การพัฒนาถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน เพื่อบำบัดไนโตรเจนจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

นางสาวเพ็ญพิชญา พินิจธนภาคย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

DEVELOPMENT OF COMBINED NITRIFICATION – DENITRIFICATION REACTOR FOR NITROGEN TREATMENT FROM AQUACULTURE SYSTEMS

Miss Phenphitchaya Phinitthanaphak

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน เพื่อบำบัดไนโตรเจนจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
โดย	นางสาวเพ็ญพิชญา พินิจธนภาคย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.สรวิศ เผ่าทองศุข

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

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

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

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

เพ็ญพิชญา พินิจธนภาคย์ : การพัฒนาถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน เพื่อบำบัดไนโตรเจนจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. (DEVELOPMENT OF COMBINED NITRIFICATION – DENITRIFICATION REACTOR FOR NITROGEN TREATMENT FROM AQUACULTURE SYSTEMS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร.สรวิศ เผ่าทองศุข, 242 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดไนโตรเจนด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของวัสดุตัวกรองชีวภาพที่บรรจุภายในถังปฏิกรณ์เดียว เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด ตัวกรองชีวภาพที่ใช้ในกระบวนการบำบัดไนทริฟิเคชัน ได้แก่ วัสดุเส้นใยไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด (ขนาด 1-3 มม.) ส่วนวัสดุตัวกลางที่ใช้ในกระบวนการบำบัดดีไนทริฟิเคชัน คือ หินพัมมิสบด แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง การทดลองช่วงแรกเป็นการตรวจวัดอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ ผลการทดลองพบว่าไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงสุดเท่ากับ 42.4 ± 0.8 และ 640 ± 387 ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม.(ปริมาตรบรรจุ)/วัน ตามลำดับ โดยหินพัมมิสบดมีอัตราการบำบัดไนเทรตสูงสุดเท่ากับ 169.1 ± 8.8 ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม.(ปริมาตรบรรจุ)/วัน การทดลองช่วงที่ 2 เป็นการนำตัวกรองชีวภาพที่เหมาะสมจากการนำข้อมูลอัตราการบำบัดมาวิเคราะห์และคำนวณเพื่อบรรจุลงในถังปฏิกรณ์ใบเดียวกันที่มีขนาด 20 x 20 x 35 ซม. โดยบรรจุหินพัมมิสบดหนา 5 ซม. และไบโอคอร์ดความยาว 1 ม. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตระหว่างสภาวะที่ทำการเติมกับไม่เติมเมทานอลที่อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเข้าระบบเท่ากับ 5:1 ผลการทดลองพบว่ากระบวนการไนทริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะที่มีการปิดฝาถังปฏิกรณ์ด้วยพลาสติก มีการเปิดปั๊มเวียนน้ำ และมีออกซิเจนในน้ำเพียงพอ การเติมเมทานอลพร้อมแอมโมเนียมคลอไรด์ไม่มีผลยับยั้งกระบวนการไนทริฟิเคชัน ส่วนกระบวนการดีไนทริฟิเคชันสามารถเกิดต่อเนื่องได้ในสภาวะที่ทำการควบคุมออกซิเจนในน้ำให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปิดปั๊มเวียนน้ำแล้วทำการเติมเมทานอลลงไป นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มไบโอคอร์ดลงในถังปฏิกรณ์ไม่มีความจำเป็น เนื่องจากหินพัมมิสบดเพียงอย่างเดียวสามารถบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชัน และบำบัดไนเทรตต่อด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นการทดลองช่วงสุดท้ายเป็นการนำถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน ขนาด 100 ล. ที่สร้างขึ้นตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองช่วงที่ 1 และ 2 ไปใช้บำบัดน้ำเสียจริงที่เกิดขึ้นจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด โดยนำมาเชื่อมต่อกับถังเลี้ยงปลานิลขนาด 100 ล. ที่มีการแยกตะกอนออกจากระบบด้วยการกรองผ่านใยกรองน้ำตลอดเวลา ทำการเดินระบบต่อเนื่องเป็นเวลา 4 เดือน ผลการทดลองพบว่าถังปฏิกรณ์ที่บรรจุหินพัมมิสบดเพียงอย่างเดียวสามารถควบคุมแอมโมเนียและไนไทรต์ให้มีปริมาณต่ำกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. และควบคุมไนเทรตให้มีปริมาณต่ำกว่า 50 มก.ไนโตรเจน/ล.ได้ ในขณะที่ไนเทรตของชุดควบคุมเพิ่มสูงขึ้นถึง 352.47 ± 9.67 มก.ไนโตรเจน/ล.

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2556 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

5370312021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : NITROGEN TREATMENT / AQUACULTURE SYSYEMS / NITRIFICATION / DENITRIFICATION

PHENPHITCHAYA PHINITTHANAPHAK : DEVELOPMENT OF COMBINED NITRIFICATION – DENITRIFICATION REACTOR FOR NITROGEN TREATMENT FROM AQUACULTURE SYSTEMS. ADVISOR : ASST. PROF. WIBOONLUK PUNGRASMI, Ph.D., CO-ADVISOR : SORAWIT POWTONGSOOK, Ph.D., 242 pp.

This study investigated the nitrogen removal efficiency of a combined nitrification - denitrification reactor from recirculating aquaculture systems. The fibrous polymer Biocord™ and pumice stones (1-3 mm in size) were used as the biofilter media. The study consisted of 3 experiments. The first experiment was an evaluation of nitrification and denitrification rates of the biofilter media. The results showed that Biocord™ and pumice stone had the maximum ammonia removal rate of 42.4 ± 0.8 and 640 ± 387 g-N/m^3(packing volume)/day, respectively, and the maximum nitrate removal rate of pumice stone was 169.1 ± 8.8 g-N/m^3(packing volume)/day. Thereafter, the second experiment was performed using the integrated packing of Biocord™ and pumice stone in a single reactor for nitrogen removal. The combined nitrification - denitrification reactor was a 20 x 20 x 35 cm glass tank. The pumice stone was packed as a layer of 5 cm height at a bottom of the reactor together with 1 meter length of Biocord™. The ammonia and nitrate removal efficiencies were evaluated after an addition of ammonium chloride with or without methanol as the carbon source at the COD:Nitrate-N of 5:1. It was found that nitrification process could occurred although the reactor was covered with plastic sheet. The small circulating pump was sufficient to maintain dissolved oxygen concentration within the desire level for nitrification. Addition of methanol with ammonium chloride had no inhibition effect to the nitrification process. On the other hand, denitrification was found only with limited dissolved oxygen after turned off an internal circulating pump with an addition of methanol. Biocord™, however, was not necessary for nitrification treatment since the performance of nitrification process in pumice stone layer was sufficient for ammonia treatment. Finally, in the last experiment, the nitrification-denitrification reactor was set up and used for the real nitrogen waste treatment from the recirculating fish culture system. The 100 L combined nitrification - denitrification reactor with the optimal operating condition from previous experiments was attached to the 100 L Tilapia fish tank for nitrogen waste treatment. Recirculating fish culture system was operated for 4 months. It was found that nitrogen treatment tank containing pumice stone could maintain ammonia and nitrite concentration at below 1 mg-N/L throughout the experiment period. The treatment tank with combined nitrification - denitrification reactor prevented nitrate accumulation and kept nitrate concentration below 50 mg-N/L while nitrate in control tank was as high as 352.47 ± 9.67 mg-N/L.

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

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

Academic Year : 2013 Co-advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร.สรวิศ เผ่าทองศุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้คำปรึกษา ถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ คอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ แนะแนวทางหลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย รวมทั้งตรวจทานและแก้ไขจนวิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจพร สุวรรณศิลป์ กรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑล แก่นมณี กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้กรุณาชี้แนะ ตรวจทาน และแก้ไขจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี นอกจากนี้ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน มอบความรู้ที่เป็นประโยชน์ ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่สำหรับทำวิจัย ตลอดจนให้ความกรุณาสำหรับเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี รวมทั้งคำแนะนำในการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ด้านต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณปวีณา ตปนียวรวงศ์ คุณเอกชัย มาลาพล คุณเสรี ดอนเหนือ ณ ห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล และพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทุกคน ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือในระหว่างการทำงานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุนสนับสนุนบางส่วนของโครงการในแผนพัฒนาวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (รหัสโครงการ CU56–FW14) ทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2556 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ทุนสนับสนุนเพิ่มเติมจากโครงการส่งเสริมการวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (รหัสโครงการ FW1017A) ที่ได้สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำวิจัย ตลอดจนจัดซื้อเครื่องมือและครุภัณฑ์ต่างๆ ที่จำเป็น และขอขอบคุณการสนับสนุนเครื่องมือ Microplate Spectrophotometer จากโครงการ Thai Government Stimulus Package 2 (TKK2555) จนทำให้งานวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้อง ที่คอยให้ความสนับสนุนในทุกๆ ด้าน ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และให้คำปรึกษาจนทำให้การทำวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูป ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 ระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 5

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพน้ำในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 8

2.3 มาตรฐานน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด 13

2.4 การบำบัดไนโตรเจนทางชีวภาพ 14

2.5 ปัจจัยที่มีผลในการทำให้เกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันร่วมกับดีไนทริฟิเคชัน 22

2.6 ระบบบำบัดไนโตรเจนและการหมุนเวียนน้ำระบบปิดเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 23

2.7 ปลานิล 26

2.8 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 29

บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย 39

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี 39

3.2 แผนการทดลอง 43

3.3 การดำเนินงานวิจัย 48

3.3.1 การเตรียมวัสดุตัวกลางก่อนนำมาใช้ในการทดลอง 48

หน้า

3.3.2 การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาและตรวจวัดอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ 48
3.3.3 การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์เดียว 59
3.3.4 การทดลองช่วงที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 66

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 80
4.1 อัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ 80
4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์เดียว 104
4.3 ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 118

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 155
5.1 สรุปผลการทดลอง 155
5.2 ข้อเสนอแนะ 157

รายการอ้างอิง 159

ภาคผนวก 168
ภาคผนวก ก 169
ภาคผนวก ข 177
ภาคผนวก ค 190
ภาคผนวก ง 210

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 242

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่มีผลกระทบต่อปลา	8
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับการเจริญเติบโตของปลา	9
2.3	มาตรฐานน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดประเภทต่างๆ	14
2.4	สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน	23
3.1	พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในระหว่างการศึกษาอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด	53
3.2	ตัวแปรในการศึกษาอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด	54
3.3	พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในการศึกษาอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบด	57
3.4	ตัวแปรในการศึกษาอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบด	58
3.5	สารอาหารและแร่ธาตุเพิ่มเติมที่ใส่ลงในน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย	60
3.6	พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน	64
3.7	ตัวแปรในการศึกษาการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์เดียว	65
3.8	ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	67
3.9	พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	74
3.10	พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (ต่อ)	75

ตารางที่ หน้า

3.11 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (ต่อ) 76
3.12 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (ต่อ) 77
4.1 เปรียบเทียบอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพชนิดต่างๆ 88
4.2 คุณภาพน้ำในระหว่างการศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดในถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน 90
4.3 เปรียบเทียบอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพชนิดต่างๆ 95
4.4 ปริมาณซีโอดีคงเหลือภายหลังสิ้นสุดการบำบัดไนเทรตก่อนทำการถ่ายน้ำออกและเปลี่ยนน้ำใหม่ 100
4.5 สรุปอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเฉลี่ยสูงสุดของตัวกรองชีวภาพ 102
4.6 ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตในน้ำเสียสังเคราะห์ของการทดลอง 4 ชุดที่ทำการบรรจุตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์เดียวกัน 109
4.7 การเจริญเติบโตของปลานิลชุดควบคุม-1 (ถังเลี้ยงปลานิล ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์) ในการศึกษาประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 147
4.8 การเจริญเติบโตของปลานิลชุดควบคุม-2 (ถังเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน) ในการศึกษาประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 148
4.9 การเจริญเติบโตของปลานิลชุดทดลอง (ถังเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน) ในการศึกษาประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 149
4.10 อัตราการเจริญเติบโตของปลานิล 150

ตารางที่ หน้า

4.11 ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนของตะกอนในน้ำและในตัวปลานิล เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHNS/O ANALYZER 152

4.12 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบและเมื่อสิ้นสุดการทดลองในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 153

4.13 เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนจากตะกอนในถังเลี้ยงปลานิลในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 154

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการบำบัดไนโตรเจนทางชีวภาพ	15
2.2	ลักษณะของไบโอคอร์ด	24
2.3	ลักษณะของหินพัมมิส	25
2.4	ลักษณะของปลานิล	26
3.1	แผนผังแนวทางในการดำเนินงานวิจัย	43
3.2	แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 1	45
3.3	แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 2	46
3.4	แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 3	47
3.5	วัสดุตัวกลาง 2 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง	48
3.6	ถังเตรียมและปรับสภาพตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันในการศึกษาอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด	50
3.7	ชุดการทดลองประเมินประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันในการศึกษาอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด	51
3.8	การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันในการศึกษาอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด	52
3.9	การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันในการศึกษาอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบด	56
3.10	การติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน	62
3.11	ชุดการทดลองบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์เดียว	63
3.12	ถังปรับสภาพตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน (ก) และชุดการทดลองประเมินประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน (ข)	69
3.13	การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับ (ก) ถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน (เปิดฝา) (ข) ถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน (คลุมด้วยผ้าพลาสติก)	69
3.14	การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับถังเลี้ยงปลานิล	70
3.15	การเชื่อมต่อถังปฏิกรณ์เข้ากับถังเลี้ยงปลานิล	72

รูปที่		หน้า
3.16	ภาพถ่ายของระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด	72
3.17	การตรวจวัดอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	78
3.18	การตรวจวัดการเจริญเติบโตของปลานิลด้วยการชั่งน้ำหนักและวัดความยาว	79
4.1	ปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในระหว่างการเตรียมและปรับสภาพตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดด้วยแอมโมเนียมคลอไรด์และอาหารกบบดละเอียด	81
4.2	ปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตในการทดสอบประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน	83
4.3	ปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตในระหว่างการตรวจวัดอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด	86
4.4	ปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตในระหว่างการตรวจวัดอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบด	93
4.5	ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิในระหว่างการตรวจวัดอัตราการบำบัดดีไนทรฟิเคชันของหินพัมมิสบด โดยทำการเติมเมทานอลที่อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1	97
4.6	ค่าศักย์ออกซิเดชัน – รีดักชัน (โออาร์พี) ในระหว่างการตรวจวัดอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบด โดยทำการเติมเมทานอลที่อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1	99
4.7	ปริมาณซีโอดีในระหว่างการทดลองการตรวจวัดอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบด โดยทำการเติมเมทานอลที่อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1	100
4.8	แผนภาพแสดงการคำนวณความยาวของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่จะบรรจุลงในถังปฏิกรณ์เดียวกับหินพัมมิสบดหนา 5 ซม. ซึ่งในการทดลองจริงใช้ไบโอคอร์ดความยาวจาก 30 ซม. เพิ่มเป็น 1 ม. เพื่อให้การบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตมีประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกัน	103

รูปที่ หน้า

4.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์เดียว 108
4.10 อัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพที่บรรจุลงในถังปฏิกรณ์เดียวกัน (คิดเทียบกับปริมาตรน้ำในถังปฏิกรณ์) ของการทดลอง 4 ชุด 110
4.11 ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิที่ทำการตรวจวัดในการทดลองช่วงที่ 2 113
4.12 ค่าศักย์ออกซิเดชัน–รีดักชันที่บริเวณชั้นน้ำและชั้นหินพัมมิสลึก 2.5 ซม. ที่ทำการตรวจวัดในการทดลองช่วงที่ 2 115
4.13 ปริมาณซีโอดีที่ทำการตรวจวัดเมื่อมีการเติมเมทานอลในการทดลองช่วงที่ 2 116
4.14 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตของหินพัมมิสบดในระหว่างการเตรียมและปรับสภาพไนทริฟิเคชันก่อนใช้งานเพื่อบรรจุลงในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 119
4.15 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของน้ำในถังเลี้ยงปลานิลของชุดการทดลอง 3 ชุด 121
4.16 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของน้ำในถังปฏิกรณ์ของชุดการทดลอง 2 ชุด 122
4.17 ปริมาณตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิลที่ทำการตรวจวัดในระหว่างการศึกษาประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 131
4.18 ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิที่ทำการตรวจวัดในระหว่างการศึกษาประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 134

รูปที่ หน้า

4.19 ค่าศักย์ออกซิเดชัน – รีดักชันในถังปฏิกรณ์ของชุดควบคุม-2 (ถังเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน) และชุดทดลอง (ถังเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน) ในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 136

4.20 ปริมาณซีโอดีในน้ำที่ทำการตรวจวัดในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 138

4.21 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของหินพัมมิสบดและตะกอนแขวนลอยในการศึกษาประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 142

4.22 อัตราการลดลงของแอมโมเนีย(คิดเทียบกับปริมาตรน้ำ)ของตะกอนชีวภาพในถังเลี้ยงปลานิลของชุดควบคุม-1 และของหินพัมมิสบดที่บรรจุลงในถังปฏิกรณ์เมื่อเริ่มต้นการทดลองกับสิ้นสุดการทดลองของชุดควบคุม-2 และชุดทดลองในการศึกษาประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 143

4.23 อัตราการลดลงของไนเทรต (คิดเทียบกับปริมาตรน้ำ) ของหินพัมมิสบดที่บรรจุในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในชุดทดลอง ในการศึกษาประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 143

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นอาชีพที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนกลายเป็นอุตสาหกรรม เพื่อตอบสนองต่อความต้องการบริโภคอาหารประเภทโปรตีนของประชากรที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมักส่งผลกระทบต่อปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการจัดการเกี่ยวกับการควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยง ในปัจจุบันรูปแบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเริ่มมีการพัฒนาเข้าสู่การเลี้ยงในระดับความหนาแน่นสูงในบ่อไร้ดินภายในโรงเรือน ที่เป็นระบบการจัดการแบบปิดที่มีการผนวกกระบวนการบำบัดด้วยวิธีการย่อยสลายทางชีวภาพเข้ากับบ่อเลี้ยง และมีการหมุนเวียนเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ แต่การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในรูปแบบนี้มักประสบปัญหาการสะสมของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนรูปต่างๆ ในระดับความเข้มข้นสูง ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำในระดับที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมักจะทำการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำผ่านกระบวนการทางชีวภาพ 2 ขั้นตอน ได้แก่ ไนทริฟิเคชัน (Nitrification) และดีไนทริฟิเคชัน (Denitrification) ซึ่งนิยมทำการบำบัดด้วยการใช้ตัวกรองชีวภาพและมักถูกออกแบบให้เป็นระบบบำบัดแบบแยกส่วน กล่าวคือ เมื่อเลี้ยงสัตว์น้ำไปเป็นระยะเวลาหนึ่งจะเกิดการสะสมของแอมโมเนียความเข้มข้นสูงขึ้นภายในบ่อเพาะเลี้ยง ซึ่งเกิดจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำและการย่อยสลายโปรตีนในอาหารสัตว์น้ำที่เหลือจากการบริโภค จึงจำเป็นต้องมีการถ่ายน้ำจากบ่อเลี้ยงเข้าสู่บ่อบำบัดไนทริฟิเคชันเพื่อเปลี่ยนแอมโมเนียที่มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำให้อยู่ในรูปของไนเทรตซึ่งมีความเป็นพิษน้อยกว่า แต่เมื่อมีการสะสมของไนเทรตในน้ำจนมีระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้นก็ทำให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำได้เช่นกัน จึงต้องมีกระบวนการต่อเนื่องเพื่อบำบัดไนเทรตและเปลี่ยนรูปให้เป็นก๊าซไนโตรเจนภายในบ่อบำบัดดีไนทริฟิเคชัน จากนั้นจึงหมุนเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่ในบ่อเพาะเลี้ยง จะเห็นได้ว่าการบำบัดไนโตรเจนด้วยแนวทางดังกล่าวสามารถใช้ควบคุมคุณภาพน้ำภายในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้เป็นอย่างดี ช่วยลดความต้องการในการเปลี่ยนถ่ายน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำลงได้มาก และยังช่วยลดปริมาณการปล่อยน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ อย่างไรก็ตามยังมีขั้นตอนที่ค่อนข้างยุ่งยาก โดยต้องทำการ

เปลี่ยนถ่ายน้ำจากบ่อเพาะเลี้ยงไปยังบ่อบำบัดถึง 2 บ่อ ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน เสียเวลา ต้องกันพื้นที่ให้เพียงพอเพื่อติดตั้งบ่อบำบัด รวมทั้งปัญหาในเรื่องราคาค่าก่อสร้าง การลงทุนด้านวัสดุอุปกรณ์ที่สูง มีความซับซ้อนในการใช้งาน จึงทำให้ยังไม่มีการนำมาใช้งานเชิงพาณิชย์มากนัก

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาถังบำบัดที่มีการเกิดปฏิกิริยาร่วมกันระหว่างกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์เดียว โดยทำการศึกษาอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเพื่อให้ได้ตัวกรองชีวภาพที่เหมาะสมจะใช้บรรจุในถังปฏิกรณ์ และศึกษาประสิทธิภาพและหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนโตรเจนด้วยปฏิกิริยาร่วมไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีความสมดุลกันภายในถังปฏิกรณ์เดียว รวมทั้งทดลองนำถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำเสียจริงที่เกิดจากระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด ซึ่งการใช้ถังบำบัดใบเดียวนี้จะทำให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในฟาร์มเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไป สามารถดำเนินการได้ง่าย เนื่องจากสามารถใช้งานกับบ่อที่มีอยู่แล้วได้โดยไม่ต้องมีการต่อเติมหรือต้องการการดัดแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทำให้ช่วยลดขั้นตอนในการบำบัดที่ยุ่งยาก ประหยัดพื้นที่ในการดำเนินงาน ราคาถูก มีประสิทธิภาพ รวมทั้งไม่ต้องสิ้นเปลืองพลังงานในการเคลื่อนมวลน้ำด้วยเครื่องสูบน้ำไปยังส่วนบำบัดต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุตัวกลางที่เหมาะสมเพื่อบรรจุลงในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไนโตรเจนด้วยปฏิกิริยาร่วมไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีความสมดุลกันภายในถังปฏิกรณ์เดียว

1.2.3 เพื่อประเมินประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนที่เกิดขึ้นจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการในระดับทดลอง ที่อุณหภูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีการกำหนดขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1.3.1 ตัวกรองชีวภาพที่ใช้ในกระบวนการบำบัดไนทริฟิเคชัน ได้แก่ ไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 1-3 มม.

1.3.2 วัสดุตัวกลางที่ใช้ในกระบวนการบำบัดดีไนทริฟิเคชัน คือ หินพัมมิสบดที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 1-3 มม.

1.3.3 ถังปฏิกรณ์ที่มีการบรรจุหินพัมมิสบดทุกการทดลองจะทำการบรรจุเป็นชั้นหนา 5 ซม.

1.3.4 สารอินทรีย์คาร์บอนที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน คือ เมทานอล โดยคงที่ค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนของสารอินทรีย์คาร์บอนเข้าระบบเท่ากับ 5:1

1.3.5 การทดลองช่วงที่ 1 และ 2 ดำเนินการโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากแอมโมเนียมคลอไรด์และโพแทสเซียมไนเทรตสำหรับเป็นแหล่งแอมโมเนียและไนเทรตตามลำดับ ส่วนการทดลองช่วงที่ 3 ดำเนินการด้วยน้ำเสียจริงที่เกิดขึ้นจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในสภาวะที่จำลองการเลี้ยงเหมือนจริงด้วยระบบปิดในโรงเรือน

1.3.6 สัตว์น้ำที่ใช้ในการทดลองคือ ปลานิล (*Oreochromis niloticus* Linnaeus) โดยทำการเพาะเลี้ยงภายใต้สภาวะจำลองของระบบบ่อไร้ดินในโรงเรือน ภายในถังพลาสติกขนาด 100 ล. ที่อัตราความหนาแน่นเริ่มต้นประมาณ 1.2 กก./ลบ.ม.ของปริมาณน้ำจืดในถังเลี้ยงสัตว์น้ำ (ไม่รวมน้ำในถังปฏิกรณ์) ด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีขายตามท้องตลาด (โปรตีนไม่น้อยกว่าร้อยละ 30)

1.3.7 ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต พีเอช อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ค่าซีโอดี และค่าสภาพด่าง ฯลฯ ตามวิธีมาตรฐานที่ระบุใน Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, และ WPCF, 2005) โดยในทุกการทดลองไม่มีการตรวจวัดปริมาณไนโตรเจนในรูปของก๊าซไนโตรเจน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เป็นแนวทางเลือกในการบำบัดไนโตรเจนจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยถังปฏิกรณ์ใบเดียวที่มีการเกิดปฏิกิริยาร่วมกันระหว่างไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันที่สามารถดำเนินการได้ง่าย มีประสิทธิภาพ ประหยัดพื้นที่ และราคาถูก

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวอย่างกว้างขวางทั่วโลก เนื่องจากปริมาณสัตว์น้ำจากธรรมชาติไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการบริโภคของประชากรที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วได้ การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในแต่ละประเทศจะมีลักษณะการเพาะเลี้ยงที่แตกต่างกันตามภูมิประเทศและภูมิอากาศที่เหมาะสม ซึ่งการเลี้ยงสัตว์น้ำในประเทศไทยมีการพัฒนารูปแบบของระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้สัตว์น้ำที่มีคุณภาพ เจริญเติบโตรวดเร็ว และให้ผลผลิตในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการบริโภคภายในประเทศและการส่งออกต่างประเทศ (สุบัณฑิต นิ่มรัตน์ และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย, 2552) โดยรูปแบบของระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ดำเนินการมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 ระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเมื่อจำแนกตามการจัดการคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงสามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่

2.1.1.1 ระบบเปิด (Open systems) หรืออาจเรียกชื่ออื่นได้ว่า Open water system หรือ Flow-through system เป็นรูปแบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบดั้งเดิม กล่าวคือเป็นระบบที่มีการผันน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติมาใช้โดยตรง และมีการถ่ายน้ำที่ผ่านการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแล้วทิ้งออกนอกระบบเพาะเลี้ยงหรือทิ้งออกจากฟาร์มลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยไม่มีการนำน้ำนั้นกลับมาใช้ใหม่ การเปลี่ยนถ่ายน้ำจะดำเนินการในระยะเวลาสั้นๆ เพื่อควบคุมคุณภาพของน้ำภายในบ่อให้มีคุณภาพที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ แต่เนื่องจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในรูปแบบระบบเปิดนี้มีการใช้น้ำปริมาณมากจากแหล่งน้ำภายนอก จึงทำให้มีโอกาสเกิดปัญหาการขาดแคลนน้ำได้ รวมทั้งยังก่อให้เกิดปัญหาการระบาดของโรคสัตว์น้ำที่เกิดจากการเปลี่ยนถ่ายน้ำและน้ำที่ทิ้งออกจากบ่อเพาะเลี้ยงยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำบริเวณใกล้เคียง จึงนำมาซึ่งการเปลี่ยนแปลงของระบบนิเวศน์ในแหล่งน้ำ (มนวิกานต์ ขจรบุญ, 2551; วันพระ นาคฤทธิ์, 2553; สุบัณฑิต นิ่มรัตน์ และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย, 2552; Hart และ O'sullivan, 1993)

2.1.1.2 ระบบกึ่งเปิด (Semi-open systems) เป็นรูปแบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ลดปริมาณการเปลี่ยนถ่ายน้ำลงหรือมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำในบางช่วงเวลา การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบนี้มีการควบคุมคุณภาพน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยเมื่อคุณภาพน้ำภายนอกไม่เหมาะสมก็สามารถที่จะทำการปิดระบบได้ นอกจากนี้ในระหว่างดำเนินการยังมีการเอาใจใส่ในทุกขั้นตอนของการเพาะเลี้ยง ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของอาหารที่ใช้เลี้ยงสัตว์น้ำ คุณภาพของน้ำในบ่อเลี้ยง ความสะอาด และอื่นๆ ซึ่งเมื่อพิจารณาในแง่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมพบว่าการเพาะเลี้ยงแบบระบบกึ่งเปิดจะส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าระบบเปิด เนื่องจากมีความถี่ในการเปลี่ยนถ่ายน้ำน้อยกว่า (มนวิกานต์ ขจรบุญ, 2551; วันพระ นาคฤทธิ์, 2553; Hart และ O'sullivan, 1993)

2.1.1.3 ระบบปิด (Closed or recirculating systems) เป็นรูปแบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ มีเพียงการชดเชยน้ำบางส่วนที่เกิดจากการระเหย รั่วซึม หรือการนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ ระบบการเพาะเลี้ยงแบบนี้จะดำเนินการเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างหนาแน่นและอาศัยกระบวนการทางชีวเคมีและกายภาพเพื่อควบคุมและรักษาคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงให้เหมาะสม มีระบบการกรองเพื่อแยกตะกอนและสารแขวนลอยที่เกิดขึ้น โดยในส่วนการบำบัดคุณภาพน้ำจะอาศัยกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันผ่านกลไกการย่อยสลายของแบคทีเรีย ทำให้สามารถหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้เลี้ยงสัตว์น้ำใหม่ได้ การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในรูปแบบนี้ในปัจจุบันกำลังเป็นที่สนใจ เนื่องจากให้ผลผลิตที่ค่อนข้างสูง แต่มีข้อเสียคือต้นทุนในการเดินระบบสูง และการดูแลรักษาระบบทำได้ยาก โดยทั่วไปจึงนิยมแก้ปัญหาด้วยการแยกส่วนบำบัดต่างๆ ออกจากกันเป็นบ่อบำบัดแต่ละบ่อ ซึ่งจะทำให้การควบคุมดูแลระบบบำบัดดำเนินการได้ง่ายกว่า (มนวิกานต์ ขจรบุญ, 2551; วันพระ นาคฤทธิ์, 2553; สุบัณฑิต นิ่มรัตน์ และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย, 2552; Hart และ O'sullivan, 1993)

2.1.2 ระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเมื่อจำแนกตามลักษณะทางกายภาพของบ่อเลี้ยงสามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่

2.1.2.1 ระบบบ่อดินกลางแจ้ง (Outdoor earthen pond) เป็นรูปแบบบ่อที่สามารถดำเนินการได้ง่ายและมีต้นทุนในการบำบัดที่มีราคาถูก ของเสียที่ปล่อยออกมาจากสัตว์น้ำจะมีไม่มากและอาศัยกระบวนการบำบัดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ซึ่งกลไกการบำบัดจะเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันที่เกิดจากการใช้ก๊าซออกซิเจนที่

บริเวณผิวน้ำและจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายในช่วงเวลากลางวัน ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นสารอนินทรีย์ขนาดเล็ก เช่น แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ ไนเทรต และฟอสเฟต ซึ่งสาหร่ายจะนำสารอนินทรีย์เหล่านี้ไปใช้ในการเจริญเติบโต จากนั้นการบำบัดต่อเนื่องจะเกิดจากกระบวนการดีไนทริฟิเคชันที่บริเวณชั้นดินก้นบ่อในสภาวะไร้อากาศ เพื่อบำบัดไนเทรตและเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจน โดยหากปริมาณไนเทรตในน้ำมีไม่เพียงพอผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารอื่น เช่น ก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) กระบวนการชีวภาพเหล่านี้จะเกิดขึ้นหมุนเวียนเป็นวัฏจักร จึงทำให้การบำบัดแอมโมเนียเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง แต่ข้อจำกัดของระบบบ่อดินกลางแจ้งคือ ต้องใช้พื้นที่มากในการขุดบ่อ ไม่เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณแอมโมเนียและสารอินทรีย์สูง นอกจากนี้ความสามารถในการบำบัดของเสียในบ่อดินกลางแจ้งยังขึ้นกับอัตราการเติมก๊าซออกซิเจนคืนให้กับระบบโดยสาหร่าย รวมถึงประสิทธิภาพของไนทริฟายอิงและดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียในการเปลี่ยนแอมโมเนียให้อยู่ในรูปของไนเทรตและก๊าซไนโตรเจนตามลำดับ (กษิดิศ หนูทอง, 2551; ชลธิชา พลายชุม, 2553)

2.1.2.2 ระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง (Outdoor lining pond) เป็นรูปแบบบ่อดินกลางแจ้งที่ปูทับพื้นบ่อด้วยวัสดุสังเคราะห์ หรือเป็นบ่อกลางแจ้งที่สร้างจากวัสดุอื่นๆ โดยไม่มีดินภายในบ่อ เช่น บ่อซีเมนต์ ถังพลาสติก เป็นต้น (กษิดิศ หนูทอง, 2551) การที่บ่อได้รับแสงแดดจากธรรมชาติจึงทำให้มีแพลงก์ตอนพืชเกิดขึ้น ซึ่งแพลงก์ตอนพืชเหล่านี้มีข้อดีคือจะช่วยบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนที่เกิดขึ้นภายในบ่อผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันและดูดซึมเข้าสู่เซลล์ แต่การเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืชอย่างรวดเร็วและมีจำนวนมากนั้นจะกลับส่งผลเสียในเวลากลางคืน และเมื่อแพลงก์ตอนพืชตายจะเกิดการทับถมกันจนเกิดการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศและทำให้เกิดการเน่าเสียภายในบ่อ การดูแลรักษาสภาพบ่อจึงทำได้ยาก (ชลธิชา พลายชุม, 2553)

2.1.2.3 ระบบบ่อเลี้ยงภายในโรงเรือน (Indoor pond) เป็นการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำภายในบ่อที่ไม่มีดินและตั้งอยู่ภายในโรงเรือน เช่น บ่อซีเมนต์ ถังพลาสติก หรือบ่อดินที่มีการปูพื้นด้วยพลาสติก เป็นต้น โดยรูปแบบบ่อแบบนี้จะช่วยแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากระบบบ่อดินกลางแจ้งได้ เช่น ปัญหาสภาพดิน ปัญหาการปนเปื้อนของเชื้อโรคอันไม่พึงประสงค์จากดิน ปัญหาการรั่วซึมของน้ำในบ่อ ตลอดจนสามารถควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำภายในระบบได้ง่ายขึ้น ระบบนี้จะได้รับแสงแดดจากธรรมชาติน้อย และมักจะทำการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบปิดที่มีการบำบัดน้ำที่ใช้แล้วในบ่อเพาะเลี้ยงและหมุนเวียนนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ แต่ระบบนี้ยังมีปัญหาในเรื่องการสะสมของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนรูปต่างๆ ในระดับความเข้มข้นสูง ได้แก่ แอมโมเนีย

ไนไทรต์ และไนเทรต ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากระบบนิเวศน์ของจุลินทรีย์ภายในบ่อไม่เอื้ออำนวยต่อการบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (ชลธิชา พลายชุม, 2553)

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพน้ำในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

คุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงเป็นปัจจัยหลักที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ หากสัตว์น้ำได้อาศัยอยู่ในน้ำที่มีคุณภาพดีก็จะดำรงชีวิตได้เป็นปกติ มีการเจริญเติบโตที่ดี และมีสุขภาพแข็งแรง ดังนั้นเพื่อให้การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้ผลผลิตในปริมาณมากและมีคุณภาพที่ดี ผู้ดำเนินการควรคำนึงถึงการจัดการคุณภาพน้ำภายในบ่อเพาะเลี้ยงให้มีความเหมาะสม โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพน้ำในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีดังนี้

2.2.1 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen; DO)

ออกซิเจนละลายน้ำเป็นปัจจัยสำคัญมากในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เนื่องจากสัตว์น้ำต้องการออกซิเจนเพื่อการดำรงชีวิตและนำไปใช้ในกระบวนการต่างๆ ภายในร่างกาย ในกรณีที่บ่อเลี้ยงปลามีออกซิเจนละลายน้ำอยู่น้อยเป็นเวลานานๆ อาจทำให้ปลาติดเชื้อโรคจากแบคทีเรียได้ง่าย และในทางตรงกันข้ามปลาที่เลี้ยงอยู่ในน้ำที่มีออกซิเจนละลายน้ำสูงเกินระดับอิ่มตัวจะทำให้เกิดฟองก๊าซในเลือดได้จากการเคลื่อนตัวจากน้ำที่มีออกซิเจนสูงไปยังน้ำที่มีออกซิเจนต่ำ ทำให้เป็นอันตรายถึงตายได้ ดังนั้นในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงควรควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายน้ำไม่ให้ต่ำกว่า 5 มก./ล. (Timmons และคณะ, 2002) โดยผลของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่อปลาแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่มีผลกระทบต่อปลา

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ	ผลกระทบต่อปลา
น้อยกว่า 1 มก./ล.	อาจถึงตายถ้าเกิดขึ้นเป็นเวลานานหลายๆ ชั่วโมง
1 - 5 มก./ล.	ปลามีชีวิตอยู่ได้ แต่ถ้าเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องปลาจะเจริญเติบโตช้าและไม่สามารถขยายพันธุ์ได้ดี
อย่างน้อย 5 มก./ล. แต่ไม่เกินระดับอิ่มตัว	เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์

(ที่มา : มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2540)

2.2.2 พีเอช (pH)

พีเอชหรือค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำมีผลต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำและคุณภาพทางเคมีของน้ำ เช่น พีเอชที่สูงหรือต่ำเกินไปจะทำให้ปลาเกิดความเครียดหรืออาจเป็นอันตรายถึงตายได้ พีเอชที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดแอมโมเนียอิสระเพิ่มมากขึ้น พีเอชที่ลดต่ำลงจะทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรอยู่ระหว่าง 6-9 โดยความสัมพันธ์ของค่าพีเอชกับการเจริญเติบโตของปลา แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับการเจริญเติบโตของปลา

พีเอช	การเจริญเติบโตของปลา
ต่ำกว่า 4	ตาย
4 - 5	ไม่สืบพันธุ์
4 - 6	เติบโตช้า
6.5 - 9	เติบโตได้ดี
9 - 11	เติบโตช้า
9.5 - 11	ไม่สืบพันธุ์
สูงกว่า 11	ตาย

(ที่มา : มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2540)

2.2.3 อุณหภูมิ (Temperature)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำมีผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น การกินอาหาร การสืบพันธุ์ กระบวนการเมตาบอลิซึมภายในร่างกายของสัตว์น้ำ ความต้านทานโรค และการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับสัตว์น้ำจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและวัยของสัตว์น้ำ โดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า 1-2 °ซ ภายใน 24 ชั่วโมง จะทำให้สัตว์น้ำอ่อนแอและส่งผลให้ความต้านทานโรคลดลง เนื่องจากการที่อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจะทำให้อุณหภูมิของน้ำและอุณหภูมิของร่างกายสัตว์น้ำมีความแตกต่างกันจนไม่สามารถปรับตัวได้ทันอาจเป็นสาเหตุทำให้ปลาตายได้ นอกจากนี้อุณหภูมิของน้ำยังเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีของน้ำอีกด้วย เช่น

อุณหภูมิมีอิทธิพลกับการละลายของออกซิเจน เมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง เป็นต้น (วิรัช จิ๋วแหยม, 2544)

2.2.4 ค่าสภาพด่าง (Alkalinity)

ค่าสภาพด่าง หมายถึง ความสามารถของน้ำในการรับไฮโดรเจนอิออน (H^+) เพื่อทำให้กรดเป็นกลาง สารประกอบที่ทำให้เกิดค่าสภาพด่างมี 3 ชนิดคือ ไฮดรอกไซด์ (OH^-) คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2540) ค่าสภาพด่างช่วยเพิ่มความสามารถในการรักษาค่าพีเอชของน้ำไม่ให้เปลี่ยนแปลงมากเกินไป (Buffering capacity) ค่าสภาพด่างที่เหมาะสมสำหรับบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีค่าระหว่าง 20-150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. (วิรัช จิ๋วแหยม, 2544)

2.2.5 แอมโมเนีย (Ammonia)

แอมโมเนียในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการขับถ่ายและการย่อยสลายโปรตีนในอาหารที่เหลือจากการบริโภค โดยแอมโมเนียในน้ำอาจอยู่ในรูปของแอมโมเนียที่ไม่แตกตัวเป็นอิออน (Un - ionized ammonia; NH_3) ซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ หรือแอมโมเนียมอิออน (Ammonium ion; NH_4^+) ซึ่งไม่มีความเป็นพิษ โดยแอมโมเนียจะอยู่ในรูปใดนั้นขึ้นอยู่กับพีเอช อุณหภูมิ และปริมาณเกลือแร่ ซึ่งพีเอชจะมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีของแอมโมเนียในน้ำมากที่สุด กล่าวคือ เมื่อพีเอชหรืออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นจะทำให้แอมโมเนียมีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณเกลือแร่ในน้ำจะมีผลในทางตรงกันข้ามคือ ถ้ามีปริมาณเกลือแร่สูงขึ้น แอมโมเนียจะมีปริมาณน้อยลง โดยแอมโมเนียมีความเป็นพิษต่อปลาในทางอ้อมคือ หากปริมาณแอมโมเนียในน้ำเพิ่มขึ้น ปลาจะขับแอมโมเนียออกจากเลือดได้น้อยลง ทำให้มีแอมโมเนียในเลือดและในเนื้อเยื่อเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้พีเอชในเลือดมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนเกิดผลเสียต่อปฏิกิริยาชีวเคมีต่างๆ ทำให้มีความต้องการออกซิเจนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นอันตรายต่อเหงือกและลดความสามารถของเลือดในการขนถ่ายออกซิเจนอีกด้วย (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2540; Camargo และ Alonso, 2006) การสะสมของแอมโมเนียในน้ำเพียง 0.025 มก.ไนโตรเจน/ล. ก็สามารถส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของปลาได้ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2540; Chen และคณะ, 2006) แต่โดยทั่วไปในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรมีปริมาณแอมโมเนียเกิน 1 มก.ไนโตรเจน/ล.

2.2.6 ไนไทรต์ (Nitrite)

ไนไทรต์เป็นสารตัวกลางที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน มีความเป็นพิษมากกว่าไนเทรต ปลาที่ได้รับไนไทรต์จะมีเมทธิโมโกลบิน (Methemoglobin) ในเลือดสูง โดยสามารถเห็นเป็นสีน้ำตาล ซึ่งเกิดจากการที่เฟอร์รัสอิออน (Fe^{2+}) ซึ่งเป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) ในเลือดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกอิออน (Fe^{3+}) ทำให้ฮีโมโกลบินเปลี่ยนเป็นเมทธิโมโกลบิน จึงไม่สามารถลำเลียงออกซิเจนได้ และปลาอาจจะตายได้เนื่องจากไม่สามารถใช้ออกซิเจนได้ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2540; Camargo และ Alonso, 2006) โดยความเป็นพิษของไนไทรต์จะสูงขึ้นเมื่อปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและพีเอชลดลง แต่ความเป็นพิษของไนไทรต์ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถป้องกันได้ด้วยการควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วง 7.5-8.5 ทำการเติมอากาศอย่างเพียงพอ และทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำเป็นระยะ (ชลอ ลิ้มสุวรรณ และพรเลิศ จันทร์รัชชกูล, 2547) โดยระดับความเข้มข้นของไนไทรต์ที่จะเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำคือ ความเข้มข้นมากกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. (Timmons และคณะ, 2002)

2.2.7 ไนเทรต (Nitrate)

ไนเทรตมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำน้อยกว่าแอมโมเนียและไนไทรต์มาก จึงทำให้สะสมอยู่ในบ่อเลี้ยงได้ในระยะเวลานาน แต่การสะสมของไนเทรตในปริมาณที่สูงขึ้นก็ส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำได้เช่นกัน โดยความเข้มข้นของไนเทรตในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำควรควบคุมให้มีค่าไม่เกิน 50 มก.ไนโตรเจน/ล. หากสูงกว่านี้ควรมีการบำบัดหรือทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำในบ่อ (กษิดิศ หนูทอง, 2551) ความเป็นพิษของไนเทรตขึ้นอยู่กับชนิด ขนาด และอายุของสัตว์น้ำ (Camargo และคณะ, 2005) ผลกระทบของไนเทรตต่อสัตว์น้ำคือ ทำให้สัตว์น้ำบริโภคอาหารลดลง เจริญเติบโตช้า เกิดความเครียด อัตราการเจริญพันธุ์ลดลง และสัตว์น้ำอ่อนแอ จึงทำให้ความต้านทานโรคลดลงและอาจถึงตายได้ (Gutierrez-Wing และ Malone, 2006)

2.2.8 ฟอสฟอรัส (Phosphorus)

ฟอสฟอรัสมีความสำคัญต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เพราะเป็นสารอาหารที่กำหนดปริมาณผลผลิตของสัตว์น้ำที่เพาะเลี้ยงในบ่อ การขาดแคลนฟอสฟอรัสมีผลทำให้ได้ผลผลิตต่ำ ฟอสฟอรัสพบได้ในรูปสารละลายน้ำหรืออนุภาคแขวนลอยในบ่อปลา มีทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ สารอินทรีย์ฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้มักเกิดจากการเน่าเปื่อยของสิ่งมีชีวิต ส่วนสารอนินทรีย์ฟอสฟอรัสมักเป็นออร์โธฟอสเฟต ซึ่งออร์โธฟอสเฟตเป็นฟอสฟอรัสในรูปละลายน้ำที่เกิด

จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ฟอสเฟตโดยแบคทีเรีย ปริมาณออร์โธฟอสเฟตในน้ำในบ่อเลี้ยงปลาควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.5 มก/ล. (วัดในรูปของฟอสฟอรัส) (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2540)

2.2.9 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide; H_2S)

ถ้าบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอยู่ในสภาวะที่ขาดอากาศแบคทีเรียบางชนิดจะสามารถใช้ซัลเฟอร์ในรูปของซัลเฟตและสารประกอบซัลเฟอร์ตัวอื่นๆ เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน โดยสารประกอบเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของซัลไฟด์ ได้แก่ H_2S HS^- HS^{2-} และ S^{2-} ซึ่ง H_2S จะมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมากกว่าในรูปอื่นๆ และมีความเป็นพิษคล้ายกับการขาดออกซิเจน แต่จะมีความรุนแรงกว่า โดยไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเข้าไปขัดขวางการขนส่งออกซิเจนภายในเซลล์ จึงทำให้ปริมาณแลกเตท (Lactate) ในเลือดสูงขึ้น มีผลทำให้กระบวนการทางเมตาบอลิซึมถูกยับยั้ง (ทยากร สุวรรณรัตน์, 2552) ซึ่งปริมาณของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น พีเอช อุณหภูมิ และความเค็ม (วิรัช จิ๋วแหยม, 2544) นอกจากนี้แบคทีเรียยังสามารถออกซิไดส์ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้กลายเป็นกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ทำให้น้ำมีสภาวะเป็นกรด ดังนั้นเพื่อป้องกันอันตรายจากสภาวะดังกล่าว ในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรมีไฮโดรเจนซัลไฟด์มากกว่า 0.002 มก./ล. (สุบัณฑิต นิ่มรัตน์ และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย, 2552)

2.2.10 อนุภาคของแข็งแขวนลอย (Suspended solid)

อนุภาคของแข็งแขวนลอยเกิดจากการรวมตัวกันของอาหารที่เหลือตกค้างอยู่ในบ่อเลี้ยง ของเสียที่สัตว์น้ำขับถ่ายออกมา เซลล์ของจุลสาหร่าย และเซลล์แบคทีเรีย โดยทั่วไปการประมาณปริมาตรของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะคิดจากร้อยละ 25 ของปริมาณอาหารที่ให้ในระบบ (คิดจากน้ำหนักแห้ง) (ปกฉัตร ชูติวิศุทธิ์, 2552) การที่ในบ่อเลี้ยงปลามีอนุภาคของแข็งแขวนลอยในน้ำมากเกินไปอาจส่งผลต่อการหายใจของปลาได้ โดยอนุภาคดังกล่าวจะไปอุดตันที่เหงือก ทำให้ประสิทธิภาพการหายใจของปลาลดลงและส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโต การสร้างเซลล์สืบพันธุ์ และอัตราการฟักไข่ลดลง และเมื่ออนุภาคของแข็งแขวนลอยในปริมาณมากถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรีย จะทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง โดยปริมาณอนุภาคของแข็งแขวนลอยในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรควบคุมให้มีค่าต่ำกว่า 80 มก./ล. ด้วยกระบวนการแยกอนุภาคของแข็งแขวนลอย ซึ่งในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ มี 3 กระบวนการที่นิยมปฏิบัติ ได้แก่ การแยกโดยใช้แรงโน้มถ่วง (Gravity separation) การแยกด้วยการกรอง (Filtration) และการแยกด้วยกระบวนการลอยตัว (Floatation) (Timmons และคณะ, 2002)

2.3 มาตรฐานน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด (กรมควบคุมมลพิษ, 2554)

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดจะมีน้ำทิ้ง 2 ส่วน คือ ระหว่างการเลี้ยง และระหว่างการจับสัตว์น้ำ โดยน้ำทิ้งส่วนหลังจะมีตะกอนเลน ปริมาณสารอินทรีย์และของเสียที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำตามธรรมชาติที่รองรับน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ จึงควรมีการบำบัดหรือจัดการน้ำทิ้งก่อนระบายสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง การกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด และกำหนดให้บ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่จะต้องถูกควบคุมการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 125 ตอนพิเศษ 21ง ลงวันที่ 30 มกราคม 2551 ออกประกาศไว้ดังนี้

“บ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด” หมายความว่า พื้นที่ที่ปรับให้ขังน้ำได้ โดยวิธีการต่างๆ เพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำแต่ไม่รวมถึงบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง หรือบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำกร่อยที่มีประกาศของรัฐมนตรีกำหนดให้เป็นแหล่งกำเนิดมลพิษไว้แล้ว

“สัตว์น้ำ” หมายความว่า สัตว์น้ำจืดที่เพาะเลี้ยงในบ่อ เช่น ปลา กุ้ง หอย เต่า จระเข้

“พื้นที่บ่อ” หมายความว่า พื้นที่บ่อที่ใช้เลี้ยง และให้หมายความรวมถึงคู คลองส่งและระบายน้ำ

“น้ำทิ้ง” หมายความว่า น้ำที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแล้วจนเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งตามที่กำหนดไว้ในประกาศนี้ แสดงดังตารางที่ 2.3

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

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

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

เติมลงในบ่อเพาะเลี้ยงเพื่อปรับระดับค่าความเค็มของน้ำที่ใช้เพาะเลี้ยงให้เหมาะสมกับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชนิดนั้น ๆ

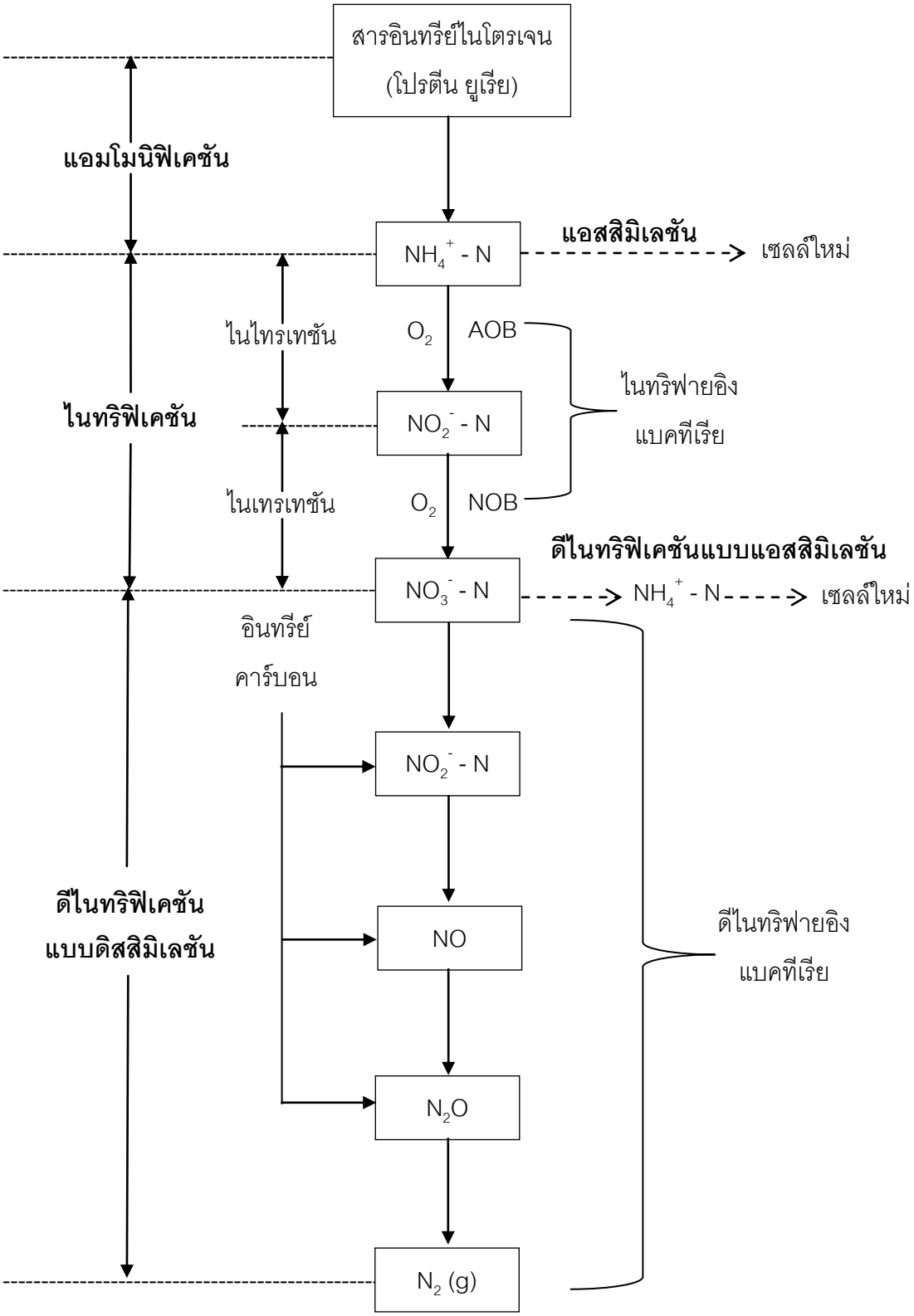
ตารางที่ 2.3 มาตรฐานน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดประเภทต่างๆ

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

การบังคับใช้จะใช้กับบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดทุกประเภทที่มีขนาดพื้นที่บ่อมากกว่าหรือเท่ากับ 10 ไร่ ยกเว้นบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดประเภท ค ที่มีพื้นที่ต่ำกว่า 10 ไร่ ให้ควบคุมเฉพาะค่าความเป็นกรดและด่าง และสภาพนำไฟฟ้า

2.4 การบำบัดไนโตรเจนทางชีวภาพ

การบำบัดไนโตรเจนทางชีวภาพจะอาศัยจุลินทรีย์สองกลุ่มในการบำบัด ได้แก่ กลุ่มแรกมีหน้าที่ในการออกซิไดซ์แอมโมเนียให้เป็นไนเทรต และกลุ่มที่สองจะทำหน้าที่เปลี่ยนไนเทรตให้อยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจน โดยขั้นตอนทั้งหมดที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.1



หมายเหตุ: ไนโตรเจนที่ลดลงเนื่องจากการเอาไปสร้างเซลล์ใหม่นั้นมีปริมาณน้อยมาก

รูปที่ 2.1 ขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการบำบัดไนโตรเจนทางชีวภาพ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

2.4.1 กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification)

กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน คือ กระบวนการที่เปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนไปอยู่ในรูปสารอนินทรีย์ และผลิตภัณฑ์ที่ได้คือแอมโมเนีย จุลินทรีย์ที่มีบทบาทในขั้นตอนนี้มีหลายชนิด ได้แก่ แบคทีเรีย แอคทิโนมัยซีทิส และรา ในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแอมโมเนียเกิดจากอาหารที่เหลือจากการบริโภคและเกิดจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำซึ่งอยู่ในรูปของโปรตีน โดยโปรตีนจะเปลี่ยนรูปเป็นกรดอะมิโน จากนั้นกรดอะมิโนจะถูกลดอะมีน (Deamination) เป็นแอมโมเนีย แอมโมเนียที่เกิดขึ้นนี้จะอยู่ในรูปแอมโมเนียมอิออน (NH_4^+) หรือแอมโมเนียอิสระ (NH_3) นั้นขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถพบแอมโมเนียได้ทั้งในชั้นน้ำและดินตะกอนก้นบ่อ กระบวนการแอมโมนิฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งสภาวะที่มีอากาศและสภาวะไร้อากาศ แต่เนื่องจากสารอินทรีย์และแบคทีเรียมักพบได้มากในดินตะกอน การผลิตแอมโมเนียส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นที่ผิวชั้นดินตะกอนใต้น้ำซึ่งเป็นบริเวณที่มีสารอินทรีย์มากที่สุด โดยแอมโมเนียที่เกิดในชั้นน้ำจะถูกพืชน้ำดูดซึมไปใช้เป็นอาหาร และบางส่วนจะถูกแบคทีเรียเปลี่ยนเป็นไนเทรตด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชัน (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544; มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2540)

2.4.2 กระบวนการไนทริฟิเคชัน (Nitrification) (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

กระบวนการไนทริฟิเคชันเป็นการออกซิไดซ์แอมโมเนียให้เป็นไนไทรต์และไนเทรต โดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ทั้งชนิดเฮเทอโรทรอฟ (Heterotroph) และออโตทรอฟ (Autotroph) แต่เมื่อเทียบกันแล้วจุลินทรีย์ชนิดออโตทรอฟมีบทบาทมากกว่ามาก กระบวนการไนทริฟิเคชันนี้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อยได้แก่

ขั้นตอนย่อยที่ 1 ไนไทรเทชัน (Nitritation) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ไนไทรทิฟิเคชัน (nitritification) อาศัยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย (Ammonia Oxidizing Bacteria; AOB) เช่น *Nitrosomonas* spp. และ *Nitrosospira* spp. เป็นต้น ทำหน้าที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียให้เป็นไนไทรต์ มีสมการแสดงการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$NH_4^+ + 1.5O_2 \xrightarrow{Nitrosomonas} NO_2^- + 2H^+ + H_2O + (58 - 84\ \text{Kcal/mol of}\ NH_4^+) \qquad (2.1)$$

ถ้าให้ยิลด์ (Yield) ของ *Nitrosomonas* มีค่า 0.15 กรัมวีเอสเอส/กรัมแอมโมเนียไนโตรเจน จะได้สมการดังนี้ (ธีระ เกรอต, 2539)

$$55NH_4^+ + 76O_2 + 109HCO_3^- \xrightarrow{Nitrosomonas} C_5H_7O_2N + 54NO_2^- + 104H_2CO_3 + 57H_2O \quad (2.2)$$

ขั้นตอนย่อยที่ 2 ไนเทรเทชัน (Nitratation) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ไนเทรทิฟิเคชัน (Nitratification) อาศัยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มไนไทรต์ออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย (Nitrite Oxidizing Bacteria; NOB) เช่น *Nitrobacter* spp. และ *Nitrospira* spp. เป็นต้น ทำหน้าที่ออกซิไดซ์ไนไทรต์ให้เป็นไนเทรต มีสมการแสดงการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$NO_2^- + 0.5O_2 \xrightarrow{Nitrobacter} NO_3^- + (15.4 - 20.9 \text{ Kcal/mol of } NO_2^-) \quad (2.3)$$

ถ้าให้ยิลด์ (Yield) ของ *Nitrobacter* มีค่า 0.02 กรัมวีเอสเอส/กรัมไนไทรต์ไนโตรเจน จะได้สมการดังนี้ (ธีระ เกรอต, 2539)

$$400NO_2^- + NH_4^+ + 195O_2 + HCO_3^- + 4H_2CO_3 \xrightarrow{Nitrobacter} C_5H_7O_2N + 400NO_3^- + 3H_2O \quad (2.4)$$

ดังนั้นสมการรวมของปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันที่มีการรวมการเจริญเติบโตในสมการที่ 2.2 และ 2.4 จะได้ดังนี้ (ธีระ เกรอต, 2539)

$$NH_4^+ + 1.83O_2 + 1.98HCO_3^- \rightarrow 0.02C_5H_7O_2N + 0.98NO_3^- + 1.88H_2CO_3 + 1.04H_2O \quad (2.5)$$

ขณะที่แบคทีเรียออโตทรอฟทั้ง 2 ชนิดออกซิไดซ์แอมโมเนียเป็นไนไทรต์และไนเทรต ระบบจะอยู่ในสภาวะที่มีอากาศและได้พลังงานออกมา แบคทีเรียจะใช้พลังงานส่วนนี้ไปดึงเอาคาร์บอนไดออกไซด์หรือไบคาร์บอเนตออกมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนต่อไป

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชัน

1) ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (Ammonia concentration)

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

2) ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen; DO)

กระบวนการไนทริฟิเคชันจะเกิดขึ้นได้เมื่อระบบอยู่ในสภาวะมีอากาศ จึงจำเป็นต้องมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่เพียงพอ จากสมการที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าแบคทีเรียมีความต้องการออกซิเจน 2 โมล เพื่อใช้ในการออกซิไดซ์แอมโมเนีย 1 โมล ให้กลายเป็นไนเทรต ดังนั้นปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์จะต้องมีการควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายน้ำไม่ให้ต่ำกว่า 2 มก./ล. (Timmons และคณะ, 2002) แต่ถ้าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำน้อยกว่า 1 มก./ล. อาจทำให้กระบวนการไนทริฟิเคชันถูกยับยั้งได้ (Crab และคณะ, 2007) นอกจากนี้การมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมากจะทำให้มีอัตราการเกิดไนทริฟิเคชันเพิ่มขึ้น แต่การเติมอากาศมากจนทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำสูงเกินไปจะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน

$$NH_3 + 2O_2 \longrightarrow NO_3^- + H^+ + H_2O \qquad (2.6)$$

3) พีเอช (pH)

ค่าพีเอชมีผลต่อการเจริญเติบโตของไนทริฟายอิงแบคทีเรีย โดยกระบวนการไนทริฟิเคชันมีความไวต่อพีเอชมากและมีการใช้ค่าสภาพด่าง จึงทำให้พีเอชในระบบลดลง ซึ่งพีเอชที่เหมาะสมต่อการเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันอยู่ในช่วง 7.5 - 8.5 ถ้าพีเอชต่ำกว่า 7.0 ปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันจะถูกยับยั้ง เนื่องจากเกิดก๊าซไนทริกออกไซด์และไนทรัสออกไซด์ขึ้น (Ling และ Chen, 2005) และถ้าพีเอชสูงกว่า 8.5 จะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม NOB ส่งผลให้เกิดการสะสมของไนไทรต์ (Fenchel และ Blackburn, 1979 อ้างถึงใน เอกชัย มาลาพล, 2551)

4) อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลต่อ *Nitrobacter* มากกว่า *Nitrosomonas* โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันอยู่ในช่วง 30-36 °ซ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างกะทันหันจะทำให้จุลินทรีย์เกิดการช็อกและหยุดทำงานได้ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

5) ค่าสภาพด่าง (Alkalinity)

ค่าสภาพด่างมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของไนทริฟายอิงแบคทีเรีย โดยไนทริฟายอิงแบคทีเรียจะใช้คาร์บอเนตหรือไบคาร์บอเนตเป็นแหล่งคาร์บอนในการสร้างเซลล์ และในการออกซิไดส์แอมโมเนียไนโตรเจน 1 ก. ให้เป็นไนเทรตมีความต้องการค่าสภาพด่าง 7.14

ก.แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งค่าสภาพด่างที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไนทริฟิเคชันควรมีค่าไม่น้อยกว่า 100 มก./ล. (Hart และ O'sullivan, 1993)

6) สารอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon)

ในกระบวนการไนทริฟิเคชัน สารอินทรีย์คาร์บอนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟมีการเจริญเติบโตมากขึ้น ทำให้เกิดการแก่งแย่งอาหาร ออกซิเจน และเกิดการเจริญเติบโตที่แข่งขันกันระหว่างแบคเทียเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟกับแบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายอิง โดยอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่สูงขึ้นมีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันลดลง เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟจะเจริญเติบโตได้ดีกว่าแบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายอิง จึงกล่าวได้ว่าการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนที่เพิ่มมากขึ้นอาจจะไปยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายอิงได้ (Zhu และ Chen, 2001; Michaud และคณะ, 2006)

7) พื้นที่ผิวสำหรับให้แบคทีเรียยึดเกาะ (Surface area)

ในกรณีที่เลือกใช้วัสดุตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวมาก มีความพรุน หรือมีความขรุขระมากจะส่งผลให้ปริมาณแบคทีเรียที่มายึดเกาะมีจำนวนมากตามไปด้วย ซึ่งในกระบวนการไนทริฟิเคชันถ้ามีไนทริฟายอิงแบคทีเรียมายึดเกาะบนวัสดุตัวกลางจำนวนมากและมีการเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนได้อย่างรวดเร็ว ก็จะส่งผลทำให้อัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงขึ้น (มนวิกานต์ ขจรบุญ, 2551)

8) สารยับยั้งกระบวนการไนทริฟิเคชัน (Inhibitory substance)

กระบวนการไนทริฟิเคชันสามารถถูกยับยั้งได้ด้วยสารพิษและโลหะหนักในระดับความเข้มข้นต่ำหลายประเภท เช่น ยาฆ่าแมลง ไซยาไนด์ (Cyanide) ฟีนอล (Phenol) เมอร์แคพแทน (Mercaptan) ไธโอยูเรีย (Thiourea) และโลหะหนัก เช่น ปรอท เงิน นิกเกิล ทองแดง โครเมียม สังกะสี เป็นต้น (กษิดิศ หนูทอง, 2551)

2.4.3 กระบวนการดีไนทริฟิเคชัน (Denitrification) (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

กระบวนการดีไนทริฟิเคชันเป็นการเปลี่ยนไนเทรตให้อยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจน โดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มดีไนทริฟายอิงแบคทีเรีย (Denitrifying bacteria) ซึ่งมีทั้งเฮเทอโรทรอฟและออโตทรอฟ แต่เฮเทอโรทรอฟมีบทบาทมากว่าออโตทรอฟอย่างมาก กระบวนดีไนทริฟิเคชันนี้จะเกิดในสภาวะที่กึ่งไร้อากาศหรือแอนอกซิก (Anoxic) คือ ใช้ไนเทรตเป็นตัวรับ

อิเล็กตรอนแทนออกซิเจนอิสระ นอกจากนี้จุลินทรีย์พวกเฮเทอโรทรอฟยังต้องการสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งคาร์บอน กระบวนการดีไนทริฟิเคชันมีขั้นตอนการเกิดของปฏิกิริยา 4 ขั้นตอนด้วยกันคือ ไนเทรตเปลี่ยนเป็นไนไทรต์ ไนไทรต์เปลี่ยนเป็นไนตริกออกไซด์ ไนตริกออกไซด์เปลี่ยนเป็นไนตรัสออกไซด์ และไนตรัสออกไซด์เปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน โดยทุกขั้นตอนจะมีเอนไซม์ที่กระตุ้นการลดรูปของไนโตรเจน แสดงดังสมการที่ 2.7

$$NO_3^- \xrightarrow[\text{Reductase}]{\text{Nitrate}} NO_2^- \xrightarrow[\text{Reductase}]{\text{Nitrite}} NO \xrightarrow[\text{Reductase}]{\text{Nitric oxide}} N_2O \xrightarrow[\text{Reductase}]{\text{Nitrous oxide}} N_2 \qquad (2.7)$$

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน

1) สารอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon)

กระบวนการดีไนทริฟิเคชันจำเป็นต้องมีสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนหรือเป็นตัวให้อิเล็กตรอน ทำให้ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียสามารถนำมาใช้ในการสร้างเซลล์และใช้เป็นแหล่งพลังงาน สารอินทรีย์คาร์บอนที่ใช้กันมีหลายชนิด ได้แก่ เอทานอล เมทานอล กรดอะซิติก กลูโคส และอะซิโตน เป็นต้น โดยอัตราการเกิดดีไนทริฟิเคชันจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการดีไนทริฟิเคชันเพื่อรีดิวซ์ไนเทรตให้เป็นก๊าซไนโตรเจนที่สมบูรณ์ด้วยแบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟายอิงขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสารอินทรีย์คาร์บอนและชนิดของแบคทีเรีย ในทางปฏิบัติการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนมักจะใช้อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนในช่วง 3.0 - 6.0 ซึ่งจะทำให้กระบวนการดีไนทริฟิเคชันสามารถเปลี่ยนไนเทรตให้อยู่ในรูปก๊าซไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์ (Van Rijn และคณะ, 2006) แต่สารอินทรีย์คาร์บอนที่นิยมใช้กันคือ เมทานอล เนื่องจากมีราคาถูกกว่าสารอินทรีย์คาร์บอนอื่นๆ ใช้งานได้ง่าย และยังเป็นสารที่มีกำลังรีดิวส์สูงเพราะมีสถานะออกซิเดชันต่ำ นอกจากนี้การใช้เมทานอลเป็นแหล่งคาร์บอนยังทำให้ได้ยิลด์ต่ำอีกด้วย (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) สามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$NO_3^- + 1.08CH_3OH + H^+ \longrightarrow 0.065C_5H_7O_2N + 2.44H_2O + 0.76CO_2 + 0.47N_2 \qquad (2.8)$$

2) ค่าสภาพด่าง (Alkalinity)

ค่าสภาพด่างมีความสัมพันธ์กับพีเอชโดยตรง ในกระบวนการดีไนทริฟิเคชันแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟจะปลดปล่อยไฮดรอกซิลอิออน (OH^-) ออกมา จึงทำให้ค่าสภาพด่างในน้ำจะค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้น โดยการรีดิวซ์ไนเทรต 1 ก. ให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนจะผลิตค่าสภาพด่าง 3.57 ก.แคลเซียมคาร์บอเนต (Chang และ Tseng, 1999; Li และ Irvin, 2007)

3) อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาคือ 2-50 °ซ แต่อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียอยู่ในช่วง 25 - 35 °ซ (Rivett และคณะ, 2008) และมีรายงานว่าดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียสามารถทำงานได้ดีเมื่ออุณหภูมิมากกว่าหรือเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

4) พีเอช (pH)

กระบวนการดีไนทริฟิเคชันจะมีการผลิตสภาพด่างขึ้นมา พีเอชมีผลต่อดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียน้อยกว่าไนทริฟายอิงแบคทีเรีย พีเอชที่เหมาะสมสำหรับดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียอยู่ในช่วง 6.5-8.5 (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) พีเอชที่ต่ำกว่า 5 จะทำให้กระบวนการดีไนทริฟิคชันถูกยับยั้งและมีแนวโน้มที่จะเกิดการสะสมของไนไทรต์หรือไนทรัสออกไซด์ (Rivett และคณะ, 2008) และในกรณีที่พีเอชมีค่าต่ำกว่า 6 และสูงกว่า 9 อาจส่งผลให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันถูกยับยั้งได้ (Rezaee และคณะ, 2008)

5) ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen; DO)

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันเช่นกัน เนื่องจากในสภาวะที่มีออกซิเจนสูงแบคทีเรียจะเลือกใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนไนเทรต เพราะพลังงานที่ได้จากการออกซิไดซ์แหล่งคาร์บอนด้วยไนเทรตจะมีค่าน้อยกว่าการออกซิไดซ์แหล่งคาร์บอนด้วยออกซิเจน ในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายน้ำประมาณ 0.1- 0.2 มก./ล. แบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟายอิงจะใช้ไนเทรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (ชลธิชา พลายชุม, 2553) ดังนั้นออกซิเจนจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องควบคุมให้เหลือน้อยที่สุดเพื่อให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเกิดได้อย่างสมบูรณ์ (Van Rijn และคณะ, 2006)

6) ค่าศักย์ออกซิเดชัน – รีดักชัน (Oxidation – reduction potential; ORP)

กระบวนการดีไนทริฟิเคชันสามารถเกิดได้เมื่อควบคุมออกซิเจนละลายน้ำให้มีปริมาณน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ แต่หัววัดค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่มีจำหน่ายและใช้งานในเชิงปฏิบัติในปัจจุบันมีขีดจำกัดที่ไม่สามารถวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่มีความเข้มข้นต่ำมากๆ ได้ จึงต้องมีการใช้โออาร์พีเป็นตัวกำหนดหรือควบคุมกระบวนการดีไนทริฟิเคชันแทนค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ โดยค่าโออาร์พีที่เหมาะสมสำหรับการเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชันอยู่ในช่วง - 50 ถึง -100 มิลลิโวลต์ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

7) สารยับยั้งการเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน (Inhibitory substance)

กระบวนการดีไนทริฟิเคชันสามารถถูกยับยั้งได้ด้วยสารเคมีหลายประเภทเช่นเดียวกับไนทริฟิเคชัน เช่น ยาฆ่าแมลง ฟีนอล ไซยาไนด์ อะเซทิลีน ซัลไฟด์ โพแตสเซียมไซยาไนด์ ไดไธออล (Dithiol) และโอ-ฟีแนนโธลีน (O-Phenanthroline) เป็นต้น (กษิดิศ หนูทอง, 2551)

2.5 ปัจจัยที่มีผลในการทำให้เกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันร่วมกับดีไนทริฟิเคชัน

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.4 เมื่อพิจารณาแนวทางที่จะทำให้กระบวนการไนทริฟิเคชันกับดีไนทริฟิเคชันเกิดร่วมกันได้คือ การควบคุมที่ปัจจัยด้านปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเป็นหลัก โดยในช่วงการบำบัดแอมโมเนียให้เป็นไนเทรตด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันต้องทำการเดินระบบในสภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมากกว่า 2 มก./ล.จากนั้นหากต้องการบำบัดไนเทรตต่อด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันต้องทำการเดินระบบภายใต้สภาวะที่ควบคุมให้มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำน้อยที่สุด แต่การควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายน้ำให้เหมาะสมอาจจะเป็นแค่การทำให้กระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ต่อเนื่องกัน โดยประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตอาจเกิดได้ไม่เท่ากัน เพราะขึ้นอยู่กับรูปแบบที่ใช้ในการเดินระบบ ปริมาณเชื้อไนทริฟายอิงแบคทีเรียและดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียที่พบในระบบ ปริมาณแอมโมเนียและไนเทรตที่เข้าสู่ระบบ เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน

ปัจจัย	ไนทริฟิเคชัน	ดีไนทริฟิเคชัน	ไนทริฟิเคชันร่วมกับดีไนทริฟิเคชัน
ค่าพีเอช	7.5 – 8.5	6.5 – 8.5	7.5 – 8.5
ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (มิลลิโวลต์)	+100	-50 ถึง -100	ไนทริฟิเคชัน +100 ดีไนทริฟิเคชัน -50 ถึง -100
ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	มากกว่า 2	น้อยกว่า 0.2	ไนทริฟิเคชันมากกว่า 2 ดีไนทริฟิเคชันน้อยกว่า 0.2
อุณหภูมิ (°ซ)	30 – 36	25 – 35	30 – 35
สารอินทรีย์คาร์บอน	ปริมาณมากจะถูกยับยั้ง	อัตราส่วนที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับระบบ	อัตราส่วนที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับระบบ

2.6 ระบบบำบัดไนโตรเจนและการหมุนเวียนน้ำระบบปิดเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

กระบวนการบำบัดคุณภาพน้ำทางชีวภาพในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์เป็นหลัก โดยจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ใน 2 ลักษณะ ได้แก่ การเจริญเติบโตด้วยการยึดเกาะอยู่บนพื้นผิวของตัวกลาง (Attached - growth) และการเจริญเติบโตอย่างอิสระในน้ำโดยไม่มีการยึดเกาะกับตัวกลาง (Suspended - growth) (Gutierrez - Wing และ Malone, 2006) โดยรูปแบบของระบบบำบัดไนโตรเจนและการหมุนเวียนน้ำระบบปิดที่ใช้อยู่ในปัจจุบันสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ เมื่อแบ่งตามการกระจายตัวของแบคทีเรียในระบบบำบัด สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ระบบ ได้แก่

2.5.1 ระบบบำบัดและหมุนเวียนน้ำแบบ Suspended - growth system

ในระบบบำบัดรูปแบบนี้เซลล์แบคทีเรียจะเจริญเติบโตได้อย่างเป็นอิสระในน้ำโดยไม่ต้องอาศัยวัสดุยึดเกาะ แต่เนื่องจากแบคทีเรียที่รับผิดชอบในกระบวนการไนทริฟิเคชันและ

ดีไนทริฟิเคชันมีอัตราการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างจำกัด ดังนั้นการใช้ระบบ Suspended - growth system ในการบำบัดน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำผ่านกระบวนไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันจึงไม่เป็นที่นิยม (กษิดิศ หนูทอง, 2551)

