 3 | 24.15 | 11.30 |
| 4 | 24.93 | 11.10 | 4 | 32.73 | 11.80 | 4 | 26.94 | 11.40 |
| 5 | 26.18 | 11.40 | 5 | 33.54 | 12.50 | 5 | 27.04 | 11.80 |
| 6 | 20.56 | 10.40 | 6 | 23.65 | 11.00 | 6 | 19.06 | 10.50 |
| 7 | 24.48 | 10.90 | | | | | | |
| วันที่ 16 ของการเลี้ยงปลา | | | | | | | | |
| บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 1) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 2) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 3) | | |
| ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) |
| 1 | 44.85 | 13.90 | 1 | 40.30 | 13.00 | 1 | 34.80 | 12.00 |
| 2 | 43.08 | 13.30 | 2 | 36.50 | 12.80 | 2 | 54.08 | 14.50 |
| 3 | 32.14 | 12.30 | 3 | 44.19 | 13.40 | 3 | 31.80 | 12.40 |
| 4 | 31.36 | 12.10 | 4 | 29.40 | 11.80 | 4 | 24.30 | 11.10 |
| 5 | 33.20 | 12.10 | 5 | 44.95 | 13.90 | 5 | 35.89 | 12.90 |
| 6 | 26.06 | 11.50 | 6 | 25.05 | 11.10 | 6 | 41.54 | 13.10 |
| 7 | 19.86 | 10.50 | | | | | | |

ตารางที่ ง-21 ข้อมูลการเจริญเติบโตของปลานิลในบ่อปลาของระบบตัวกลางเคลื่อนที่ (แต่ละชุดการทดลองจะมี 3 ซ้ำ) ในช่วง 16 วันแรกของการเลี้ยงปลา

| เริ่มการเลี้ยงปลา | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------------|---------------|-----------------------------|--------------|---------------|-----------------------------|--------------|---------------|
| บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 1) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 2) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 3) | | |
| ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) |
| 1 | 14.72 | 9.40 | 1 | 23.34 | 10.90 | 1 | 16.14 | 9.60 |
| 2 | 14.40 | 9.50 | 2 | 25.42 | 11.20 | 2 | 17.50 | 10.00 |
| 3 | 16.40 | 9.90 | 3 | 19.48 | 10.00 | 3 | 19.23 | 10.50 |
| 4 | 19.30 | 10.60 | 4 | 17.60 | 10.50 | 4 | 22.19 | 10.60 |
| 5 | 20.04 | 10.30 | 5 | 16.62 | 9.70 | 5 | 18.15 | 10.00 |
| 6 | 25.44 | 11.00 | 6 | 25.54 | 11.20 | 6 | 17.48 | 10.20 |
| | | | | | | 7 | 17.00 | 10.20 |
| วันที่ 16 ของการเลี้ยงปลา | | | | | | | | |
| บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 1) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 2) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 3) | | |
| ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) |
| 1 | 15.55 | 9.80 | 1 | 26.83 | 11.10 | 1 | 18.46 | 10.50 |
| 2 | 20.18 | 10.80 | 2 | 24.85 | 11.40 | 2 | 24.43 | 10.60 |
| 3 | 16.88 | 9.90 | 3 | 18.05 | 10.00 | 3 | 21.62 | 10.40 |
| 4 | 25.45 | 11.40 | 4 | 16.20 | 9.80 | 4 | 20.67 | 10.30 |
| 5 | 32.95 | 11.60 | 5 | 29.86 | 11.90 | 5 | 18.90 | 10.40 |
| 6 | 22.82 | 10.80 | 6 | 33.95 | 12.50 | 6 | 35.72 | 11.00 |
| | | | | | | 7 | 19.85 | 10.30 |

ตารางที่ ง-22 ข้อมูลการเจริญเติบโตของปลานิลในบ่อปลาของระบบตัวกลางเคลื่อนที่ (แต่ละชุดการทดลองจะมี 3 ซ้ำ) ตั้งแต่วันที่ 20 จนถึงวันที่ 60 ของการเลี้ยงปลาหลังจากที่มีการเติมฟอรั่มาลีน

| เริ่มการเลี้ยงปลา | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------------|---------------|-----------------------------|--------------|---------------|-----------------------------|--------------|---------------|
| บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 1) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 2) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 3) | | |
| ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) |
| 1 | 24.85 | 11.40 | 1 | 44.16 | 13.10 | 1 | 33.16 | 12.20 |
| 2 | 33.05 | 12.40 | 2 | 29.52 | 12.40 | 2 | 41.56 | 12.80 |
| 3 | 25.69 | 11.50 | 3 | 21.56 | 10.20 | 3 | 40.21 | 13.40 |
| 4 | 17.87 | 9.80 | 4 | 39.99 | 12.80 | 4 | 32.56 | 12.30 |
| 5 | 34.09 | 12.00 | 5 | 20.24 | 10.50 | 5 | 29.12 | 11.60 |
| 6 | 32.76 | 11.80 | 6 | 28.05 | 11.80 | | | |
| วันที่ 16 ของการเลี้ยงปลา | | | | | | | | |
| บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 1) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 2) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 3) | | |
| ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) |
| 1 | 24.82 | 11.00 | 1 | 34.00 | 11.30 | 1 | 34.26 | 12.40 |
| 2 | 30.75 | 12.30 | 2 | 51.33 | 13.90 | 2 | 55.06 | 14.00 |
| 3 | 45.70 | 13.50 | 3 | 41.80 | 13.60 | 3 | 44.36 | 13.40 |
| 4 | 37.58 | 12.80 | 4 | 59.56 | 14.60 | 4 | 53.48 | 14.50 |
| 5 | 32.25 | 12.00 | 5 | 30.24 | 12.10 | 5 | 31.87 | 11.90 |
| 6 | 42.20 | 13.00 | 6 | 40.20 | 12.90 | | | |

ตารางที่ ง-23 ข้อมูลการเจริญเติบโตของปลานิลในบ่อปลาของระบบโปรยกรอง (แต่ละชุดการทดลองจะมี 3 ซ้ำ) ในช่วง 16 วันแรกของการเลี้ยงปลา

| เริ่มการเลี้ยงปลา | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------------|---------------|-----------------------------|--------------|---------------|-----------------------------|--------------|---------------|
| บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 1) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 2) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 3) | | |
| ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) |
| 1 | 26.38 | 11.30 | 1 | 22.78 | 11.20 | 1 | 24.40 | 11.40 |
| 2 | 23.77 | 10.90 | 2 | 22.05 | 10.90 | 2 | 18.26 | 10.60 |
| 3 | 19.96 | 10.60 | 3 | 15.30 | 9.60 | 3 | 19.10 | 10.50 |
| 4 | 17.56 | 10.30 | 4 | 23.78 | 10.60 | 4 | 22.71 | 11.10 |
| 5 | 16.50 | 10.20 | 5 | 22.26 | 11.00 | 5 | 20.04 | 10.60 |
| | | | 6 | 20.00 | 10.40 | 6 | 27.80 | 12.00 |
| วันที่ 16 ของการเลี้ยงปลา | | | | | | | | |
| บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 1) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 2) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 3) | | |
| ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) |
| 1 | 32.45 | 12.00 | 1 | 24.45 | 10.90 | 1 | 27.23 | 11.20 |
| 2 | 20.70 | 10.50 | 2 | 25.65 | 11.20 | 2 | 20.60 | 10.60 |
| 3 | 27.98 | 11.80 | 3 | 25.86 | 11.30 | 3 | 24.73 | 10.90 |
| 4 | 18.95 | 10.40 | 4 | 27.63 | 11.00 | 4 | 14.85 | 9.10 |
| 5 | 24.07 | 15.00 | 5 | 26.35 | 11.00 | 5 | 24.86 | 11.20 |
| | | | 6 | 23.40 | 10.90 | 6 | 27.74 | 11.30 |

ตารางที่ ง-24 ข้อมูลการเจริญเติบโตของปลานิลในบ่อปลาของระบบโปรยกรอง (แต่ละชุดการทดลองจะมี 3 ซ้ำ) ตั้งแต่วันที่ 20 จนถึงวันที่ 60 ของการเลี้ยงปลาหลังจากที่มีการเติมฟอรัสมาลิน

| เริ่มการเลี้ยงปลา | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------------|---------------|-----------------------------|--------------|---------------|-----------------------------|--------------|---------------|
| บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 1) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 2) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 3) | | |
| ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) |
| 1 | 24.32 | 10.80 | 1 | 23.18 | 11.00 | 1 | 28.16 | 11.60 |
| 2 | 21.13 | 10.80 | 2 | 16.76 | 10.00 | 2 | 21.54 | 11.40 |
| 3 | 26.78 | 11.80 | 3 | 25.98 | 11.50 | 3 | 18.17 | 10.30 |
| 4 | 24.48 | 11.20 | 4 | 18.03 | 10.40 | 4 | 17.82 | 10.40 |
| 5 | 22.47 | 10.90 | 5 | 24.22 | 11.60 | 5 | 41.13 | 13.20 |
| 6 | 11.15 | 9.30 | 6 | 21.95 | 11.00 | | | |
| วันที่ 16 ของการเลี้ยงปลา | | | | | | | | |
| บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 1) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 2) | | | บ่อชุดการทดลองที่ 1 (ซ้ำ 3) | | |
| ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) | ตัวที่ | น้ำหนัก (ก.) | ความยาว (ซม.) |
| 1 | 30.87 | 11.80 | 1 | 32.40 | 12.20 | 1 | 34.44 | 11.80 |
| 2 | 15.24 | 9.40 | 2 | 36.34 | 9.00 | 2 | 23.48 | 10.80 |
| 3 | 32.08 | 12.00 | 3 | 34.49 | 12.10 | 3 | 31.64 | 10.00 |
| 4 | 35.76 | 12.90 | 4 | 33.78 | 11.80 | 4 | 62.45 | 14.80 |
| 5 | 31.77 | 11.50 | 5 | 25.19 | 10.90 | 5 | 27.52 | 12.30 |
| 6 | 30.21 | 11.80 | 6 | 28.20 | 11.30 | | | |

ภาคผนวก จ

ข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพน้ำสำหรับการทดลองช่วงที่ 4 เพื่อศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และ ไพรยกรอง ในการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากการเลี้ยงปลา

ตารางที่ จ-1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ของการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากการเลี้ยงปลาความเข้มข้นแอมโมเนีย 1, 2 และ 3 มก. ไนโตรเจน/ล.ตามลำดับ ของชุดควบคุม (ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|-------|------------------|----|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 3/2/2560 | 15:30 น. | 0 | 1.17 | 0.01 | | 18.14 | | |
| 3/2/2560 | 21:30 น. | 6 | 0.79 | 0.03 | | 16.46 | | |
| 4/2/2560 | 5:30 น. | 14 | 0.47 | 0.04 | | 18.57 | | |
| 4/2/2560 | 17:30 น. | 26 | 0.30 | 0.07 | | 18.76 | | |
| 5/2/2560 | 5:30 น. | 38 | 0.24 | 0.09 | | 18.39 | | |
| 7/2/2560 | 10:00 น. | 0 | 1.99 | 0.01 | | 17.21 | | |
| 7/2/2560 | 22:00 น. | 12 | 1.44 | 0.07 | | 18.73 | | |
| 8/2/2560 | 10:00 น. | 24 | 1.03 | 0.13 | | 18.80 | | |
| 8/2/2560 | 22:00 น. | 36 | 0.69 | 0.18 | | 19.52 | | |
| 9/2/2560 | 10:00 น. | 48 | 0.09 | 0.35 | | 19.24 | | |
| 14/2/2560 | 10:00 น. | 0 | 2.56 | 0.01 | | 16.75 | | |
| 14/2/2560 | 22:00 น. | 12 | 2.53 | 0.09 | | 21.51 | | |
| 15/2/2560 | 10:00 น. | 24 | 2.09 | 0.33 | | 21.67 | | |
| 16/2/2560 | 13:00 น. | 51 | 0.34 | 0.90 | | 20.21 | | |
| 17/2/2560 | 10:00 น. | 72 | 0.02 | 0.28 | | 21.00 | | |
| 18/2/2560 | 10:00 น. | 96 | 0.03 | 0.01 | | 18.92 | | |