2.5.2 ระบบบำบัดและหมุนเวียนน้ำแบบ Attached - growth system

ระบบบำบัดรูปแบบนี้โดยทั่วไปถูกออกแบบสำหรับกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน โดยให้แบคทีเรียในระบบจะเจริญเติบโตและยึดเกาะกับตัวกรองชีวภาพ ซึ่งอาจเคลื่อนที่ได้หรือไม่ก็ได้ ตัวอย่างของวัสดุตัวกรองชีวภาพได้แก่ หิน ทราย เปลือกหอย หรือพลาสติก เช่น พีวีซี (PVC) โพลิเอทิลีน (Polyethylene) หรือโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) ซึ่งจะมีความคงทนและไม่ทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำ คุณลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งของวัสดุตัวกรองชีวภาพคือ ต้องมีพื้นที่ผิวสูงเพื่อให้ไนทริฟายอิงและดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียมายึดเกาะและเติบโตในปริมาณที่เพียงพอต่อการเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งทำให้สามารถแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับอัตราการเติบโตที่จำกัดของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มนี้ได้ วัสดุตัวกรองชีวภาพเหล่านี้สามารถหาซื้อได้ทั่วไปและมีชื่อทางการค้า ตัวอย่างเช่น Biopolyma™ Bioball™ และ HyperDrain™ เป็นต้น (กษิดิศ หนูทอง, 2551) โดยในงานวิจัยนี้มีการนำวัสดุตัวกลาง 2 ชนิด มาใช้ในการทดลองเพื่อให้จุลินทรีย์ยึดเกาะ ได้แก่

1) ไบโอคอร์ด (Biocord™)

รูปที่ 2.2 ลักษณะของไบโอคอร์ด

ไบโอคอร์ดเป็นวัสดุตัวกรองชีวภาพลักษณะเป็นมัดเส้นใยสีขาวที่ผลิตจากเส้นใยสังเคราะห์โพลีโพรพิลีน (Polypropylene) ดังรูปที่ 2.2 โดยมีคุณสมบัติพิเศษ กล่าวคือ มีความเหนียวและมีความทนทานสูงจึงสามารถใช้ได้เป็นระยะเวลานาน อีกทั้งยังง่ายต่อการ

ทำความสะอาด และที่สำคัญวัสดุตัวกรองชีวภาพนี้จะมีประสิทธิภาพและประหยัดเนื้อที่มาก เนื่องจากตัวกรองชีวภาพมีพื้นที่ผิวมากถึง 2.8 ตร.ม./ม. จึงทำให้มีปริมาณแบคทีเรียที่เกาะกับบริเวณผิวเส้นใยมีปริมาณต่อหน่วยความยาวของตัวกรองมากตามไปด้วย (ทยากร สุวรรณรัตน์, 2552; ธนทร ศรีสุข, 2551; เอกชัย มาลาพล, 2551)

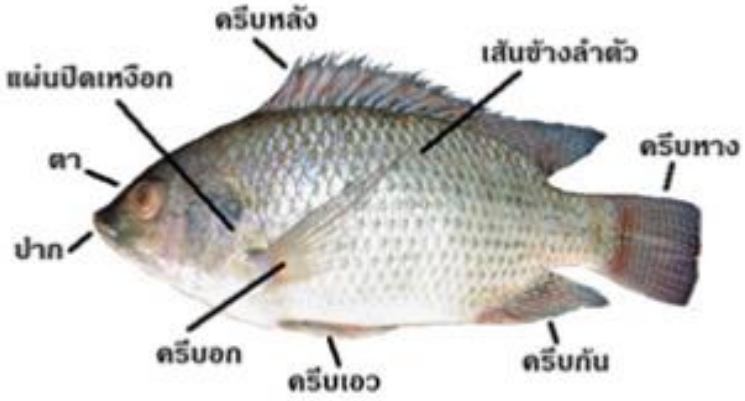
2) หินพัมมิส (Pumice rock)

รูปที่ 2.3 ลักษณะของหินพัมมิส

หินพัมมิส คือ หินภูเขาไฟชนิดหนึ่งจัดอยู่ในประเภทหินอัคนี มีลักษณะดังรูปที่ 2.3 เกิดจากการหลอมละลายของลาวาและแม็กม่าแล้วจับตัวแข็งโดยฉับพลันกับชั้นอากาศและฟองอากาศ รูพรุนจำนวนมากนั้นคือฟองอากาศ เนื่องจากขณะที่ลาวากำลังร้อนมากผนวกเข้ากับความเย็นจากอากาศและน้ำทำให้เกิดการจับตัวแข็งเป็นก้อน เกิดโพรงและรูพรุนจำนวนมหาศาล การมีรูพรุนจึงทำให้หินมีคุณสมบัติมีน้ำหนักเบา ลอยน้ำได้ในระยะหนึ่ง แต่เมื่อแช่น้ำไปนานๆ ก็จะจมลงเอง มีสสารและแร่ธาตุมากมาย หินพัมมิสมีสีออกโทนเหลือง น้ำตาล หรือขาวขุ่นๆ หินพัมมิสต่างจากหินภูเขาไฟประเภทอื่นคือ มีลักษณะเบา สามารถนำมาใช้งานได้ง่าย ไม่ทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนแปลง และมีแร่ธาตุเหล็กในปริมาณน้อย ประโยชน์ของหินพัมมิสคือ ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกเสื้อผ้าและกางเกงยีนส์ ใช้เป็นวัสดุสำหรับปลูกไม้ดอกและไม้ประดับได้เป็นอย่างดี ใช้เป็นวัสดุช่วยในการปรับปรุงดิน นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นวัสดุเพิ่มความร้อนและเก็บกักความร้อน และที่สำคัญเป็นที่นิยมอย่างมากในวงการการเลี้ยงปลาสวยงาม เนื่องจากมีคุณสมบัติที่มีรูพรุนจำนวนมากจึงทำให้เป็นที่อยู่ของแบคทีเรียที่ช่วยในการย่อยสลายของเสียในตู้ปลาได้เป็นอย่างดี มีราคาถูก และไม่ทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำ (นิคม จึงอยู่สุข, 2540; จำนง ถีราวุฒิ, 2553: ออนไลน์)

2.6 ปลานิล

ปลานิล (ดังรูปที่ 2.4) เป็นปลาน้ำจืดชนิดหนึ่งที่มีถิ่นกำเนิดในทวีปแอฟริกา เป็นปลาที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายและมีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศ เพราะเป็นปลาที่สามารถขยายพันธุ์ได้เองในบ่อเลี้ยง เลี้ยงง่าย เจริญเติบโตเร็ว เนื้อมีรสชาติดี สามารถนำมาประกอบอาหารได้หลายอย่าง ประกอบกับเป็นที่ต้องการของตลาดจึงเป็นที่นิยมเลี้ยงของเกษตรกรทั่วไป (อุดม เรืองนพคุณ, 2550)



รูปที่ 2.4 ลักษณะของปลานิล
(ที่มา: http://www.xn--12ca4dscc8ayd2f.com)

2.6.1 อนุกรมวิธานและชีววิทยาของปลานิล

ปลานิลเป็นปลาน้ำจืดชนิดหนึ่งจัดอยู่ในวงศ์ Cichlidae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Oreochromis niloticus* (Linn.) มีชื่อสามัญว่า Nile tilapia มีการจัดลำดับหมวดหมู่ตามหลักของอนุกรมวิธานดังนี้

Kingdom: Animalia

Phylum: Chordata

Class: Teleostei

Order: Perciformers

Family: Cichlidae

Genus: *Oreochromis*

Species: *Oreochromis niloticus*

ปลานิลมีรูปร่างลักษณะคล้ายกับปลาหมอเทศ ลักษณะของปลานิลคือ มีริมฝีปากบนและล่างเสมอกัน มีเกล็ด 4 แถวตรงบริเวณแก้ม และมีลายพาดขวางลำตัว 9-10 แถบ ครีบหลังครีบก้นและครีบหางมีจุดขาวและเส้นสีดำตัดขวาง ครีบหลังมีอันเดียวประกอบด้วยก้านครีบแข็ง 15-18 อัน และก้านครีบอ่อน 12-14 อัน ครีบก้นมีก้านครีบแข็ง 3 อัน และก้านครีบอ่อน 9-10 อัน บนแถบเส้นข้างลำตัวมีเกล็ด 33 เกล็ด ทางด้านข้างมีเกล็ดตามแนวเฉียงจากตอนต้นของครีบหลังลงมาถึงเส้นข้างลำตัว 5 เกล็ด และจากเส้นข้างลำตัวลงมาถึงส่วนหน้าของครีบก้น 13 เกล็ด ลำตัวมีสีเขียวปนน้ำตาล ตรงกลางเกล็ดมีสีเข้ม ที่กระดูกแก้มมีจุดสีเข้มอยู่ 1 จุด (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536)

ปลานิลมีนิสัยชอบอาศัยอยู่รวมกันเป็นฝูง เป็นปลาที่อยู่ได้ทั้งในน้ำจืดและน้ำกร่อย มีความอดทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ดี สามารถอยู่ได้ปกติในน้ำที่มีความเค็มสูงสุด 20 พีพีที ทนต่อความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำ โดยเจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอช 6.5 - 8.5 และสามารถมีชีวิตอยู่ได้ในช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่กว้างมากคือ ตั้งแต่ 11 - 42 °ซ ปลานิลเป็นปลาที่กินทั้งพืชและสัตว์รวมทั้งซากพืชที่เน่าเปื่อยเป็นอาหาร เช่น แพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ สาหร่าย กินอาหารตั้งแต่ระดับผิวน้ำไปถึงพื้นท้องน้ำ (อุดม เรืองนพคุณ, 2550)

2.6.2 รูปแบบการเพาะเลี้ยงปลานิล

รูปแบบในการเพาะเลี้ยงปลานิลสามารถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่

2.6.2.1 การเลี้ยงแบบยังชีพ (Extensive) เป็นการเลี้ยงปลานิลแบบความหนาแน่นต่ำ มักเป็นการเลี้ยงเพื่อการบริโภคภายในครัวเรือนเป็นหลัก เลี้ยงโดยอาศัยอาหารธรรมชาติที่เกิดขึ้นในบ่อ ส่วนใหญ่ใช้วิธีการใส่ปุ๋ย ไม่มีการให้อาหารสมทบ (อุดม เรืองนพคุณ, 2550) มีการปล่อยปลาจำนวนไม่แน่นอน ส่วนมากจะปล่อยปลานิลขนาดใหญ่เพื่อให้ออกลูก หรือปล่อยปลานิลขนาดเล็กเพื่อให้เจริญเติบโต (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536) โดยความหนาแน่นเริ่มต้นของปลาที่เลี้ยงจะอยู่ในช่วง 0.5 – 2 ตัว/ตร.ม. (El-Sayed, 2006)

2.6.2.2 การเลี้ยงแบบกึ่งพัฒนา (Semi - intensive) เป็นการเลี้ยงเพื่อการบริโภคและจำหน่ายส่วนที่เหลือจากการบริโภคเป็นรายได้ การเลี้ยงจะมุ่งเน้นการใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ ผู้เลี้ยงจะใช้ปุ๋ยเพื่อเพิ่มอาหารธรรมชาติเพียงอย่างเดียวตลอดการเลี้ยง หรือใช้ปุ๋ยร่วมกับการให้

อาหารเสริมบ้างเล็กน้อยเพื่อเร่งการเจริญเติบโต (อุดม เรืองนพคุณ, 2550) โดยความหนาแน่นเริ่มต้นของปลาที่เลี้ยงจะอยู่ในช่วง 2-4 ตัว/ตร.ม. (El-Sayed, 2006)

2.6.2.3 การเลี้ยงแบบพัฒนา (Intensive) เป็นการเลี้ยงเพื่อการจำหน่ายผลผลิตเป็นหลัก มีการปล่อยปลาแบบหนาแน่น มีการดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีเพื่อรักษาคุณภาพน้ำให้ดีอยู่เสมอ และมีการให้อาหารที่มีโปรตีนสูงเพื่อเร่งการเจริญเติบโตและเพื่อให้ได้ปลาที่มีขนาดใหญ่เป็นไปตามความต้องการของตลาด (อุดม เรืองนพคุณ, 2550) โดยความหนาแน่นเริ่มต้นของปลาที่เลี้ยงจะอยู่ในช่วง 4-10 ตัว/ตร.ม. (El-Sayed, 2006)

2.6.3 คุณสมบัติของน้ำที่ใช้ในการเลี้ยงปลานิล

2.6.3.1 อุณหภูมิ ปลานิลเป็นปลาที่ทนต่ออุณหภูมิได้ในช่วงกว้างตั้งแต่ 11-42 °ซ แต่อุณหภูมิของน้ำต่ำกว่า 10 °ซ หรือสูงกว่า 42 °ซ ปลาจะอยู่ได้ไม่นานและทำให้ตายได้ ปลานิลจะไม่กินอาหารและไม่เจริญเติบโตเมื่ออุณหภูมิของน้ำต่ำกว่า 15 °ซ และจะไม่วางไข่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 °ซ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการวางไข่อยู่ระหว่าง 26-29 °ซ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตอยู่ระหว่าง 19-28 °ซ (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536)

2.6.3.2 ค่าพีเอช โดยทั่วไปปลานิลสามารถอาศัยอยู่ได้ในน้ำที่มีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 7.2-8.3 (อุดม เรืองนพคุณ, 2550)

2.6.3.3 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ปริมาณออกซิเจนในน้ำในบ่อเลี้ยงปลาที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 5 มก./ล. จนถึงจุดอิ่มตัว ปลานิลสามารถทนต่อสภาพน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำได้ดีตั้งแต่ 0-0.4 มก./ล. (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536)

2.6.3.4 ความเค็ม ปลานิลเป็นปลาน้ำจืดจะต้องการน้ำที่มีระดับความเค็มที่ต่ำมาก การเปลี่ยนแปลงของระดับความเค็มอย่างกะทันหันจะมีผลต่อตัวปลา จากการศึกษาผลของระดับความเค็มของน้ำต่อการกินอาหารพบว่า ที่ระดับความเค็ม 10 พีพีที อัตราการเจริญเติบโตของปลานิลจะดีกว่าระดับความเค็ม 1 พีพีที เนื่องจากระดับความเค็มเหมาะสมทำให้มีการกินอาหารได้มากขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อกลับต่ำลงเมื่อระดับความเค็มเพิ่มขึ้น (อุดม เรืองนพคุณ, 2550)

2.6.3.5 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เกิดจากการหมักหมมและการเน่าของสารอินทรีย์ที่บริเวณก้นบ่อในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน มักจะเกิดปัญหาในบ่อเลี้ยงปลาที่มีการให้อาหารปริมาณมากและมีอาหารตกค้างและเป็นพิษต่อปลา ถึงแม้ว่าปลานิลที่แข็งแรงมีภูมิต้านทานสูง แต่ถ้าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีค่ามากกว่า 1 มก./ล. ปลานิลก็มีอาการมึนงงและตายได้ (อุดม เรืองนพคุณ, 2550)

2.6.3.6 ค่าความเป็นด่าง ที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงปลานิลควรอยู่ในช่วง 200-300 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. (ทยากร สุวรรณรัตน์, 2552)

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

2.7 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 การบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชัน

กชพร กฤติยานันต์ (2554) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กสำหรับการเลี้ยงปลานิล โดยประยุกต์ใช้ขวดพลาสติกเหลือทิ้งเป็นวัสดุให้แบคทีเรียยึดเกาะเพื่อการบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชัน และใช้เป็นอุปกรณ์ดักตะกอน งานวิจัยเริ่มจากการทดสอบการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันที่ทำจากขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง ฝาขวดน้ำดื่ม พลาสติกล็อกฝาขวด และแก้วน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น พบว่าขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้นเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันมากกว่าวัสดุพลาสติกแบบอื่นๆ จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพในการแยกตะกอนของถังพลาสติกขนาด 200 ล. ที่ภายในบรรจุขวดน้ำพลาสติกตัดปลายขนาด 6 ล. จำนวน 18 ขวด ที่เรียงซ้อนกันอยู่จำนวน 6 ชุดๆ ละ 3 ขวด ซึ่งขวดพลาสติกจะเป็นวัสดุกั้นทางเดินน้ำเพื่อช่วยให้การดักตะกอนเกิดได้ดีขึ้น พบว่ามีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนได้ร้อยละ 89.73 ที่อัตราการไหล 857 ล./ชม. จากนั้นนำสภาวะการทดลองดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำพบว่าขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้นที่ผ่านการตรึงเชื้อสามารถควบคุมคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงปลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ และถังแยกตะกอนสามารถช่วยลดปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงปลานิลได้เป็นอย่างดี

Al-Hafedh และคณะ (2003) ศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุตัวกรองชีวภาพพลาสติก 3 ชนิด ได้แก่ Plastic roll, PVC pipe และ Scrub pads ในการบำบัดน้ำเสียจากระบบการเพาะเลี้ยงปลานิลแบบหนาแน่นที่มีการหมุนเวียนน้ำ โดยน้ำเสียจะไหลผ่านส่วนกำจัดตะกอนที่ประกอบด้วยถังตกตะกอน ถังกรองทราย และเข้าสู่ระบบบำบัดที่บรรจุตัวกรองชีวภาพพลาสติก จากการทดลองพบว่าตัวกรองชีวภาพทั้ง 3 ชนิดมีประสิทธิภาพในการควบคุมคุณภาพน้ำได้ดี โดย Plastic rolls มีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียและไนไทรต์ได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับ PVC pipe และ Scrub pads แต่งานวิจัยนี้แนะนำให้ใช้ PVC pipe เนื่องจากมีราคาถูก ใช้งานได้ง่าย และมีประสิทธิภาพค่อนข้างดีในการบำบัดน้ำเสียจากระบบเพาะเลี้ยงปลานิลแบบหนาแน่นที่มีการหมุนเวียนน้ำ

Tseng และ Wu (2004) ศึกษาการบำบัดแอมโมเนียในระบบการเพาะเลี้ยงปลาไหลที่มีการหมุนเวียนน้ำแบบปิด เมื่อใช้ตัวกรองชีวภาพแบบจมที่มีจุลินทรีย์มาเกาะจนมีลักษณะเป็นไบโอฟิล์ม (Biofilm) มีการล้างตัวกรองแบบย้อนกลับ (Backwashing) เป็นระยะเพื่อให้ได้ตัวกรองชีวภาพที่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำการประเมินประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพจากพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของแอมโมเนีย และความเข้มข้นของของแข็ง (Suspended solids) ผลการทดลองพบว่า อัตราการกำจัดแอมโมเนียต่อพื้นที่ผิวของตัวกลางจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการทดลองและค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ประสิทธิภาพในการทำงานของตัวกรองชีวภาพมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดลอง ได้แก่ อัตราการกำจัดแอมโมเนียเริ่มต้น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของแอมโมเนีย และความเข้มข้นของแข็งที่เข้าระบบ ส่วนการล้างตัวกรองแบบย้อนกลับบ่อยๆ จะช่วยรักษาคุณภาพน้ำในระบบหมุนเวียนน้ำสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้

Brazil (2006) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบจานหมุนชีวภาพ (Rotation Biological Contactor; RBC) ที่มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 13,380 ตร.ม. เมื่อนำมาติดตั้งกับระบบการเพาะเลี้ยงปลานิลแบบปิด อุณหภูมิ 28 °ซ จากการทดลองพบว่า มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับ 0.43 ± 0.16 ก./ตร.ม./วัน ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำลดลงประมาณร้อยละ 6.6 ต่อรอบการหมุนของระบบจานหมุนชีวภาพ โดยการเพิ่มขึ้นของสารอินทรีย์ละลายน้ำจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียลดลง นอกจากนี้ระบบจานหมุนชีวภาพยังช่วยลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ลงได้ประมาณร้อยละ 39 และระบบนี้ยังช่วยลดปัญหาในเรื่องการอุดตันได้

Sesuk และคณะ (2009) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้อาหารกุ้งเพื่อกระตุ้นกระบวนการไนทริฟิเคชันบนตัวกรองชีวภาพแบบ Submerged fibrous โดยมีการเลี้ยงปลานิล

และบ่มตัวกรองชีวภาพในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำไปพร้อมกัน จากผลการทดลองพบว่า การเติมอาหารกุ้งภายในช่วง 3 สัปดาห์แรกสามารถกระตุ้นให้เกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยพบการสะสมของไนเทรตเพิ่มขึ้นแต่แอมโมเนียและไนไทรต์มีปริมาณลดลง หรือคิดเป็นอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยเท่ากับ 24.1 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน และระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพหลังจากทำการเลี้ยงปลานิลไปอย่างน้อย 44 วัน ซึ่งจะมีปริมาณสารอนินทรีย์ไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 1.24-10.78 มก.ไนโตรเจน/ล./วัน และพบว่าปลานิลที่เลี้ยงในบ่อที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพจะมีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่าบ่อเลี้ยงที่ไม่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพถึงร้อยละ 7-16

Suhr และ Pedersen (2010) ศึกษาประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพแบบฟิกซ์เบด (Fixed bed) หรือตัวกรองชีวภาพแบบตัวกลางไม่เคลื่อนที่ คือ Bioblok (Polyethylene netshaped cylinders, 200 ตร.ม./ลบม.) และตัวกรองชีวภาพแบบตัวกลางเคลื่อนที่ (Moving bed) คือ Biomedia (Polypropylene carriers, 850 ตร.ม./ลบม.) ในการบำบัดน้ำเสียจากการเลี้ยงปลาเรนโบว์เทราท์ (Rainbow trout) ที่อุณหภูมิ 8 °ซ จากผลการทดลองพบว่า ตัวกรองชีวภาพแบบตัวกลางไม่เคลื่อนที่มีพื้นที่ผิวที่จำเพาะต่อการกำจัดแอมโมเนียมากว่าตัวกรองชีวภาพแบบตัวกลางเคลื่อนที่ แต่อัตราการกำจัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพแบบตัวกลางเคลื่อนที่มีค่ามากกว่าตัวกรองชีวภาพแบบตัวกลางไม่เคลื่อนที่ และเมื่อทำการปล่อยน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงเข้าระบบเป็นเวลา 2 สัปดาห์ พบว่าตัวกรองชีวภาพแบบตัวกลางไม่เคลื่อนที่มีอัตราการบำบัดที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ตัวกรองชีวภาพแบบตัวกลางเคลื่อนที่มีประสิทธิภาพที่ไม่เปลี่ยนแปลง แสดงว่าจุลินทรีย์เฮเทอโรทรอฟสามารถเกาะเป็นไบโอฟิล์มบนตัวกรองชีวภาพแบบตัวกลางไม่เคลื่อนที่ได้มากกว่า จึงสามารถปรับตัวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เข้ามาได้

Harwanto และคณะ (2011) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำจืดของวัสดุตัวกลาง 3 ชนิด ได้แก่ Sand filter ซึ่งเป็นตัวกรองชีวภาพแบบฟลูอิดไดซ์ Polystyrene microbead filter และ Kaldnes bead filter ซึ่งเป็นตัวกรองชีวภาพแบบโปรยกรอง แต่ละชนิดมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) เท่ากับ 7,836 3,287 และ 500 ตร.ม./ลบ.ม. ตามลำดับ โดยวัสดุตัวกลางจะถูกบรรจุด้วยปริมาตรเท่ากับ 7 ล. ทำการบำบัดแอมโมเนียที่มีอัตราภาระบรรทุก (Ammonia loading rate) แตกต่างกัน ได้แก่ 5 25 และ 50 ก./ลบ.ม./วัน ผลการทดลองพบว่า ถ้าอัตราภาระบรรทุกแอมโมเนียมีค่าสูงขึ้น

จะทำให้อัตราการบำบัดแอมโมเนียมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และพบว่า Sand filter มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงกว่า Polystyrene microbead filter และ Kaldnes bead filter เพราะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า เมื่อพิจารณาในแง่ของความคุ้มค่าที่จะนำไปใช้งานพบว่า Polystyrene microbead filter มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานมากที่สุด เนื่องจาก Kaldnes bead filter มีราคาแพงที่สุดและมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียต่ำที่สุดจึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน ส่วน Polystyrene microbead filter ถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียน้อยกว่า Sand filter แต่ถ้าพิจารณาในด้านราคาที่ถูกกว่ามากจึงทำให้มีความคุ้มค่าที่จะนำไปใช้งานมากกว่า

2.7.2 การบำบัดไนเทรตด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน

ธัญญา พันธ์ฤทธิ์ดำ (2541) ศึกษาการเปรียบเทียบการเลี้ยงกุ้งกุลาดำในระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดที่มีระบบดีไนทริฟิเคชัน โดยระบบประกอบด้วยบ่อเลี้ยงกุ้ง บ่อตัวกรองชีวภาพสภาวะใช้อากาศที่บรรจุวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ BIO - POLYMA และระบบตัวกรองชีวภาพสภาวะไม่ใช้อากาศ ซึ่งประกอบด้วยคอลัมน์ลดปริมาณออกซิเจนละลาย คอลัมน์บรรจุวัสดุตรึงสำหรับดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียและคอลัมน์เพิ่มปริมาณออกซิเจน ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดชุดควบคุมที่ไม่มีระบบตัวกรองชีวภาพสภาวะไม่ใช้อากาศ จากผลการทดลองพบว่า ระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดนี้สามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต ให้อยู่ในเกณฑ์ปกติได้ ส่วนการเจริญเติบโตและการรอดของกุ้งกุลาดำอยู่ในเกณฑ์ปกติ

วิลาสินี ไตรยราช (2546) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไนเทรตในน้ำทะเลด้วยระบบบำบัดไนเทรตแบบท่อยาวสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล ทำการทดลองโดยติดตั้งระบบบำบัดไนเทรตแบบท่อยาวกับบ่อเลี้ยงกุ้งที่เชื่อมต่อกับบ่อบำบัดไนทริฟิเคชัน มีการหมุนเวียนน้ำระหว่างบ่อเลี้ยงกับบ่อบำบัดตลอดเวลา โดยการปรับระยะเวลากักน้ำให้อยู่ในช่วง 2.3 - 3.5 ชั่วโมง ในสภาวะที่เติมเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 5 เพื่อเป็นแหล่งคาร์บอน ด้วยอัตราการเติม 10 มล./ชม. ปรับค่าศักย์ออกซิเดชัน - รีดักชันให้อยู่ในช่วง -310 ถึง -320 มิลลิโวลต์ จากการทดลองพบว่า ระบบท่อยาวมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนเทรตได้มากกว่าร้อยละ 80 โดยไม่พบการสะสมของไนไทรต์และไม่มีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้น

ชลธิชา พลายชุม (2553) ศึกษาการบำบัดไนเทรตในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยถังดีไนทริฟิเคชัน โดยศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้วัสดุทดแทนดินธรรมชาติ 3 ชนิดในการบรรจุ

ลงในถังปฏิกรณ์ ได้แก่ ทราย ทรายเทียม และหินพัมมิส เพื่อลดปัญหาการปนเปื้อนของเชื้อโรคอันไม่พึงประสงค์จากดิน และง่ายต่อการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ในการเดินระบบ พบว่าหินพัมมิสเป็นวัสดุที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นตัวกลางในถังดีไนทริฟิเคชัน จากนั้นทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนเทรตของหินพัมมิส โดยเปรียบเทียบการใช้เมทานอลกับกากน้ำตาลเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับดีไนทริฟายอิงแบคทีเรีย และศึกษาอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนที่เหมาะสม รวมทั้งลักษณะการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนลงในชั้นน้ำและชั้นวัสดุ ผลการทดลองพบว่า เมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนที่มีความเหมาะสมมากกว่ากากน้ำตาล เพราะไม่ก่อปัญหาในเรื่องของแอมโมเนียและสีของน้ำ โดยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนที่เหมาะสมคือ 5:1 เพราะมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงและมีปริมาณเมทานอลคงเหลือในน้ำน้อยที่สุด นอกจากนี้การเติมเมทานอลในชั้นน้ำและชั้นหินพัมมิสให้ผลไม่แตกต่างกัน เมื่อนำไปใช้ในการบำบัดไนโตรเจนจากระบบการเพาะเลี้ยงปลานิลแบบปิดพบว่า ถังบำบัดดีไนทริฟิเคชันนี้มีประสิทธิภาพในการบำบัดไนเทรตได้มากกว่าร้อยละ 80

Menasveta และคณะ (2001) ศึกษาระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่มีระบบดีไนทริฟิเคชันสำหรับการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ในการทดลองจะมีการใช้คอลัมน์ที่บรรจุเปลือกหอยนางรมทุบเป็นวัสดุตัวกรองชีวภาพ มีการพ่นก๊าซไนโตรเจนเพื่อไล่ออกซิเจนออกจากน้ำ และทำการทดลองเปรียบเทียบการใช้เอทานอลกับเมทานอลเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนให้กับดีไนทริฟายอิงแบคทีเรีย จากการทดลองพบว่า สามารถบำบัดไนเทรตที่มีความเข้มข้นจาก 165 มก./ล. ลดลงเหลือ 25 มก./ล. ภายใน 9 สัปดาห์ ส่วนการใช้เอทานอลเป็นแหล่งคาร์บอนนั้นปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีการเติมแบคทีเรีย *Bacillus* spp. ลงไปเป็นหัวเชื้อในแต่ละครั้ง โดยการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ของเอทานอลจะทำให้พีเอชในระบบเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีกรดอินทรีย์เกิดขึ้น ในขณะที่เมื่อใช้เมทานอลเป็นแหล่งคาร์บอนปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันสามารถเกิดได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องมีการเติมแบคทีเรียลงไป แต่ข้อเสียของระบบนี้คือในขั้นตอนของปฏิกริยาดีไนทริฟิเคชันต้องเสียค่าใช้จ่ายในการนำก๊าซไนโตรเจนมาใช้เพื่อไล่ออกซิเจนออกจากระบบ

Saliling และคณะ (2007) ศึกษาการใช้แผ่นไม้และฟางข้าวสาลีที่มีราคาถูกเป็นทางเลือกสำหรับวัสดุตัวกลางในกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน เพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีไนเทรตความเข้มข้นสูง ในการวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นไม้ฟางข้าวสาลี และเม็ดพลาสติกโพลีเอทิลีนในการบำบัดไนเทรตจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นเลียนแบบน้ำเสียจริงจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีความเข้มข้นไนเทรตแตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 50 120 และ 200 มก.ไนเทรต

ไนโตรเจน/ล. ทำการบรรจุวัสดุตัวกลางแต่ละชนิดลงในถังดีไนทริฟิเคชันสูง 40 ซม. จากผลการทดลองพบว่า แผ่นไม้และฟางข้าวสาลีมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนเทรตที่ใกล้เคียงกับเม็ดพลาสติกโพลีเอทิลีน โดยมีประสิทธิภาพถึงร้อยละ 99 ทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีความเข้มข้นของแอมโมเนียน้อยมากและมีความเข้มข้นของไนไทรต์ประมาณ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. และพบว่าเมื่อเดินระบบต่อเนื่องไปเป็นเวลา 140 วัน แผ่นไม้และฟางข้าวสาลีมีการสูญเสียมวลร้อยละ 16.2 และ 37.7 ตามลำดับ ดังนั้นแผ่นไม้และฟางข้าวสาลีจึงมีศักยภาพที่จะใช้เป็นวัสดุตัวกลางในกระบวนการดีไนทริฟิเคชันได้ดี แต่มีปัญหาในเรื่องของช่วงเวลาในการใช้งานที่ค่อนข้างจำกัด

Hamlin และคณะ (2008) ศึกษาการบำบัดไนเทรตด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันในสภาวะที่แปรเปลี่ยนแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน 4 ชนิด ได้แก่ เมทานอล อะซิติก กากน้ำตาล และแป้งที่ผ่านการย่อย โดยออกแบบถังดีไนทริฟิเคชันให้มีความจุน้ำปริมาตร 1.89 ลบ.ม. ภายในบรรจุตัวกลางพลาสติกโพลีเอทิลีนปริมาตร 1 ลบ.ม. จากนั้นผ่านน้ำเสียจากถังไนทริฟิเคชันเข้าบริเวณทางด้านล่างของถังดีไนทริฟิเคชันด้วยอัตราการไหล 10 ลิตร/นาที ผลการทดลองพบว่าสารอินทรีย์คาร์บอนทั้ง 4 ชนิดมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนเทรตในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไนเทรตขาเข้าในช่วง 11-57 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่ไม่แตกต่างกัน โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมคือ 2:1 1.7:1 2.5:1 และ 2.5:1 ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาในด้านค่าใช้จ่ายพบว่าการน้ำตาลมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด แต่ยังต้องแก้ไขปัญหาในเรื่องของแอมโมเนียที่ตกค้างอยู่ในน้ำที่เกิดขึ้นจากกากน้ำตาลและความขุ่น

Matos และคณะ (2009) ศึกษาการบำบัดไนเทรตจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มด้วยถังบำบัดชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange membrane bioreactor) ในสภาวะที่ใช้เอทานอลเป็นแหล่งคาร์บอน จากผลการทดลองพบว่า ถังปฏิกรณ์ดังกล่าวสามารถบำบัดไนเทรตให้ลดลงได้จากความเข้มข้น 251-380 มก.ไนโตรเจน/ล. เหลือความเข้มข้นที่ต่ำกว่า 27 มก.ไนโตรเจน/ล. เมื่อมีการใช้คลอไรด์เป็นตัวแลกเปลี่ยนอิออน

Srinu และ Pydi (2011) ศึกษาการบำบัดไนเทรตด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed bio-reactor) ที่มีการใช้ Polypropylene beads เป็นวัสดุตัวกลางสำหรับตรึงเชื้อ *Pseudomonas stutzeri* เติมอากาศที่บริเวณด้านล่างถังปฏิกรณ์เพื่อให้ Polypropylene beads ที่มีความหนาแน่นต่ำเกิดการลอยอยู่ที่บริเวณด้านบน ทำการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของไนเทรตเริ่มต้น 300 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยแปรค่าอัตราการเติมอากาศ (air flow rate) เข้าระบบแตกต่างกันในช่วง 2 – 3.5 ล./นาที

ควบคุมอุณหภูมิคงที่ระหว่าง 20 - 30 °ซ ใช้เมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในช่วงความเข้มข้น 70-85 มก./ล. ใช้ Polypropylene beads 5-25 มก./ล. และพีเอชในช่วง 6-8 ผลการทดลองพบว่าอัตราดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นในสภาวะที่เหมาะสมที่มีอัตราการเติมอากาศ 2.5 ล./นาที อุณหภูมิ 30 °ซ สารอินทรีย์คาร์บอนความเข้มข้น 85 มก./ล. Polypropylene beads 15 มก./ล. และพีเอชเท่ากับ 7 โดยไนเทรตสามารถถูกบำบัดได้มากกว่าร้อยละ 95

2.7.3 การบำบัดไนโตรเจนด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน

ศิริวรรณ ศิลาภากุล (2545) ศึกษาการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกที่มีการไหลวนแบบภายนอก ทำการทดลองโดยถังปฏิกรณ์ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่มีการให้อากาศกับส่วนที่ไม่มีอากาศ ซึ่งทั้งสองส่วนมีการบรรจุพลาสติกไบโอบอลเพื่อเป็นวัสดุตรึงแบคทีเรีย จากการทดลองพบว่า ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกนี้สามารถบำบัดสารประกอบไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์ มีการเกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันพร้อมกัน มีอัตราการเกิดไนทริฟิเคชันอยู่ในช่วง 0.06 - 0.87 ก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน และอัตราการเกิดดีไนทริฟิเคชันอยู่ในช่วง 0.01-0.08 ก.ไนเทรตไนโตรเจน/ตร.ม./วัน

รุ่งนภา สุทธิศรี (2549) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับการเลี้ยงกุ้งความหนาแน่นสูงในโรงเรือน ทำการทดลองโดยระบบประกอบด้วยบ่อเลี้ยงมีความจุน้ำ 3,000 ลิตร ระบบกรองตะกอน ระบบแยกตะกอนโปรตีนและไขมัน บ่อบำบัดไนทริฟิเคชันที่มีตัวกรอง Biopolymar™ และระบบบำบัดไนเทรตแบบท่อยาวที่สร้างขึ้นจากท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ความยาว 50 เมตร ภายในบรรจุไบโอบอล มีการเติมเมทานอลเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอน มีการติดตั้งหัวตรวจวัดค่าศักย์ออกซิเดชัน – รีดักชันเพื่อควบคุมการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันแบบอัตโนมัติ จากการทดลองพบว่า ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดนี้สามารถควบคุมคุณภาพน้ำให้อยู่ในสภาพที่ดีได้ตลอดการเลี้ยงโดยที่ไม่ต้องทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำและสามารถหมุนเวียนนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ได้สำหรับการเลี้ยงในรอบต่อไป

เอกชัย มาลาพล (2551) ศึกษาประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันในการควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้ง ทำการทดลองโดยใช้ตัวกรองชีวภาพ Biocord™ มาทำการเตรียมสภาพและนำมาใช้ในการควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้งที่มีการทดลองเลี้ยงกุ้ง 2 รอบ การทดลองรอบแรกใช้ความยาวของตัวกรองชีวภาพ 7 เมตร ไม่มีการ

เปลี่ยนถ่ายน้ำและไม่มีการซักทำความสะอาดตัวกรอง จากการทดลองพบว่า ไม่สามารถควบคุมคุณภาพน้ำให้มีความเหมาะสมได้ และการไม่ซักทำความสะอาดตัวกรองมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียลดลง การทดลองรอบที่ 2 ทำการเพิ่มความยาวของตัวกรองเป็น 24 เมตร และมีการซักทำความสะอาดตัวกรองทุกสัปดาห์ จากการทดลองพบว่า สามารถควบคุมคุณภาพน้ำภายในบ่อเลี้ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการซักทำความสะอาดตัวกรองจะทำให้ตัวกรองมีความพร้อมในการบำบัดตลอดเวลา ส่วนกุ้งมีอัตราการรอดถึงร้อยละ 93 ส่วนการศึกษาความเป็นไปได้ของระบบถังดินเพื่อบำบัดไนเทรต ทำการทดลองโดยใช้ถังบรรจุน้ำเค็มและมีชั้นดินที่ก้นถังความหนา 8 ซม. มีการเปรียบเทียบการใช้เมทานอลและกลูโคสสำหรับเป็นแหล่งคาร์บอนที่มีการแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ผลการทดลองพบว่า การใช้เมทานอลหรือกลูโคสให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน แต่การเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจาก 0.06:1 เป็น 3.3:1 ทำให้อัตราการบำบัดไนเทรตมากขึ้น และเมื่อนำระบบถังดินนี้ไปใช้ในการบำบัดไนเทรตจากบ่อเลี้ยงกุ้งในโรงเรือนพบว่า สามารถควบคุมปริมาณไนเทรตให้มีค่าเท่ากับ 72 มก.ไนโตรเจน/ล. ในครั้งสุดท้ายของการทดลอง

ทยากร สุวรรณรัตน์ (2552) ศึกษาการพัฒนาระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดความหนาแน่นสูงโดยผสมผสานตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน โดยระบบการทดลองประกอบด้วยบ่อเพาะเลี้ยงสำหรับการอนุบาลลูกปลาวัยอ่อนในโรงเรือนที่มีการบรรจุตัวกรองชีวภาพ Biocord™ ความยาว 30 ซม. ภายในบ่อ ทำการอนุบาลลูกปลาวัยอ่อนระยะเวลา 24 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ พบว่าระบบไม่สามารถควบคุมคุณภาพน้ำได้ จากนั้นจึงปรับปรุงระบบโดยแยกตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันออกมาจากบ่อเลี้ยงและบรรจุลงในถังอีกใบที่มีการเพิ่มผ้ากรองไนลอนตาถี่สำหรับแยกตะกอน พบว่าระบบสามารถควบคุมคุณภาพน้ำได้เป็นอย่างดีตลอดระยะเวลาการเพาะเลี้ยง 24 วัน เมื่อทดลองทำการประเมินประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในการเพาะเลี้ยงปลาขนาดตลาดในโรงเรือน ด้วยระบบที่ประกอบด้วยบ่อเพาะเลี้ยงที่มีตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันภายในบ่อและระบบดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว ผลการทดลองพบว่า สามารถควบคุมคุณภาพน้ำได้ทั้งปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตโดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดระยะเวลาการทดลอง และมีอัตราการรอดของปลาอยู่ที่ร้อยละ 92

Chu และ Wang (2011) ศึกษาการกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านกระบวนการเอสเอ็นดี (Simultaneous nitrification and denitrification; SND) ด้วยถังปฏิกรณ์

แบบตัวกลางเคลื่อนที่ (Moving bed bioreactor) ซึ่งภายในบรรจุเม็ดโพลีเมอร์ย่อยสลายได้ชนิด PCL หรือ Polycaprolactone เป็นตัวกลางเพื่อก่อให้เกิดการยึดเกาะของกลุ่มแบคทีเรียเป็นไบโอฟิล์ม และใช้เป็นสารอินทรีย์คาร์บอนให้กับระบบ ผลการศึกษาพบว่า ระบบสามารถบำบัดไนโตรเจนได้ร้อยละ 74.6 โดยมีระยะเวลาในการกักน้ำ (Hydraulic retention time) ประมาณ 18.5 ชั่วโมง และ PCL มีประสิทธิภาพในการก่อให้เกิดไบโอฟิล์มของกลุ่มแบคทีเรียและเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนสำหรับกระบวนการเอสเอ็นดี เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ช้ากว่าการใช้สารละลายที่สามารถถูกออกซิไดส์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างรวดเร็วภายในขั้นตอนแรกที่มีการเติมอากาศ โดยปริมาณของ PCL ที่สามารถบำบัดไนโตรเจนได้เท่ากับ 1.27 กรัม PCL/กรัมไนโตรเจน

Kern และ Boopathy (2012) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งด้วยระบบบำบัดชนิดเอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor; SBR) ที่มีการบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) ด้วยกระบวนการหลายขั้นตอนที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์เดียว โดยมีการบำบัดแอมโมเนียในสภาวะที่มีอากาศก่อนและบำบัดไนเทรตต่อด้วยสภาวะที่ไร้อากาศที่มีการเติมกากน้ำตาลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนด้วยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 10:1 จากผลการทดลองพบว่า ระบบ SBR มีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตมากกว่าร้อยละ 95

สรุปประเด็นสำคัญจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1) การบำบัดไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันสามารถช่วยลดความเป็นพิษของแอมโมเนียที่มีผลต่อสัตว์น้ำได้ด้วยการเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไนเทรตซึ่งมีความเป็นพิษน้อยกว่า โดยหากมีไนเทรตความเข้มข้นสูงสะสมอยู่ในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลานานก็ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำได้เช่นกัน จะมีผลทำให้สัตว์น้ำบริโภคอาหารลดลง เจริญเติบโตช้า เกิดความเครียด อัตราการเจริญพันธุ์ลดลง สัตว์น้ำอ่อนแอ ความต้านทานโรคลดลง และอาจถึงตายได้ และถ้าปล่อยน้ำที่มีไนเทรตความเข้มข้นสูงลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะส่งผลทำให้พืชน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วจนทำลายระบบนิเวศน์ในแหล่งน้ำได้ จึงต้องมีการพัฒนาระบบบำบัดไนเทรตด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันขึ้น โดยนำส่วนบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันไปใช้ร่วมกันในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อให้การบำบัดไนโตรเจนเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์และช่วยลดปัญหาการสะสมของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตที่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำได้ ซึ่งระบบบำบัดไนทริฟิเคชันและระบบบำบัดดีไนทริฟิเคชันที่ทำการศึกษากันมีหลายรูปแบบและยังคงมีการพัฒนาอยู่เรื่อยๆ เพื่อเป็นแนวทางเลือกในการนำไป

ประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับการเลี้ยงสัตว์น้ำรูปแบบต่างๆ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบแต่ละรูปแบบขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ปริมาณของแอมโมเนียและไนเทรตที่เข้าสู่ระบบ รูปแบบและความสามารถของระบบในการบำบัด ลักษณะของน้ำเสีย ค่าลงทุนก่อสร้างระบบ ค่าดำเนินการดูแลและบำรุงรักษา และขนาดของพื้นที่ที่ใช้ในการติดตั้งระบบ เป็นต้น

2) การบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันและการบำบัดไนเทรตต่อด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันมักดำเนินการด้วยระบบตัวกรองชีวภาพ เนื่องจากมีประสิทธิภาพดี ควบคุมระบบง่าย และมีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ งานวิจัยส่วนใหญ่จึงสนใจทำการศึกษาเพื่อให้ได้วัสดุตัวกลางชนิดต่างๆ ที่มีความเหมาะเพื่อใช้เป็นตัวกรองชีวภาพในระบบบำบัด โดยวัสดุตัวกลางที่ดีควรมีพื้นที่ผิวมากพอสำหรับให้จุลินทรีย์ยึดเกาะ นำมาใช้ได้ง่าย ไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ หาง่าย มีอายุการใช้งานที่คงทน และมีราคาที่เหมาะสม โดยวัสดุตัวกลางที่ต่างชนิดกันและพื้นที่ผิวที่แตกต่างกันก็จะทำให้มีอัตราการบำบัดที่แตกต่างกันตามไปด้วย นอกจากนี้ในส่วนของกระบวนการดีไนทริฟิเคชันยังมีการศึกษาถึงชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอนและอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนหรืออัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบในแต่ละรูปแบบ เพื่อเร่งให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งการพิจารณาเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของสารอินทรีย์คาร์บอนที่ทำการเติมลงไปด้วย

3) การบำบัดไนโตรเจนแบบแยกส่วน ที่ประกอบไปด้วยส่วนบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชัน และส่วนบำบัดไนเทรตด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน สามารถควบคุมคุณภาพน้ำภายในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้ดี แต่มีข้อเสียคือ ต้องสิ้นเปลืองพลังงานในการเคลื่อนมวลน้ำด้วยเครื่องสูบน้ำไปยังส่วนบำบัดต่างๆ และต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งบ่อบำบัดมากอีกด้วย

4) ในการเดินระบบเพื่อบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตในถังปฏิกรณ์เดียวยังไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร เนื่องจากปัญหาสภาวะในการควบคุมระบบ เช่น การบำบัดไนโตรเจนผ่านกระบวนการเอสเอ็นดีด้วยถังปฏิกรณ์แบบตัวกลางเคลื่อนที่ ยังมีปัญหาในเรื่องการควบคุมปริมาณออกซิเจนให้เหมาะสมกับการทำงานของฟล็อกในแต่ละชั้น โดยประสิทธิภาพของฟล็อกยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำเสีย รวมทั้งปัญหาการเตรียมฟล็อกให้มีสภาพที่เหมาะสมพร้อมจะทำปฏิกิริยา ส่วนการบำบัดไนโตรเจนด้วยระบบบำบัดแบบเอสบีอาร์สามารถควบคุมให้เกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์เดียวได้ดี แต่ระบบนี้เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีปริมาณน้อยและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการระบบสูง รวมทั้งในการควบคุมการทำงานของระบบต้องใช้ผู้ที่มีความเชี่ยวชาญและประสบการณ์

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

- กระบอกฉีดยา
- ขวดพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำปริมาตร 30 60 และ 120 มล.
- ขวดโหลพลาสติกปริมาตร 1.5 ล.
- เครื่องชั่งน้ำหนักปลา ยี่ห้อ Sartorius รุ่น PT 1200
- เครื่องเติมอากาศ ยี่ห้อ RESUN รุ่น LP 60 และ LP 100
- เครื่องสูบน้ำ
- ตะแกรงเหล็ก
- ตาข่ายไนล่อน
- ตู้กระจกขนาดกว้าง 20 ซม. ยาว 20 ซม. สูง 35 ซม.
- ถังพลาสติกปริมาตร 125 130 และ 500 ลิตร
- ท่อพีวีซีและข้อต่อ
- วัสดุตัวกลางชนิดเส้นใยไบโอคอร์ด
- ปลานิล
- ปั๊มเวียนน้ำ ยี่ห้อ BOYU รุ่น SP-500
- ปั๊มเวียนน้ำ ยี่ห้อ SONIC รุ่น AP2500
- แผ่นโฟม
- พาราฟิล์ม
- แผ่นพลาสติกสำหรับปิดถังปฏิกรณ์และบ่อปลา
- ใยกรองน้ำ
- สายยางพลาสติก
- หัวทรายพ่นอากาศ
- หินพัมมิสบดขนาด 1-3 มม.

- อาหารปลาที่มีปริมาณโปรตีนไม่น้อยกว่าร้อยละ 30
- อุปกรณ์วัดความยาว

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

- กระดาษกรอง Whatman GF/C ขนาด 25 และ 47 มม.
- กระบอกตวง
- กรวยกรองบุคเนอร์
- กรวยอิมฮอพพ์
- ขวดวัดปริมาตร
- ขวดรูปชมพู่
- เครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer)
- เครื่องเขย่าสาร (Vortex Mixer GENIE 2) ยี่ห้อ Scientific Industries รุ่น G560E
- เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP3100s
- เครื่องชั่งสารเคมี 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP210s
- เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ยี่ห้อ BECKMAN COULTER รุ่น Microfuge 16
- เครื่องอ่านค่าบนไมโครเพลท (Microplate reader) ยี่ห้อ BioTek รุ่น PowerWave XS2
- เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO meter) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 9147
- เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 9125
- เครื่องวัดค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP meter) ยี่ห้อ HANNA รุ่น pH 213
- เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Milton Roy รุ่น Spectronic Genesys 5 และ 10 UV scanning
- เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 9147
- ชุดทดสอบแอมโมเนีย ไนไทรต์ คลอรีน และค่าสภาพด่าง ยี่ห้อ AQUA-VBC ของศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ Memmert
- โถดูดความชื้น (Desiccator)
- แท่งแก้วคนสาร
- บิวเรต

- บีกเกอร์
- ปิเปต
- ไมโครปิเปต
- หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ยี่ห้อ HIRAYAMA รุ่น HICLAVE HVE-50
- หลอดทดลอง
- หลอดหยด
- Syringe filter holder สำหรับกรองน้ำ

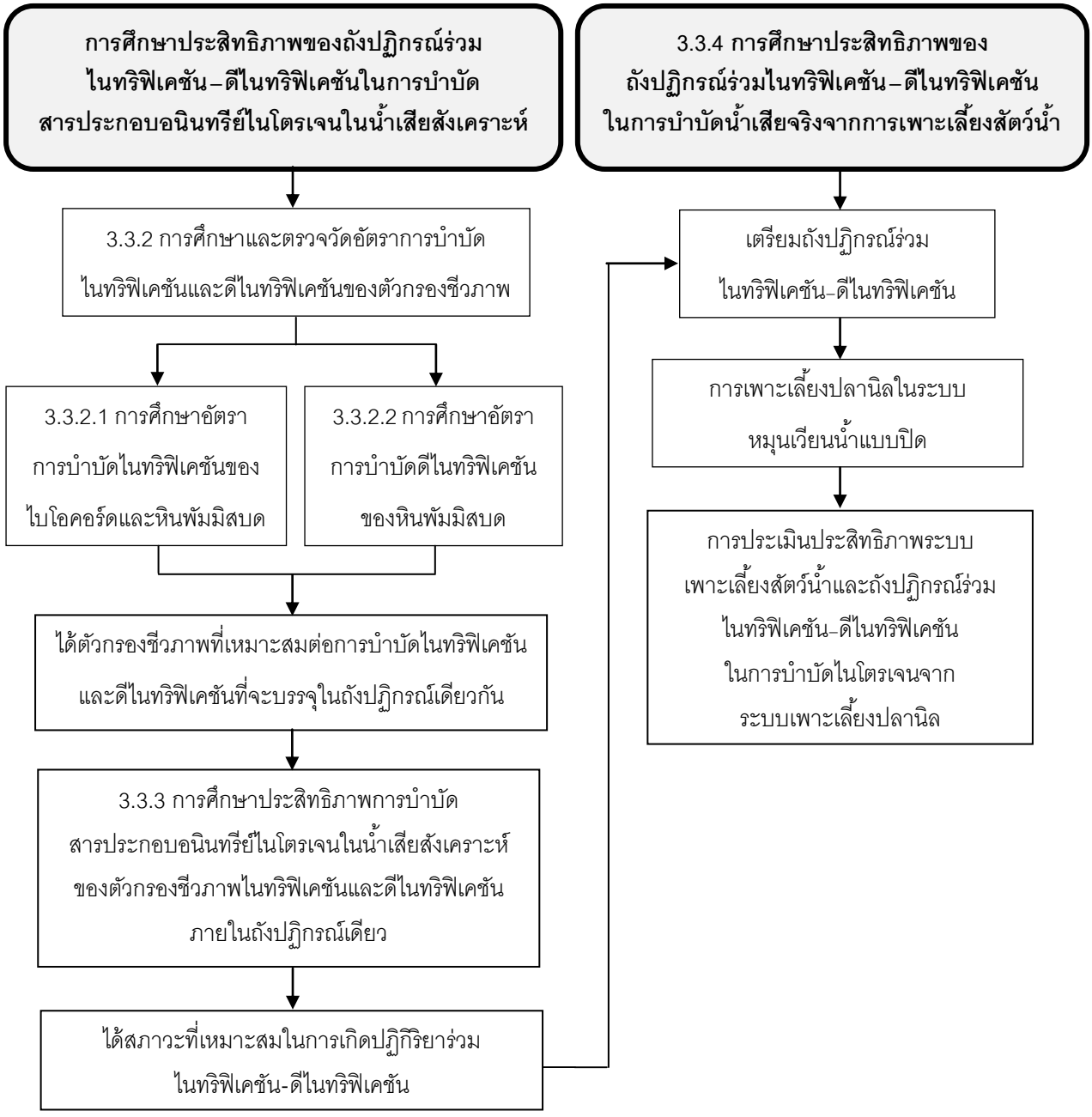
3.1.3 สารเคมี

- 1,10-Phenanthroline monohydrate ($C_{12}H_8N_2.H_2O$)
- Ammonium chloride (NH_4Cl)
- Ammonium heptamolybdate ($(NH_4)_6Mo_7O_{24}\cdot 4H_2O$)
- Ammonium iron (II) sulfate hexahydrate ($(NH_4)_2Fe(SO_4)_2.6H_2O$)
- Ammonium sulfate ($(NH_4)_2SO_4$)
- Boric acid (H_3BO_3)
- Calcium chloride dihydrate ($CaCl_2.2H_2O$)
- Cobalt (II) chloride hexahydrate ($CoCl_2.6H_2O$)
- Copper (II) sulfate pentahydrate ($CuSO_4.5H_2O$)
- De-ionized water (DI)
- Ethanol (C_2H_5OH)
- Hydrochloric acid (HCl)
- Iron (III) chloride ($FeCl_3$)
- Iron (II) sulfate heptahydrate ($FeSO_4.7H_2O$)
- Magnesium sulfate heptahydrate ($MgSO_4.7H_2O$)
- Manganese (II) chloride tetrahydrate ($MnCl_2.4H_2O$)
- Mercury (II) sulphate ($HgSO_4$)
- Methanol (CH_3OH)
- NNED (N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride)
- Phenol (C_6H_5OH)

- Potassium dichromate ($K_2Cr_2O_7$)
- Potassium hydrogen phosphate (KH_2PO_4)
- Potassium nitrate (KNO_3)
- Potassium persulfate ($K_2O_8S_2$)
- Silver sulfate ($AgSO_4$)
- Sodium bicarbonate ($NaHCO_3$)
- Sodium chloride (NaCl)
- Sodium citrate dihydrate ($Na_3C_6H_5O_7.2H_2O$)
- Sodium hydroxide (NaOH)
- Sodium nitrate ($NaNO_3$)
- Sodium nitrite ($NaNO_2$)
- Sodium nitroprusside dihydrate ($Na_2Fe(CN)_5NO.2H_2O$)
- Sodium salicylate ($C_6H_4(OH)COONa$)
- Sodium sulfite (Na_2SO_3)
- Sulfuric acid (H_2SO_4)
- Sulphanilamide ($C_6H_8N_2O_2S$)
- Zinc chloride ($ZnCl_2$)

3.2 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาและประเมินประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันที่มีการบรรจุตัวกรองชีวภาพ ซึ่งแนวทางในการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.1



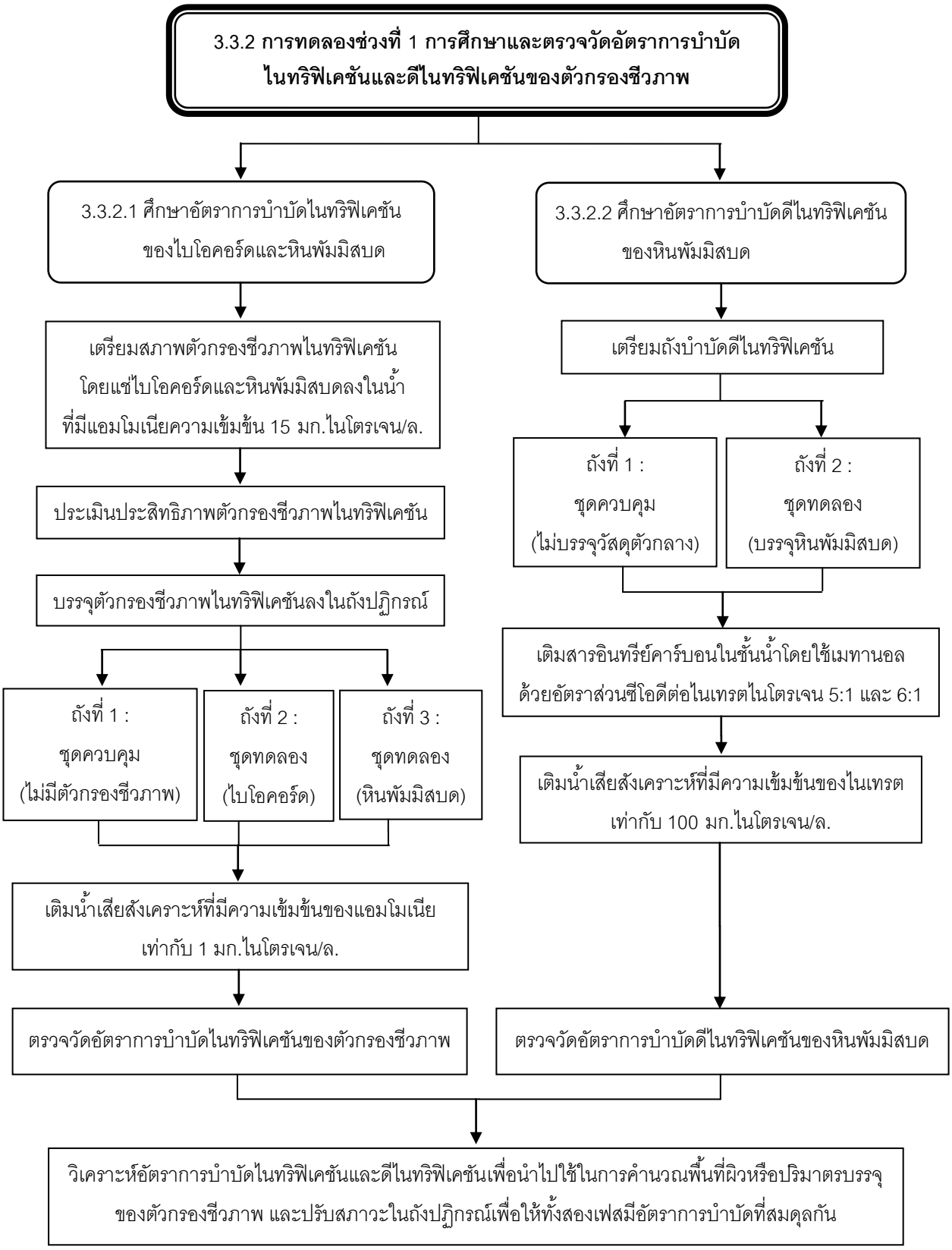
รูปที่ 3.1 แผนผังแนวทางในการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการในระดับทดลอง ที่อุณหภูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

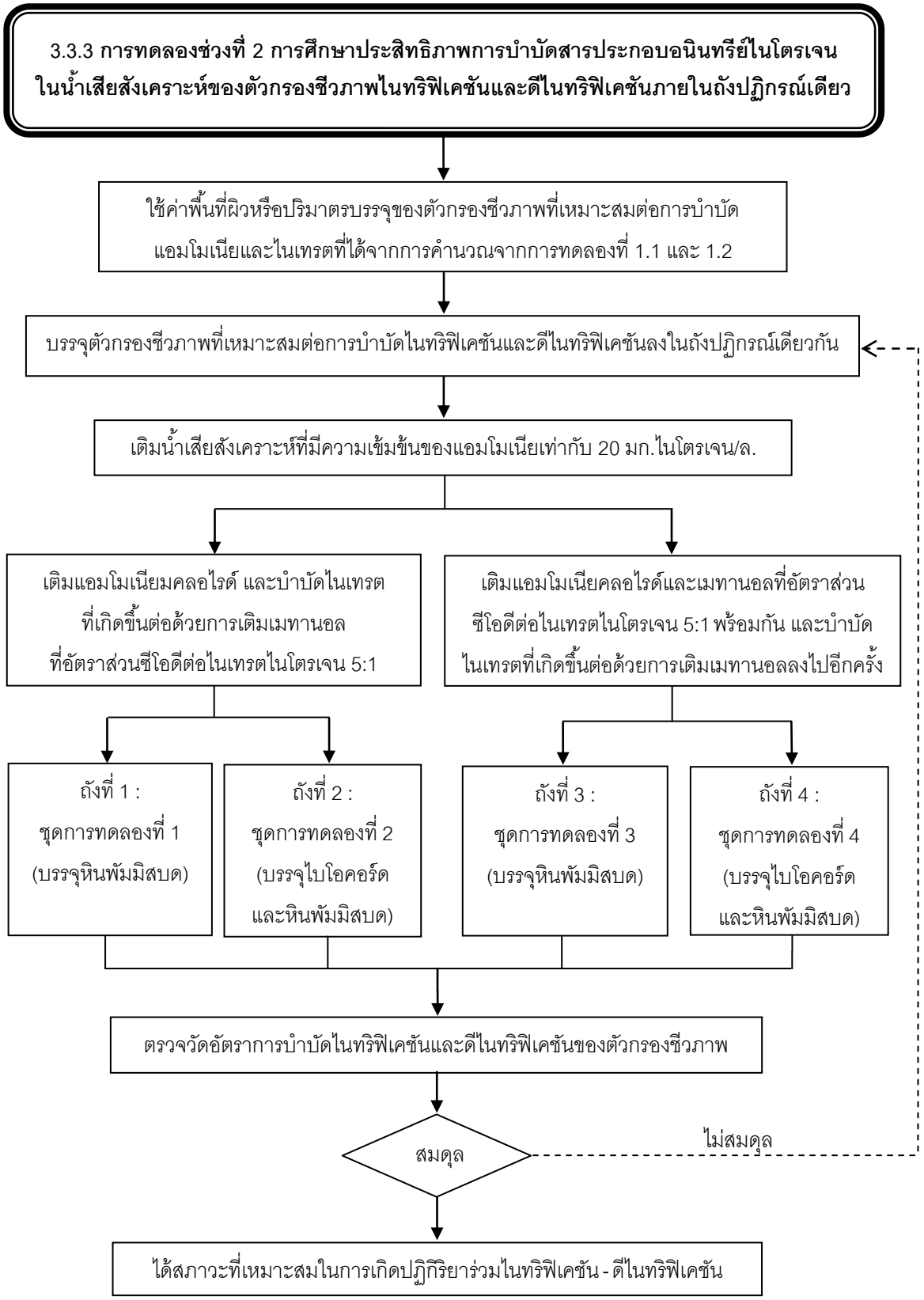
การทดลองช่วงที่ 1 เป็นการศึกษาและตรวจวัดอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ โดยเดินระบบการทดลองแบบแบทช์ และแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การศึกษาอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของวัสดุ 2 ชนิด ได้แก่ ไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด และการศึกษาอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบด ดังมีรายละเอียดการทดลองแสดงด้วยแผนผังรูปที่ 3.2 และในหัวข้อ 3.3.2

การทดลองช่วงที่ 2 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์เดียว โดยเดินระบบการทดลองแบบแบทช์ด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ในสภาวะที่ทำการปรับพื้นที่ผิวหรือปริมาตรบรรจุของตัวกรองชีวภาพให้เหมาะสมต่อการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากผลการทดลองที่ได้ในช่วงที่ 1 เพื่อให้การบำบัดทั้งในส่วนกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพและเกิดการบำบัดอย่างสมดุลกัน ดังมีรายละเอียดการทดลองแสดงด้วยแผนผังรูปที่ 3.3 และในหัวข้อ 3.3.3

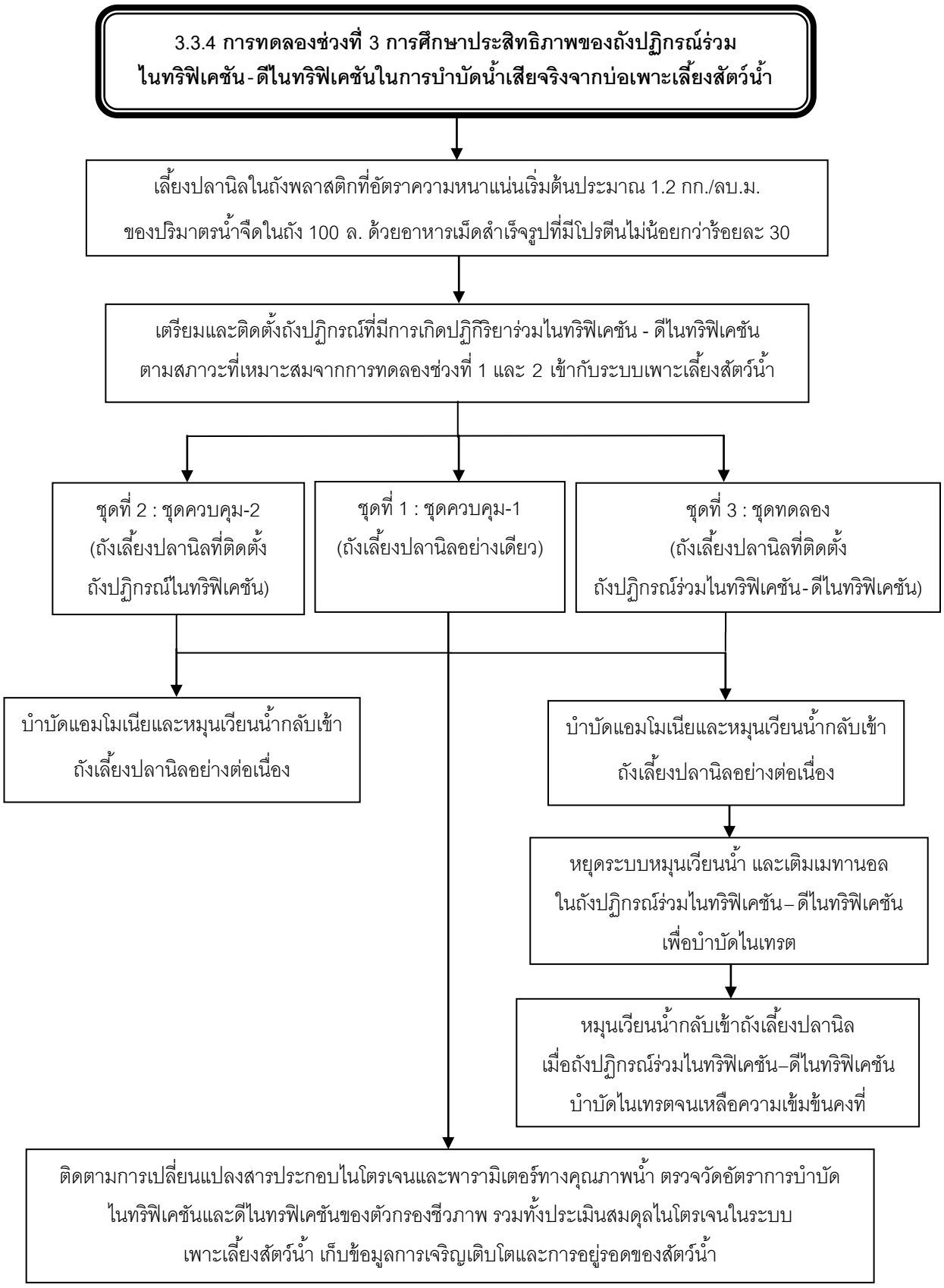
การทดลองช่วงที่ 3 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน - ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงที่เกิดขึ้นจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยทำการติดตั้งถังปฏิกรณ์เข้ากับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจำลองขนาดเล็กที่ดำเนินการด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในถังไร้ดินในโรงเรือน เดินระบบการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่องตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองช่วงที่ 1 และ 2 เพื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน - ดีไนทริฟิเคชัน ดังมีรายละเอียดการทดลองแสดงด้วยแผนผังรูปที่ 3.4 และในหัวข้อ 3.3.4



รูปที่ 3.2 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 1



รูปที่ 3.3 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 2



รูปที่ 3.4 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 3

3.3 การดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมวัสดุตัวกลางก่อนนำมาใช้ในการทดลอง

วัสดุตัวกลาง 2 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ไบโอคอร์ด (Biocord™) และหินพัมมิสบด (Pumice rock) โดยไบโอคอร์ดมีลักษณะเป็นมัดเส้นใยสีขาวที่ผลิตจากเส้นใยสังเคราะห์โพลิโพรพิลีน (Polypropylene) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มม. มีพื้นที่ผิวประมาณ 2.8 ตร.ม./ม. (เอกชัย มาลาพล, 2551; Bishop Water Technologies Inc, 2012: online) แสดงดังรูปที่ 3.5ก ส่วนหินพัมมิสบดเป็นหินภูเขาไฟที่มีรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งขนาดของหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 1 - 3 มม. แสดงดังรูปที่ 3.5ข โดยก่อนนำวัสดุตัวกลางไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดมาใช้งานจะต้องล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปาและนำมาตากแดดหรืออบให้แห้งก่อน

(ก) ไบโอคอร์ด (Biocord™) (ข) หินพัมมิสบด (Pumice rock)

รูปที่ 3.5 วัสดุตัวกลาง 2 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง

3.3.2 การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาและตรวจวัดอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ

การทดลองส่วนนี้เป็นการศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตของวัสดุตัวกลาง 2 ชนิด ได้แก่ ไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดที่จะบรรจุลงในถังปฏิกรณ์ใบเดียวกัน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการปรับสภาวะให้การบำบัดด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นอย่างสมดุลและต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพภายในถังปฏิกรณ์เดียว โดยทำการทดลองแบบแบทช์และแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วน โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.2.1 การศึกษาอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด

การทดลองนี้เป็นการศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียของวัสดุตัวกลาง 2 ชนิด ได้แก่ ไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด เริ่มจากนำวัสดุตัวกลางมาบ่มเพาะเชื้อเพื่อทำให้เกิดการเกาะติดของเชื้อไนทริฟายอิงแบคทีเรียตามธรรมชาติบนพื้นผิวก่อนเป็นเวลาอย่างน้อย 45 วัน จากนั้นทดสอบประสิทธิภาพและนำตัวกรองชีวภาพไปบรรจุลงในถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันเพื่อตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย ซึ่งมีขั้นตอนในการดำเนินการทดลองดังนี้

- *การเตรียมและปรับสภาพตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน*

ก่อนนำตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันมาใช้งาน จะต้องเตรียมความพร้อมวัสดุตัวกลางก่อนด้วยการบ่มให้เกิดการเกาะติดและเพิ่มจำนวนของเชื้อไนทริฟายอิงแบคทีเรียตามธรรมชาติบนพื้นผิวและในบริเวณรูพรุนของวัสดุตัวกลาง โดยนำวัสดุตัวกลาง 2 ชนิด ได้แก่ ไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดที่เคยผ่านการใช้งานมาแล้วแช่ให้จมตัวลงในถังพลาสติกที่บรรจุน้ำจืดปริมาตร 100 ล. (รูปที่ 3.6) ที่ปรับความเข้มข้นของแอมโมเนียมคลอไรด์เท่ากับ 15 มก.ไนโตรเจน/ล. (ด้วยการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ 5.73 ก.) และเติมอาหารกบเม็ดบดละเอียดที่มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 40 ลงไปจนมีความเข้มข้นไนโตรเจนเทียบเท่ากับ 1.5 มก.ไนโตรเจน/ล. (อาหารกบ 2.34 ก.) การเติมอาหารกบนั้นเพื่อให้เป็นแหล่งสารอาหารและวิตามินเพิ่มเติมสำหรับไนทริฟายอิงแบคทีเรีย (ทยากร สุวรรณรัตน์, 2552; ธนทร ศรีสุข, 2551; เอกชัย มาลาพล, 2551) ให้อากาศอย่างเพียงพอด้วยหัวทรายพ่นอากาศตลอดเวลา โดยควบคุมค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำให้มากกว่า 4 มก./ล. และควบคุมค่าสภาพด่างให้อยู่ในช่วง 100-150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต เดินระบบการทดลองต่อเนื่องเป็นเวลาอย่างน้อย 45 วัน ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกวันเพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต จนเมื่อตรวจพบว่าปริมาณแอมโมเนียในน้ำเริ่มหมดลงจะทำการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์และอาหารกบเม็ดบดละเอียดลงไปใหม่จนมีค่าความเข้มข้นเท่ากับ 15 และ 1.5 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

รูปที่ 3.6 ถังเตรียมและปรับสภาพตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันในการศึกษาอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด

- การประเมินประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน

ทำการประเมินประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการเตรียมและปรับสภาพมาแล้ว เพื่อทดสอบการบำบัดแอมโมเนียผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันในขวดทดลอง โดยแยกบรรจุตัวกรองชีวภาพ 2 ชนิด ได้แก่ ไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดที่ผ่านการเตรียมสภาพและปรับสภาพแล้วลงในขวดพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.5 ซม. สูง 21.5 ซม. (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) สำหรับไบโอคอร์ดตัดให้มีความยาวประมาณ 10 ซม.ต่อขวด (ปริมาตรบรรจุของชิ้นไบโอคอร์ด 159 มล.) แสดงดังรูปที่ 3.7ก ส่วนหินพัมมิสบดบรรจุให้มีความหนาประมาณ 2 ซม.ต่อขวด (ปริมาตรบรรจุของหินพัมมิสบด 173 มล.) แสดงดังรูปที่ 3.7ข จากนั้นเติมน้ำที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. (เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ปริมาณ 0.0057 ก.) ปริมาตร 1.5 ลิตร ปรับค่าสภาพด่างให้อยู่ในช่วง 100 - 150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต และเติมอากาศด้วยหัวทรายพ่นอากาศตลอดเวลาเพื่อควบคุมให้มีค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมากกว่า 4 มก./ล. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ ชั่วโมง และทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตจนกว่าแอมโมเนียจะเกิดการบำบัดหมด จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ

(ก) ไบโอคอร์ด (ข) หินพัมมิสบด

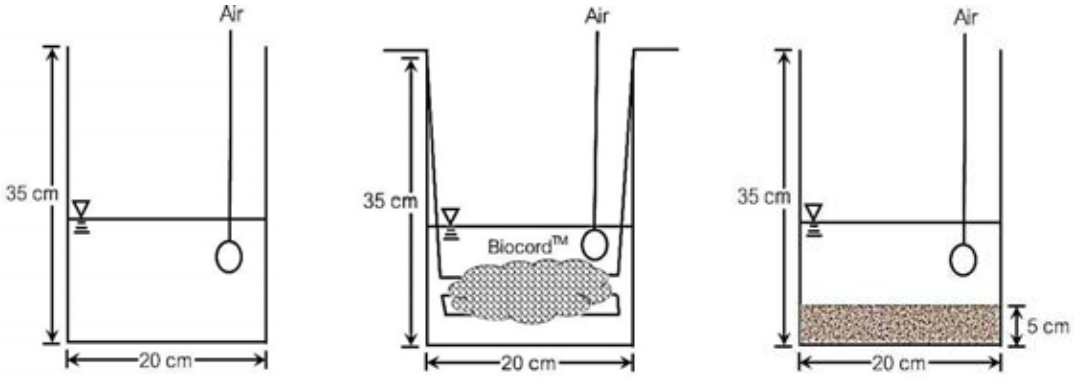
รูปที่ 3.7 ชุดการทดลองประเมินประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันในการศึกษาอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด

- *การติดตั้งชุดอุปกรณ์และการทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน*

ทำการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลอง 3 ชุด (ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ) ประกอบด้วยชุดควบคุมที่ไม่บรรจุตัวกรองชีวภาพ ชุดทดลองที่บรรจุตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด และชุดทดลองที่บรรจุหินพัมมิสบด แสดงดังรูปที่ 3.8 โดยบรรจุตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการปรับสภาพและตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียแล้วลงในถังปฏิกรณ์ที่ทำจากกระจกใสทรงสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 20 ซม. ยาว 20 ซม. สูง 35 ซม. มีปริมาตรรวมเท่ากับ 14 ล. พื้นที่ถังเท่ากับ 0.04 ตร.ม. โดยไบโอคอร์ดตัดให้มีความยาวประมาณ 30 ซม. (ปริมาตรบรรจุของไบโอคอร์ด 477 มล.) บรรจุและผูกกับลวดอะลูมิเนียมเพื่อถ่วงให้จมอยู่ใต้ผิวน้ำตลอดเวลา (ดังรูปที่ 3.8ข) ส่วนหินพัมมิสบดบรรจุให้เป็นชั้นที่มีความหนาประมาณ 5 ซม. (ปริมาตรบรรจุของหินพัมมิสบด 2,000 มล.) (ดังรูปที่ 3.8ค) ทำการเติมอากาศในถังปฏิกรณ์ทุกถังด้วยหัวทรายพ่นอากาศตลอดเวลา เพื่อควบคุมและรักษาระดับปริมาณออกซิเจนละลายน้ำให้มีค่ามากกว่า 4 มก./ล.

ทำการทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียด้วยการเติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากแอมโมเนียมคลอไรด์ มีความเข้มข้นของแอมโมเนีย 1 มก.ไนโตรเจน/ล. (เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.0191 ก.) ปริมาตร 5 ล. ลงในถังปฏิกรณ์ เดินระบบการทดลองแบบแบทช์ทั้งสามชุดการทดลองควบคู่กัน เก็บตัวอย่างน้ำจากแต่ละถังปฏิกรณ์เพื่อตรวจวัดอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชัน โดยเก็บน้ำทุกชั่วโมงจนกว่าแอมโมเนียจะเกิดการบำบัดหมด เมื่อตรวจพบว่าปริมาณแอมโมเนียหมดลงจะทำ

การถ่ายน้ำออกและเติมน้ำที่มีแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ปริมาตร 5 ล. ลงไปใหม่ เพื่อทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และค่าสภาพด่างของน้ำ ตามรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 3.1 จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณอัตราการลดลงของแอมโมเนีย โดยรายละเอียดของตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.2



(ก) (ข) (ค)

(ก) (ค)

(ข)

รูปที่ 3.8 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันในการศึกษาอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด

(ก) ชุดควบคุม (ไม่บรรจุตัวกรองชีวภาพ)

(ข) ชุดทดลอง (บรรจุไบโอคอร์ดความยาว 30 ซม.)

(ค) ชุดทดลอง (บรรจุหินพัมมิสบดหนา 5 ซม.)

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในระหว่างการศึกษาอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์ / เครื่องมือวิเคราะห์	ความถี่ในการวิเคราะห์
แอมโมเนีย (NH_4^+ - N)	Colorimetric and Spectrophotometric method (ดัดแปลงจาก Strickland และ Parsons,1972)	ทุกชั่วโมง
ไนไทรต์ (NO_2^- - N)	Colorimetric and Spectrophotometric method (ดัดแปลงจาก Strickland และ Parsons,1972)	ทุกชั่วโมง
ไนเทรต (NO_3^- - N)	Ultraviolet Spectrophotometric method (APHA และคณะ, 2005)	ทุกชั่วโมง
ค่าสภาพด่าง (Alkalinity)	Test kit (AQUA-VBC ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)	ทุก 4 ชั่วโมง
อุณหภูมิ (Temperature)	Thermometer (HANNA, HI9147)	ทุก 4 ชั่วโมง
ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO)	DO meter (HANNA, HI9147)	ทุก 4 ชั่วโมง
พีเอช (pH)	pH meter (HANNA, HI9125)	ทุก 4 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรในการศึกษาอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด

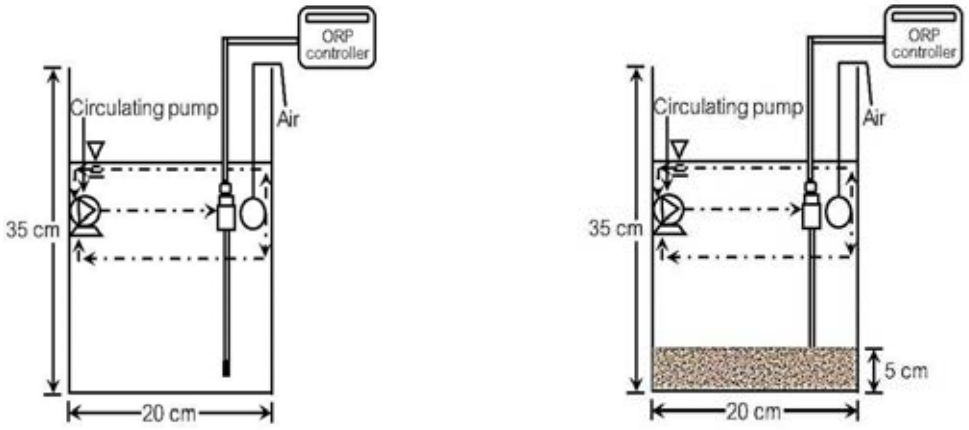
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. วัสดุตัวกลางในถังปฏิกรณ์	- ไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ความเข้มข้นของแอมโมเนีย	- 1 มก.ไนโตรเจน/ล.
2. ความยาวของไบโอคอร์ด	- 30 ซม.
3. ความหนาของชั้นหินพัมมิสบด	- 5 ซม.
4. ระยะเวลาในการเดินระบบ	- จนกว่าแอมโมเนียจะถูกบำบัดหมด
ตัวแปรตาม	**พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์**
1. ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของวัสดุตัวกลาง	- แอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต
2. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ	- อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และค่าสภาพด่าง

3.3.2.2 การศึกษาอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบด

การทดลองนี้เป็นการศึกษาและทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดไนเทรตของหินพัมมิสบดในถังดีไนทริฟิเคชัน เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับนำไปวิเคราะห์ร่วมกับการทดลองที่ 1.1 ในการคัดเลือกตัวกรองชีวภาพที่เหมาะสมที่จะบรรจุลงในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชัน การทดลองนี้ทำโดยติดตั้งและประกอบอุปกรณ์สำหรับการทดลอง 2 ชุด (ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ) ได้แก่ ชุดควบคุมที่ไม่บรรรจุวัสดุตัวกลาง และชุดทดลองที่บรรจุหินพัมมิสบด โดยบรรจุหินพัมมิสบดเป็นชั้นหนาประมาณ 5 ซม. ลงในถังปฏิกรณ์ที่ทำจากกระจกใสทรงสี่เหลี่ยม ขนาดกว้าง 20 ซม. ยาว 20 ซม. สูง 35 ซม. มีปริมาตรรวมเท่ากับ 14 ล. พื้นที่ถังเท่ากับ 0.04 ตร.ม. ที่บริเวณด้านบนของถังปฏิกรณ์มีการติดตั้งปั๊มเวียนน้ำขนาดเล็ก โดยมีวาล์วเพื่อช่วยควบคุมให้น้ำที่ออกมาเกิดการไหลวนในถังอย่างช้าๆ และไม่รบกวนชั้นวัสดุที่ก้นถัง ทำการเติมอากาศด้วยหัวทรายพ่นอากาศเมื่อตรวจพบว่ามีค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำกว่า 1 มก./ล. เพื่อป้องกันการเน่าเสียของน้ำและลดความเสี่ยงต่อการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้ระบบล้มเหลวได้ ติดตั้งชุดอุปกรณ์วัดค่าศักย์ออกซิเดชัน – รีดักชัน (โออาร์พี) เพื่อใช้ตรวจสอบการเกิดสภาวะดีไนทริฟิเคชันด้วยการจุ่ม

หัววัดลงในชั้นน้ำและในชั้นหินลึกประมาณ 2.5 ซม. ทุกวัน (ชลธิชา พลายชุม, 2553) ซึ่งการติดตั้งชุดอุปกรณ์และวัสดุการทดลองสำหรับถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันแสดงดังรูปที่ 3.9

ในช่วง 4 สัปดาห์แรกของการทดลองจะทำการบ่มเชื้อเพื่อให้ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียเติบโตเพิ่มจำนวนบนพื้นผิวของหินพัมมิสบดก่อน ด้วยการเติมโพแทสเซียมไนเทรตความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. เติมอาหารกุ้งบดละเอียดที่มีโปรตีนร้อยละ 32 ความเข้มข้น 1 มก.ไนโตรเจน/ล. เพื่อเป็นสารอาหาร แร่ธาตุ และวิตามินเพิ่มเติมที่ช่วยให้แบคทีเรียเจริญเติบโตได้ดี และทำการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ลงไปเป็นระยะๆ จนกว่าไนเทรตจะถูกบำบัดเหลือในปริมาณต่ำกว่า 20 มก.ไนโตรเจน/ล. จากนั้นทำการทดสอบอัตราการบำบัดไนเทรตด้วยการเติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 8 ล. ที่เตรียมจากโพแทสเซียมไนเทรต โดยมีความเข้มข้นของไนเทรต 100 มก.ไนโตรเจน/ล. (เติมโพแทสเซียมไนเทรต 5.77 ก.) ลงในถังปฏิกรณ์ และเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนลงในชั้นน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1 (เติมเมทานอล 3.4 และ 4.0 มล. ตามลำดับ) เพื่อเร่งให้เกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเดินระบบการทดลองแบบแบทช์ (ชลธิชา พลายชุม, 2553) จากนั้นทำการทดลองต่อเนื่องและเมื่อตรวจพบว่าไนเทรตถูกบำบัดจนเหลือในปริมาณคงที่จะทำการถ่ายน้ำออกและเปลี่ยนน้ำใหม่ เพื่อทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง เก็บตัวอย่างน้ำจากถังปฏิกรณ์เพื่อตรวจวัดอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำ ได้แก่แอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช ค่าศักย์ออกซิเดชัน -รีดักชัน ซีโอดี และค่าสภาพด่างของน้ำ ตามรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 3.3 และรายละเอียดของตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.4



(ก) (ข)

(ก)

(ข)

รูปที่ 3.9 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชันในการศึกษาอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบด

(ก) ชุดควบคุม (ไม่บรรจุวัสดุตัวกลาง)

(ข) ชุดทดลอง (บรรจุหินพัมมิสบด)

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในการศึกษาอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบด

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์ / เครื่องมือวิเคราะห์	ความถี่ในการวิเคราะห์
แอมโมเนีย (NH_4^+ - N)	Colorimetric and Spectrophotometric method (ดัดแปลงจาก Strickland และ Parsons,1972)	ทุกวัน
ไนไทรต์ (NO_2^- - N)	Colorimetric and Spectrophotometric method (ดัดแปลงจาก Strickland และ Parsons,1972)	ทุกวัน
ไนเทรต (NO_3^- - N)	Ultraviolet Spectrophotometric method (APHA และคณะ, 2005)	ทุกวัน
ค่าสภาพด่าง (Alkalinity)	Test kit (AQUA-VBC ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)	ทุกวัน
อุณหภูมิ (Temperature)	Thermometer (HANNA, HI9147)	ทุกวัน
ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO)	DO meter (HANNA, HI9147)	ทุกวัน
พีเอช (pH)	pH meter (HANNA, HI9125)	ทุกวัน
ซีโอดี (COD)	Closed Reflux (APHA และคณะ, 2005)	ทุกวัน
ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP)	ORP meter (HANNA, pH 213)	ทุกวัน

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการศึกษาอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบด

ตัวแปรอิสระ	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. วัสดุตัวกลางในถังปฏิกรณ์	- มีและไม่มีการบรรจุหินพัมมิสบด
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ความเข้มข้นของไนเทรต	- 100 มก.ไนโตรเจน/ล.
2. ความหนาของชั้นหินพัมมิสบด	- 5 ซม.
3. ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน	- เมทานอล
4. อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจน	- 5:1 และ 6:1
5. ระยะเวลาในการเดินระบบ	- จนกว่าไนเทรตจะถูกบำบัดเหลือในปริมาณคงที่
ตัวแปรตาม	**พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์**
1. ประสิทธิภาพการบำบัดไนเทรตของหินพัมมิสบด	- แอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต
2. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ	- อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช ค่าสภาพด่าง ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน
3. ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในระบบ	- ซีโอดี

3.3.3 การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์เดียว

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการบำบัดไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ของถังปฏิกรณ์ที่มีการบรรจุตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1 ลงในถังปฏิกรณ์ใบเดียวกัน ทำการหาสภาวะและทดสอบประสิทธิภาพเพื่อให้ได้ถังปฏิกรณ์ที่สามารถบำบัดไนโตรเจนด้วยปฏิกิริยาร่วมไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันที่เกิดขึ้นอย่างสมดุลกันภายในถังปฏิกรณ์เดียว โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการทดลองดังนี้

3.3.3.1 การติดตั้งชุดอุปกรณ์และการเตรียมตัวกรองชีวภาพสำหรับถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน

ทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์เหมือนกับการศึกษาอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบด (ในหัวข้อ 3.3.2.2) ด้วยการใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากกระจกใสทรงสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 20 ซม. ยาว 20 ซม. สูง 35 ซม. มีปริมาตรรวมเท่ากับ 14 ล. พื้นที่ถังเท่ากับ 0.04 ตร.ม. การทดลองเริ่มจากการบรรจุหินพัมมิสบดให้มีความหนา 5 ซม. ต่อถังที่บริเวณพื้นก้นถัง และทำการบ่มเชื้อดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียเป็นระยะเวลาประมาณ 3 สัปดาห์ก่อนเริ่มการทดลอง ด้วยการเติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการเติมสารอาหารและแร่ธาตุเพิ่มเติมสำหรับแบคทีเรีย ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.5 และเติมโพแทสเซียมไนเทรตที่มีความเข้มข้นของไนเทรต 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ปริมาตร 8 ล. ลงในถังปฏิกรณ์ เติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนลงในชั้นน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 เป็นระยะจนกว่าจะเหลือไนเทรตในปริมาณต่ำกว่า 20 มก.ไนโตรเจน/ล. จากนั้นทำการบรรจุตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการปรับสภาพและทดสอบประสิทธิภาพแล้วลงในถังปฏิกรณ์ใบเดียวกับหินพัมมิสบดที่ผ่านการบ่มเชื้อมาแล้ว ซึ่งทำการบรรจุด้วยสภาวะและพื้นที่ผิวหรือปริมาตรบรรจุของตัวกรองชีวภาพที่เหมาะสมต่อการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตที่คำนวณได้จากผลการทดลองช่วงที่ 1 โดยตัดไบโอคอร์ดให้มีความยาวที่เหมาะสมต่อถังคือ 1 ม. นำมาบรรจุด้วยการผูกกับลวดอะลูมิเนียมเพื่อถ่วงให้จมอยู่ใต้ผิวน้ำ

ตารางที่ 3.5 สารอาหารและแร่ธาตุเพิ่มเติมที่ใส่ลงในน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (Saliling และคณะ, 2007)

สารเคมี	ความเข้มข้น (มก./ล.)	อิออนหรือธาตุที่เป็นส่วนประกอบ	ความเข้มข้นของอิออนที่เป็นส่วนประกอบ (มก./ล.)
$CaCl_2.2H_2O$	82.90	Ca	22.60
$CoCl_2.6H_2O$	0.40	Co	0.10
$CuSO_4.5H_2O$	0.12	Cu	0.03
$FeCl_3$	0.58	Fe	0.20
KH_2PO_4	52.65	PO_4-P	11.98
		K	15.13
$MgSO_4.7H_2O$	100.45	Mg	9.80
$MnCl_2.4H_2O$	0.32	Mn	0.09
$(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$	0.60	Mo	0.05
		NH_4	0.05
$ZnCl_2$	0.11	Zn	0.05
Na_2SO_3	70.92	SO_4^{2-}	54.08
NaCl	103.40	Cl^-	62.75

3.3.3.2 การทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน - ดีไนทริฟิเคชัน

ทดสอบการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของตัวกรองชีวภาพที่บรรจุในถังปฏิกรณ์เดียวกัน ด้วยการเติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการเติมสารอาหารและแร่ธาตุเพิ่มเติมสำหรับแบคทีเรีย ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.5 และเติมแอมโมเนียความเข้มข้น 20 มก.ไนโตรเจน/ล.ในรูปของแอมโมเนียมคลอไรด์ (เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.61 ก.) ปริมาตร 8 ล. ลงในถังปฏิกรณ์ เติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 (เติมเมทานอล 0.68 มล.) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตระหว่างสภาวะที่ทำการเติมกับไม่เติมเมทานอลลงไปพร้อมกับแอมโมเนียมคลอไรด์ และสภาวะที่เติมเมทานอลเพื่อบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อจาก

กระบวนการไนทริฟิเคชัน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุด (ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ) ดังรูปที่ 3.10 และ 3.11 มีรายละเอียดดังนี้

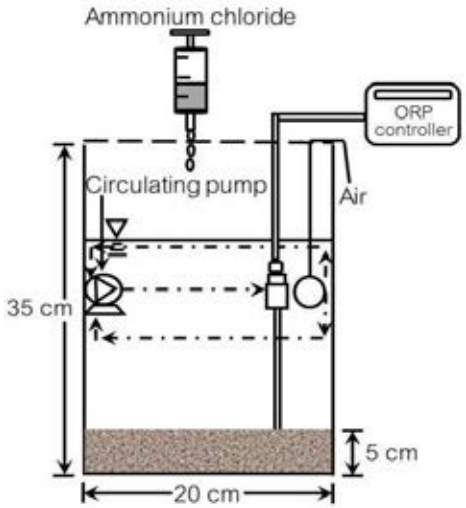
ชุดการทดลองที่ 1 : ถังปฏิกรณ์บรรจุหินพัมมิสบด มีการเติมแอมโมเนียคลอไรด์และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอล

ชุดการทดลองที่ 2 : ถังปฏิกรณ์บรรจุไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด มีการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอล

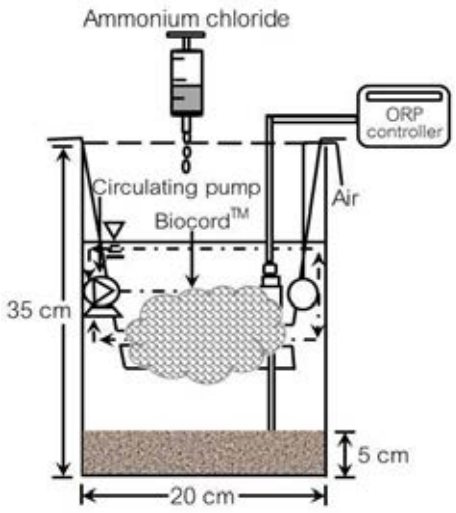
ชุดการทดลองที่ 3 : ถังปฏิกรณ์บรรจุหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์และเมทานอลพร้อมกัน และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอลลงไปอีกครั้ง

ชุดการทดลองที่ 4 : ถังปฏิกรณ์บรรจุไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์และเมทานอลพร้อมกัน และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอลลงไปอีกครั้ง

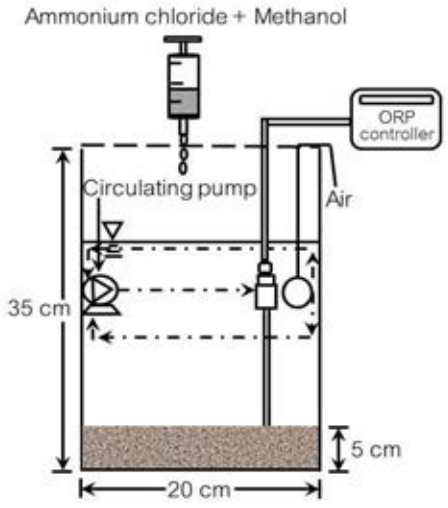
เดินระบบการทดลองแบบแบทช์ และทำการทดลองต่อเนื่องเป็นเวลาประมาณ 100 วัน โดยแบ่งเป็นช่วงของการบ่มเชื้อดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียเป็นระยะเวลาประมาณ 3 สัปดาห์ จากนั้นทำการทดลองเบื้องต้นก่อนในสภาวะที่ไม่มีการปิดฝาถัง ทำการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ทุกชุดการทดลอง แต่ชุดการทดลองที่ 3 และ 4 จะมีการเติมเมทานอลลงไปพร้อมกับแอมโมเนียมคลอไรด์ เมื่อตรวจพบว่าทุกชุดการทดลองเกิดการบำบัดแอมโมเนียผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันด้วยการเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไนเทรตในปริมาณคงที่แล้ว จะทำการบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอลลงไป ซึ่งจากผลการทดลองเบื้องต้นทำให้ทราบว่าต้องควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและลดการไหลเวียนของน้ำในถังให้น้อยที่สุดด้วยการปิดฝาถังปฏิกรณ์ด้วยพลาสติกจึงจะช่วยให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเกิดได้ดีขึ้น (อธิบายรายละเอียดในบทที่ 4 หัวข้อ 4.2) ดังนั้นจึงเริ่มการทดลองใหม่ด้วยการปิดฝาถังปฏิกรณ์ด้วยพลาสติกทุกถังในช่วงท้ายการทดลอง เมื่อตรวจพบว่าไนเทรตเกิดการบำบัดลดลงจนคงที่แล้วจึงทำการถ่ายน้ำออกและเปลี่ยนน้ำใหม่เพื่อทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง เก็บตัวอย่างน้ำจากถังปฏิกรณ์เพื่อตรวจวัดอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ซีโอดี และค่าสภาพด่างของน้ำ ตามรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 3.6 และโดยตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงนี้แสดงดังตารางที่ 3.7



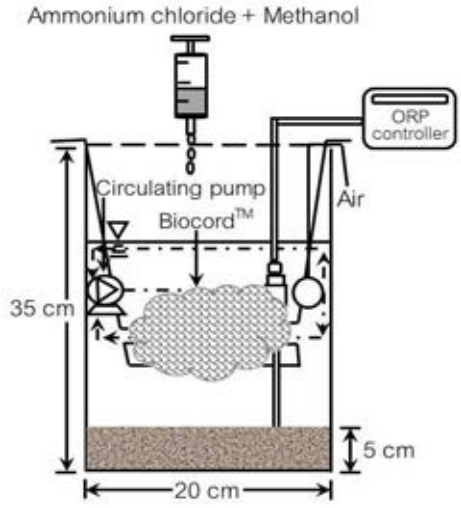
(ก) ชุดการทดลองที่ 1 (บรรจุหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอล)



(ข) ชุดการทดลองที่ 2 (บรรจุไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอล)



(ค) ชุดการทดลองที่ 3 (บรรจุหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์และเมทานอลพร้อมกัน และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอลลงไปอีกครั้ง)



(ง) ชุดการทดลองที่ 4 (บรรจุไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์และเมทานอลพร้อมกัน และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอลลงไปอีกครั้ง)

รูปที่ 3.10 การติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน

(ก) ชุดการทดลองที่ 1
(บรรจุหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอล

(ค) ชุดการทดลองที่ 3
(บรรจุหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์และเมทานอลพร้อมกัน และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอลลงไปอีกครั้ง)

(ข) ชุดการทดลองที่ 2
(บรรจุไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอล)

(ง) ชุดการทดลองที่ 4
(บรรจุไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์และเมทานอลพร้อมกัน และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอลลงไปอีกครั้ง)

รูปที่ 3.11 ชุดการทดลองบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์เดียว

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชัน

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์ / เครื่องมือวิเคราะห์	ความถี่ในการวิเคราะห์
แอมโมเนีย (NH_4^+ - N)	Salicylate–Hypochlorite method (ดัดแปลงจาก Bower และ Holm-Hansen,1980)	ทุกวัน
ไนไทรต์ (NO_2^- - N)	Colorimetric and Spectrophotometric method (ดัดแปลงจาก Strickland และ Parsons,1972)	ทุกวัน
ไนเทรต (NO_3^- - N)	Ultraviolet Spectrophotometric method (APHA และคณะ, 2005)	ทุกวัน
ค่าสภาพด่าง (Alkalinity)	Test kit (AQUA-VBC ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)	ทุกวัน
อุณหภูมิ (Temperature)	Thermometer (HANNA, HI9147)	ทุกวัน
ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO)	DO meter (HANNA, HI9147)	ทุกวัน
พีเอช (pH)	pH meter (HANNA, HI9125)	ทุกวัน
ซีโอดี (COD)	Closed Reflux (APHA และคณะ, 2005)	ทุกวัน
ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP)	ORP meter (HANNA, pH 213)	ทุกวัน

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์เดียว

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. วัสดุตัวกลางในถังปฏิกรณ์	- มีไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด และมีหินพัมมิสบดเท่านั้น
2. การเติมสารอินทรีย์คาร์บอน	- เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ และเติมเมทานอลพร้อมแอมโมเนียมคลอไรด์ - เติมเมทานอลเพื่อบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไนทริฟิเคชัน
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ความเข้มข้นของแอมโมเนีย	- 20 มก.ไนโตรเจน/ล.
2. ความยาวของไบโอคอร์ด	- ค่าจากการทดลองช่วงที่ 1
3. ความหนาของชั้นหินพัมมิสบด	- 5 ซม.
4. ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน	- เมทานอล
5. อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจน	- 5:1
6. ระยะเวลาในการเดินระบบ	- จนกว่าไนเทรตจะเกิดการบำบัดเหลือในปริมาณคงที่
ตัวแปรตาม	**พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์**
1. อัตราการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตและการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน	- แอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต
2. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ	- อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช ค่าสภาพด่าง ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน
3. ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในระบบ	- ซีโอดี

3.3.4 การทดลองช่วงที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

การทดลองนี้ดำเนินการโดยนำถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันที่เตรียมขึ้นตามสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ผ่านมา (การทดลองช่วงที่ 1 และ 2) มาติดตั้งเข้ากับระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตที่เกิดขึ้นจริงจากถังเลี้ยงปลานิล รวมทั้งประเมินประสิทธิภาพระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยทำการเดินระบบการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่องในสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำและมีการหมุนเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่ภายในระบบ รายละเอียดของตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.8 และมีขั้นตอนในการดำเนินการทดลองดังนี้

การทดลองนี้ประกอบไปด้วย 3 ชุดการทดลอง ได้แก่

ชุดการทดลองที่ 1 : ชุดควบคุม-1 ประกอบด้วยถังเลี้ยงปลานิลเพียงอย่างเดียวโดยที่ไม่มีการติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน และไม่มีการนำตะกอนออกจากระบบ ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นและสะสมในถังเลี้ยงปลานิลจะทำหน้าที่ในการช่วยบำบัดแอมโมเนียที่เกิดขึ้นและเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของไนเทรตด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันอย่างต่อเนื่องภายในถังเลี้ยงปลานิล

ชุดการทดลองที่ 2: ชุดควบคุม-2 ประกอบด้วยถังเลี้ยงปลานิลที่เชื่อมต่อเข้ากับถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันที่บรรจุหินพัมมิสบด ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และมีการนำตะกอนออกจากระบบตลอดเวลา โดยหินพัมมิสจะทำหน้าที่บำบัดแอมโมเนียจากบ่อเลี้ยงปลานิลให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไนเทรตอย่างต่อเนื่องด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชัน

ชุดการทดลองที่ 3: ชุดทดลอง ประกอบด้วยถังเลี้ยงปลานิลที่เชื่อมต่อเข้ากับถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันที่เตรียมขึ้นตามสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 และ 2 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ในสภาวะที่มีการนำตะกอนออกจากระบบตลอดเวลา โดยภายในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน - ดีไนทริฟิเคชันจะบรรจุหินพัมมิสบดที่ทำหน้าที่เป็นตัวกรองชีวภาพบำบัดแอมโมเนียจากบ่อเลี้ยงปลานิลให้อยู่ในรูปของไนเทรตด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชัน และบำบัดไนเทรตต่อให้เป็นก๊าซไนโตรเจนด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันอย่างต่อเนื่องภายในชั้นหินพัมมิสบดที่บรรจุในถังเดียวกัน

ตารางที่ 3.8 ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชัน ในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ตัวแปรอิสระ	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. คุณภาพน้ำจากการเลี้ยงปลานิล	- น้ำเสียจากการเลี้ยงปลานิล
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน	- เตรียมโดยใช้วัสดุและสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1 และ 2
2. ชนิดของสัตว์น้ำ	- ปลานิล
3. ความหนาแน่นเริ่มต้นของสัตว์น้ำ	- 1.2 กก./ลบ.ม. (คิดเฉพาะปริมาตรน้ำในถังเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ไม่รวมน้ำในถังปฏิกรณ์)
4. อาหารปลานิล	- อาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีปริมาณโปรตีนไม่น้อยกว่าร้อยละ 30
5. ปริมาณอาหารที่ให้ปลานิล	- ร้อยละ 0-5 ของน้ำหนักตัวปลาต่อวัน
6. ระยะเวลาในการเดินระบบ	- ประมาณ 4 เดือน
ตัวแปรตาม	**พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์**
1. การเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน และประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบไนโตรเจน	- แอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต ไนโตรเจนทั้งหมด
2. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ	- อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช ค่าสภาพด่าง ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน
3. ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในระบบ	- ซีโอดี
4. การเจริญเติบโตและการรอดของสัตว์น้ำ	- นับจำนวน ชั่งน้ำหนัก และวัดความยาว

3.3.4.1 การเตรียมถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันและถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน

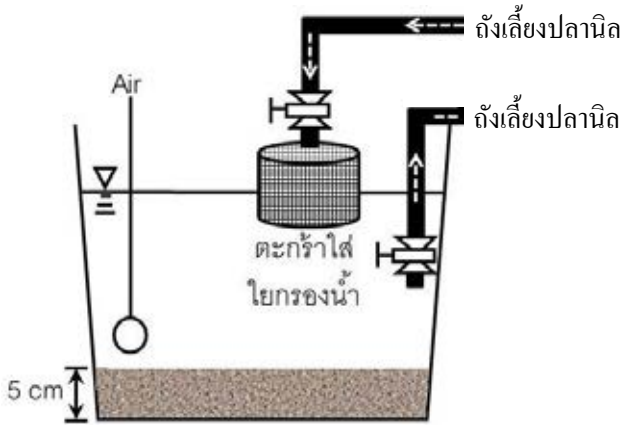
ทำการเตรียมและปรับสภาพตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันที่เหมาะสมจากการทดลองที่ผ่านมา (หัวข้อ 3.3.2 และ 3.3.3) ก่อนนำมาใช้งานเพื่อให้เกิดการเกาะติดและเกิดการเจริญเติบโตของเชื้อไนทริฟายอิงแบคทีเรียตามธรรมชาติบนพื้นผิวและในบริเวณรูพรุนของวัสดุตัวกลาง ซึ่งจากการทดลองเบื้องต้นทำให้ทราบว่าตัวกรองชีวภาพหินพัมมิสเพียงอย่างเดียวสามารถบำบัดได้ทั้งแอมโมเนียและไนเทรตโดยไม่ต้องมีการใส่ตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดเพิ่มลงไป (อธิบายรายละเอียดในบทที่ 4 หัวข้อ 4.2) จึงทำให้ถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันและถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันมีการเตรียมและติดตั้งอุปกรณ์ที่เหมือนกัน โดยนำหินพัมมิสบดที่ผ่านและยังไม่ผ่านการใช้งานมาล้างทำความสะอาด ทำให้แห้ง ทำการปรับสภาพตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันตามวิธีในหัวข้อ 3.3.2.1 เป็นเวลาอย่างน้อย 3 สัปดาห์ โดยบรรจุลงในถังพลาสติกขนาด 500 ล. เติมน้ำจืดปริมาตร 300 ล. (ดังรูปที่ 3.12ก) จากนั้นทำการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์และอาหารกบบดละเอียดที่มีโปรตีนร้อยละ 40 ความเข้มข้น 15 และ 1.5 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ และตรวจวัดปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตของน้ำทุกวัน จากนั้นก่อนเริ่มการทดลองจะนำหินพัมมิสบดที่ผ่านการปรับสภาพแล้วมาประเมินประสิทธิภาพในขวดพลาสติกเพื่อตรวจวัดอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันตามวิธีในหัวข้อ 3.3.2.1 (รูปที่ 3.12ข)

จากนั้นทำการบรรจุหินพัมมิสบดที่ผ่านการปรับสภาพและตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียแล้วให้เป็นชั้นหินหนา 5 ซม. ในถังพลาสติกปริมาตร 130 ล. (คิดเป็นปริมาตรบรรจุของหินพัมมิสบดประมาณ 16 ล.) เติมน้ำจืดปริมาตร 100 ล. ที่บริเวณส่วนบนของถังมีการติดตั้งตะกร้าขนาดเล็กที่ภายในบรรจุใยกรองน้ำเพื่อช่วยกรองตะกอนออกจากน้ำที่ถูกสูบมาจากถังเลี้ยงปลานิลด้วยเครื่องสูบน้ำขนาดเล็กไม่ให้เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ทำการเวียนน้ำกลับเข้าสู่ถังเลี้ยงปลานิลด้วยวิธีกาลักน้ำอย่างต่อเนื่อง โดยถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันจะทำการเติมออกซิเจนด้วยหัวทรายพ่นอากาศตลอดเวลา แต่ถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันจะมีการเติมอากาศเฉพาะเวลาที่ปริมาณออกซิเจนในถังต่ำมากและปิดคลุมถังด้วยพลาสติกใสตลอดเวลาเพื่อลดการแลกเปลี่ยนออกซิเจนจากอากาศภายนอกลงสู่น้ำในถังปฏิกรณ์ (ดังรูปที่ 3.13)

(ก)

(ข)

รูปที่ 3.12 ถังปรับสภาพตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน (ก) และชุดการทดลองประเมินประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน (ข)



(ก)

(ข)

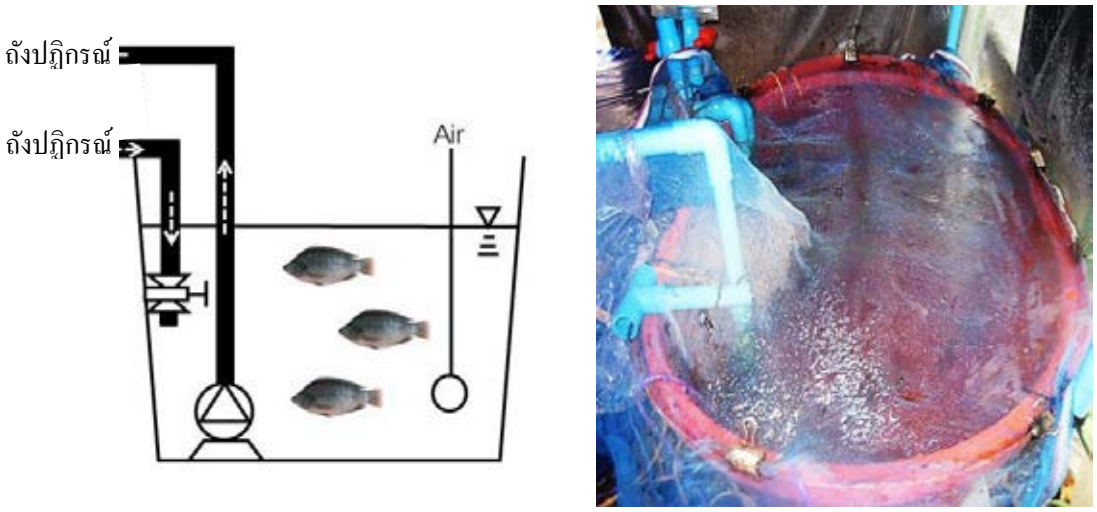
รูปที่ 3.13 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับ

(ก) ถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน (เปิดฝา)

(ข) ถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน (คลุมด้วยผ้าพลาสติก)

3.3.4.2 การเตรียมถังเลี้ยงปลานิล

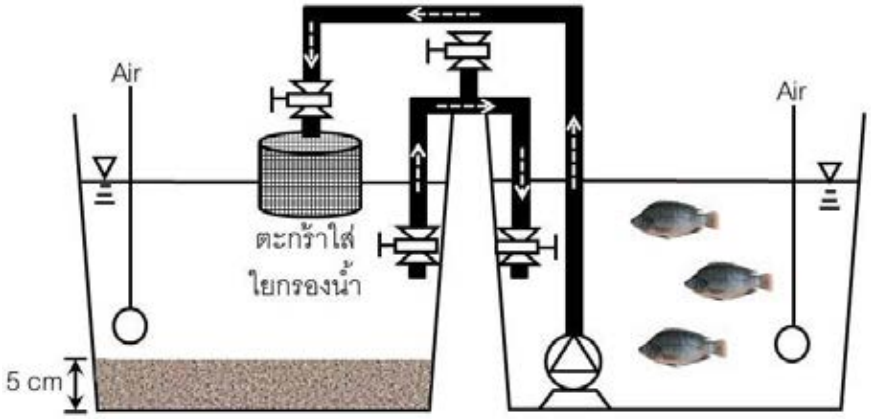
ก่อนทำการทดลองจะทำการเลี้ยงปลานิลในถังพลาสติกที่บรรจุน้ำจืดปริมาตร 500 ล. เพื่อทำการปรับสภาพให้มีความคุ้นเคยกับสิ่งแวดล้อมและการกินอาหารเม็ดสำเร็จรูป จากนั้นคัดเลือกปลานิลที่มีขนาดใกล้เคียงกันและสุขภาพแข็งแรงมาทำการทดลองด้วยการเลี้ยงในถังพลาสติกปริมาตร 125 ล. ที่เติมน้ำจืดปริมาตร 100 ล. ภายใต้สภาวะจำลองของระบบบ่อไร้ดินในโรงเรือน ที่ความหนาแน่นปลาต่อน้ำเริ่มต้นประมาณ 0.6 กก./ลบ.ม. (คิดจากปริมาตรน้ำทั้งหมดที่หมุนเวียนในระบบ) หรือคิดเป็นความหนาแน่นเฉพาะในถังเลี้ยงปลานิลเท่ากับ 1.2 กก./ลบ.ม. (คิดเฉพาะปริมาตรน้ำในถังเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ) โดยทำการเลี้ยงปลานิลบ่อละ 11 ตัว น้ำหนักปลานิลเฉลี่ยเริ่มต้นประมาณ 11.01±2.76 11.02±0.13 และ 11.06±0.06 ก./ตัว สำหรับชุดควบคุม-1 ชุดควบคุม-2 และชุดทดลอง ตามลำดับ ให้อาหารปลานิลด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปยี่ห้อเอราวัณที่มีโปรตีนไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 ด้วยอัตราร้อยละ 0 - 5 ต่อวัน ทั้งนี้ปริมาณการให้อาหารในแต่ละวันนั้นจะปรับปริมาณตามความสามารถในการกินอาหารของปลานิลและตามการเจริญเติบโตหรือการตายของปลานิลภายในถังเลี้ยง โดยภายในถังเลี้ยงปลานิลจะมีการเติมอากาศตลอดเวลาด้วยหัวทรายพ่นอากาศและปิดคลุมปากถังด้วยตาข่ายไนล่อนเพื่อป้องกันปลากระโดดออกจากถัง ส่วนที่บริเวณก้นถังจะติดตั้งปั๊มเพื่อทำการสูบน้ำจากบ่อเลี้ยงปลานิลมายังถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันหรือถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน โดยน้ำจากถังเพาะเลี้ยงปลานิลกับถังปฏิกรณ์ที่ใช้บำบัดไนโตรเจนจะมีการหมุนเวียนกันอยู่ตลอดโดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ



รูปที่ 3.14 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับถังเลี้ยงปลานิล

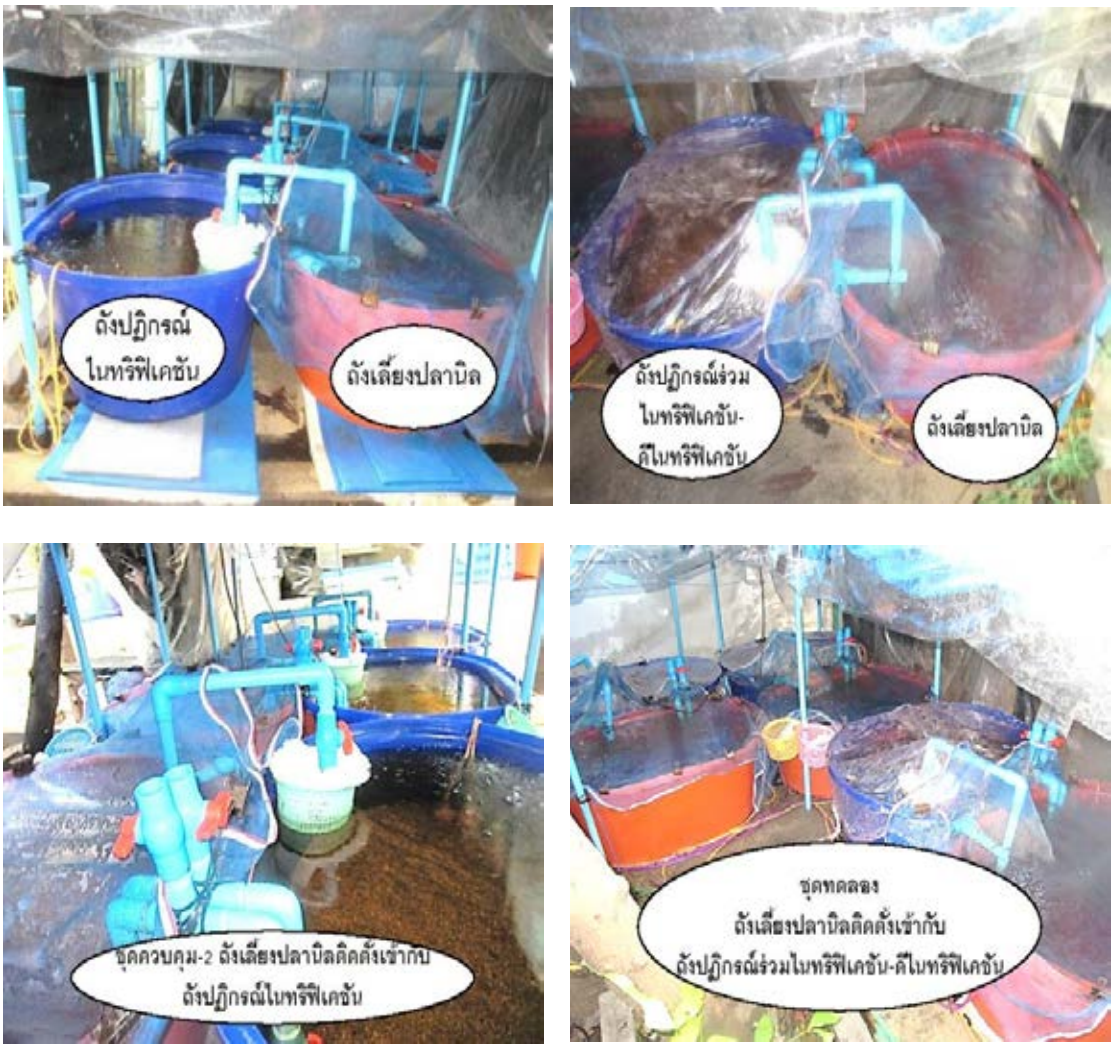
3.3.4.3 การติดตั้งถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันหรือถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน - ดีไนทริฟิเคชันเข้ากับถังเลี้ยงปลานิล

ทำการติดตั้งถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันหรือถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน - ดีไนทริฟิเคชันเข้ากับถังเลี้ยงปลานิล ดังแสดงดังรูปที่ 3.15 และ 3.16 โดยน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลจะถูกสูบเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหลในช่วง 30 – 60 ล./ชม. คิดเป็นอัตราการหมุนเวียนน้ำร้อยละ 360 - 720 ต่อวัน และไหลผ่านใยกรองน้ำเพื่อดักตะกอนก่อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ซึ่งถังปฏิกรณ์ของทั้ง 2 ชุดการทดลองนี้มีการบรรจุตัวกรองชีวภาพหินพัมมิสบดเพียงอย่างเดียว มีการติดตั้งชุดอุปกรณ์และทำหน้าที่เหมือนกัน คือ บำบัดแอมโมเนียจากถังเลี้ยงปลานิลให้อยู่ในรูปของไนเทรตด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันและหมุนเวียนนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับเข้าสู่ถังเลี้ยงปลานิลอย่างต่อเนื่องด้วยวิธีกาลักน้ำ แต่จะแตกต่างกันตรงที่ถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันจะทำหน้าที่เพิ่มเติมคือ ทำการบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน โดยเมื่อปริมาณไนเทรตในระบบเพาะเลี้ยงปลานิลมีความเข้มข้นสูงประมาณ 50 มก.ไนโตรเจน/ล. จะทำการหยุดการหมุนเวียนน้ำและเติมเมทานอลในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ลงไปเพื่อกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันให้ทำการบำบัดไนเทรตต่อไปจนลดลงเหลือในปริมาณคงที่ หลังจากนั้นถ้าตรวจพบว่าถังปฏิกรณ์มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำกว่า 1 มก./ล. จะทำการเติมออกซิเจนเป็นเวลา 1 วันก่อนแล้วจึงทำการหมุนเวียนน้ำกลับบ่อเลี้ยงปลานิลตามปกติด้วยวิธีกาลักน้ำ ทำการทดลองต่อเนื่องเช่นนี้เป็นเวลาประมาณ 120 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำออกนอกระบบเลี้ยง แต่จะมีการเติมน้ำเข้าสู่ระบบเพื่อทดแทนน้ำที่ระเหยและชดเชยปริมาณน้ำที่ถูกเก็บตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์ ควบคุมค่าสภาพด่างทั้งในถังปฏิกรณ์และถังเลี้ยงปลานิลให้อยู่ในช่วง 100 -150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต และในระหว่างการทดลองจะมีการเปลี่ยนใยกรองน้ำทุก 5 วัน หรือเมื่อพบว่าน้ำเกิดการไหลล้นออกมาเนื่องจากตะกอนไปอุดตันใยกรองน้ำมากเกินไป ด้วยการนำใยกรองน้ำมาล้างทำความสะอาดและตากให้แห้งแล้วหมุนเวียนนำกลับไปใช้ใหม่



ถังบำบัดไนโตรเจน ถังเลี้ยงปลานิล

รูปที่ 3.15 การเชื่อมต่อถังปฏิกรณ์เข้ากับถังเลี้ยงปลานิล



รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายของระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด

3.3.4.4 การตรวจวัดคุณภาพน้ำและพารามิเตอร์ต่างๆ ในถังปฏิกรณ์และถังเลี้ยงปลานิล

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำและตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตลอดระยะเวลาการทดลอง ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ ไนเทรต อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ค่าสภาพด่างของน้ำ ซีโอดี ปริมาณตะกอนแขวนลอย และไนโตรเจนทั้งหมด จากนั้นประเมินสมดุลไนโตรเจนในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำร่วมกับการเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตและอัตราการรอดของปลานิล โดยการนับจำนวนของสัตว์น้ำ ชั่งน้ำหนัก และวัดความยาวก่อนการทดลอง ระหว่างการทดลอง และภายหลังการทดลอง ตามรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 3.9-3.12

3.3.4.5 การตรวจวัดอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพที่บรรจุลงในถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันและถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชัน

ทำการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของหินพัมมิสบดก่อนบรรจุลงในถังปฏิกรณ์ส่วนหินพัมมิสบดที่บรรจุในถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันและถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน รวมทั้งตะกอนในถังเลี้ยงปลานิลที่ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์เมื่อสิ้นสุดการทดลอง โดยทำการทดลองเหมือนวิธีที่ผ่านมาในหัวข้อ 3.3.2.1 แสดงดังรูปที่ 3.17 สำหรับการวิเคราะห์อัตราการบำบัดของตะกอนจากบ่อปลานั้นให้ทำการกวนน้ำและตะกอนในบ่อเลี้ยงปลานิลให้เข้ากันแล้วจึงตักน้ำมา 1.5 ล. จากนั้นเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ปริมาณ 0.0057 ก. เพื่อปรับความเข้มข้นให้น้ำมีปริมาณแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเป็นระยะ และตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต จนแอมโมเนียเกิดการบำบัดหมด จากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณหาอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชัน

ส่วนการตรวจวัดอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบดจะทำเมื่อมีการเติมเมทานอล โดยการเก็บตัวอย่างน้ำจากถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันมาวิเคราะห์อัตราการบำบัดไนเทรต จากนั้นนำอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันมาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบและประเมินประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตต่อไป

ตารางที่ 3.9 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์ / เครื่องมือวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่างน้ำ		ความถี่ในการวิเคราะห์
		ถังเลี้ยงปลานิล	ถังปฏิกรณ์	
พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ				
แอมโมเนีย (NH_4^+ - N)	Salicylate – Hypochlorite method (ดัดแปลงจาก Bower และ Holm-Hansen, 1980)	✓	✓	ทุกวัน
ไนไทรต์ (NO_2^- - N)	Colorimetric and Spectrophotometric method (ดัดแปลงจาก Strickland และ Parsons,1972)	✓	✓	ทุกวัน
ไนเทรต (NO_3^- - N)	Ultraviolet Spectrophotometric method (APHA และคณะ, 2005)	✓	✓	ทุกวัน
ซีโอดี (COD)	Closed Reflux (APHA และคณะ, 2005)	✓	✓	- เริ่มต้นการทดลอง
		✓	✓	- ก่อนเติมเมทานอล
			✓ (เฉพาะชุดทดลอง)	- ระหว่างเติมเมทานอลจนบำบัดเหลือไนเทรตในปริมาณคงที่
		✓	✓	- สิ้นสุดการทดลอง

ตารางที่ 3.10 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (ต่อ)

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์ /เครื่องมือวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่างน้ำ		ความถี่ในการวิเคราะห์
		ถังเลี้ยงปลา	ถังปฏิกรณ์	
พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ (ต่อ)				
ไนโตรเจนทั้งหมด (TN)	Ultraviolet Spectrophotometric method	✓		- เริ่มต้นการทดลอง
	(ดัดแปลงจาก Grassholf และคณะ (1999)	✓		- สิ้นสุดการทดลอง
ค่าสภาพด่าง (Alkalinity)	Test kit (AQUA-VBC ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)	✓	✓	ทุกวัน
อุณหภูมิ (Temperature)	Thermometer (HANNA, HI9125)	✓	✓	ทุกวัน
ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO)	DO meter (HANNA, HI9147)	✓	✓	ทุกวัน
พีเอช (pH)	pH meter (HANNA, HI9147)	✓	✓	ทุกวัน

ตารางที่ 3.11 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (ต่อ)

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์ /เครื่องมือวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่างน้ำ		ความถี่ในการวิเคราะห์
		ถังเลี้ยงปลา	ถังปฏิกรณ์	
พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ (ต่อ)				
ค่าศักย์ออกซิเดชัน - รีดักชัน (ORP)	ORP meter (HANNA, pH 213)		✓	ทุกวัน
ตะกอนแขวนลอย (Total Suspended Solid)	Total Suspended Solid Dried at 103 – 105 ℃ (APHA และคณะ, 2005)	✓		ระหว่างการทดลองเป็นระยะ และสิ้นสุดการทดลอง
พารามิเตอร์ทางการเจริญเติบโตของปลานิล				
น้ำหนักปลา (Fish weight)	เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง	✓		- เริ่มต้นการทดลอง
		✓		- ระหว่างการทดลองเป็นระยะ
		✓		- สิ้นสุดการทดลอง
ความยาวปลา (Fish length)	วัดจากปากถึงปลายหางด้วยอุปกรณ์วัดความยาว	✓		- เริ่มต้นการทดลอง
		✓		- ระหว่างการทดลองเป็นระยะ
		✓		- สิ้นสุดการทดลอง

ตารางที่ 3.12 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (ต่อ)

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์ /เครื่องมือวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่างน้ำ		ความถี่ในการวิเคราะห์
		ถังเลี้ยงปลา	ถังปฏิกรณ์	
พารามิเตอร์ทางการเจริญเติบโตของปลานิล (ต่อ)				
อัตราการแลกเนื้อ (FCR: Feed Conversion Ratio)	เปรียบเทียบปริมาณอาหารที่ให้กับน้ำหนักผลผลิตปลารวมทั้งหมด	✓		- สิ้นสุดการทดลอง
อัตราการเติบโตต่อวัน (DWG: Daily Weight Gain)	เปรียบเทียบน้ำหนักปลากับระยะเวลา การเลี้ยง			- เริ่มต้นการทดลอง
		✓		- ระหว่างการทดลองเป็นระยะ
		✓		- สิ้นสุดการทดลอง
อัตราการรอดตาย (Survival rate)	เปรียบเทียบปริมาณปลาในวันเริ่มต้นและวันสุดท้ายของการทดลอง	✓		- เริ่มต้นการทดลอง
		✓		- ระหว่างการทดลองเป็นระยะ
		✓		- สิ้นสุดการทดลอง

รูปที่ 3.17 การตรวจวัดอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

3.3.4.6 การประเมินประสิทธิภาพระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ทำการตรวจวัดอัตราการเติบโตของปลานิลทุกชุดการทดลองตลอดระยะเวลาในการทดลอง โดยการชั่งน้ำหนักและวัดความยาวของปลานิล (รูปที่ 3.18) ช่วงเริ่มต้นการทดลอง ระหว่างการทดลอง และวันสุดท้ายของการทดลอง เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการคำนวณน้ำหนักและความยาวเฉลี่ยของปลานิล คำนวณอัตราการเจริญเติบโตของปลานิลต่อวัน (Daily Weight Grain: DWG) คำนวณอัตราการรอดของปลานิล (Survival rate) และคำนวณอัตราการแลกเนื้อ (Feed Conversion Ratio: FCR) จากสูตรต่างๆ ดังต่อไปนี้

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

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

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

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

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

การชั่งน้ำหนักปลานิล

การวัดความยาวปลานิล

รูปที่ 3.18 การตรวจวัดการเจริญเติบโตของปลานิลด้วยการชั่งน้ำหนักและวัดความยาว

3.3.4.7 การประเมินสมดุลไนโตรเจน

ทำการประเมินสมดุลไนโตรเจนเมื่อสิ้นสุดการทดลอง โดยการประเมินปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบเลี้ยงปลานิลจากอาหาร ตัวปลานิล และในน้ำ เปรียบเทียบกับปริมาณไนโตรเจนในวันสุดท้ายของการทดลองจากในตัวปลานิล ในน้ำ และในตะกอนแขวนลอย เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบระหว่างถังเลี้ยงปลานิลที่ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ ถังเลี้ยงปลานิลที่ติดตั้งตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน และถังเลี้ยงปลานิลที่ติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 อัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ

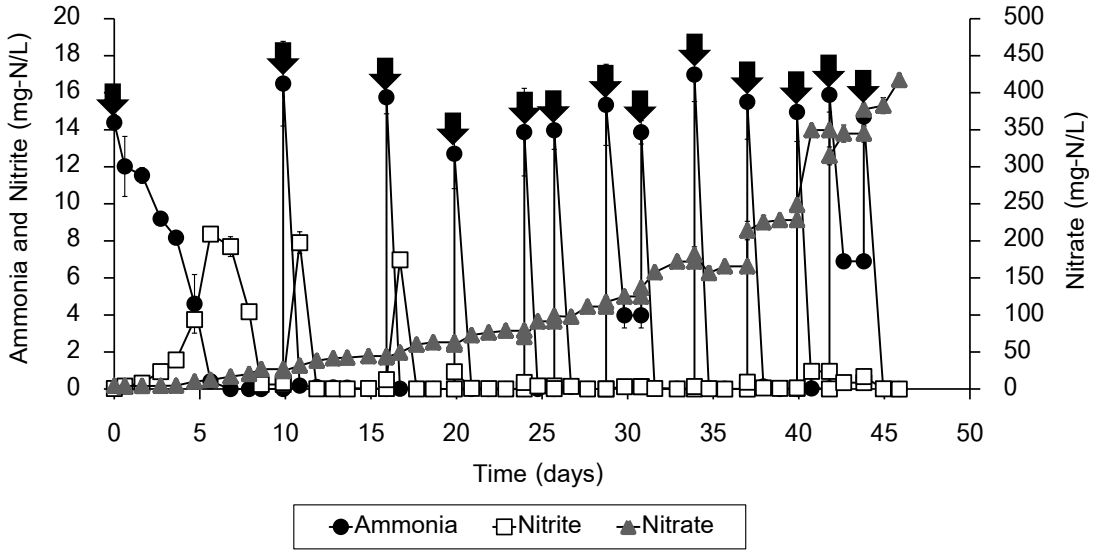
การทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตของวัสดุตัวกลาง 2 ชนิด ได้แก่ ไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด เพื่อให้ได้ตัวกรองชีวภาพที่เหมาะสมที่จะใช้บรรจุในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชัน โดยผลการทดลองมีดังนี้

4.1.1 อัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด

4.1.1.1 การเตรียมและปรับสภาพตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน

ก่อนนำตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดมาใช้ในการทดลอง จะต้องทำให้มีความสามารถพร้อมที่จะนำมาใช้งานด้วยการเตรียมและปรับสภาพ เพื่อทำให้เกิดการทำงานของไนทริฟายอิงแบคทีเรียตามธรรมชาติที่เกาะติดอยู่บนพื้นผิวของวัสดุตัวกลาง โดยนำไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดที่เคยมีการนำมาใช้งานแล้วมาทำการบ่มเชื้อด้วยการแช่ในถังพลาสติกที่บรรจุน้ำจืดปริมาตร 100 ล. เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 15 มก.ไนโตรเจน/ล. และเติมอาหารกบบดละเอียดที่มีโปรตีนร้อยละ 40 ความเข้มข้น 1.5 มก.ไนโตรเจน/ล. เพื่อเป็นสารอาหาร แร่ธาตุ และวิตามินเพิ่มเติมสำหรับไนทริฟายอิงแบคทีเรีย (Sesuk และคณะ, 2009) เติมอากาศตลอดเวลาด้วยหัวทรายพ่นอากาศและควบคุมให้ค่าสภาพด่างอยู่ในช่วง 100–150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. เมื่อแอมโมเนียถูกบำบัดหมดจะทำการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์และอาหารกบความเข้มข้นเท่าเดิมลงไปใหม่ ทำการทดลองต่อเนื่องเป็นเวลา 46 วัน จากการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ลงไปเป็นระยะๆ ตลอดการทดลอง ในช่วงสัปดาห์แรกปริมาณของแอมโมเนียจะมีค่าลดลงอย่างช้าๆ และเกิดการเปลี่ยนไปสะสมอยู่ในรูปของไนไทรต์ในปริมาณมาก โดยพบว่ามีความเข้มข้นไนไทรต์สูงสุดเท่ากับ 8.37 ± 0.35 มก.ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 6 ของการทดลอง ส่วนไนเทรตยังพบในปริมาณที่ต่ำ ต่อมาในช่วงสัปดาห์ที่สองตั้งแต่วันที่ 10 ของการทดลองเป็นต้นไปปริมาณแอมโมเนียเกิดการลดลงและถูกบำบัดหมดอย่างรวดเร็วในถัดมา (วันที่ 11 ของการทดลอง) โดยเกิดการเปลี่ยนไปอยู่

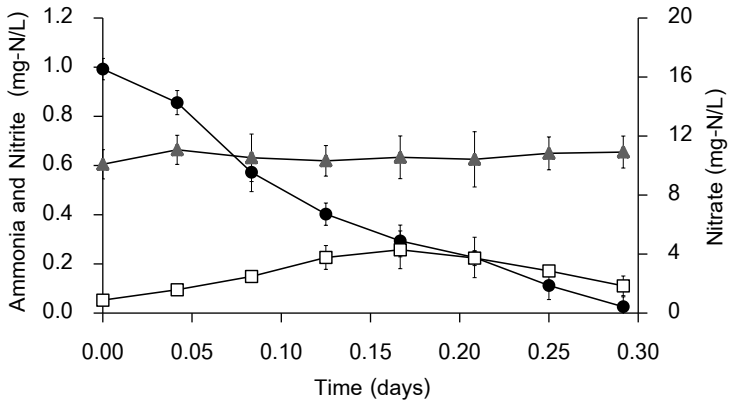
ในรูปของไนเทรตในปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ แต่พบการสะสมของไนไทรต์ในปริมาณที่ลดลง และเมื่อเข้าสู่ช่วงการทดลองตั้งแต่สัปดาห์ที่สามเป็นต้นไปจะไม่พบการสะสมของไนไทรต์อีก แสดงว่าหลังจากสัปดาห์ที่สามเป็นต้นไปตัวกรองชีวภาพสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันแบบสมบูรณ์ เพราะทำให้แอมโมเนียมีปริมาณลดลงและถูกบำบัดหมดภายในวันถัดมาโดยไม่มีการสะสมของไนไทรต์ พบเพียงการสะสมของไนเทรตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังตรวจพบการลดลงของค่าสภาพด่างควบคู่ไปด้วย ซึ่งผลการเตรียมสภาพตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของทยากร สุวรรณรัตน์ (2552) ธนทร ศรีสุข (2551) และเอกชัย มาลาพล (2551) ที่ศึกษาการเตรียมและปรับสภาพตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด พบว่าตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดสามารถเกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันได้สมบูรณ์หลังจากทำการปรับสภาพเป็นเวลาประมาณสามสัปดาห์ และจากงานวิจัยของ Grommen และคณะ (2002) รายงานว่าการเตรียมตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันสำหรับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในสภาวะที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 21–26 องศาเซลเซียสต้องใช้เวลาประมาณ 28-60 วัน



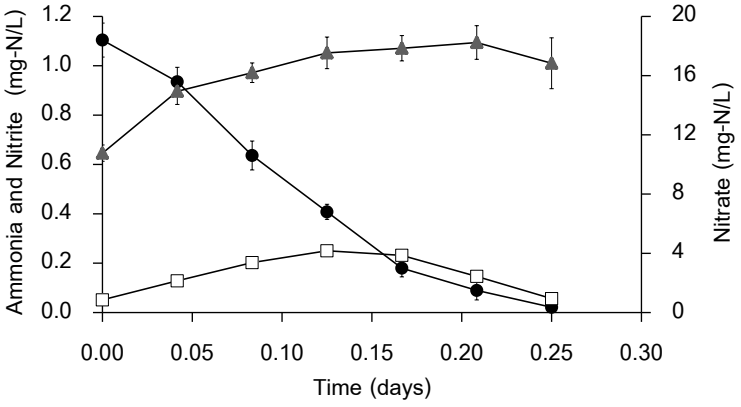
รูปที่ 4.1 ปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในระหว่างการเตรียมและปรับสภาพตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดด้วยแอมโมเนียมคลอไรด์และอาหารกบบดละเอียด (⬇ แสดงวันที่มีการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์และอาหารกบบดละเอียดความเข้มข้น 15 และ 1.5 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ)

4.1.1.2 การประเมินประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน

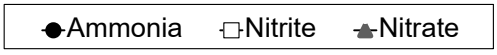
ภายหลังการเตรียมและปรับสภาพตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดเป็นเวลา 46 วัน และพบว่าตัวกรองชีวภาพสามารถเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ โดยสามารถบำบัดแอมโมเนียได้จนหมด ไม่มีการสะสมของไนไทรต์ และมีไนเทรตเกิดเพิ่มขึ้น จึงทำการสุ่มตัวกรองชีวภาพมาทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียในขวดโหลพลาสติกที่มีแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ปริมาตร 1.5 ล. โดยไบโอคอร์ดตัดให้มีความยาว 10 ซม. ส่วนหินพัมมิสบดทำการบรรจุเป็นชั้นหนา 2 ซม. ปรับค่าสภาพด่างของน้ำให้อยู่ในช่วง 100-150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. จากการเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด (รูปที่ 4.2ก) และหินพัมมิสบด (รูปที่ 4.2ข) สามารถบำบัดแอมโมเนียให้มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.1 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้ภายใน 7 และ 5 ชม. (0.29 และ 0.21 วัน) ตามลำดับ และพบการสะสมของไนไทรต์ในระยะเวลาหนึ่ง แล้วจึงค่อยๆ ลดลงด้วยการเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไนเทรต เมื่อคำนวณอัตราการบำบัดแอมโมเนียด้วยสมการจลนพลศาสตร์ของมิเคลลิส-เมนเทน (Michaelis – Menten kinetic equation) พบว่าตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยสูงสุดเมื่อเทียบกับปริมาตรบรรจุของวัสดุตัวกลางเท่ากับ 53.6 และ 52.1 ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน ตามลำดับ หรือคิดเป็นอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงสุดเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวของวัสดุตัวกลางเท่ากับ 0.030 ก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน สำหรับไบโอคอร์ด หรือคิดเป็นอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงสุดเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวก้นถัง 1.043 ก.ไนโตรเจน/ตร.ม.(พื้นที่ผิวก้นถัง)/วัน สำหรับหินพัมมิสบด ซึ่งผลการตรวจวัดประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดจากงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ ธนทร ศรีสุข (2551) ที่พบว่าไบโอคอร์ดมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับ 0.024 ก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน และงานวิจัยของทยากร สุวรรณรัตน์ (2552) ที่พบว่าตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับ 0.037 ก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน ทั้งนี้ประสิทธิภาพการบำบัดไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการเตรียมและปรับสภาพ ความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เป็นสารตั้งต้น พื้นที่ผิวและปริมาณไนทริฟายอิงแบคทีเรียที่มายึดเกาะบนวัสดุตัวกลาง จากการทดลองจะเห็นได้ว่าตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดมีการบำบัดด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันเกิดขึ้น เนื่องจากมีไนทริฟายอิงแบคทีเรียเกาะอยู่ที่พื้นผิวและในรูพรุนของวัสดุตัวกลางที่สามารถบำบัดแอมโมเนียและไนไทรต์ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อสัตว์น้ำ จึงทำให้พร้อมที่จะนำไปใช้งานได้ต่อไปในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด



(ก) ตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด



(ข) หินพัมมิสบด



รูปที่ 4.2 ปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตในการทดสอบประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน

4.1.1.3 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน

- การบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน

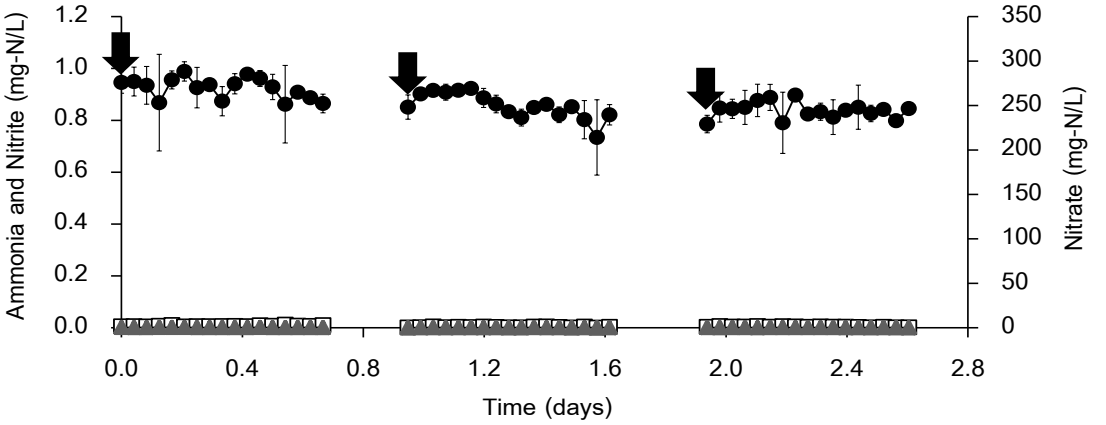
หลังจากทำการปรับสภาพและทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดแล้ว พบว่าการใช้วัสดุตัวกรองชีวภาพทั้ง 2 ชนิด สามารถเกิดการบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันได้ เนื่องจากมีไนทริฟายอิงแบคทีเรียมาเกาะติดบนพื้นผิวของวัสดุตัวกลางทำให้มีความสามารถพร้อมที่จะนำมาใช้งาน จึงนำไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์และอาหารกบเป็น

ระยะๆ อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 240 วัน มาบรรจุลงในถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันเพื่อทดสอบการบำบัดแอมโมเนีย ซึ่งการทดลองนี้แบ่งออกเป็น 3 ชุด ได้แก่ ชุดควบคุมที่ไม่บรรจุตัวกรองชีวภาพ ชุดทดลองที่บรรจุตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดความยาวประมาณ 30 ซม. และชุดทดลองที่บรรจุหินพัมมิสบดความหนา 5 ซม. ลงในถังปฏิกรณ์ จากนั้นเติมน้ำที่มีแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ปริมาตร 5 ล. ทำการปรับค่าสภาพด่างให้อยู่ในช่วง 100 - 150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. จากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำพบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต แสดงดังรูปที่ 4.3 โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ชุดควบคุมที่ไม่บรรจุตัวกรองชีวภาพไม่มีกระบวนการไนทริฟิเคชันเกิดขึ้น เพราะไม่พบการลดลงของแอมโมเนียและไม่มีไนเทรตเกิดขึ้น โดยปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตมีค่าคงที่ตลอดการทดลองเท่ากับ 0.87 ± 0.06 0.01 ± 0.00 และ 0.21 ± 0.07 มก. ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ส่วนชุดทดลองที่บรรจุตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดเกิดการบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชัน โดยสามารถบำบัดแอมโมเนียให้มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.1 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้ภายใน 10-16 และ 2-7 ชม. (0.42 – 0.67 และ 0.08–0.29 วัน) ตามลำดับ

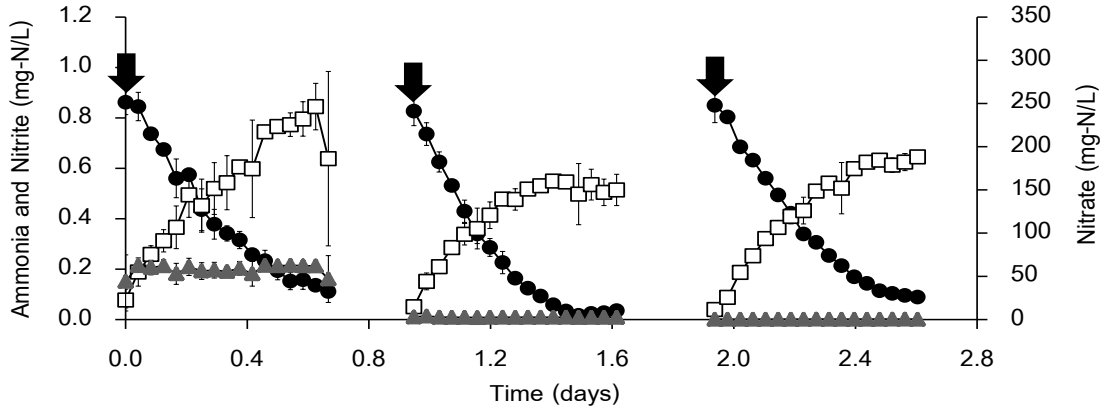
สำหรับปริมาณไนไทรต์ พบว่าในชุดทดลองที่บรรจุตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดเกิดการสะสมไนไทรต์เพิ่มปริมาณขึ้นเรื่อยๆ แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 4 – 5 ชม. ชุดทดลองที่บรรจุหินพัมมิสบดปริมาณไนไทรต์มีแนวโน้มค่อยๆ ลดลง ซึ่งการที่ในน้ำยังมีไนไทรต์สะสมอยู่และยังไม่สามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไนเทรตได้ทันที อาจเนื่องมาจากบนพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพอาจยังมีแบคทีเรียกลุ่มไนไทรต์ออกซิไดส์ซิงแบคทีเรีย (Nitrite oxidizing bacteria: NOB) เกาะติดอยู่ในปริมาณน้อยและมีการเจริญเติบโตช้า นอกจากนี้ในความเป็นจริงกระบวนการแอมโมเนียมและไนไทรต์ออกซิเดชันจะไม่เกิดขึ้นพร้อมกัน โดยแบคทีเรียกลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซ์ซิง (Ammonia oxidizing bacteria: AOB) จะออกซิไดส์แอมโมเนียเป็นไนไทรต์ก่อน จากนั้นเมื่อมีปริมาณไนไทรต์เพียงพอแบคทีเรียกลุ่มไนไทรต์ออกซิไดซ์ซิงจึงจะออกซิไดส์ไนไทรต์ต่อให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไนเทรตได้ต่อไป (Philips และคณะ, 2002; Sesuk และคณะ, 2009) ดังนั้นในทางปฏิบัติเพื่อให้ได้ตัวกรองชีวภาพที่มีประสิทธิภาพพร้อมใช้งานควรต้องทำการทดสอบก่อนจนแน่ใจว่าตัวกรองชีวภาพดังกล่าวสามารถบำบัดแอมโมเนียได้อย่างสมบูรณ์จนเป็นไนเทรต โดยไม่พบการสะสมของไนไทรต์

ส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเทรตของชุดทดลองที่บรรจุตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดให้ผลการทดลองที่คล้ายกัน แต่ชุดทดลองที่บรรจุหินพัมมิสบดจะมีปริมาณ

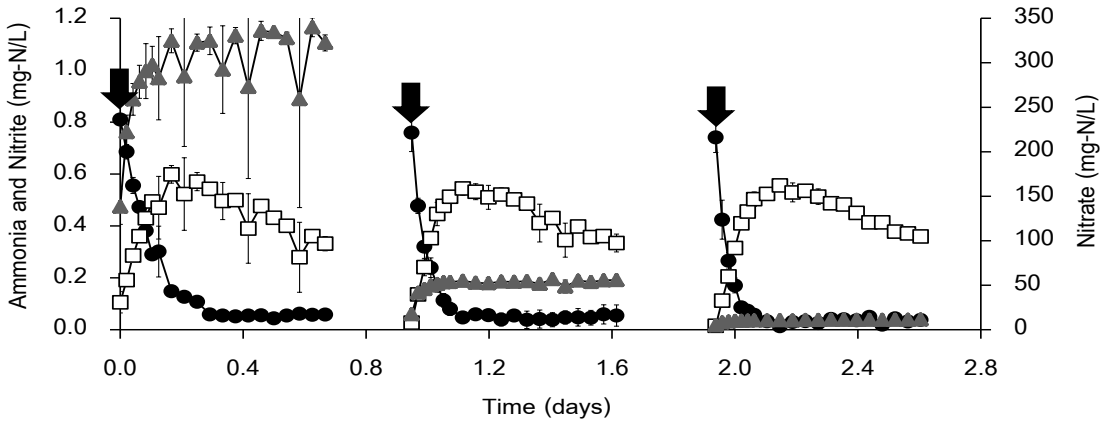
ไนเทรตสูงกว่าชุดทดลองที่บรรจุตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด ซึ่งผลการทดลองในช่วงการทดลองรอบที่ 1 ของตัวกรองชีวภาพทั้งสองชนิดตรวจพบไนเทรตความเข้มข้นสูงโดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและคงที่ คาดว่ามีสาเหตุมาจากการมีไนเทรตบางส่วนติดมากับตัวกรองชีวภาพในช่วงการปรับสภาพเบื้องต้น โดยในถังปรับสภาพนี้จะไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำและมีการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์เป็นระยะๆ เพื่อให้เกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันอย่างต่อเนื่อง เป็นสาเหตุให้น้ำในถังนี้มีปริมาณไนเทรตสะสมอยู่ในปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อนำตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดมาใช้ในการทดลองจึงมีไนเทรตติดมาด้วยในปริมาณที่สูง นอกจากนี้การที่หินพัมมิสบดพบปริมาณไนเทรตติดมามากกว่าไบโอคอร์ดอาจเนื่องมาจากลักษณะความเป็นรูพรุนของหินพัมมิสที่มีจำนวนมาก ทำให้ไนเทรตที่ติดค้างอยู่ในรูพรุนอาจเกิดการแพร่ออกมาได้ นอกจากนี้ในช่วงแรกของการทดลองเมื่อนำตัวกรองชีวภาพมาบรรจุในขวดโหลพลาสติกแล้วเติมน้ำเสียสังเคราะห์ลงไปจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์ทันที อาจจะทำให้น้ำที่เติมลงไปยังไม่เกิดการผสมกับไนเทรตที่ติดมากับตัวกรองชีวภาพ จึงทำให้ปริมาณไนเทรตเมื่อตรวจวัดค่ามีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นและคงที่ ประกอบกับในการทดลองนี้ทำการเติมแอมโมเนียลงไปเพียงความเข้มข้น 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งตัวกรองชีวภาพจะทำการบำบัดแอมโมเนียโดยเปลี่ยนไปสะสมอยู่ในรูปของไนไทรต์ ในขณะที่ไนไทรต์ยังไม่ถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นไนเทรตได้ทันที จึงทำให้ไม่สามารถเห็นการเพิ่มขึ้นของไนเทรตได้ชัดเจน ต่อมาเมื่อทำการถ่ายน้ำออกและเติมน้ำที่มีแอมโมเนียมคลอไรด์ลงไปใหม่ จึงทำให้ปริมาณไนเทรตที่ติดมากับตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดลดลง



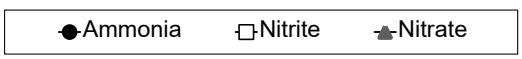
(ก) ชุดควบคุม (ไม่บรรจุตัวกรองชีวภาพ)



(ข) ชุดทดลอง (บรรจุตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด)



(ค) ชุดทดลอง (บรรจุตัวกรองชีวภาพหินพัมมิสบด)



รูปที่ 4.3 ปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตในระหว่างการตรวจวัดอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด โดย ⬇ แสดงการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 มก.ไนโตรเจน/ล. (ทำการทดลองซ้ำ 3 รอบ)

- อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน พบว่าชุดควบคุมที่ไม่มีการบรรจุตัวกรองชีวภาพไม่สามารถคำนวณอัตราการบำบัดแอมโมเนียได้ เนื่องจากไม่พบการลดลงของปริมาณแอมโมเนีย ส่วนชุดทดลองที่บรรจุตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดสามารถคำนวณอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยสูงสุดเมื่อเทียบกับปริมาตรบรรจุของวัสดุตัวกลางเท่ากับ 42.4±0.8 และ 640±387 ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน ตามลำดับ หรือคิดเป็นอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยสูงสุดเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวของวัสดุตัวกลางจะเท่ากับ 0.024 ± 0.000 ก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน สำหรับไบโอคอร์ด หรือคิดเป็นอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยสูงสุดเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวก้นถังจะเท่ากับ 32.0±19.3 ก.ไนโตรเจน/ตร.ม.(พื้นที่ผิวก้นถัง)/วัน สำหรับหินพัมมิสบดจะเห็นได้ว่าชุดทดลองที่บรรจุหินพัมมิสบดมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงกว่าชุดทดลองที่บรรจุไบโอคอร์ด อาจเนื่องมาจากหินพัมมิสบดมีพื้นที่ผิวและรูพรุนให้ไนทริฟายอิงแบคทีเรียยึดเกาะได้มากกว่า เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา ที่ศึกษาเกี่ยวกับอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองของทยากร สุวรรณรัตน์ (2552) เอกชัย มาลาพล (2551) และ Sesuk และคณะ (2009) แต่เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียกับตัวกรองชีวภาพชนิดอื่นๆ พบว่าไบโอคอร์ดมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยการที่ตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด รวมทั้งตัวกรองชีวภาพที่ทำจากวัสดุตัวกลางอื่นๆ มีอัตราการบำบัดที่ต่างกันนั้นมีปัจจัยมาจากความแตกต่างด้านพื้นที่ผิวของวัสดุตัวกลาง ชนิดของวัสดุตัวกลาง ปริมาณแบคทีเรียที่ยึดเกาะ ระยะเวลาในการบ่มเชื้อ และปัจจัยทางสภาพแวดล้อมอื่นๆ ที่มีผลต่อการเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชัน เช่น อุณหภูมิ พีเอช เป็นต้น นอกจากนี้จากการศึกษาของมนวิกานต์ ขจรบุญ (2551) พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการปรับสภาพตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและการเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียมีผลทำให้อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพชนิดต่าง ๆ

รูปแบบของการกรอง	ชนิดของตัวกรองชีวภาพ	อัตราการบำบัดไนทริฟิเคชัน	เอกสารอ้างอิง
Submerged biofilter	Plastic rolls	3.46 g TAN/m^3/day	Al- Hafedh และคณะ (2003)
	PVC pipes	3.20 g TAN/m^3/day	
	Scrub pads	2.95 g TAN/m^3/day	
Moving bed bioreactor	Clearwater™ (Kaldnes)	267 ± 123 g TAN/$m^3$of unexpanded media/day	Guerdat และคณะ (2010)
Floating bead filter	PolyGeyser® (polyethylene dimpled beads)	586 ± 284 g TAN/$m^3$of unexpanded media/day	
Fluidized sand filter	CycloBio© (silica sand)	667 ± 344 g TAN/$m^3$of unexpanded media/day	
Fluidized filter	Sand filter	39.3 - 322.7 g TAN/m^3/day	Harwanto และคณะ (2011)
Trickle filtered	Polystyrene microbead filter	35.0 - 310.5 g TAN/m^3/day	
Trickle filtered	Kaldnes bead filter	32.1 - 288.1 g TAN/m^3/day	
Submerged biofilter	Polypropylene (Biocord™)	0.048 - 0.106 g N/m^2/day	เอกชัย มาลาพล (2551)
Submerged biofilter	Polypropylene (Biocord™)	0.013 - 0.050 g N/m^2/day	ทยากร สุวรรณรัตน์ (2552)
Submerged biofilter	Polypropylene (Biocord™)	0.024 g N/m^2/day	Sesuk และคณะ (2009)
Submerged biofilter	Polypropylene (Biocord™)	0.0024 ± 0.000 g N/m^2/day หรือ 42.4 ± 0.8 g N/m^3/day	งานวิจัยนี้
	Pumice rock	32.0 ± 19.3 g N/m^2(พื้นที่ผิวก้นถัง)/day หรือ 640 ± 387 g N/m^3/day	

- *การตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ*

ผลการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำที่มีผลต่ออัตราการบำบัดแอมโมเนียของถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันในระหว่างการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.2 โดยชุดควบคุมที่ไม่บรรจุตัวกรองชีวภาพ ชุดทดลองที่บรรจุตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด และชุดทดลองที่บรรจุหินพัมมิสบดมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใกล้เคียงกัน และอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชัน จากการทดลองพบว่าทุกชุดการทดลองมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมากกว่า 7 มก./ล. ซึ่งเพียงพอต่อการทำงานของไนทริฟายอิงแบคทีเรีย ดังรายงานของ Timmon และคณะ (2002) ที่กล่าวว่าการออกซิไดซ์แอมโมเนียให้ไปอยู่ในรูปของไนเทรตมีความต้องการออกซิเจน 4.57 ก.ออกซิเจน/ก.ไนโตรเจน และการที่ตัวกรองชีวภาพจะมีอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันได้ดีควรมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำอย่างน้อย 2 มก.ไนโตรเจน/ล. สำหรับค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันควรอยู่ในช่วง 7–9 ซึ่งค่าพีเอชในช่วง 7.2–8.8 และ 7.2–9 เป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของ *Nitrosomonas* และ *Nitrobacter* ตามลำดับ (Chen และคณะ, 2006) โดยในการทดลองนี้มีค่าพีเอชของน้ำประมาณ 8 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่ไนทริฟายอิงแบคทีเรียสามารถทำงานได้ ส่วนอุณหภูมินั้นจากรายงานของ Hagopian และ Riley (1998) กล่าวว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับไนทริฟายอิงแบคทีเรียคือ 25 °ซ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองนี้ และอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 42 °ซ และต่ำกว่า 5 °ซ แต่จากรายงานของธงชัย พรรณสวัสดิ์ (2544) กล่าวว่าอุณหภูมิที่ดีสำหรับปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันคือ 30–36 °ซ และค่าสภาพด่างสำหรับการทดลองนี้เมื่อเกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันจะมีค่าลดลง เนื่องจากแบคทีเรียบำบัดแอมโมเนียด้วยการเปลี่ยนให้ไปอยู่ในรูปของไนเทรตจะได้พลังงานออกมาและแบคทีเรียจะใช้พลังงานไปดึงคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) หรือ ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) หรือ คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) มาเป็นแหล่งคาร์บอน จึงมีการปล่อยไฮโดรเจนอิออนออกมาทำให้ระบบมีความต้องการค่าสภาพด่างเพียงพอ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) โดยค่าสภาพด่างที่พบในการทดลองนี้อยู่ในช่วง 100–150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ตลอดการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Hart และ O'sullivan (1993) ที่กล่าวว่า ค่าสภาพด่างที่เหมาะสมต่อการทำงานของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันควรมีค่าไม่น้อยกว่า 100 มก./ล.