ตารางที่ จ-2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ของการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากการเลี้ยงปลาความเข้มข้นแอมโมเนีย 1, 2 และ 3 มก. ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ของระบบตัวกลางจมตัวที่ท่อน้ำออกจำนวน 3 ถังปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ ถังปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 3/2/2560 | 15:30 น. | 0 | 1.14 | 0.05 | 0.01 | 0.01 | 19.10 | 1.44 |
| 3/2/2560 | 21:30 น. | 6 | 0.84 | 0.05 | 0.02 | 0.00 | 18.55 | 1.64 |
| 4/2/2560 | 5:30 น. | 14 | 0.48 | 0.10 | 0.02 | 0.01 | 19.03 | 2.39 |
| 4/2/2560 | 17:30 น. | 26 | 0.42 | 0.09 | 0.04 | 0.01 | 18.17 | 0.37 |
| 5/2/2560 | 5:30 น. | 38 | 0.24 | 0.06 | 0.06 | 0.01 | 19.62 | 1.22 |
| 7/2/2560 | 10:00 น. | 0 | 1.98 | 0.10 | 0.01 | 0.00 | 18.21 | 3.09 |
| 7/2/2560 | 22:00 น. | 12 | 1.51 | 0.10 | 0.05 | 0.02 | 20.04 | 0.58 |
| 8/2/2560 | 10:00 น. | 24 | 1.14 | 0.18 | 0.10 | 0.06 | 19.91 | 0.36 |
| 8/2/2560 | 22:00 น. | 36 | 0.55 | 0.20 | 0.14 | 0.10 | 20.88 | 0.76 |
| 9/2/2560 | 10:00 น. | 48 | 0.05 | 0.05 | 0.15 | 0.06 | 20.40 | 1.98 |
| 14/2/2560 | 10:00 น. | 0 | 2.91 | 0.15 | 0.01 | 0.00 | 20.77 | 0.81 |
| 14/2/2560 | 22:00 น. | 12 | 2.61 | 0.10 | 0.06 | 0.03 | 22.18 | 0.93 |
| 15/2/2560 | 10:00 น. | 24 | 2.18 | 0.24 | 0.16 | 0.09 | 21.52 | 1.61 |
| 16/2/2560 | 13:00 น. | 51 | 0.60 | 0.45 | 0.55 | 0.26 | 20.44 | 1.88 |
| 17/2/2560 | 10:00 น. | 72 | 0.01 | 0.00 | 0.19 | 0.13 | 22.96 | 0.89 |
| 18/2/2560 | 10:00 น. | 96 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 21.18 | 2.94 |

ตารางที่ จ-3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ของการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากการเลี้ยงปลาความเข้มข้นแอมโมเนีย 1, 2 และ 3 มก. ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ของระบบตัวกลางเคลื่อนที่ที่ให้น้ำออกจำนวน 3 ถึงปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถึงปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 3/2/2560 | 15:30 น. | 0 | 0.89 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 15.00 | 0.73 |
| 3/2/2560 | 21:30 น. | 6 | 0.79 | 0.03 | 0.02 | 0.00 | 17.29 | 2.20 |
| 4/2/2560 | 5:30 น. | 14 | 0.47 | 0.07 | 0.02 | 0.01 | 16.31 | 1.15 |
| 4/2/2560 | 17:30 น. | 26 | 0.36 | 0.08 | 0.03 | 0.01 | 17.99 | 3.50 |
| 5/2/2560 | 5:30 น. | 38 | 0.19 | 0.04 | 0.04 | 0.01 | 19.17 | 3.00 |
| 7/2/2560 | 10:00 น. | 0 | 2.03 | 0.05 | 0.01 | 0.00 | 18.24 | 2.86 |
| 7/2/2560 | 22:00 น. | 12 | 1.52 | 0.10 | 0.03 | 0.00 | 19.10 | 2.37 |
| 8/2/2560 | 10:00 น. | 24 | 1.05 | 0.10 | 0.06 | 0.02 | 18.47 | 1.40 |
| 8/2/2560 | 22:00 น. | 36 | 0.55 | 0.17 | 0.08 | 0.01 | 20.37 | 2.75 |
| 9/2/2560 | 10:00 น. | 48 | 0.04 | 0.04 | 0.11 | 0.05 | 19.32 | 1.72 |
| 14/2/2560 | 10:00 น. | 0 | 2.84 | 0.13 | 0.01 | 0.00 | 20.05 | 2.71 |
| 14/2/2560 | 22:00 น. | 12 | 2.61 | 0.21 | 0.07 | 0.03 | 21.85 | 2.65 |
| 15/2/2560 | 10:00 น. | 24 | 2.18 | 0.11 | 0.11 | 0.02 | 20.08 | 1.77 |
| 16/2/2560 | 13:00 น. | 51 | 0.53 | 0.19 | 0.60 | 0.07 | 22.18 | 1.88 |
| 17/2/2560 | 10:00 น. | 72 | 0.01 | 0.01 | 0.07 | 0.11 | 22.86 | 2.08 |
| 18/2/2560 | 10:00 น. | 96 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 21.19 | 4.24 |

ตารางที่ จ-4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ของการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากการเลี้ยงปลาความเข้มข้นแอมโมเนีย 1, 2 และ 3 มก. ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ของระบบโปรยกรองที่ท่อน้ำออกจำนวน 3 ถึงปฏิกรณ์ (วิเคราะห์ถึง ปฏิกรณ์ละ 3 ชั่วโมง)

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 3/2/2560 | 15:30 น. | 0 | 1.08 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 20.40 | 1.40 |
| 3/2/2560 | 21:30 น. | 6 | 0.80 | 0.06 | 0.01 | 0.00 | 19.00 | 0.88 |
| 4/2/2560 | 5:30 น. | 14 | 0.40 | 0.07 | 0.02 | 0.00 | 20.62 | 1.84 |
| 4/2/2560 | 17:30 น. | 26 | 0.29 | 0.13 | 0.03 | 0.01 | 20.76 | 1.24 |
| 5/2/2560 | 5:30 น. | 38 | 0.13 | 0.05 | 0.03 | 0.02 | 21.99 | 0.99 |
| 7/2/2560 | 10:00 น. | 0 | 2.18 | 0.04 | 0.01 | 0.00 | 21.77 | 1.03 |
| 7/2/2560 | 22:00 น. | 12 | 1.52 | 0.05 | 0.04 | 0.01 | 22.72 | 1.07 |
| 8/2/2560 | 10:00 น. | 24 | 1.00 | 0.10 | 0.06 | 0.01 | 23.94 | 2.16 |
| 8/2/2560 | 22:00 น. | 36 | 0.41 | 0.05 | 0.08 | 0.03 | 23.23 | 1.32 |
| 9/2/2560 | 10:00 น. | 48 | 0.04 | 0.00 | 0.07 | 0.05 | 23.45 | 1.91 |
| 14/2/2560 | 10:00 น. | 0 | 3.02 | 0.06 | 0.01 | 0.00 | 22.97 | 1.48 |
| 14/2/2560 | 22:00 น. | 12 | 2.53 | 0.08 | 0.05 | 0.01 | 25.10 | 1.51 |
| 15/2/2560 | 10:00 น. | 24 | 2.03 | 0.09 | 0.13 | 0.02 | 25.07 | 2.30 |
| 16/2/2560 | 13:00 น. | 51 | 0.21 | 0.11 | 0.56 | 0.15 | 24.62 | 2.04 |
| 17/2/2560 | 10:00 น. | 72 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.03 | 25.96 | 2.24 |
| 18/2/2560 | 10:00 น. | 96 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 26.01 | 0.98 |

ตารางที่ จ-5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ของการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากการเลี้ยงปลาความเข้มข้นแอมโมเนีย 1, 2 และ 3 มก. ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ของชุดควบคุมที่บ่อปลา

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | แอมโมเนีย | | ไนไตรต์ | | ไนเตรต | |
|--------------|----------|-------------------|------------------|------|------------------|-------|------------------|----|
| | | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 3/2/2560 | 15:30 น. | 0 | 1.07 | 0.01 | | 13.24 | | |
| 3/2/2560 | 21:30 น. | 6 | 0.73 | 0.03 | | 17.52 | | |
| 4/2/2560 | 5:30 น. | 14 | 0.44 | 0.05 | | 18.29 | | |
| 4/2/2560 | 17:30 น. | 26 | 0.31 | 0.06 | | 16.22 | | |
| 5/2/2560 | 5:30 น. | 38 | 0.24 | 0.09 | | 19.14 | | |
| 7/2/2560 | 10:00 น. | 0 | 2.02 | 0.01 | | 18.99 | | |
| 7/2/2560 | 22:00 น. | 12 | 1.62 | 0.05 | | 19.00 | | |
| 8/2/2560 | 10:00 น. | 24 | 1.03 | 0.11 | | 19.60 | | |
| 8/2/2560 | 22:00 น. | 36 | 0.68 | 0.20 | | 19.54 | | |
| 9/2/2560 | 10:00 น. | 48 | 0.12 | 0.31 | | 19.07 | | |
| 14/2/2560 | 10:00 น. | 0 | 2.80 | 0.01 | | 19.33 | | |
| 14/2/2560 | 22:00 น. | 12 | 2.53 | 0.09 | | 21.43 | | |
| 15/2/2560 | 10:00 น. | 24 | 2.17 | 0.25 | | 20.42 | | |
| 16/2/2560 | 13:00 น. | 51 | 0.34 | 0.99 | | 21.54 | | |
| 17/2/2560 | 10:00 น. | 72 | 0.02 | 0.25 | | 22.81 | | |
| 18/2/2560 | 10:00 น. | 96 | 0.03 | 0.01 | | 23.34 | | |

ตารางที่ จ-6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ของการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากการเลี้ยงปลาความเข้มข้นแอมโมเนีย 1, 2 และ 3 มก. ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ของระบบตัวกลางจมตัวที่บ่อปลา

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|----------|-------------------|-------------------------------|------|-----------------------------|------|----------------------------|------|
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 3/2/2560 | 15:30 น. | 0 | 1.11 | 0.04 | 0.01 | 0.00 | 18.22 | 2.48 |
| 3/2/2560 | 21:30 น. | 6 | 0.91 | 0.03 | 0.02 | 0.00 | 18.74 | 1.98 |
| 4/2/2560 | 5:30 น. | 14 | 0.56 | 0.09 | 0.03 | 0.01 | 18.74 | 2.55 |
| 4/2/2560 | 17:30 น. | 26 | 0.42 | 0.05 | 0.04 | 0.01 | 19.04 | 2.22 |
| 5/2/2560 | 5:30 น. | 38 | 0.22 | 0.06 | 0.06 | 0.01 | 19.58 | 1.75 |
| 7/2/2560 | 10:00 น. | 0 | 2.16 | 0.13 | 0.01 | 0.00 | 19.58 | 1.33 |
| 7/2/2560 | 22:00 น. | 12 | 1.58 | 0.07 | 0.05 | 0.02 | 19.79 | 0.09 |
| 8/2/2560 | 10:00 น. | 24 | 1.26 | 0.09 | 0.10 | 0.05 | 21.80 | 1.97 |
| 8/2/2560 | 22:00 น. | 36 | 0.55 | 0.16 | 0.15 | 0.10 | 20.89 | 0.84 |
| 9/2/2560 | 10:00 น. | 48 | 0.11 | 0.08 | 0.15 | 0.06 | 20.87 | 2.30 |
| 14/2/2560 | 10:00 น. | 0 | 2.79 | 0.04 | 0.01 | 0.00 | 20.31 | 0.93 |
| 14/2/2560 | 22:00 น. | 12 | 2.58 | 0.07 | 0.06 | 0.03 | 22.11 | 0.89 |
| 15/2/2560 | 10:00 น. | 24 | 2.19 | 0.16 | 0.16 | 0.10 | 21.86 | 1.25 |
| 16/2/2560 | 13:00 น. | 51 | 0.66 | 0.51 | 0.60 | 0.33 | 22.00 | 0.57 |
| 17/2/2560 | 10:00 น. | 72 | 0.01 | 0.00 | 0.15 | 0.09 | 23.25 | 0.54 |
| 18/2/2560 | 10:00 น. | 96 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 23.68 | 0.37 |

ตารางที่ จ-7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ของการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากการเลี้ยงปลาความเข้มข้นแอมโมเนีย 1, 2 และ 3 มก. ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ของระบบตัวกลางเคลื่อนที่ที่บ่อปลา

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|----------|-------------------|-------------------------------|------|-----------------------------|------|----------------------------|------|
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 3/2/2560 | 15:30 น. | 0 | 1.07 | 0.09 | 0.01 | 0.00 | 17.81 | 2.82 |
| 3/2/2560 | 21:30 น. | 6 | 0.84 | 0.03 | 0.02 | 0.00 | 16.19 | 2.18 |
| 4/2/2560 | 5:30 น. | 14 | 0.46 | 0.04 | 0.02 | 0.01 | 16.55 | 1.69 |
| 4/2/2560 | 17:30 น. | 26 | 0.40 | 0.03 | 0.03 | 0.01 | 17.85 | 2.50 |
| 5/2/2560 | 5:30 น. | 38 | 0.17 | 0.05 | 0.04 | 0.01 | 18.90 | 2.98 |
| 7/2/2560 | 10:00 น. | 0 | 2.07 | 0.07 | 0.01 | 0.00 | 19.34 | 3.09 |
| 7/2/2560 | 22:00 น. | 12 | 1.60 | 0.15 | 0.03 | 0.01 | 18.76 | 2.49 |
| 8/2/2560 | 10:00 น. | 24 | 1.23 | 0.15 | 0.06 | 0.00 | 20.04 | 2.94 |
| 8/2/2560 | 22:00 น. | 36 | 0.54 | 0.18 | 0.07 | 0.01 | 20.78 | 3.09 |
| 9/2/2560 | 10:00 น. | 48 | 0.07 | 0.06 | 0.07 | 0.06 | 19.76 | 3.30 |
| 14/2/2560 | 10:00 น. | 0 | 2.88 | 0.06 | 0.01 | 0.00 | 19.00 | 3.98 |
| 14/2/2560 | 22:00 น. | 12 | 2.66 | 0.13 | 0.05 | 0.01 | 21.86 | 2.92 |
| 15/2/2560 | 10:00 น. | 24 | 2.34 | 0.20 | 0.11 | 0.02 | 21.83 | 2.61 |
| 16/2/2560 | 13:00 น. | 51 | 0.50 | 0.21 | 0.57 | 0.05 | 21.57 | 2.48 |
| 17/2/2560 | 10:00 น. | 72 | 0.01 | 0.00 | 0.06 | 0.10 | 22.75 | 1.92 |
| 18/2/2560 | 10:00 น. | 96 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 20.27 | 4.04 |

ตารางที่ จ-8 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ของการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากการเลี้ยงปลาความเข้มข้นแอมโมเนีย 1, 2 และ 3 มก. ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ของระบบโปรยกรองที่บ่อปลา

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ระยะเวลา (ชม.) | แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.) | | ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.) | |
|--------------|----------|-------------------|-------------------------------|------|-----------------------------|------|----------------------------|------|
| | | | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| 3/2/2560 | 15:30 น. | 0 | 1.16 | 0.09 | 0.00 | 0.00 | 20.95 | 1.47 |
| 3/2/2560 | 21:30 น. | 6 | 0.80 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 20.42 | 2.12 |
| 4/2/2560 | 5:30 น. | 14 | 0.43 | 0.06 | 0.02 | 0.01 | 20.48 | 0.41 |
| 4/2/2560 | 17:30 น. | 26 | 0.24 | 0.12 | 0.03 | 0.00 | 21.42 | 2.09 |
| 5/2/2560 | 5:30 น. | 38 | 0.14 | 0.07 | 0.03 | 0.02 | 22.19 | 1.32 |
| 7/2/2560 | 10:00 น. | 0 | 2.22 | 0.07 | 0.01 | 0.00 | 21.64 | 1.44 |
| 7/2/2560 | 22:00 น. | 12 | 1.54 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 21.44 | 1.26 |
| 8/2/2560 | 10:00 น. | 24 | 0.99 | 0.07 | 0.06 | 0.01 | 23.52 | 1.15 |
| 8/2/2560 | 22:00 น. | 36 | 0.40 | 0.06 | 0.08 | 0.02 | 23.37 | 1.10 |
| 9/2/2560 | 10:00 น. | 48 | 0.04 | 0.01 | 0.06 | 0.05 | 23.40 | 1.21 |
| 14/2/2560 | 10:00 น. | 0 | 2.93 | 0.06 | 0.01 | 0.00 | 22.54 | 1.25 |
| 14/2/2560 | 22:00 น. | 12 | 2.47 | 0.09 | 0.05 | 0.01 | 25.12 | 1.69 |
| 15/2/2560 | 10:00 น. | 24 | 1.99 | 0.04 | 0.13 | 0.02 | 24.85 | 0.99 |
| 16/2/2560 | 13:00 น. | 51 | 0.17 | 0.09 | 0.55 | 0.09 | 24.61 | 1.33 |
| 17/2/2560 | 10:00 น. | 72 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 0.03 | 26.01 | 2.24 |
| 18/2/2560 | 10:00 น. | 96 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 26.37 | 1.66 |

ภาคผนวก ฉ

ฉ1 – ฉ5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติใน excel สำหรับตารางช่วงที่ 2

ตารางที่ ฉ-1 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแต่ละระบบของความเข้มข้นแอมโมเนีย 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ท่อน้ำออก

| ANOVA TEST ท่อน้ำออกก่อนลงปลา 1 mg/l | | | | | | |
|--------------------------------------|---------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|
| Submerged | Fluidized Bed | Trickling Filter | | | | |
| 0.0211 | 0.0204 | 0.0246 | | | | |
| 0.0171 | 0.021 | 0.0285 | | | | |
| 0.0193 | 0.0205 | 0.0295 | | | | |
| Anova: Single Factor | | | | | | |
| SUMMARY | | | | | | |
| <i>Groups</i> | <i>Count</i> | <i>Sum</i> | <i>Average</i> | <i>Variance</i> | | |
| Submerged | 3 | 0.0575 | 0.019167 | 4.01E-06 | | |
| Fluidized Bed | 3 | 0.0619 | 0.020633 | 1.03E-07 | | |
| Trickling Filter | 3 | 0.0826 | 0.027533 | 6.7E-06 | | |
| ANOVA | | | | | | |
| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
| Between Group | 0.00012 | 2 | 5.99E-05 | 16.6029 | 0.003584 | 5.143253 |
| Within Groups | 2.16E-05 | 6 | 3.61E-06 | | | |
| Total | 0.000141 | 8 | | | | |

ตารางที่ ฉ-2 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแต่ละระบบของความเข้มข้น
แอมโมเนีย 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ท่อน้ำออก

| Submerged คู่กับ Fluidized Bed 1 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
|---|------------|------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.019167 | 0.027533 |
| Variance | 4.01E-06 | 6.70E-06 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.71399 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -3.40404 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.038263 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.076525 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| Submerged คู่กับ Trickling Filter 1 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.019167 | 0.027533 |
| Variance | 4.01E-06 | 6.70E-06 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.71399 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -3.40404 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.038263 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.076525 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| Fluidized Bed คู่กับ Trickling Filter 1 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.020633 | 0.027533 |
| Variance | 1.03E-07 | 6.70E-06 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | 0.466594 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -4.86688 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.01986 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.03972 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |

ตารางที่ ฉ-3 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแต่ละระบบของความเข้มข้นแอมโมเนีย 2 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ท่อน้ำออก

| ANOVA TEST ท่อน้ำออกก่อนลงปลา 2 mg/l | | | | | | |
|--------------------------------------|---------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|
| Submerged | Fluidized Bed | Trickling Filter | | | | |
| 0.0156 | 0.0304 | 0.0413 | | | | |
| 0.0118 | 0.0406 | 0.0373 | | | | |
| 0.0122 | 0.0228 | 0.0397 | | | | |
| Anova: Single Factor | | | | | | |
| SUMMARY | | | | | | |
| <i>Groups</i> | <i>Count</i> | <i>Sum</i> | <i>Average</i> | <i>Variance</i> | | |
| Submerged | 3 | 0.0396 | 0.0132 | 4.36E-06 | | |
| Fluidized Bed | 3 | 0.0938 | 0.031267 | 7.98E-05 | | |
| Trickling Filter | 3 | 0.1183 | 0.039433 | 4.05E-06 | | |
| ANOVA | | | | | | |
| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
| Between Group | 0.001081 | 2 | 0.000541 | 18.39201 | 0.002758 | 5.143253 |
| Within Groups | 0.000176 | 6 | 2.94E-05 | | | |
| Total | 0.001258 | 8 | | | | |

ตารางที่ ฉ-4 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแต่ละระบบของความเข้มข้นแอมโมเนีย 2 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ท่อน้ำออก

| Submerged คู่กับ Fluidized Bed 2 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
|---|------------|------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.0132 | 0.031267 |
| Variance | 4.36E-06 | 7.98E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.17909 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -3.2837 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.040778 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.081556 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| Submerged คู่กับ Trickle Filter 2 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.0132 | 0.039433 |
| Variance | 4.36E-06 | 4.05E-06 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | 0.856354 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -41.25 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.000294 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.000587 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| Fluidized Bed คู่กับ Trickle Filter 2 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.031267 | 0.039433 |
| Variance | 7.98E-05 | 4.05E-06 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.66141 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -1.36355 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.152952 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.305904 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |

ตารางที่ ฉ-5 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแต่ละระบบของความเข้มข้นแอมโมเนีย 3 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ท่อน้ำออก

| ANOVA TEST ท่อน้ำออกก่อนลงปลา 3 mg/l | | | | | | |
|--------------------------------------|---------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|
| Submerged | Fluidized Bed | Trickling Filter | | | | |
| 0.0518 | 0.051 | 0.0602 | | | | |
| 0.0558 | 0.0681 | 0.056 | | | | |
| 0.0384 | 0.0452 | 0.0557 | | | | |
| Anova: Single Factor | | | | | | |
| SUMMARY | | | | | | |
| <i>Groups</i> | <i>Count</i> | <i>Sum</i> | <i>Average</i> | <i>Variance</i> | | |
| Submerged | 3 | 0.146 | 0.048667 | 8.31E-05 | | |
| Fluidized Bed | 3 | 0.1643 | 0.054767 | 0.000142 | | |
| Trickling Filter | 3 | 0.1719 | 0.0573 | 6.33E-06 | | |
| ANOVA | | | | | | |
| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
| Between Group | 0.000118 | 2 | 5.91E-05 | 0.766867 | 0.505153 | 5.143253 |
| Within Groups | 0.000462 | 6 | 7.7E-05 | | | |
| Total | 0.00058 | 8 | | | | |

P-value 0.5 > 0.05 ไม่ significant

ฉ6 – ฉ10 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติใน excel สำหรับตารางช่วงที่ 2

ตารางที่ ฉ-6 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแต่ละระบบของความเข้มข้นแอมโมเนีย 1 มก.ไนโตรเจน/ล. หลังจากการเลี้ยงปลาที่ท่อน้ำออก

| ANOVA TESTท่อน้ำออกหลังลงปลา 1 mg/l | | | | | | |
|-------------------------------------|---------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|
| Submerged | Fluidized Bed | Trickling Filter | | | | |
| 0.0471 | 0.0255 | 0.0451 | | | | |
| 0.0436 | 0.0302 | 0.0533 | | | | |
| 0.0514 | 0.0368 | 0.0467 | | | | |
| Anova: Single Factor | | | | | | |
| SUMMARY | | | | | | |
| <i>Groups</i> | <i>Count</i> | <i>Sum</i> | <i>Average</i> | <i>Variance</i> | | |
| Submerged | 3 | 0.1421 | 0.047367 | 1.53E-05 | | |
| Fluidized Bed | 3 | 0.0925 | 0.030833 | 3.22E-05 | | |
| Trickling Filter | 3 | 0.1451 | 0.048367 | 1.89E-05 | | |
| ANOVA | | | | | | |
| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
| Between Group | 0.000582 | 2 | 0.000291 | 13.14633 | 0.006414 | 5.143253 |
| Within Groups | 0.000133 | 6 | 2.21E-05 | | | |
| Total | 0.000715 | 8 | | | | |

ตารางที่ ฉ-7 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแต่ละระบบของความเข้มข้นแอมโมเนีย 1 มก.ไนโตรเจน/ล. หลังจากการเลี้ยงปลาที่ท่อน้ำออก

| Submerged คู่กับ Fluidized Bed 1 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
|---|------------|------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.047367 | 0.030833 |
| Variance | 1.53E-05 | 3.22E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | 0.628419 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | 6.466144 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.011546 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.023092 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| Submerged คู่กับ Trickle Filter 1 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.047367 | 0.048367 |
| Variance | 1.53E-05 | 1.89E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.71941 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -0.22628 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.421002 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.842005 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| Fluidized Bed คู่กับ Trickle Filter 1 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.030833 | 0.048367 |
| Variance | 3.22E-05 | 1.89E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | 0.088217 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -4.44091 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.023574 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.047148 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |

ตารางที่ ฉ-8 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแต่ละระบบของความเข้มข้นแอมโมเนีย 2 มก.ไนโตรเจน/ล. หลังจากการเลี้ยงปลาที่ท่อน้ำออก

| ANOVA TEST ท่อน้ำออกหลังลงปลา 2 mg/l | | | | | | |
|--------------------------------------|---------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|
| Submerged | Fluidized Bed | Trickling Filter | | | | |
| 0.0383 | 0.0477 | 0.0465 | | | | |
| 0.0344 | 0.0365 | 0.0511 | | | | |
| 0.0316 | 0.0383 | 0.0495 | | | | |
| Anova: Single Factor | | | | | | |
| SUMMARY | | | | | | |
| <i>Groups</i> | <i>Count</i> | <i>Sum</i> | <i>Average</i> | <i>Variance</i> | | |
| Submerged | 3 | 0.1043 | 0.034767 | 1.13E-05 | | |
| Fluidized Bed | 3 | 0.1225 | 0.040833 | 3.62E-05 | | |
| Trickling Filter | 3 | 0.1471 | 0.049033 | 5.45E-06 | | |
| ANOVA | | | | | | |
| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
| Between Group | 0.000308 | 2 | 0.000154 | 8.713377 | 0.0168 | 5.143253 |
| Within Groups | 0.000106 | 6 | 1.77E-05 | | | |
| Total | 0.000413 | 8 | | | | |

ตารางที่ ฉ-9 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแต่ละระบบของความเข้มข้นแอมโมเนีย 2 มก.ไนโตรเจน/ล. หลังจากการเลี้ยงปลาที่ท่อน้ำออก

| Submerged คู่กับ Fluidized Bed 2 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
|---|------------|------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.034767 | 0.040833 |
| Variance | 1.13E-05 | 3.62E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | 0.836848 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -2.84688 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.052207 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.104415 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| Submerged คู่กับ Trickling Filter 2 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.034767 | 0.049033 |
| Variance | 1.13E-05 | 5.45E-06 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.71179 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -4.67292 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.021436 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.042872 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| Fluidized Bed คู่กับ Trickling Filter 2 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.0408333 | 0.049033 |
| Variance | 3.62E-05 | 5.45E-06 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.980175 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -1.707839 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.114895 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.229787 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |

ตารางที่ ฉ-10 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแต่ละระบบของความเข้มข้น
แอมโมเนีย 3 มก.ไนโตรเจน/ล. หลังจากการเลี้ยงปลาที่ท่อน้ำออก

| ANOVA TEST ท่อน้ำออกหลังลงปลา 3 mg/l | | | | | | |
|--------------------------------------|---------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|
| Submerged | Fluidized Bed | Trickling Filter | | | | |
| 0.0678 | 0.0662 | 0.0631 | | | | |
| 0.0518 | 0.0524 | 0.0706 | | | | |
| 0.0557 | 0.0645 | 0.0689 | | | | |
| Anova: Single Factor | | | | | | |
| SUMMARY | | | | | | |
| <i>Groups</i> | <i>Count</i> | <i>Sum</i> | <i>Average</i> | <i>Variance</i> | | |
| Submerged | 3 | 0.1753 | 0.058433 | 6.96E-05 | | |
| Fluidized Bed | 3 | 0.1831 | 0.061033 | 5.66E-05 | | |
| Trickling Filter | 3 | 0.2026 | 0.067533 | 1.55E-05 | | |
| ANOVA | | | | | | |
| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
| Between Group | 0.000132 | 2 | 6.59E-05 | 1.395511 | 0.317933 | 5.143253 |
| Within Groups | 0.000283 | 6 | 4.72E-05 | | | |
| Total | 0.000415 | 8 | | | | |

P-value 0.317 > 0.05 ไม่ significant

ฉ11 – ฉ15 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติใน excel สำหรับตารางช่วงที่ 2

ตารางที่ ฉ-11 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแต่ละระบบของความเข้มข้น
แอมโมเนีย 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่บ่อปลา

| ANOVA TESTบ่อปลาก่อนลงปลา 1 mg/l | | | | | | |
|----------------------------------|---------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|
| Submerged | Fluidized Bed | Trickling Filter | | | | |
| 0.0198 | 0.0144 | 0.0244 | | | | |
| 0.0154 | 0.0183 | 0.0238 | | | | |
| 0.0179 | 0.0151 | 0.0272 | | | | |
| Anova: Single Factor | | | | | | |
| SUMMARY | | | | | | |
| <i>Groups</i> | <i>Count</i> | <i>Sum</i> | <i>Average</i> | <i>Variance</i> | | |
| Submerged | 3 | 0.0531 | 0.0177 | 4.87E-06 | | |
| Fluidized Bed | 3 | 0.0478 | 0.015933 | 4.32E-06 | | |
| Trickling Filter | 3 | 0.0754 | 0.025133 | 3.29E-06 | | |
| ANOVA | | | | | | |
| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
| Between Group | 0.000143 | 2 | 7.15E-05 | 17.18019 | 0.003285 | 5.143253 |
| Within Groups | 2.5E-05 | 6 | 4.16E-06 | | | |
| Total | 0.000168 | 8 | | | | |

ตารางที่ ฉ-12 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแต่ละระบบของความเข้มข้น
แอมโมเนีย 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่บ่อปลา

| Submerged คู่กับ Fluidized Bed 1 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
|---|------------|------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.0177 | 0.015933 |
| Variance | 4.87E-06 | 4.32E-06 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.96218 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | 0.720772 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.272956 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.545913 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| Submerged คู่กับ Trickle Filter 1 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.0177 | 0.025133 |
| Variance | 4.87E-06 | 3.29E-06 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | 0.242209 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -5.16099 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.017777 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.035553 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| Fluidized Bed คู่กับ Trickle Filter 1 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.015933 | 0.025133 |
| Variance | 4.32E-06 | 3.29E-06 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.49735 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -4.72572 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.020989 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.041978 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |

ตารางที่ ฉ-13 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแต่ละระบบของความเข้มข้น
แอมโมเนีย 2 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่บ่อปลา

| ANOVA TESTบ่อปลาก่อนลงปลา 2 mg/l | | | | | | |
|----------------------------------|---------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|
| Submerged | Fluidized Bed | Trickling Filter | | | | |
| 0.0161 | 0.0229 | 0.0409 | | | | |
| 0.0166 | 0.0402 | 0.0385 | | | | |
| 0.0111 | 0.0241 | 0.0429 | | | | |
| Anova: Single Factor | | | | | | |
| SUMMARY | | | | | | |
| <i>Groups</i> | <i>Count</i> | <i>Sum</i> | <i>Average</i> | <i>Variance</i> | | |
| Submerged | 3 | 0.0438 | 0.0146 | 9.25E-06 | | |
| Fluidized Bed | 3 | 0.0872 | 0.029067 | 9.33E-05 | | |
| Trickling Filter | 3 | 0.1223 | 0.040767 | 4.85E-06 | | |
| ANOVA | | | | | | |
| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
| Between Group | 0.001031 | 2 | 0.000515 | 14.39404 | 0.005131 | 5.143253 |
| Within Groups | 0.000215 | 6 | 3.58E-05 | | | |
| Total | 0.001246 | 8 | | | | |

ตารางที่ ฉ-14 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแต่ละระบบของความเข้มข้น
แอมโมเนีย 2 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่บ่อปลา

| Submerged คู่กับ Fluidized Bed 2 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
|--|------------|------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.0146 | 0.029067 |
| Variance | 9.25E-06 | 9.33E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | 0.517342 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -2.94945 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.049148 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.098296 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| Submerged คู่กับ Tricking Filter 2 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.0146 | 0.040767 |
| Variance | 9.25E-06 | 4.85E-06 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.88056 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -8.90494 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.006189 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.012377 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| Fluidized Bed คู่กับ Tricking Filter 2 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.029067 | 0.040767 |
| Variance | 9.33E-05 | 4.85E-06 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.86113 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -1.74523 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.111531 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.223061 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |

ตารางที่ ฉ-15 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแต่ละระบบของความเข้มข้น
แอมโมเนีย 3 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่บ่อปลา

| ANOVA TESTบ่อปลาก่อนลงปลา 3 mg/l | | | | | | |
|----------------------------------|---------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|
| Submerged | Fluidized Bed | Trickling Filter | | | | |
| 0.0666 | 0.0567 | 0.0598 | | | | |
| 0.0518 | 0.0607 | 0.0413 | | | | |
| 0.0457 | 0.0592 | 0.0575 | | | | |
| Anova: Single Factor | | | | | | |
| SUMMARY | | | | | | |
| <i>Groups</i> | <i>Count</i> | <i>Sum</i> | <i>Average</i> | <i>Variance</i> | | |
| Submerged | 3 | 0.1641 | 0.0547 | 0.000116 | | |
| Fluidized Bed | 3 | 0.1766 | 0.058867 | 4.08E-06 | | |
| Trickling Filter | 3 | 0.1586 | 0.052867 | 0.000102 | | |
| ANOVA | | | | | | |
| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
| Between Group | 5.67E-05 | 2 | 2.84E-05 | 0.384546 | 0.696406 | 5.143253 |
| Within Groups | 0.000443 | 6 | 7.38E-05 | | | |
| Total | 0.000499 | 8 | | | | |

ฉ16 – ฉ18 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติใน excel สำหรับตารางช่วงที่ 2

ตารางที่ ฉ-16 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแต่ละระบบของความเข้มข้น
แอมโมเนีย 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่บ่อปลา

| ANOVA TESTบ่อปลาหลังปลา 1 mg/l | | | | | | |
|--------------------------------|---------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|
| Submerged | Fluidized Bed | Trickling Filter | | | | |
| 0.0469 | 0.0519 | 0.0461 | | | | |
| 0.0292 | 0.0444 | 0.0613 | | | | |
| 0.0423 | 0.0369 | 0.0479 | | | | |
| Anova: Single Factor | | | | | | |
| SUMMARY | | | | | | |
| <i>Groups</i> | <i>Count</i> | <i>Sum</i> | <i>Average</i> | <i>Variance</i> | | |
| Submerged | 3 | 0.1184 | 0.039467 | 8.43E-05 | | |
| Fluidized Bed | 3 | 0.1332 | 0.0444 | 5.63E-05 | | |
| Trickling Filter | 3 | 0.1553 | 0.051767 | 6.9E-05 | | |
| ANOVA | | | | | | |
| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
| Between Group | 0.00023 | 2 | 0.000115 | 1.645507 | 0.269317 | 5.143253 |
| Within Groups | 0.000419 | 6 | 6.99E-05 | | | |
| Total | 0.000649 | 8 | | | | |

ตารางที่ ฉ-17 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแต่ละระบบของความเข้มข้น
แอมโมเนีย 2 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่บ่อปลา

| ANOVA TESTบ่อปลาหลังปลา 2 mg/l | | | | | | |
|--------------------------------|---------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|
| Submerged | Fluidized Bed | Trickling Filter | | | | |
| 0.0477 | 0.0442 | 0.0453 | | | | |
| 0.0329 | 0.0257 | 0.0562 | | | | |
| 0.0314 | 0.0355 | 0.0514 | | | | |
| Anova: Single Factor | | | | | | |
| SUMMARY | | | | | | |
| <i>Groups</i> | <i>Count</i> | <i>Sum</i> | <i>Average</i> | <i>Variance</i> | | |
| Submerged | 3 | 0.112 | 0.037333 | 8.12E-05 | | |
| Fluidized Bed | 3 | 0.1054 | 0.035133 | 8.57E-05 | | |
| Trickling Filter | 3 | 0.1529 | 0.050967 | 2.98E-05 | | |
| ANOVA | | | | | | |
| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
| Between Group | 0.000441 | 2 | 0.000221 | 3.36657 | 0.104628 | 5.143253 |
| Within Groups | 0.000393 | 6 | 6.56E-05 | | | |
| Total | 0.000835 | 8 | | | | |

ตารางที่ ฉ-18 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของแต่ละระบบของความเข้มข้น
แอมโมเนีย 3 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่บ่อปลา

| ANOVA TESTบ่อปลาหลังปลา 3 mg/l | | | | | | |
|--------------------------------|---------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|
| Submerged | Fluidized Bed | Trickling Filter | | | | |
| 0.0715 | 0.0766 | 0.0656 | | | | |
| 0.0517 | 0.0586 | 0.0694 | | | | |
| 0.047 | 0.069 | 0.067 | | | | |
| Anova: Single Factor | | | | | | |
| SUMMARY | | | | | | |
| <i>Groups</i> | <i>Count</i> | <i>Sum</i> | <i>Average</i> | <i>Variance</i> | | |
| Submerged | 3 | 0.1702 | 0.056733 | 0.000169 | | |
| Fluidized Bed | 3 | 0.2042 | 0.068067 | 8.17E-05 | | |
| Trickling Filter | 3 | 0.202 | 0.067333 | 3.69E-06 | | |
| ANOVA | | | | | | |
| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
| Between Group | 0.000241 | 2 | 0.000121 | 1.422952 | 0.312052 | 5.143253 |
| Within Groups | 0.000509 | 6 | 8.48E-05 | | | |
| Total | 0.00075 | 8 | | | | |