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งหมดมีความเหมาะสมและเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชัน โดยปัจจัยเหล่านี้จะช่วยทำให้ชุดการทดลองที่บรรจุตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดที่มีไนทริฟายอิงแบคทีเรียเกาะติดอยู่บนพื้นผิวเกิดการเจริญเติบโต

และสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ชุดควบคุมที่ไม่มีตัวกรองชีวภาพบรรจุอยู่จะไม่เกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันเนื่องจากไม่มีการเจริญเติบโตและการทำงานของไนทริฟายอิงแบคทีเรีย

ตารางที่ 4.2 คุณภาพน้ำในระหว่างการศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดในถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน

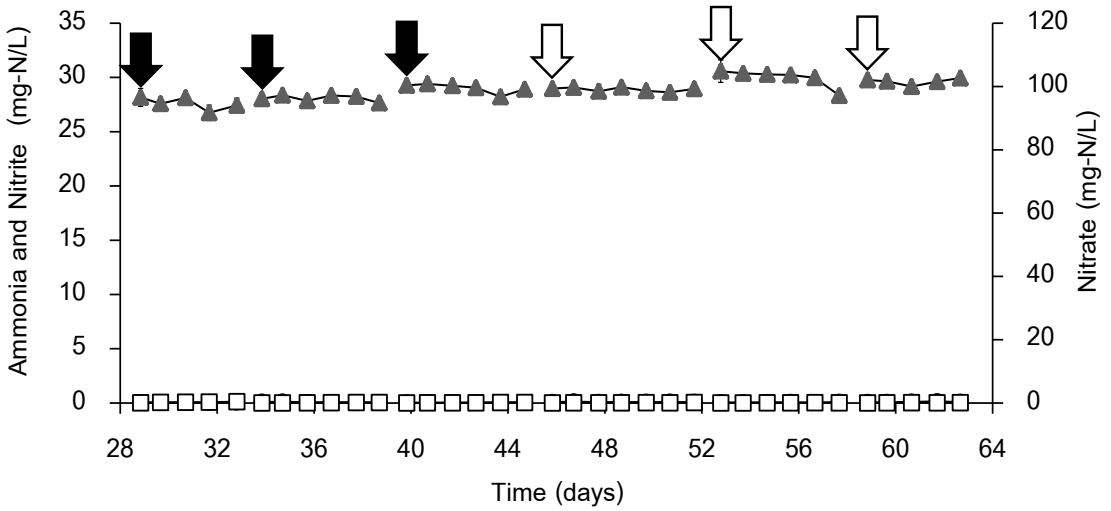
พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด - ค่าสูงสุด)		
	ชุดควบคุม ไม่บรรจุ ตัวกรองชีวภาพ	**ชุดทดลอง บรรจุตัวกรองชีวภาพ ไบโอคอร์ด**	**ชุดทดลอง บรรจุ หินพัมมิสบด**
ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	7.69 ± 0.33 (7.13 - 8.30)	7.70 ± 0.25 7.43 - 8.27	7.78 ± 0.22 (7.40 - 8.17)
พีเอช	8.67 ± 0.09 (8.54 - 8.80)	8.67 ± 0.06 (8.55 - 8.75)	8.54 ± 0.11 (8.36 - 8.67)
อุณหภูมิ (^{o}ซ)	26.09 ± 0.49 (25.07 - 26.93)	25.94 ± 0.50 (24.90 - 26.77)	25.77 ± 0.49 24.80 ± 26.60
ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.	134.22 ± 13.36 (116.67 - 150.00)	123.56 ± 15.30 (103.33 - 150.00)	123.11 ± 16.59 (100.00 - 150.00)

4.1.2 อัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบด

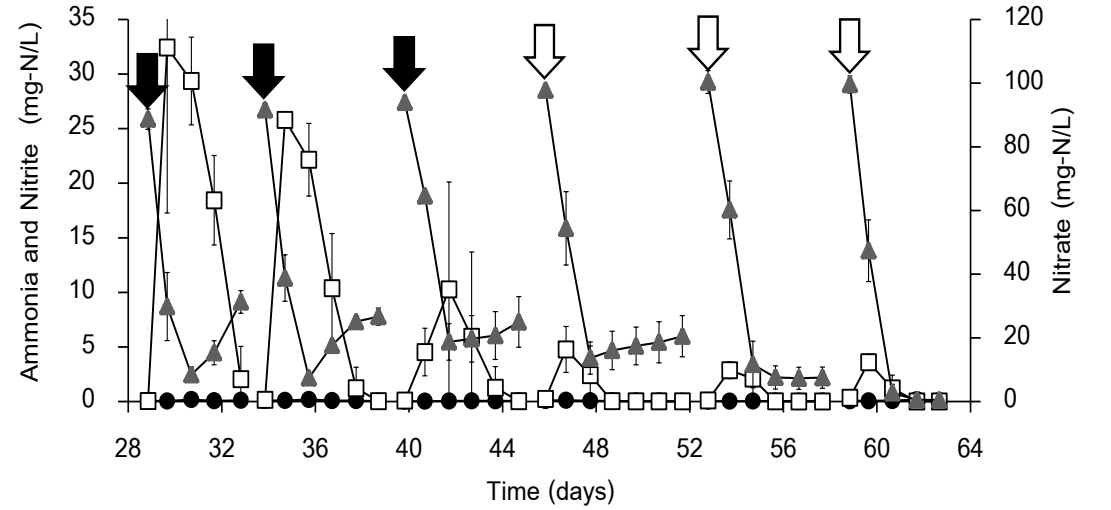
- *การบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของตัวกรองชีวภาพดีไนทริฟิเคชัน*

การทดลองนี้ศึกษาการบำบัดไนเทรตของหินพัมมิสบดในถังปฏิกรณ์ดีไนทริฟิเคชัน เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับนำไปวิเคราะห์ร่วมกับอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด และหินพัมมิสบด เพื่อให้ได้ตัวกรองชีวภาพที่เหมาะสมที่จะบรรจุลงในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันในการทดลองต่อไป การทดลองช่วงนี้แบ่งชุดการทดลองออกเป็น ชุดควบคุมที่ไม่มีการบรรจุวัสดุตัวกลาง และชุดทดลองที่บรรจุหินพัมมิสบดเป็นชั้นหนา 5 ซม. ลงในถังปฏิกรณ์ ทำการทดลองด้วยการเติมน้ำที่มีโพแทสเซียมไนเทรตความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ปริมาตร 8 ล. และเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 แต่เนื่องจากผลการทดลองที่ได้ไม่สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของชลธิชา พลายชุม (2553) โดยพบว่าหินพัมมิสบดไม่สามารถบำบัดไนเทรตได้อย่างสมบูรณ์ด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันและพบการสะสมของไนไทรต์ในระยะเวลาหนึ่ง จึงได้ทำการเพิ่มปริมาณการเติมเมทานอลเป็นอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 6:1 ซึ่งการทดลองนี้จะทำการบ่มเชื้อดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียในวันที่ 0-28 และเริ่มทำการทดลองในวันที่ 29 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อเติมเมทานอลในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1 ลงในชุดควบคุมที่ไม่บรรจุวัสดุตัวกลางจะไม่เกิดการบำบัดไนเทรต ส่วนไนไทรต์และแอมโมเนียมีปริมาณต่ำมาก โดยพบไนเทรต ไนไทรต์ และแอมโมเนียมีปริมาณเฉลี่ย 99.01 ± 3.14, 0.03 ± 0.02 และ 0.07 ± 0.03 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ส่วนชุดทดลองที่บรรจุหินพัมมิสบดพบว่าเมื่อเติมเมทานอลในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1 หินพัมมิสบดสามารถบำบัดไนเทรตให้ลดต่ำลงจนเหลือปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 11.54 ± 6.26 และ 9.33 ± 5.81 ตามลำดับ ภายในวันที่ 3 ของแต่ละช่วงการบำบัดไนเทรต เมื่อพิจารณาปริมาณไนไทรต์ พบว่าการเติมเมทานอลในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 พบการสะสมของไนไทรต์มากกว่าการเติมเมทานอลในอัตราส่วนซีโอดี ต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 6:1 ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากระยะเวลาในการบ่มเชื้อดีไนทริฟายอิง แบคทีเรียเพื่อให้เกิดการเกาะติดบนหินพัมมิสอาจจะยังไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนได้ จึงทำให้ในช่วงการทดลองที่มีการเติมเมทานอลในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ยังพบการสะสมของไนไทรต์ในปริมาณมากและทำให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์

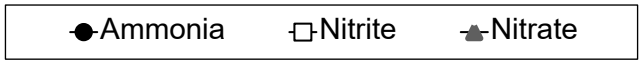
ตัวกลางหินพัมมิสบดที่ใช้ในงานวิจัยช่วงนี้ผ่านการบ่มเชื้อเพื่อให้ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียเกิดการเจริญเติบโตที่พื้นผิวเป็นระยะเวลาประมาณ 4 สัปดาห์ แต่เมื่อนำมาทดสอบการบำบัดไนเทรตกลับพบว่ายังไม่สามารถทำให้เกิดการบำบัดไนเทรตได้อย่างสมบูรณ์ด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน โดยพบการสะสมของไนไทรต์เป็นระยะเวลาหนึ่ง แต่หลังจากนั้นไนไทรต์จะมีปริมาณลดลงและถูกเปลี่ยนกลับไปอยู่ในรูปของไนเทรต โดยคาดว่ากระบวนการที่เกิดขึ้นนี้เป็นการทำงานของไนไทรต์ออกซิไดส์ซิงแบคทีเรียที่อาจเติบโตได้ในสภาวะที่มีออกซิเจนหลงเหลืออยู่บริเวณพื้นผิวของหินพัมมิสบดด้านบน จึงทำให้ปริมาณไนไทรต์บางส่วนถูกเปลี่ยนกลับไปเป็นไนเทรตด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชัน ปริมาณไนเทรตที่วิเคราะห์ได้จึงเพิ่มสูงขึ้น ต่อมาเมื่อทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำและเติมไนเทรตพร้อมกับเมทานอลลงไปใหม่ พบว่าปริมาณไนไทรต์ที่สะสมลดลง ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนมากบนพื้นผิวของตัวกลางหินพัมมิสบดจนมีสภาพพร้อมที่จะทำงานตามการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียพบว่า แอมโมเนียที่ตรวจวัดได้ในน้ำมีปริมาณค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 0.07±0.04 มก.ไนโตรเจน/ล. สำหรับการเติมเมทานอลในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1



(ก) ชุดควบคุม (ไม่บรรจุวัสดุตัวกลาง)



(ข) ชุดทดลอง (บรรจุหินพัมมิสบดหนา 5 ซม.)



รูปที่ 4.4 ปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตในระหว่างการตรวจวัดอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบด โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมโพแทสเซียมไนเทรต 100 มก. ไนโตรเจน/ล. และเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1 ตามลำดับ (แต่ละอัตราส่วนทำการทดลองซ้ำ 3 รอบ)

- *อัตราการบำบัดไนเทรตของตัวกรองชีวภาพดีไนทริฟิเคชัน*

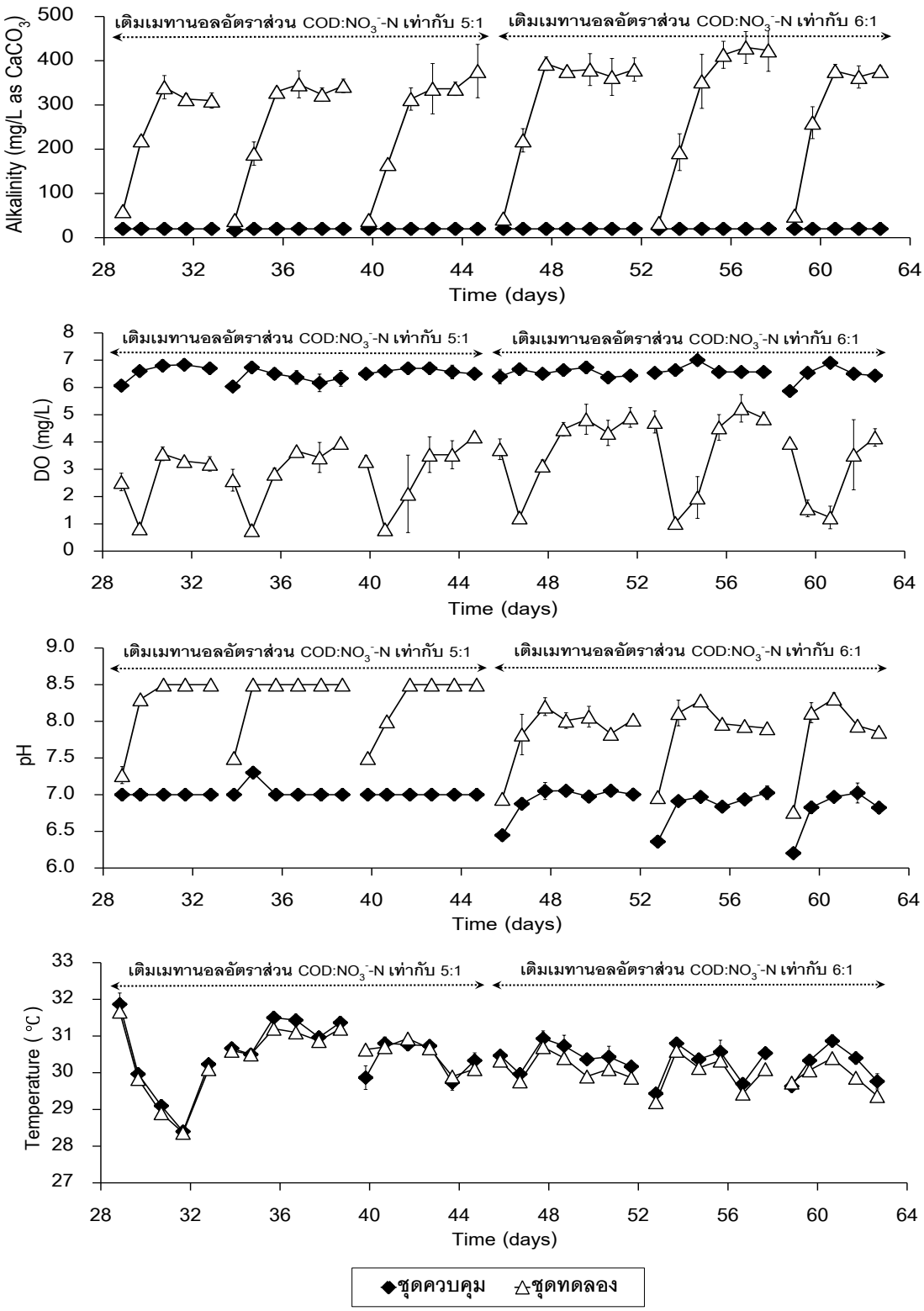
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอัตราการบำบัดไนเทรตของตัวกรองชีวภาพพบว่า ชุดควบคุมที่ไม่บรรจุวัสดุตัวกลางไม่สามารถคำนวณอัตราการบำบัดไนเทรตได้ เนื่องจากไม่พบการลดลงของไนเทรต ส่วนชุดทดลองที่บรรจุหินพัมมิสบดเมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาอัตราการบำบัดไนเทรตพบว่า การเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1 ให้ผลการบำบัดไนเทรตที่แตกต่างกัน โดยมีอัตราการบำบัดไนเทรตเฉลี่ยสูงสุดเมื่อเทียบกับปริมาตรบรรจุของวัสดุตัวกลางเท่ากับ 169.1 ± 8.8 และ 191.0 ± 19.0 ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน ตามลำดับ หรือคิดเป็นอัตราการบำบัดไนเทรตเฉลี่ยสูงสุดเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวก้นถังเท่ากับ 8.46 ± 0.44 และ 9.55 ± 0.95 ก.ไนโตรเจน/ตร.ม.(พื้นที่ผิวก้นถัง)/วัน ตามลำดับ ซึ่งการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 มีอัตราการบำบัดไนเทรตเฉลี่ยสูงสุดต่ำกว่าการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 6:1 ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของชลธิชา พลายชุม (2553) ที่ศึกษาการบำบัดไนเทรตของถังดีไนทริฟิเคชันที่บรรจุหินพัมมิสในสภาวะที่มีการเติมเมทานอลเพื่อเร่งปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 3:1 4:1 5:1 และ 6:1 พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนจาก 3-6 เท่า จะทำให้หินพัมมิสมีอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันสูงขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งการเติมเมทานอลที่อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1 หินพัมมิสบดมีอัตราการบำบัดไนเทรตเท่ากับ 4.59 และ 7.30 ก.ไนโตรเจน/ตร.ม.(พื้นที่ผิวก้นถัง)/วัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอัตราการบำบัดไนเทรตของหินพัมมิสบดจากงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่างานวิจัยของชลธิชา พลายชุม (2553) และเมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไนเทรตกับตัวกรองชีวภาพชนิดอื่นๆ ซึ่งแสดงผลดังตารางที่ 4.3 พบว่าหินพัมมิสบดมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนเทรตอยู่ในระดับที่ค่อนข้างต่ำ แต่ทั้งนี้อัตราการบำบัดไนเทรตที่แตกต่างกันของตัวกลางแต่ละชนิดนั้นมีปัจจัยมาจากความแตกต่างของชนิดและพื้นที่ผิววัสดุตัวกลาง ปริมาณและชนิดแบคทีเรียที่ยึดเกาะบนวัสดุตัวกลาง ระยะเวลาในการบ่มเชื้อ สารอินทรีย์คาร์บอนและอัตราส่วนสารอินทรีย์คาร์บอนที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน ซึ่งจากรายงานของ Van Rijn และคณะ (2006) กล่าวว่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับเร่งให้เกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันมีค่าอยู่ระหว่าง 3-6 และปัจจัยทางสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน เช่น อุณหภูมิ พีเอช เป็นต้น

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพชนิดต่าง ๆ

ชนิดของตัวกรองชีวภาพ	สารอินทรีย์คาร์บอน	อัตราส่วน	อัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชัน	เอกสารอ้างอิง
Pseudomonas stutzeri immobilized on microbial cellulose	Ethanol	COD:NO_3^-- N;3:1 COD:NO_3^-- N;1.5:1	1.6 ± 0.02 kg NO_3^- – N/m^3/day 1.3 ± 0.08 kg NO_3^- – N/m^3/day	Rezaee และคณะ (2008)
Plastic extruded floating media (AMB™ media, EEC)	Methanol Acetic acid Hydrolyzed starch Molasses	C:N; 2:1 C:N; 1.7:1 C:N; 2.5:1 C:N; 2.5:1	670 g NO_3^- – N removed/m^3 media/day 670 g NO_3^- – N removed/m^3 media /day 680 g NO_3^- – N removed/m^3 media /day 670 g NO_3^- – N removed/m^3 media /day	Hamlin และคณะ (2008)
Soil	Glucose Methanol	C:N; 3.3:1 C:N; 3.3:1	42 g N/m^3(ปริมาตรดิน)/day 31 g N/m^3(ปริมาตรดิน)/day	เอกชัย มาลาพล (2551)
Digester box (polyethylene)	Methanol	C:N; 0.99, 1.06, 9.18, 1.26	0.5 - 0.6 mg N/L(ปริมาตรบรรจุตัวกรอง)/day	ทยากร สุวรรณรัตน์ (2552)
Pumice rock	Methanol	COD:NO_3^-- N;5:1 COD:NO_3^-- N; 6:1	4.59 g N/m^2(พื้นที่ผิวก้นถัง)/day 7.30 g N/m^2(พื้นที่ผิวก้นถัง)/day	ชลธิชา พลายชุม (2553)
Pumice rock	Methanol	COD:NO_3^-- N; 5:1 COD:NO_3^-- N; 6:1	8.46 ± 0.44 g N/m^2(พื้นที่ผิวก้นถัง)/day 169.1 ± 8.8 g N/m^3/day 9.55 ± 0.95 N/m^2(พื้นที่ผิวก้นถัง)/day 191.0 ± 19.0 g N/m^3/day	งานวิจัยนี้

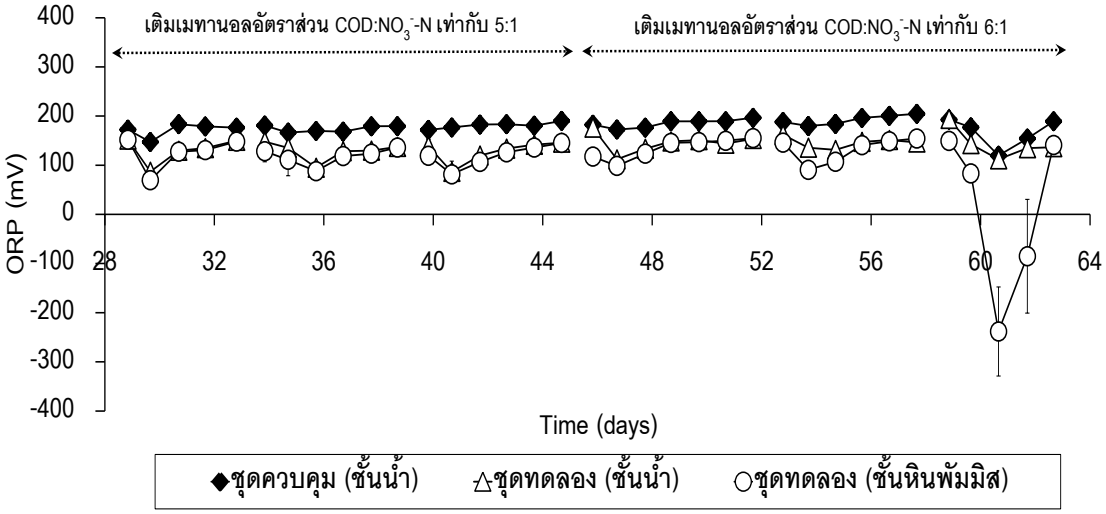
- *การตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ*

สำหรับผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน ได้แก่ ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1 ในแต่ละช่วงของการบำบัดไนเทรตสำหรับชุดควบคุมที่ไม่บรรจุวัสดุตัวกลางจะมีค่าสภาพด่าง พีเอช และปริมาณออกซิเจนละลายน้ำคงที่ตลอดการทดลองเท่ากับ 19.09 ± 0.56 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. 6.93 ± 0.20 และ 6.53 ± 0.24 มก./ล. ตามลำดับ แต่การเติมเมทานอลในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนที่สูงขึ้นเท่ากับ 6:1 ค่าพีเอชมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากประมาณ 6.5 เป็น 7 ส่วนชุดทดลองที่บรรจุหินพัมมิสบดค่าสภาพด่างและพีเอชจะมีค่าเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่เมื่อไนเทรตถูกบำบัดจนเหลือในปริมาณที่ต่ำ โดยเป็นผลมาจากการปลดปล่อยไฮดรอกซิลอิออน (OH^-) ของแบคทีเรียพวกเฮเทอโรทรอฟเมื่อเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน จึงทำให้ค่าสภาพด่างในน้ำเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ โดยการรีดิวซ์ไนเทรต 1 ก. ให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนจะผลิตค่าสภาพด่าง 3.57 ก.แคลเซียมคาร์บอเนต (Van Rijn และคณะ, 2006) และมีผลทำให้พีเอชมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย โดยพีเอชที่เหมาะสมสำหรับดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียคือ 6.5 - 8.5 (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) ซึ่งในการทดลองนี้มีค่าพีเอชเฉลี่ยอยู่ที่ 8.05 ± 0.49 และยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน และจากงานวิจัยของ Rezaee และคณะ (2008) รายงานว่าถ้าพีเอชต่ำกว่า 6 หรือมากกว่า 9 อาจส่งผลให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันถูกยับยั้งได้ นอกจากนี้ยังพบการลดลงของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและพบปริมาณต่ำที่สุดซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.7–1.2 มก./ล. หลังการเติมเมทานอลในวันถัดมา จากนั้นปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและคงที่เมื่อไนเทรตและเมทานอลถูกบำบัดจนเหลือในปริมาณที่ต่ำเช่นกัน ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากที่บริเวณชั้นหินพัมมิสด้านบนยังมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำคงเหลือเพียงต่อการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์อาศัยอยู่ (Warneke และคณะ, 2011) จึงทำให้ในช่วงเวลาที่แบคทีเรียเหล่านี้นำออกซิเจนไปใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์จะตรวจพบปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำ โดยเมื่อสารอินทรีย์หมดลงปริมาณออกซิเจนละลายน้ำก็จะเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามออกซิเจนเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องควบคุมให้เหลือน้อยที่สุดเพื่อให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเกิดได้อย่างสมบูรณ์ (Van Rijn และคณะ, 2006) สำหรับอุณหภูมิทุกชุดการทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าคงที่เฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 30.39 ± 0.69 และ 30.22 ± 0.68 °ซ สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการบรรจุวัสดุตัวกลางและชุดทดลองที่บรรจุหินพัมมิสบด ตามลำดับ โดยดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิในช่วง 5-25 °ซ และทำงานได้ดีกว่าเมื่ออุณหภูมิมากกว่าหรือเท่ากับ 20 °ซ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)



รูปที่ 4.5 ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิในระหว่างการตรวจวัดอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบด โดยทำการเติมเมทานอลที่อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1 (ทำการทดลองอัตราส่วนละ 3 รอบ)

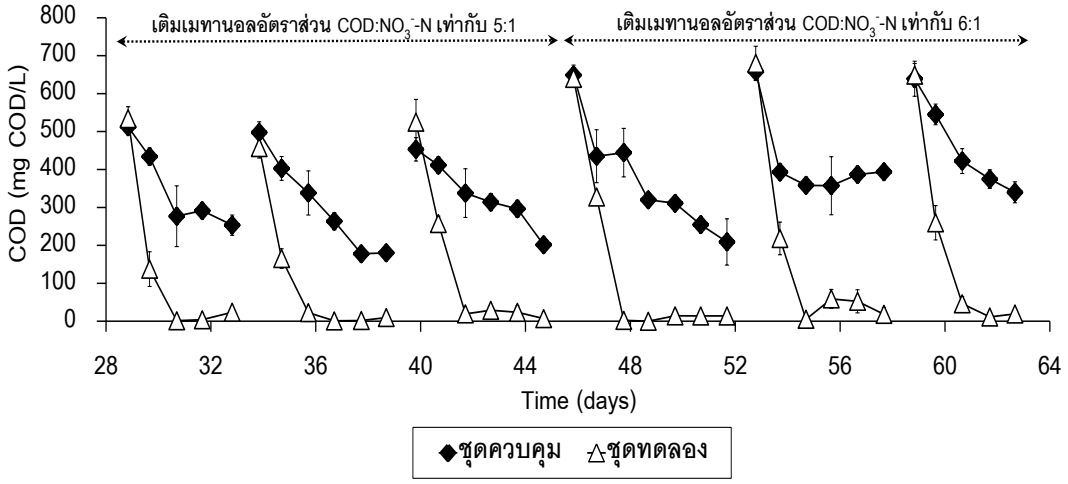
สำหรับค่าศักย์ออกซิเดชัน – รีดักชัน (โออาร์พี) ดังรูปที่ 4.6 พบว่าค่าโออาร์พีที่บริเวณชั้นน้ำของชุดควบคุมที่ไม่บรรจุวัสดุตัวกลางและชุดทดลองที่บรรจุหินพัมมิสบดมีค่าคงที่ตลอดการทดลองเฉลี่ยเท่ากับ 179.13±15.63 และ 137.31±21.54 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าโออาร์พีบริเวณชั้นน้ำของชุดควบคุมที่ไม่บรรจุวัสดุตัวกลางมีค่ามากกว่าชุดทดลองที่บรรจุหินพัมมิสบด แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าโออาร์พีที่บริเวณชั้นน้ำและชั้นหินพัมมิสของชุดทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ชลธิชา พลายชุม (2553) รายงานว่าค่าโออาร์พีที่เหมาะสมต่อการบำบัดไนเทรตภายในถังดีไนทริฟิเคชันอยู่ในช่วง -300 ถึง -200 มิลลิโวลต์ ซึ่งในการทดลองนี้ค่าโออาร์พีที่บริเวณชั้นหินพัมมิสตลอดการทดลองมีค่าเป็นบวกและสูงกว่า -200 มิลลิโวลท์ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากภายในถังปฏิกรณ์มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมากเกินไปจึงส่งผลให้ออกซิเจนแทรกซึมไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดหินส่งผลให้ค่าโออาร์พีที่วัดได้จึงมีค่าเป็นบวก แต่หินพัมมิสบดยังสามารถเกิดการบำบัดไนเทรตให้ลดลงได้นั้นอาจเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของหินพัมมิส โดยบริเวณด้านในรูพรุนอาจมีสภาพไร้อากาศทำให้ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียที่อาศัยอยู่เกิดการบำบัดไนเทรตให้ลดลงได้ นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงการบำบัดไนเทรตที่มีการเติมเมทานอลอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 6:1 ครั้งสุดท้ายค่าโออาร์พีลดลงจนติดลบและมีค่าต่ำสุดเท่ากับ -238.23 ± 90.53 มิลลิโวลท์ ซึ่งเป็นจุดเดียวกับที่พบปริมาณไนเทรตมีค่าต่ำประมาณ 2.71 ± 2.69 มก.ไนโตรเจน/ล. ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในบริเวณรูพรุนและชั้นหินพัมมิสที่อัดแน่นอาจมีดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียยึดเกาะและเพิ่มจำนวนมากขึ้นตามระยะเวลาในการทดลองที่เพิ่มขึ้น และสภาวะของถังปฏิกรณ์ในขณะนั้นออกซิเจนละลายน้ำมีค่าต่ำประมาณ 1 มก./ล. จึงส่งผลทำให้ออกซิเจนอาจแพร่ลงไปไม่ถึงบริเวณชั้นหินพัมมิสที่ลึกลงไป เป็นสาเหตุให้ค่าโออาร์พีที่วัดได้บริเวณชั้นหินพัมมิสมีค่าติดลบ อีกทั้งดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียที่มีจำนวนมากขึ้นยังต้องใช้ไนเทรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนมากขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้ไนเทรตมีปริมาณลดลงเหลือต่ำกว่าในช่วงการบำบัดที่ผ่านมาซึ่งในขณะนั้นดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียมีจำนวนน้อยกว่า แต่ถ้าหากปริมาณไนเทรตถูกบำบัดหมดและในขณะนั้นระบบไม่มีหรือมีปริมาณออกซิเจนคงเหลือน้อยมาก แบคทีเรียในระบบจะเปลี่ยนมาใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนและไนเทรต อาจส่งผลให้ระบบเสี่ยงต่อการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟล์ได้



รูปที่ 4.6 ค่าศักย์ออกซิเดชัน – รีดักชัน (โออาร์พี) ในระหว่างการตรวจวัดอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบด โดยทำการเติมเมทานอลที่อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1 (ทำการทดลองอัตราส่วนละ 3 รอบ)

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีในน้ำในระหว่างการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.7 ในแต่ละช่วงของการบำบัดไนเทรตที่มีการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1 พบว่าชุดควบคุมที่ไม่บรรจุวัสดุตัวกลางปริมาณซีโอดีมีการลดลงอย่างช้าๆ และยังคงเหลือในปริมาณมาก ซึ่งแตกต่างจากชุดทดลองที่บรรจุหินพัมมิสบดที่ปริมาณซีโอดีมีการลดลงอย่างรวดเร็วจนหมดลงภายในวันที่ 3 ของแต่ละช่วงการบำบัดไนเทรต นอกจากนี้การเติมเมทานอลเพื่อเร่งให้เกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันในการทดลองนี้มีค่าสูงกว่าสัดส่วนตามทฤษฎีปริมาณสารสัมพันธ์ที่มีอัตราส่วนเมทานอลต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 2.47:1 หรือคิดเป็นอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 3.7:1 (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) ซึ่งการเติมเมทานอลในสัดส่วนที่สูงกว่าทางทฤษฎีนั้นเพื่อให้แบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ ที่อาศัยอยู่ในถังปฏิกรณ์สามารถนำสารอินทรีย์คาร์บอนไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ โดยไม่ไปยับยั้งการทำงานของดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการบำบัดไนเทรตให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจน สำหรับผลการตรวจวัดปริมาณซีโอดีเฉลี่ยคงเหลือภายหลังสิ้นสุดการบำบัดไนเทรตก่อนการถ่ายน้ำออกและเปลี่ยนน้ำใหม่แสดงดังตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1 พบซีโอดีคงเหลือในปริมาณที่ใกล้เคียงกันซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมาก ในการทดลองช่วงต่อไปจึงเลือกใช้การเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 เนื่องจากใช้เมทานอล

ในปริมาณที่น้อยกว่า และมีปริมาณไนเทรตคงเหลือเมื่อสิ้นสุดการบำบัดมากกว่าการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 6:1 ซึ่งหากการบำบัดไนเทรตเกิดขึ้นจนคงเหลือในปริมาณที่ต่ำมากจะมีความเสี่ยงต่อการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟล์ และเมื่อนำไปใช้ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะทำให้เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำได้ ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของชลธิชา พลายชุม (2553) ที่รายงานว่าการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนเทรตด้วยถังดีไนทริฟิเคชันที่บรรจุหินพัมมิสบด เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงและหลังการบำบัดมีปริมาณเมทานอลเหลืออยู่ในน้ำน้อยกว่าการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 6:1



รูปที่ 4.7 ปริมาณซีโอดีในระหว่างการทดลองการตรวจวัดอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบด โดยทำการเติมเมทานอลที่อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1 (ทำการทดลองอัตราส่วนละ 3 ซ้ำ)

ตารางที่ 4.4 ปริมาณซีโอดีคงเหลือภายหลังสิ้นสุดการบำบัดไนเทรตก่อนทำการถ่ายน้ำออกและเปลี่ยนน้ำใหม่

อัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจน	ปริมาณซีโอดีที่เหลือ (มก.ซีโอดี/ล.)	
	ชุดควบคุม ไม่บรรจุวัสดุตัวกลาง	ชุดทดลอง บรรจุหินพัมมิสบด
5:1	211.78 ± 37.54	13.48 ± 8.95
6:1	314.32 ± 95.01	17.10 ± 2.78

4.1.3 อัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ

จากผลการทดลองสามารถสรุปอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันเฉลี่ยสูงสุดของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด และอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันเฉลี่ยสูงสุดของหินพัมมิสบดได้ดังตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไนทริฟิเคชัน หินพัมมิสบดมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงกว่าไบโอคอร์ดมาก และในขณะเดียวกันพบว่าหินพัมมิสบดมีประสิทธิภาพที่ดีในการบำบัดไนเทรตได้ด้วย โดยมีอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันเท่ากับ 169.1±8.8 ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน โดยอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบดมีค่ามากกว่าอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของไบโอคอร์ดแต่มีค่าต่ำกว่าอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบดด้วยกัน ในการทดลองต่อไปทำการบรรจุตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันในถังปฏิกรณ์เดียวกัน โดยมีวัตถุประสงค์ให้ตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดทำหน้าที่หลักในการบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชัน และให้หินพัมมิสบดทำหน้าที่หลักในการบำบัดไนเทรตด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน

แต่อย่างไรก็ตามต้องทำการประเมินความสามารถในการบำบัดไนทริฟิเคชันของชั้นหินพัมมิสที่บริเวณผิวด้านบนความหนาประมาณ 1 ซม.ด้วย เพราะเป็นบริเวณที่มีออกซิเจนสูงซึ่งพบว่ามีความเหมาะสมต่อการเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าหินพัมมิสบดที่เติมลงในถังปฏิกรณ์ทำหน้าที่เป็นได้ทั้งตัวกลางในการบำบัดด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันเพื่อบำบัดแอมโมเนีย (ในบริเวณชั้นหินพัมมิสด้านบนที่มีความหนาประมาณ 1 ซม.) และตัวกลางดีไนทริฟิเคชันเพื่อบำบัดไนเทรต (บริเวณชั้นหินพัมมิสบดหนา 5 ซม. ที่อัดแน่นและบริเวณรูพรุนด้านในของหินพัมมิส) แสดงในหัวข้อ 4.1.4 ซึ่งเป็นแนวทางการคำนวณเพื่อปรับให้สัดส่วนการบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันและการบำบัดไนเทรตด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพที่จะบรรจุลงในถังปฏิกรณ์เดียวมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน นอกจากนี้จากข้อมูลในตารางที่ 4.5 ถึงแม้ว่าตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตค่อนข้างต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวกรองชีวภาพในงานวิจัยอื่นๆ (ดังตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.3) แต่ตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการควบคุมปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ให้มีความปลอดภัยต่อระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้ อีกทั้งยังช่วยให้การเดินระบบสามารถทำได้ง่ายและไม่ซับซ้อนอีกด้วย

ตารางที่ 4.5 สรุปอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเฉลี่ยสูงสุดของตัวกรองชีวภาพ

ตัวกรองชีวภาพ	ปริมาตรบรรจุ (มล.)	อัตราบำบัดไนทริฟิเคชัน (ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน)	อัตราบำบัดดีไนทริฟิเคชัน (ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน)
ไบโอคอร์ด	477	42.4 ± 0.8	-
หินพัมมิสบด	2000	640 ± 387	169.1 ± 8.8

หมายเหตุ: เครื่องหมาย – หมายถึงไม่ได้ทำการทดลอง

4.1.4 การคำนวณเพื่อปรับสัดส่วนการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันให้สมดุลกัน

การคำนวณในช่วงนี้จะใช้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตของตัวกรองชีวภาพจากข้อมูลในตารางที่ 4.5 ซึ่งในความเป็นจริงตัวกรองชีวภาพจะไม่สามารถบำบัดได้ด้วยอัตราบำบัดสูงสุดดังกล่าว เนื่องจากค่าเหล่านั้นได้มาจากการคำนวณตามสมการจลนพลศาสตร์ ในการคำนวณจึงกำหนดให้ตัวกรองชีวภาพมีประสิทธิภาพการบำบัดประมาณร้อยละ 70 ของอัตราการบำบัดสูงสุด พบว่า

<u>ส่วนบำบัดไนทริฟิเคชัน</u>

ไบโอคอร์ด: มีอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชัน = 30 ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน

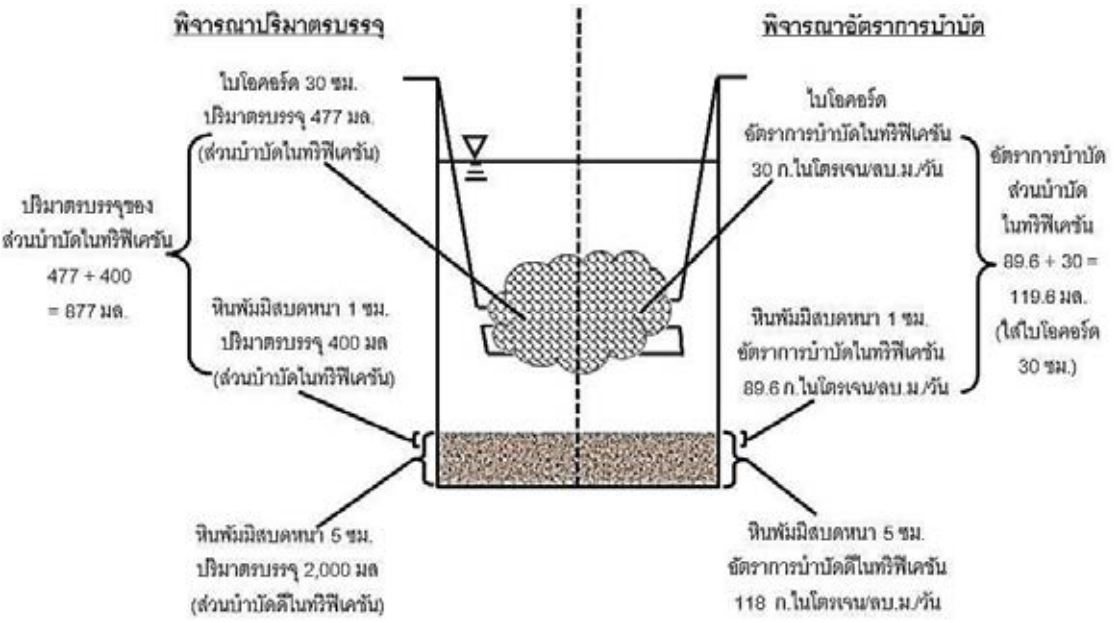
หินพัมมิสบด: มีอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชัน = 448 ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน

<u>ส่วนบำบัดดีไนทริฟิเคชัน</u>

หินพัมมิสบด: มีอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชัน = 118 ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน

ถ้ากำหนดให้หินพัมมิสบดที่บริเวณผิวด้านบนหนา 1 ซม. เกิดการบำบัดไนทริฟิเคชันร่วมกับไบโอคอร์ด เมื่อพิจารณาการคำนวณจากการเปรียบเทียบจากอัตราการบำบัดและปริมาตรบรรจุแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าการที่จะทำให้อัตราการบำบัดของตัวกรองชีวภาพที่บรรจุในถังปฏิกรณ์เดียวกันมีการบำบัดในส่วนไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันใกล้เคียงกันนั้น ต้องนำปริมาตรบรรจุและอัตราการบำบัดมาพิจารณาควบคู่กัน ซึ่งถ้าพิจารณาอัตราการบำบัดเพียงอย่างเดียวในการทดลองต่อไปจะใช้ไบโอคอร์ดความยาวเท่าเดิมคือ 30 ซม. เพื่อบำบัดแอมโมเนียร่วมกับหินพัมมิสบดบริเวณด้านบนที่หนา 1 ซม. อาจไม่สามารถทำให้อัตราไนทริฟิเคชันมีค่าใกล้เคียงกับอัตราดีไนทริฟิเคชันได้ เนื่องจากการบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันส่วนใหญ่จะเกิดได้ช้ากว่าการบำบัดไนเทรตด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน เพราะไนทริฟายอิงแบคทีเรียมีการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างช้ากว่า

ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรีย จึงต้องมีการพิจารณาปริมาตรบรรจุด้วยอีกทางหนึ่ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าต้องทำการเพิ่มความยาวของไบโอคอร์ดจาก 30 ซม. (ปริมาตรบรรจุ 477 มล.) เป็น 1 ม. (ปริมาตรบรรจุ 1,590 มล.) เพื่อให้ปริมาตรบรรจุของส่วนบำบัดไนทริฟิเคชันมีค่าประมาณ 1,990 มล. จึงจะทำให้ปริมาตรบรรจุมีค่าใกล้เคียงกับหินพัมมิสบดหนา 5 ซม. (ปริมาตรบรรจุ 2,000 มล.) ซึ่งเป็นส่วนบำบัดดีไนทริฟิเคชัน โดยคาดว่าอาจเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะทำให้ไนทริฟายอิงแบคทีเรียเกิดการยึดเกาะได้ในปริมาณมากขึ้น และทำให้อัตราไนทริฟิเคชันมีค่าใกล้เคียงกับอัตราดีไนทริฟิเคชันได้ ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะทำการศึกษาด้วยการบรรจุตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดความยาว 1 ม. และหินพัมมิสบดความหนา 5 ซม. ลงในถังปฏิกรณ์เดียวกัน เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชัน



รูปที่ 4.8 แผนภาพแสดงการคำนวณความยาวของตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่จะบรรจุลงในถังปฏิกรณ์ใบเดียวกับหินพัมมิสบดหนา 5 ซม. ซึ่งในการทดลองจริงใช้ไบโคอร์ดความยาวจาก 30 ซม. เพิ่มเป็น 1 ม. เพื่อให้การบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตมีประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกัน

4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์เดียว

- *การบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของตัวกรองชีวภาพในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชัน*

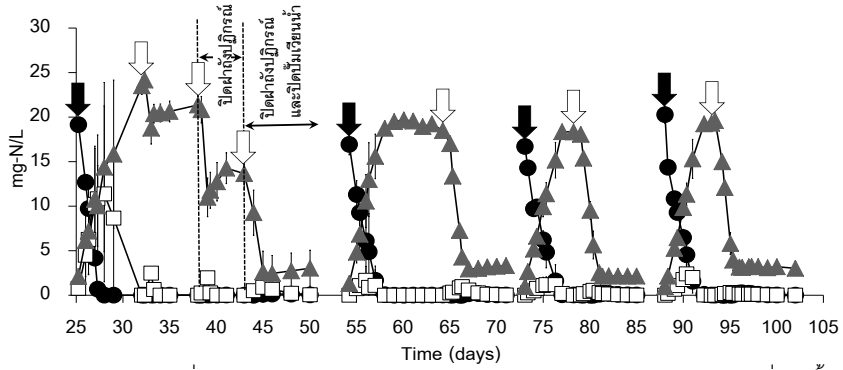
การทดลองนี้ทำการบรรจุหินพัมมิสบดที่บริเวณก้นถังปฏิกรณ์ด้วยความหนา 5 ซม. และทำการบ่มเชื้อดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียเป็นเวลาประมาณ 24 วัน จากนั้นนำตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่ผ่านการปรับสภาพและทดสอบประสิทธิภาพไนทริฟิเคชันแล้วมาบรรจุด้วยความยาวที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อ 4.1.4 คือความยาว 1 ม. โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดการทดลองที่ 1 (ถังปฏิกรณ์บรรจุหินพัมมิสบด มีการเติมแอมโมเนียคลอไรด์ และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอล) ชุดการทดลองที่ 2 (ถังปฏิกรณ์บรรจุไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด มีการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอล) ชุดการทดลองที่ 3 (ถังปฏิกรณ์บรรจุหินพัมมิสบด มีการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์และเมทานอลพร้อมกัน และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอลลงไปอีกครั้ง) ชุดการทดลองที่ 4 (ถังปฏิกรณ์บรรจุไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด มีการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์และเมทานอลพร้อมกัน และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอลลงไปอีกครั้ง) ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตของชุดการทดลองที่ 1 และ 2 กับชุดการทดลองที่ 3 และ 4 ระหว่างสภาวะที่ทำการเติมและไม่เติมเมทานอลลงในชั้นน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการเติมแอมโมเนียคลอไรด์ 20 มก.ไนโตรเจน/ล. ปริมาตร 8 ล. และปรับค่าสภาพด่างให้อยู่ในช่วง 100–150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ทุกชุดการทดลอง แต่ชุดการทดลองที่ 3 และชุดการทดลองที่ 4 จะทำการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ลงไปพร้อมกับการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ และจากนั้นทำการเติมเมทานอลลงไปเพื่อบำบัดไนเทรตที่สะสมอยู่ในน้ำซึ่งเกิดขึ้นจากกระบวนการไนทริฟิเคชันในทุกชุดการทดลอง โดยผลจากการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่ากระบวนการไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นในทุกชุดการทดลอง โดยพบการลดลงของแอมโมเนียและการเพิ่มขึ้นของไนไทรต์เป็นระยะเวลาสั้นๆ ก่อน หลังจากนั้นแอมโมเนียและไนไทรต์จะถูกบำบัดด้วยการเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไนเทรต ในขณะที่การเติมเมทานอลลงไปพร้อมกับแอมโมเนียมคลอไรด์ในชุดการทดลองที่ 3 และ 4 ไม่มีผลยับยั้งปฏิกิริยาไนทริฟิเคชัน โดยจะพบการเปลี่ยนแปลงแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตคล้ายกับชุดการทดลองที่ 1 และ 2 ในวันที่ 32 ของการทดลองได้ทำการกระตุ้นการบำบัดไนเทรตที่สะสมอยู่ใน

ถังปฏิกรณ์ทุกชุดการทดลองด้วยการเติมเมทานอลลงไป พบว่าไนเทรตยังไม่สามารถถูกบำบัดไปเป็นก๊าซไนโตรเจนได้ ที่เป็นเช่นนี้อาจมีสาเหตุมาจากภายในถังปฏิกรณ์ยังคงมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมากเกินไป จึงทำให้ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียและแบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ เกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยการใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าไนเทรต ซึ่งดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียจะทำงานได้ดีในสภาวะไร้ออกซิเจนเพื่อการบำบัดไนเทรตให้เป็นก๊าซไนโตรเจน จากเหตุผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน โดยมีรายงานว่าไนทริฟายอิงแบคทีเรียสามารถทำงานได้เมื่อมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำอย่างน้อย 2 มก./ล. (Timmons และคณะ, 2002) ในขณะที่ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียจะทำงานได้ในสภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำหรือไม่มีออกซิเจนภายในระบบ (Van Rijn และคณะ, 2006) ดังนั้นเพื่อให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเกิดได้ดีขึ้น จึงต้องทำการปรับเปลี่ยนสภาวะการเดินระบบใหม่ด้วยการพยายามควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายน้ำภายในถังปฏิกรณ์ให้ลดลง โดยการปิดฝาถังปฏิกรณ์ด้วยพลาสติกและเติมเมทานอลลงไปในวันที่ 38 ของการทดลองอีกครั้ง พบว่ายังมีไนเทรตสะสมอยู่ในน้ำในปริมาณมาก แสดงว่าการปิดฝาถังปฏิกรณ์เพื่อป้องกันการถ่ายเทออกซิเจนจากอากาศลงสู่น้ำเพียงอย่างเดียวยังไม่เพียงพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเกิดได้ เพราะถังปฏิกรณ์ยังไม่อยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจนที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการปรับแนวทางการทดลองใหม่อีกครั้งด้วยการเดินระบบในสภาวะที่ปิดฝาถังปฏิกรณ์ด้วยพลาสติกเช่นเดิม แต่เพิ่มการปิดปั๊มเวียนน้ำที่ยังทำงานอยู่ด้วยเพื่อไม่ให้การไหลเวียนของน้ำกระตุ้นให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจน พบว่าภายหลังการเติมเมทานอลในวันที่ 43 ปริมาณไนเทรตในน้ำลดลงอย่างชัดเจน จากผลการทดลองดังกล่าวยืนยันอย่างชัดเจนว่าปริมาณออกซิเจนเป็นปัจจัยหลักที่ควบคุมการทำงานของแบคทีเรียในระบบ ถ้าสภาวะในถังปฏิกรณ์มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่เหมาะสมสำหรับไนทริฟายอิงแบคทีเรียหรือดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียเพียงกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งเท่านั้น ก็จะทำให้แบคทีเรียทั้งสองกลุ่มนี้ไม่สามารถทำงานร่วมกันได้ จึงต้องมีการปรับปริมาณออกซิเจนละลายน้ำให้มีความเหมาะสม ด้วยการกระตุ้นให้เกิดการบำบัดแอมโมเนียผ่านกระบวนไนทริฟิเคชันในสภาวะที่มีออกซิเจนก่อน จากนั้นจึงบำบัดไนเทรตต่อเนื่องด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันในสภาวะไร้ออกซิเจน

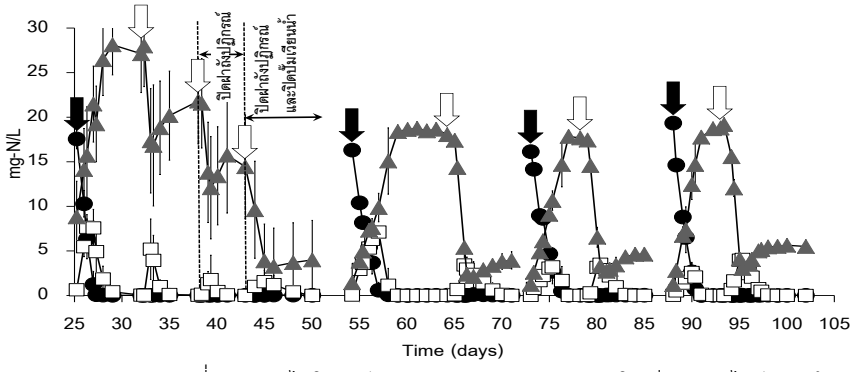
ในช่วงวันที่ 54 ของการทดลองเป็นต้นไป จึงได้เริ่มการทดลองใหม่ด้วยสภาวะที่ได้จากการทดสอบเบื้องต้น คือทำการปิดฝาถังปฏิกรณ์ด้วยพลาสติกทุกถัง เมื่อทำการบำบัดไนเทรตจะทำการปิดปั๊มเวียนน้ำและเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ลงไป ถ้าตรวจพบว่าไนเทรตเกิดการบำบัดลดลงจนคงที่แล้วจะทำการถ่ายน้ำออกและเปลี่ยนน้ำใหม่

เพื่อทำการทดลองซ้ำอีก 2 รอบ จากผลการทดลอง (ดังรูปที่ 4.9) พบว่าได้ผลการทดลองที่คล้ายกับในช่วงการทดสอบเบื้องต้น กล่าวคือ มีกระบวนการไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นทุกชุดการทดลอง และพบการลดลงของแอมโมเนียจนมีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.1 มก.ไนโตรเจน/ล. ภายใน 3-8 วัน การเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ลงไปพร้อมกับการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ในชุดการทดลองที่ 3 และ 4 ไม่สามารถทำให้การบำบัดแอมโมเนียด้วยปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันและบำบัดไนเทรตด้วยปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นพร้อมกันได้ในขั้นตอนเดียว ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากไนทริฟายอิงแบคทีเรียและดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียสามารถทำงานได้ดีในสภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่แตกต่างกัน ซึ่งจากการทดลองพบว่าในถังปฏิกรณ์มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเพียงพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ดี แต่เป็นปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่ยังมากเกินไปซึ่งไม่เหมาะสมที่จะทำให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันที่บริเวณชั้นหินพัมมิสเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง ถึงแม้ว่าจะปิดฝาถังด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันออกซิเจนมากเกินไปเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แล้วก็ตาม ซึ่งออกซิเจนอาจจะแทรกซึมไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดหินพัมมิสและเข้าไปถึงบริเวณรูพรุนจึงส่งผลให้ชั้นหินพัมมิสไม่อยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน จึงทำให้ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียและแบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ ใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนไนเทรตในการบำบัดเมทานอล เป็นสาเหตุให้ปริมาณไนเทรตไม่ลดลง ทำให้กระบวนการดีไนทริฟิเคชันไม่สามารถเกิดขึ้นได้พร้อมกับกระบวนการไนทริฟิเคชัน นอกจากนี้การเติมเมทานอลลงไปพร้อมกับแอมโมเนียคลอไรด์ยังทำให้ปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันเกิดได้ช้าในช่วงแรก และต้องรอให้เมทานอลถูกใช้ไปจนหมดก่อนแอมโมเนียจึงจะถูกเปลี่ยนไปเป็นไนเทรตได้เร็วขึ้น เป็นผลให้ต้องใช้ระยะเวลาในการบำบัดแอมโมเนียนานกว่าชุดการทดลองที่ 1 และ 2 ที่ไม่มีการเติมเมทานอลลงไปพร้อมกับแอมโมเนียมคลอไรด์ และจากการทดลองเมื่อตรวจวัดปริมาณไนเทรตหลังจากที่แอมโมเนียถูกบำบัดหมดแล้ว พบว่าในบางชุดการทดลองมีปริมาณไนเทรตน้อยกว่าปริมาณแอมโมเนียที่ตรวจวัดได้เมื่อเริ่มต้นเล็กน้อย (ดังรูปที่ 4.9) แสดงว่ามีไนเทรตบางส่วนหายไปเนื่องจากการเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซไนโตรเจนด้วยปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันซึ่งเกิดขึ้นควบคู่กับการบำบัดแอมโมเนียด้วยปฏิกิริยาไนทริฟิเคชัน แต่อย่างไรก็ตามไนเทรตที่สะสมอยู่ในน้ำยังมีปริมาณมาก จึงต้องทำการทดลองต่อเนื่องด้วย การปิดปั๊มเวียนน้ำและเติมเมทานอลลงไปเพื่อบำบัดไนเทรตที่สะสมอยู่ในน้ำ พบว่าทุกชุดการทดลองในระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันมีไนไทรต์เกิดขึ้นในระยะเวลาหนึ่งและหลังจากนั้นจะถูกบำบัดหมด ส่วนปริมาณไนเทรตในน้ำเกิดการลดลงและเปลี่ยนไปอยู่ในรูปก๊าซไนโตรเจนจนเหลือความเข้มข้นต่ำกว่า 5 มก.ไนโตรเจน/ล. ภายใน 2-3 วัน

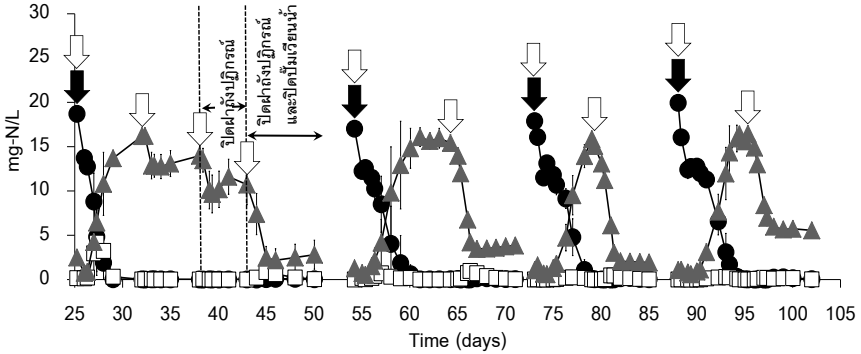
เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตของการทดลองทั้ง 4 ชุด ที่แสดงดังตารางที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ 1 กับ 2 และระหว่างชุดการทดลองที่ 3 กับ 4 ที่มีหรือไม่มีตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดบรรจุเพิ่มเข้าไป พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตใกล้เคียงกัน และทุกชุดการทดลองมีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียใกล้เคียงกัน แสดงว่าการเติมเมทานอลลงไปพร้อมกับแอมโมเนียมคลอไรด์ไม่มีผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียลดลง เพียงแต่ทำให้การบำบัดแอมโมเนียเกิดได้ช้าขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นสาเหตุทำให้ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียมีการเจริญเติบโตช้า เพราะในสภาวะที่มีออกซิเจนเพียงพอนอกจากดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียจะสามารถใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายเมทานอลได้แล้วยังมีแบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ มาใช้เมทานอลร่วมด้วย ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ อาจมีจำนวนมากกว่าและสามารถใช้เมทานอลได้ดีกว่า จึงทำให้เมทานอลมีปริมาณไม่เพียงพอสำหรับดีไนทริฟายอิงแบคทีเรีย เป็นสาเหตุทำให้ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียมีการเจริญเติบโตไม่ทันหรือหยุดชะงักได้ ซึ่งภาวะดังกล่าวส่งผลต่อเนื่องทำให้การเติมเมทานอลลงไปอีกครั้งในสภาวะไร้ออกซิเจนเพื่อบำบัดไนเทรตที่สะสมอยู่ในน้ำ มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไนเทรตของชุดการทดลองที่ 3 และ 4 มีค่าน้อยกว่าชุดการทดลองที่ 1 และ 2 ส่วนการที่ทุกชุดการทดลองมีประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียสูงกว่าไนเทรต เนื่องจากแอมโมเนียสามารถถูกบำบัดให้หมดได้จึงทำให้มีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 99 แต่ไนเทรตถ้าทำการบำบัดจนหมดจะเสี่ยงต่อการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ หากสภาวะขณะนั้นไม่มีออกซิเจนอยู่ภายในถังปฏิกรณ์เลย จึงทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดไนเทรตมีค่าต่ำกว่า



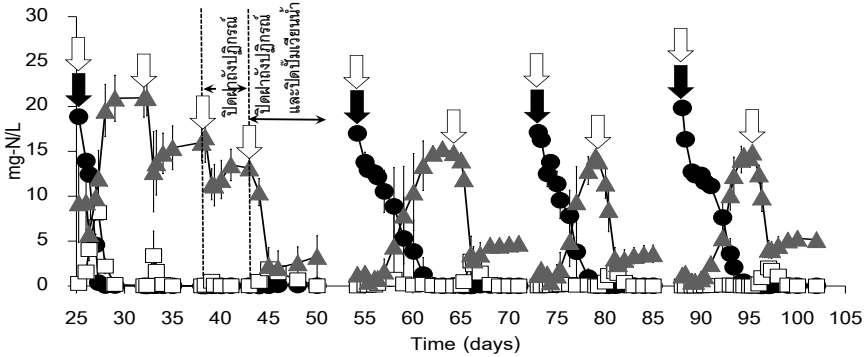
(ก) ชุดการทดลองที่ 1 (บรรจุหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอล)



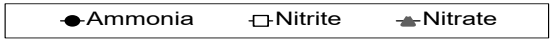
(ข) ชุดการทดลองที่ 2 (บรรจุไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอล)



(ค) ชุดการทดลองที่ 3 (บรรจุหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์และเมทานอลพร้อมกันและบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอลลงไปอีกครั้ง)



(ง) ชุดการทดลองที่ 4 (บรรจุไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์และเมทานอลพร้อมกัน และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอลลงไปอีกครั้ง)



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์เดียว ทำการทดสอบเบื้องต้นในวันที่ 25-50 ของการทดลอง และทำการทดลองจริงตั้งแต่วันที่ 54 ของการทดลองเป็นต้นไป ในสภาวะที่ปิดฝาถังปฏิกรณ์ทุกชุดตลอดการทดลอง โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ 20 มก.ไนโตรเจน/ล. และเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ตามลำดับ

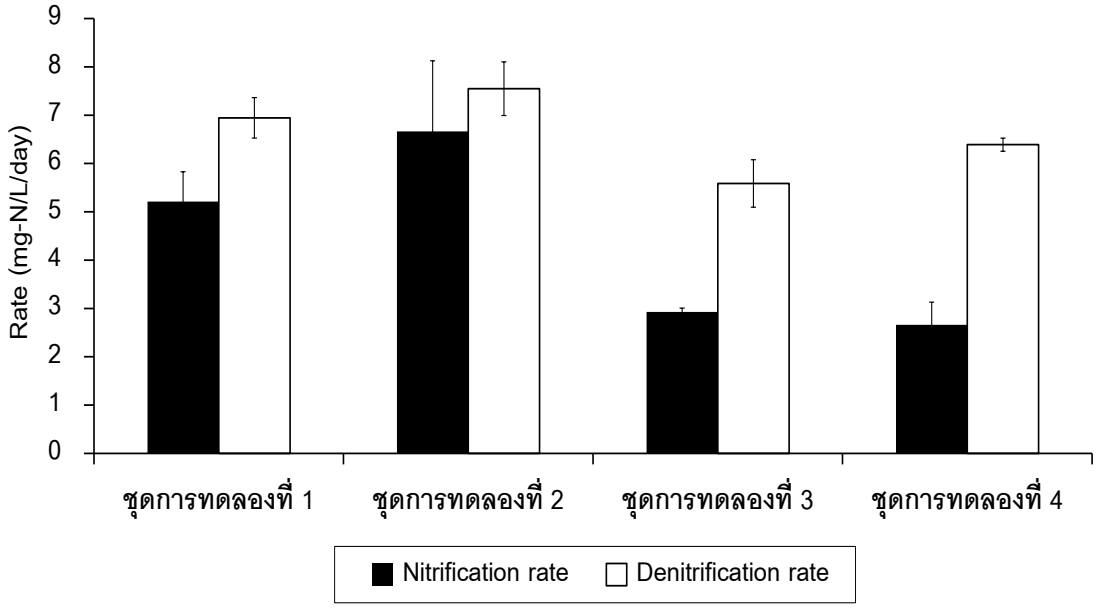
ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตในน้ำเสียสังเคราะห์ของการทดลอง 4 ชุด ที่ทำการบรรจุตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์เดียวกัน

ชุดการทดลอง	ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)	
	แอมโมเนีย	ไนเทรต
ชุดการทดลองที่ 1 (บรรจุหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอล)	99.69 ± 0.14	85.44 ± 2.50
ชุดการทดลองที่ 2 (บรรจุไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอล)	99.76 ± 0.22	85.57 ± 2.35
ชุดการทดลองที่ 3 (บรรจุหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์และเมทานอลพร้อมกัน และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอลลงไปอีกครั้ง)	99.73 ± 0.20	73.74 ± 8.77
ชุดการทดลองที่ 4 (บรรจุไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์และเมทานอลพร้อมกัน และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอลลงไปอีกครั้ง)	99.61 ± 0.07	78.58 ± 4.93

- *อัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน*

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันที่คำนวณเทียบกับปริมาตรน้ำในถังปฏิกรณ์ของการทดลอง 4 ชุด โดยเปรียบเทียบกันระหว่างชุดการทดลองที่ 1 กับชุดการทดลองที่ 2 และระหว่างชุดการทดลองที่ 3 กับชุดการทดลองที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าให้ผลอัตราการบำบัดที่ไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงว่าตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดที่เติมเพิ่มลงไปไม่ได้มีผลช่วยให้ปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเกิดได้เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการที่ไม่ได้ทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้น โดยทุกชุดการทดลองพบว่ามีอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันต่ำกว่าอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชัน เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายอิงมีการเจริญเติบโตช้ากว่าแบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟายอิง หรืออาจเกิดจากการมีปริมาณออกซิเจนในถังปฏิกรณ์น้อยเกินไป นอกจากนี้การเติมเมทานอลลงไปพร้อมกับแอมโมเนียมคลอไรด์ส่งผลให้อัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันลดลง จึงทำให้อัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันของชุดการทดลองที่ 3 กับชุดการทดลองที่ 4 มีค่าต่ำกว่า

ชุดการทดลองที่ 1 กับชุดการทดลองที่ 2 ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Zhu และ Chen (2001) ที่ศึกษาผลของสารอินทรีย์คาร์บอนต่ออัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพแบบฟิล์มตรึง พบว่า การเติมสารอินทรีย์คาร์บอนด้วยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมากกว่า 1 จะมีผลทำให้อัตราไนทริฟิเคชันลดลง และในทำนองเดียวกันจากการศึกษาของ Ling และ Chen (2005) ที่รายงานถึงผลของสารอินทรีย์คาร์บอนต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ 3 ชนิด ได้แก่ Floating bead filter Fluidized sand filter และ Submerge bio-cube filter พบว่า เมื่อทำการทดลองด้วยการเติมแอมโมเนียความเข้มข้น 10 มก.ไนโตรเจน/ล.และเติมสารอินทรีย์คาร์บอนด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 3 เท่า มีผลทำให้อัตราไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพทั้งสามชนิดลดลงเหลือประมาณร้อยละ 60 - 70 และการเติมเมทานอลลงไปพร้อมกับแอมโมเนียมคลอไรด์ยังส่งผลต่อเนื่องทำให้ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเกิดได้ช้าตามไปด้วย ซึ่งมีเหตุผลที่คล้ายกับการที่ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดไนเทรตลดลง



รูปที่ 4.10 อัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพที่บรรจุลงในถังปฏิกรณ์เดียวกัน (คิดเทียบกับปริมาตรน้ำในถังปฏิกรณ์) ของการทดลอง 4 ชุด

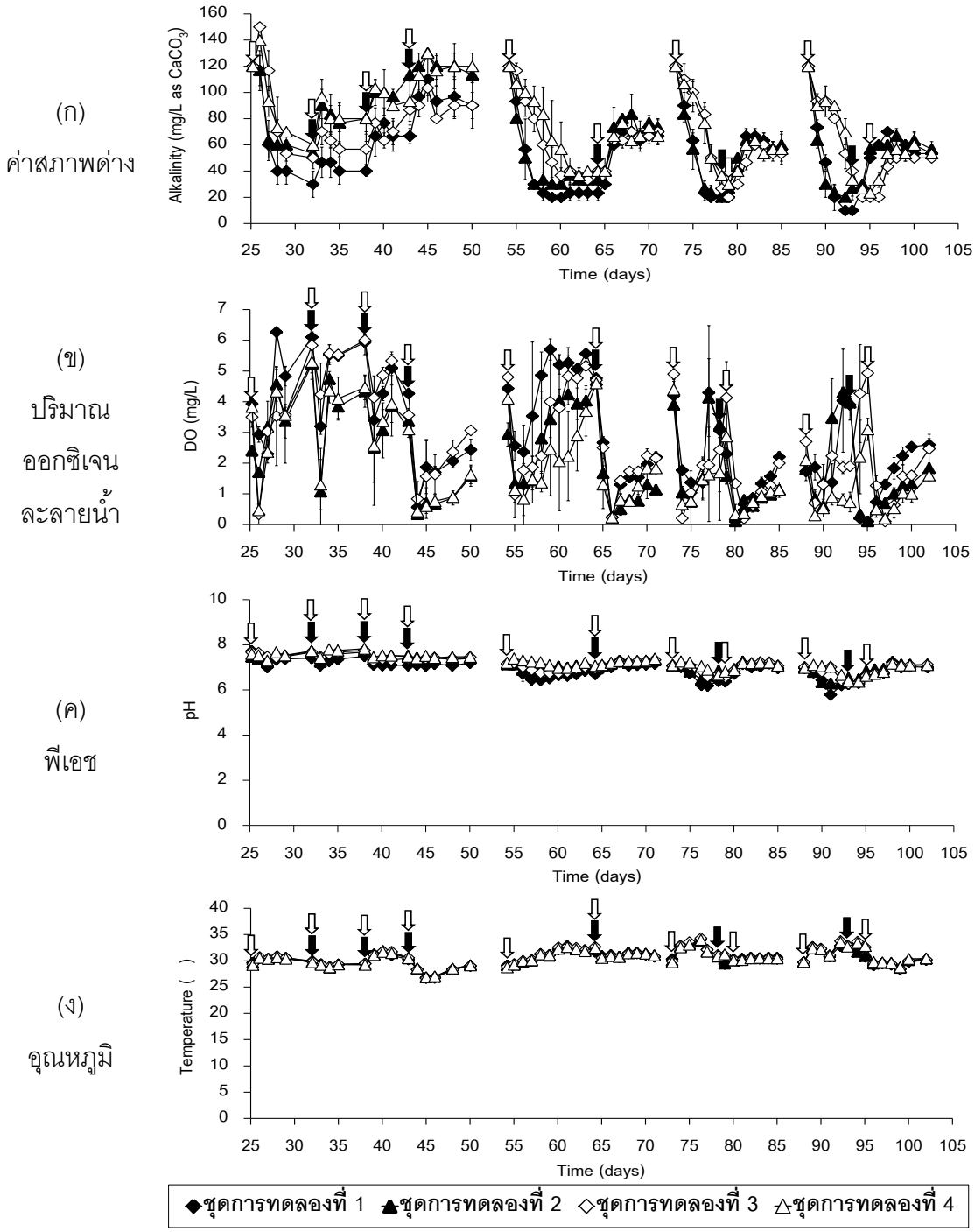
- *การตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ*

ผลการตรวจวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์เดียว ได้แก่ ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.11 โดยเมื่อเริ่มต้นการทดลองในแต่ละช่วงการบำบัดจะทำการปรับค่าสภาพด่างให้เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชัน คือ 120 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ในทุกชุดการทดลอง ผลการตรวจวัดค่าสภาพด่าง (รูปที่ 4.11ก) ในแต่ละช่วงการบำบัดพบว่าทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพด่างใกล้เคียงกัน เมื่อแอมโมเนียถูกบำบัดด้วยปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันค่าสภาพด่างจะเกิดการลดลงและคงที่เมื่อแอมโมเนียเกิดการบำบัดหมด จากนั้นเมื่อทำการบำบัดไนเทรตต่อด้วยปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันพบว่าค่าสภาพด่างมีแนวโน้มสูงขึ้นแต่มีค่าน้อยกว่าปริมาณเริ่มต้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะในทางทฤษฎีการออกซิไดซ์แอมโมเนียไนโตรเจน 1 ก. มีความต้องการค่าสภาพด่าง 7.14 ก.แคลเซียมคาร์บอเนต ในขณะที่การรีดิวซ์ไนเทรต 1 ก. ให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนจะผลิตค่าสภาพด่าง 3.57 ก. แคลเซียมคาร์บอเนต (Chang และ Tseng, 1999; Li และ Irvin, 2007) จึงเป็นผลทำให้ในการทดลองนี้เมื่อสิ้นสุดการบำบัดไนเทรตจะพบปริมาณค่าสภาพด่างในถังปฏิกรณ์น้อยกว่าปริมาณเริ่มต้นที่ใส่เข้าไป

เมื่อพิจารณาค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (รูปที่ 4.11ข) ในช่วงการทดสอบเบื้องต้นพบว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจะมีค่าสูงเป็นผลทำให้การบำบัดดีไนทริฟิเคชันไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ในการทดลองจริงจึงทำการปรับสภาวะใหม่ด้วยการปิดฝาถังปฏิกรณ์ตลอดการทดลอง และเมื่อทำการเติมเมทานอลเพื่อบำบัดไนเทรตจะทำการปิดปั๊มเวียนน้ำ พบว่าทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำไปในทิศทางเดียวกัน ในแต่ละช่วงการบำบัดจะพบว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีค่าสูงในช่วงแรกเมื่อเติมน้ำเสียสังเคราะห์ลงในถังปฏิกรณ์และทำการปิดฝาถังปฏิกรณ์ จากนั้นจะมีค่าค่อยลดลงจนเหลือปริมาณที่ต่ำกว่า 1 มก./ล. ในช่วงที่มีปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้น และปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นมาอีกในช่วงที่แอมโมเนียและไนเทรตเริ่มมีปริมาณต่ำจนถูกบำบัดหมดหรือเหลือในปริมาณคงที่ แสดงว่าในช่วงที่ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำค่อยลดลงเนื่องจากการปิดฝาถังปฏิกรณ์และยังคงเปิดปั๊มเวียนน้ำเป็นช่วงที่ประมาณออกซิเจนละลายน้ำยังมีเพียงพอสำหรับการบำบัดแอมโมเนียได้จนหมดด้วยปฏิกิริยาไนทริฟิเคชัน แต่ชุดการทดลองที่ 3 และชุดการทดลองที่ 4 ที่มีการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ลงไปพร้อมกับเมทานอล พบว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลงจนเหลือ

ต่ำกว่าชุดการทดลองที่ 1 และชุดการทดลองที่ 2 ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนของแบคทีเรียที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เมื่อปริมาณสารอินทรีย์ลดลงจนหมด ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำก็จะกลับเพิ่มขึ้นและเกิดการบำบัดแอมโมเนียได้ต่อจนหมด ต่อมาเมื่อทำการเติมเมทานอลและปิดปั๊มเวียนน้ำเป็นช่วงที่ออกซิเจนละลายน้ำมีปริมาณค่อยๆ ลดลงและเหลือในปริมาณน้อยที่สุดที่สามารถเกิดบำบัดไนเทรตด้วยปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันได้ จากการทดลองจะเห็นได้ว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่ต่ำกว่า 2 มก./ล. สามารถบำบัดแอมโมเนียได้แต่อาจส่งผลกระทบต่ออัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันได้ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การทดลองนี้อัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันมีค่าต่ำกว่าอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชัน ดังนั้นเพื่อให้ปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเกิดได้ดีและมีอัตราการบำบัดสูงควรควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันให้มีค่ามากกว่า 2 มก.ไนโตรเจน/ล. สำหรับช่วงการบำบัดไนทริฟิเคชัน และควบคุมให้มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำน้อยที่สุดหรือไม่มีเลยสำหรับช่วงการบำบัดดีไนทริฟิเคชัน

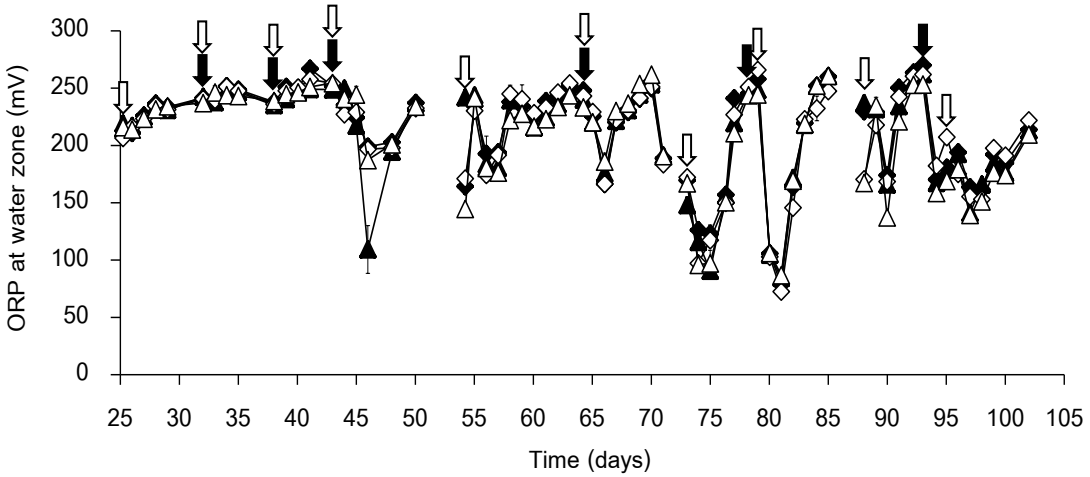
สำหรับค่าพีเอช (รูปที่ 4.11ค) และอุณหภูมิ (รูปที่ 4.11ง) พบว่าทุกชุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มคงที่ตลอดการทดลอง อุณหภูมิและพีเอชที่ตรวจวัดได้ตลอดการทดลองนี้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับในช่วงการทดสอบเบื้องต้นและในช่วงการทดลองจริงอยู่ที่ 29.62 ± 1.36 และ 31.08 ± 1.30 ^{o}ซ ตามลำดับ ส่วนพีเอชสำหรับในช่วงการทดสอบเบื้องต้นและในช่วงการทดลองจริงมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.44 ± 0.19 และ 6.93 ± 0.30 ตามลำดับ



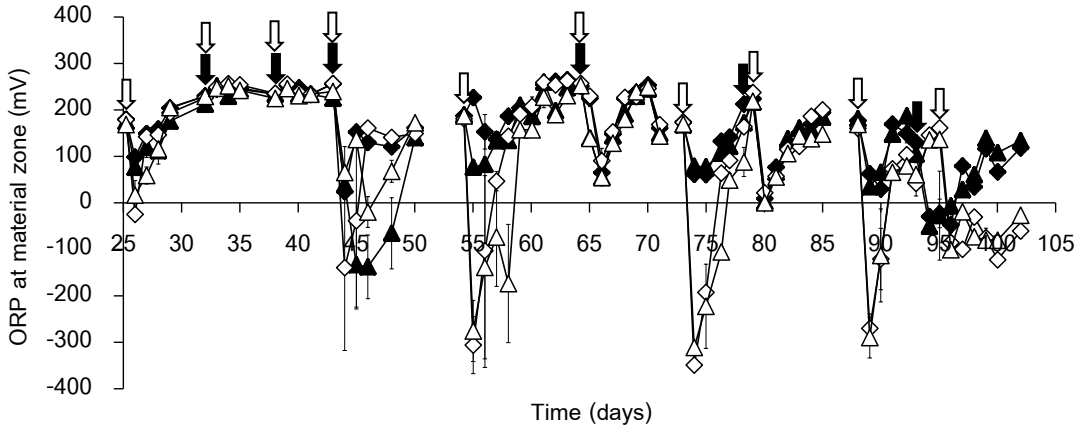
รูปที่ 4.11 ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิที่ทำการตรวจวัดในการทดลองช่วงที่2 ทำการทดสอบเบื้องต้นในวันที่ 25 - 50 ของการทดลอง และทำการทดลองจริงตั้งแต่วันที่ 54 ของการทดลองเป็นต้นไป (ทำการทดลองซ้ำ 3 รอบ) โดย ⬇ และ ⇩ แสดงวันที่มีการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ของชุดการทดลองที่ 1 กับ 2 และชุดการทดลองที่ 3 กับ 4 ตามลำดับ

ผลการตรวจวัดค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (โออาร์พี) แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าค่าโออาร์พีที่บริเวณชั้นน้ำมีค่าเป็นบวกอยู่ในช่วง 109.27–267.00 และ 72.63–270.00 มิลลิโวลต์ สำหรับในการทดสอบเบื้องต้นและในช่วงทดลองจริงตามลำดับ ส่วนที่บริเวณชั้นหินพัมมิสค่าโออาร์พีมีทั้งค่าที่เป็นบวกและค่าที่ติดลบอยู่ในช่วง -139.43 ถึง 256.63 และ -348.97 ถึง 264.90 มิลลิโวลต์ สำหรับในการทดสอบเบื้องต้นและในช่วงทดลองจริง ตามลำดับ จากทฤษฎีที่กล่าวว่าถ้ามีปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นค่าโออาร์พีจะมีค่าเป็นบวก และถ้ามีปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นค่าโออาร์พีจะมีค่าเป็นลบ จากรายงานของธงชัย พรรณสวัสดิ์ (2544) กล่าวว่า ค่าโออาร์พีสำหรับสภาวะแอนอกซิกควรมีค่าอยู่ในช่วง -50 ถึง -100 มิลลิโวลต์ จากการทดลองพบว่าในช่วงการบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันชุดทดลองที่เติมเมทานอลลงไปพร้อมกับแอมโมเนียมคลอไรด์ค่าโออาร์พีที่บริเวณชั้นหินพัมมิสจะมีค่าติดลบ ทั้งนี้อาจเนื่องจากมีทั้งดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียและแบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ มาใช้ออกซิเจนและเมทานอลร่วมกัน จึงทำให้ออกซิเจนมีปริมาณต่ำลงและแทรกซึมลงไปที่ช่องว่างระหว่างเม็ดหินพัมมิสได้น้อยลง และเมื่อเมทานอลหมดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าโออาร์พีเป็นบวก โดยในช่วงของการบำบัดไนเทรตด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันพบว่าค่าโออาร์พีที่วัดได้ไม่เป็นไปตามทฤษฎีเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา โดยพบค่าโออาร์พีที่บริเวณชั้นหินพัมมิสบางชุดการทดลองมีค่าเป็นบวก ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ผลการทดลองเป็นเช่นนี้อาจเป็นเหตุผลเดียวกับที่เคยกล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.1.2 ดังนั้นการพิจารณาเพียงค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในการทดลองนี้อาจยังไม่ให้ผลแน่ชัดว่ามีปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์เดียวหรือไม่ แต่ก็สามารถประเมินได้จากการพิจารณาค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ร่วมด้วย ได้แก่ ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ปริมาณแอมโมเนียและไนเทรตที่ลดลง เป็นต้น

รูปที่ 4.13 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีในน้ำเมื่อทำการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ทั้งในช่วงการทดสอบเบื้องต้นและช่วงการทดลองจริง พบว่าทุกชุดการทดลองเมื่อทำการเติมเมทานอลลงไป ซีโอดีจะมีปริมาณค่อยๆ ลดลงและคงเหลือในปริมาณต่ำมีค่าเฉลี่ยประมาณ 9.74±7.36 และ 8.49±5.74 มก.ซีโอดี/ล. ตามลำดับ แสดงว่าเมทานอลที่เติมลงไปได้ถูกแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้ออกซิเจนเพื่อบำบัดเมทานอลนำไปใช้ในช่วงการบำบัดไนทริฟิเคชันและถูกแบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟายอิงนำไปใช้ในช่วงบำบัดดีไนทริฟิเคชัน



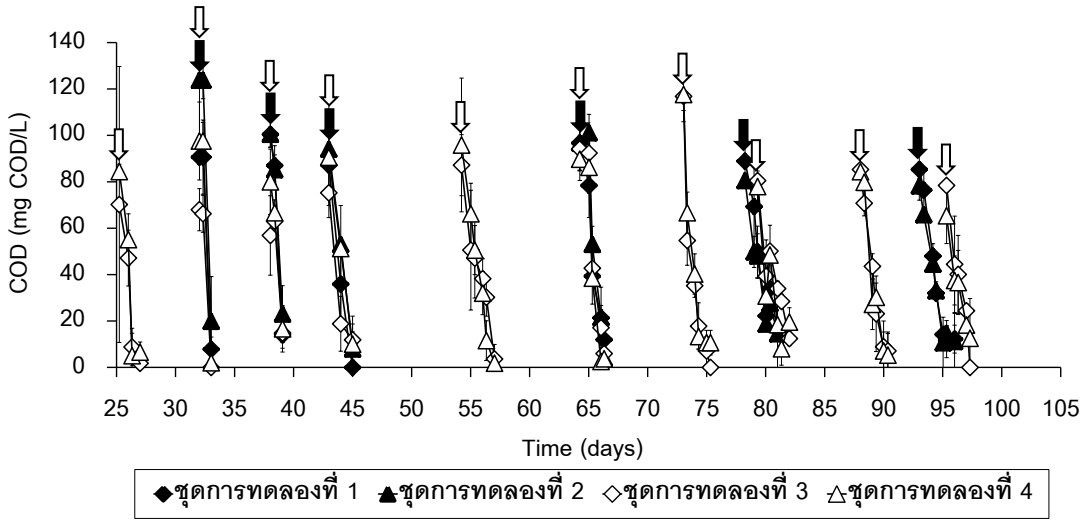
(ก) ค่าโออาร์พีที่บริเวณชั้นน้ำ



(ข) ค่าอาร์พีที่บริเวณชั้นหินพัมมิส

◆**ชุดการทดลองที่** 1 ▲**ชุดการทดลองที่** 2 ◇**ชุดการทดลองที่** 3 △**ชุดการทดลองที่** 4

รูปที่ 4.12 ค่าศักย์ออกซิเดชัน–รีดักชันที่บริเวณชั้นน้ำและชั้นหินพัมมิสลึก 2.5 ซม. ที่ทำการตรวจวัดในการทดลองช่วงที่ 2 ทำการทดสอบเบื้องต้นในวันที่ 25 - 50 ของการทดลอง และทำการทดลองจริงตั้งแต่วันที่ 54 ของการทดลองเป็นต้นไป (ทำการทดลองซ้ำ 3 รอบ) โดย ⬇ และ ⇩ แสดงวันที่มีการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ของชุดการทดลองที่ 1 กับ 2 และชุดการทดลองที่ 3 กับ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 ปริมาณซีโอดีที่ทำการตรวจวัดเมื่อมีการเติมเมทานอลในการทดลองช่วงที่ 2 ทำการทดสอบเบื้องต้นในวันที่ 25-50 ของการทดลอง และทำการทดลองจริงตั้งแต่วันที่ 54 ของการทดลองเป็นต้นไป (ทำการทดลองซ้ำ 3 รอบ) โดย ⬇ และ ⇩ แสดงวันที่มีการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ของชุดการทดลองที่ 1 กับ 2 และชุดการทดลองที่ 3 กับ 4 ตามลำดับ

ดังนั้นผลการทดลองในช่วงนี้แสดงให้เห็นว่า ถังปฏิกรณ์ชุดการทดลองที่ 1 และ 3 ที่บรรจุหินพัมมิสบดเพียงอย่างเดียวสามารถบำบัดแอมโมเนียให้หมดลงได้โดยไม่จำเป็นต้องใส่ไบโอคอร์ดเพิ่มเข้าไป ประกอบกับผลที่ได้จากการศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียของไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด พบว่าหินพัมมิสบดมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงกว่าไบโอคอร์ดมาก การเติมเมทานอลลงไปพร้อมแอมโมเนียมคลอไรด์ในแต่ละรอบของการบำบัดต้องรอให้เมทานอลถูกบำบัดด้วยแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้ออกซิเจนให้หมดก่อนแล้วแบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายอิงแบคทีเรียจึงค่อยทำหน้าที่บำบัดแอมโมเนียต่อได้หมด อีกทั้งยังไม่สามารถบำบัดแอมโมเนียให้เป็นก๊าซไนโตรเจนได้ภายในขั้นตอนเดียว แต่ต้องทำการเติมเมทานอลซ้ำลงไปอีกครั้งหนึ่งเพื่อบำบัดไนเทรตให้หมด ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองสารเคมีที่เติมลงไป ดังนั้นถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานต่อไปในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดคือ ชุดการทดลองที่ 1 ที่มีการบรรจุหินพัมมิสบดเพียงอย่างเดียว ด้วยการทดลองในสภาวะที่มีการปิดฝาถังปฏิกรณ์ด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันออกซิเจนจากอากาศที่มากเกินไปเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ทำการบำบัดแอมโมเนียผ่านปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันจากการทำงานของไนทริฟายอิงแบคทีเรียที่เกาะอยู่บริเวณด้านบนของชั้นหินพัมมิสความหนาประมาณ 1 ซม. หรือบริเวณลึกลงไปที่ยังสามารถรับออกซิเจนได้เพียงพอ จากนั้นไนเทรตที่เกิดขึ้นจะถูกบำบัดต่อด้วย

ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันจากการทำงานของดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียซึ่งอาศัยอยู่ในบริเวณรูพรุนของหินพัมมิสในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยต้องทำการปิดปั๊มเวียนน้ำและกระตุ้นการบำบัดไนเทรตด้วยการเติมเมทานอลในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1

การนำถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันตามสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองนี้ไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดไนโตรเจนในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในการทดลองต่อไป ด้วยการบรรจุหินพัมมิสบดเพียงอย่างเดียวความหนา 5 ซม. ลงถังปฏิกรณ์ หินพัมมิสจะเกิดการบำบัดไนโตรเจนผ่านการทำงานของแบคทีเรียที่ยึดเกาะอยู่ด้วยกลไกที่เกิดขึ้นคือ ในช่วงที่มีออกซิเจนเพียงพอไนทริฟายอิงแบคทีเรียที่อาศัยอยู่บริเวณชั้นหินพัมมิสและในรูพรุนของหินพัมมิสที่ความหนาประมาณ 1 ซม. เกิดการบำบัดแอมโมเนียด้วยการเปลี่ยนไปอยู่ในรูปไนเทรตผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน นอกจากนี้อาจมีดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียซึ่งสามารถอาศัยอยู่ในสภาวะที่มีอากาศนำแอมโมเนียบางส่วนมาใช้ในการเจริญเติบโตได้เล็กน้อย จากนั้นไนเทรตที่เกิดขึ้นจะถูกบำบัดไปอยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจนด้วยการเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนผ่านการทำงานของดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในรูพรุนของหินพัมมิสในสภาวะที่ไร้อากาศ นอกจากนี้สภาวะในช่วงการบำบัดไนเทรตอาจจะไม่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของไนทริฟายอิงแบคทีเรียที่อาศัยอยู่บริเวณชั้นหินพัมมิส จึงเป็นสาเหตุทำให้ไนทริฟายอิงแบคทีเรียบางส่วนมีการเจริญเติบโตช้าหรือตายได้

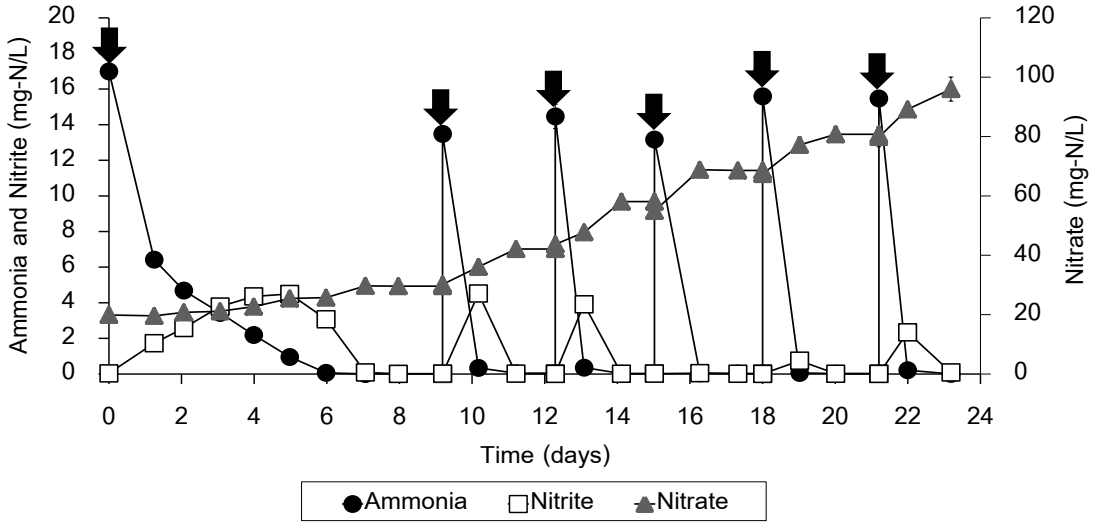
4.3 ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

จากผลการทดลองที่ผ่านมาในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 พบว่าหินพัมมิสบดเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพเพียงพอที่สามารถบำบัดได้ทั้งแอมโมเนียและไนเทรตผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์เดียว โดยไม่ต้องมีการใส่ตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดเพิ่มลงไป ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเดินระบบการทดลองด้วยการนำถังปฏิกรณ์ที่มีการบรรจุหินพัมมิสบดที่ก้นถังเป็นชั้นหนา 5 ซม. เพียงอย่างเดียวมาติดตั้งเข้ากับถังเลี้ยงปลานิล เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากน้ำเสียจริงที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงปลานิล รวมทั้งประเมินประสิทธิภาพของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำและประเมินสมดุลไนโตรเจน ทำการทดลองต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 121 วัน ในสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ แต่มีการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ภายในระบบ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุด ได้แก่ ชุดควบคุม-1 ประกอบด้วยถังเลี้ยงปลานิลเพียงอย่างเดียวที่ไม่มีการนำตะกอนออกจากระบบ ชุดควบคุม-2 ประกอบด้วยถังเลี้ยงปลานิลที่มีการหมุนเวียนน้ำเข้ากับถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน และชุดทดลองที่ประกอบด้วยถังเลี้ยงปลานิลที่มีการหมุนเวียนน้ำเข้ากับถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน โดยชุดควบคุม-2 และชุดทดลองจะมีการกรองตะกอนบางส่วนออกจากระบบ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีดังต่อไปนี้

4.3.1 การเตรียมถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน ถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน และการประเมินประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน

จากผลการทดลองและการวิจารณ์ผลที่ผ่านมาในหัวข้อ 4.2 ส่งผลทำให้ถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันและถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันในการทดลองนี้มีรูปแบบเหมือนกัน โดยภายในถังจะบรรจุหินพัมมิสบดที่ผ่านการบ่มเตรียมสภาพไนทริฟิเคชันก่อนเพื่อให้เกิดการเกาะติดของไนทริฟายอิงแบคทีเรีย ในระหว่างการทดลองทำการควบคุมค่าสภาพด่างให้อยู่ในช่วง 100-150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. และมีการเติมอากาศด้วยหัวทรายพ่นอากาศเพื่อควบคุมให้มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมากกว่า 4 มก./ล. ในระหว่างที่ทำการปรับสภาพไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบดเป็นเวลาประมาณ 23 วัน จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าหินพัมมิสบดในถังปรับสภาพไนทริฟิเคชันสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชัน โดยพบปริมาณไนไทรต์สะสมอยู่ระยะเวลาหนึ่งแล้วจึงเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไนเทรต จากนั้นจึงสุ่มหินพัมมิสบดมาบรรจุ

ในขวดพลาสติกที่ความหนาประมาณ 2 ซม. เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย พบว่าสามารถบำบัดแอมโมเนียความเข้มข้น 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ให้มีค่าต่ำกว่า 0.1 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้ภายในเวลาประมาณ 12 ชม. โดยมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงสุดเท่ากับ 15 ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน แสดงว่าหินพัมมิสบดมีไนทริฟายอิงแบคทีเรียเกาะอยู่ในปริมาณหนึ่งที่ทำให้สามารถบำบัดแอมโมเนียให้หมดได้ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบประสิทธิภาพของหินพัมมิสบดในหัวข้อ 4.1.1 พบว่ามีค่าต่ำกว่า เนื่องจากความแตกต่างของระยะเวลาในการปรับสภาพไนทริฟิเคชัน จึงทำให้มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียแตกต่างกัน ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าถ้าใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพไนทริฟิเคชันนาน จะทำให้มีเชื้อไนทริฟายอิงแบคทีเรียเพิ่มจำนวนขึ้นและส่งผลให้มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงขึ้นตามไปด้วย จากนั้นนำหินพัมมิสบดที่ผ่านการปรับสภาพเป็นเวลาประมาณ 23 วัน และทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียแล้วมาบรรจุเป็นชั้นหนา 5 ซม. ลงในถังพลาสติกขนาด 130 ล. ที่บรรจุน้ำจืดปริมาตร 100 ล. สำหรับถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันจะเป็นถังเปิดที่มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเพียงพอ ส่วนถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันจะทำการปิดฝาถังด้วยผ้าพลาสติกเพื่อป้องออกซิเจนที่มากเกินไปเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ จากนั้นทำการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตจากน้ำที่หมุนเวียนมาจากถังเลี้ยงปลานิล



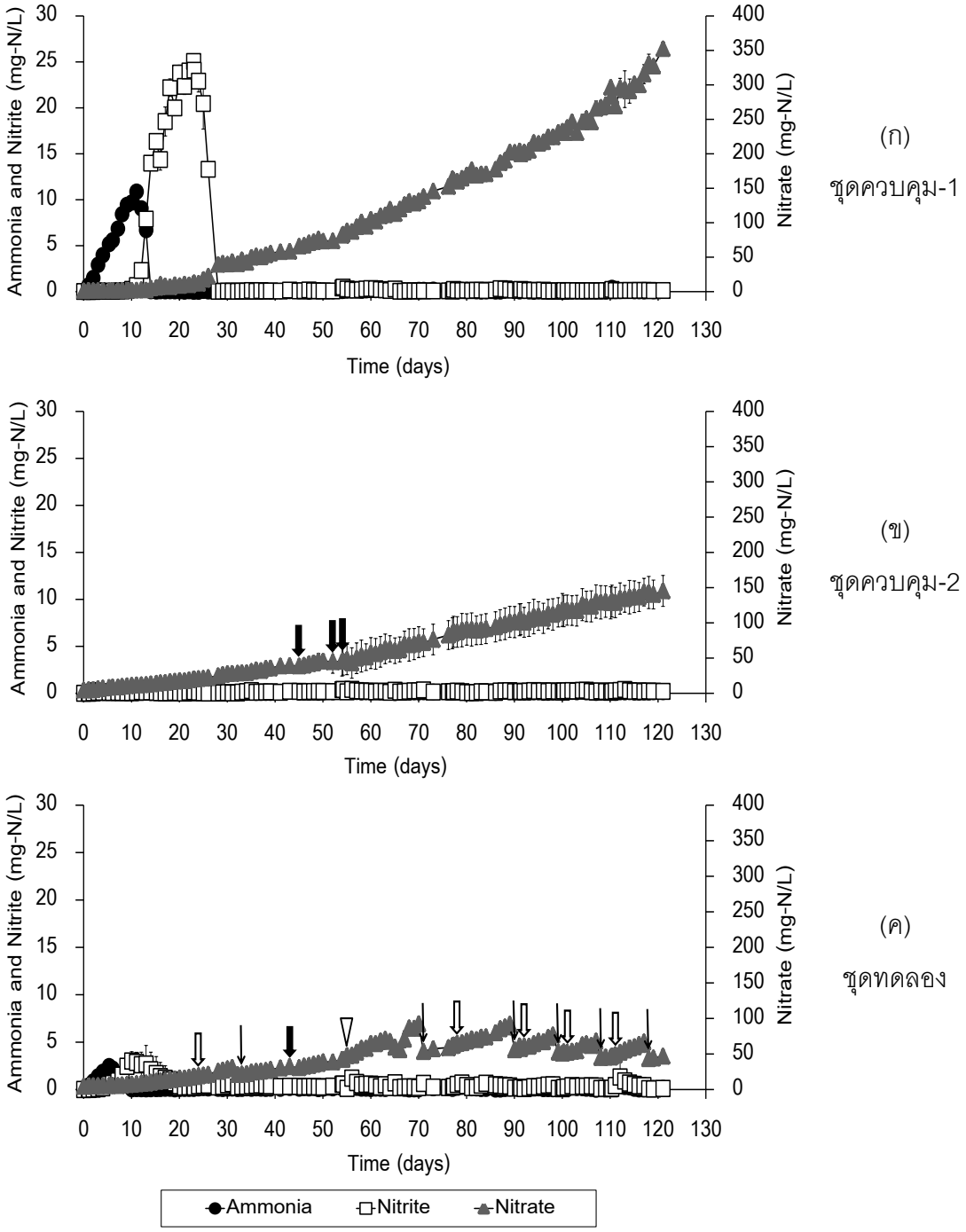
รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ของหินพัมมิสบดในระหว่างการเตรียมและปรับสภาพไนทริฟิเคชันก่อนใช้งานเพื่อบรรจุลงในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดย ⬇ แสดงวันที่มีการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์และอาหารกบบดละเอียดความเข้มข้น 15 และ 1.5 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

4.3.2 การติดตั้งถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันหรือถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน - ดีไนทริฟิเคชันเข้ากับถังเลี้ยงปลานิล

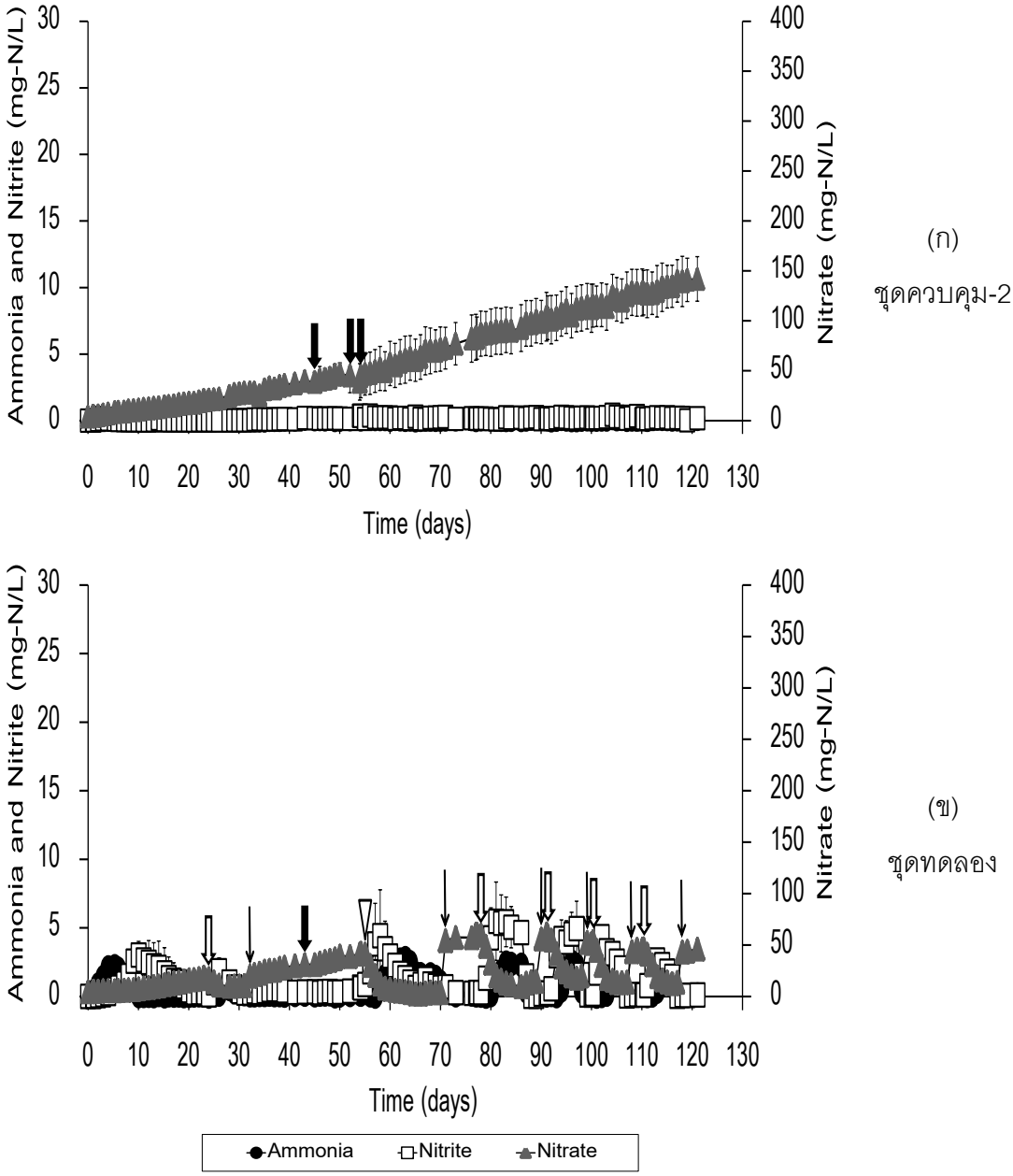
ทำการเปรียบเทียบการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนระหว่างถังเลี้ยงปลานิลเพียงอย่างเดียวที่ไม่มีการแยกตะกอนออกจากระบบ ถังเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน และถังเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน - ดีไนทริฟิเคชัน ซึ่งถังเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์จะมีการแยกตะกอนบางส่วนออกจากระบบด้วยการกรองผ่านใยกรองน้ำ โดยน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลจะถูกปั๊มเข้าสู่ถังปฏิกรณ์เพื่อบำบัดแอมโมเนียให้อยู่ในรูปของไนเทรตด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชัน และหมุนเวียนนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับเข้าสู่ถังเลี้ยงปลานิลอย่างต่อเนื่องด้วยวิธีกาลักน้ำ สำหรับการบำบัดไนเทรตต่อด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันจะทำการหยุดระบบหมุนเวียนน้ำและเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ลงในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน - ดีไนทริฟิเคชัน และเมื่อไนเทรตถูกบำบัดจนลดลงเหลือในปริมาณคงที่จะทำการเวียนน้ำกลับเข้าสู่ถังเลี้ยงปลานิลเหมือนเดิม ในระหว่างการทดลองทำการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ได้ผลการทดลองดังมีรายละเอียดดังนี้

- *ประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของถังเลี้ยงปลานิลและถังปฏิกรณ์*

ผลการตรวจวัดการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในระหว่างทำการทดลองของชุดการทดลอง 3 ชุด ได้แก่ ชุดควบคุม-1 ประกอบด้วยถังเลี้ยงปลานิลที่ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์และไม่มีการนำตะกอนออกจากระบบ ชุดควบคุม-2 ประกอบด้วยถังเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน และชุดทดลองประกอบด้วยถังเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน - ดีไนทริฟิเคชัน โดยชุดควบคุม-2 และชุดทดลองมีการนำตะกอนออกจากระบบตลอดเวลา พบว่าการทดลองทั้ง 3 ชุดให้ผลการทดลองที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.15 และ 4.16



รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของน้ำในถังเลี้ยงปลานิลของชุดการทดลอง 3 ชุด โดย ⇩, ▽ แสดงการปิดปั๊มเวียนน้ำและเติมเมทานอลในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันด้วยอัตราการส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1 ตามลำดับ และ ↓ แสดงการเวียนน้ำกลับเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันตามปกติ ส่วน ⬇ แสดงถึงชุดการทดลอง 3 ซ้ำที่มี 1 ซ้ำกาลักน้ำไม่ทำงาน



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของน้ำในถังปฏิกรณ์ของชุดการทดลอง 2 ชุด โดย ⇩, ▽ แสดงการปิดปั๊มเวียนน้ำและเติมเมทานอลในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันด้วยอัตราการส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1 ตามลำดับ และ ↓ แสดงการเวียนน้ำกลับเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันตามปกติ ส่วน ⬇ แสดงถึงชุดการทดลอง 3 ซ้ำที่มี 1 ซ้ำกาลักน้ำไม่ทำงาน

1) ชุดควบคุม-1

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของชุดควบคุม-1 ที่มีการเลี้ยงปลานิลเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์และไม่มีการนำตะกอนออกจากระบบ ดังรูปที่ 4.15ก พบว่าในช่วงแรกเกิดการสะสมแอมโมเนียเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเป็นผลมาจากการขับถ่ายของปลานิล หรือมีอาหารที่ปลานิลกินไม่หมดเหลือตกค้างอยู่ภายในถังเลี้ยงปลานิล จึงทำให้จุลินทรีย์ตามธรรมชาติย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในอาหารปลาที่อยู่ในรูปโปรตีนผ่านกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันได้เป็นแอมโมเนีย โดยพบแอมโมเนียความเข้มข้นสูงสุดถึง 10.88 ± 0.30 มก.ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 11 ของการทดลอง จากนั้นแอมโมเนียจะถูกบำบัดต่อด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชัน ปริมาณแอมโมเนียจะค่อยๆ ลดลงและถูกเปลี่ยนไปสะสมอยู่ในรูปของไนไทรต์ในระยะเวลาหนึ่ง โดยพบว่ามีความเข้มข้นของไนไทรต์สูงสุดเท่ากับ 25.05± 0.62 มก.ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 23 ของการทดลอง ต่อมาไนไทรต์จะค่อยๆ ลดลงและถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไนเทรต และตั้งแต่วันที่ 28 ของการทดลองจนสิ้นสุดการทดลองพบว่าภายในถังเลี้ยงปลานิลพบกระบวนการไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์เกิดขึ้น เนื่องจากไม่พบการสะสมของแอมโมเนียและไนไทรต์ แต่พบการสะสมของไนเทรตเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยมีปริมาณแอมโมเนียและไนไทรต์คงที่เฉลี่ยเท่ากับ 0.09±0.07 และ 0.14±0.09 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ และในวันสุดท้ายของการทดลองพบปริมาณไนเทรตสะสมสูงถึง 352.47±9.67 มก.ไนโตรเจน/ล. การที่ถังเลี้ยงปลานิลที่ไม่มีระบบบำบัดไนทริฟิเคชันแต่สามารถบำบัดแอมโมเนียให้ไปอยู่ในรูปของไนเทรตได้ด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันแบบสมบูรณ์ตั้งแต่วันที่ 28 ของการทดลองเป็นต้นไป เนื่องจากเมื่อเลี้ยงปลานิลไประยะเวลาหนึ่งหากสภาวะภายในถังเลี้ยงมีความเหมาะสมต่อการทำงานของไนทริฟายอิงแบคทีเรีย จะส่งผลให้เกิดการแบ่งตัวเพิ่มจำนวนและเจริญเติบโตยึดเกาะอยู่ที่ตะกอนแขวนลอยหรือยึดเกาะเป็นไบโอฟิล์มที่บริเวณรอบๆ ถังเลี้ยงปลานิลเกิดการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวน จึงเป็นสาเหตุทำให้มีการบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันภายในถังเลี้ยงปลานิล

นอกจากนี้ปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำที่เพิ่มปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ ประกอบกับมีการผสมและหมุนเวียนระหว่างน้ำกับตะกอนได้ดี รวมทั้งมีการเติมออกซิเจนที่เพียงพอ และมีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสม จะช่วยกระตุ้นให้แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปเจริญเติบโตด้วยการนำแอมโมเนียและไนไทรต์ในน้ำเข้าสู่เซลล์เพื่อใช้ในการสร้างโปรตีนและมวลชีวภาพ (Biomass) จนกระทั่งในที่สุดจะมีปริมาณมากขึ้นและสามารถรวมกลุ่มกันเป็นฟล็อก (Biofloc) (กษิดิศ หนูทอง, 2551; Avnimelech, 2006; Crab และคณะ, 2007) ซึ่งการ

ย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรปที่เกิดภายในฟล็อกกับกระบวนการไนทริฟิเคชันที่เกิดขึ้นภายในถังเลี้ยงปลานิลนี้จะช่วยในการบำบัดแอมโมเนียและไนไทรต์ไม่ให้เกิดการสะสมในน้ำ

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณไนเทรตเมื่อสิ้นสุดการทดลองกับชุดการทดลองอื่นๆ พบว่าชุดควบคุม-1 พบปริมาณไนเทรตสะสมมากที่สุด เพราะกระบวนการไนทริฟิเคชันที่เกิดขึ้นนอกจากจะมาจากแอมโมเนียที่เกิดจากการขับถ่ายของปลานิลและอาหารที่เหลือตกค้างอยู่ในถังเลี้ยงปลานิลแล้ว ยังมีแอมโมเนียที่เกิดจากตะกอนแขวนลอยในน้ำสะสมอยู่ในปริมาณหนึ่ง เนื่องจากชุดควบคุม-1 นี้ไม่มีการนำตะกอนแขวนลอยออกจากระบบ จึงทำให้ตะกอนแขวนลอยที่สะสมเกิดการย่อยโปรตีนที่อยู่ภายในตะกอนด้วยกระบวนแอมโมนิฟิเคชันเรื่อยๆ เป็นสาเหตุให้แอมโมเนียที่เกิดขึ้นถูกเปลี่ยนไปสะสมอยู่ในรูปของไนเทรตผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันในปริมาณมากกว่าชุดการทดลองอื่นๆ แต่ไนเทรตในปริมาณมากนี้อาจถูกบำบัดต่อได้ด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันที่อาจจะเกิดขึ้นได้ที่ชั้นไบโอฟล็อกด้านในบริเวณที่ไร้ออกซิเจนได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ไม่สามารถถูกบำบัดให้ลดลงเหลือในปริมาณที่ต่ำได้ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในถังเลี้ยงปลานิลมีสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการบำบัดด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน เพราะยังมีออกซิเจนในปริมาณมากหรือมีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่ไม่เพียงพอสำหรับดีไนทริฟายอิงแบคทีเรีย โดยในสภาวะที่มีออกซิเจนสูงดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียที่เป็นแบคทีเรียในกลุ่ม Facultative Aerobes หรือเฮเทอโรทรอฟแบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ ที่อาศัยอยู่ในถังเลี้ยงปลานิลจะใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ แต่ถ้าออกซิเจนหมดจะใช้ไนเทรตที่มีอยู่ในน้ำเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทน ซึ่งในถังเลี้ยงปลานิลชุดควบคุม-1 มีการเติมอากาศอยู่ตลอดเวลา จึงทำให้ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียไม่สามารถนำไนเทรตมาใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนได้ หรือแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟชนิดอื่นๆ อาจมีจำนวนมากกว่าดีไนทริฟายอิงจึงทำให้สามารถนำสารอินทรีย์คาร์บอนในระบบไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ดีกว่าดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในไบโอฟล็อก จึงทำให้กระบวนการดีไนทริฟิเคชันถูกยับยั้งได้ (Mook และคณะ, 2012) และจากผลการทดลองถึงแม้ว่าในช่วง 27 วันแรกภายในถังเลี้ยงปลานิลจะมีแอมโมเนียและไนไทรต์สะสมในปริมาณมากจนอยู่ในระดับที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของปลานิล ซึ่งอาจส่งผลให้ปลานิลตายได้ แต่ก็พบการตายของปลานิลเพียง 1 ตัวเท่านั้น โดยแอมโมเนียในปริมาณที่มากเกินไปจะมีความเป็นพิษต่อปลา โดยมีผลไปทำลายเหงือกและลดความสามารถของเลือดในการขนถ่ายออกซิเจน (Camargo และ Alonso, 2006) โดย Randall และ Tsui (2002) รายงานว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ก่อให้เกิดพิษแบบเฉียบพลันจากการศึกษาในสัตว์น้ำจืด 32 ชนิดมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.79 มก.แอมโมเนีย/ล. ในขณะที่ Crab และคณะ (2007) ระบุว่า แอมโมเนียที่มีความเข้มข้น

มากกว่า 1.5 มก.ไนโตรเจน/ล. จะมีความเป็นพิษต่อปลา ส่วนการสะสมของไนไทรต์ในน้ำในปริมาณมากมีผลทำให้เกิดการออกซิเดชันของฮีโมโกลบิน (Haemoglobin) เปลี่ยนเป็นเมทเฮโมโกลบิน (Methaemoglobin) จึงส่งผลให้เลือดไม่สามารถเกิดการลำเลียงออกซิเจนภายในร่างกายของสัตว์น้ำได้ (Kroupova และคณะ, 2005) โดย Timmons และคณะ (2002) กล่าวว่า ไนไทรต์ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. จะเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ แต่ Camargo และ Alonso (2006) รายงานว่าเพื่อความปลอดภัยของสัตว์น้ำควรควบคุมปริมาณไนไทรต์ในน้ำให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.08 – 0.35 มก.ไนโตรเจน/ล. ทั้งนี้ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไทรต์ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและความเป็นอยู่ของสัตว์น้ำนั้นอาจมีความแตกต่างกันได้ เนื่องจากขึ้นอยู่กับชนิด อายุ ความแข็งแรง ขนาด ปัจจัยทางเคมีและกายภาพในน้ำ เป็นต้น

แต่อย่างไรก็ตามผลการทดลองของชุดควบคุม-1 ที่ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์และไม่มีการนำตะกอนออกจากระบบก็สามารถควบคุมคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงปลานิลให้อยู่ในค่าที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของปลานิลได้ ซึ่งในการนำไปใช้จริงอาจต้องมีการปรับสภาพถังเลี้ยงก่อนประมาณ 4 สัปดาห์ด้วยการเลี้ยงปลานิลจนมีตะกอนแขวนลอยเกิดขึ้นภายในบ่อเลี้ยงในปริมาณหนึ่งก่อน เพื่อให้มีไนทริฟายอิงแบคทีเรียและแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟยึดเกาะที่ตะกอนแขวนลอยและยึดเกาะเป็นไบโอฟิล์มที่บริเวณรอบๆ ถังเลี้ยงปลานิลมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์ นอกจากนี้จะต้องคำนึงถึงความหนาแน่นของปลาที่เลี้ยงด้วย โดยในการทดลองนี้เป็นการเลี้ยงปลานิลด้วยความหนาแน่น 1.21–10.28 กก./ลบ.ม. ซึ่งจัดเป็นความหนาแน่นปานกลาง หากเลี้ยงด้วยความหนาแน่นสูงกว่านี้ก็อาจทำให้อัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันที่เกิดขึ้นต่ำกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณแอมโมเนีย ส่งผลให้เกิดความเป็นพิษของแอมโมเนียต่อสัตว์น้ำได้

2) ชุดควบคุม-2

สำหรับชุดควบคุม-2 ที่ถังเลี้ยงปลานิลมีการติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันและมีการนำตะกอนบางส่วนออกจากระบบตลอดเวลา พบการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของถังเลี้ยงปลานิลกับถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันแสดงดังรูปที่ 4.15ข และ 4.16ก ซึ่งให้ผลการทดลองไม่แตกต่างกัน เพราะมีการหมุนเวียนน้ำระหว่างถังทั้งสองอยู่ตลอดเวลา จึงทำให้น้ำจากถังเลี้ยงปลานิลและถังบำบัดมีปริมาณสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองพบว่าถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันสามารถควบคุมคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงปลานิลให้อยู่ในค่าที่

เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการดำรงชีวิตของปลานิลได้ดีตลอดการทดลอง โดยหินพัมมิสบดสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ด้วยปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ ไม่พบการสะสมของไนไทรต์ และมีไนเทรตสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยพบว่าในถังเลี้ยงปลานิลมีปริมาณแอมโมเนียและไนไทรต์เฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 0.13±0.06 และ 0.18±0.09 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ และในวันสุดท้ายของการทดลองพบไนเทรตความเข้มข้นเท่ากับ 145.31±21.88 มก.ไนโตรเจน/ล. แสดงว่าหินพัมมิสบดมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนทริฟิเคชันได้ดี

3) ชุดทดลอง

สำหรับชุดทดลองที่ถังเลี้ยงปลานิลมีการติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน จากรูปที่ 4.15ค และ 4.16ข พบว่าในช่วงสัปดาห์แรกทั้งถังปฏิกรณ์และถังเลี้ยงปลานิลจะพบปริมาณแอมโมเนียค่อยๆ เพิ่มขึ้นและลดลงเหลือต่ำกว่า 0.1 มก.ไนโตรเจน/ล.ประมาณวันที่ 10 ของการทดลอง จากนั้นเกิดไนไทรต์สะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แทนและจะค่อยๆ ลดลงจนมีค่าต่ำกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 19 ของการทดลอง โดยถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไนเทรตเพิ่มมากขึ้น การที่ในช่วงประมาณสามสัปดาห์แรกของการทดลองถังปฏิกรณ์ยังไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์เหมือนกับชุดควบคุม-2 อาจเนื่องมาจากหินพัมมิสบดในขณะทำการปรับสภาพไนทริฟิเคชันมีการบรรจุในถังพลาสติกด้วยความหนามากกว่า 5 ซม.ขึ้นไป ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำแทรกไปตามช่องว่างระหว่างเม็ดหินพัมมิสได้น้อยลง จึงส่งผลให้ไนทริฟายอิงแบคทีเรียที่ยึดเกาะกับหินพัมมิสบดที่บรรจุอยู่บริเวณด้านล่างของถังปรับสภาพได้รับออกซิเจนไม่เพียงต่อการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนถึงแม้ว่าภายในถังจะมีการเติมออกซิเจนในปริมาณมากด้วยหัวทรายพ่นอากาศก็ตาม จึงเป็นสาเหตุทำให้หินพัมมิสบดที่ย้ายมาบรรจุในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันในชุดทดลอง ซึ่งเป็นหินพัมมิสบดที่บรรจุอยู่บริเวณลึกกว่าที่นำไปบรรจุลงในถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันในชุดควบคุม-2 ไม่สามารถเกิดการบำบัดด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ในช่วงสามสัปดาห์แรก นอกจากนี้การปิดฝาถังปฏิกรณ์ด้วยพลาสติกและไม่มีการเติมออกซิเจนลงไปในถังยังพบว่า ระบบสามารถบำบัดแอมโมเนียผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ เพราะน้ำที่หมุนเวียนจากถังเลี้ยงปลานิลมายังถังปฏิกรณ์ในช่วงแรกยังคงมีออกซิเจนเหลืออยู่ในปริมาณสูงและเพียงพอต่อการทำงานของไนทริฟายอิงแบคทีเรียเช่นเดียวกันกับผลการศึกษาในหัวข้อที่ 4.2 ต่อมาในวันที่ 23 ของการทดลองพบการสะสมของไนเทรตในถังเลี้ยงปลานิลประมาณ 18.27±1.19 มก.ไนโตรเจน/ล. จึงทดลองหยุดการหมุนเวียนน้ำและเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1

เพื่อทดสอบการบำบัดไนเทรต พบว่าปริมาณไนเทรตมีค่าลดลงจนคงที่ประมาณ 10 มก. ไนโตรเจน/ล. ภายใน 3 วัน และในระหว่างการบำบัดไนเทรตพบไนไทรต์และแอมโมเนียเกิดเพิ่มขึ้น โดยพบว่าไนไทรต์มีปริมาณสูงสุดเท่ากับ 1.87±0.94 มก.ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 26 ของการทดลอง และแอมโมเนียมีปริมาณสูงสุดเท่ากับ 0.55± 0.17 มก.ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 28 ของการทดลอง และเมื่อไนเทรตถูกบำบัดจนเริ่มเหลือปริมาณคงที่ ไนไทรต์และแอมโมเนียจะมีปริมาณลดลงอยู่ในระดับที่สัตว์น้ำสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ จึงหมุนเวียนน้ำกลับเข้าสู่ถังเลี้ยงปลานิลตามปกติในวันที่ 32 ของการทดลอง

ต่อมาในวันที่ 54 ของการทดลองได้ลองทำการบำบัดไนเทรตจากถังเลี้ยงปลานิลที่มีความเข้มข้น 42.40 ± 5.01 มก.ไนโตรเจน/ล. ด้วยการหยุดหมุนเวียนน้ำและเติมเมทานอลลงไปด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 6:1 พบว่าไนเทรตสามารถถูกบำบัดให้ลดลงเหลือความเข้มข้นที่ต่ำกว่า 10 มก.ไนโตรเจน/ล. ภายใน 5 วัน และจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงอีกเรื่อยๆ จนเหลือประมาณ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. แต่ในระหว่างการบำบัดพบไนไทรต์และแอมโมเนียมีปริมาณค่อยๆ เพิ่มขึ้น โดยพบไนไทรต์มีความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 4.43 ± 3.35 มก.ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 58 ของการทดลอง และแอมโมเนียมีความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 2.79 ± 0.14 มก.ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 63 ของการทดลอง แต่เมื่อไนเทรตถูกบำบัดจนเหลือในปริมาณคงที่ ไนไทรต์จะค่อยๆ มีปริมาณลดลงจนมีความเข้มข้นต่ำกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. แต่ยังพบแอมโมเนียในปริมาณที่มากกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งยังเป็นความเข้มข้นที่อาจเป็นอันตรายต่อปลานิลได้ จึงทำการเติมออกซิเจนลงในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน - ดีไนทริฟิเคชันเพื่อให้ไนทริฟายอิงแบคทีเรียเกิดการบำบัดแอมโมเนียให้มีค่าต่ำกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ก่อนด้วยกระบวนไนทริฟิเคชัน จากนั้นจึงทำการเวียนน้ำกลับเข้าสู่ถังเลี้ยงปลานิลตามปกติ ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 6:1 สามารถทำให้ไนเทรตถูกบำบัดเหลือในปริมาณที่ต่ำกว่าการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 แต่ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ระบบเพาะเลี้ยงปลานิลมีความเสี่ยงต่อการเกิดกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน ซึ่งทำให้เกิดการเน่าเสียของน้ำและเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีความเป็นพิษต่อปลานิล ดังนั้นจึงต้องควบคุมให้น้ำในถังปฏิกรณ์มีปริมาณไนเทรตเหลืออยู่บ้างในระดับที่ไม่เป็นอันตราย (10-20 มก.ไนโตรเจน/ล.)

ในเวลาต่อมาจนถึงสิ้นสุดการทดลอง เมื่อพบว่าปริมาณไนเทรตในถังเลี้ยงปลานิลมีความเข้มข้นมากกว่า 40 มก.ไนโตรเจน/ล. จึงได้ทำการหยุดระบบหมุนเวียนน้ำและทำการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ลงในปฏิกรณ์ ผลการทดลองพบว่าในแต่ละช่วง

ของการบำบัดไนเทรตในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันในวันที่ 77 91 100 และ 110 ของการทดลอง พบการลดลงของไนเทรตอย่างรวดเร็วและถูกบำบัดเหลือในปริมาณ 20 มก.ไนโตรเจน/ล. ภายใน 3-5 วัน จากนั้นจะลดลงอีกเล็กน้อยอย่างช้าๆและเริ่มคงที่ แต่ความเข้มข้นของไนเทรตยังมีค่ามากกว่า 10 มก.ไนโตรเจน/ล. ส่วนไนไทรต์และแอมโมเนียยังคงพบการสะสมในความเข้มข้นที่สูง โดยในแต่ละช่วงการบำบัดไนเทรตพบการสะสมของไนไทรต์และแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างกันแต่อยู่ในช่วงตั้งแต่ 1–6 มก.ไนโตรเจน/ล. และ 1-3 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ แต่เมื่อไนเทรตถูกบำบัดจนลดลงเหลือในปริมาณที่เริ่มคงที่ไนไทรต์จะค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ จากนั้นจะพบการสะสมของแอมโมเนียเกิดขึ้นมา แต่อย่างไรก็ตามยังพบทั้งแอมโมเนียและไนไทรต์ที่ความเข้มข้นมากกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. จึงทำการเติมออกซิเจนในถังปฏิกรณ์เพื่อบำบัดแอมโมเนียและไนไทรต์ให้หมดก่อนและเพื่อให้น้ำมีออกซิเจนเพียงพอก่อนเวียนกลับไปยังถังเลี้ยงปลานิล เพื่อป้องกันไม่ให้ถังเลี้ยงปลานิลมีค่าออกซิเจนละลายน้ำต่ำเกินไปซึ่งอาจทำให้เป็นอันตรายต่อปลานิลได้ การที่ไนเทรตเริ่มบำบัดจนลดลงเหลือในปริมาณเริ่มคงที่แล้วพบว่ามีแอมโมเนียเกิดขึ้นตามมาในปริมาณหนึ่ง อาจเกิดจากสภาวะภายในถังปฏิกรณ์ในขณะนั้นอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน และสารอินทรีย์คาร์บอนไม่ได้มีเฉพาะเมทานอลที่เติมลงไปเท่านั้นอาจมีสารอินทรีย์จากอาหารและจากเซลล์แบคทีเรียที่ตายแล้วและอื่นๆ ซึ่งมีผลทำให้มีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนมากเกินไป จึงเป็นไปได้ว่าสภาวะนี้จะทำให้แบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ ที่อาศัยอยู่บริเวณหินพัมมิสนอกเหนือจากไนทริฟายอิงและดีไนทริฟายอิงแบคทีเรีย เช่น แบคทีเรียกลุ่ม α-*Proteobacteria* β–*Proteobacteria* และ δ–*Proteobacteria* ที่สามารถเปลี่ยนไนเทรตให้กลับไปอยู่ในรูปของแอมโมเนียผ่านกระบวนการที่เรียกว่า Dissimilatory nitrate reduction to ammonia หรือ DNRA (Schreier และคณะ, 2010; Blancheton และคณะ, 2013) ส่วนในถังเลี้ยงปลานิลพบว่าหลังจากที่หินพัมมิสในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันสามารถปรับสภาพจนเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ตั้งแต่วันที่ 19 ของการทดลองเป็นต้นไป จะพบปริมาณแอมโมเนียและไนไทรต์อยู่ในช่วงไม่เป็นอันตรายต่อปลานิล ซึ่งสามารถควบคุมให้มีค่าต่ำกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้ และมีความเข้มข้นเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 0.17 ± 0.10 และ 0.38 ± 0.21 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามในขณะที่ทำการหยุดเวียนน้ำ ปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์อาจมีการเพิ่มขึ้นบ้างเล็กน้อยแต่ไม่เกิดการสะสมในปริมาณมากจนเป็นอันตรายต่อปลานิล แต่ไนเทรตกลับมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แสดงว่าในถังเลี้ยงปลานิลก็มีไนทริฟายอิงแบคทีเรียที่เติบโตขึ้นตามธรรมชาติอาศัยอยู่เช่นกัน จึงทำให้สามารถช่วยบำบัดแอมโมเนียผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันได้เมื่อหมุนเวียนน้ำกลับเข้าสู่ถังเลี้ยงปลานิลตามปกติ พบว่าปริมาณไนเทรตมีค่าลดลงและเหลือใน

ปริมาณที่ใกล้เคียงกับในถังปฏิกรณ์ แต่พบในปริมาณที่ต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นๆ เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าปริมาณไนเทรตในถังเลี้ยงปลานิลมีค่าเท่ากับ 46.89 ± 8.45 มก.ไนโตรเจน/ล. นอกจากนี้การปิดฝาถังปฏิกรณ์และไม่มีการเติมออกซิเจนเพิ่มเติมลงไปยังพบว่าในช่วงที่มีการหมุนเวียนน้ำปกติ ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ที่บริเวณหินพัมมิสบดก้นถังไม่สามารถบำบัดไนเทรตในน้ำที่มีปริมาณสูงให้ลดต่ำลงได้ในสภาวะที่ไม่มีการเติมเมทานอลลงไป เพราะในถังปฏิกรณ์อาจมีออกซิเจนมากเกินไป หรือปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่มีอยู่ในระบบอาจมีไม่เพียงพอที่ทำให้ดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียทำงานได้ ดังนั้นผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันสามารถบำบัดได้ทั้งแอมโมเนียและไนเทรตที่เกิดขึ้นจากการเพาะเลี้ยงปลานิลได้ภายในถังปฏิกรณ์เดียวและสามารถควบคุมคุณภาพน้ำให้เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของปลานิลได้

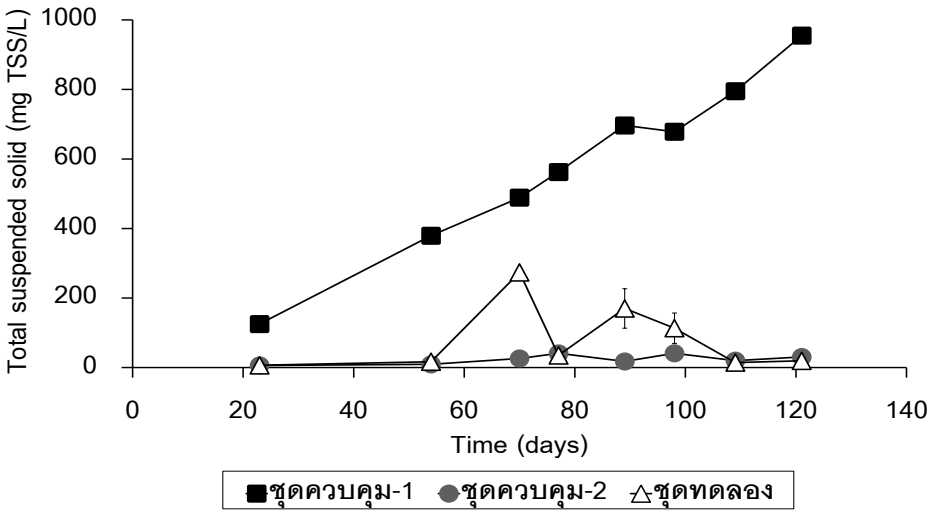
จะเห็นได้ว่าการทดลองทั้ง 3 ชุด สามารถช่วยควบคุมคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงปลานิลให้มีความเหมาะสมต่อดำรงชีวิตของปลานิลได้ แต่ชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2 ไม่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้จริง เพราะหากทำการเลี้ยงปลานิลต่อไปเรื่อยๆ พบว่ามีปริมาณไนเทรตสะสมเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเลี้ยง ซึ่ง Camargo และคณะ (2005) กล่าวว่าไนเทรตในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอาจมีความเข้มข้นได้สูงถึง 500 มก.ไนโตรเจน/ล. และจากรายงานของ Harwanto และคณะ (2011) กล่าวว่าไนเทรตจะมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำที่ความเข้มข้นมากกว่า 300 มก.ไนโตรเจน/ล. ส่วนกษิดิศ หนูทอง (2551) รายงานว่าระดับความเข้มข้นสูงสุดของไนเทรตที่ยอมให้มีในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำได้คือ 50 มก.ไนโตรเจน/ล. หากสูงกว่านี้ควรทำการบำบัดหรือทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ถึงแม้ว่าไนเทรตจะมีความเป็นพิษน้อยกว่าแอมโมเนียและไนไทรต์แต่ถ้ามีปริมาณมากก็ส่งผลต่อสัตว์น้ำได้เช่นกัน โดยทำให้สัตว์น้ำบริโภคอาหารลดลง เจริญเติบโตช้า เกิดความเครียด อัตราการเจริญพันธุ์ลดลง และสัตว์น้ำอ่อนแอ จึงทำให้ความต้านทานโรคลดลงและอาจถึงตายได้ (Gutierrez-Wing และ Malone, 2006) นอกจากนี้สำหรับชุดควบคุม-1 ยังมีอีกปัจจัยหนึ่งคือปริมาณตะกอนแขวนลอยที่ไม่เหมาะสม (ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป) ดังนั้นเพื่อให้ระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถควบคุมได้ทั้งปริมาณแอมโมเนียไนไทรต์ และไนเทรต ถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ช่วยให้การบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนสามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เช่นเดียวกันกับระบบบำบัดอื่นๆ ที่มีทั้งระบบบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันที่เป็นระบบบำบัดแบบแยกส่วนหรือที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์เดียว ตัวอย่างของระบบบำบัดแบบแยกส่วน เช่น จากงานวิจัยของทยากร สุวรรณรัตน์ (2552) ที่ศึกษาการพัฒนาระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดความหนาแน่นสูงโดยผสมผสานตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน ด้วยการเลี้ยงปลานิลและมีการ

ติดตั้งตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันภายในบ่อเลี้ยงเพื่อบำบัดแอมโมเนียและทำการบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นด้วยระบบบำบัดดีไนทริฟิเคชันแบบท่อยาว หรือจากงานวิจัยของชลธิชา พลายชุม (2553) ที่ศึกษาการบำบัดไนเทรตในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยถังดีไนทริฟิเคชัน ด้วยการเลี้ยงปลานิลในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันที่มีการบรรจุตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดเพื่อบำบัดแอมโมเนียควบคู่กับการใช้ถังดีไนทริฟิเคชันที่บรรจุหินพัมมิสบดเพื่อบำบัดไนเทรต ตัวอย่างของระบบบำบัดที่มีปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ภายในถังปฏิกรณ์เดียว เช่น จากงานวิจัยของ Kern และ Boopathy (2012) ที่ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งด้วยระบบบำบัดแบบเอสบีอาร์ที่มีการบำบัดแบบตะกอนเร่ง จากตัวอย่างงานวิจัยดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันแตกต่างจากระบบอื่นๆ คือมีการใช้พื้นที่ในการติดตั้งระบบบำบัดน้อยกว่าและสามารถบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตที่เกิดขึ้นจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์เดียวด้วยขั้นตอนที่ง่ายและมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบที่ไม่สูงมาก

- การตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำในถังเลี้ยงปลานิลและถังปฏิกรณ์

จากรูปที่ 4.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอยในชุดการทดลอง พบว่าตะกอนแขวนลอยในชุดควบคุม-1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และในวันสุดท้ายของการทดลองพบว่ามีปริมาณตะกอนแขวนลอยสูงถึง 955 มก./ล. ซึ่งเป็นปริมาณตะกอนแขวนลอยที่สูงมาก เนื่องจากตลอดระยะเวลาในการทดลองไม่มีถ่ายตะกอนออกจากระบบ สำหรับชุดควบคุม-2 และชุดทดลองปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำมีค่าน้อยกว่าชุดควบคุม-1 อย่างเห็นได้ชัด เพราะทั้ง 2 ชุดการทดลองนี้มีการนำตะกอนแขวนลอยออกจากระบบตลอดเวลาด้วยการกรองตะกอนแขวนลอยผ่านใยกรองน้ำ และสามารถควบคุมให้ตะกอนแขวนลอยอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลานิลได้ โดย Timmons และคณะ (2002) รายงานว่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำคือน้อยกว่า 80 มก./ล. เมื่อลองตรวจวัดปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำจากชุดทดลองในวันที่ 70 89 และ 98 ซึ่งเป็นวันที่ทำการเก็บตะกอนแขวนลอยมาทำการวิเคราะห์ก่อนทำการเวียนน้ำกลับถังเลี้ยงปลานิลตามปกติ พบว่ามีปริมาณตะกอนแขวนลอยมากกว่า 100 มก./ล. แสดงให้เห็นว่าปริมาณตะกอนแขวนลอยจะมีค่าเพิ่มขึ้นถ้าทำการหยุดเวียนน้ำเป็นระยะเวลานาน แต่ชุดทดลองเมื่อเวียนน้ำกลับปกติและมีการนำตะกอนออกจากระบบตลอดเวลาด้วยการกรองผ่านใยกรองน้ำจะพบว่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำมีค่าน้อยกว่า 50 มก./ล. ซึ่งอยู่ระดับที่เหมาะสม การมีปริมาณตะกอนแขวนลอยสะสมอยู่ในระบบเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลา อาจจะ

ไปรบกวนการหายใจและอาจเกิดการอุดตันที่เหงือกของปลา รวมทั้งตะกอนในน้ำที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้องการออกซิเจนของระบบเพิ่มมากขึ้นด้วยจนอาจทำให้ออกซิเจนในน้ำมีค่าลดลงจนอาจไม่เพียงพอต่อความต้องการของปลานิลและแบคทีเรียที่มีการใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายของเสียในน้ำได้ แต่อย่างไรก็ตามการนำตะกอนแขวนลอยออกจากระบบเพาะเลี้ยงปลานิลจะช่วยให้น้ำในถังเลี้ยงปลานิลมีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำที่อยู่ในช่วง 300-500 มก./ล. สามารถช่วยควบคุมปริมาณแอมโมเนียและไนไทรต์ที่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำได้ดี (ศิวฤกษ์ หนูฤทธิ์, 2554) จากรายงานของ De Schryver และคณะ (2008) แนะนำว่าสำหรับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ทำการบำบัดด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกควรมีปริมาณตะกอนแขวนลอยในบ่อเลี้ยงอยู่ในช่วง 0.2-1.0 ก./ล. ดังนั้นปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพน้ำและการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ



รูปที่ 4.17 ปริมาณตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิลที่ทำการตรวจวัดในระหว่างการศึกษาประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

สำหรับผลการวิเคราะห์ค่าสภาพด่างตลอดระยะเวลาการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.18ก โดยช่วงเริ่มต้นการทดลองจะทำการปรับค่าสภาพด่างให้อยู่ที่ 150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ในทุกชุดการทดลองด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต จากการทดลองพบว่าค่าสภาพด่างในถังปฏิกรณ์และในถังเลี้ยงปลานิลมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากระบบมีการหมุนเวียนน้ำอยู่ตลอดเวลา ในช่วงที่มีปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นทั้งในถังเลี้ยงปลานิลและในถังปฏิกรณ์ทุกชุดการทดลองค่าสภาพด่าง

จะเกิดการลดลง เพราะไนทริฟายอิงแบคทีเรียนำคาร์บอนจากไบคาร์บอเนตมาใช้ในการเจริญเติบโต นอกจากนี้ในขณะที่ทำการหยุดหมุนเวียนน้ำเพื่อบำบัดไนเทรตในชุดการทดลอง พบว่าค่าสภาพด่างของถังเลี้ยงปลานิลจะมีค่าลดลงเช่นกัน เนื่องจากในถังเลี้ยงปลานิลมีไนทริฟายอิงแบคทีเรียในปริมาณที่เพียงพอที่สามารถทำงานได้เกิดการบำบัดแอมโมเนียให้อยู่ในรูปของไนเทรต แต่ค่าสภาพด่างในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้น แต่เมื่อเวียนน้ำกลับเข้าสู่ถังเลี้ยงปลานิลตามปกติจะทำให้ค่าสภาพด่างในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน - ดีไนทริฟิเคชันและในถังเลี้ยงปลานิลมีปริมาณใกล้เคียงกันและอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ส่งผลให้ไม่ต้องทำการปรับค่าสภาพด่างในถังเลี้ยงปลานิลที่ลดลงด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต เป็นการช่วยลดปริมาณสารเคมีที่เติมลงในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ แต่อย่างไรก็ตามตลอดการทดลองถ้าค่าสภาพด่างในถังเลี้ยงปลานิลหรือในถังปฏิกรณ์แต่ละถังมีค่าต่ำกว่า 100 มก./ล. จะทำการปรับให้อยู่ในช่วง 100 – 150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต โดย Timmons และคณะ (2002) รายงานว่า ค่าสภาพด่างที่อยู่ในช่วง 50 - 300 มก. แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. เป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

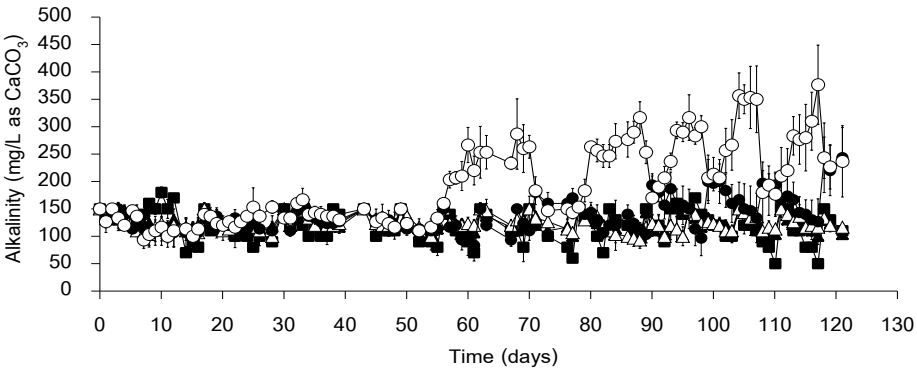
ส่วนค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำตลอดระยะเวลาในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.18ข พบว่าชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2 ทั้งในถังปฏิกรณ์และในถังเลี้ยงปลานิล และชุดทดลองส่วนที่เป็นถังเลี้ยงปลานิลมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.26 ± 0.48 มก./ล. และมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 5.10 – 7.80 มก./ล. แต่สำหรับชุดทดลองในส่วนของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันที่มีการปิดคลุมพลาสติกตลอดเวลาและไม่มีการเติมอากาศลงในถังปฏิกรณ์ พบว่าในช่วงที่มีการหมุนเวียนน้ำเพื่อบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชัน ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีค่ามากกว่า 2.5 มก./ล. แต่ส่วนใหญ่พบในปริมาณที่ต่ำกว่า 5 มก./ล. และต่ำกว่าในถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันในชุดควบคุม-2 แสดงว่าปริมาณออกซิเจนในน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลที่หมุนเวียนมายังถังปฏิกรณ์มีปริมาณเพียงพอต่อการทำงานของไนทริฟายอิงแบคทีเรีย แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้ถังปฏิกรณ์สามารถทำงานบำบัดแอมโมเนียได้ด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันอย่างมีประสิทธิภาพ ควรมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำอย่างน้อย 2 มก./ล. ต่อมาเมื่อทำการหยุดระบบหมุนเวียนน้ำและทำการเติมเมทานอลลงไปเพื่อบำบัดไนเทรตพบว่า ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีค่าค่อยๆ ลดลงและเหลือต่ำกว่า 1 มก./ล. จากนั้นถ้าในถังปฏิกรณ์มีออกซิเจนละลายน้ำต่ำและมีการสะสมของไนไทรต์และแอมโมเนียจะทำการเติมออกซิเจนก่อนประมาณ 1 วัน และในวันถัดมาถ้าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเพียงพอและไนไทรต์และแอมโมเนียถูกบำบัดหมดแล้วจึงค่อยเวียนน้ำกลับเข้าสู่ถังเลี้ยงปลานิล ซึ่งมีรายงานว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่เหมาะ

สำหรับการเลี้ยงปลาควรมีค่ามากกว่า 5 มก./ล. (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2540)

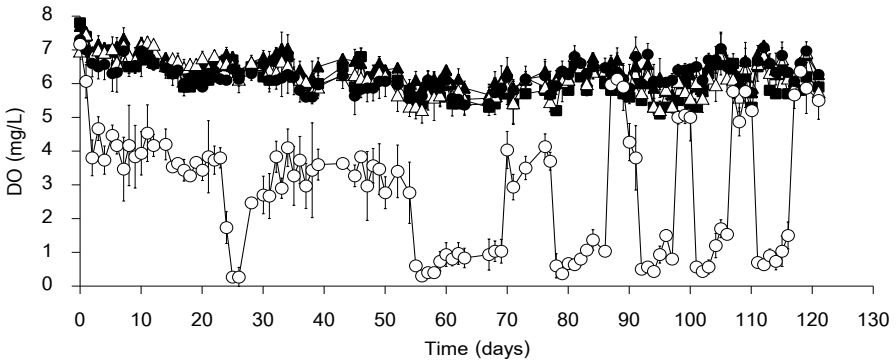
สำหรับการเปลี่ยนแปลงของพีเอชตลอดการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.18ค พบว่าทุกชุดการทดลองพีเอชในถังปฏิกรณ์และในถังเลี้ยงปลานิลมีค่าใกล้เคียงกัน โดยพีเอชจะมีค่าลดลงเมื่อมีปฏิกิริยาไนทริฟิเคชันเกิดขึ้น เพราะกระบวนการไนทริฟิเคชันมีการสร้างกรดขึ้นมาด้วย จึงทำให้ในน้ำมีไฮโดรเจนอิออน (H^+) เพิ่มขึ้นและค่าพีเอชในน้ำลดลง Lucas และ Southgate (2012) รายงานว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำจืดอยู่ในช่วง 6.5-9 นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นได้ว่า สำหรับชุดควบคุม-1 ในช่วงท้ายของการทดลองจะมีค่าพีเอชลดลงเรื่อยๆ และลดลงต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นๆ แต่เมื่อทำการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตลงไปเพื่อปรับค่าสภาพด่างที่ลดลงต่ำกว่า 100 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ก็สามารถช่วยให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นและอยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้ โดยค่าพีเอชที่ตรวจวัดได้ในทุกชุดการทดลองอยู่ในช่วง 6.63 – 8.61 และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.67 ± 0.29 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงปลานิล การบำบัดด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชัน และการบำบัดด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน

สำหรับการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิตลอดการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.18ง จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของทุกชุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน จากรายงานของ El-Sayed (2006) เสนอว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของปลานิลอยู่ในช่วงระหว่าง 25 – 30 ^{o}ซ ซึ่งอุณหภูมิตลอดการทดลองมีค่าไม่ค่อยคงที่ เพราะสภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองนี้ทำการทดลองในช่วงฤดูร้อนและบางวันอาจมีฝนตกเนื่องจากพายุฝน จึงส่งผลให้บางช่วงของการทดลองอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เป็นสาเหตุให้ปลานิลปรับตัวไม่ทันจึงมีการตายเกิดขึ้น โดยทุกชุดการทดลองมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 25.50 – 32.00 ^{o}ซ และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 29.38 ± 1.18 ^{o}ซ ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการดำรงชีวิตของปลานิล การบำบัดด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชัน และการบำบัดด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน

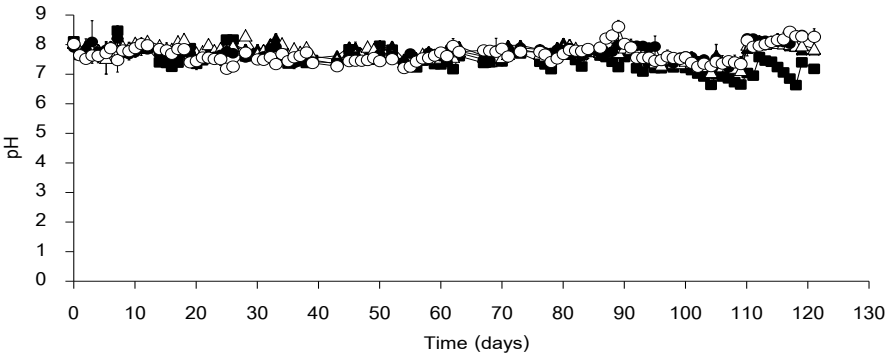
(ก)
ค่าสภาพด่าง



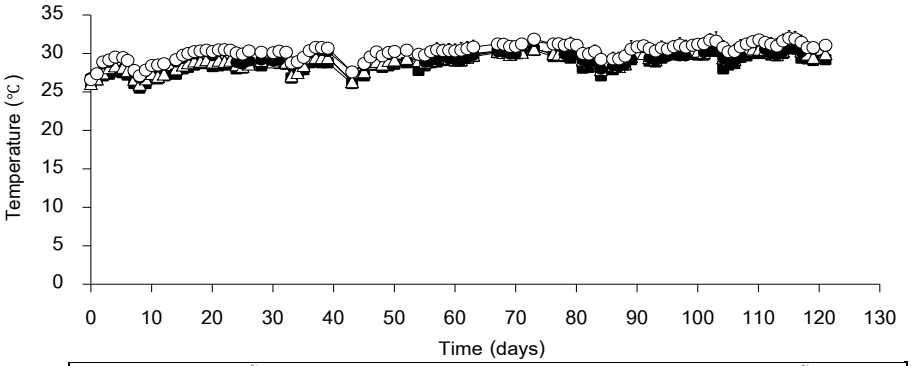
(ข)
ปริมาณ
ออกซิเจน
ละลายน้ำ

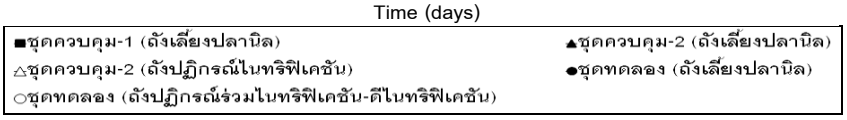


(ค)
พีเอช



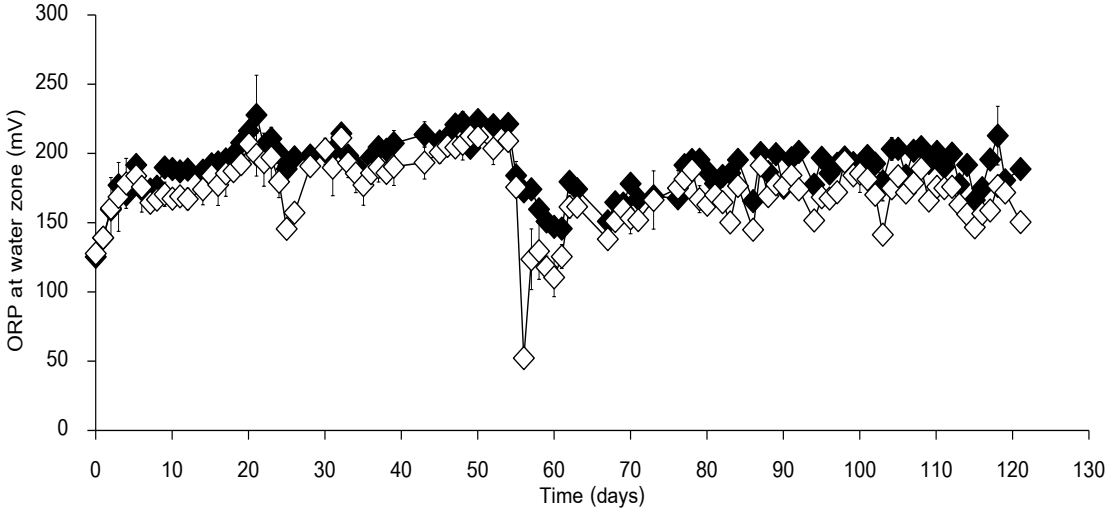
(ง)
อุณหภูมิ



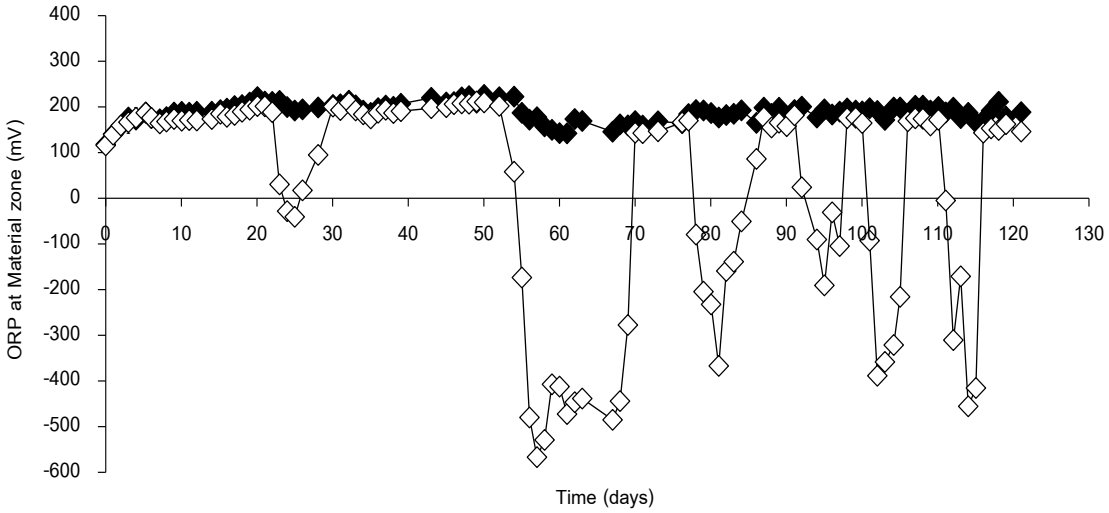


รูปที่ 4.18 ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิที่ทำการตรวจวัดในระหว่างการศึกษาประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (โออาร์พี) ในถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน และถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันแสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่าในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชุดการทดลองมีค่าโออาร์พีที่บริเวณชั้นน้ำเป็นบวก โดยค่าโออาร์พีที่บริเวณชั้นน้ำของถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 189.14±18.94 มิลลิโวลต์ โดยมีพิสัยอยู่ระหว่าง 125.33-227.73 มิลลิโวลต์ ส่วนค่าโออาร์พีที่ชั้นน้ำของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 171.98±24.31 มิลลิโวลต์ และมีพิสัยอยู่ระหว่าง 52.20-212.70 มิลลิโวลต์ เมื่อทำการตรวจวัดค่าโออาร์พีที่บริเวณชั้นหินพัมมิสพบว่า ถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันมีค่าโออาร์พีเป็นบวกตลอดการทดลอง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 187.99±20.06 มิลลิโวลต์ หรืออยู่ในช่วงระหว่าง 117.80-226.10 มิลลิโวลต์ เนื่องจากภายในถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันมีการเติมอากาศอยู่ตลอดเวลาทำให้ออกซิเจนแทรกเข้าไปที่ช่องว่างระหว่างเม็ดหินพัมมิสได้ ในขณะที่ค่าโออาร์พีที่บริเวณชั้นหินพัมมิสของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันจะมีค่าเป็นบวกในช่วงที่ทำการบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชัน โดยมีค่าลดลงจนเป็นลบในช่วงที่ทำการเติมเมทานอล แสดงว่ามีกระบวนการดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้น และเมื่อไนเทรตถูกบำบัดหมดค่าโออาร์พีจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนเป็นบวก โดยชลธิชา พลายชุม (2553) ระบุว่า ปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชันจะเกิดได้ดีที่บริเวณชั้นหินพัมมิสเมื่อมีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง -300 ถึง -200 มิลลิโวลต์ ซึ่งการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 มีผลทำให้ในบางช่วงของการบำบัดไนเทรตค่าโออาร์พีมีค่าลดลงจนต่ำกว่า -300 มิลลิโวลต์ หรือในช่วงที่เติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 6:1 ค่าโออาร์พีลดลงถึง -567.10 มิลลิโวลต์ ซึ่งหากค่าโออาร์พีต่ำกว่า -300 มิลลิโวลต์อาจส่งผลให้น้ำในถังปฏิกรณ์มีความเสี่ยงที่จะเกิดการเน่าเสียได้ ดังนั้นในสภาวะที่ค่าโออาร์พีลดลงจนต่ำกว่า -300 มิลลิโวลต์เรื่อยๆ ควรทำการเติมออกซิเจนลงไปที่บริเวณชั้นน้ำเพื่อป้องกันไม่ให้ระบบเกิดการล้มเหลว



(ก) ค่าโออาร์พีที่ชั้นน้ำ



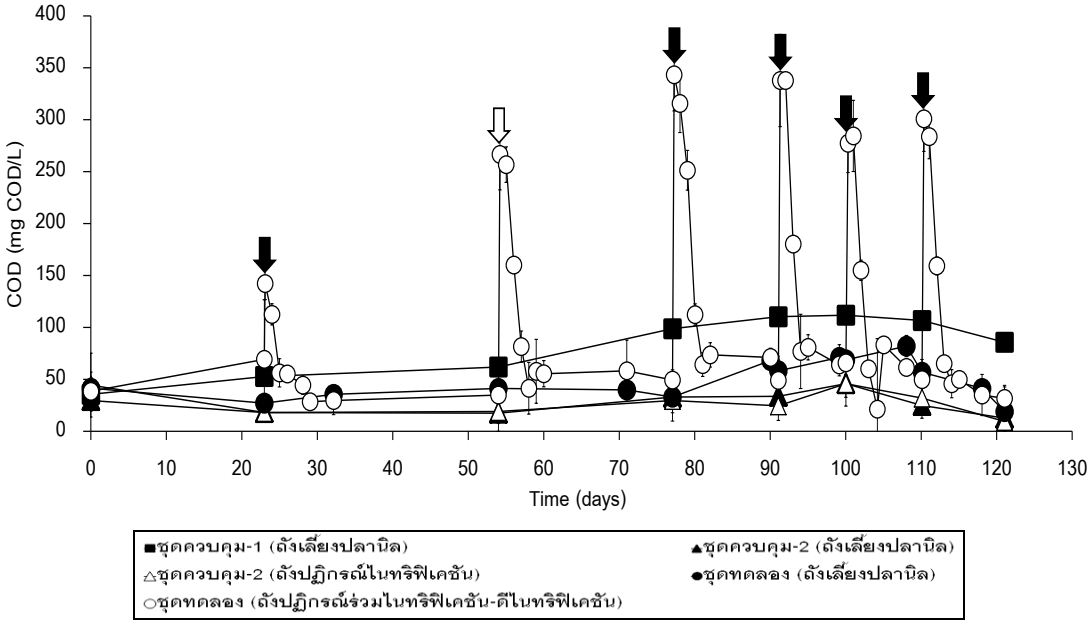
(ข) ค่าโออาร์พีที่ชั้นหินพัมมิส

◆**ชุดควบคุม-2 (ถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน)** ◇**ชุดทดลอง (ถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน)**

รูปที่ 4.19 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (โออาร์พี) ในถังปฏิกรณ์ของชุดควบคุม-2 (ถังเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน) และชุดทดลอง (ถังเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชัน) ในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

สำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณซีโอดีในน้ำของถังเลี้ยงปลานิลและถังปฏิกรณ์จากการทดลอง 3 ชุดตลอดการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.20 สำหรับถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน - ดีไนทริฟิเคชันเมื่อทำการหยุดหมุนเวียนน้ำและทำการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 หรือ 6:1 ลงไปเพื่อบำบัดไนเทรต พบว่าปริมาณซีโอดีจะค่อยๆ ลดลงและเหลือในปริมาณต่ำเมื่อไนเทรตถูกบำบัดจนเหลือในปริมาณคงที่ แสดงว่ามีการเจริญเติบโตของดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียที่สามารถนำเมทานอลไปใช้ได้จนเหลือในปริมาณต่ำ โดยปริมาณซีโอดีที่เหลือเมื่อไนเทรตถูกบำบัดจนคงที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 63.22 ± 23.46 และ 55.41 ± 12.64 มก.ซีโอดี/ล. สำหรับการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 มีปริมาณซีโอดีเหลือมากกว่าการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 6:1 เนื่องจากค่าซีโอดีที่วัดได้ไม่ได้เป็นปริมาณเมทานอลที่เติมลงไปเพียงอย่างเดียว แต่อาจมีสารอินทรีย์อื่นๆ ที่อยู่ในถังเลี้ยงปลานิลหรือถังปฏิกรณ์ร่วมด้วย เช่น อาหาร ซากเซลล์แบคทีเรีย เป็นต้น จึงส่งผลให้ปริมาณซีโอดีที่วัดได้มีค่าสูง แต่อย่างไรก็ตามปริมาณซีโอดีที่ตกค้างอยู่ในถังปฏิกรณ์เป็นปริมาณที่ค่อนข้างต่ำและไม่เป็นอันตรายต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ นอกจากนี้ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำยังมีแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรทรอฟกลุ่มอื่นๆ อาศัยอยู่ ซึ่งจะสามารถนำคาร์บอนจากสารอินทรีย์ไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ เป็นผลทำให้สามารถควบคุมปริมาณสารอินทรีย์ในถังเลี้ยงปลานิลไม่ให้มีมากเกินไปจนเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ส่วนการตรวจวัดค่าซีโอดีทั้งในถังปฏิกรณ์และในถังเลี้ยงปลานิลของชุดควบคุม-1 ชุดควบคุม-2 และชุดทดลองในขณะที่ยังไม่มีการเติมเมทานอลลงในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน โดยทำการตรวจเป็นระยะๆ พบว่าปริมาณซีโอดีมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 9.52 - 111.83 มก.ซีโอดี/ล. ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณซีโอดีในน้ำของชุดควบคุม-1 มีค่ามากกว่าในชุดการทดลองอื่นๆ และมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากชุดควบคุม-1 ไม่มีการนำตะกอนแขวนลอยออกจากระบบ จึงทำให้ปริมาณตะกอนแขวนลอยมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ปริมาณสารอินทรีย์ในถังเลี้ยงปลานิลมีเพิ่มมากขึ้น ค่าซีโอดีจึงสูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ ที่มีการนำตะกอนแขวนลอยออกจากระบบ จากรายงานของ Kaviraj และคณะ (2004) กล่าวว่าความเป็นพิษของเมทานอลที่มีผลกับสัตว์น้ำจืดแบบเรื้อรังคือ ถ้าระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดกลางแจ้งที่มีเมทานอลในน้ำมากกว่า 47.49 มก./ล. (ประมาณ 71.24 มก.ซีโอดี/ล.) จะส่งผลต่อการเจริญเติบโตและการวางไข่ของสัตว์น้ำ แต่ถ้าเมทานอลมีความเข้มข้นสูงถึง 1,527.60 มก./ล. (2,291.40 มก.ซีโอดี/ล.) เมทานอลจะไปทำลายเนื้อเยื่อในตัวปลาในส่วนของจอตา เป็นผลให้ปลาตาบอดได้ และทำลายเหงือกปลาทำให้ปลาตายได้ จากผลการทดลองค่าปริมาณซีโอดีในบางครั้งที่ทำการตรวจวัดได้ในถังเลี้ยงปลานิลของชุดควบคุม-2

และชุดทดลองอาจมีค่ามากกว่า 71.24 มก.ซีโอดี/ล. แต่ก็เป็นเพียงช่วงระยะเวลาสั้นๆ เท่านั้น ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อปลานิล



รูปที่ 4.20 ปริมาณซีโอดีในน้ำที่ทำการตรวจวัดในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดย ⬇ และ ⇩ แสดงการเติมเมทานอลในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชัน ด้วยอัตราการส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 และ 6:1 ตามลำดับ

4.4.3 อัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของถังปฏิกรณ์

เมื่อเริ่มต้นการทดลองจะนำหินพัมมิสบดที่ผ่านการปรับสภาพแล้วมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียก่อน แล้วจึงทำการบรรจุลงในถังปฏิกรณ์ และทำการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของหินพัมมิสบดที่บรรจุอยู่ในถังปฏิกรณ์และตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิลที่ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ส่วนการตรวจวัดอัตราการบำบัดดีไนทริฟิเคชันจะดำเนินการเมื่อมีการเติมเมทานอลลงในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน ด้วยการเก็บตัวอย่างน้ำเป็นระยะจนกว่าไนเทรตจะลดลงเหลือปริมาณคงที่ จากรูปที่ 4.21 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในระหว่างการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของหินพัมมิสบดและตะกอนแขวนลอย พบว่าทั้งหินพัมมิสบดและตะกอนแขวนลอยสามารถบำบัดแอมโมเนียผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันแบบสมบูรณ์ โดยไม่พบการสะสมของ

ไนไทรต์ และมีไนเทรตเกิดเพิ่มขึ้น แต่ชุดควบคุม-1 พบการลดลงของแอมโมเนียแต่ปริมาณไนเทรตเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แสดงว่ามีไนโตรเจนส่วนหนึ่งที่แบคทีเรียนำไปใช้ในการสร้างเซลล์หรือเกาะอยู่กับตะกอนแขวนลอยในน้ำมากกว่าที่จะเกิดจากกระบวนไนทริฟิเคชัน

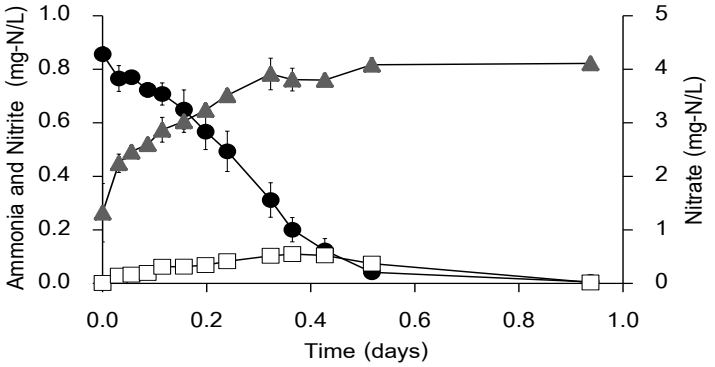
เมื่อคำนวณหาอัตราการบำบัดแอมโมเนียได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.22 พบว่าเมื่อเริ่มต้นการทดลองหินพัมมิสบดมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเมื่อคิดเทียบจากปริมาตรน้ำเท่ากับ 1.73 มก.ไนโตรเจน/ล./วัน หรือคิดเป็นอัตราการบำบัดแอมโมเนียเมื่อคิดเทียบกับปริมาตรบรรจุเท่ากับ 21.6 ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองหินพัมมิสบดมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเมื่อคิดเทียบกับปริมาตรน้ำเท่ากับ 3.28 และ 4.48 มก.ไนโตรเจน/ล./วัน หรือคิดเป็นอัตราการบำบัดแอมโมเนียเมื่อคิดเทียบกับปริมาตรบรรจุเท่ากับ 40.9 และ 56.0 ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน สำหรับในถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันและถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของหินพัมมิสบดทั้งในถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันและถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของหินพัมมิสบดมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาในการเลี้ยงปลานิล เนื่องจากสภาวะภายในถังปฏิกรณ์มีความเหมาะสม และน้ำที่หมุนเวียนมาจากถังเลี้ยงปลานิลมีปริมาณแอมโมเนียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ตลอดเวลา จึงทำให้แบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายอิงที่ไปยึดเกาะบนหินพัมมิสมีการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนมากขึ้น การหยุดระบบหมุนเวียนน้ำและเติมเมทานอลลงไปในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันเพื่อบำบัดไนเทรต และเมื่อหมุนเวียนน้ำกลับถังเลี้ยงปลานิลตามปกติ แสดงให้เห็นว่าการเติมเมทานอลไม่มีผลยับยั้งการบำบัดแอมโมเนียของหินพัมมิสบดด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชัน นอกจากนี้หินพัมมิสบดที่บรรจุลงในถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียต่ำกว่าหินพัมมิสบดที่บรรจุในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน อาจมีสาเหตุมาจากเมื่อเวียนน้ำมาจากถังเลี้ยงปลานิลอาจมีตะกอนแขวนลอยในน้ำหลุดลอดผ่านใยกรองน้ำผ่านเข้ามายังถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน หรืออาจมีซากแบคทีเรียที่ตายแล้วจำนวนมากเกาะอยู่บนพื้นผิวของหินพัมมิส จึงทำให้ไนทริฟายอิงแบคทีเรียมีพื้นที่ยึดเกาะลดลงและมีความสามารถในการทำงานลดลง เป็นสาเหตุทำให้อัตราการบำบัดแอมโมเนียของหินพัมมิสบดที่บรรจุลงถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันมีค่าลดลง ส่วนการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนแขวนลอยในน้ำในถังเลี้ยงปลานิลของชุดควบคุม-1 เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ามีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเมื่อคิดเทียบกับปริมาตรน้ำเท่ากับ 5.05 มก.ไนโตรเจน/ล.วัน ซึ่งมีค่ามากกว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของหินพัมมิสบดที่บรรจุในถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันและถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าในถังเลี้ยงปลานิลไม่มีการนำตะกอนแขวนลอยออกจากระบบจึงเกิดการสะสมของตะกอนแขวนลอย

ในน้ำเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเลี้ยงปลานิล ซึ่งในตะกอนแขวนลอยนี้นอกจากจะมีไนทริฟายอิงแบคทีเรียอาศัยอยู่ ยังมีแบคทีเรียเฮเทอโรทรอฟที่สามารถมีการเจริญเติบและเพิ่มจำนวนได้อย่างรวดเร็วกว่าไนทริฟายอิงแบคทีเรียด้วยถ้าสภาวะในถังเลี้ยงปลานิลมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสม แอมโมเนียและไนไทรต์จะถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วจากการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียทั้ง 2 กลุ่มดังกล่าว จึงส่งผลให้ตะกอนแขวนลอยมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเกิดขึ้นได้เร็วกว่าหินพัมมิสบด จากรายงานของ Crab และคณะ (2012) กล่าวว่าไบโอฟล็อกหรือตะกอนภายในถังเลี้ยงปลานิลที่รวมกลุ่มกันสามารถบำบัดแอมโมเนียโดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรียเฮเทอโรทรอฟได้รวดเร็วกว่ากระบวนการไนทริฟิเคชันที่อาศัยแบคทีเรียไนทริฟายอิงแบคทีเรียที่เกาะอยู่บนตัวกรองชีวภาพ

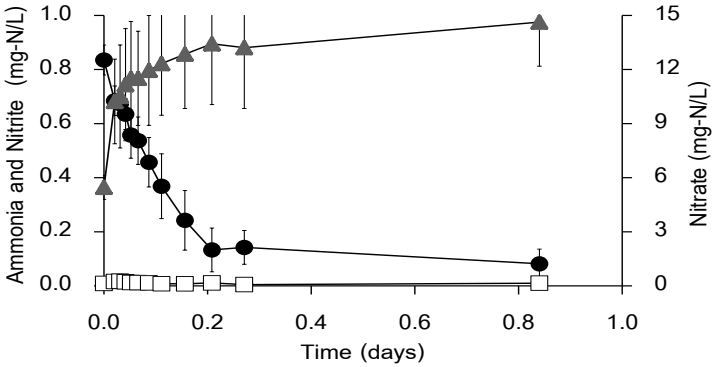
สำหรับอัตราการบำบัดไนเทรตของหินพัมมิสบดในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันแสดงดังรูปที่ 4.23 พบว่าการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 หรือ 6:1 เพื่อบำบัดไนเทรตในช่วงวันที่ 23 54 และ 77 มีผลทำให้อัตราการบำบัดไนเทรตของหินพัมมิสบดมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และจากนั้นในวันที่ 91 100 และ 110 จะพบว่าอัตราการบำบัดไนเทรตมีค่าไม่คงที่ เมื่อเปรียบเทียบอัตราการบำบัดไนเทรตตลอดการทดลองจะเห็นได้ว่าในวันที่ 23 ของการทดลองอัตราการบำบัดไนเทรตเมื่อคิดเทียบกับปริมาตรน้ำมีค่าเท่ากับ 2.51 มก.ไนโตรเจน/ล./วัน ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุด เนื่องจากถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันไม่มีการบ่มเชื้อดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียมาก่อนจึงทำให้อัตราการบำบัดไนเทรตยังมีค่าต่ำอยู่ จากนั้นในวันที่ 54 ของการทดลองจึงได้ลองทำการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 6:1 พบว่ามีค่าต่ำกว่าอัตราการบำบัดไนเทรตในช่วงที่ทำการเติมเมทานอลด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ในวันที่ 77 91 100 และ 110 ที่เป็นเช่นนี้เพราะดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียอาจยังเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนได้ไม่มาก และยังพบว่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนทรตไนโตรเจนเท่ากับ 6:1 เป็นสัดส่วนที่ไม่เหมาะสมเพราะเมื่อไนเทรตถูกบำบัดจนเหลือในปริมาณคงที่ จะพบไนเทรตเหลืออยู่ในน้ำที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 5 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งถ้าระบบในขณะนั้นที่บริเวณชั้นหินพัมมิสอยู่ในสภาวะไร้อากาศและไนเทรตถูกบำบัดจนหมดจะทำให้แบคทีเรียเปลี่ยนมาใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน เป็นสาเหตุทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟล์ซึ่งเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำได้ ส่วนในวันที่ 91 100 และ 110 จะพบว่าอัตราการบำบัดไนเทรตมีค่าไม่คงที่อาจมีสาเหตุมาจากสภาวะภายในถังปฏิกรณ์ในแต่ละช่วงการบำบัดอาจมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่ไม่เหมาะสมต่อการบำบัด หรือปริมาณไนเทรตที่เข้าระบบในแต่ละช่วงการบำบัดอาจมีความแตกต่างกัน จึงส่งผลให้หินพัมมิสบดมีอัตราการบำบัดที่ไม่คงที่

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียกับอัตราการบำบัดไนเทรตของหินพัมมิสบดที่บรรจุในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันในวันสุดท้ายของการทดลอง พบว่าหินพัมมิสบดมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเมื่อคิดเทียบกับปริมาตรน้ำเท่ากับ 4.48 มก.ไนโตรเจน/ล./วัน หรือคิดเป็นอัตราการบำบัดแอมโมเนียเมื่อคิดเทียบกับปริมาตรบรรจุเท่ากับ 56.0 ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน และมีอัตราการบำบัดไนเทรตเมื่อคิดเทียบกับปริมาตรน้ำเท่ากับ 10.20 มก.ไนโตรเจน/ล./วัน หรือคิดเป็นอัตราการบำบัดไนเทรตเมื่อคิดเทียบกับปริมาตรบรรจุเท่ากับ 127.5 ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน จะเห็นได้ว่าอัตราการบำบัดไนเทรตมีค่ามากกว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนีย ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อทำการหยุดหมุนเวียนน้ำและเติมเมทานอลลงไปด้วยอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 อาจส่งผลให้ไนทริฟายอิงแบคทีเรียเจริญเติบโตได้ช้าลงหรือบางส่วนอาจตายได้ จึงทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันลดลง เพราะถังปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจนน้อยลงและอาจไม่เพียงพอต่อการทำงานของไนทริฟายอิงแบคทีเรีย นอกจากนี้การเติมเมทานอลยังช่วยเร่งให้แบคทีเรียเฮเทอโรทรอฟที่เกาะอยู่ชั้นนอกของตัวกรองชีวภาพมีการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนได้เร็วขึ้น จึงขวางกั้นไม่ให้แอมโมเนียแพร่เข้าไปถึงบริเวณที่ไนทริฟายอิงแบคทีเรียเกาะอยู่บนตัวกรองได้ ส่งผลให้การเจริญเติบโตของไนทริฟายอิงแบคทีเรียบางส่วนถูกยับยั้งได้ (Michaud และคณะ, 2006)

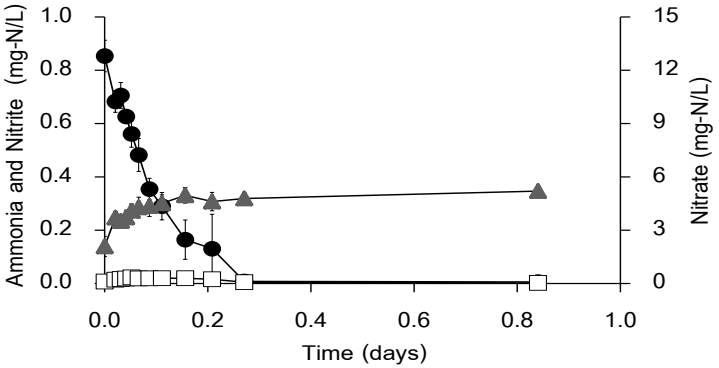
จะเห็นได้ว่าการทดลองนี้ทำการเดินระบบผ่านมาเป็นระยะเวลา 4 เดือน ถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนได้ดี แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเดินระบบต่อไปเรื่อยๆ จนปลานิลมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นและสามารถนำไปจำหน่ายได้ ในระหว่างนั้นหินพัมมิสบดอาจมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนลดลง จึงมีผลทำให้แอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต สะสมอยู่ในน้ำในปริมาณเพิ่มขึ้นและเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำได้ ถ้าหากเกิดกรณีเช่นนี้จะต้องแก้ไขโดยการนำหินพัมมิสบดภายในถังปฏิกรณ์ออกเพื่อนำไปล้างทำความสะอาดตะกอนและเซลล์แบคทีเรียที่ตายทับถมและอุดตันหินพัมมิส ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ไนทริฟายอิงแบคทีเรียและดีไนทรฟิฟายอิงแบคทีเรียไม่สามารถไปยึดเกาะได้ แล้วจึงนำกลับมาบรรจุใหม่หรือนำหินพัมมิสบดไปปรับสภาพใหม่ แต่นำหินพัมมิสบดที่ทำการเตรียมสภาพไว้แล้วมาบรรจุแทน



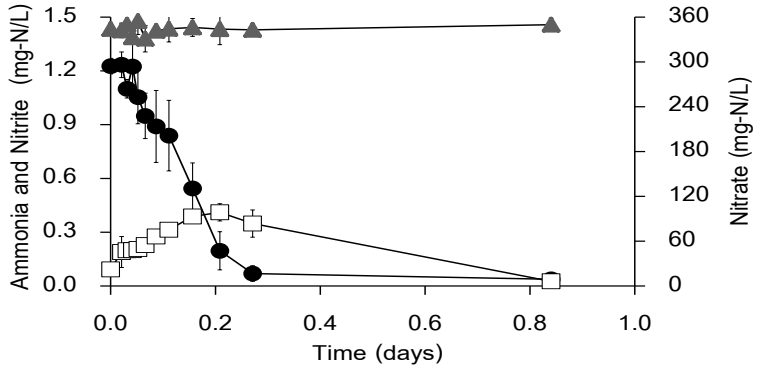
หินพัมมิสบดเมื่อเริ่มต้นการทดลอง



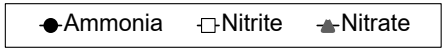
หินพัมมิสบดในถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันของชุดควบคุม-2 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง



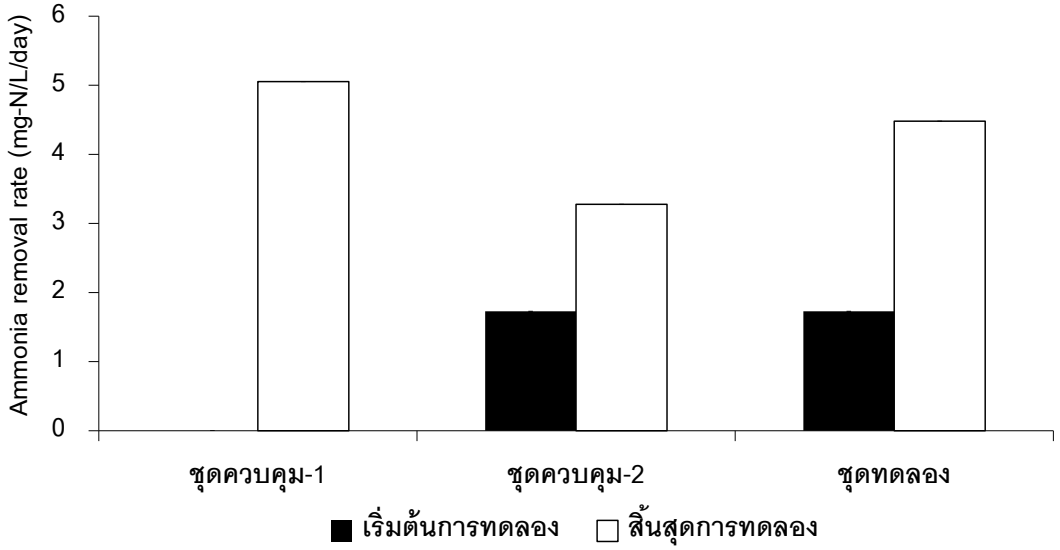
หินพัมมิสบดในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันของชุดทดลอง เมื่อสิ้นสุดการทดลอง



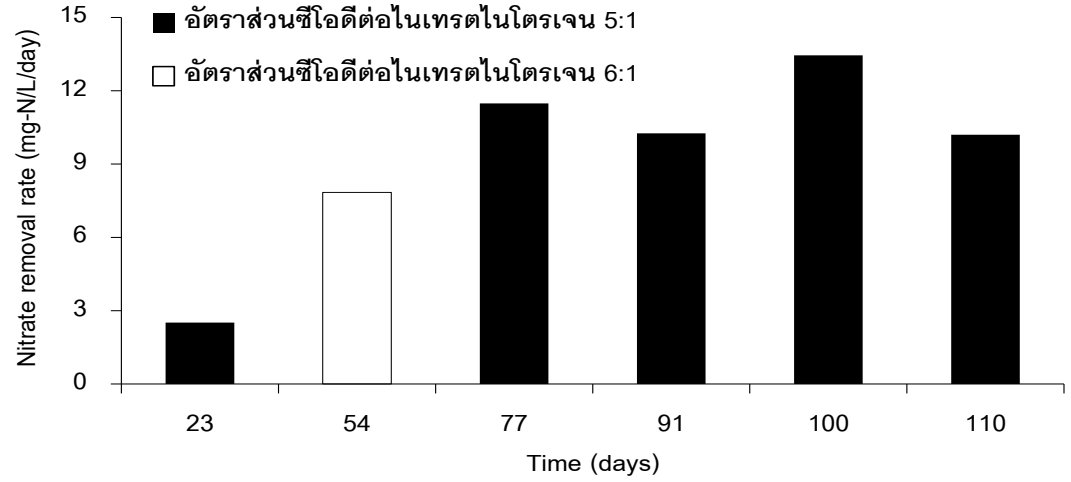
ตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิลของชุดควบคุม-1 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง



รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของหินพัมมิสบดและตะกอนแขวนลอย ในการศึกษาประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ



รูปที่ 4.22 อัตราการลดลงของแอมโมเนีย (คิดเทียบกับปริมาตรน้ำ) ของตะกอนชีวภาพในถังเลี้ยงปลานิลของชุดควบคุม-1 และของหินพัมมิสบดที่บรรจุลงในถังปฏิกรณ์เมื่อเริ่มต้นการทดลองกับสิ้นสุดการทดลองของชุดควบคุม-2 และชุดทดลองในการศึกษาประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ



รูปที่ 4.23 อัตราการลดลงของไนเทรต (คิดเทียบกับปริมาตรน้ำ) ของหินพัมมิสบดที่บรรจุในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในชุดทดลอง ในการศึกษาประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

4.2.3 การประเมินประสิทธิภาพระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

การเจริญเติบโตของปลานิลในการทดลอง 3 ชุด ได้แก่ ชุดควบคุม-1 ที่ทำการเลี้ยงปลานิลอย่างเดียว (จำนวน 1 ชุด) ชุดควบคุม-2 ที่ทำการเลี้ยงปลานิลและมีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน (จำนวน 3 ชุด) และชุดทดลองที่มีการเลี้ยงปลานิลและติดตั้งถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน (จำนวน 3 ชุด) ซึ่งทำการเลี้ยงปลานิลถังละ 11 ตัว ด้วยน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 11.01 ± 2.76, 11.02 ± 0.13 และ 11.06 ± 0.06 ก./ตัว ตามลำดับ หรือคิดเป็นความหนาแน่นเริ่มต้นประมาณ 1.2 กก./ลบ.ม. (คิดเฉพาะปริมาตรน้ำในถังเลี้ยงปลานิลคือ 100 ล.) ทำการให้อาหารตลอดการทดลอง วันละ 3 มื้อ ในอัตราร้อยละ 0-5 ของน้ำหนักปลาต่อวัน โดยมีการปรับปริมาณอาหารตามการเจริญเติบโตที่เพิ่มขึ้น-ลดลงหรือมีการตายเกิดขึ้น การเจริญเติบโตของปลานิลตลอดการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 พบว่าในช่วง 32 วันแรกของการทดลองชุดควบคุม-1 (ตารางที่ 4.7) ปลานิลมีการกินอาหารลดลงเรื่อยๆ จนไม่กินอาหาร และมีปลานิล 1 ตัวตายไปเนื่องจากคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงปลานิลช่วงนี้มีปริมาณแอมโมเนียและไนไทรต์สะสมอยู่ในปริมาณที่สูง จึงส่งผลให้ปลานิลในถังเลี้ยงมีอัตราการเจริญเติบโตที่ช้ากว่าชุดการทดลองอื่นๆ แต่หลังจากนั้นอัตราการเจริญเติบโตมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเลี้ยงปลานิล นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์น้ำหนักเฉลี่ยของปลานิลในชุดควบคุม-1 เทียบกับชุดการทดลองอื่นๆ พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าสูง แสดงว่าการเจริญเติบโตของปลานิลแต่ละตัวในชุดควบคุม-1 มีขนาดไม่สม่ำเสมอกัน

ส่วนชุดควบคุม-2 (ตารางที่ 4.8) ในช่วง 53 วันแรกของการทดลอง อัตราการเจริญเติบโตของปลานิลมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นและหลังจากนั้นเริ่มคงที่และลดลงเล็กน้อยในช่วงท้ายของการทดลอง เนื่องจากในช่วงหลังจากวันที่ 53 ของการทดลองเป็นต้นไปปลานิลเริ่มกินอาหารไม่หมด จึงทำการลดปริมาณอาหารลง และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโต อัตราการรอด และความหนาแน่น (คิดเฉพาะปริมาตรน้ำในถังเลี้ยงปลานิลคือ 100 ล.) ของชุดควบคุม-2 กับชุดการทดลองอื่นๆ พบว่ามีค่าต่ำกว่า ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากปลานิลที่นำมาทำการทดลองมีสุขภาพและความแข็งแรงไม่เท่ากัน ประกอบกับสภาพแวดล้อมของน้ำขณะนั้นมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอยู่บ่อยครั้ง จึงส่งผลให้มีอัตราการเจริญเติบโตไม่ดี หรือปลานิลบางตัวไม่สามารถปรับตัวให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมได้จึงทำให้เกิดการตายได้ในที่สุด

สำหรับชุดทดลอง (ตารางที่ 4.9) ตั้งแต่วันที่ 76-109 ของการทดลองมีถังเลี้ยงปลานิล 1 ถังทดลอง (จากทั้งหมด 3 ถังทดลอง) พบปลานิลตายเกิดขึ้นเรื่อยๆ จนเหลือปลานิลที่รอดตายเพียง 1 ตัวเท่านั้น จึงได้ทำการเติมปลานิลลงไปเพิ่มเติมอีก 10 ตัว โดยให้มีขนาดและ

น้ำหนักรวมของปลานิลเฉลี่ยใกล้เคียงกับอีก 2 ถังทดลองในวันที่ 109 ของการทดลองคือ 1,034.15± 31.75 ก. และทำการทดลองต่อจนถึงวันสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 121 ก็ยังพบว่าถังเลี้ยงปลานิลถังเดิม ปลานิลยังมีการตายอยู่เรื่อยๆ เช่นเดิม จนเหลือปลานิลที่รอดตายอยู่ 3 ตัวเท่านั้น แสดงว่าปลานิลถังนี้มีการติดโรคเกิดขึ้น ซึ่งตั้งแต่วันที่ 76 ของการทดลองเป็นต้นไปเมื่อสังเกตพฤติกรรมของปลานิลในถังเลี้ยงที่คาดว่าจะเป็นโรค พบว่าปลานิลไม่กินอาหารและมีการลอยตัวขึ้นมาอยู่ตามขอบถังเลี้ยงครั้งละ 1-2 ตัว หลังจากนั้นปลาจะเริ่มตายในวันถัดไป โดยพฤติกรรมแบบนี้เกิดขึ้นเรื่อยๆ จนสิ้นสุดการทดลอง เมื่อพิจารณาอุณหภูมิพบว่าในระหว่างทำการทดลองเป็นช่วงฤดูร้อนและมีพายุฝนเกิดขึ้น จึงทำให้อุณหภูมิของน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยในช่วงวันที่ 76 จนถึงสิ้นสุดการทดลองพบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 27–32 °ซ อย่างรวดเร็ว ประกอบกับอุณหภูมิที่สูงอาจเป็นสภาวะที่เอื้ออำนวยให้ปลาอ่อนแอและติดโรคได้ง่าย ซึ่ง Amal และ Zamri-Saad (2011) รายงานว่าอุณหภูมิที่มากกว่า 31 °ซ มีผลทำให้ปลานิลติดโรคจากเชื้อ *Streptococcus agalactiae* ได้ นอกจากนี้สภาวะดังกล่าวยังส่งผลถึงกระบวนการย่อยสลายของเสียที่เกิดขึ้นในถังเลี้ยงปลานิลเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ของจุลินทรีย์ โดยเฉพาะอาหารเหลือและสิ่งขับถ่ายจากปลานิลทำให้เกิดการตายของสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ตามมาจนเกิดการสะสมของสารอนินทรีย์และอินทรีย์จำนวนมากในถังเลี้ยงปลานิล ส่งผลให้คุณภาพน้ำทั้งทางชีวภาพ กายภาพ และเคมีเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ไม่เหมาะสม ซึ่งสาเหตุดังกล่าวเป็นส่วนสำคัญที่ก่อให้เกิดสภาวะเครียดในปลานิล จึงส่งผลให้ปลานิลเจริญเติบโตช้า มีสุขภาพอ่อนแอ ติดเชื้อโรคต่างๆ ได้ง่าย และนำไปสู่การตายในที่สุด ดังนั้นสาเหตุที่ทำให้ปลานิลตายเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อาจมาจากอุณหภูมิที่สูงมากเกินไปจนทำให้เชื้อโรคบางชนิดเกิดการเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว โดยในถังเลี้ยงอาจมีปลานิลที่เป็นพาหะนำโรคและสามารถเกิดการติดต่อกันและเกิดการตายเรื่อยๆ จากรายงานต่างๆ พบว่าปลาที่ติดเชื้อโรคแต่ละชนิดจะมีลักษณะอาการที่แตกต่างกัน เช่น ชนกันต์ จิตมนัส (2556) กล่าวว่า ปลาที่ติดเชื้อแบคทีเรียสเตรปโตคอคคัส (*Streptococcus* spp.) จะมีอาการตาขุ่นขาวและโปน ไม่ค่อยว่ายน้ำลอยนิ่ง บางตัวว่ายน้ำควงสว่าน ช่องขับถ่ายบวมแดง พบระบาดรุนแรงในหน้าร้อน สามารถทำให้ปลาตายจำนวนมากในเวลาอันสั้นหากมีการติดเชื้อรุนแรง นอกจากนี้ในช่วงหน้าร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศอย่างกระทันหันจะเป็นปัจจัยที่ทำให้ปลานิลติดเชื้อฟลาโวแบคทีเรียม (*Flavobaterium columnarae*) สังเกตได้จากลำตัวปลาจะมีสีซีดเป็นแถบๆ มีเมือกมาก ครีบและเหงือกกร่อน ดังนั้นการตายของปลานิลที่คาดว่าเกิดจากการติดโรค 1 ถังทดลอง (จากทั้งหมด 3 ถังทดลอง) ในชุดทดลอง ส่งผลให้การเจริญเติบโตของปลานิลตั้งแต่วันที่ 76-121 ของการทดลองเป็นค่าเฉลี่ยจากจำนวน 2 ถังทดลอง (จากทั้งหมด 3 ถังทดลอง) ซึ่งผลการทดลองพบว่า อัตราการ

เจริญเติบโตของปลานิลมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงวันที่ 99 ของการทดลอง และหลังจากนั้นมีแนวโน้มลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากมีการลดปริมาณอาหาร เพราะในบางวันถ้าพบว่าปลาไม่กินอาหารจะทำการให้อาหารเพียงมื้อเดียว (ประมาณร้อยละ 1 ต่อวัน) หรือหยุดให้ในวัดถัดมา เพื่อไม่ให้อาหารเกิดการเหลือตกค้างในถังเลี้ยงปลานิลมากเกินไป

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของปลานิลในการทดลองนี้กับอัตราการเจริญเติบโตของปลานิลในบ่อที่เกษตรกรเลี้ยงทั่วไป แสดงดังตารางที่ 4.10 พบว่าปลานิลในการทดลองนี้มีอัตราการเจริญเติบโตอยู่ในระดับปกติ แต่อย่างไรก็ตามการเจริญเติบโตของปลานิลขึ้นอยู่กับส่วนประกอบและปริมาณของอาหารที่ให้ในแต่ละวัน คุณภาพน้ำ ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น

ตารางที่ 4.7 การเจริญเติบโตของปลานิลชุดควบคุม-1 (ถังเลี้ยงปลานิล ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์) ในการศึกษาประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน ในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ชุดควบคุม-1 (ถังเลี้ยงปลานิล ไม่มีระบบบำบัด)							
วัน	**อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (ก./วัน)**	**น้ำหนักเฉลี่ย (ก./ตัว)**	**ความยาวเฉลี่ย (ซม./ตัว)**	**อัตราการรอด (%)**	**อัตราการแลกเนื้อ**	**ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)**	
						คิดเฉพาะปริมาตรน้ำในถังเลี้ยงปลานิล (100 ล.)	**คิดจากปริมาตรน้ำทั้งหมดในระบบ (200 ล.)**
1		11.01 ± 2.76	8.09 ± 0.56	100.00		1.21	
1-15	0.30	15.51 ± 4.01	8.97 ± 0.73	100.00		1.71	
15-32	0.30	20.65 ± 9.01	9.39 ± 3.22	90.91		2.27	
32-53	0.53	38.90 ± 18.01	11.49 ± 4.01	90.91		4.28	
53-76	0.60	56.68 ± 25.92	13.10 ± 4.54	90.91		6.24	
76-99	0.66	76.72 ± 35.10	14.42 ± 5.01	90.91		8.44	
99-109	0.67	84.10 ± 37.86	14.92 ± 5.17	90.91		9.25	
109-121	0.68	93.42 ± 41.38	15.45 ± 5.34	90.91	1.33	10.28	

ตารางที่ 4.8 การเจริญเติบโตของปลานิลชุดควบคุม-2 (ถังเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน) ในการศึกษาประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ชุดควบคุม-2 (ถังเลี้ยงปลานิล มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน)							
วัน	**อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (ก./วัน)**	**น้ำหนักเฉลี่ย (ก./ตัว)**	**ความยาวเฉลี่ย (ซม./ตัว)**	**อัตราการรอด (%)**	**อัตราการแลกเนื้อ**	**ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)**	
						คิดเฉพาะปริมาตรน้ำในถังเลี้ยงปลานิล (100 ล.)	**คิดจากปริมาตรน้ำทั้งหมดในระบบ (200 ล.)**
1		11.02 ± 0.13	8.35 ± 0.08	100.0 ± 00.00		1.21 ± 0.01	0.61 ± 0.01
1-15	0.28 ± 0.09	15.26 ± 1.24	8.48 ± 0.75	90.91 ± 9.09		1.68 ± 0.14	0.84 ± 0.07
15-32	0.42 ± 0.07	24.35 ± 2.00	9.95 ± 0.87	90.91 ± 9.09		2.68 ± 0.22	1.34 ± 0.11
32-53	0.56 ± 0.11	40.84 ± 5.61	11.44 ± 1.54	87.88 ± 13.89		4.49 ± 0.62	2.25 ± 0.31
53-76	0.56 ± 0.11	53.83 ± 8.01	12.20 ± 1.84	84.85 ± 13.89		5.92 ± 0.88	2.96 ± 0.44
76-99	0.56 ± 0.10	66.53 ± 9.37	12.81 ± 1.28	81.82 ± 9.09		7.32 ± 1.03	3.66 ± 0.52
99-109	0.53 ± 0.07	68.54 ± 8.05	12.66 ± 1.16	78.79 ± 10.50		7.54 ± 0.89	3.77 ± 0.44
109-121	0.53 ± 0.07	74.68 ± 8.20	12.69 ± 0.72	75.76 ± 5.25	1.70 ± 0.12	8.21 ± 0.90	4.11 ± 0.45

ตารางที่ 4.9 การเจริญเติบโตของปลานิลชุดทดลอง (ถังเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชัน) ในการศึกษาประสิทธิภาพถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ชุดทดลอง (ถังเลี้ยงปลานิล มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน)							
วัน	**อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (ก./วัน)**	**น้ำหนักเฉลี่ย (ก./ตัว)**	**ความยาวเฉลี่ย (ซม./ตัว)**	**อัตราการรอด (%)**	**อัตราการแลกเนื้อ**	**ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)**	
						คิดเฉพาะปริมาตรน้ำในถังเลี้ยงปลานิล (100 ล.)	**คิดจากปริมาตรน้ำทั้งหมดในระบบ (200 ล.)**
1		11.06 ± 0.06	8.37 ± 0.05	100.00 ± 0.00		1.22 ± 0.01	0.61 ± 0.00
1-15	0.37 ± 0.01	16.61 ± 0.13	9.39 ± 0.06	100.00 ± 0.00		1.83 ± 0.01	0.91 ± 0.01
15-32	0.50 ± 0.01	26.97 ± 0.18	11.22 ± 0.08	100.00 ± 0.00		2.97 ± 0.02	1.48 ± 0.01
32-53	0.69 ± 0.03	47.53 ± 1.33	13.17 ± 0.22	100.00 ± 0.00		5.23 ± 0.15	2.61 ± 0.07
53-76	0.73 ± 0.07	66.42 ± 5.64	14.48 ± 1.06	100.00 ± 0.00		7.31 ± 0.62	3.65 ± 0.31
76-99	0.79 ± 0.03	89.66 ± 2.87	16.33 ± 0.12	100.00 ± 0.00		9.86 ± 0.32	4.93 ± 0.16
99-109	0.76 ± 0.03	94.01 ± 2.89	16.66 ± 0.11	100.00 ± 0.00		10.34 ± 0.32	5.17 ± 0.16
109-121	0.71 ± 0.02	97.06 ± 2.27	17.17 ± 0.19	100.00 ± 0.00	1.45 ± 0.00	10.68 ± 0.25	5.34 ± 0.12

หมายเหตุ: ตั้งแต่วันที่ 76-109 ของการทดลองเป็นต้นไปมีถังเลี้ยงปลานิล 1 ถังทดลองจากทั้งหมด 3 ถังทดลองมีปลาตายเกิดขึ้นเนื่องจากการติดโรค จึงทำให้ผลการเจริญเติบโตของปลานิลตั้งแต่วันที่ 76-121 ของการทดลองคิดจากค่าเฉลี่ยของ 2 ถังทดลองที่เหลือจากทั้งหมด 3 ถังทดลอง

ตารางที่ 4.10 อัตราการเจริญเติบโตของปลานิล (ดัดแปลงจาก คีรี กออนันตกุล และจุฬ สินชัยพานิช, 2551 อ้างถึงใน กชพร กฤติยานันต์, 2554)

อายุปลา (สัปดาห์)	น้ำหนัก (ก.)	อัตราการเจริญเติบโต (ก./วัน)	อ้างอิง
7 - 8	1 - 10	0.16 - 0.18	คีรี และจุฬ (2551)
12 - 14	10 - 30	0.30 - 0.34	
24 - 28	30 - 60	0.30 - 0.35	
29 - 33	60 - 100	0.43 - 0.49	
33 - 38	100 - 400	1.50 -1.73	
	น้ำหนักเริ่มต้น 11.01 - 11.06 น้ำหนักสิ้นสุด 74.68 - 97.06	0.53 - 0.71	งานวิจัยนี้

4.3.5 การประเมินสมดุลไนโตรเจน

การทดลองช่วงสุดท้ายเป็นการประเมินสมดุลไนโตรเจนในถังเลี้ยงปลานิลของการทดลอง 3 ชุด ได้แก่ ชุดควบคุม-1 ถังเลี้ยงปลานิลไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ (จำนวน 1 ถัง) ชุดควบคุม-2 ถังเลี้ยงปลานิลมีการติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน (จำนวน 3 ถัง) และชุดทดลอง ถังเลี้ยงปลานิลมีการติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชัน (จำนวน 2 ถัง) เนื่องจากตั้งแต่วันที่ 76-109 ของการทดลองเป็นต้นไปมีถังเลี้ยงปลานิล 1 ถังจากทั้งหมด 3 ถังของชุดทดลองมีปลาตายเกิดขึ้น และเหลือปลาที่รอดตายเพียง 1 ตัวเท่านั้นเพราะปลานิลมีการติดโรคเกิดขึ้น จึงทำให้การคิดสมดุลไนโตรเจนของชุดทดลองจะคิดเฉลี่ยจากจำนวน 2 ถังทดลองที่เหลือจากทั้งหมด 3 ถังทดลอง ซึ่งการประเมินสมดุลไนโตรเจนทำโดยการเปรียบเทียบปริมาณและสัดส่วนไนโตรเจนทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบและไนโตรเจนทั้งหมดในวันสุดท้าย ปริมาณไนโตรเจนในตะกอนและในตัวปลานิลซึ่งได้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนด้วยเครื่อง CHNS/O ANALYZER (PE2400 Series II) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงดังตารางที่ 4.11 เมื่อนำข้อมูลมาใช้ในการประเมินสมดุลไนโตรเจนได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบส่วนใหญ่มาจากอาหารเลี้ยงปลานิล โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 99.55 98.41 และ 98.48 สำหรับชุดควบคุม-1 ชุดควบคุม-2 และชุดทดลอง ตามลำดับ และสัดส่วนที่เหลือเป็นไนโตรเจนในน้ำทั้งหมด สำหรับ

ไนโตรเจนในวันสุดท้ายพบว่า ไนโตรเจนในอาหารเปลี่ยนไปเป็นมวลชีวภาพในตัวปลานิลเท่ากับร้อยละ 19.32 14.50 และ 17.69 สำหรับชุดควบคุม-1 ชุดควบคุม-2 และชุดทดลอง ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเนื่องจากทั้งสามชุดการทดลองมีจำนวนปลานิลตายไม่เท่ากัน และมีการให้อาหารในแต่ละชุดการทดลองไม่เท่ากันเนื่องจากพฤติกรรมการกินอาหารของปลานิลแตกต่างกัน จึงทำให้พบไนโตรเจนในตัวปลานิลเป็นสัดส่วนที่แตกต่างกัน

ในวันสุดท้ายของการทดลองเลี้ยงปลานิล พบว่าไนโตรเจนที่เหลืออยู่ในน้ำของชุดทดลองที่มีถังบำบัดไนเทรตจะมีปริมาณน้อยกว่าชุดควบคุมอย่างเห็นได้ชัด โดยปริมาณไนโตรเจนในน้ำทั้งหมดของชุดทดลองมีเพียงร้อยละ 13.77 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2 ที่มีปริมาณไนโตรเจนเท่ากับร้อยละ 61.21 และ 41.63 ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เพราะชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2 มีการสะสมของไนเทรตในน้ำความเข้มข้นสูงที่เกิดจากการบำบัดผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน ซึ่งไนเทรตนี้จะสะสมอยู่ในน้ำไม่สามารถกำจัดออกได้ในระบบหมุนเวียนน้ำที่มีเฉพาะระบบบำบัดไนทริฟิเคชัน ในขณะที่ชุดทดลองเกิดการบำบัดไนโตรเจนในน้ำได้ทั้งกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน จึงทำให้มีไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำเหลืออยู่ในปริมาณน้อย สำหรับไนโตรเจนในตะกอนพบว่าชุดควบคุม-1 ที่ไม่มีการนำตะกอนออกจากระบบพบไนโตรเจนอยู่ในตะกอนถึงร้อยละ 7.10 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มากกว่าชุดควบคุม-2 และชุดทดลองที่มีการนำตะกอนออกจากระบบตลอดเวลาซึ่งเป็นเหตุทำให้พบไนโตรเจนในตะกอนน้อยมาก โดยคิดเป็นร้อยละ 0.44 และ 0.29 ตามลำดับ แต่ในส่วนของไนโตรเจนที่ไม่สามารถระบุได้ถึงร้อยละ 68.25 และ 43.43 พบในชุดทดลองและชุดควบคุม-2 ตามลำดับ โดยคาดว่าเป็นส่วนของไนโตรเจนที่สูญเสียไปกับตะกอนที่นำออกจากระบบตลอดเวลา ไนโตรเจนจากในตัวปลาที่ตายไป แบคทีเรียนำไปใช้ในการเจริญเติบโต และจากการระเหยของแอมโมเนียในรูปของก๊าซซึ่งพบได้น้อย เนื่องจากในระหว่างการทดลองพีเอชของน้ำอยู่ในช่วงระหว่าง 6.63-8.61 ดังนั้นแอมโมเนียส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำ ส่วนการที่ชุดทดลองพบสัดส่วนไนโตรเจนในส่วนที่ไม่สามารถระบุได้มากกว่าชุดการทดลองอื่นๆ เนื่องจากชุดการทดลองนี้มีการติดตั้งถังเลี้ยงปลานิลเข้ากับส่วนบำบัดไนเทรตด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน จึงทำให้ไนโตรเจนบางส่วนสูญหายจากระบบไปในรูปของก๊าซไนโตรเจนได้ และไนโตรเจนในส่วนที่ไม่สามารถระบุได้ร้อยละ 12.37 ของชุดควบคุม-1 คาดว่าเป็นส่วนของกระบวนการดีไนทริฟิเคชันที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติในตะกอนที่สะสมอยู่บริเวณก้นถังซึ่งอาจอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน รวมทั้งการนำไนโตรเจนไปใช้ในการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย

เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนในตะกอนกับงานวิจัยอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 4.13 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของทยากร สุวรรณรัตน์ (2552) และวรรัตน์ วณิชชานัย (2552) ที่ทำการทดลองในสภาวะที่มีการเติมแป้งมันอัตราส่วน C:N = 16:1 แต่มีค่าต่ำกว่าของศิวฤกษ์ หนูฤทธิ์ (2554) แสดงว่าปริมาณไนโตรเจนที่สะสมในตะกอนจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ปริมาณโปรตีนของอาหารที่ใช้เลี้ยงปลานิล ปริมาณการให้อาหารในแต่ละวัน การเดินระบบในการทดลอง และสภาวะแวดล้อมในการเลี้ยงปลานิล เป็นต้น

แต่อย่างไรก็ตามการประเมินสมดุลไนโตรเจนในการทดลองนี้ค่าที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนสูง จากสาเหตุหลายประการ เช่น เมื่อมีปลาตายเกิดขึ้นไม่ได้ทำการชั่งน้ำหนักปลาที่ตายไว้ การให้อาหารในปริมาณที่แตกต่างกันตามการเจริญเติบโตและจากการสังเกตการกินอาหารในแต่ละวัน ไม่มีการตรวจวัดไนโตรเจนในรูปของก๊าซจึงทำให้ไม่ทราบได้ว่าไนโตรเจนที่สูญหายไปเป็นก๊าซไนโตรเจนมีในปริมาณมากน้อยเพียงใด และยังพบการผิดพลาดของระบบหมุนเวียนน้ำในบางวัน เช่น ปัญหาจากชุดกาลักน้ำที่ขัดข้องในบางถัง ทำให้น้ำบางส่วนไหลล้นออกจากถังไปจึงต้องทำการเติมน้ำลงไปชดเชย ส่งผลให้ไนโตรเจนบางส่วนอาจหายไปกับน้ำที่ไหลล้นออกจากถัง จากผลการประเมินสมดุลไนโตรเจนแสดงให้เห็นว่า ถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน - ดีไนทริฟิเคชันที่ติดตั้งเข้ากับถังเลี้ยงปลานิลเป็นระบบอีกรูปแบบหนึ่งที่สามารถนำไปใช้บำบัดไนโตรเจนในน้ำของระบบหมุนเวียนน้ำสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 4.11 ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนของตะกอนในน้ำและในตัวปลานิล เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHNS/O ANALYZER

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

ตารางที่ 4.12 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบและเมื่อสิ้นสุดการทดลองในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

องค์ประกอบไนโตรเจน	ไนโตรเจน (ก.)			ไนโตรเจน (%)		
	ชุดควบคุม-1	ชุดควบคุม-2	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม-1	ชุดควบคุม - 2	ชุดทดลอง
ไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบ						
อาหารปลานิล	65.71	66.85	74.09	99.55	98.41	98.48
ไนโตรเจนในน้ำทั้งหมด (TN=TDN+PN)	0.30	1.08	1.14	0.45	1.59	1.52
- ไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมด (TDN)	0.26	1.03	1.14	0.39	1.51	1.52
- ไนโตรเจนไม่ละลายน้ำทั้งหมด (PN)	0.04	0.05	0.00	0.06	0.08	0.00
รวม	66.00	67.93	75.23	100	100	100
ไนโตรเจนในวันสุดท้าย						
ปลานิล	12.75	9.85	13.31	19.32	14.50	17.69
ไนโตรเจนในน้ำทั้งหมด (TN=TDN+PN)	40.40	28.28	10.36	61.21	41.63	13.77
- ไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมด (TDN)	33.20	28.28	10.11	50.30	41.63	13.44
- ไนโตรเจนไม่ละลายน้ำทั้งหมด (PN)	7.20	0.00	0.25	10.91	0.00	0.33
ตะกอน	4.69	0.30	0.22	7.10	0.44	0.29
ส่วนที่ไม่สามารถระบุได้	8.17	29.50	51.34	12.37	43.43	68.25
รวม	66.00	67.93	75.23	100	100	100

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนจากตะกอนในถังเลี้ยงปลานิลในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ร้อยละ			หมายเหตุ	เอกสารอ้างอิง
คาร์บอน	**ไฮโดรเจน**	**ไนโตรเจน**		
-	-	4.98 ± 0.15	ตะกอนปลาเล็ก	ทยากร สุวรรณรัตน์
-	-	5.44 ± 0.07	ตะกอนปลาใหญ่	(2552)
21.70	-	2.19	ระบบไม่มีการเติมแป้งมัน	วรรัตน์ วณิชชานัย
34.50	-	4.20	ระบบมีการเติมแป้งมัน อัตราส่วน C:N = 16:1	(2552)
-	-	15.00		ศิวฤกษ์ หนูฤทธิ์ (2554)
35.32	6.70	4.91		งานวิจัยนี้

หมายเหตุ: - หมายถึงงานวิจัยดังกล่าวไม่ได้ระบุไว้

ผลการทดลองในช่วงนี้แสดงให้เห็นว่าทุกชุดการทดลองสามารถควบคุมปริมาณสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อสัตว์น้ำได้ แต่ชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2 ไม่สามารถควบคุมปริมาณไนเทรตให้ต่ำกว่ามาตรฐานคือ 50 มก.ไนโตรเจน/ล.ได้ อีกทั้งชุดควบคุม-1 ยังพบปริมาณตะกอนแขวนลอยสะสมอยู่ในถังเลี้ยงในปริมาณมาก ซึ่งการนำชุดควบคุม-1 และชุดควบคุม-2 ไปประยุกต์ใช้งานจริงในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำอาจไม่มีความเหมาะสม เพราะทั้ง 2 ชุดการทดลองนี้มีการสะสมของไนเทรตเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาในการเลี้ยง ซึ่งไนเทรตความเข้มข้นสูงสามารถส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำได้ เช่น ทำให้สัตว์น้ำเกิดความเครียด เจริญเติบโตช้า และอ่อนแอ เป็นต้น สำหรับชุดควบคุม-1 ที่ไม่มีการนำตะกอนทิ้งออกจากระบบ หากระบบไม่มีการกวนผสมของน้ำกับตะกอนในถังเลี้ยงได้ดี ตะกอนจะส่งผลกระทบต่อระบบการหายใจของสัตว์น้ำและอาจเกิดการเน่าเสียภายในถังเลี้ยงได้ ส่งผลให้ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นชุดทดลองที่ถังเลี้ยงปลานิลมีการติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันจึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับเกษตรกรในการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อช่วยลดพื้นที่ในการติดตั้งระบบบำบัดและประหยัดพลังงานในการเคลื่อนมวลน้ำด้วยเครื่องสูบน้ำไปยังส่วนบำบัดต่างๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาการบำบัดไนโตรเจนด้วยปฏิกิริยาร่วมไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพที่บรรจุภายในถังปฏิกรณ์เดียว เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยวัสดุตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ วัสดุเส้นใยสังเคราะห์โพลีโพรพิลีนมีชื่อเรียกว่า “ไบโอคอร์ด” และหินพัมมิสบดขนาด 1-3 มม. งานวิจัยเริ่มจากทำการศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตของวัสดุตัวกลาง จากนั้นทำการบรรจุตัวกรองชีวภาพที่เหมาะสมลงในถังปฏิกรณ์ใบเดียวกัน เพื่อทำการศึกษาการบำบัดไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ และในการทดลองสุดท้ายจะนำถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันไปเชื่อมต่อเข้ากับถังเลี้ยงปลานิล เพื่อประเมินประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์ที่มีการพัฒนาขึ้นในการบำบัดน้ำเสียจริงที่เกิดขึ้นจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 ผลการศึกษาอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของวัสดุตัวกลาง 2 ชนิด ได้แก่ ไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด พบว่าไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบดมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงสุดเมื่อคิดเทียบกับปริมาตรบรรจุเท่ากับ 42.4 ± 0.8 และ 640 ± 387 ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน ตามลำดับ ส่วนหินพัมมิสบดมีอัตราการบำบัดไนเทรตเมื่อคิดเทียบกับปริมาตรบรรจุเท่ากับ 169.1 ± 8.8 ก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน จากนั้นนำอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชัน ดีไนทริฟิเคชัน และปริมาตรบรรจุมาวิเคราะห์และคำนวณเพื่อให้ได้สัดส่วนปริมาณตัวกรองชีวภาพที่เหมาะสมที่จะบรรจุลงในถังปฏิกรณ์เดียวกัน พบว่าในการทดลองต่อไปควรทำการบรรจุหินพัมมิสบดที่ก้นถังปฏิกรณ์เป็นชั้นหนา 5 ซม. และไบโอคอร์ดความยาว 1 ม. ซึ่งจะช่วยทำให้การบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันและการบำบัดไนเทรตด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ในอัตราใกล้เคียงกัน โดยมีการบำบัดทั้งสองกระบวนการภายในถังปฏิกรณ์เดียว

5.1.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาอัตรา

การบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตเมื่อนำมาบรรจุภายในถังปฏิกรณ์เดียว พบว่าถังปฏิกรณ์ที่บรรจุหินพัมมิสบดความหนา 5 ซม.เพียงอย่างเดียวสามารถบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตได้ โดยมีอัตราการบำบัดใกล้เคียงกับถังปฏิกรณ์ที่บรรจุไบโอคอร์ดร่วมกับหินพัมมิสบดในถังปฏิกรณ์ โดยจะต้องทำการทดลองในสภาวะที่มีการปิดฝาถังปฏิกรณ์ด้วยพลาสติก เพื่อป้องกันการแลกเปลี่ยนออกซิเจนจากอากาศ โดยสามารถทำการบำบัดเป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการบำบัดแอมโมเนียด้วยการทำงานของไนทริฟายอิงแบคทีเรียที่เกาะอยู่บริเวณด้านบนของชั้นหินพัมมิสผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน ในสภาวะที่มีการเปิดปั๊มเวียนน้ำเพื่อให้เกิดการไหลเวียนของน้ำและมีออกซิเจนในน้ำเพียงพอ และในขั้นตอนที่สองเป็นการบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไนทริฟิเคชันต่อ ด้วยการทำงานของดีไนทริฟายอิงแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในบริเวณรูพรุนของหินพัมมิสผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชันในสภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งในขั้นตอนนี้จะต้องปิดปั๊มเวียนน้ำและทำการเติมเมทานอลในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเทรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 นั่นคือหินพัมมิสบดที่บรรจุลงในถังปฏิกรณ์จะทำหน้าที่เป็นได้ทั้งตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันโดยทำให้เกิดการบำบัดได้ทั้งแอมโมเนียและไนเทรตภายในถังปฏิกรณ์เดียว โดยมีความเหมาะสมและเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้เพื่อบำบัดไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงปลานิลในการทดลองต่อไป

5.1.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันเมื่อนำมาติดตั้งเข้ากับถังเลี้ยงปลานิล เพื่อบำบัดไนโตรเจนจากน้ำเสียที่เกิดขึ้นจริงในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ เมื่อทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาประมาณ 4 เดือน พบว่าถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน–ดีไนทริฟิเคชันมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เพราะสามารถควบคุมปริมาณสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยสำหรับการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำได้ โดยสามารถบำบัดแอมโมเนียให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไนเทรตผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ โดยสามารถควบคุมให้แอมโมเนียและไนไทรต์มีความเข้มข้นต่ำกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. และสามารถบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นได้ต่อเนื่องด้วยกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน โดยสามารถควบคุมปริมาณไนเทรตให้มีความเข้มข้นต่ำกว่า 50 มก.ไนโตรเจน/ล.ได้ ในขณะที่ชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ และชุดควบคุมที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนียและไนไทรต์ให้มีความเข้มข้นต่ำกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล.ได้ แต่พบการสะสมไนเทรตในปริมาณสูงมากคือ 352.47±9.67 และ 145.31±21.88 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ โดยเป็นปริมาณไนเทรตที่สูงเกินกว่าค่ามาตรฐานสำหรับการเลี้ยงปลานิลและสัตว์น้ำ

ทั่วไป ซึ่งจะต้องมีไนเทรตไม่เกิน 50 มก.ไนโตรเจน/ล. นอกจากนี้ชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ยังพบตะกอนแขวนลอยปริมาณมากในถังเลี้ยงปลานิลคือ 955 มก./ล. เพราะไม่มีการนำตะกอนทิ้งออกจากระบบ ซึ่งปริมาณตะกอนแขวนลอยที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรเกิน 80 มก./ล. และตะกอนแขวนลอยปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อระบบการหายใจของสัตว์น้ำได้ ดังนั้นจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงทำให้ชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์และชุดควบคุมที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน ไม่มีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

การเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดด้วยการติดตั้งถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน - ดีไนทริฟิเคชันเข้ากับถังเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถช่วยควบคุมความเข้มข้นสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ให้อยู่ในปริมาณที่ปลอดภัยต่อสัตว์น้ำ แต่อย่างไรก็ตามยังต้องมีการศึกษาและทำการพัฒนาต่อเนื่องเพิ่มเติมเพื่อให้ถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยนี้ ได้แก่

5.2.1 เพื่อความปลอดภัยของสัตว์น้ำ ก่อนนำตัวกรองชีวภาพมาใช้ในการบำบัดไนโตรเจนจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรตรวจสอบให้แน่ใจก่อนว่า ตัวกรองชีวภาพที่ทำการบ่มเตรียมสภาพมาล่วงหน้าเพื่อให้เกิดความพร้อมของแบคทีเรีย สามารถทำการบำบัดแอมโมเนียและไนเทรตผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่มีการสะสมของไนไทรต์

5.2.2 ด้วยข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือวิจัย ในงานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้ค่าซีโอดีเป็นตัวบ่งชี้สารอินทรีย์และปริมาณเมทานอลที่คงเหลืออยู่ในน้ำ ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นการตรวจสอบในทางอ้อมและอาจได้ข้อมูลที่แตกต่างจากปริมาณเมทานอลที่คงเหลืออยู่จริง ดังนั้นหากสามารถตรวจวิเคราะห์ปริมาณเมทานอลที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำในปริมาณต่ำได้ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟฟี (Gas chromatography; GC) จะทำให้ข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

5.3.3 การควบคุมปริมาณออกซิเจนในถังปฏิกรณ์มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจน การนำถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน - ดีไนทริฟิเคชันไปใช้จริงในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอาจมีการปรับเปลี่ยนแนวทางเพื่อควบคุมปริมาณออกซิเจนในถัง เช่น การใช้เครื่องเติมอากาศ

เฉพาะในช่วงการบำบัดไนทริฟิเคชัน หรือใช้การเปิดฝาถังปฏิกรณ์เพื่อให้ออกซิเจนจากอากาศแพร่สู่น้ำในถังปฏิกรณ์ได้ เพื่อทำให้ไนทริฟายอิงแบคทีเรียสามารถทำงานได้ดีมากยิ่งขึ้น โดยไม่ต้องทำการเติมออกซิเจนด้วยหัวทรายพ่นอากาศเพิ่มลงไป ทำให้เป็นการช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและลดการใช้พลังงานในการเติมอากาศได้

5.3.4 ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมด้วยการนำวัสดุตัวกลางอื่นๆ มาบรรจุเป็นตัวกรองชีวภาพแทนหินพัมมิสบด เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน ความเหมาะสมในการนำมาใช้งาน และเป็นทางเลือกในการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

5.3.5 ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับประชากรจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ร่วมกันในตัวกรองชีวภาพด้วยเทคนิคทางด้านชีววิทยาระดับโมเลกุล เพื่อศึกษาความหลากหลายของการอยู่ร่วมกันของแบคทีเรียกลุ่มต่างๆ ได้แก่ แบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายอิง แบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟายอิง แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ หรือแบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ ที่อาศัยอยู่บริเวณชั้นหินพัมมิสและในรูพรุน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะช่วยอธิบายกลไกการบำบัดทางชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันได้อย่างถูกต้อง

5.3.6 ควรนำหินพัมมิสบดออกมาล้างทำความสะอาด เมื่อตรวจพบว่าการบำบัดแอมโมเนียหรือไนเทรตมีประสิทธิภาพลดลง เพื่อช่วยลดการสะสมของตะกอนที่ลอดผ่านใยกรองน้ำที่มาเกาะติดอยู่ที่ผิวของหินพัมมิส

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กชพร กฤติยานันต์. 2554. การพัฒนาระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กสำหรับการเลี้ยงปลาน้ำจืด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

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

ควบคุมมลพิษ, กรม. 2554. มาตรฐานน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://wqm.pcd.go.th/water/index.php/2010-04-12-07-30-00/2010-10-11-09-33-20/308-2011-05-20-06-32-11 [2556, สิงหาคม 1]

ความรู้การเกษตรเรื่องปลานิล [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.xn--12ca4dscc8ayd2f.com [2556, กันยายน 16]

คีรี กออนันตกุล และจุฬ สินชัยพานิช. 2551. การเลี้ยงปลานิลในประชัง. กรุงเทพมหานคร: สำนักพัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยีการประมง กรมประมง. อ้างถึงใน กชพร กฤติยานันต์. 2554. การพัฒนาระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กสำหรับการเลี้ยงปลาน้ำจืด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จำนง ถีราวุฒิ. 2553. พัมมิส มหัศจรรย์หินภูเขาไฟ [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.nicaonline.com/articles9/site/view_article.asp?idarticle=215 [2554, สิงหาคม 19]

ชนกันต์ จิตมนัส. 2556. โรคปลานิล. เชียงใหม่สัตวแพทยสาร 11(1): 75-86.

ชลธิชา พลายชุม. 2553. การบำบัดไนเทรตในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยถังดีไนทริฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชลอ ลิ้มสุวรรณ และพรเลิศ จันทร์รัชกูล. 2547. อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งในประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

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

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

ธนทร ศรีสุข. 2551. การบำบัดไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงปลานิลระบบปิดโดยตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชั่นแบบจม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

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

ธีระ เกรอต. 2539. วิศวกรรมน้ำเสีย: การบำบัดทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นิคม จึงอยู่สุข. 2540. หินอุตสาหกรรมกับการเกษตรแผนใหม่. เอกสารการประชุมเสนอผลงานทางวิชาการกองธรณีวิทยา (ธันวาคม): 8-19.

ปกฉัตร ชูติวิศุทธิ์. 2552. ประสิทธิภาพของระบบกรองแบบแบ่งส่วนในการแยกจุลสาหร่ายและอนุภาคสารแขวนลอยเพื่อควบคุมคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

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

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา. 2540. การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

มานพ ตั้งตรงไพโรจน์, ภาณุ เทวรัตน์มณีกุล, พรรณศรี จริโมภาส, สุจินต์ หนูขวัญ, กำชัย ลาวัณยวุฒิ, วีระ วัชรกรโยธิน และวิมล จันทรโรทัย. 2536. การพัฒนาการเพาะเลี้ยงปลานิล. เอกสารวิชาการฉบับที่ 23. สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด กรมประมง. 96 หน้า.