ฉ19 – ฉ24 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติใน excel เปรียบเทียบระหว่างการทดลองช่วงที่ 2 และทดลองช่วงที่ 4

ตารางที่ ฉ-19 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียก่อนการลงปลาและหลังการลงปลาของระบบตัวกลาง

จมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรองที่ความเข้มข้น 1 มกไนโตรเจน/ล. บริเวณที่อน้ำออก

| เปรียบเทียบก่อนและหลัง Submerged 1 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
|---|------------|------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.019167 | 0.047367 |
| Variance | 4.01E-06 | 1.53E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | 0.498722 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -14.42208 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.002387 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.004773 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| เปรียบเทียบก่อนและหลัง Fluidized Bed 1 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.020633 | 0.030833 |
| Variance | 1.03E-07 | 3.22E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | 0.059369 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -3.11775 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.044655 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.08931 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| เปรียบเทียบก่อนและหลัง Trickling Filter 1 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.027533 | 0.048367 |
| Variance | 6.7E-06 | 1.89E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | 0.491981 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -9.46861 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.005485 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.010971 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |

ตารางที่ ฉ-20 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียก่อนการลงปลาและหลังการลงปลาของระบบ
ตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรองที่ความเข้มข้น 2 มก.ไนโตรเจน/ล. บริเวณท่อน้ำออก

| เปรียบเทียบก่อนและหลัง Submerged 2 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
|---|------------|------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.0132 | 0.034767 |
| Variance | 4.36E-06 | 1.13E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | 0.865313 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -19.90063 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.001258 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.002516 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| เปรียบเทียบก่อนและหลัง Fluidized Bed 2 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.031267 | 0.040833 |
| Variance | 7.98E-05 | 3.62E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.2322 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -1.39597 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.148749 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.297499 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| เปรียบเทียบก่อนและหลัง Trickling Filter 2 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.039433 | 0.049033 |
| Variance | 4.05E-06 | 5.45E-06 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.95856 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -3.86377 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.030464 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.060927 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |

ตารางที่ ฉ-21 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียก่อนการลงปลาและหลังการลงปลาของระบบ
 ตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรองที่ความเข้มข้น 3 มก.ไนโตรเจน/ล. บริเวณท่อน้ำออก

| เปรียบเทียบก่อนและหลัง Submerged 3 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
|---|------------|------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.0486667 | 0.058433 |
| Variance | 8.31E-05 | 6.96E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | 0.066376 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -1.416782 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.146126 | |
| t Critical one-tail | 2.9199856 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.2922519 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| เปรียบเทียบก่อนและหลัง Fluidized Bed 3 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.054767 | 0.061033 |
| Variance | 0.000142 | 5.66E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.93616 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -0.56728 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.313854 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.627709 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| เปรียบเทียบก่อนและหลัง Trickling Filter 3 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.0573 | 0.067533 |
| Variance | 6.33E-06 | 1.55E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.96173 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -2.77411 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.054544 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.109089 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |

ตารางที่ ฉ-22 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียก่อนการลงปลาและหลังการลงปลาของระบบ
ตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรองที่ความเข้มข้น 1 มก.ไนโตรเจน/ล. บริเวณบ่อ
ปลา

| เปรียบเทียบก่อนและหลัง Submerged 1 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
|---|------------|------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.0177 | 0.039467 |
| Variance | 4.87E-06 | 8.43E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | 0.9816441 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -5.362737 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.016529 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.0330573 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| เปรียบเทียบก่อนและหลัง Fluidized Bed 1 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.015933 | 0.0444 |
| Variance | 4.32E-06 | 5.63E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.16833 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -6.07725 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.013012 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.026024 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| เปรียบเทียบก่อนและหลัง Trickling Filter 1 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.025133 | 0.051767 |
| Variance | 3.29E-06 | 6.9E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.54894 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -4.89494 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.019646 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.039292 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |

ตารางที่ ฉ-23 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียก่อนการลงปลาและหลังการลงปลาของระบบ
ตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรองที่ความเข้มข้น 2 มก.ไนโตรเจน/ล. บริเวณบ่อ
ปลา

| เปรียบเทียบก่อนและหลัง Submerged 2 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
|---|------------|------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.0146 | 0.037333 |
| Variance | 9.25E-06 | 8.12E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | 0.500912 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -4.962264 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.0191466 | |
| t Critical one-tail | 2.9199856 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.038293 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| เปรียบเทียบก่อนและหลัง Fluidized Bed 2 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.029067 | 0.035133 |
| Variance | 9.33E-05 | 8.57E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.91016 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -0.56841 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.313535 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.62707 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| เปรียบเทียบก่อนและหลัง Trickling Filter 2 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.040767 | 0.050967 |
| Variance | 4.85E-06 | 2.98E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.48581 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -2.59387 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.061008 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.122015 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |

ตารางที่ ฉ-24 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียก่อนการลงปลาและหลังการลงปลาของระบบ
ตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรองที่ความเข้มข้น 3 มก.ไนโตรเจน/ล. บริเวณบ่อ
ปลา

| เปรียบเทียบก่อนและหลัง Submerged 3 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
|---|------------|------------|
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.0547 | 0.056733 |
| Variance | 0.000116 | 0.000169 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | 0.994387 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -1.365368 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.152713 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.3054267 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| เปรียบเทียบก่อนและหลัง Fluidized Bed 3 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.058867 | 0.068067 |
| Variance | 4.08E-06 | 8.17E-05 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.973 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -1.44701 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.142417 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.284835 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |
| เปรียบเทียบก่อนและหลัง Trickline Filter 3 mg/l t-Test: Paired Two Sample for Means | | |
| | Variable 1 | Variable 2 |
| Mean | 0.052867 | 0.067333 |
| Variance | 0.000102 | 3.69E-06 |
| Observations | 3 | 3 |
| Pearson Correlation | -0.96677 | |
| Hypothesized Mean Difference | 0 | |
| df | 2 | |
| t Stat | -2.09667 | |
| P(T<=t) one-tail | 0.085481 | |
| t Critical one-tail | 2.919986 | |
| P(T<=t) two-tail | 0.170961 | |
| t Critical two-tail | 4.302653 | |

ตารางที่ ฉ-25 ตารางสรุปอัตราการบำบัดแอมโมเนียแต่ละระบบของความเข้มข้น 1, 2 และ 3 มก.

ไนโตรเจน/ล. ที่ท่อน้ำออกก่อนการเลี้ยงปลา

| ท่อน้ำออกก่อนลงปลา | | | | | | | |
|--------------------|---------|-----------|------|---------------|------|------------------|------|
| ความเข้มข้น | Control | Submerged | SD | Fluidized Bed | SD | Trickling Filter | SD |
| 1 mg/l | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.03 | 0.00 |
| 2 mg/l | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 0.04 | 0.00 |
| 3 mg/l | 0.00 | 0.05 | 0.01 | 0.05 | 0.01 | 0.06 | 0.00 |

ตารางที่ ฉ-26 ตารางสรุปอัตราการบำบัดแอมโมเนียแต่ละระบบของความเข้มข้น 1, 2 และ 3 มก.

ไนโตรเจน/ล. ที่ท่อน้ำออกหลังการเลี้ยงปลา

| ท่อน้ำออกหลังลงปลา | | | | | | | |
|--------------------|---------|-----------|------|---------------|------|------------------|------|
| ความเข้มข้น | Control | Submerged | SD | Fluidized Bed | SD | Trickling Filter | SD |
| 1 mg/l | 0.05 | 0.05 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 0.05 | 0.00 |
| 2 mg/l | 0.04 | 0.03 | 0.00 | 0.04 | 0.01 | 0.05 | 0.00 |
| 3 mg/l | 0.06 | 0.06 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 0.07 | 0.00 |

ตารางที่ ฉ-27 ตารางสรุปอัตราการบำบัดแอมโมเนียแต่ละระบบของความเข้มข้น 1, 2 และ 3 มก.

ไนโตรเจน/ล.ที่บ่อบำบัดก่อนการเลี้ยงปลา

| บ่อบำบัด ก่อนลงปลา | | | | | | | |
|--------------------|---------|-----------|------|---------------|------|------------------|------|
| ความเข้มข้น | Control | Submerged | SD | Fluidized Bed | SD | Trickling Filter | SD |
| 1 mg/l | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.03 | 0.00 |
| 2 mg/l | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 0.04 | 0.00 |
| 3 mg/l | 0.00 | 0.05 | 0.01 | 0.06 | 0.00 | 0.05 | 0.01 |

ตารางที่ ฉ-28 ตารางสรุปอัตราการบำบัดแอมโมเนียแต่ละระบบของความเข้มข้น 1, 2 และ 3 มก.

ไนโตรเจน/ล. ที่บ่อบำบัดหลังการเลี้ยงปลา

| บ่อบำบัด หลังลงปลา | | | | | | | |
|--------------------|---------|-----------|------|---------------|------|------------------|------|
| ความเข้มข้น | Control | Submerged | SD | Fluidized Bed | SD | Trickling Filter | SD |
| 1 mg/l | 0.05 | 0.04 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 0.05 | 0.01 |
| 2 mg/l | 0.04 | 0.04 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 0.05 | 0.01 |
| 3 mg/l | 0.07 | 0.06 | 0.01 | 0.07 | 0.01 | 0.07 | 0.00 |

ตารางที่ ฉ-29 ตารางสรุปการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียแต่ละระบบของความเข้มข้น 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ท่อน้ำออก

| 1mg/l | อัตราการบำบัด แอมโมเนียก่อนลงปลา | อัตราการบำบัด แอมโมเนียหลังลงปลา | P-Value |
|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------|
| Submerged | 0.019 ± 0.002 ^{a,A} | 0.047 ± 0.004 ^{a,B} | 0.002 |
| Fluidized Bed | 0.021 ± 0.0003 ^{a,A} | 0.031 ± 0.006 ^{b,B} | 0.045 |
| Trickling Filter | 0.028 ± 0.003 ^{b,A} | 0.048 ± 0.004 ^{a,B} | 0.005 |
| P-Value | 0.004 | 0.006 | |
| 2mg/l | อัตราการบำบัด แอมโมเนียก่อนลงปลา | อัตราการบำบัด แอมโมเนียหลังลงปลา | P-Value |
| Submerged | 0.013 ± 0.002 ^{b,A} | 0.035 ± 0.003 ^{a,B} | 0.001 |
| Fluidized Bed | 0.031 ± 0.009 ^{a,A} | 0.041 ± 0.006 ^{a,b,A} | 0.149 |
| Trickling Filter | 0.039 ± 0.002 ^{a,A} | 0.049 ± 0.002 ^{b,B} | 0.030 |
| P-Value | 0.003 | 0.017 | |
| 3mg/l | อัตราการบำบัด แอมโมเนียก่อนลงปลา | อัตราการบำบัด แอมโมเนียหลังลงปลา | P-Value |
| Submerged | 0.049 ± 0.009 ^{a,A} | 0.058 ± 0.008 ^{a,A} | 0.146 |
| Fluidized Bed | 0.055 ± 0.012 ^{a,A} | 0.061 ± 0.008 ^{a,A} | 0.314 |
| Trickling Filter | 0.057 ± 0.003 ^{a,A} | 0.068 ± 0.004 ^{a,A} | 0.055 |
| P-Value | 0.505 | 0.318 | |

ตารางที่ ฉ-30 ตารางสรุปการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียแต่ละระบบของความเข้มข้น 1, 2 และ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่บ่อปลา

| 1mg/l | อัตราการบำบัด แอมโมเนียก่อนลงปลา | อัตราการบำบัด แอมโมเนียหลังลงปลา | P-Value |
|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------|
| Submerged | 0.018 ± 0.002 ^{a,A} | 0.039 ± 0.009 ^{a,B} | 0.017 |
| Fluidized Bed | 0.016 ± 0.0002 ^{a,A} | 0.044 ± 0.008 ^{b,B} | 0.013 |
| Trickling Filter | 0.025 ± 0.002 ^{b,A} | 0.052 ± 0.008 ^{a,B} | 0.020 |
| P-Value | 0.003 | 0.269 | |
| 2mg/l | อัตราการบำบัด แอมโมเนียก่อนลงปลา | อัตราการบำบัด แอมโมเนียหลังลงปลา | P-Value |
| Submerged | 0.015 ± 0.003 ^{b,A} | 0.037 ± 0.010 ^{a,B} | 0.019 |
| Fluidized Bed | 0.029 ± 0.010 ^{a,A} | 0.035 ± 0.009 ^{a,A} | 0.314 |
| Trickling Filter | 0.041 ± 0.002 ^{a,A} | 0.051 ± 0.006 ^{a,A} | 0.061 |
| P-Value | 0.005 | 0.105 | |
| 3mg/l | อัตราการบำบัด แอมโมเนียก่อนลงปลา | อัตราการบำบัด แอมโมเนียหลังลงปลา | P-Value |
| Submerged | 0.055 ± 0.011 ^{a,A} | 0.057 ± 0.013 ^{a,A} | 0.153 |
| Fluidized Bed | 0.059 ± 0.002 ^{a,A} | 0.068 ± 0.009 ^{a,A} | 0.142 |
| Trickling Filter | 0.053 ± 0.010 ^{a,A} | 0.067 ± 0.002 ^{a,A} | 0.085 |
| P-Value | 0.696 | 0.312 | |

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างรายการคำนวณ

การทดลองครั้งที่ 2 ศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์ สิ้นสุดการเลี้ยงปลาที่ความหนาแน่นเท่ากับ 1 กก/ลบม. จะใช้ BCN-012 กี่ลิตร

$$\begin{aligned}
 \text{ความหนาแน่นปลา} &= 1 \text{ kg/m}^3 \times 10^6 \text{ mg/1kg} \times 1 \text{ m}^3 / 1000 \text{ l} \\
 &= 1,000 \text{ mg/l} \\
 \text{อาหาร 3\%} &= 1,000 \text{ mg/l} \times 0.03 = 30 \text{ mg/l/day} \\
 \text{โปรตีน 15.875\%} &= 30 \text{ mg/l} \times 0.15875 = 4.7625 \text{ mg/l/day} \\
 \text{ไนโตรเจน 16\%} &= 4.7625 \text{ mg/l} \times 0.16 = 0.762 \text{ mg/l/day} \\
 \text{แอมโมเนียที่เกิด 75\%} &= 0.762 \text{ mg/l} \times 0.75 = 0.572 \text{ mg/l/day} \\
 \text{เกิด TAN} &= 0.572 \text{ mg-N/L/day} \\
 &= 250 \times 0.572 \text{ mg-N/250L/day} \\
 &= 143 \text{ mg-N/250L/day}
 \end{aligned}$$

ตัวกรองชีวภาพ 3 เดือน

$$\begin{aligned}
 V_{\max} &= 2.61 \text{ mg-N/L}_{\text{biofilter}} / \text{hr} \\
 K_s &= 6.47 \text{ mg-N/L} \\
 V &= \frac{V_{\max}(S)}{K_s + S} \\
 V &= \frac{2.62(0.286)}{6.47 + 0.286} \text{ mg-N/L}_{\text{biofilter}} / \text{hr} \\
 V &= 0.111 \text{ mg-N/L}_{\text{biofilter}} / \text{hr} \\
 V &= 0.111 \times 24 \text{ mg-N/L}_{\text{biofilter}} / \text{day} \\
 V &= 2.664 \text{ mg-N/L}_{\text{biofilter}} / \text{day} \\
 \text{จำนวนตัวกรองที่ใช้} &= \frac{143 \text{ mg-N/250L/day}}{2.664 \text{ mg-N/L}_{\text{biofilter}} / \text{hr}} = 53.68 \text{ ลิตร} \\
 &\approx 54 \text{ ลิตร}
 \end{aligned}$$

ตัวกรองชีวภาพ 6 เดือน

$$\begin{aligned}
 V_{\max} &= 1.93 \text{ mg-N/L}_{\text{biofilter}} / \text{hr} \\
 K_s &= 2.15 \text{ mg-N/L} \\
 V &= \frac{V_{\max}(S)}{K_s + S} \\
 V &= \frac{1.93(0.286)}{2.15 + 0.286} \text{ mg-N/L}_{\text{biofilter}} / \text{hr} \\
 V &= 0.227 \text{ mg-N/L}_{\text{biofilter}} / \text{hr} \\
 V &= 0.227 \times 24 \text{ mg-N/L}_{\text{biofilter}} / \text{day} \\
 V &= 5.45 \text{ mg-N/L}_{\text{biofilter}} / \text{day} \\
 \text{จำนวนตัวกรองที่ใช้} &= \frac{143 \text{ mg-N}/250\text{L}/\text{day}}{5.45 \text{ mg-N/L}_{\text{biofilter}} / \text{hr}} = 26.24 \text{ ลิตร} \\
 &\approx 26 \text{ ลิตร}
 \end{aligned}$$



การทดลองช่วงที่ 3 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และระบบโปรยกรอง ในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากน้ำเสียจริงในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

การเกิดแอมโมเนียในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำต่อวัน (มก.-ไนโตรเจน/ปริมาณน้ำทั้งระบบ/วัน)

$$= \text{ความหนาแน่นเริ่มต้นในการเลี้ยงปลา (กก./ลบ.ม.)} \times \text{อัตราการให้อาหารต่อวัน (ร้อยละ)} \times \text{อัตราส่วนโปรตีนในอาหาร (ร้อยละ)} \times \text{ปริมาณแร่ธาตุไนโตรเจนในโปรตีน (ก.-ไนโตรเจน/ก.-โปรตีน)} \times \text{ปริมาณน้ำทั้งระบบ} \times 0.75 \times 10^3 \text{มก./ล.}$$

$$= (0.5 \text{ กก./ลบ.ม.}) \times (0.03) \times (0.15) \times (0.16 \text{ ก.-ไนโตรเจน/ก.-โปรตีน}) \times 250 \times 0.75 \times 10^3 \text{มก./ล.}$$

$$= 71.5 \text{ มก.-ไนโตรเจน/250ลิตร/วัน}$$

น้ำหนักสัตว์น้ำเฉลี่ย (ก./ตัว) (คำนวณจากชุดควบคุม)

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

$$= (125.03 \text{ ก./บ่อ}) / (6 \text{ ตัว/บ่อ})$$

$$= 20.84 \text{ ก./ตัว}$$

ความยาวสัตว์น้ำเฉลี่ย (ซม./ตัว) (คำนวณจากชุดควบคุม)

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

$$= (64 \text{ ซม./บ่อ}) / (6 \text{ ตัว/บ่อ})$$

$$= 10.67 \text{ ซม./ตัว}$$

อัตราการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำต่อวัน (ก./ตัว/วัน)

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

$$= [(25.66 \text{ ก./ตัว}) - (20.84 \text{ ก./ตัว})] / (16 \text{ วัน})$$

$$= 0.30 \text{ ก./ตัว/วัน}$$



การทดลองครั้งที่ 4 ศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบตัวกลางจมตัว ตัวกลางเคลื่อนที่ และโปรยกรอง ในการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจน จากน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากการเลี้ยงปลา

การคำนวณพื้นที่ทั้งหมดของชุดควบคุมระบบตัวกลางจมตัว ระบบตัวกลางเคลื่อนที่และระบบโปรยกรอง โดยที่พื้นที่ทั้งหมดที่แบคทีเรียยึดเกาะอาศัยของแต่ละระบบจะคาดการณ์ว่าแบคทีเรียที่ไปยึดเกาะนั้นจะอยู่ตามบริเวณที่มีน้ำสัมผัสอยู่

1.ระบบตัวกลางจมตัว (Submerged)

= พื้นที่ของบ่อปลา + พื้นที่ของถังตกตะกอน + พื้นที่ถังปฏิกรณ์ + พื้นที่ของท่อต่างๆ

1.1 พื้นที่ของบ่อปลา

= พื้นที่ด้านข้าง 4 ด้านของบ่อปลา + พื้นที่ก้นของบ่อปลา

= พื้นที่ด้านข้างที่ประกอบด้วยความกว้างและความสูงจำนวน 2 ด้าน + พื้นที่ด้านข้างที่

ประกอบด้วยความยาวและความสูงจำนวน 2 ด้าน + พื้นที่ก้นบ่อปลา

1.1.1 พื้นที่ด้านข้างประกอบด้วยความกว้าง = 58.5 ซม. และความสูง 35 ซม. จำนวน 2 ด้าน

= ความกว้าง×ความสูง×2

= (58.5×35)×2

= 4,095 ตร.ซม.

1.1.2 พื้นที่ด้านข้างประกอบด้วยความยาว = 98.5 ซม. และความสูง 35 ซม. จำนวน 2 ด้าน

= ความกว้าง×ความสูง×2

= (98.5×35)×2

= 6,895 ตร.ซม.

1.1.3 พื้นที่ก้นบ่อปลาประกอบด้วยความกว้าง = 58.5 ซม. และความยาว 98.5 ซม.

= ความกว้าง×ความสูง

= 58.5×98.5

= 5,762.25 ตร.ซม.

∴ พื้นที่ของบ่อปลาที่บริเวณน้ำสัมผัส = 4,095 + 6,895 + 5,762.25 = 16752.25 cm²

1.2 พื้นที่ของถังตกตะกอน

$$= \text{พื้นที่ด้านข้างของถังตกตะกอน} + \text{พื้นที่ก้นถังของถังตกตะกอน}$$

1.2.1 พื้นที่ด้านข้างของถังตกตะกอน

จากสมการ

$$\pi r_2(l+l_2) - \pi r l$$

$$R = \text{รัศมีของปากถังตกตะกอน}$$

$$r_2 = \text{รัศมีของถังตกตะกอนเมื่อ } l_2 = 40 \text{ ซม.}$$

$$L = \text{ความสูงเอียงของปากถังตกตะกอน}$$

$$= 50.8 \text{ ซม.}$$

$$l_2 = \text{ความสูงเอียงของถังน้ำ (เมื่อน้ำมีปริมาตร 40)}$$

$$= 40 \text{ ซม.}$$

$$r = \text{รัศมีของก้นถังตกตะกอน}$$

$$= 16.25 \text{ ซม.}$$

$$l = \text{ความสูงเอียงที่เกิดจากการคำนวณของสมการ}$$

$$\frac{l}{l+L} = \frac{r}{R}$$

$$\frac{l}{l+50.8} = \frac{16.25}{19.85}$$

$$19.85l = 16.25(l+50.8)$$

$$19.85l = 16.25l + 825.5$$

$$3.60l = 825.5$$

$$l = \frac{825.5}{3.60} \text{ ซม.}$$

$$l = 229.306 \text{ ซม.}$$

การคำนวณหาค่า r_2

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } \frac{r}{r_2} &= \frac{l}{l+l_2} \\ r_2 &= \left(\frac{l+l_2}{l} \right) \times r \end{aligned}$$

$$r_2 = \left(\frac{229.306+40}{229.306} \right) \times 16.25 \text{ ซม.}$$

$$r_2 = 19.085 \text{ ซม.}$$

∴ พื้นที่ด้านข้างของถังตกตะกอน

$$= \pi r_2(l + l_2) - \pi r l$$

$$= \frac{22}{7} \times 19.085 \times (229.306 + 40) - \frac{22}{7} \times 16.25 \times 229.306$$

$$= 4,442.374 \text{ ตร.ซม.}$$

1.2.2 พื้นที่ก้นถังตกตะกอน

เนื่องจากก้นถังของถังตกตะกอนลักษณะเป็นวงกลม

จากสมการ

$$A = \pi r^2$$

∴ พื้นที่ก้นถังตกตะกอน

$$= \pi r^2$$

$$= \frac{22}{7} \times (16.25)^2 \text{ ตร.ซม.}$$

$$= 829.911 \text{ ตร.ซม.}$$

∴ พื้นที่ของถังตกตะกอน

$$= 4442.374 + 829.911$$

$$= 5,272.285 \text{ ตร.ซม.}$$

1.3 พื้นที่ถังปฏิกรณ์

$$= \text{พื้นที่ด้านข้างของถังปฏิกรณ์} + \text{พื้นที่ก้นถังปฏิกรณ์}$$

1.3.1 พื้นที่ด้านข้างของถังปฏิกรณ์

$$R = \text{รัศมีของถังปฏิกรณ์ (ได้จากข้อมูลของท่อน้ำไทย)}$$

$$= \frac{15}{2} = 7.5 \text{ ซม.}$$

$$h = \text{ความสูงของน้ำในถังปฏิกรณ์}$$

$$= 82 \text{ ซม.}$$

∴ พื้นที่ด้านข้างของถังปฏิกรณ์

$$\text{จากสูตร } A = 2\pi Rh$$

$$= 2\pi \times (7.5) \times 82 \text{ ตร.ซม.}$$

$$= 3,865.714 \text{ ตร.ซม.}$$

1.3.2 พื้นที่ก้นถังปฏิกรณ์

$$R = 7.5 \text{ ซม.}$$

∴ พื้นที่ก้นถังปฏิกรณ์

$$\text{จากสูตร } A = \pi r^2$$

$$= \frac{22}{7} \times (7.5)^2 \text{ ตร.ซม.}$$

$$= 176.786 \text{ ตร.ซม.}$$

$$\therefore \text{พื้นที่ถังปฏิกรณ์} = 3865.714 + 176.686 \text{ ตร.ซม.}$$

$$= 4,042.5 \text{ ตร.ซม.}$$

1.4 พื้นที่ของท่อต่างๆ

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่ของท่อต่างๆ} &= \text{พื้นที่ของท่อกาลักน้ำจากบ่อปลาไปยังถังตกตะกอน} + \text{พื้นที่ของท่อน้ำเข้า} \\ &\quad \text{ถังปฏิกรณ์} + \text{พื้นที่ของท่อน้ำออกถังปฏิกรณ์} \end{aligned}$$