รุ่งนภา สุทธิศรี. 2549. ประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับการเลี้ยงกุ้งความหนาแน่นสูงในโรงเรือน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วรรัตน์ วณิชชานัย. 2552. ผลจากการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนต่อการเกิดตะกอนจุลินทรีย์และคุณภาพน้ำในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วันพระ นาคฤทธิ์. 2553. บทบาทของสาหร่ายช่อพริกไทยในการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิรัช จิ๋วแหยม. 2544. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคุณภาพน้ำและการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิลาสินี ไตรยราช. 2546. สภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดไนเตรตในน้ำทะเลด้วยระบบบำบัดไนเตรตแบบท่อสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิริวรรณ ศิลาภากุล. 2545. การกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้งโดยถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกที่มีการไหลวนแบบภายนอก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิวฤกษ์ หนูฤทธิ์. 2554. การพัฒนาหน่วยแยกตะกอนและผลของตะกอนต่อคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุบัณฑิต นิ่มรัตน์ และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย. 2552. การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างยั่งยืน: บทบาทของจุลินทรีย์และการประยุกต์ใช้. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อุดม เรืองนพคุณ. 2550. การเพาะพันธุ์และการเลี้ยงปลานิล. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: อักษรสยามการพิมพ์.

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

ภาษาอังกฤษ

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

Amal, M. N. A. and Zamri-Saad, M. 2011. Streptococcosis in Tilapia (*Oreochromis niloticus*): A Review. Pertanika J. Trop. Agric. Sci. 34(2): 195-206.

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.

Avnimelech, Y. 2006. Bio-filters: The need for an new comprehensive approach. Aquacultural Engineering 34: 172-178.

Bishop Water Technologies Inc. 2012. Biofilm for Wastewater Treatment [Online]. Available from: http://www.bishopwater.ca/userfiles/file/Biocord%20Brochure%20Website.pdf [2013, June 23]

Blancheton, J. P., Attramadal, K. J. K., Michaud, L., Roque d'Orbcastel, E. and Vadstein, O. 2013. Insight into bacterial population in aquaculture systems and its implication. Aquacultural Engineering 53: 30-39.

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

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

Camargo, J. A. and Alonso, A. 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.

Chang, Y. J. and Tseng, S. K. 1999. A novel double–membrane system for simultaneous nitrification and denitrification in a single tank. Letters in Applied Microbiology 28: 453-456.

Chen, S., Ling, J. and Blancheton, J. P. 2006. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. Aquacultural Engineering 34: 179-197.

Chu, L. and Wang, J. 2011. Nitrogen removal using biodegradable polymers as carbon source and biofilm carriers in a moving bed biofilm reactor. Chemical Engineering Journal 170: 220-225.

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

Crab, R., Defoirdt, T., Bossier, P. and Verstraete, W. 2012. Biofloc technology in aquaculture: Beneficial effects and future challenges. Aquaculture 356-357: 351-357.

De Schryver, P., Crab, R., Defoirdt, T., Boon, N. and Verstraete, W. 2008. The basics of bio - flocs technology: The added value for aquaculture. Aquaculture 277: 125 – 137.

El - Sayed, A-F. M. 2006. Tilapia Culture. UK: CABI Publishing.

Fenchel, T. and Blackburn, T. H. 1979. Bacteria and Mineral cycling. London: Academic press. อ้างถึงใน เอกชัย มาลาพล. 2551. การบำบัดไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้งโดยตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

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

Grommen, R., Hauteghem, I. V., Wembeke, M. V. and Verstraete, W. 2002. An improved nitrifying enrichment to remove ammonium and nitrite from freshwater aquaia systems. Aquaculture 211: 115-124.

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

Gutierrez-Wing, M. T. and Malone, R. F. 2006. Biological filters in aquaculture: Trends and research directions for freshwater and marine applications. Aquacultural Engineering 34: 163-171.

Hagopian, D. S. and Riley, J. G. 1998. A closer look at the bacteriology of nitrification. Aquacultural Engineering 18: 223–244.

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

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

Harwanto, D., Oh, S. Y. and Jo, J. Y. 2011. Comparison of the nitrification efficiencies of three biofilter media in a freshwater system. Fish Aquat Sci 14(4): 363-369.

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, Part C 151: 420-425.

Kaviraj, A., Bhunia, F., and Saha, N. C. 2004. Toxicity of Methanol to fish, Crustacean, Oligochaete Worm, and Aquatic Ecosystem. International Journal Toxicity 23(1): 55-63.

Kern, C. and Boopathy, R. 2012. Use of Sequencing Batch Reactor in the Treatment of Shrimp Aquaculture Wastewater. Journal of Water Sustainability 2(4): 221-232.

Kroupova, H., Machova, J. and Svobodova, Z. 2005. Nitrite influence on fish: a review. Vet. Med.-Czech 50(11): 461-471.

Li, B. and Irvin, S. 2007. The comparison of alkalinity and ORP as indicators for nitrification and denitrification in a sequencing batch reactor (SBR). Biochemical Engineering Journal 34: 248-255.

Ling, J. and Chen, S. 2005. Impact of organic carbon on nitrification performance of different biofilters. Aquacultural Engineering 33: 150-162.

Lucas, J. S. and Southgate, P. C. 2012. Aquaculture: Farming Aquatic Animals and Plants. 2nd ed. UK. Blackwell Publishing.

Matos, C. T., Sequeira, A. M., Velizarov, S., Crespo, J. G. and Reris, M. A. M. 2009. Nitrate removal in a closed marine system through the ion exchange membrane bioreactor. Journal of Hazardous Materials 166: 428-434.

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

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.

Mook, W. T., Chakrabarti, M. H., Aroua, M. K., Khan, G. M. A., Ali, B. S., Islam, M. S. and Abu Hassan, M. A. 2012. Removal of total ammonia nitrogen (TAN), nitrate and total organic carbon (TOC) from aquaculture wastewater using electrochemical technology: A review. Desalination 285: 1-13.

Philips, S., Laanbroek, H. J. and Verstraete, W. 2002. Origin, causes and effects of increased nitrite concentrations in aquatic environments. Re/Views in Environmental Science & Bio/Technology 1: 115–141.

Randall, D. J. and Tsui, T. K. N. 2002. Ammonia toxicity in fish. Marine Pollution Bulletin 45: 17-23.

Rezaee, A., Godini, H., Dehestani, S., Yazdanbakhsh, A. R., Mosavi, G. and Kazemnejad, A. 2008. Biological denitrification by *Pseudomonas stutzeri* immobilized on microbial cellulose. World J Microbiol Biotechnol 24: 2397–2402.

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

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

Schreier, H. J., Mirzoyan, N. and Saito, K. 2010. Microbial diversity of biological filters in recirculating aquaculture systerms. Current Opinion in Biotechnology 21: 318-325.

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: 2088-2094.

Srinu, N. S. and Pydi S. Y. 2011. Biological denitrification of wastewater in a fluidized bed bioreactor by immobilization of *Pseudomonas stutzeri* using polypropylene granules. International Journal of Biotechnology Applications 3(3): 106-109.

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

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.

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

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.

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

Warneke, S., Schipper, L. A., Matiasek, M. G., Scow, K. M., Cameron, S., Bruesewitz, D. A. and McDonald, I. R. 2011. Nitrate removal, communities of denitrifiers and adverse effects in different carbon substrates for use in denitrification beds. WATER RESEARCH 45: 5463-5475.

Zhu, S. and Chen, S. 2001. Effects of organic carbon on nitrification rate in fixed film biofilters. Aquacultural Engineering 25: 1-11.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ก.1 วิธีวิเคราะห์แอมโมเนีย (วิธีที่ 1)

การวิเคราะห์แอมโมเนียในน้ำ วิธีที่ 1 ใช้วิธีวิเคราะห์แอมโมเนียซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงมาจาก Strickland and Parsons (1972) โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 30 มล. จากนั้นทำการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C และเก็บใส่ขวดพลาสติก ควรทำการวิเคราะห์ทันทีหลังเก็บตัวอย่างน้ำ แต่ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรนำตัวอย่างน้ำแช่แข็งไว้ที่อุณหภูมิ -15 ^{o}ซ

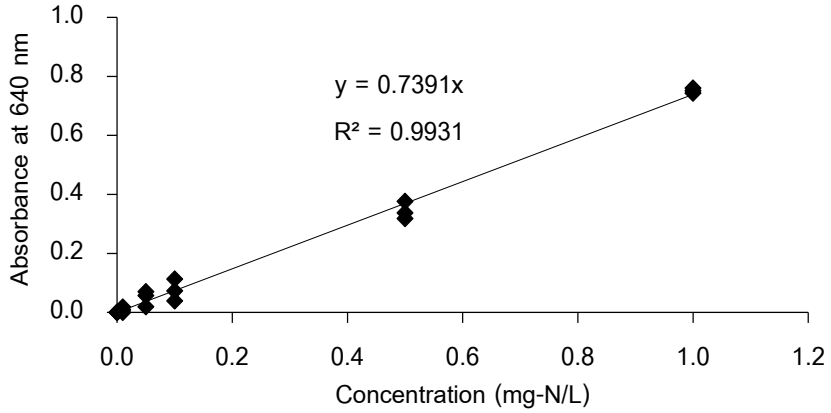
- การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายฟีนอล (Phenol solution) เตรียมโดยละลายฟีนอล 20 ก. ใน 95 เปอร์เซ็นต์ เอทิลแอลกอฮอล์ และปรับปริมาตรเป็น 200 มล.)
2. สารละลายโซเดียมไนโตรพลัสไซด์ (Sodium nitroprusside solution) เตรียมโดยละลายโซเดียมไนโตรพลัสไซด์ ($Na_2[Fe(CN)_5NO].2H_2O$) 1 ก. ในน้ำ D.I. และปรับปริมาตรเป็น 200 มล.
3. อัลคาไลน์รีเอเจนต์ (Alkaline reagent) เตรียมโดยละลายโซเดียมซิเตรต 100 ก. กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 ก. ในน้ำ D.I. และปรับปริมาตรเป็น 500 มล.
4. สารละลายโซเดียมไฮโปรคลอไรด์ (Sodium hypochlorite solution) ใช้สารละลายไฮโปรคลอไรด์ทางการค้าซึ่งมีความเข้มข้น 1.5 นอร์มอล
5. สารละลายออกซิไดซ์ซิงค์ (Oxidizing reagent) เตรียมโดยการผสมอัลคาไลน์รีเอเจนต์ กับสารละลายโซเดียมไฮโปรคลอไรด์ ในอัตราส่วน 4 ต่อ 1

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

ปิเปตตัวอย่างน้ำปริมาตร 5 มล. ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมสารละลายฟีนอลปริมาตร 0.2 มล. เติมสารละลายโซเดียมไนโตรพลัสไซด์ปริมาตร 0.2 มล. และเติมสารละลายออกซิไดซ์ซิงค์ปริมาตร 0.5 มล. จากนั้นเขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 1 ชม. หลังจากสารเคมีและตัวอย่างน้ำทำปฏิกิริยากันแล้วสีของสารละลายที่เกิดขึ้นจะคงอยู่ภายใน 24

ชม. สำหรับแบลงค์ (Blank) ใช้น้ำ D.I. ที่มีการใส่สารเคมีเหมือนกับตัวอย่างน้ำ จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร และทำการเตรียมสารละลายแอมโมเนียมาตรฐาน (Standard ammonia solution) ที่ความเข้มข้น 0.01 0.05 0.1 0.5 และ 1.0 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากสารละลายสต็อกแอมโมเนีย (Stock ammonia solution) ความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้กราฟมาตรฐานแสดงดังรูปที่ ก-1



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานแอมโมเนีย

ก.2 วิธีวิเคราะห์แอมโมเนีย (วิธีที่ 2)

การวิเคราะห์แอมโมเนียในน้ำ วิธีที่ 2 ใช้วิธีวิเคราะห์แอมโมเนียซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีของ Bower และ Holm - Hansen (1980) โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 30 มล. จากนั้นทำการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C และเก็บใส่ขวดพลาสติก ควรทำการวิเคราะห์ทันทีหลังเก็บตัวอย่างน้ำ แต่ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรนำตัวอย่างน้ำแช่แข็งไว้ที่อุณหภูมิ -15 °ซ

- การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายซาลิไซเลตคะตะลิสต์ (Salicylate – catalyst solution) เตรียมโดยละลายโซเดียมซาลิไซเลต 440 ก. กับโซเดียมไนโตรพลัสไซด์ 0.28 ก. ในน้ำ D.I. และปรับปริมาตรเป็น 1 ล.

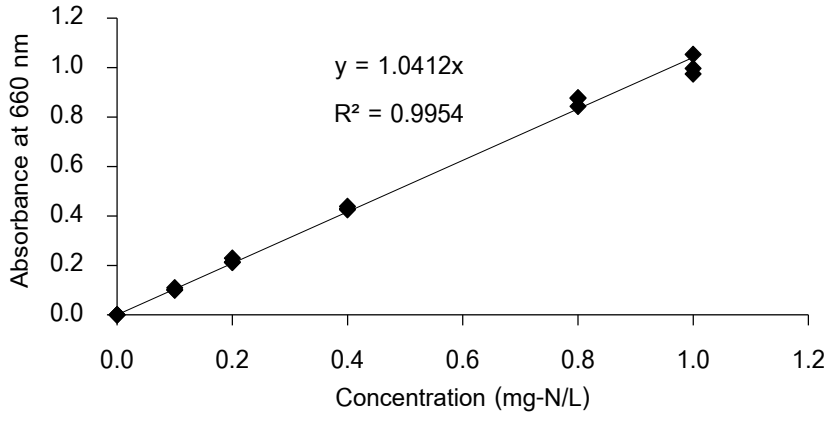
2. สารละลายอัลคาไลน์ซิเทรต (Alkaline – citrate solution) เตรียมโดยละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18.5 ก. กับโซเดียมซิเตรต 100 ก. ในน้ำ D.I. และปรับปริมาตรเป็น 1 ล.

3. สารละลายโซเดียมไฮโปรคลอไรด์ (Sodium hypochlorite solution) ใช้สารละลายไฮโปรคลอไรด์ทางการค้าซึ่งมีความเข้มข้น 1.5 นอร์มอล

4. สารละลายอัลคาไลน์ไฮโปรคลอไรด์ (Alkaline - hypochlorite solution) เตรียมโดยการผสมสารละลายโซเดียมไฮโปรคลอไรด์กับสารละลายอัลคาไลน์ซิเทรต ในอัตราส่วน 1 ต่อ 9

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

ปิเปตตัวอย่างน้ำปริมาตร 5 มล. ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมสารละลายซาลิไซเลตคะตะลิสต์ ปริมาตร 0.6 มล. และเติมสารละลายอัลคาไลน์ไฮโปรคลอไรด์ปริมาตร 1.0 มล. จากนั้นเขย่าให้เข้ากัน นำไปเก็บไว้ในที่มืด และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 1 ชม. หรือไม่เกิน 3 ชม. สำหรับแบลงค์ (Blank) ใช้น้ำ D.I. ที่มีการใส่สารเคมีเหมือนกับตัวอย่างน้ำ จากนั้นนำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 640 หรือ 660 นาโนเมตร สำหรับตัวอย่างเป็นน้ำเค็มและน้ำจืด ตามลำดับ และทำการเตรียมสารละลายแอมโมเนียมาตรฐาน (Standard ammonia solution) ที่ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.4 0.8 และ 1.0 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากสารละลายสต็อกแอมโมเนีย (Stock ammonia solution) ความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้กราฟมาตรฐานแสดงดังรูปที่ ก-2



รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานแอมโมเนีย

ก.3 วิธีวิเคราะห์ไนไทรต์

การวิเคราะห์ไนไทรต์ในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์ไนไทรต์ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงมาจาก Strickland and Parsons (1972) โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 30 มล. จากนั้น

ทำการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C และเก็บใส่ขวดพลาสติก ควรทำการวิเคราะห์ทันทีหลังเก็บตัวอย่างน้ำ แต่ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรนำตัวอย่างน้ำแช่แข็งไว้ที่อุณหภูมิ -15 °ซ

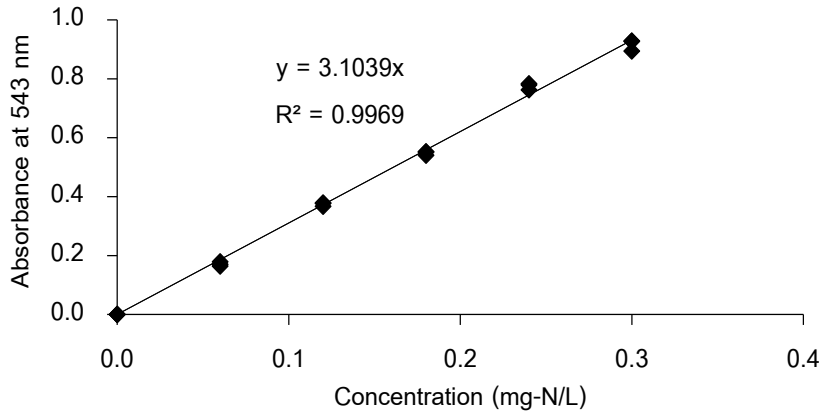
- การเตรียมสารเคมี

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

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

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

ปิเปตตัวอย่างน้ำปริมาตร 5 มล. ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมสารละลายซัลฟานิลาไมด์ปริมาตร 0.1 มล. เขย่าให้เข้ากันและทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 2 นาที แต่ไม่เกิน 10 นาที จากนั้นเติมสารละลายเอ็นเอ็นอีดีปริมาตร 0.1 มล. เขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 30 นาที หรือไม่เกิน 2 ชม. สำหรับแบลงค์ (Blank) ใช้น้ำ D.I. ที่มีการใส่สารเคมีเหมือนกับตัวอย่างน้ำ จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 543 นาโนเมตร ตามลำดับ และทำการเตรียมสารละลายไนไทรต์มาตรฐาน (Standard nitrite solution) ที่ความเข้มข้น 0.06 0.12 0.18 0.24 และ 0.30 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากสารละลายสต็อกไนไทรต์ (Stock nitrite solution) ความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้กราฟมาตรฐานแสดงดังรูปที่ ก-3

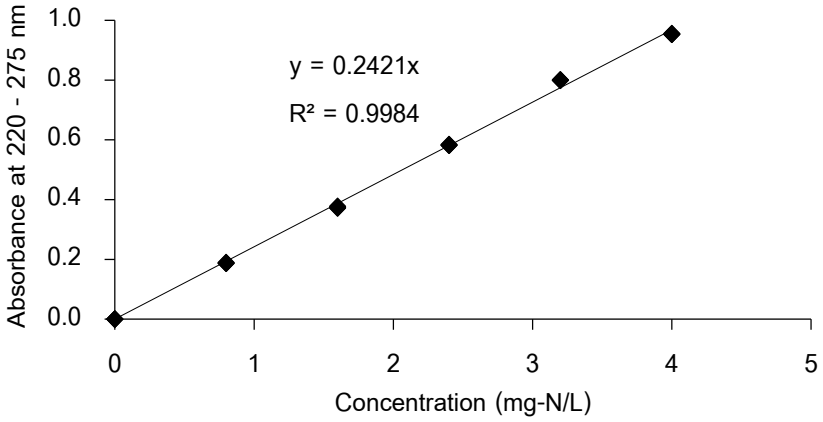


รูปที่ ก-3 กราฟมาตรฐานไนไทรต์

ก.4 วิธีวิเคราะห์ไนเทรต

การวิเคราะห์ไนเทรตในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์ไนเทรตด้วยวิธีวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงมาจาก Standard Method (2005) โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 30 มล. จากนั้นทำการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C และเก็บใส่ขวดพลาสติก ควรทำการวิเคราะห์ทันทีหลังเก็บตัวอย่างน้ำ แต่ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรนำตัวอย่างน้ำแช่แข็งไว้ที่อุณหภูมิ -15 °ซ

การวิเคราะห์ไนเทรตในน้ำทำโดยนำตัวอย่างน้ำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 220 และ 275 นาโนเมตร สำหรับแบลงค์ (Blank) ใช้น้ำ D.I. ที่ไม่มีการเติมสารเคมีลงไป จากนั้นนำผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงทั้งสองค่าไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณไนเทรต ซึ่งค่าไนเทรตที่คำนวณได้ต้องนำไปลบด้วยปริมาณไนไทรต์ที่วิเคราะห์จากตัวอย่างน้ำเดียวกัน เนื่องจากการวิเคราะห์ไนเทรตด้วยวิธีนี้จะมีปริมาณไนไทรต์รวมอยู่ด้วย และทำการเตรียมสารละลายไนเทรตมาตรฐาน (Standard nitrate solution) ที่ความเข้มข้น 0.8 1.6 2.4 3.2 และ 4.0 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากสารละลายสต็อกไนเทรต (Stock nitrate solution) ความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้กราฟมาตรฐานแสดงดังรูปที่ ก-4



รูปที่ ก-4 กราฟมาตรฐานไนเทรต

ก.5 วิธีวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมด

การวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำซึ่งดัดแปลงมาจาก Grassholf และคณะ (1999)

- การเตรียมสารเคมี

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

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

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

ปิเปตตัวอย่างน้ำ (ทั้งที่กรองและไม่ได้กรอง) ปริมาตร 5 มล. ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมสารละลายออกซิไดซ์ปริมาตร 2.5 มล. เขย่าให้เข้ากัน และนำตัวอย่างไปย่อยด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) (121 ^{o}ซ, 15 ปอนด์/ตร.นิ้ว) เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วเติมสารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ปริมาตร 0.5 มล. เขย่าให้เข้ากันและนำไปปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) 15 นาที และนำส่วนที่เป็นน้ำใสไปวิเคราะห์หาปริมาณไนเทรตด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ด้วยวิธีการเดียวกับในภาคผนวกหัวข้อ ก.4 ซึ่งตัวอย่างน้ำที่ไม่กรองจะเป็นตัวแทนของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและตัวอย่างน้ำที่กรองจะเป็นตัวแทนของปริมาณไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมด สำหรับแบลงค์ (Blank) ใช้น้ำ D.I. และสารละลายไนเทรตมาตรฐาน (Standard nitrite solution) เตรียมที่ความเข้มข้น 2 4 6 8 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากสารละลายสต็อกไนเทรต (Stock nitrate solution) ความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ทำการเติมสารเคมีและทำการวิเคราะห์ตามขั้นตอนเหมือนกับตัวอย่างน้ำ

ก.6 วิธีวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ

การวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงมาจาก Standard Method (2005) โดยนำกระดาษกรอง GF/C ขนาด 47 มม. มาอบและชั่งน้ำหนักจนคงที่ จากนั้นนำตัวอย่างน้ำมากรองผ่านกระดาษกรองแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 - 105 ^{o}ซ เป็นเวลา 24 ชม. นำกระดาษกรองออกจากตู้อบและนำมาใส่ไว้ในโถดูดความชื้นจนกระดาษกรองเย็นลงแล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่งจนน้ำหนักคงที่ เพื่อนำน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมาคำนวณหาปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำดังสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ตะกอนแขวนลอยทั้งหมด} = \frac{\left(\text{นน.กระดาษกรองหลังกรองน้ำ} - \text{นน.กระดาษกรองก่อนกรองน้ำ}\right) x\ 10^6}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำที่กรอง (มล.)}}$$

ก.7 วิธีวิเคราะห์ซีโอดี

การวิเคราะห์ซีโอดีในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงมาจาก Standard Method (2005) โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 30 มล. ควรทำการวิเคราะห์ทันที ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc.H_2SO_4) แล้วนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 ^{o}ซ

- การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต (Standard Potassium Dichromate Solution) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล เตรียมโดยละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 4.913 ก. (ซึ่งถูกทำให้แห้งด้วยการอบ 103 ^{o}ซ เป็นเวลา 2 ชม.) ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มล. เติมกรดซัลฟิวริก 167 มล. และเติมเมอร์คิวริคซัลเฟต ($HgSO_4$) 33.3 ก. คนให้ละลายและตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วจึงทำการปรับปริมาตรให้เป็น 1 ล.

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

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

$$\text{ความเข้มข้นของ FAS} = \frac{\text{มล.}\ K_2Cr_2O_7\ x\ 0.1}{\text{มล.}\ FAS\ \text{ที่ใช้}}$$

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

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

ปิเปตตัวอย่างน้ำ 5 มล. ลงในหลอดย่อยสลาย (Digestion Tubes) ขนาด 20 x 150 มม. เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตปริมาตร 3 มล. เติมกรดซัลฟิวริกและซิลเวอร์ซัลเฟต 7 มล. ปิดฝาจุกหลอดย่อยสลายให้แน่นพอดี แกว่งหลอดเพื่อให้สารละลายผสมเข้ากันอย่างทั่วถึง นำไปเข้าตู้อบ ที่อุณหภูมิ 150 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็น ทำการเปิดฝาจุกและเติมเฟอโรอิน 2–3 หยด แล้วนำไปไทเทรตด้วย 0.1 นอร์มอล เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต จุดยุติจะเปลี่ยนอย่างรวดเร็วจากสีฟ้าอมเขียวเป็นน้ำตาลแดง สำหรับแบลงค์ใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างน้ำ และทำทุกขั้นตอนเหมือนตัวอย่างน้ำ จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณหาปริมาซีโอดีด้วยสมการต่อไปนี้

$$\text{ซีโอดี (มก./ล.)} = \frac{(A-B)x\ N\ x\ 8{,}000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ}}$$

เมื่อ A = ปริมาตรของสารละลายเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตแบลงค์ (มล.)

B = ปริมาตรของสารละลายเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำ (มล.)

N = นอร์มัลลิตี้ของสารละลายเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต

ภาคผนวก ข

ข้อมูลคุณภาพน้ำที่ทำการตรวจวัดในการทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาและตรวจวัดอัตราการบำบัดไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ

ตารางที่ ข-1 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตในระหว่างการเตรียมและปรับสภาพตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
14/5/2554 19:00 น.	0.00	14.39	0.44	0.02	0.00	4.27	0.05
15/5/2554 9:45 น.	0.61	12.02	1.62	0.16	0.00	4.25	0.08
16/5/2554 10:00 น.	1.63	11.53	0.42	0.32	0.01	4.06	0.10
17/5/2554 12:00 น.	2.71	9.20	0.13	0.94	0.03	4.29	0.07
18/5/2554 9:40 น.	3.61	8.17	0.20	1.57	0.12	4.53	0.22
19/5/2554 11:30 น.	4.69	4.60	1.58	3.75	0.01	10.07	0.34
20/5/2554 10:00 น.	5.63	0.41	0.04	8.37	0.35	12.24	0.38
21/5/2554 14:00 น.	6.79	0.00	0.00	7.69	0.53	16.75	0.59
22/5/2554 16:00 น.	7.88	0.00	0.00	4.18	0.11	20.24	0.34
23/5/2554 9:00 น.	8.58	0.00	0.00	0.25	0.00	26.88	0.69
24/5/2554 15:50 น.	9.87	16.49	2.29	0.35	0.01	24.25	0.67
25/5/2554 15:00 น.	10.83	0.18	0.03	7.90	0.59	31.55	0.16
26/5/2554 15:00 น.	11.83	0.11	0.02	0.01	0.00	38.16	0.30
27/5/2554 14:00 น.	12.79	0.08	0.03	0.01	0.00	41.58	1.14
28/5/2554 9:40 น.	13.61	0.06	0.02	0.01	0.00	42.34	0.63
29/5/2554 15:30 น.	14.85	0.00	0.00	0.02	0.00	44.39	1.03
30/5/2554 16:45 น.	15.91	15.76	0.90	0.51	0.03	42.77	0.66
31/5/2554 11:40 น.	16.69	0.02	0.00	6.98	0.26	49.21	2.04
1/6/2554 11:00 น.	17.67	0.01	0.01	0.01	0.00	59.98	1.73
2/6/2554 10:20 น.	18.64	0.00	0.00	0.00	0.00	63.02	2.13
3/6/2554 16:00 น.	19.88	12.71	1.88	0.93	0.01	59.91	0.55
4/6/2554 16:00 น.	20.88	0.00	0.00	0.04	0.00	72.76	1.13
5/6/2554 16:00 น.	21.88	0.00	0.00	0.02	0.00	76.24	2.13
6/6/2554 16:00 น.	22.88	0.00	0.00	0.01	0.00	78.66	0.81
7/6/2554 18:00 น.	23.96	13.87	2.37	0.36	0.01	70.17	3.80
8/6/2554 13:00 น.	24.75	0.00	0.00	0.16	0.01	91.30	2.66
9/6/2554 12:00 น.	25.71	13.97	1.03	0.02	0.00	98.56	1.76
10/6/2554 11:40 น.	26.69	0.11	0.01	0.14	0.00	97.53	0.91
11/6/2554 10:45 น.	27.66	0.00	0.00	0.00	0.00	111.26	3.24
12/6/2554 12:45 น.	28.74	15.35	2.19	0.01	0.00	117.37	0.56
13/6/2554 14:30 น.	29.81	3.97	0.68	0.13	0.00	124.93	4.25
14/6/2554 14:00 น.	30.79	13.86	0.63	0.12	0.01	136.42	1.13
15/6/2554 9:00 น.	31.58	0.04	0.01	0.03	0.00	157.64	0.71
16/6/2554 16:30 น.	32.90	0.02	0.02	0.01	0.00	172.10	5.24
17/6/2554 16:40 น.	33.90	16.98	1.45	0.14	0.01	181.09	10.90
18/6/2554 13:00 น.	34.75	0.02	0.01	0.02	0.00	156.59	9.09

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
19/6/2554 11:15 น.	35.68	0.01	0.01	0.00	0.00	165.61	4.98
20/6/2554 18:50 น.	36.99	15.51	2.02	0.37	0.02	213.89	12.42
21/6/2554 17:30 น.	37.94	0.14	0.05	0.06	0.00	225.12	9.45
22/6/2554 16:30 น.	38.90	0.00	0.00	0.04	0.00	228.12	5.87
23/6/2554 16:30 น.	39.90	14.96	1.59	0.06	0.00	248.55	1.82
24/6/2554 13:00 น.	40.75	0.03	0.05	0.95	0.04	349.52	3.89
25/6/2554 14:00 น.	41.79	15.89	0.93	0.01	0.00	314.73	12.05
26/6/2554 10:00 น.	42.63	6.90	0.33	0.35	0.02	344.90	11.47
27/6/2554 14:15 น.	43.80	14.72	0.53	0.67	0.01	377.41	13.56
28/6/2554 17:30 น.	44.94	0.00	0.00	0.01	0.00	382.56	10.84
29/6/2554 16:00 น.	45.88	0.00	0.00	0.00	0.00	417.26	8.71

ตารางที่ ข-2 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตในการทดสอบประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพชีวภาพไบโอคอร์ด

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/06/2554 11:45 น.	0.00	0.99	0.04	0.05	0.01	10.09	0.99
5/06/2554 12:45 น.	0.04	0.86	0.05	0.09	0.01	11.06	0.98
5/06/2554 13:45 น.	0.08	0.57	0.08	0.15	0.02	10.53	1.61
5/06/2554 14:45 น.	0.13	0.40	0.05	0.23	0.05	10.32	1.04
5/06/2554 15:45 น.	0.17	0.29	0.06	0.26	0.08	10.56	1.45
5/06/2554 16:45 น.	0.21	0.23	0.08	0.22	0.03	10.42	1.87
5/06/2554 17:45 น.	0.25	0.11	0.06	0.17	0.02	10.82	1.12
5/06/2554 18:45 น.	0.29	0.03	0.04	0.11	0.04	10.91	1.09

ตารางที่ ข-3 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตในการทดสอบประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพหินพัมมิสบด

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5/06/2554 11:45 น.	0.00	1.10	0.07	0.05	0.00	10.76	0.55
5/06/2554 12:45 น.	0.04	0.94	0.06	0.13	0.01	14.95	0.89
5/06/2554 13:45 น.	0.08	0.64	0.06	0.20	0.00	16.20	0.66
5/06/2554 14:45 น.	0.13	0.41	0.03	0.25	0.00	17.54	1.06
5/06/2554 15:45 น.	0.17	0.18	0.04	0.23	0.02	17.85	0.85
5/06/2554 16:45 น.	0.21	0.09	0.04	0.15	0.02	18.24	1.14
5/06/2554 17:45 น.	0.25	0.02	0.01	0.06	0.02	16.84	1.72

ตารางที่ ข-4 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตของชุดควบคุม (ไม่บรรจุตัวกรองชีวภาพ) จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
9/01/2555 9:40 น.	0.00	0.95	0.04	0.01	0.00	0.36	0.16
9/01/2555 10:40 น.	0.04	0.95	0.06	0.01	0.00	0.25	0.05
9/01/2555 11:40 น.	0.08	0.94	0.07	0.01	0.00	0.28	0.09
9/01/2555 12:40 น.	0.13	0.87	0.19	0.01	0.00	0.38	0.04
9/01/2555 13:40 น.	0.17	0.96	0.03	0.01	0.00	0.39	1.24
9/01/2555 14:40 น.	0.21	0.99	0.04	0.01	0.00	0.39	0.04
9/01/2555 15:40 น.	0.25	0.93	0.08	0.01	0.00	0.21	0.08
9/01/2555 16:40 น.	0.29	0.94	0.01	0.01	0.00	0.25	0.06
9/01/2555 17:40 น.	0.33	0.87	0.06	0.01	0.00	0.20	0.09
9/01/2555 18:40 น.	0.38	0.94	0.04	0.01	0.00	0.23	0.06
9/01/2555 19:40 น.	0.42	0.98	0.01	0.01	0.00	0.25	0.05
9/01/2555 20:40 น.	0.46	0.96	0.03	0.01	0.00	0.34	0.16
9/01/2555 21:40 น.	0.50	0.93	0.05	0.01	0.00	0.25	0.02
9/01/2555 22:40 น.	0.54	0.86	0.15	0.01	0.00	0.24	0.05
9/01/2555 23:40 น.	0.58	0.91	0.02	0.01	0.00	0.24	0.05
10/01/2555 0:40 น.	0.63	0.89	0.02	0.01	0.00	0.26	0.06
10/01/2555 1:40 น.	0.67	0.87	0.04	0.01	0.00	0.30	0.06
10/01/2555 8:25 น.	0.95	0.85	0.05	0.00	0.00	0.09	0.02
10/01/2555 9:25 น.	0.99	0.90	0.02	0.00	0.00	0.13	0.07
10/01/2555 10:25 น.	1.03	0.92	0.00	0.01	0.01	0.13	0.06
10/01/2555 11:25 น.	1.07	0.91	0.03	0.00	0.00	0.12	0.11
10/01/2555 12:25 น.	1.11	0.92	0.02	0.00	0.00	0.15	0.05
10/01/2555 13:25 น.	1.16	0.92	0.02	0.00	0.00	0.09	0.06
10/01/2555 14:25 น.	1.20	0.89	0.04	0.00	0.00	0.11	0.04
10/01/2555 15:25 น.	1.24	0.86	0.03	0.00	0.00	0.15	0.06
10/01/2555 16:25 น.	1.28	0.83	0.01	0.00	0.00	0.15	0.04
10/01/2555 17:25 น.	1.32	0.81	0.03	0.00	0.00	0.12	0.04
10/01/2555 18:25 น.	1.36	0.85	0.01	0.00	0.00	0.22	0.04
10/01/2555 19:25 น.	1.41	0.86	0.01	0.01	0.00	0.14	0.03
10/01/2555 20:25 น.	1.45	0.82	0.03	0.00	0.00	0.15	0.04
10/01/2555 21:25 น.	1.49	0.85	0.01	0.00	0.00	0.17	0.04
10/01/2555 22:25 น.	1.53	0.80	0.07	0.01	0.00	0.17	0.16
10/01/2555 23:25 น.	1.57	0.73	0.15	0.00	0.00	0.13	0.04
11/01/2555 0:25 น.	1.61	0.82	0.04	0.00	0.00	0.17	0.06
11/01/2555 8:10 น.	1.94	0.79	0.03	0.00	0.00	0.25	0.06
11/01/2555 9:10 น.	1.98	0.85	0.05	0.01	0.00	0.17	0.05
11/01/2555 10:10 น.	2.02	0.84	0.04	0.01	0.00	0.22	0.08
11/01/2555 11:10 น.	2.06	0.85	0.07	0.01	0.00	0.25	0.07
11/01/2555 12:10 น.	2.10	0.88	0.06	0.01	0.00	0.18	0.02
11/01/2555 13:10 น.	2.15	0.89	0.05	0.00	0.00	0.20	0.04
11/01/2555 14:10 น.	2.19	0.79	0.12	0.01	0.00	0.19	0.03
11/01/2555 15:10 น.	2.23	0.90	0.02	0.01	0.00	0.20	0.01
11/01/2555 16:10 น.	2.27	0.82	0.01	0.00	0.00	0.19	0.05
11/01/2555 17:10 น.	2.31	0.83	0.03	0.01	0.00	0.20	0.05
11/01/2555 18:10 น.	2.35	0.81	0.07	0.00	0.00	0.20	0.04

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
11/01/2555 19:10 น.	2.40	0.84	0.02	0.00	0.00	0.17	0.04
11/01/2555 20:10 น.	2.44	0.85	0.08	0.00	0.00	0.14	0.04
11/01/2555 21:10 น.	2.48	0.83	0.03	0.00	0.00	0.19	0.02
11/01/2555 22:10 น.	2.52	0.84	0.02	0.00	0.00	0.18	0.02
11/01/2555 23:10 น.	2.56	0.80	0.02	0.00	0.00	0.19	0.05
12/01/2555 0:10 น.	2.60	0.85	0.01	0.00	0.00	0.17	0.04

ตารางที่ ข-5 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตของชุดทดลอง (บรรจุตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด) จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
9/01/2555 9:40 น.	0.00	0.86	0.05	0.08	0.04	44.11	30.74
9/01/2555 10:40 น.	0.04	0.84	0.06	0.19	0.06	62.27	6.13
9/01/2555 11:40 น.	0.08	0.74	0.02	0.26	0.03	60.09	8.41
9/01/2555 12:40 น.	0.13	0.67	0.02	0.31	0.04	62.18	7.04
9/01/2555 13:40 น.	0.17	0.56	0.08	0.37	0.08	52.91	12.19
9/01/2555 14:40 น.	0.21	0.57	0.03	0.49	0.09	60.98	9.97
9/01/2555 15:40 น.	0.25	0.44	0.08	0.45	0.11	56.10	9.74
9/01/2555 16:40 น.	0.29	0.38	0.06	0.52	0.10	57.17	9.08
9/01/2555 17:40 น.	0.33	0.34	0.03	0.54	0.11	55.57	2.95
9/01/2555 18:40 น.	0.38	0.32	0.03	0.61	0.02	59.30	7.94
9/01/2555 19:40 น.	0.42	0.26	0.02	0.60	0.19	52.91	14.28
9/01/2555 20:40 น.	0.46	0.23	0.04	0.74	0.02	62.60	5.92
9/01/2555 21:40 น.	0.50	0.19	0.04	0.77	0.02	62.15	5.23
9/01/2555 22:40 น.	0.54	0.15	0.03	0.77	0.05	62.73	2.73
9/01/2555 23:40 น.	0.58	0.16	0.04	0.80	0.07	62.23	5.38
10/01/2555 0:40 น.	0.63	0.14	0.02	0.85	0.09	61.96	5.64
10/01/2555 1:40 น.	0.67	0.11	0.01	0.64	0.35	46.90	27.13
10/01/2555 8:25 น.	0.95	0.83	0.06	0.05	0.03	2.95	1.70
10/01/2555 9:25 น.	0.99	0.74	0.05	0.15	0.03	4.05	1.55
10/01/2555 10:25 น.	1.03	0.63	0.04	0.21	0.02	2.67	0.87
10/01/2555 11:25 น.	1.07	0.53	0.02	0.29	0.02	2.57	0.82
10/01/2555 12:25 น.	1.11	0.43	0.04	0.34	0.04	2.49	0.97
10/01/2555 13:25 น.	1.16	0.34	0.04	0.36	0.08	2.24	0.20
10/01/2555 14:25 น.	1.20	0.29	0.04	0.41	0.05	2.48	0.37
10/01/2555 15:25 น.	1.24	0.23	0.04	0.48	0.00	2.64	0.77
10/01/2555 16:25 น.	1.28	0.16	0.02	0.48	0.04	2.52	0.81
10/01/2555 17:25 น.	1.32	0.12	0.02	0.52	0.01	2.66	0.75
10/01/2555 18:25 น.	1.36	0.09	0.03	0.53	0.02	2.64	0.72
10/01/2555 19:25 น.	1.41	0.06	0.03	0.55	0.01	2.64	0.67
10/01/2555 20:25 น.	1.45	0.03	0.02	0.55	0.02	2.62	0.79
10/01/2555 21:25 น.	1.49	0.02	0.01	0.50	0.12	2.39	1.06
10/01/2555 22:25 น.	1.53	0.02	0.02	0.54	0.06	2.56	0.87
10/01/2555 23:25 น.	1.57	0.03	0.02	0.50	0.05	2.52	0.85
11/01/2555 0:25 น.	1.61	0.04	0.02	0.51	0.06	2.59	0.84

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
11/01/2555 8:10 น.	1.94	0.85	0.07	0.04	0.00	0.36	0.06
11/01/2555 9:10 น.	1.98	0.80	0.01	0.09	0.03	0.26	0.06
11/01/2555 10:10 น.	2.02	0.68	0.02	0.19	0.03	0.32	0.02
11/01/2555 11:10 น.	2.06	0.63	0.00	0.25	0.02	0.34	0.05
11/01/2555 12:10 น.	2.10	0.56	0.00	0.32	0.02	0.29	0.01
11/01/2555 13:10 น.	2.15	0.49	0.02	0.37	0.02	0.32	0.06
11/01/2555 14:10 น.	2.19	0.42	0.02	0.41	0.03	0.36	0.03
11/01/2555 15:10 น.	2.23	0.34	0.00	0.43	0.05	0.32	0.02
11/01/2555 16:10 น.	2.27	0.31	0.01	0.51	0.02	0.46	0.08
11/01/2555 17:10 น.	2.31	0.25	0.02	0.54	0.01	0.38	0.05
11/01/2555 18:10 น.	2.35	0.21	0.01	0.52	0.10	0.31	0.02
11/01/2555 19:10 น.	2.40	0.17	0.02	0.60	0.02	0.33	0.04
11/01/2555 20:10 น.	2.44	0.14	0.01	0.62	0.03	0.37	0.04
11/01/2555 21:10 น.	2.48	0.11	0.01	0.63	0.02	0.36	0.03
11/01/2555 22:10 น.	2.52	0.10	0.00	0.61	0.03	0.41	0.06
11/01/2555 23:10 น.	2.56	0.10	0.01	0.62	0.03	0.44	0.06
12/01/2555 0:10 น.	2.60	0.09	0.01	0.65	0.01	0.38	0.04

ตารางที่ ข-6 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตของชุดทดลอง (บรรจุตัวกรองชีวภาพหินพัมมิสบด) จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
9/01/2555 9:40 น.	0.00	0.81	0.02	0.11	0.04	138.29	19.92
9/01/2555 10:10 น.	0.02	0.69	0.03	0.19	0.00	222.07	19.09
9/01/2555 10:40 น.	0.04	0.56	0.03	0.29	0.01	258.88	17.81
9/01/2555 11:10 น.	0.06	0.47	0.01	0.36	0.00	278.61	18.55
9/01/2555 11:40 น.	0.08	0.38	0.02	0.43	0.04	290.57	30.86
9/01/2555 12:10 น.	0.10	0.29	0.02	0.49	0.03	297.39	21.15
9/01/2555 12:40 น.	0.13	0.30	0.10	0.47	0.12	282.65	46.84
9/01/2555 13:40 น.	0.17	0.15	0.01	0.60	0.03	324.64	13.45
9/01/2555 14:40 น.	0.21	0.13	0.00	0.52	0.14	284.70	78.70
9/01/2555 15:40 น.	0.25	0.11	0.01	0.57	0.04	322.68	9.60
9/01/2555 16:40 น.	0.29	0.06	0.02	0.54	0.01	324.70	15.54
9/01/2555 17:40 น.	0.33	0.05	0.02	0.50	0.07	292.30	49.26
9/01/2555 18:40 น.	0.38	0.05	0.01	0.50	0.01	330.48	9.13
9/01/2555 19:40 น.	0.42	0.05	0.02	0.39	0.13	272.83	102.89
9/01/2555 20:40 น.	0.46	0.06	0.01	0.48	0.02	335.92	10.74
9/01/2555 21:40 น.	0.50	0.04	0.02	0.43	0.02	334.52	2.29
9/01/2555 22:40 น.	0.54	0.05	0.02	0.40	0.01	327.74	6.64
9/01/2555 23:40 น.	0.58	0.06	0.01	0.28	0.13	259.18	121.92
10/01/2555 0:40 น.	0.63	0.06	0.01	0.36	0.00	339.82	10.59
10/01/2555 1:40 น.	0.67	0.06	0.01	0.33	0.03	322.36	9.00
10/01/2555 8:25 น.	0.95	0.76	0.07	0.03	0.00	17.42	6.21
10/01/2555 8:55 น.	0.97	0.48	0.03	0.14	0.01	41.58	1.86
10/01/2555 9:25 น.	0.99	0.32	0.05	0.24	0.03	45.75	4.42
10/01/2555 9:55 น.	1.01	0.24	0.04	0.35	0.01	49.60	1.48
10/01/2555 10:25 น.	1.03	0.17	0.03	0.45	0.04	51.47	0.69

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
10/01/2555 10:55 น.	1.05	0.11	0.03	0.48	0.02	53.41	0.82
10/01/2555 11:25 น.	1.07	0.08	0.03	0.51	0.02	53.61	1.77
10/01/2555 12:25 น.	1.11	0.05	0.01	0.54	0.03	55.01	0.04
10/01/2555 13:25 น.	1.16	0.06	0.02	0.53	0.03	52.77	2.16
10/01/2555 14:25 น.	1.20	0.06	0.02	0.51	0.05	52.22	6.59
10/01/2555 15:25 น.	1.24	0.04	0.02	0.52	0.03	54.15	0.74
10/01/2555 16:25 น.	1.28	0.05	0.02	0.50	0.01	53.85	1.86
10/01/2555 17:25 น.	1.32	0.04	0.03	0.49	0.01	54.63	1.73
10/01/2555 18:25 น.	1.36	0.04	0.04	0.41	0.07	51.52	5.38
10/01/2555 19:25 น.	1.41	0.04	0.03	0.43	0.01	56.85	0.67
10/01/2555 20:25 น.	1.45	0.05	0.03	0.35	0.07	48.56	7.26
10/01/2555 21:25 น.	1.49	0.05	0.03	0.40	0.01	55.27	2.02
10/01/2555 22:25 น.	1.53	0.05	0.03	0.36	0.00	53.65	2.42
10/01/2555 23:25 น.	1.57	0.06	0.04	0.36	0.01	55.56	0.41
11/01/2555 0:25 น.	1.61	0.05	0.04	0.33	0.03	55.82	2.08
11/01/2555 8:10 น.	1.94	0.74	0.06	0.02	0.02	5.06	2.12
11/01/2555 8:40 น.	1.96	0.42	0.08	0.11	0.02	8.25	0.99
11/01/2555 9:10 น.	1.98	0.27	0.03	0.21	0.02	9.28	0.75
11/01/2555 9:40 น.	2.00	0.17	0.03	0.32	0.02	9.92	0.70
11/01/2555 10:10 น.	2.02	0.09	0.02	0.41	0.01	10.05	0.98
11/01/2555 10:40 น.	2.04	0.07	0.01	0.46	0.02	10.37	0.61
11/01/2555 11:10 น.	2.06	0.06	0.02	0.50	0.03	10.43	0.79
11/01/2555 12:10 น.	2.10	0.03	0.00	0.52	0.02	10.57	0.87
11/01/2555 13:10 น.	2.15	0.01	0.00	0.56	0.01	10.77	0.62
11/01/2555 14:10 น.	2.19	0.03	0.02	0.53	0.04	10.43	1.25
11/01/2555 15:10 น.	2.23	0.03	0.02	0.54	0.01	10.98	0.69
11/01/2555 16:10 น.	2.27	0.03	0.01	0.51	0.03	10.99	0.80
11/01/2555 17:10 น.	2.31	0.04	0.01	0.49	0.02	11.10	0.62
11/01/2555 18:10 น.	2.35	0.04	0.01	0.48	0.01	11.09	0.79
11/01/2555 19:10 น.	2.40	0.04	0.01	0.45	0.01	11.20	0.63
11/01/2555 20:10 น.	2.44	0.05	0.01	0.41	0.01	11.14	0.72
11/01/2555 21:10 น.	2.48	0.02	0.01	0.41	0.02	11.10	0.54
11/01/2555 22:10 น.	2.52	0.04	0.02	0.38	0.01	11.16	0.60
11/01/2555 23:10 น.	2.56	0.03	0.02	0.37	0.01	11.24	0.59
12/01/2555 0:10 น.	2.60	0.04	0.01	0.36	0.01	11.50	0.70

ตารางที่ ข-7 ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิของชุดควบคุม (ไม่บรรจุตัวกรองชีวภาพ) จำนวน 3 ถังทดลอง

วัน/เดือน/ปี	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
9/01/2555 9:40 น.	0.00	150.00	0.00	8.30	0.00	8.54	0.09	25.97	0.06
9/01/2555 13:40 น.	0.17	150.00	0.00	7.70	0.00	8.56	0.05	26.4	0.00

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
9/01/2555 17:40 น.	0.33	150.00	0.00	7.67	0.15	8.63	0.10	26.20	0.00
9/01/2555 21:40 น.	0.50	123.33	5.77	7.20	0.10	8.57	0.05	25.67	0.12
10/01/2555 1:40 น.	0.67	120.00	10.00	7.50	0.17	8.63	0.06	25.07	0.12
10/01/2555 8:25 น.	0.95	150.00	0.00	7.60	0.00	8.76	0.01	25.83	0.15
10/01/2555 12:25 น.	1.11	123.33	11.55	8.27	0.06	8.60	0.06	26.43	0.06
10/01/2555 16:25 น.	1.28	123.33	11.55	7.77	0.06	8.78	0.01	26.93	0.12
10/01/2555 20:25 น.	1.45	123.33	11.55	7.80	0.10	8.80	0.02	26.43	0.06
11/01/2555 0:25 น.	1.61	116.67	11.55	7.90	0.00	8.80	0.01	25.77	0.12
11/01/2555 8:10 น.	1.94	150.00	0.00	7.70	0.17	8.64	0.01	25.87	0.06
11/01/2555 12:10 น.	2.10	140.00	17.32	7.40	0.00	8.68	0.01	25.97	0.06
11/01/2555 16:10 น.	2.27	120.00	10.00	7.13	0.06	8.71	0.01	26.90	0.10
11/01/2555 20:10 น.	2.44	140.00	0.00	7.50	0.00	8.67	0.05	26.30	0.10
12/01/2555 0:10 น.	2.60	133.33	5.77	7.97	0.06	8.67	0.01	25.67	0.12

ตารางที่ ข-8 ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิของชุดทดลอง (บรรจุตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ด) จำนวน 3 ถังทดลอง

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
9/01/2555 9:40 น.	0.00	150.00	0.00	8.10	0.00	8.55	0.01	25.93	0.25
9/01/2555 13:40 น.	0.17	116.67	5.77	7.60	0.20	8.58	0.01	26.30	0.36
9/01/2555 17:40 น.	0.33	113.33	5.77	7.80	0.36	8.70	0.06	26.10	0.36
9/01/2555 21:40 น.	0.50	113.33	5.77	7.50	0.17	8.70	0.03	25.50	0.36
10/01/2555 1:40 น.	0.67	110.00	10.00	7.57	0.21	8.55	0.04	24.90	0.36
10/01/2555 8:25 น.	0.95	150.00	0.00	7.70	0.00	8.74	0.03	25.67	0.21
10/01/2555 12:25 น.	1.11	130.00	0.00	8.27	0.06	8.66	0.03	26.27	0.21
10/01/2555 16:25 น.	1.28	130.00	0.00	7.83	0.12	8.73	0.01	26.77	0.21
10/01/2555 20:25 น.	1.45	113.33	5.77	7.53	0.21	8.75	0.01	26.33	0.15
11/01/2555 0:25 น.	1.61	103.33	5.77	7.43	0.06	8.69	0.01	25.80	0.17
11/01/2555 8:10 น.	1.94	150.00	0.00	7.83	0.12	8.68	0.01	25.47	0.21
11/01/2555 12:10 น.	2.10	120.00	0.00	7.53	0.12	8.69	0.01	25.60	0.26
11/01/2555 16:10 น.	2.27	120.00	0.00	7.43	0.15	8.69	0.02	26.67	0.29
11/01/2555 20:10 น.	2.44	120.00	10.00	7.50	0.00	8.69	0.01	26.23	0.32
12/01/2555 0:10 น.	2.60	113.33	11.55	7.87	0.15	8.66	0.01	25.63	0.32

ตารางที่ ข-9 ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิของชุดทดลอง (บรรจุตัวกรองชีวภาพหินพัมมิสบด) จำนวน 3 ถังทดลอง

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
9/01/2555 9:40 น.	0.00	150.00	0.00	8.07	0.12	8.36	0.02	25.50	0.10
9/01/2555 13:40 น.	0.17	110.00	0.00	7.83	0.06	8.39	0.02	25.90	0.10
9/01/2555 17:40 น.	0.33	110.00	0.00	7.93	0.06	8.43	0.03	25.77	0.06
9/01/2555 21:40 น.	0.50	110.00	0.00	7.53	0.15	8.36	0.02	25.30	0.10
10/01/2555 1:40 น.	0.67	100.00	10.00	7.40	0.00	8.41	0.02	24.80	0.10
10/01/2555 8:25 น.	0.95	150.00	0.00	7.90	0.00	8.54	0.06	25.53	0.15
10/01/2555 12:25 น.	1.11	116.67	5.77	8.17	0.12	8.60	0.01	26.23	0.06
10/01/2555 16:25 น.	1.28	110.00	0.00	7.87	0.15	8.62	0.01	26.60	0.00
10/01/2555 20:25 น.	1.45	110.00	0.00	7.70	0.17	8.61	0.01	26.23	0.06
11/01/2555 0:25 น.	1.61	113.33	5.77	7.80	0.10	8.56	0.02	25.70	0.00
11/01/2555 8:10 น.	1.94	150.00	0.00	7.83	0.12	8.60	0.01	25.40	0.10
11/01/2555 12:10 น.	2.10	130.00	0.00	7.63	0.15	8.65	0.01	25.57	0.12
11/01/2555 16:10 น.	2.27	130.00	0.00	7.47	0.06	8.67	0.02	26.53	0.12
11/01/2555 20:10 น.	2.44	130.00	0.00	7.63	0.25	8.63	0.01	26.03	0.06
12/01/2555 0:10 น.	2.60	126.67	5.77	7.97	0.06	8.61	0.01	25.47	0.06

ตารางที่ ข-10 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตของชุดควบคุม (ไม่บรรจุวัสดุตัวกลาง) จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
15/05/2555 14:00 น.	28.84	0.05	0.00	0.02	0.01	96.56	2.85
16/05/2555 9:40 น.	29.66	0.05	0.01	0.05	0.03	94.55	1.31
17/05/2555 10:30 น.	30.70	0.03	0.01	0.06	0.03	96.43	0.64
18/05/2555 9:50 น.	31.67	0.03	0.01	0.08	0.04	91.68	2.47
19/05/2555 13:15 น.	32.81	0.07	0.01	0.12	0.06	94.02	2.31
20/05/2555 14:00 น.	33.84	0.09	0.01	0.01	0.00	96.12	0.73
21/05/2555 10:30 น.	34.70	0.11	0.01	0.01	0.01	97.25	0.50
22/05/2555 11:00 น.	35.72	0.06	0.00	0.02	0.01	95.47	0.61
23/05/2555 10:45 น.	36.71	0.06	0.01	0.03	0.01	97.16	0.16
24/05/2555 11:30 น.	37.74	0.06	0.01	0.04	0.01	96.84	1.94
25/05/2555 10:20 น.	38.69	0.05	0.02	0.04	0.02	94.78	0.71
26/05/2555 13:30 น.	39.82	0.02	0.01	0.00	0.00	100.38	1.05
27/05/2555 10:00 น.	40.68	0.03	0.00	0.01	0.01	100.82	1.00
28/05/2555 10:45 น.	41.71	0.02	0.01	0.02	0.01	100.22	0.73
29/05/2555 10:00 น.	42.68	0.04	0.01	0.02	0.02	99.62	0.85
30/05/2555 10:20 น.	43.69	0.06	0.01	0.04	0.02	96.73	1.14
31/05/2555 10:20 น.	44.69	0.06	0.01	0.04	0.02	99.16	0.39
1/06/2555 13:45 น.	45.83	0.07	0.01	0.00	0.00	99.34	0.38
2/06/2555 10:50 น.	46.71	0.13	0.03	0.01	0.01	99.70	0.30
3/06/2555 11:40 น.	47.75	0.07	0.02	0.02	0.00	98.49	2.14

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/06/2555 10:10 น.	48.68	0.09	0.02	0.02	0.00	99.80	0.22
5/06/2555 10:40 น.	49.70	0.08	0.02	0.03	0.01	98.62	1.11
6/06/2555 10:10 น.	50.68	0.09	0.03	0.02	0.00	98.15	0.60
7/06/2555 10:10 น.	51.68	0.08	0.02	0.04	0.01	99.27	0.69
8/06/2555 12:30 น.	52.78	0.04	0.02	0.01	0.00	104.85	3.55
9/06/2555 10:40 น.	53.70	0.04	0.00	0.01	0.01	104.15	0.18
10/06/2555 10:30 น.	54.70	0.06	0.01	0.01	0.01	103.82	0.76
11/06/2555 9:40 น.	55.66	0.07	0.02	0.02	0.01	103.63	0.36
12/06/2555 9:40 น.	56.66	0.05	0.02	0.03	0.01	102.75	0.21
13/06/2555 9:50 น.	57.67	0.08	0.02	0.02	0.02	97.15	0.26
14/06/2555 14:00 น.	58.84	0.07	0.01	0.00	0.00	102.07	1.11
15/06/2555 9:10 น.	59.64	0.07	0.01	0.01	0.01	101.64	0.88
16/06/2555 9:30 น.	60.66	0.10	0.03	0.03	0.01	99.98	0.33
17/06/2555 10:45 น.	61.71	0.14	0.06	0.02	0.01	101.53	1.05
18/06/2555 9:45 น.	62.67	0.09	0.02	0.02	0.01	102.69	0.95

ตารางที่ ข-11 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตของชุดทดลอง (บรรจุหินพัมมิสบดหนา 5 ซม.) จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
15/05/2555 14:00 น.	28.84	0.06	0.00	0.05	0.01	88.73	3.23
16/05/2555 9:40 น.	29.66	0.05	0.00	32.44	15.17	29.83	10.71
17/05/2555 10:30 น.	30.70	0.18	0.12	29.37	4.02	8.44	2.45
18/05/2555 9:50 น.	31.67	0.07	0.01	18.44	4.10	15.32	3.80
19/05/2555 13:15 น.	32.81	0.11	0.01	2.06	3.00	31.29	3.55
20/05/2555 14:00 น.	33.84	0.10	0.00	0.15	0.11	91.65	1.99
21/05/2555 10:30 น.	34.70	0.10	0.02	25.80	0.59	38.79	7.31
22/05/2555 11:00 น.	35.72	0.19	0.05	22.15	3.33	7.43	1.03
23/05/2555 10:45 น.	36.71	0.09	0.01	10.39	5.00	17.64	1.35
24/05/2555 11:30 น.	37.74	0.09	0.04	1.22	1.93	25.10	1.48
25/05/2555 10:20 น.	38.69	0.04	0.00	0.04	0.01	26.68	2.69
26/05/2555 13:30 น.	39.82	0.03	0.00	0.08	0.05	93.97	0.67
27/05/2555 10:00 น.	40.68	0.03	0.00	4.53	2.18	64.61	1.51
28/05/2555 10:45 น.	41.71	0.05	0.04	10.27	9.85	18.74	5.75
29/05/2555 10:00 น.	42.68	0.07	0.02	5.93	7.77	19.70	7.31
30/05/2555 10:20 น.	43.69	0.06	0.01	1.26	1.94	20.72	7.52
31/05/2555 10:20 น.	44.69	0.06	0.01	0.04	0.01	24.99	7.97
1/06/2555 13:45 น.	45.83	0.09	0.02	0.24	0.25	97.82	1.65
2/06/2555 10:50 น.	46.71	0.12	0.02	4.77	2.11	54.40	11.54
3/06/2555 11:40 น.	47.75	0.07	0.01	2.42	2.67	13.64	5.07
4/06/2555 10:10 น.	48.68	0.06	0.01	0.03	0.03	16.03	6.06
5/06/2555 10:40 น.	49.70	0.04	0.01	0.02	0.02	17.46	5.91
6/06/2555 10:10 น.	50.68	0.04	0.01	0.01	0.01	18.60	6.48
7/06/2555 10:10 น.	51.68	0.01	0.01	0.02	0.01	20.52	6.47

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
8/06/2555 12:30 น.	52.78	0.04	0.00	0.11	0.11	100.36	3.59
9/06/2555 10:40 น.	53.70	0.03	0.00	2.87	0.77	60.21	9.11
10/06/2555 10:30 น.	54.70	0.04	0.01	2.10	1.41	11.63	7.31
11/06/2555 9:40 น.	55.66	0.05	0.01	0.01	0.01	7.58	3.64
12/06/2555 9:40 น.	56.66	0.03	0.00	0.01	0.00	7.31	3.49
13/06/2555 9:50 น.	57.67	0.05	0.00	0.01	0.00	7.51	3.34
14/06/2555 14:00 น.	58.84	0.07	0.00	0.35	0.13	99.59	2.67
15/06/2555 9:10 น.	59.64	0.07	0.01	3.61	0.75	47.36	9.69
16/06/2555 9:30 น.	60.66	0.09	0.03	1.21	1.22	2.71	2.69
17/06/2555 10:45 น.	61.71	0.17	0.08	0.01	0.01	0.51	0.33
18/06/2555 9:45 น.	62.67	0.09	0.02	0.01	0.00	0.51	0.21

ตารางที่ ข-12 ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิของชุดควบคุม (ไม่บรรจุวัสดุตัวกลาง) จำนวน 3 ถังทดลอง

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
15/05/2555 14:00 น.	28.84	20.00	0.00	6.07	0.15	7.00	0.00	31.87	0.31
16/05/2555 9:40 น.	29.66	20.00	0.00	6.60	0.20	7.00	0.00	29.97	0.06
17/05/2555 10:30 น.	30.70	20.00	0.00	6.80	0.20	7.00	0.00	29.10	0.10
18/05/2555 9:50 น.	31.67	20.00	0.00	6.83	0.15	7.00	0.00	28.40	0.10
19/05/2555 13:15 น.	32.81	20.00	0.00	6.70	0.17	7.00	0.00	30.23	0.12
20/05/2555 14:00 น.	33.84	16.67	5.77	6.03	0.12	7.00	0.00	30.67	0.06
21/05/2555 10:30 น.	34.70	20.00	0.00	6.73	0.12	7.30	0.00	30.50	0.10
22/05/2555 11:00 น.	35.72	20.00	0.00	6.50	0.10	7.00	0.00	31.50	0.10
23/05/2555 10:45 น.	36.71	20.00	0.00	6.37	0.25	7.00	0.00	31.43	0.12
24/05/2555 11:30 น.	37.74	20.00	0.00	6.17	0.32	7.00	0.00	30.97	0.15
25/05/2555 10:20 น.	38.69	20.00	0.00	6.33	0.29	7.00	0.00	31.37	0.15
26/05/2555 13:30 น.	39.82	20.00	0.00	6.50	0.10	7.00	0.00	29.87	0.32
27/05/2555 10:00 น.	40.68	20.00	0.00	6.60	0.00	7.00	0.00	30.80	0.17
28/05/2555 10:45 น.	41.71	20.00	0.00	6.70	0.00	7.00	0.00	30.77	0.15
29/05/2555 10:00 น.	42.68	20.00	0.00	6.70	0.00	7.00	0.00	30.73	0.12
30/05/2555 10:20 น.	43.69	20.00	0.00	6.57	0.25	7.00	0.00	29.73	0.21
31/05/2555 10:20 น.	44.69	20.00	0.00	6.50	0.10	7.00	0.00	30.33	0.21
1/06/2555 13:45 น.	45.83	20.00	0.00	6.40	0.26	6.45	0.04	30.47	0.06
2/06/2555 10:50 น.	46.71	20.00	0.00	6.67	0.12	6.88	0.01	29.97	0.15
3/06/2555 11:40 น.	47.75	20.00	0.00	6.50	0.10	7.05	0.12	30.93	0.21
4/06/2555 10:10 น.	48.68	20.00	0.00	6.63	0.15	7.05	0.04	30.73	0.29
5/06/2555 10:40 น.	49.70	20.00	0.00	6.73	0.21	6.97	0.01	30.37	0.06
6/06/2555 10:10 น.	50.68	20.00	0.00	6.37	0.06	7.05	0.03	30.43	0.29
7/06/2555 10:10 น.	51.68	20.00	0.00	6.43	0.12	7.00	0.03	30.17	0.06
8/06/2555 12:30 น.	52.78	20.00	0.00	6.53	0.12	6.36	0.01	29.43	0.06
9/06/2555 10:40 น.	53.70	20.00	0.00	6.63	0.06	6.91	0.03	30.80	0.00
10/06/2555 10:30 น.	54.70	20.00	0.00	7.00	0.10	6.97	0.06	30.37	0.12
11/06/2555 9:40 น.	55.66	20.00	0.00	6.57	0.15	6.84	0.03	30.57	0.32

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
12/06/2555 9:40 น.	56.66	20.00	0.00	6.57	0.06	6.94	0.04	29.70	0.10
13/06/2555 9:50 น.	57.67	20.00	0.00	6.57	0.06	7.03	0.09	30.53	0.15
14/06/2555 14:00 น.	58.84	20.00	0.00	5.87	0.12	6.20	0.02	29.63	0.06
15/06/2555 9:10 น.	59.64	20.00	0.00	6.53	0.15	6.83	0.02	30.33	0.06
16/06/2555 9:30 น.	60.66	20.00	0.00	6.90	0.10	6.97	0.05	30.87	0.06
17/06/2555 10:45 น.	61.71	20.00	0.00	6.50	0.10	7.02	0.14	30.40	0.10
18/06/2555 9:45 น.	62.67	20.00	0.00	6.43	0.06	6.82	0.01	29.77	0.21

ตารางที่ ข-13 ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิของชุดทดลอง (บรรจุหินพัมมิสบดหนา 5 ซม.) จำนวน 3 ถังทดลอง

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
15/05/2555 14:00 น.	28.84	60.00	10.00	2.53	0.32	7.27	0.12	31.67	0.06
16/05/2555 9:40 น.	29.66	220.00	10.00	0.83	0.12	8.30	0.00	29.83	0.06
17/05/2555 10:30 น.	30.70	340.00	26.46	3.57	0.25	8.50	0.00	28.90	0.10
18/05/2555 9:50 น.	31.67	313.33	11.55	3.30	0.10	8.50	0.00	28.37	0.06
19/05/2555 13:15 น.	32.81	310.00	17.32	3.20	0.26	8.50	0.00	30.10	0.00
20/05/2555 14:00 น.	33.84	40.00	0.00	2.60	0.40	7.50	0.00	30.60	0.00
21/05/2555 10:30 น.	34.70	190.00	26.46	0.77	0.06	8.50	0.00	30.50	0.10
22/05/2555 11:00 น.	35.72	330.00	10.00	2.83	0.21	8.50	0.00	31.20	0.00
23/05/2555 10:45 น.	36.71	346.67	30.55	3.67	0.06	8.50	0.00	31.10	0.00
24/05/2555 11:30 น.	37.74	323.33	15.28	3.43	0.55	8.50	0.00	30.87	0.06
25/05/2555 10:20 น.	38.69	343.33	15.28	3.97	0.12	8.50	0.00	31.20	0.00
26/05/2555 13:30 น.	39.82	40.00	0.00	3.30	0.20	7.50	0.00	30.63	0.12
27/05/2555 10:00 น.	40.68	166.67	5.77	0.80	0.10	8.00	0.00	30.70	0.10
28/05/2555 10:45 น.	41.71	313.33	25.17	2.10	1.42	8.50	0.00	30.93	0.06
29/05/2555 10:00 น.	42.68	336.67	56.86	3.53	0.65	8.50	0.00	30.67	0.12
30/05/2555 10:20 น.	43.69	336.67	15.28	3.53	0.51	8.50	0.00	29.90	0.10
31/05/2555 10:20 น.	44.69	376.67	60.28	4.20	0.17	8.50	0.00	30.10	0.00
1/06/2555 13:45 น.	45.83	43.33	5.77	3.73	0.38	6.94	0.02	30.33	0.06
2/06/2555 10:50 น.	46.71	220.00	26.46	1.23	0.06	7.82	0.28	29.77	0.06
3/06/2555 11:40 น.	47.75	393.33	15.28	3.13	0.21	8.20	0.12	30.70	0.10
4/06/2555 10:10 น.	48.68	376.67	5.77	4.47	0.25	8.01	0.11	30.40	0.10
5/06/2555 10:40 น.	49.70	380.00	36.06	4.83	0.55	8.06	0.14	29.90	0.00
6/06/2555 10:10 น.	50.68	363.33	41.63	4.33	0.46	7.83	0.06	30.10	0.00
7/06/2555 10:10 น.	51.68	380.00	26.46	4.90	0.36	8.02	0.06	29.87	0.06
8/06/2555 12:30 น.	52.78	33.33	5.77	4.73	0.40	6.97	0.06	29.20	0.10
9/06/2555 10:40 น.	53.70	193.33	41.63	1.03	0.15	8.11	0.18	30.60	0.00
10/06/2555 10:30 น.	54.70	353.33	61.10	1.97	0.76	8.28	0.03	30.13	0.06
11/06/2555 9:40 น.	55.66	413.33	30.55	4.53	0.47	7.97	0.01	30.33	0.06
12/06/2555 9:40 น.	56.66	430.00	36.06	5.23	0.50	7.94	0.03	29.43	0.06
13/06/2555 9:50 น.	57.67	423.33	47.26	4.87	0.23	7.91	0.01	30.10	0.00
14/06/2555 14:00 น.	58.84	50.00	0.00	3.97	0.15	6.77	0.04	29.73	0.06

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
15/06/2555 9:10 น.	59.64	260.00	36.06	1.57	0.31	8.12	0.14	30.07	0.06
16/06/2555 9:30 น.	60.66	376.67	15.28	1.23	0.42	8.31	0.08	30.40	0.00
17/06/2555 10:45 น.	61.71	363.33	25.17	3.53	1.29	7.94	0.04	29.87	0.06
18/06/2555 9:45 น.	62.67	376.67	11.55	4.17	0.32	7.86	0.03	29.37	0.06

ตารางที่ ข-14 ค่าโออาร์พีของชุดควบคุม (ไม่บรรจุวัสดุตัวกลาง) และชุดทดลอง (บรรจุหินพัมมิสบดหนา 5 ซม.) ชุดการทดลองละ 3 ถังทดลอง

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พีในชั้นน้ำ (มิลลิโวลต์)				ค่าโออาร์พีในชั้นหินพัมมิสของชุดทดลอง (มิลลิโวลต์)	
		ชุดควบคุม		ชุดทดลอง			
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
15/05/2555 14:00 น.	28.84	172.40	0.92	152.27	1.97	151.93	2.04
16/05/2555 9:40 น.	29.66	147.20	3.25	86.87	6.22	69.50	13.29
17/05/2555 10:30 น.	30.70	183.40	0.79	129.53	5.25	127.57	1.65
18/05/2555 9:50 น.	31.67	178.93	0.67	134.87	5.93	130.80	3.64
19/05/2555 13:15 น.	32.81	176.33	4.44	149.80	5.73	148.17	5.65
20/05/2555 14:00 น.	33.84	180.67	0.49	147.90	17.50	128.27	21.38
21/05/2555 10:30 น.	34.70	166.40	1.30	135.33	6.52	111.03	32.55
22/05/2555 11:00 น.	35.72	169.77	0.74	95.00	3.72	87.97	14.62
23/05/2555 10:45 น.	36.71	168.23	1.59	128.60	5.45	118.67	16.03
24/05/2555 11:30 น.	37.74	179.23	1.76	129.67	3.98	123.40	5.69
25/05/2555 10:20 น.	38.69	179.47	1.24	137.37	2.57	135.97	0.45
26/05/2555 13:30 น.	39.82	171.73	2.15	138.47	13.92	119.27	3.96
27/05/2555 10:00 น.	40.68	176.77	0.93	86.43	21.90	81.47	6.84
28/05/2555 10:45 น.	41.71	182.70	0.62	119.67	2.76	106.77	12.86
29/05/2555 10:00 น.	42.68	183.43	2.12	133.90	0.78	126.30	10.38
30/05/2555 10:20 น.	43.69	180.47	7.86	141.67	5.46	135.93	14.11
31/05/2555 10:20 น.	44.69	190.20	1.82	145.87	5.17	145.40	5.89
1/06/2555 13:45 น.	45.83	182.43	4.86	176.33	1.59	117.53	5.17
2/06/2555 10:50 น.	46.71	172.67	5.25	111.93	5.92	98.60	7.89
3/06/2555 11:40 น.	47.75	176.57	2.94	133.47	4.85	123.43	12.39
4/06/2555 10:10 น.	48.68	189.30	3.28	148.43	4.14	145.50	5.81
5/06/2555 10:40 น.	49.70	189.33	5.01	151.07	0.85	147.00	4.94
6/06/2555 10:10 น.	50.68	189.47	4.94	143.83	2.90	149.73	0.99
7/06/2555 10:10 น.	51.68	196.57	2.01	153.57	2.77	155.00	4.36
8/06/2555 12:30 น.	52.78	188.03	7.16	161.90	10.98	145.93	15.59
9/06/2555 10:40 น.	53.70	179.77	3.88	135.63	4.56	90.70	8.91
10/06/2555 10:30 น.	54.70	184.03	2.01	131.20	1.49	106.97	13.30
11/06/2555 9:40 น.	55.66	196.17	0.40	147.47	0.65	140.90	6.46
12/06/2555 9:40 น.	56.66	200.40	1.65	151.23	0.58	148.67	1.59
13/06/2555 9:50 น.	57.67	204.53	1.99	146.27	0.91	154.43	7.16
14/06/2555 14:00 น.	58.84	192.67	0.61	194.17	0.12	149.43	4.32
15/06/2555 9:10 น.	59.64	177.07	2.93	142.93	4.90	83.37	17.70
16/06/2555 9:30 น.	60.66	119.60	0.66	111.97	0.91	-238.23	90.53
17/06/2555 10:45 น.	61.71	154.27	2.40	134.63	5.74	-85.17	115.63
18/06/2555 9:45 น.	62.67	189.40	3.29	136.73	0.76	141.10	0.70

ตารางที่ ข-15 ค่าซีโอดีที่ทำการตรวจวัดของชุดควบคุม (ไม่บรรจุวัสดุตัวกลาง) และชุดทดลอง (บรรจุหินพัมมิสบดหนา 5) ชุดการทดลองละ 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ซีโอดี (มก./ล.)			
		ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
15/05/2555 14:00 น.	28.84	512.42	15.69	533.99	31.37
16/05/2555 9:40 น.	29.66	433.99	22.79	137.31	45.85
17/05/2555 10:30 น.	30.70	276.92	80.11	1.27	2.21
18/05/2555 9:50 น.	31.67	291.56	6.16	3.99	6.91
19/05/2555 13:15 น.	32.81	253.33	26.67	23.68	9.76
20/05/2555 14:00 น.	33.84	497.78	27.76	457.78	27.76
21/05/2555 10:30 น.	34.70	402.96	31.36	165.29	25.78
22/05/2555 11:00 น.	35.72	338.13	58.30	22.68	10.83
23/05/2555 10:45 น.	36.71	263.70	22.37	0.99	1.71
24/05/2555 11:30 น.	37.74	177.78	15.40	1.78	3.08
25/05/2555 10:20 น.	38.69	180.32	9.59	9.78	10.78
26/05/2555 13:30 น.	39.82	453.16	30.89	524.84	59.90
27/05/2555 10:00 น.	40.68	411.33	21.77	257.73	19.31
28/05/2555 10:45 น.	41.71	337.78	64.10	19.40	9.02
29/05/2555 10:00 น.	42.68	314.07	22.37	28.82	4.44
30/05/2555 10:20 น.	43.69	296.30	22.37	23.56	16.89
31/05/2555 10:20 น.	44.69	201.68	12.94	6.97	3.02
1/06/2555 13:45 น.	45.83	649.02	26.14	640.31	15.09
2/06/2555 10:50 น.	46.71	434.93	69.90	327.45	9.11
3/06/2555 11:40 น.	47.75	444.44	64.10	2.35	4.08
4/06/2555 10:10 น.	48.68	320.00	13.33	0.00	0.00
5/06/2555 10:40 น.	49.70	311.11	7.70	14.22	16.29
6/06/2555 10:10 น.	50.68	254.47	15.97	13.94	7.99
7/06/2555 10:10 น.	51.68	209.15	61.00	13.94	7.99
8/06/2555 12:30 น.	52.78	658.17	0.00	679.74	45.28
9/06/2555 10:40 น.	53.70	393.05	20.95	218.20	43.07
10/06/2555 10:30 น.	54.70	358.28	20.78	5.14	7.74
11/06/2555 9:40 น.	55.66	357.24	76.48	58.86	25.23
12/06/2555 9:40 น.	56.66	386.87	14.00	52.53	30.50
13/06/2555 9:50 น.	57.67	393.94	12.12	18.18	18.18
14/06/2555 14:00 น.	58.84	639.33	46.19	648.89	30.79
15/06/2555 9:10 น.	59.64	545.19	27.16	259.59	45.17
16/06/2555 9:30 น.	60.66	422.22	32.89	46.17	18.66
17/06/2555 10:45 น.	61.71	374.73	24.74	11.33	6.04
18/06/2555 9:45 น.	62.67	339.87	27.67	19.17	5.44