1.4.1 พื้นที่ของท่อกาลักน้ำจากบ่อปลาไปยังถังตกตะกอน

$$= \text{พื้นที่ของท่อกาลักน้ำเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน} + \text{พื้นที่ภายนอกของท่อการลักน้ำที่} \\ \text{สัมผัสกับน้ำ}$$

1.4.1.1 พื้นที่ของท่อกาลักน้ำเส้นผ่านศูนย์กลางภายในน้ำ

เนื่องจากท่อกาลักน้ำจะมีจำนวน 2 ชุด จากบ่อปลาไปยังถังตกตะกอน

- พื้นที่ของท่อกาลักน้ำชุดที่ 1 จากบ่อปลาไปยังถังตกตะกอน

ชุดที่ 1 ประกอบด้วยท่อพีวีซีขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ยาว 95.1 เซนติเมตรสามทาง 90°

ขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้วจำนวน 3 ชุด แต่ละชุดมีเส้นผ่าศูนย์กลางกว้าง 3 เซนติเมตร

- พื้นที่ภายในท่อพีวีซีขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว

จากสมการ

$$A = 2\pi rh$$

$$r = \text{ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อพีวีซีขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว}$$

$$= 1 \text{ เซนติเมตร}$$

$$h = \text{ความยาวของท่อพีวีซีขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว}$$

$$= 95.1 \text{ ซม.}$$

$$= 2 \times \frac{22}{7} \times 1 \times 95.1 \text{ ตร.ซม.}$$

$$= 597.77 \text{ ตร.ซม.}$$

- พื้นที่ของสามทาง 90° ขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้วรวมกับส่วนตรงของข้องอ 90° ขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว

$$\begin{aligned} r &= \text{ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของสามทาง } 90^\circ \\ &= \text{ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อพีวีซีขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว} \\ &= \frac{2.6}{2} = 1.3 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

h = ความยาวของสามทางรวมกับส่วนของข้องอ

จากสมการ

$$A = 2\pi rh$$

$$\begin{aligned} &= 2 \times \frac{22}{7} \times 1.3 \times 7.2 \text{ ตร.ซม.} \\ &= 58.834 \text{ ตร.ซม.} \end{aligned}$$

- พื้นที่ของส่วนโค้งของข้องอ 90° ขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว จำนวน 3 ชุด

$$r = \text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของส่วนโค้งของข้องอ } 90^\circ = 2.6 \text{ ซม.}$$

จากสมการ

$$A = 4\pi r^2$$

แต่เนื่องจากส่วนโค้งของข้องอ 90° มี 3 ชุด เมื่อประกอบกันจะเป็น $\frac{3}{4}$ ของวงกลม

$$\therefore \text{พื้นที่ของส่วนโค้งของข้องอ} = \frac{3}{4}A$$

$$\begin{aligned} &= \frac{3}{4}(4\pi r^2) \\ &= 3\pi r^2 \\ &= 3 \times \frac{22}{7} \times (3)^2 \text{ ตร.ซม.} \\ &= 63.737 \text{ ตร.ซม.} \end{aligned}$$

∴ พื้นที่ของท่อกาลักน้ำชุดที่หนึ่งจากบ่อปลาไปยังถังตกตะกอน

$$= \text{พื้นที่ภายในท่อพีวีซีขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว} + \text{พื้นที่ของสามทาง } 90^\circ \text{ ขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้วรวมกับ}$$

$$\text{ส่วนตรงของข้องอ } 90^\circ \text{ ขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว} + \text{พื้นที่ของส่วนโค้งของข้องอ } 90^\circ \text{ ขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว}$$

จำนวน 3 ชุด

$$= 597.77 + 58.834 + 63.737 \quad \text{ตร.ซม.}$$

$$= 720.341 \quad \text{ตร.ซม.}$$

- พื้นที่ของท่อกาลักน้ำชุดที่ 2 จากบ่อปลาไปยังถังตกตะกอน

ชุดที่สอง จะเหมือนชุดที่หนึ่งแต่เพิ่มท่อพีวีซีขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ยาว 65 ซม. และข้องอ

90° ขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว จำนวน 1 ชิ้น

∴ พื้นที่ของท่อกาลักน้ำชุดที่สองจากบ่อปลาไปยังถังตกตะกอน

= พื้นที่ของท่อกาลักน้ำชุดที่หนึ่งจากบ่อปลาไปยังถังตกตะกอน + พื้นที่ภายใน

$$\text{ท่อพีวีซีขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว} + \text{พื้นที่ส่วนโค้งข้องอ } 90^\circ \text{ ขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว}$$

- พื้นที่ของท่อกาลักน้ำชุดที่หนึ่งจากบ่อปลาไปยังถังตกตะกอน = 1,249.85 ตร.ซม.

- พื้นที่ภายในท่อพีวีซีขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว

จากสมการ $A = 2\pi rh$

$$r = \text{ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อพีวีซีขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว}$$

$$= 1 \text{ ซม.}$$

$$h = \text{ความยาวของท่อพีวีซีขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว}$$

$$= 65 \text{ ซม.}$$

$$= 2 \times \frac{22}{7} \times 1 \times 65 \text{ ตร.ซม.}$$

$$= 408.571 \text{ ตร.ซม.}$$

- พื้นที่ของสามทาง 90° ขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้วรวมกับส่วนตรงของข้ออ 90° ขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว

จากสมการ $A = 4\pi r^2$

$$r = \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนโค้งของข้ออ } 90^\circ$$

$$= \text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อพีริซขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว}$$

$$= 2.6 \text{ ซม.}$$

$$\therefore \text{พื้นที่ของส่วนโค้งของข้ออ} = \frac{1}{4} A$$

$$= \frac{1}{4} (4\pi r^2)$$

$$= \pi r^2$$

$$= \frac{22}{7} \times (2.6)^2 \text{ ตร.ซม.}$$

$$= 21.246 \text{ ตร.ซม.}$$

\therefore พื้นที่ของท่อกลักน้ำชุดที่สองจากบ่อปลาไปยังถังตกตะกอน

$$= \text{พื้นที่ของท่อกลักน้ำจากบ่อปลาไปยังถังตกตะกอนชุดที่หนึ่ง} +$$

$$\text{พื้นที่ภายในท่อพีริซขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว} + \text{พื้นที่ของสามทาง } 90^\circ \text{ ขนาด}$$

$$\frac{3}{4} \text{ นิ้ว}$$

$$= 1,249.85 + 408.571 + 21.246 \text{ ตร.ซม.}$$

$$= 1,679.667 \text{ ตร.ซม.}$$

\therefore พื้นที่ของท่อกลักน้ำเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน = พื้นที่ของท่อกลักน้ำชุดที่หนึ่งจากบ่อปลา

ไปยังถึงตกตะกอน + พื้นที่ของท่อกาลักน้ำ

ชุดที่สองจากบ่อปลาไปยังถึงตกตะกอน

$$= 720.341 + 1,679.667 = 2,400.008 \text{ ตร.ซม.}$$

1.4.1.2 พื้นที่ภายนอกของท่อกาลักน้ำที่สัมผัสกับผิวน้ำ

เนื่องจากท่อกาลักน้ำจะมีจำนวน 2 ชุด จากบ่อปลาไปยังถึงตกตะกอน

- พื้นที่กาลักน้ำชุดที่หนึ่ง ที่สัมผัสกับผิวน้ำจากบ่อปลาไปยังถึงตกตะกอน จะ

ประกอบไปด้วย 2 ส่วน

1. ท่อกาลักที่สัมผัสกับน้ำในบ่อปลา

2. ท่อกาลักที่สัมผัสกับน้ำในถังตกตะกอน

- พื้นที่ของท่อกาลักภายนอกที่สัมผัสกับน้ำในบ่อปลา

จะประกอบไปด้วยท่อพีวีซีขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว จะมีส่วนที่สัมผัสกับน้ำเป็นความยาว =

23.8 ซม.

r = ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อพีวีซีขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว

= 1.3 ซม.

h = ความยาวของท่อพีวีซีขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ที่สัมผัสกับน้ำในบ่อปลา

= 23.8 ซม.

จากสมการ

$$A = 2\pi rh$$

$$= 2 \times \frac{22}{7} \times 1.3 \times 23.8 \text{ ตร.ซม.}$$

$$= 194.48 \text{ ตร.ซม.}$$

- พื้นที่ของท่อกาลักที่สัมผัสกับน้ำในถังตกตะกอน

จะประกอบไปด้วยท่อพีวีซีขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว จะมีส่วนที่สัมผัสกับน้ำเป็นความยาว =

33.5 ซม. กับข้องอ 90° ขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว

- พื้นที่ท่อพีวีซีที่สัมผัสน้ำ

จากสมการ

$$A = 2\pi rh$$

$$\begin{aligned} r &= \text{ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อพีวีซีขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว} \\ &= 1.3 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h &= \text{ความยาวของท่อพีวีซีขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว ที่สัมผัสกับน้ำในบ่อปลา} \\ &= 33.5 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการ

$$A = 2\pi rh$$

$$\begin{aligned} &= 2 \times \frac{22}{7} \times 1.3 \times 33.5 \text{ ตร.ซม.} \\ &= 243.743 \text{ ตร.ซม.} \end{aligned}$$

- พื้นที่ของข้องอ 90° ที่สัมผัสน้ำ

จากสมการ

$$A = 2 \times 2\pi r_1 h + \pi r_2^2$$

$$r_1 = \text{ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกข้องอ } 90^\circ = 1.5 \text{ ซม.}$$

$$h = \text{ความยาวส่วนตรงข้องอ } 90^\circ \text{ ขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว} = 3.5 \text{ ซม.}$$

$$\begin{aligned} r_2 &= \text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของข้องอ } 90^\circ \text{ ขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว} \\ &= 3 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

แทนค่าลงในสมการ

$$\begin{aligned} A &= 2 \times 2 \times \frac{22}{7} \times 1.5 \times 3.5 + \frac{22}{7} \times (3)^2 \text{ ตร.ซม.} \\ &= 66 + 28.286 \text{ ตร.ซม.} \\ &= 94.286 \text{ ตร.ซม.} \end{aligned}$$

\therefore พื้นที่ของท่อกาลักน้ำภายนอกที่สัมผัสกับน้ำในถังตกตะกอน

$$= \text{พื้นที่ของท่อพีวีซีที่สัมผัสน้ำ} + \text{พื้นที่ของข้องอ } 90^\circ \text{ ที่สัมผัสน้ำ}$$

$$= 273.743 + 94.28 \text{ ตร.ซม.}$$

$$= 368.029 \text{ ตร.ซม.}$$

∴ พื้นที่ของท่อกาลักน้ำชุดที่หนึ่งที่สัมผัสกับน้ำจากบ่อปลาไปยังถังตกตะกอน

$$= \text{พื้นที่ของท่อกาลักน้ำภายนอกที่สัมผัสกับน้ำในบ่อปลา} + \text{พื้นที่ของท่อกาลักน้ำภายนอกที่สัมผัสกับน้ำในถังตกตะกอน}$$

$$= 194.48 + 368.029 \text{ ตร.ซม.}$$

$$= 562.509 \text{ ตร.ซม.}$$

- พื้นที่ของท่อกาลักน้ำชุดที่สองที่สัมผัสกับน้ำจากบ่อปลาไปยังถังตกตะกอน

- พื้นที่ของท่อกาลักน้ำชุดที่สองที่สัมผัสกับน้ำในบ่อปลา

จะประกอบไปด้วยท่อพีวีซีขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว จะมีส่วนที่สัมผัสกับน้ำเป็นความยาว =

28.5 ซม.

r = ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อพีวีซีขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว

$$= 1.3 \text{ ซม.}$$

h = ความยาวของท่อพีวีซีขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ที่สัมผัสกับน้ำในบ่อปลา

$$= 28.5 \text{ ซม.}$$

จากสมการ

$$A = 2\pi rh$$

$$= 2 \times \frac{22}{7} \times 1.3 \times 28.5 \text{ ตร.ซม.}$$

$$= 232.886 \text{ ตร.ซม.}$$

- พื้นที่ของท่อกาลักน้ำชุดที่สองที่สัมผัสกับน้ำในถังตกตะกอนจะเหมือนกับพื้นที่

ของกาลักน้ำชุดที่หนึ่งที่สัมผัสกับน้ำในถังตกตะกอน

∴ พื้นที่ของท่อกาลักน้ำชุดที่สองที่สัมผัสกับน้ำในถังตกตะกอน

$$= \text{พื้นที่ของกาลักน้ำชุดที่หนึ่งที่สัมผัสกับน้ำในถังตกตะกอน}$$

$$= 368.029 \quad \text{ตร.ชม.}$$

∴ พื้นที่ของท่อกาลักน้ำชุดที่สองที่สัมผัสกับน้ำจากบ่อปลาไปยังถังตกตะกอน

$$= \text{พื้นที่ของท่อกาลักน้ำภายนอกที่สัมผัสกับน้ำในบ่อปลา} + \text{พื้นที่ของท่อกาลักน้ำภายนอกที่สัมผัสกับน้ำในถังตกตะกอน}$$

$$= 232.886 + 368.029 \quad \text{ตร.ชม.}$$

$$= 600.915 \quad \text{ตร.ชม.}$$



1.4.2 พื้นที่ของท่อน้ำเข้าถึงปฏิกรณ์

พื้นที่ของท่อน้ำเข้าถึงปฏิกรณ์ = พื้นที่ภายในท่อน้ำเข้าที่สัมผัสกับน้ำ + พื้นที่ภายนอก
ท่อน้ำเข้าที่สัมผัสกับน้ำ

1.4.2.1 พื้นที่ภายในท่อน้ำเข้าที่สัมผัสกับน้ำ

พื้นที่ภายในท่อน้ำเข้าที่สัมผัสกับน้ำ = พื้นที่ภายในท่อพีวีซีขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว มีความยาว
เท่ากับ 279.7 ซม. + พื้นที่ภายในท่อพีวีซีขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว มีความยาว 7 ซม. + พื้นที่
ภายในของส่วนโค้งของ 90° ขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว จำนวน 3 ชุด + พื้นที่ภายในช่องว่างของ
สามทาง 90° ขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว , บอลวาล์ว ขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว จำนวน 2 ชุด
- พื้นที่ภายในท่อพีวีซีขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว

จากสมการ

$$A = 2\pi rh$$

$$\begin{aligned} r &= \text{ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อพีวีซีขนาด } \frac{1}{2} \text{ นิ้ว} \\ &= 0.9 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h &= \text{ความยาวของท่อพีวีซีขนาด } \frac{1}{2} \text{ นิ้ว} \\ &= 279.7 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

$$\therefore \text{พื้นที่ภายในท่อพีวีซีขนาด } \frac{1}{2} \text{ นิ้ว} = 2 \times \frac{22}{7} \times 0.9 \times 279.7 \text{ ตร.ซม.}$$

$$= 1582.303 \text{ ตร.ซม.}$$

- พื้นที่ภายในท่อพีวีซีขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว

จากสมการ

$$A = 2\pi rh$$

$$\begin{aligned} r &= \text{ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อพีวีซีขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว} \\ &= 1 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

$$h = \text{ความยาวของท่อพีวีซีขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว}$$

$$= 7 \text{ ซม.}$$

$$\therefore \text{พื้นที่ภายในท่อพีวีซีขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว} = 2 \times \frac{22}{7} \times 1 \times 7 \text{ ตร.ซม.}$$

$$= 44 \text{ ตร.ซม.}$$

- พื้นที่ภายในของส่วนโค้งของ 90° ขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว จำนวน 3 ชุด

จากสมการ

$$A = 4\pi r^2$$

$$r = \text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของส่วนโค้งของ } 90^\circ$$

$$= \text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อพีวีซีขนาด } \frac{1}{2} \text{ นิ้ว}$$

$$= 2.2 \text{ ซม.}$$

$$\therefore \text{พื้นที่ของส่วนโค้งของ } 90^\circ = \frac{3}{4} A$$

$$= \frac{3}{4} (4\pi r^2)$$

$$= 3\pi r^2$$

$$= 3 \times \frac{22}{7} \times (2.2)^2 \text{ ตร.ซม.}$$

$$= 45.634 \text{ ตร.ซม.}$$

- พื้นที่ภายในของช่องว่างของสามทาง 90° ขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว, บอลวาล์ว ขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว จำนวน 2 ชุด

จากสมการ

$$A = 2\pi r_1 h_1 + 2\pi r_2 h_2$$

$$r_1 = \text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของสามทาง}$$

$$= \text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อพีวีซีขนาด } \frac{1}{2} \text{ นิ้ว}$$

$$= 1.1 \text{ ซม.}$$

$$h_1 = \text{ความยาวช่องว่างภายในของสามทาง } 90^\circ$$

$$= 2.6 \text{ ซม.}$$

$$\begin{aligned} r_2 &= \text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายในช่องว่างของบอลวาล์ว} \\ &= 0.75 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_2 &= \text{ความยาวช่องว่างภายในของสามทาง } 90^\circ \\ &= 1.8 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

∴ พื้นที่ภายในช่องว่างของสามทาง 90° กับ บอลวาล์ว

$$\begin{aligned} &= 2\pi r_1 h_1 + 2 \times 2\pi r_2 h_2 \\ &= 2 \times \frac{22}{7} \times 1.1 \times 2.6 + 2 \times 2 \times \frac{22}{7} \times 0.75 \times 1.8 \text{ ตร.ซม.} \\ &= 34.949 \text{ ตร.ซม.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{พื้นที่ภายในท่อน้ำเข้าที่สัมผัสกับน้ำ} &= 1582.303 + 44 + 45.634 + 34.949 \text{ ตร.ซม.} \\ &= 1706.886 \text{ ตร.ซม.} \end{aligned}$$

1.4.2.2 พื้นที่ภายนอกท่อน้ำเข้าที่สัมผัสกับน้ำ

พื้นที่ภายนอกท่อน้ำเข้าที่สัมผัสกับน้ำ = พื้นที่ภายนอกท่อพีวีซีขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว มีความ

ยาว เท่ากับ 74.648 ซม. + พื้นที่ผิวของปั้มน้ำ รุ่น SP-6000 + พื้นที่ภายนอกข้อต่อ

เกลียวนอก ขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว + พื้นที่ภายนอกข้อลดจาก $\frac{3}{4}$ นิ้ว ไป $\frac{1}{2}$ นิ้ว

- พื้นที่ภายนอกท่อพีวีซีขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว

จากสมการ

$$A = 2\pi rh$$

$$r = \text{ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อพีวีซีขนาด } \frac{1}{2} \text{ นิ้ว}$$

$$= 1.1 \text{ ซม.}$$

$$h = \text{ความยาวของท่อพีวีซีขนาด } \frac{1}{2} \text{ นิ้ว}$$

$$= 74.648 \text{ ซม.}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{พื้นที่ภายนอกท่อพีวีซีขนาด } \frac{1}{2} \text{ นิ้ว} &= 2 \times \frac{22}{7} \times 1.1 \times 74.648 \text{ ตร.ซม.} \\ &= 516.138 \text{ ตร.ซม.} \end{aligned}$$

- พื้นที่ผิวของปั้มน้ำ

$$\text{จากสมการ } \boxed{A = 2 \times W \times L + 2 \times W \times H + 2 \times L \times H}$$

$$\begin{aligned} W &= \text{ความกว้างของปั้มน้ำ} \\ &= 13 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L &= \text{ความยาวของปั้มน้ำ} \\ &= 16 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H &= \text{ความสูงของปั้มน้ำ} \\ &= 15 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{พื้นที่ผิวของปั้มน้ำ} &= 2 \times 13 \times 16 + 2 \times 13 \times 15 + 2 \times 16 \times 15 \\ &= 1286 \text{ ตรซม} \end{aligned}$$

- พื้นที่ภายนอกข้อต่อเกลียวนอก ขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว

$$\text{จากสมการ } \boxed{A = 2\pi r h}$$

$$r = \text{ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของข้อต่อเกลียวนอก}$$

$$\begin{aligned} &\text{ขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว} \\ &= 1.59 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h &= \text{ความยาวของข้อต่อเกลียวนอกขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว} \\ &= 3.5 \text{ ซม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{พื้นที่ภายนอกข้อต่อเกลียวนอก} &= 2 \times \frac{22}{7} \times 1.59 \times 3.5 \text{ ตร.ซม.} \\ &= 34.98 \text{ ตร.ซม.} \end{aligned}$$

- พื้นที่ภายนอกขอลดจาก $\frac{3}{4}$ นิ้ว ไป $\frac{1}{2}$ นิ้ว

จากสมการ $A = 2\pi r_1 h_1 + 2\pi r_2 h_2$

$$\begin{aligned} r &= \text{ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขอลดขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว} \\ &= 1.59 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h &= \text{ความยาวของข้อต่อเกลียวขนาด } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว} \\ &= 3.5 \text{ ซม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r &= \text{ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขอลดขนาด } \frac{1}{2} \text{ นิ้ว} \\ &= 1.388 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h &= \text{ความยาวของข้อต่อเกลียวขนาด } \frac{1}{2} \text{ นิ้ว} \\ &= 3 \text{ ซม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{พื้นที่ภายนอกขอลดจาก } \frac{3}{4} \text{ นิ้ว ไป } \frac{1}{2} \text{ นิ้ว} \\ &= 2 \times \frac{22}{7} \times 1.59 \times 3.5 + 2 \times \frac{22}{7} \times 1.388 \times 3 \text{ ตร.ซม} \\ &= 61.154 \text{ ตร.ซม.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{พื้นที่ภายนอกท่อน้ำเข้าที่สัมผัสกับน้ำ} &= 516.138 + 1286 + 34.98 + 61.154 \text{ ตร.ซม} \\ &= 1898.272 \text{ ตร.ซม} \end{aligned}$$

$$\therefore \text{พื้นที่ของท่อน้ำเข้าถึงปฏิกรณ์} = 1706.886 + 1898.272 = 3605.158 \text{ ตร.ซม.}$$

1.4.3 พื้นที่ของท่อน้ำออกจากถังปฏิกรณ์

$$= \text{พื้นที่ภายในท่อพีวีซีขนาด 1 นิ้วยาว 85 ซม.}$$

จากสมการ $A = 2\pi r h$

$$\begin{aligned} r &= \text{ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อพีวีซีขนาด 1 นิ้ว} \\ &= 1.25 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h &= \text{ความยาวของท่อพีวีซีขนาด 1 นิ้ว} \\ &= 85 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{พื้นที่ของท่อน้ำออกจากถังปฏิกรณ์} &= 2 \times \frac{22}{7} \times 1.25 \times 85 \text{ ตร.ซม.} \\ &= 667.857 \text{ ตร.ซม.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{พื้นที่ของท่อต่างๆ} &= \text{พื้นที่ของท่อกาลัดน้ำจากบ่อปลาไปยังถังตกตะกอน} + \text{พื้นที่ของท่อน้ำ} \\ &\quad \text{เข้าถังปฏิกรณ์} + \text{พื้นที่ของท่อน้ำออกจากถังปฏิกรณ์} \\ &= 2,400.008 + 3605.158 + 667.857 \text{ ตร.ซม.} \\ &= 6672.753 \text{ ตร.ซม.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สรุปได้ว่า พื้นที่ทั้งหมดของระบบตัวกลางจมตัว} &= \text{พื้นที่ของบ่อปลา} + \text{พื้นที่ของถังตกตะกอน} + \text{พื้นที่} \\ &\quad \text{ถังปฏิกรณ์} + \text{พื้นที่ของท่อต่างๆ} \\ &= 16,752.25 + 5,272.285 + 4,042.5 + 6,672.753 \text{ ตร.ซม.} \\ &= 32,739.788 \text{ ตร.ซม.} \end{aligned}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ฐานวัฒน์ กาญจนกุล เกิดเมื่อวันที่ 21 พฤศจิกายน พ.ศ.2533 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร ปัจจุบันอายุ 26 ปี จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนหอวังจังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2556 และเข้าศึกษา ต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

ผลงานที่ได้รับการเผยแพร่

(1) ฐานวัฒน์ กาญจนกุล, วิบูลย์ลักษณ์ พิงรัศมี, เพ็ญพิชา สท้านวัตร และสรวิศ เผ่าทองสุข 2559. จลนพลศาสตร์การบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันที่ผ่านการใช้งานระยะยาว. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย. 30 (กันยายน-ธันวาคม 2559) : 65-73