ภาคผนวก ค

ข้อมูลคุณภาพน้ำที่ทำการตรวจวัดในการทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์เดียว

ตารางที่ ค-1 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตของชุดการทดลองที่ 1 (บรรจุหินพัมมิสบดเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอล) จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
8/09/2555 15:00 น.	25.23	19.16	0.53	0.78	0.70	2.10	0.90
9/09/2555 9:30 น.	26.00	12.69	0.36	4.49	3.02	6.13	4.02
9/09/2555 17:00 น.	26.31	9.74	0.61	6.27	3.89	7.20	4.89
10/09/2555 9:20 น.	26.99	4.17	0.85	10.21	6.27	10.76	5.98
10/09/2555 16:30 น.	27.29	0.69	0.68	10.83	7.17	10.03	4.54
11/09/2555 9:30 น.	28.00	0.02	0.00	11.38	9.88	14.38	9.51
12/09/2012 9:35 น.	29.00	0.02	0.01	8.66	8.02	15.84	8.32
15/09/2555 10:00 น.	32.02	0.01	0.00	0.01	0.00	23.52	0.98
15/09/2555 17:20 น.	32.33	0.01	0.00	0.01	0.01	24.16	1.14
16/09/2555 10:00 น.	33.02	0.02	0.01	2.49	0.39	18.75	1.79
16/09/2555 17:00 น.	33.31	0.03	0.01	0.65	0.36	20.38	1.06
17/09/2555 9:40 น.	34.01	0.02	0.01	0.01	0.01	20.47	1.01
18/09/2555 9:30 น.	35.00	0.01	0.00	0.01	0.00	20.64	1.17
21/09/2555 10:15 น.	38.03	0.01	0.01	0.01	0.00	21.36	1.01
21/09/2555 19:00 น.	38.40	0.00	0.00	0.25	0.12	20.83	1.49
22/09/2555 11:00 น.	39.06	0.03	0.02	1.96	0.07	10.99	2.18
22/09/2555 18:00 น.	39.35	0.04	0.02	0.27	0.12	11.79	2.02
23/09/2555 11:15 น.	40.07	0.02	0.01	0.01	0.00	12.74	2.16
24/09/2555 11:15 น.	41.07	0.03	0.01	0.00	0.00	14.27	1.73
26/09/2555 9:10 น.	42.99	0.01	0.00	0.00	0.00	13.65	1.78
27/09/2555 9:20 น.	43.99	0.00	0.00	0.51	0.26	9.27	2.54
28/09/2555 9:25 น.	45.00	0.11	0.05	0.89	0.61	2.61	2.34
29/09/2555 9:00 น.	45.98	0.13	0.04	0.67	0.44	2.45	2.01
1/10/2555 10:00 น.	48.02	0.13	0.04	0.22	0.16	2.74	2.01
3/10/2555 10:20 น.	50.03	0.05	0.01	0.05	0.05	3.04	2.03
7/10/2555 15:00 น.	54.23	16.94	1.18	0.01	0.00	1.31	0.19
8/10/2555 10:00 น.	55.02	11.32	1.57	0.74	0.85	4.83	1.21
8/10/2555 18:00 น.	55.35	9.28	2.81	1.09	1.16	6.85	1.76
9/10/2555 10:00 น.	56.02	6.11	4.45	1.68	1.56	10.56	2.99
9/10/2555 17:30 น.	56.33	4.88	4.29	0.88	1.16	12.99	4.14
10/10/2555 10:00 น.	57.02	1.69	1.60	1.11	1.74	15.59	2.51
11/10/2555 10:20 น.	58.03	0.07	0.01	0.01	0.00	18.74	0.19

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
12/10/2555 10:30 น.	59.04	0.01	0.00	0.00	0.00	19.49	0.55
13/10/2555 11:15 น.	60.07	0.00	0.00	0.00	0.00	19.68	0.57
14/10/2555 11:20 น.	61.08	0.02	0.01	0.00	0.00	19.55	0.55
15/10/2555 11:40 น.	62.09	0.02	0.01	0.00	0.00	18.94	0.61
16/10/2555 11:30 น.	63.08	0.02	0.00	0.00	0.00	19.24	0.56
17/10/2555 15:30 น.	64.25	0.03	0.01	0.00	0.00	18.49	0.65
18/10/2555 10:15 น.	65.03	0.03	0.00	0.26	0.27	17.02	0.21
18/10/2555 17:00 น.	65.31	0.01	0.01	0.34	0.21	13.37	0.24
19/10/2555 10:40 น.	66.05	0.00	0.00	0.83	0.24	7.26	0.23
19/10/2555 17:00 น.	66.31	0.00	0.00	0.97	0.24	4.27	0.29
20/10/2555 9:45 น.	67.01	0.17	0.04	0.59	0.21	2.94	0.48
21/10/2555 10:30 น.	68.04	0.19	0.07	0.27	0.10	3.01	0.62
22/10/2555 9:50 น.	69.01	0.09	0.03	0.12	0.04	3.18	0.62
23/10/2555 10:00 น.	70.02	0.04	0.00	0.07	0.02	3.25	0.65
24/10/2555 10:00 น.	71.02	0.03	0.00	0.03	0.01	3.33	0.70
26/10/2555 10:30 น.	73.04	16.71	0.45	0.01	0.00	0.97	0.07
26/10/2555 18:00 น.	73.35	14.31	0.55	0.27	0.18	2.65	0.20
27/10/2555 9:10 น.	73.99	9.71	0.64	0.49	0.36	5.18	0.46
27/10/2555 17:10 น.	74.32	9.92	0.85	0.77	0.66	6.62	0.71
28/10/2555 9:15 น.	74.99	6.23	1.01	1.09	0.94	9.93	1.12
28/10/2555 17:15 น.	75.32	4.83	1.76	1.19	0.88	11.39	1.27
29/10/2555 17:00 น.	76.31	1.62	1.82	1.19	0.53	15.16	1.99
30/10/2555 10:00 น.	77.02	0.06	0.06	0.20	0.33	18.36	0.53
31/10/2555 15:30 น.	78.25	0.04	0.01	0.00	0.00	18.33	0.20
1/11/2555 10:00 น.	79.02	0.03	0.01	0.04	0.04	18.06	0.40
1/11/2555 17:00 น.	79.31	0.01	0.00	0.18	0.18	15.39	0.17
2/11/2555 10:30 น.	80.04	0.00	0.00	0.43	0.15	9.53	1.00
2/11/2555 18:15 น.	80.36	0.00	0.00	0.56	0.09	5.65	1.57
3/11/2555 9:45 น.	81.01	0.12	0.09	0.30	0.06	2.52	0.71
3/11/2555 17:40 น.	81.34	0.20	0.04	0.19	0.04	2.14	0.81
4/11/2555 9:45 น.	82.01	0.20	0.01	0.15	0.02	2.18	0.59
5/11/2555 9:35 น.	83.00	0.10	0.02	0.07	0.01	2.16	0.47
6/11/2555 10:15 น.	84.03	0.05	0.01	0.04	0.02	2.15	0.54
7/11/2555 9:30 น.	85.00	0.03	0.00	0.02	0.00	2.15	0.53
10/11/2555 10:20 น.	88.03	20.28	0.98	0.01	0.00	0.95	0.08
10/11/2555 18:00 น.	88.35	14.37	0.70	0.21	0.05	2.14	0.07
11/11/2555 10:40 น.	89.05	10.84	0.37	0.67	0.33	5.25	0.21
11/11/2555 18:15 น.	89.36	9.30	0.40	1.08	0.53	6.46	0.31
12/11/2555 9:20 น.	89.99	6.48	0.92	1.77	0.83	9.84	0.54
12/11/2555 18:00 น.	90.35	4.55	1.07	2.40	0.99	11.33	1.27
13/11/2555 9:20 น.	90.99	1.57	1.33	1.99	0.59	15.31	2.19
14/11/2555 15:00 น.	92.23	0.11	0.13	0.03	0.05	19.24	0.48
15/11/2555 10:00 น.	93.02	0.03	0.02	0.00	0.00	19.31	0.19
15/11/2555 19:00 น.	93.40	0.02	0.01	0.00	0.00	19.61	0.23
16/11/2555 13:40 น.	94.17	0.00	0.00	0.09	0.04	14.99	0.70
16/11/2555 20:00 น.	94.44	0.00	0.00	0.20	0.01	12.09	0.28
17/11/2555 10:30 น.	95.04	0.00	0.00	0.31	0.01	5.80	1.25
17/11/2555 17:25 น.	95.33	0.03	0.03	0.21	0.05	3.94	1.20
18/11/2555 9:45 น.	96.01	0.26	0.02	0.13	0.02	3.16	0.65

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
18/11/2555 17:00 น.	96.31	0.27	0.01	0.12	0.02	3.11	0.77
19/11/2555 9:45 น.	97.01	0.23	0.05	0.11	0.01	3.20	0.68
19/11/2555 17:00 น.	97.31	0.19	0.04	0.12	0.01	3.23	0.71
20/11/2555 10:00 น.	98.02	0.11	0.04	0.10	0.02	3.21	0.69
21/11/2555 10:00 น.	99.02	0.05	0.02	0.05	0.04	3.08	0.69
22/11/2555 10:00 น.	100.02	0.03	0.01	0.03	0.02	3.20	0.70
24/11/2555 9:30 น.	102.00	0.02	0.01	0.01	0.01	3.02	0.75

ตารางที่ ค-2 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตของชุดการทดลองที่ 2 (บรรจุไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอล) จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
8/09/2555 15:00 น.	25.23	17.56	1.11	0.64	0.29	8.82	4.00
9/09/2555 9:30 น.	26.00	10.29	1.49	5.47	1.12	14.13	4.60
9/09/2555 17:00 น.	26.31	6.35	2.25	7.65	1.42	15.72	5.45
10/09/2555 9:20 น.	26.99	1.23	1.48	7.58	2.08	21.47	4.26
10/09/2555 16:30 น.	27.29	0.09	0.10	4.92	2.62	19.25	4.25
11/09/2555 9:30 น.	28.00	0.04	0.01	1.86	1.45	26.45	4.02
12/09/2555 9:35 น.	29.00	0.02	0.01	0.41	0.30	28.12	3.38
15/09/2555 10:00 น.	32.02	0.02	0.00	0.04	0.02	27.12	4.35
15/09/2555 17:20 น.	32.33	0.01	0.01	0.04	0.03	27.99	4.56
16/09/2555 10:00 น.	33.02	0.01	0.01	5.20	3.39	17.35	5.86
16/09/2555 17:00 น.	33.31	0.03	0.00	3.94	2.81	16.83	6.79
17/09/2555 9:40 น.	34.01	0.03	0.01	0.99	0.77	18.82	5.25
18/09/2555 9:30 น.	35.00	0.03	0.01	0.11	0.05	20.18	5.00
21/09/2555 10:15 น.	38.03	0.01	0.00	0.03	0.00	21.81	4.82
21/09/2555 19:00 น.	38.40	0.00	0.00	0.14	0.13	21.56	5.02
22/09/2555 11:00 น.	39.06	0.03	0.02	1.31	1.37	13.81	5.63
22/09/2555 18:00 น.	39.35	0.02	0.00	1.79	2.73	12.08	5.74
23/09/2555 11:15 น.	40.07	0.02	0.01	0.45	0.67	13.42	5.51
24/09/2555 11:15 น.	41.07	0.03	0.01	0.08	0.09	15.74	6.50
26/09/2555 9:10 น.	42.99	0.03	0.01	0.01	0.00	14.44	5.81
27/09/2555 9:20 น.	43.99	0.00	0.00	1.02	0.40	9.62	5.45
28/09/2555 9:25 น.	45.00	0.02	0.02	1.55	1.29	3.88	4.14
29/09/2555 9:00 น.	45.98	0.05	0.05	1.22	1.04	3.27	4.31
1/10/2555 10:00 น.	48.02	0.05	0.01	0.40	0.42	3.69	4.47
3/10/2555 10:20 น.	50.03	0.02	0.00	0.02	0.01	3.99	4.43
7/10/2555 15:00 น.	54.23	16.31	0.70	0.04	0.01	1.43	0.34
8/10/2555 10:00 น.	55.02	10.40	0.67	2.93	0.61	3.83	0.73
8/10/2555 18:00 น.	55.35	8.18	0.58	3.59	0.53	4.98	0.81
9/10/2555 10:00 น.	56.02	5.42	1.04	5.32	0.78	7.32	1.21
9/10/2555 17:30 น.	56.33	3.68	1.28	6.30	0.95	7.62	1.00
10/10/2555 10:00 น.	57.02	0.59	0.88	7.12	0.44	9.86	1.60

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
11/10/2555 10:20 น.	58.03	0.08	0.04	1.15	1.89	15.08	3.72
12/10/2555 10:30 น.	59.04	0.01	0.00	0.02	0.03	18.39	0.53
13/10/2555 11:15 น.	60.07	0.00	0.00	0.00	0.00	18.62	0.58
14/10/2555 11:20 น.	61.08	0.01	0.00	0.00	0.00	18.76	0.71
15/10/2555 11:40 น.	62.09	0.02	0.00	0.01	0.00	18.46	0.56
16/10/2555 11:30 น.	63.08	0.02	0.00	0.00	0.00	18.65	0.54
17/10/2555 15:30 น.	64.25	0.03	0.00	0.01	0.00	18.04	0.47
18/10/2555 10:15 น.	65.03	0.06	0.02	0.07	0.02	17.41	0.66
18/10/2555 17:00 น.	65.31	0.00	0.00	0.67	0.23	14.35	0.42
19/10/2555 10:40 น.	66.05	0.00	0.00	3.42	1.58	5.39	0.75
19/10/2555 17:00 น.	66.31	0.02	0.01	2.96	1.36	2.38	0.43
20/10/2555 9:45 น.	67.01	0.11	0.01	2.37	1.44	2.12	0.16
21/10/2555 10:30 น.	68.04	0.08	0.02	1.42	1.24	2.88	0.39
22/10/2555 9:50 น.	69.01	0.05	0.01	0.62	0.80	3.38	0.68
23/10/2555 10:00 น.	70.02	0.03	0.01	0.13	0.17	3.81	0.87
24/10/2555 10:00 น.	71.02	0.02	0.00	0.02	0.00	3.94	0.97
26/10/2555 10:30 น.	73.04	16.13	0.30	0.02	0.01	1.24	0.23
26/10/2555 18:00 น.	73.35	14.16	0.56	0.80	0.11	2.59	0.46
27/10/2555 9:10 น.	73.99	8.98	0.60	1.67	0.38	4.88	0.58
27/10/2555 17:10 น.	74.32	8.65	0.53	2.24	0.74	6.13	0.67
28/10/2555 9:15 น.	74.99	4.66	0.96	3.07	1.27	9.10	0.91
28/10/2555 17:15 น.	75.32	2.71	1.40	3.21	1.53	10.65	1.09
29/10/2555 17:00 น.	76.31	0.49	0.76	1.69	1.57	14.70	2.52
30/10/2555 10:00 น.	77.02	0.03	0.01	0.01	0.01	17.84	0.67
31/10/2555 15:30 น.	78.25	0.02	0.01	0.00	0.00	17.67	0.16
1/11/2555 10:00 น.	79.02	0.02	0.00	0.01	0.00	17.43	0.16
1/11/2555 17:00 น.	79.31	0.00	0.00	0.29	0.12	14.57	0.48
2/11/2555 10:30 น.	80.04	0.00	0.00	3.15	0.61	6.53	1.12
2/11/2555 18:15 น.	80.36	0.01	0.00	3.51	0.60	3.29	0.55
3/11/2555 9:45 น.	81.01	0.05	0.01	2.90	0.34	2.72	0.59
3/11/2555 17:40 น.	81.34	0.07	0.00	2.19	0.30	2.93	0.44
4/11/2555 9:45 น.	82.01	0.05	0.01	0.98	0.29	3.42	0.88
5/11/2555 9:35 น.	83.00	0.04	0.00	0.11	0.06	4.32	0.63
6/11/2555 10:15 น.	84.03	0.02	0.01	0.02	0.00	4.63	0.56
7/11/2555 9:30 น.	85.00	0.03	0.00	0.01	0.00	4.63	0.67
10/11/2555 10:20 น.	88.03	19.34	0.52	0.02	0.00	1.23	0.11
10/11/2555 18:00 น.	88.35	14.64	0.75	0.51	0.08	2.81	0.29
11/11/2555 10:40 น.	89.05	8.81	0.61	1.39	0.54	6.73	0.97
11/11/2555 18:15 น.	89.36	6.51	0.59	1.98	0.72	7.37	2.58
12/11/2555 9:20 น.	89.99	2.65	1.07	2.58	0.98	12.44	1.67
12/11/2555 18:00 น.	90.35	0.75	1.14	2.08	1.30	14.69	2.57
13/11/2555 9:20 น.	90.99	0.01	0.01	0.14	0.22	17.76	0.46
14/11/2555 15:00 น.	92.23	0.01	0.00	0.00	0.00	18.70	0.50
15/11/2555 10:00 น.	93.02	0.01	0.00	0.00	0.00	18.78	0.25
15/11/2555 19:00 น.	93.40	0.01	0.00	0.00	0.00	19.18	0.28
16/11/2555 13:40 น.	94.17	0.00	0.00	0.67	0.29	15.57	0.70
16/11/2555 20:00 น.	94.44	0.01	0.01	1.64	0.36	12.06	0.95
17/11/2555 10:30 น.	95.04	0.00	0.00	3.96	0.27	4.09	0.55
17/11/2555 17:25 น.	95.33	0.03	0.02	4.05	0.47	3.03	0.86

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
18/11/2555 9:45 น.	96.01	0.02	0.00	2.45	0.40	3.54	0.55
18/11/2555 17:00 น.	96.31	0.01	0.00	2.06	0.56	4.02	0.77
19/11/2555 9:45 น.	97.01	0.02	0.00	0.77	0.42	4.99	0.55
19/11/2555 17:00 น.	97.31	0.04	0.00	0.48	0.36	5.15	0.72
20/11/2555 10:00 น.	98.02	0.03	0.01	0.06	0.02	5.45	0.34
21/11/2555 10:00 น.	99.02	0.01	0.01	0.01	0.00	5.51	0.37
22/11/2555 10:00 น.	100.02	0.02	0.00	0.01	0.00	5.63	0.35
24/11/2555 9:30 น.	102.00	0.02	0.01	0.01	0.00	5.50	0.36

ตารางที่ ค-3 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตของชุดการทดลองที่ 3 (บรรจุหินพัมมิสบดเติมแอมโมเนียมคลอไรด์และเมทานอลพร้อมกัน และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอลลงไปอีกครั้ง) จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
8/09/2555 15:00 น.	25.23	18.71	0.36	0.16	0.23	2.49	0.48
9/09/2555 9:30 น.	26.00	13.73	0.79	0.14	0.14	0.76	0.15
9/09/2555 17:00 น.	26.31	12.75	0.59	0.22	0.36	0.87	0.44
10/09/2555 9:20 น.	26.99	8.81	3.23	2.96	2.69	4.24	1.46
10/09/2555 16:30 น.	27.29	4.84	3.95	4.16	3.69	6.44	2.58
11/09/2555 9:30 น.	28.00	1.90	2.57	3.23	1.82	10.80	3.56
12/09/2555 9:35 น.	29.00	0.04	0.03	0.32	0.53	13.69	0.83
15/09/2555 10:00 น.	32.02	0.03	0.01	0.01	0.00	16.19	0.91
15/09/2555 17:20 น.	32.33	0.01	0.00	0.03	0.03	16.22	0.76
16/09/2555 10:00 น.	33.02	0.03	0.00	0.07	0.09	12.86	1.50
16/09/2555 17:00 น.	33.31	0.03	0.00	0.01	0.00	12.85	1.29
17/09/2555 9:40 น.	34.01	0.02	0.01	0.01	0.00	12.76	1.37
18/09/2555 9:30 น.	35.00	0.02	0.01	0.00	0.00	13.10	1.47
21/09/2555 10:15 น.	38.03	0.01	0.01	0.01	0.00	13.98	1.26
21/09/2555 19:00 น.	38.40	0.00	0.00	0.07	0.05	13.47	1.35
22/09/2555 11:00 น.	39.06	0.02	0.00	0.02	0.01	10.10	2.13
22/09/2555 18:00 น.	39.35	0.01	0.00	0.00	0.00	9.66	2.15
23/09/2555 11:15 น.	40.07	0.00	0.00	0.00	0.00	10.19	2.06
24/09/2555 11:15 น.	41.07	0.02	0.00	0.00	0.00	11.60	1.98
26/09/2555 9:10 น.	42.99	0.02	0.00	0.00	0.00	10.72	2.27
27/09/2555 9:20 น.	43.99	0.00	0.00	0.22	0.07	7.39	2.32
28/09/2555 9:25 น.	45.00	0.05	0.05	0.85	0.88	2.46	1.28
29/09/2555 9:00 น.	45.98	0.08	0.06	0.61	0.80	2.18	1.30
1/10/2555 10:00 น.	48.02	0.09	0.04	0.23	0.36	2.49	1.51
3/10/2555 10:20 น.	50.03	0.04	0.00	0.05	0.07	2.81	1.64
7/10/2555 15:00 น.	54.23	17.03	0.49	0.01	0.00	1.27	0.17
8/10/2555 10:00 น.	55.02	12.25	0.82	0.19	0.10	0.73	0.04
8/10/2555 18:00 น.	55.35	12.60	0.77	0.05	0.03	0.52	0.12
9/10/2555 10:00 น.	56.02	11.49	1.14	0.19	0.17	1.51	0.79
9/10/2555 17:30 น.	56.33	10.27	1.37	0.41	0.36	2.13	1.44
10/10/2555 10:00 น.	57.02	8.50	3.16	0.71	0.72	4.16	2.63

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
11/10/2555 10:20 น.	58.03	4.03	4.26	0.32	0.06	9.81	5.18
12/10/2555 10:30 น.	59.04	1.86	3.11	0.14	0.23	12.92	4.95
13/10/2555 11:15 น.	60.07	0.61	1.05	0.18	0.31	14.82	2.25
14/10/2555 11:20 น.	61.08	0.02	0.01	0.01	0.00	16.08	1.06
15/10/2555 11:40 น.	62.09	0.03	0.01	0.00	0.00	15.64	0.95
16/10/2555 11:30 น.	63.08	0.03	0.00	0.00	0.00	15.95	1.11
17/10/2555 15:30 น.	64.25	0.04	0.00	0.00	0.00	15.41	0.95
18/10/2555 10:15 น.	65.03	0.07	0.03	0.03	0.02	13.97	0.90
18/10/2555 17:00 น.	65.31	0.01	0.00	0.11	0.05	11.99	0.71
19/10/2555 10:40 น.	66.05	0.02	0.03	0.74	0.35	6.77	0.45
19/10/2555 17:00 น.	66.31	0.02	0.01	0.97	0.42	4.19	0.17
20/10/2555 9:45 น.	67.01	0.14	0.01	0.72	0.39	3.46	0.27
21/10/2555 10:30 น.	68.04	0.15	0.03	0.39	0.32	3.50	0.20
22/10/2555 9:50 น.	69.01	0.09	0.02	0.19	0.20	3.60	0.32
23/10/2555 10:00 น.	70.02	0.05	0.01	0.10	0.11	3.75	0.42
24/10/2555 10:00 น.	71.02	0.05	0.01	0.04	0.04	3.84	0.47
26/10/2555 10:30 น.	73.04	17.88	0.07	0.01	0.00	1.05	0.03
26/10/2555 18:00 น.	73.35	16.09	0.79	0.04	0.01	1.60	0.25
27/10/2555 9:10 น.	73.99	11.51	0.60	0.01	0.01	0.67	0.03
27/10/2555 17:10 น.	74.32	13.13	0.58	0.01	0.00	0.60	0.09
28/10/2555 9:15 น.	74.99	11.82	0.81	0.04	0.02	1.29	0.66
28/10/2555 17:15 น.	75.32	10.70	1.13	0.07	0.03	1.76	0.85
29/10/2555 17:00 น.	76.31	9.14	1.11	0.20	0.04	4.73	1.50
30/10/2555 10:00 น.	77.02	4.79	2.08	0.25	0.03	9.52	2.22
31/10/2555 15:30 น.	78.25	1.09	1.16	0.18	0.16	13.93	1.30
1/11/2555 10:00 น.	79.02	0.09	0.07	0.03	0.05	15.85	0.48
1/11/2555 17:00 น.	79.31	0.04	0.03	0.01	0.01	15.07	0.07
2/11/2555 10:30 น.	80.04	0.02	0.02	0.02	0.00	13.10	0.21
2/11/2555 18:15 น.	80.36	0.00	0.00	0.05	0.01	11.23	0.15
3/11/2555 9:45 น.	81.01	0.00	0.00	0.47	0.18	6.12	0.61
3/11/2555 17:40 น.	81.34	0.02	0.01	0.46	0.04	3.02	0.79
4/11/2555 9:45 น.	82.01	0.15	0.06	0.20	0.05	2.05	0.33
5/11/2555 9:35 น.	83.00	0.19	0.05	0.16	0.06	2.02	0.37
6/11/2555 10:15 น.	84.03	0.08	0.01	0.08	0.02	1.98	0.47
7/11/2555 9:30 น.	85.00	0.04	0.00	0.02	0.00	1.93	0.40
10/11/2555 10:20 น.	88.03	19.95	0.09	0.01	0.00	1.07	0.08
10/11/2555 18:00 น.	88.35	16.06	0.76	0.03	0.01	1.09	0.12
11/11/2555 10:40 น.	89.05	12.41	1.01	0.03	0.02	0.79	0.28
11/11/2555 18:15 น.	89.36	12.71	0.33	0.01	0.00	0.60	0.15
12/11/2555 9:20 น.	89.99	12.75	0.36	0.01	0.00	0.91	0.21
12/11/2555 18:00 น.	90.35	12.01	0.39	0.04	0.01	1.14	0.29
13/11/2555 9:20 น.	90.99	11.29	0.88	0.14	0.04	3.09	0.95
14/11/2555 15:00 น.	92.23	6.57	1.53	0.23	0.04	7.67	1.96
15/11/2555 10:00 น.	93.02	3.09	2.12	0.30	0.11	11.97	2.96
15/11/2555 19:00 น.	93.40	1.72	1.78	0.26	0.22	14.34	3.01
16/11/2555 13:40 น.	94.17	0.32	0.47	0.11	0.18	15.92	1.52
16/11/2555 20:00 น.	94.44	0.13	0.18	0.03	0.05	16.37	0.93
17/11/2555 10:30 น.	95.04	0.04	0.04	0.00	0.01	15.60	0.41
17/11/2555 17:25 น.	95.33	0.02	0.02	0.00	0.00	16.45	0.61

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
18/11/2555 9:45 น.	96.01	0.00	0.00	0.02	0.00	14.90	0.57
18/11/2555 17:00 น.	96.31	0.02	0.03	0.08	0.02	13.00	0.56
19/11/2555 9:45 น.	97.01	0.00	0.00	0.20	0.05	8.40	0.66
19/11/2555 17:00 น.	97.31	0.01	0.01	0.18	0.10	6.97	0.91
20/11/2555 10:00 น.	98.02	0.23	0.08	0.10	0.07	5.97	0.60
21/11/2555 10:00 น.	99.02	0.26	0.10	0.16	0.11	5.65	0.64
22/11/2555 10:00 น.	100.02	0.16	0.10	0.17	0.07	5.73	0.68
24/11/2555 9:30 น.	102.00	0.05	0.05	0.03	0.01	5.55	0.61

ตารางที่ ค-4 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตของชุดการทดลองที่ 4 (บรรจุไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์และเมทานอลพร้อมกัน และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอลลงไปอีกครั้ง) จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
8/09/2555 15:00 น.	25.23	18.86	0.71	0.29	0.22	9.26	4.40
9/09/2555 9:30 น.	26.00	13.92	0.37	1.56	0.28	9.35	3.12
9/09/2555 17:00 น.	26.31	12.43	0.13	4.06	0.71	5.84	3.01
10/09/2555 9:20 น.	26.99	4.58	1.19	8.12	0.32	9.85	2.53
10/09/2555 16:30 น.	27.29	0.38	0.33	8.17	0.26	11.99	3.11
11/09/2555 9:30 น.	28.00	0.06	0.01	2.21	0.83	19.55	2.91
12/09/2555 9:35 น.	29.00	0.06	0.01	0.18	0.21	20.91	2.57
15/09/2555 10:00 น.	32.02	0.03	0.01	0.02	0.01	20.96	2.16
15/09/2555 17:20 น.	32.33	0.01	0.01	0.07	0.03	20.98	2.01
16/09/2555 10:00 น.	33.02	0.03	0.01	3.38	2.75	12.72	4.46
16/09/2555 17:00 น.	33.31	0.04	0.00	1.63	1.50	13.72	3.59
17/09/2555 9:40 น.	34.01	0.03	0.01	0.17	0.24	14.78	2.25
18/09/2555 9:30 น.	35.00	0.03	0.00	0.03	0.02	15.40	2.44
21/09/2555 10:15 น.	38.03	0.01	0.00	0.01	0.01	15.99	2.04
21/09/2555 19:00 น.	38.40	0.00	0.00	0.09	0.06	16.59	2.82
22/09/2555 11:00 น.	39.06	0.03	0.01	0.53	0.41	11.32	1.73
22/09/2555 18:00 น.	39.35	0.04	0.01	0.09	0.09	11.23	2.31
23/09/2555 11:15 น.	40.07	0.02	0.00	0.03	0.02	11.86	2.14
24/09/2555 11:15 น.	41.07	0.04	0.00	0.03	0.02	13.48	1.76
26/09/2555 9:10 น.	42.99	0.04	0.01	0.02	0.01	13.14	1.80
27/09/2555 9:20 น.	43.99	0.00	0.00	0.52	0.16	10.46	1.51
28/09/2555 9:25 น.	45.00	0.03	0.01	1.91	0.84	2.27	2.02
29/09/2555 9:00 น.	45.98	0.14	0.04	1.48	0.76	2.03	1.90
1/10/2555 10:00 น.	48.02	0.11	0.04	0.69	0.64	2.57	1.80
3/10/2555 10:20 น.	50.03	0.04	0.01	0.02	0.02	3.29	2.32
7/10/2555 15:00 น.	54.23	17.00	0.48	0.01	0.00	1.31	0.16
8/10/2555 10:00 น.	55.02	13.79	1.12	0.10	0.02	1.43	0.46

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
8/10/2555 18:00 น.	55.35	12.95	0.77	0.08	0.09	0.52	0.10
9/10/2555 10:00 น.	56.02	12.61	0.81	0.11	0.18	0.84	0.21
9/10/2555 17:30 น.	56.33	12.15	0.91	0.30	0.49	0.82	0.46
10/10/2555 10:00 น.	57.02	10.54	2.35	0.72	1.05	1.65	1.36
11/10/2555 10:20 น.	58.03	8.87	4.31	0.75	0.68	4.43	3.95
12/10/2555 10:30 น.	59.04	5.30	4.58	0.23	0.18	7.89	5.44
13/10/2555 11:15 น.	60.07	3.85	3.49	0.10	0.09	10.45	4.30
14/10/2555 11:20 น.	61.08	1.27	1.90	0.17	0.14	13.40	2.76
15/10/2555 11:40 น.	62.09	0.08	0.08	0.06	0.08	14.77	0.68
16/10/2555 11:30 น.	63.08	0.03	0.01	0.01	0.00	15.27	0.41
17/10/2555 15:30 น.	64.25	0.06	0.02	0.01	0.01	14.84	0.31
18/10/2555 10:15 น.	65.03	0.05	0.02	0.06	0.04	14.02	0.58
18/10/2555 17:00 น.	65.31	0.01	0.00	0.49	0.31	11.94	0.76
19/10/2555 10:40 น.	66.05	0.01	0.00	2.77	1.42	3.56	2.00
19/10/2555 17:00 น.	66.31	0.06	0.00	2.37	1.36	2.89	1.50
20/10/2555 9:45 น.	67.01	0.10	0.02	1.45	1.07	3.53	1.31
21/10/2555 10:30 น.	68.04	0.06	0.01	0.17	0.22	4.52	0.62
22/10/2555 9:50 น.	69.01	0.05	0.01	0.02	0.00	4.53	0.48
23/10/2555 10:00 น.	70.02	0.03	0.00	0.01	0.00	4.65	0.48
24/10/2555 10:00 น.	71.02	0.02	0.00	0.01	0.00	4.74	0.43
26/10/2555 10:30 น.	73.04	17.12	0.21	0.01	0.00	1.26	0.09
26/10/2555 18:00 น.	73.35	16.29	0.21	0.03	0.01	1.82	0.23
27/10/2555 9:10 น.	73.99	12.49	1.42	0.08	0.03	1.34	0.48
27/10/2555 17:10 น.	74.32	13.80	0.56	0.04	0.06	0.45	0.07
28/10/2555 9:15 น.	74.99	11.37	1.42	0.11	0.18	1.21	1.18
28/10/2555 17:15 น.	75.32	9.55	2.02	0.14	0.19	1.90	1.84
29/10/2555 17:00 น.	76.31	7.82	2.86	0.18	0.12	4.93	2.74
30/10/2555 10:00 น.	77.02	3.82	3.19	0.09	0.08	9.36	3.96
31/10/2555 15:30 น.	78.25	0.95	0.95	0.10	0.09	12.86	1.55
1/11/2555 10:00 น.	79.02	0.06	0.03	0.01	0.01	14.44	0.84
1/11/2555 17:00 น.	79.31	0.06	0.05	0.01	0.01	13.91	0.65
2/11/2555 10:30 น.	80.04	0.06	0.09	0.44	0.34	11.44	1.70
2/11/2555 18:15 น.	80.36	0.02	0.04	1.17	0.68	8.50	2.46
3/11/2555 9:45 น.	81.01	0.04	0.03	1.59	0.97	3.10	1.19
3/11/2555 17:40 น.	81.34	0.08	0.04	1.40	0.99	2.47	0.34
4/11/2555 9:45 น.	82.01	0.11	0.05	0.40	0.34	2.95	1.12
5/11/2555 9:35 น.	83.00	0.06	0.01	0.02	0.01	3.37	0.92
6/11/2555 10:15 น.	84.03	0.03	0.01	0.01	0.01	3.54	0.98
7/11/2555 9:30 น.	85.00	0.04	0.00	0.01	0.00	3.59	0.98
10/11/2555 10:20 น.	88.03	19.84	0.63	0.01	0.00	1.20	0.06
10/11/2555 18:00 น.	88.35	16.34	0.44	0.01	0.00	1.41	0.13
11/11/2555 10:40 น.	89.05	12.73	0.43	0.01	0.01	0.53	0.06
11/11/2555 18:15 น.	89.36	12.36	0.39	0.00	0.00	0.52	0.06
12/11/2555 9:20 น.	89.99	12.38	0.19	0.01	0.01	0.78	0.05
12/11/2555 18:00 น.	90.35	11.60	0.26	0.04	0.03	1.13	0.28
13/11/2555 9:20 น.	90.99	11.15	0.78	0.05	0.02	2.48	0.61
14/11/2555 15:00 น.	92.23	7.64	1.71	0.09	0.03	5.36	1.97
15/11/2555 10:00 น.	93.02	3.60	1.70	0.11	0.04	10.14	1.69
15/11/2555 19:00 น.	93.40	2.09	2.05	0.08	0.04	12.28	2.08
16/11/2555 13:40 น.	94.17	0.44	0.66	0.02	0.02	14.09	1.49

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/11/2555 20:00 น.	94.44	0.47	0.56	0.02	0.03	14.53	0.72
17/11/2555 10:30 น.	95.04	0.11	0.16	0.01	0.01	14.28	0.66
17/11/2555 17:25 น.	95.33	0.07	0.08	0.00	0.00	14.91	0.35
18/11/2555 9:45 น.	96.01	0.06	0.10	0.23	0.21	12.47	0.99
18/11/2555 17:00 น.	96.31	0.01	0.02	0.93	0.61	9.90	1.61
19/11/2555 9:45 น.	97.01	0.02	0.03	2.02	0.35	4.09	0.97
19/11/2555 17:00 น.	97.31	0.07	0.03	1.75	0.27	4.03	0.95
20/11/2555 10:00 น.	98.02	0.14	0.10	1.10	0.77	4.50	0.99
21/11/2555 10:00 น.	99.02	0.06	0.08	0.11	0.09	5.11	0.79
22/11/2555 10:00 น.	100.02	0.04	0.02	0.01	0.00	5.31	0.74
24/11/2555 9:30 น.	102.00	0.03	0.00	0.00	0.00	5.15	0.69

ตารางที่ ค-5 ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิของชุดการทดลองที่ 1 (บรรจุหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอล) จำนวน 3 ถังทดลอง

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
8/09/2555 15:00 น.	25.23	120.00	0.00	3.93	0.40	7.72	0.02	29.63	0.06
9/09/2555 9:30 น.	26.00	116.67	11.55	2.93	0.25	7.51	0.04	30.53	0.31
10/09/2555 9:20 น.	26.99	60.00	10.00	2.30	0.30	7.01	0.09	30.37	0.25
11/09/2555 9:30 น.	28.00	40.00	10.00	6.27	0.06	7.34	0.05	30.87	0.06
12/09/2555 9:35 น.	29.00	40.00	10.00	4.83	0.32	7.37	0.08	30.57	0.06
15/09/2555 10:00 น.	32.02	30.00	10.00	6.10	0.17	7.41	0.10	29.97	0.06
16/09/2555 10:00 น.	33.02	46.67	11.55	3.20	0.26	7.09	0.06	29.37	0.06
17/09/2555 9:40 น.	34.01	46.67	11.55	5.53	0.32	7.28	0.06	28.80	0.10
18/09/2555 9:30 น.	35.00	40.00	10.00	5.50	0.10	7.36	0.03	29.30	0.10
21/09/2555 10:15 น.	38.03	40.00	0.00	5.93	0.40	7.50	0.04	29.50	0.00
22/09/2555 11:00 น.	39.06	66.67	15.28	3.40	0.61	7.12	0.05	31.23	0.12
23/09/2555 11:15 น.	40.07	76.67	11.55	4.27	0.23	7.09	0.06	31.77	0.25
24/09/2555 11:15 น.	41.07	66.67	11.55	5.10	0.52	7.10	0.06	31.03	0.31
26/09/2555 9:10 น.	42.99	66.67	5.77	4.27	0.12	7.09	0.06	30.27	0.32
27/09/2555 9:20 น.	43.99	96.67	15.28	0.57	0.25	7.11	0.06	28.37	0.06
28/09/2555 9:25 น.	45.00	110.00	17.32	1.87	0.86	7.07	0.03	26.77	0.06
29/09/2555 9:00 น.	45.98	93.33	11.55	1.70	0.20	7.15	0.06	26.80	0.00
1/10/2555 10:00 น.	48.02	96.67	15.28	2.07	0.21	7.08	0.03	28.37	0.06
3/10/2555 10:20 น.	50.03	90.00	17.32	2.43	0.35	7.20	0.08	29.03	0.06
7/10/2555 15:00 น.	54.23	120.00	0.00	4.43	0.21	7.14	0.05	29.13	0.38
8/10/2555 10:00 น.	55.02	93.33	11.55	2.57	0.47	7.12	0.14	29.27	0.32
9/10/2555 10:00 น.	56.02	56.67	23.09	2.37	0.38	6.71	0.33	29.73	0.31
10/10/2555 10:00 น.	57.02	30.00	0.00	3.53	2.41	6.45	0.03	30.00	0.17
11/10/2555 10:20 น.	58.03	23.33	5.77	4.87	0.75	6.43	0.24	31.27	0.15
12/10/2555 10:30 น.	59.04	20.00	0.00	5.70	0.35	6.52	0.17	31.10	0.00

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
13/10/2555 11:15 น.	60.07	20.00	0.00	5.20	0.30	6.66	0.15	32.17	0.42
14/10/2555 11:20 น.	61.08	23.33	5.77	5.27	0.23	6.63	0.14	32.83	0.06
15/10/2555 11:40 น.	62.09	23.33	5.77	5.07	0.12	6.70	0.13	32.40	0.26
16/10/2555 11:30 น.	63.08	23.33	5.77	5.57	0.06	6.84	0.07	32.03	0.06
17/10/2555 15:30 น.	64.25	23.33	5.77	4.77	0.15	6.70	0.05	31.73	0.40
18/10/2555 10:15 น.	65.03	30.00	0.00	2.67	0.12	6.95	0.02	30.93	0.25
19/10/2555 10:40 น.	66.05	60.00	0.00	0.23	0.06	7.01	0.04	31.13	0.15
20/10/2555 9:45 น.	67.01	70.00	10.00	1.30	0.30	7.29	0.01	30.67	0.06
21/10/2555 10:30 น.	68.04	70.00	10.00	1.53	0.15	7.08	0.06	31.47	0.06
22/10/2555 9:50 น.	69.01	63.33	5.77	1.53	0.12	7.10	0.04	31.53	0.06
23/10/2555 10:00 น.	70.02	70.00	0.00	1.97	0.06	7.13	0.06	31.20	0.00
24/10/2555 10:00 น.	71.02	66.67	5.77	2.20	0.17	7.16	0.05	30.77	0.06
26/10/2555 10:30 น.	73.04	120.00	0.00	4.20	0.10	7.08	0.01	30.33	0.12
27/10/2555 9:10 น.	73.99	90.00	10.00	1.77	0.06	7.01	0.05	32.90	0.10
28/10/2555 9:15 น.	74.99	63.33	5.77	1.37	0.06	6.75	0.09	33.23	0.21
29/10/2555 17:00 น.	76.31	23.33	5.77	1.37	0.21	6.22	0.13	34.07	0.32
30/10/2555 10:00 น.	77.02	20.00	0.00	4.30	2.18	6.19	0.03	32.13	0.06
31/10/2555 15:30 น.	78.25	20.00	0.00	3.07	0.23	6.39	0.05	30.83	0.12
1/11/2555 10:00 น.	79.02	20.00	0.00	2.30	0.20	6.37	0.05	29.40	0.10
2/11/2555 10:30 น.	80.04	40.00	0.00	0.10	0.00	6.71	0.03	30.30	0.17
3/11/2555 9:45 น.	81.01	66.67	5.77	0.47	0.25	7.16	0.01	30.40	0.44
4/11/2555 9:45 น.	82.01	66.67	5.77	0.87	0.06	7.00	0.04	30.63	0.15
5/11/2555 9:35 น.	83.00	63.33	5.77	1.33	0.21	7.04	0.02	30.47	0.12
6/11/2555 10:15 น.	84.03	56.67	5.77	1.57	0.15	7.17	0.01	30.63	0.15
7/11/2555 9:30 น.	85.00	56.67	5.77	2.20	0.17	6.96	0.03	30.60	0.20
10/11/2555 10:20 น.	88.03	120.00	0.00	1.73	0.31	6.97	0.02	29.73	0.15
11/11/2555 10:40 น.	89.05	73.33	5.77	1.87	0.42	6.78	0.06	32.67	0.06
12/11/2555 9:20 น.	89.99	46.67	5.77	1.33	0.21	6.44	0.03	32.27	0.15
13/11/2555 9:20 น.	90.99	20.00	10.00	1.37	0.61	5.79	0.19	30.80	0.10
14/11/2555 15:00 น.	92.23	10.00	0.00	4.03	1.68	6.21	0.04	32.83	0.50
15/11/2555 10:00 น.	93.02	10.00	0.00	3.90	0.50	6.26	0.02	32.97	0.15
16/11/2555 13:40 น.	94.17	26.67	5.77	0.20	0.17	6.31	0.00	31.90	0.10
17/11/2555 10:30 น.	95.04	50.00	0.00	0.10	0.00	6.66	0.05	30.77	0.25
18/11/2555 9:45 น.	96.01	60.00	0.00	0.73	0.15	6.73	0.06	29.13	0.21
19/11/2555 9:45 น.	97.01	70.00	0.00	1.30	0.17	6.77	0.02	29.50	0.00
20/11/2555 10:00 น.	98.02	53.33	5.77	1.83	0.35	7.24	0.03	29.27	0.15
21/11/2555 10:00 น.	99.02	60.00	0.00	2.23	0.29	7.00	0.04	28.40	0.10
22/11/2555 10:00 น.	100.02	53.33	5.77	2.53	0.12	7.03	0.02	29.77	0.15
24/11/2555 9:30 น.	102.00	53.33	5.77	2.60	0.20	7.01	0.03	30.17	0.06

ตารางที่ ค-6 ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิของชุดการทดลองที่ 2 (บรรจุไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอล) จำนวน 3 ถังทดลอง

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
8/09/2555 15:00 น.	25.23	120.00	0.00	2.40	0.17	7.47	0.02	29.57	0.06
9/09/2555 9:30 น.	26.00	116.67	15.28	1.70	0.10	7.36	0.02	30.60	0.10
10/09/2555 9:20 น.	26.99	63.33	15.28	3.17	0.85	7.27	0.09	30.33	0.15
11/09/2555 9:30 น.	28.00	60.00	10.00	4.57	0.55	7.61	0.08	30.83	0.06
12/09/2555 9:35 น.	29.00	60.00	10.00	3.37	0.55	7.52	0.03	30.47	0.06
15/09/2555 10:00 น.	32.02	53.33	11.55	5.23	0.50	7.69	0.03	29.73	0.12
16/09/2555 10:00 น.	33.02	90.00	20.00	1.07	1.42	7.25	0.15	29.27	0.15
17/09/2555 9:40 น.	34.01	83.33	15.28	4.73	0.25	7.59	0.13	28.67	0.06
18/09/2555 9:30 น.	35.00	76.67	15.28	3.83	0.38	7.59	0.09	29.30	0.17
21/09/2555 10:15 น.	38.03	80.00	17.32	4.33	0.51	7.68	0.09	29.30	0.10
22/09/2555 11:00 น.	39.06	100.00	10.00	2.50	1.87	7.35	0.09	31.13	0.15
23/09/2555 11:15 น.	40.07	100.00	17.32	3.07	0.90	7.44	0.09	31.87	0.06
24/09/2555 11:15 น.	41.07	96.67	5.77	3.87	0.99	7.52	0.08	31.50	0.26
26/09/2555 9:10 น.	42.99	113.33	15.28	3.37	0.42	7.51	0.09	30.43	0.15
27/09/2555 9:20 น.	43.99	120.00	10.00	0.33	0.06	7.42	0.03	28.43	0.12
28/09/2555 9:25 น.	45.00	130.00	0.00	0.70	0.50	7.43	0.09	26.80	0.10
29/09/2555 9:00 น.	45.98	120.00	10.00	0.67	0.06	7.41	0.08	26.90	0.10
1/10/2555 10:00 น.	48.02	120.00	17.32	0.87	0.23	7.35	0.09	28.43	0.12
3/10/2555 10:20 น.	50.03	113.33	5.77	1.57	0.32	7.39	0.05	29.17	0.06
7/10/2555 15:00 น.	54.23	120.00	0.00	2.93	0.38	7.13	0.04	29.10	0.00
8/10/2555 10:00 น.	55.02	80.00	0.00	1.33	0.15	7.13	0.01	29.23	0.21
9/10/2555 10:00 น.	56.02	50.00	0.00	1.33	0.21	6.89	0.02	29.80	0.17
10/10/2555 10:00 น.	57.02	30.00	0.00	1.43	0.21	6.70	0.04	30.00	0.20
11/10/2555 10:20 น.	58.03	33.33	5.77	2.80	1.54	6.89	0.06	31.20	0.17
12/10/2555 10:30 น.	59.04	30.00	0.00	3.43	0.60	6.94	0.05	30.93	0.12
13/10/2555 11:15 น.	60.07	30.00	0.00	4.03	0.38	7.03	0.07	32.30	0.10
14/10/2555 11:20 น.	61.08	36.67	5.77	4.23	0.15	6.99	0.05	32.63	0.06
15/10/2555 11:40 น.	62.09	33.33	5.77	3.93	0.51	7.07	0.06	32.33	0.15
16/10/2555 11:30 น.	63.08	33.33	5.77	4.03	0.38	7.13	0.03	31.87	0.15
17/10/2555 15:30 น.	64.25	33.33	5.77	4.70	0.10	6.92	0.05	32.23	0.12
18/10/2555 10:15 น.	65.03	40.00	0.00	1.67	0.25	7.05	0.02	30.63	0.06
19/10/2555 10:40 น.	66.05	73.33	15.28	0.20	0.00	7.15	0.02	31.00	0.10
20/10/2555 9:45 น.	67.01	80.00	0.00	0.50	0.20	7.25	0.03	30.77	0.06
21/10/2555 10:30 น.	68.04	83.33	15.28	0.80	0.10	7.19	0.03	31.57	0.06
22/10/2555 9:50 น.	69.01	66.67	5.77	0.77	0.12	7.22	0.02	31.63	0.12
23/10/2555 10:00 น.	70.02	76.67	5.77	1.30	0.46	7.26	0.03	31.33	0.15
24/10/2555 10:00 น.	71.02	73.33	5.77	1.13	0.15	7.31	0.03	31.03	0.12
26/10/2555 10:30 น.	73.04	120.00	0.00	3.90	0.10	7.08	0.02	29.93	0.06
27/10/2555 9:10 น.	73.99	83.33	5.77	1.03	0.21	7.04	0.04	32.67	0.12
28/10/2555 9:15 น.	74.99	56.67	15.28	0.73	0.15	6.82	0.09	33.17	0.21
29/10/2555 17:00 น.	76.31	26.67	5.77	1.50	0.70	6.46	0.04	33.70	0.44
30/10/2555 10:00 น.	77.02	23.33	5.77	4.13	1.27	6.62	0.04	31.73	0.15

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
31/10/2555 15:30 น.	78.25	20.00	0.00	3.23	0.40	6.84	0.01	30.77	0.15
1/11/2555 10:00 น.	79.02	26.67	5.77	1.57	0.25	6.72	0.03	29.43	0.15
2/11/2555 10:30 น.	80.04	50.00	0.00	0.10	0.00	6.92	0.05	30.03	0.06
3/11/2555 9:45 น.	81.01	63.33	5.77	0.80	0.00	7.26	0.02	30.13	0.06
4/11/2555 9:45 น.	82.01	63.33	5.77	0.60	0.00	7.13	0.02	30.53	0.12
5/11/2555 9:35 น.	83.00	63.33	5.77	0.87	0.06	7.22	0.02	30.47	0.06
6/11/2555 10:15 น.	84.03	56.67	5.77	0.97	0.06	7.19	0.01	30.53	0.06
7/11/2555 9:30 น.	85.00	60.00	10.00	1.13	0.06	7.07	0.03	30.47	0.06
10/11/2555 10:20 น.	88.03	120.00	0.00	1.80	0.17	7.00	0.01	29.77	0.12
11/11/2555 10:40 น.	89.05	63.33	5.77	0.83	0.29	6.80	0.03	32.37	0.12
12/11/2555 9:20 น.	89.99	30.00	10.00	0.60	0.10	6.34	0.05	32.20	0.20
13/11/2555 9:20 น.	90.99	23.33	5.77	3.47	1.29	6.28	0.20	30.87	0.25
14/11/2555 15:00 น.	92.23	20.00	0.00	4.30	0.17	6.32	0.08	33.53	0.06
15/11/2555 10:00 น.	93.02	26.67	5.77	3.97	0.21	6.52	0.05	32.80	0.10
16/11/2555 13:40 น.	94.17	30.00	0.00	0.33	0.06	6.46	0.06	31.67	0.06
17/11/2555 10:30 น.	95.04	56.67	5.77	0.10	0.00	6.83	0.03	30.87	0.15
18/11/2555 9:45 น.	96.01	60.00	0.00	0.50	0.00	6.91	0.05	29.43	0.12
19/11/2555 9:45 น.	97.01	60.00	0.00	0.70	0.00	6.93	0.03	29.57	0.15
20/11/2555 10:00 น.	98.02	66.67	5.77	1.00	0.20	7.24	0.02	29.57	0.15
21/11/2555 10:00 น.	99.02	56.67	5.77	1.27	0.21	7.12	0.03	28.63	0.12
22/11/2555 10:00 น.	100.02	63.33	5.77	1.33	0.25	7.11	0.03	30.10	0.10
24/11/2555 9:30 น.	102.00	56.67	5.77	1.83	0.12	7.12	0.01	30.37	0.15

ตารางที่ ค-7 ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิของชุดการทดลองที่ 3 (บรรจุหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์และเมทานอลพร้อมกัน และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอลลงไปอีกครั้ง) จำนวน 3 ถังทดลอง

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
8/09/2555 15:00 น.	25.23	120.00	0.00	3.50	0.17	7.67	0.01	29.37	0.06
9/09/2555 9:30 น.	26.00	150.00	0.00	0.33	0.32	7.64	0.03	30.73	0.06
10/09/2555 9:20 น.	26.99	116.67	15.28	3.03	0.31	7.47	0.18	30.43	0.06
11/09/2555 9:30 น.	28.00	70.00	26.46	3.53	1.62	7.44	0.22	30.83	0.06
12/09/2555 9:35 น.	29.00	53.33	5.77	3.57	1.57	7.48	0.13	30.60	0.10
15/09/2555 10:00 น.	32.02	50.00	0.00	5.83	0.06	7.67	0.01	29.87	0.06
16/09/2555 10:00 น.	33.02	70.00	10.00	4.23	1.02	7.47	0.02	29.30	0.10
17/09/2555 9:40 น.	34.01	63.33	5.77	5.57	0.29	7.61	0.01	28.90	0.10
18/09/2555 9:30 น.	35.00	56.67	5.77	5.53	0.12	7.67	0.01	29.33	0.12
21/09/2555 10:15 น.	38.03	56.67	11.55	6.00	0.17	7.75	0.02	29.43	0.12
22/09/2555 11:00 น.	39.06	76.67	11.55	4.13	0.71	7.28	0.04	31.13	0.12
23/09/2555 11:15 น.	40.07	63.33	5.77	4.87	0.25	7.37	0.03	31.83	0.12

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
24/09/2555 11:15 น.	41.07	70.00	10.00	5.33	0.21	7.33	0.05	31.73	0.12
26/09/2555 9:10 น.	42.99	86.67	11.55	3.57	0.15	7.39	0.03	30.57	0.15
27/09/2555 9:20 น.	43.99	90.00	0.00	0.83	0.57	7.34	0.01	28.33	0.06
28/09/2555 9:25 น.	45.00	103.33	5.77	1.57	1.21	7.40	0.02	26.70	0.00
29/09/2555 9:00 น.	45.98	80.00	0.00	1.63	0.64	7.42	0.06	26.73	0.06
1/10/2555 10:00 น.	48.02	90.00	10.00	2.37	0.38	7.39	0.01	28.30	0.00
3/10/2555 10:20 น.	50.03	90.00	10.00	3.07	0.06	7.45	0.01	29.03	0.06
7/10/2555 15:00 น.	54.23	120.00	0.00	4.80	0.10	7.16	0.02	28.90	0.00
8/10/2555 10:00 น.	55.02	116.67	5.77	0.97	0.75	7.20	0.08	29.40	0.17
9/10/2555 10:00 น.	56.02	93.33	11.55	1.77	1.47	7.02	0.09	30.00	0.10
10/10/2555 10:00 น.	57.02	80.00	10.00	1.87	0.35	6.89	0.21	30.20	0.17
11/10/2555 10:20 น.	58.03	60.00	26.46	2.23	0.50	6.75	0.15	31.33	0.12
12/10/2555 10:30 น.	59.04	46.67	11.55	4.00	1.54	6.74	0.21	31.10	0.17
13/10/2555 11:15 น.	60.07	36.67	5.77	3.80	1.73	6.75	0.03	32.57	0.25
14/10/2555 11:20 น.	61.08	40.00	0.00	4.83	0.93	6.79	0.08	32.70	0.26
15/10/2555 11:40 น.	62.09	36.67	5.77	4.77	0.42	6.95	0.02	32.47	0.15
16/10/2555 11:30 น.	63.08	33.33	5.77	5.17	0.15	7.03	0.01	31.97	0.15
17/10/2555 15:30 น.	64.25	40.00	0.00	4.70	0.17	6.96	0.02	32.67	0.06
18/10/2555 10:15 น.	65.03	40.00	10.00	2.50	0.36	7.07	0.01	30.53	0.06
19/10/2555 10:40 น.	66.05	63.33	5.77	0.23	0.06	7.12	0.02	30.90	0.00
20/10/2555 9:45 น.	67.01	63.33	5.77	1.43	0.15	7.25	0.01	30.70	0.00
21/10/2555 10:30 น.	68.04	70.00	0.00	1.73	0.06	7.22	0.02	31.37	0.06
22/10/2555 9:50 น.	69.01	66.67	11.55	1.73	0.12	7.26	0.01	31.40	0.00
23/10/2555 10:00 น.	70.02	66.67	5.77	2.23	0.23	7.27	0.01	31.17	0.06
24/10/2555 10:00 น.	71.02	70.00	10.00	2.17	0.15	7.33	0.01	30.83	0.06
26/10/2555 10:30 น.	73.04	120.00	0.00	4.90	0.17	7.07	0.02	29.93	0.15
27/10/2555 9:10 น.	73.99	110.00	0.00	0.20	0.00	7.11	0.01	32.83	0.12
28/10/2555 9:15 น.	74.99	100.00	10.00	1.03	0.12	7.09	0.03	33.57	0.12
29/10/2555 17:00 น.	76.31	83.33	5.77	1.93	0.21	6.85	0.17	34.30	0.10
30/10/2555 10:00 น.	77.02	50.00	10.00	1.93	0.12	6.60	0.05	32.10	0.10
31/10/2555 15:30 น.	78.25	26.67	5.77	2.43	1.37	6.70	0.14	31.13	0.15
1/11/2555 10:00 น.	79.02	20.00	0.00	4.13	1.17	6.57	0.12	31.07	0.15
2/11/2555 10:30 น.	80.04	30.00	0.00	1.33	0.06	6.87	0.06	30.20	0.00
3/11/2555 9:45 น.	81.01	46.67	5.77	0.20	0.00	7.15	0.07	30.10	0.00
4/11/2555 9:45 น.	82.01	60.00	0.00	0.63	0.23	7.16	0.01	30.43	0.06
5/11/2555 9:35 น.	83.00	60.00	0.00	1.07	0.15	7.23	0.02	30.37	0.06
6/11/2555 10:15 น.	84.03	53.33	5.77	1.27	0.32	7.22	0.01	30.47	0.06
7/11/2555 9:30 น.	85.00	53.33	5.77	2.00	0.17	7.07	0.03	30.33	0.06
10/11/2555 10:20 น.	88.03	120.00	0.00	2.70	0.50	7.01	0.05	29.73	0.15
11/11/2555 10:40 น.	89.05	93.33	5.77	0.70	0.36	6.98	0.05	32.57	0.06
12/11/2555 9:20 น.	89.99	93.33	11.55	1.30	0.66	6.82	0.03	32.33	0.21
13/11/2555 9:20 น.	90.99	80.00	0.00	2.23	0.06	7.01	0.04	31.07	0.06
14/11/2555 15:00 น.	92.23	53.33	11.55	1.87	0.21	6.43	0.08	33.77	0.12
15/11/2555 10:00 น.	93.02	40.00	10.00	1.90	0.10	6.28	0.25	32.90	0.10
16/11/2555 13:40 น.	94.17	20.00	0.00	4.27	1.59	6.32	0.06	33.63	0.06
17/11/2555 10:30 น.	95.04	20.00	0.00	4.93	0.67	6.62	0.15	32.60	0.17
18/11/2555 9:45 น.	96.01	20.00	0.00	1.27	0.32	6.73	0.05	29.53	0.06
19/11/2555 9:45 น.	97.01	43.33	5.77	0.10	0.00	6.77	0.02	29.53	0.06

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
20/11/2555 10:00 น.	98.02	50.00	0.00	0.63	0.06	7.16	0.02	29.43	0.06
21/11/2555 10:00 น.	99.02	53.33	5.77	1.57	0.38	7.06	0.02	28.50	0.00
22/11/2555 10:00 น.	100.02	50.00	0.00	1.60	0.10	7.09	0.02	30.07	0.06
24/11/2555 9:30 น.	102.00	50.00	0.00	2.47	0.47	7.12	0.04	30.27	0.06

ตารางที่ ค-8 ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิของชุดการทดลองที่ 4 (บรรจุไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์และเมทานอลพร้อมกันและบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอลลงไปอีกครั้ง) จำนวน 3 ถังทดลอง

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
8/09/2555 15:00 น.	25.23	120.00	0.00	3.83	0.67	7.60	0.02	29.20	0.00
9/09/2555 9:30 น.	26.00	140.00	0.00	0.47	0.21	7.53	0.01	30.57	0.06
10/09/2555 9:20 น.	26.99	93.33	11.55	2.37	0.15	7.30	0.02	30.40	0.00
11/09/2555 9:30 น.	28.00	73.33	5.77	4.33	0.72	7.67	0.02	30.67	0.06
12/09/2555 9:35 น.	29.00	70.00	0.00	3.57	0.25	7.53	0.04	30.40	0.10
15/09/2555 10:00 น.	32.02	60.00	10.00	5.30	0.36	7.73	0.04	29.73	0.06
16/09/2555 10:00 น.	33.02	96.67	5.77	1.30	0.82	7.43	0.06	29.23	0.15
17/09/2555 9:40 น.	34.01	80.00	10.00	4.37	0.40	7.80	0.05	28.77	0.06
18/09/2555 9:30 น.	35.00	80.00	10.00	4.10	0.70	7.75	0.03	29.30	0.10
21/09/2555 10:15 น.	38.03	80.00	10.00	4.47	0.40	7.83	0.03	29.23	0.06
22/09/2555 11:00 น.	39.06	103.33	5.77	2.57	1.19	7.45	0.06	31.10	0.10
23/09/2555 11:15 น.	40.07	100.00	0.00	3.37	0.38	7.54	0.04	31.70	0.17
24/09/2555 11:15 น.	41.07	90.00	0.00	3.93	0.61	7.52	0.06	31.47	0.15
26/09/2555 9:10 น.	42.99	93.33	15.28	3.10	0.26	7.48	0.05	30.50	0.10
27/09/2555 9:20 น.	43.99	113.33	11.55	0.43	0.15	7.41	0.02	28.60	0.10
28/09/2555 9:25 น.	45.00	130.00	0.00	0.60	0.10	7.51	0.06	26.90	0.10
29/09/2555 9:00 น.	45.98	116.67	11.55	0.77	0.21	7.43	0.03	27.03	0.06
1/10/2555 10:00 น.	48.02	120.00	10.00	0.90	0.10	7.47	0.03	28.53	0.06
3/10/2555 10:20 น.	50.03	120.00	10.00	1.63	0.31	7.47	0.04	29.13	0.06
7/10/2555 15:00 น.	54.23	120.00	0.00	4.10	0.20	7.21	0.01	28.75	0.07
8/10/2555 10:00 น.	55.02	106.67	11.55	1.13	0.40	7.39	0.04	29.27	0.15
9/10/2555 10:00 น.	56.02	100.00	10.00	0.83	1.10	7.31	0.05	30.00	0.10
10/10/2555 10:00 น.	57.02	93.33	11.55	1.47	0.76	7.26	0.06	30.10	0.10
11/10/2555 10:20 น.	58.03	83.33	20.82	1.37	0.31	7.23	0.10	31.23	0.12
12/10/2555 10:30 น.	59.04	63.33	30.55	2.47	1.53	7.10	0.07	31.10	0.10
13/10/2555 11:15 น.	60.07	56.67	20.82	2.07	1.62	6.98	0.06	32.30	0.20
14/10/2555 11:20 น.	61.08	40.00	10.00	2.23	1.46	6.98	0.09	32.63	0.21
15/10/2555 11:40 น.	62.09	36.67	5.77	2.90	1.15	7.03	0.04	32.17	0.23
16/10/2555 11:30 น.	63.08	40.00	0.00	3.70	0.82	7.20	0.05	31.83	0.21
17/10/2555 15:30 น.	64.25	40.00	0.00	4.60	0.17	7.07	0.06	32.47	0.15

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
18/10/2555 10:15 น.	65.03	40.00	0.00	1.30	0.78	7.11	0.01	30.53	0.06
19/10/2555 10:40 น.	66.05	66.67	5.77	0.23	0.06	7.21	0.04	30.90	0.10
20/10/2555 9:45 น.	67.01	76.67	5.77	0.80	0.20	7.28	0.02	30.73	0.06
21/10/2555 10:30 น.	68.04	63.33	5.77	0.77	0.15	7.28	0.02	31.43	0.06
22/10/2555 9:50 น.	69.01	66.67	5.77	1.27	0.29	7.29	0.01	31.53	0.06
23/10/2555 10:00 น.	70.02	73.33	5.77	1.83	0.12	7.30	0.02	31.37	0.06
24/10/2555 10:00 น.	71.02	66.67	5.77	1.83	0.21	7.39	0.02	31.03	0.06
26/10/2555 10:30 น.	73.04	120.00	0.00	4.40	0.26	7.10	0.01	29.73	0.12
27/10/2555 9:10 น.	73.99	106.67	15.28	0.67	0.21	7.26	0.04	32.57	0.15
28/10/2555 9:15 น.	74.99	96.67	11.55	0.77	0.98	7.21	0.03	33.07	0.15
29/10/2555 17:00 น.	76.31	76.67	15.28	1.47	0.61	7.05	0.08	34.00	0.20
30/10/2555 10:00 น.	77.02	50.00	10.00	1.63	1.54	6.90	0.01	31.77	0.06
31/10/2555 15:30 น.	78.25	36.67	5.77	1.70	1.56	6.68	0.10	30.97	0.15
1/11/2555 10:00 น.	79.02	30.00	10.00	2.87	1.53	6.81	0.06	31.23	0.06
2/11/2555 10:30 น.	80.04	40.00	0.00	0.33	0.32	6.89	0.02	30.10	0.10
3/11/2555 9:45 น.	81.01	60.00	0.00	0.37	0.15	7.20	0.02	30.17	0.06
4/11/2555 9:45 น.	82.01	63.33	5.77	0.73	0.06	7.19	0.02	30.47	0.06
5/11/2555 9:35 น.	83.00	53.33	5.77	0.93	0.15	7.21	0.01	30.53	0.06
6/11/2555 10:15 น.	84.03	56.67	5.77	1.07	0.23	7.22	0.02	30.47	0.06
7/11/2555 9:30 น.	85.00	56.67	11.55	1.13	0.25	7.08	0.01	30.47	0.06
10/11/2555 10:20 น.	88.03	120.00	0.00	2.10	0.10	6.98	0.00	29.80	0.00
11/11/2555 10:40 น.	89.05	90.00	0.00	0.30	0.00	7.11	0.03	32.37	0.15
12/11/2555 9:20 น.	89.99	93.33	11.55	0.53	0.29	7.05	0.02	32.20	0.10
13/11/2555 9:20 น.	90.99	90.00	0.00	0.90	0.26	7.03	0.02	31.03	0.12
14/11/2555 15:00 น.	92.23	70.00	10.00	0.80	0.20	6.67	0.02	33.57	0.12
15/11/2555 10:00 น.	93.02	33.33	15.28	0.73	0.32	6.41	0.06	32.70	0.20
16/11/2555 13:40 น.	94.17	26.67	5.77	2.20	1.20	6.37	0.05	33.40	0.10
17/11/2555 10:30 น.	95.04	23.33	5.77	3.10	0.36	6.63	0.04	32.83	0.06
18/11/2555 9:45 น.	96.01	33.33	5.77	0.50	0.26	6.71	0.03	29.80	0.10
19/11/2555 9:45 น.	97.01	53.33	5.77	0.20	0.10	6.81	0.03	29.73	0.06
20/11/2555 10:00 น.	98.02	56.67	5.77	0.53	0.32	7.17	0.02	29.63	0.06
21/11/2555 10:00 น.	99.02	53.33	5.77	1.03	0.32	7.09	0.03	28.77	0.06
22/11/2555 10:00 น.	100.02	60.00	10.00	1.00	0.26	7.09	0.02	30.37	0.29
24/11/2555 9:30 น.	102.00	53.33	5.77	1.60	0.17	7.11	0.02	30.47	0.06

ตารางที่ ค-9 ค่าโออาร์พีในชั้นน้ำของการทดลอง 4 ชุด (ชุดการทดลองละ 3 ถังทดลอง)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พีในชั้นน้ำ (มิลลิโวลต์)							
		ชุดการทดลองที่ 1		ชุดการทดลองที่ 2		ชุดการทดลองที่ 3		ชุดการทดลองที่ 4	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
8/09/2555 15:00 น.	25.23	208.17	0.46	219.03	0.57	206.57	0.67	216.07	1.50
9/09/2555 9:30 น.	26.00	210.83	0.06	217.07	1.10	216.13	1.02	214.03	1.70
10/09/2555 9:20 น.	26.99	226.10	1.31	225.17	1.68	223.60	3.47	223.43	1.03
11/09/2555 9:30 น.	28.00	236.57	0.81	231.43	1.50	234.73	2.37	231.60	1.44
12/09/2555 9:35 น.	29.00	233.53	1.27	230.87	1.53	231.47	2.23	234.37	1.50
15/09/2555 10:00 น.	32.02	241.67	1.97	242.53	3.42	240.60	1.39	237.13	1.62
16/09/2555 10:00 น.	33.02	240.53	1.45	237.70	3.32	239.73	0.45	246.40	5.65

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พีในชั้นน้ำ (มิลลิโวลต์)							
		ชุดการทดลองที่ 1		ชุดการทดลองที่ 2		ชุดการทดลองที่ 3		ชุดการทดลองที่ 4	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
17/09/2555 9:40 น.	34.01	251.63	1.18	247.43	2.77	251.33	0.12	244.03	1.24
18/09/2555 9:30 น.	35.00	248.73	1.93	246.67	2.31	247.77	0.25	243.30	0.69
21/09/2555 10:15 น.	38.03	237.87	1.19	235.17	1.40	236.10	0.44	238.93	1.55
22/09/2555 11:00 น.	39.06	251.17	0.70	240.37	1.88	247.83	2.55	244.87	2.07
23/09/2555 11:15 น.	40.07	250.10	1.56	246.70	0.36	250.63	1.10	246.47	0.45
24/09/2555 11:15 น.	41.07	267.00	1.28	249.10	0.62	257.67	2.60	251.10	0.85
26/09/2555 9:10 น.	42.99	251.77	0.76	248.80	2.03	254.13	0.35	254.50	3.21
27/09/2555 9:20 น.	43.99	235.43	2.86	249.63	4.58	227.27	1.16	240.77	3.61
28/09/2555 9:25 น.	45.00	224.27	2.57	217.17	0.84	229.10	0.80	244.57	7.09
29/09/2555 9:00 น.	45.98	198.90	0.87	109.27	20.85	196.73	1.21	187.37	1.05
1/10/2555 10:00 น.	48.02	202.80	0.53	194.47	7.55	197.97	1.48	201.10	0.36
3/10/2555 10:20 น.	50.03	237.17	0.46	236.53	0.59	232.63	0.65	234.03	0.15
7/10/2555 15:00 น.	54.23	164.30	3.63	241.97	1.46	171.10	0.46	144.70	3.87
8/10/2555 10:00 น.	55.02	234.53	2.15	243.57	1.05	230.33	1.27	241.63	0.42
9/10/2555 10:00 น.	56.02	192.73	15.42	183.47	1.07	174.47	6.40	180.53	7.46
10/10/2555 10:00 น.	57.02	194.03	4.14	180.43	1.66	191.67	5.62	176.43	0.35
11/10/2555 10:20 น.	58.03	238.07	14.53	239.43	2.30	245.03	4.75	222.27	5.23
12/10/2555 10:30 น.	59.04	234.37	0.42	227.73	1.86	240.50	12.40	227.77	4.65
13/10/2555 11:15 น.	60.07	225.10	0.26	215.63	1.57	228.23	1.14	216.63	3.91
14/10/2555 11:20 น.	61.08	238.83	0.85	224.17	1.46	233.03	0.32	223.03	0.61
15/10/2555 11:40 น.	62.09	242.97	0.60	236.00	0.90	246.27	0.96	233.83	1.96
16/10/2555 11:30 น.	63.08	252.37	0.61	248.17	0.55	254.20	1.93	243.93	2.06
17/10/2555 15:30 น.	64.25	247.93	0.72	240.00	0.62	243.17	0.72	233.33	3.01
18/10/2555 10:15 น.	65.03	225.40	1.87	219.93	0.32	229.27	1.60	220.40	0.35
19/10/2555 10:40 น.	66.05	166.50	3.86	175.37	2.55	166.47	2.06	186.07	7.25
20/10/2555 9:45 น.	67.01	220.23	0.40	221.47	2.02	222.40	0.60	230.20	2.10
21/10/2555 10:30 น.	68.04	229.20	0.62	230.83	1.45	230.93	0.57	236.63	1.63
22/10/2555 9:50 น.	69.01	240.97	0.55	244.50	1.76	241.53	0.47	253.70	1.65
23/10/2555 10:00 น.	70.02	249.93	0.55	253.37	3.17	251.30	0.87	261.93	1.61
24/10/2555 10:00 น.	71.02	188.87	0.97	191.20	0.56	183.67	6.02	190.90	0.66
26/10/2555 10:30 น.	73.04	169.63	1.40	147.90	7.20	172.33	0.75	167.13	0.06
27/10/2555 9:10 น.	73.99	126.17	4.60	115.70	2.71	97.17	3.58	95.97	0.75
28/10/2555 9:15 น.	74.99	122.97	7.59	90.57	6.47	117.47	1.06	97.20	11.36
29/10/2555 17:00 น.	76.31	156.93	4.87	156.37	3.04	150.00	2.96	150.57	1.16
30/10/2555 10:00 น.	77.02	241.13	6.73	219.47	2.44	226.93	13.06	210.87	0.46
31/10/2555 15:30 น.	78.25	245.33	2.05	245.90	0.80	251.13	1.89	243.87	2.02
1/11/2555 10:00 น.	79.02	258.00	0.66	248.33	2.19	265.93	2.12	244.63	1.80
2/11/2555 10:30 น.	80.04	105.70	1.80	104.50	0.56	103.00	1.54	106.27	1.23
3/11/2555 9:45 น.	81.01	78.57	1.45	84.40	0.70	72.63	0.85	86.87	0.71
4/11/2555 9:45 น.	82.01	164.03	1.20	171.70	0.87	145.77	1.21	169.47	0.25
5/11/2555 9:35 น.	83.00	219.47	3.54	217.87	0.65	222.87	0.67	218.90	0.44
6/11/2555 10:15 น.	84.03	252.00	0.72	252.03	0.55	232.37	10.79	252.47	0.50
7/11/2555 9:30 น.	85.00	260.07	0.31	260.50	0.10	247.53	0.40	260.90	0.20
10/11/2555 10:20 น.	88.03	229.87	1.82	237.00	5.48	170.53	0.12	167.40	0.95
11/11/2555 10:40 น.	89.05	229.23	0.93	231.63	0.92	217.87	4.24	234.77	7.30
12/11/2555 9:20 น.	89.99	174.00	4.97	165.90	2.23	168.53	0.86	137.33	1.92
13/11/2555 9:20 น.	90.99	250.37	6.22	234.37	6.71	242.53	12.30	221.20	3.80
14/11/2555 15:00 น.	92.23	263.67	4.42	254.93	1.16	260.53	2.99	253.03	0.38
15/11/2555 10:00 น.	93.02	270.00	0.92	262.27	1.29	262.00	1.56	253.23	1.25

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พีในชั้นน้ำ (มิลลิโวลต์)							
		ชุดการทดลองที่ 1		ชุดการทดลองที่ 2		ชุดการทดลองที่ 3		ชุดการทดลองที่ 4	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/11/2555 13:40 น.	94.17	170.30	0.89	167.20	0.26	182.37	2.00	158.70	6.38
17/11/2555 10:30 น.	95.04	180.67	0.67	178.93	1.20	207.33	1.61	169.13	0.91
18/11/2555 9:45 น.	96.01	194.03	0.32	192.50	8.24	175.33	4.53	179.43	1.35
19/11/2555 9:45 น.	97.01	163.60	0.60	141.13	3.04	155.50	3.14	139.50	1.55
20/11/2555 10:00 น.	98.02	161.47	2.01	165.97	0.60	153.10	2.07	151.30	1.25
21/11/2555 10:00 น.	99.02	192.13	1.46	184.27	2.36	197.80	1.28	176.33	4.05
22/11/2555 10:00 น.	100.02	184.80	2.05	175.93	3.01	191.17	1.60	174.37	1.72
24/11/2555 9:30 น.	102.00	213.90	1.21	213.10	1.11	221.93	1.99	209.67	1.85

ตารางที่ ค-10 ค่าโออาร์พีในชั้นหินพัมมิสของการทดลอง 4 ชุด (ชุดการทดลองละ 3 ถังทดลอง)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พีในชั้นหินพัมมิส (มิลลิโวลต์)							
		ชุดการทดลองที่ 1		ชุดการทดลองที่ 2		ชุดการทดลองที่ 3		ชุดการทดลองที่ 4	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
8/09/2555 15:00 น.	25.23	179.83	1.21	175.03	1.55	178.93	1.37	168.53	0.96
9/09/2555 9:30 น.	26.00	98.43	7.80	76.30	10.58	-24.80	9.12	16.87	31.40
10/09/2555 9:20 น.	26.99	149.33	2.78	119.33	21.44	142.33	3.69	58.90	18.45
11/09/2555 9:30 น.	28.00	158.90	5.80	112.17	7.11	146.27	4.45	115.73	32.29
12/09/2555 9:35 น.	29.00	204.00	3.30	175.93	3.86	193.60	11.35	205.17	7.77
15/09/2555 10:00 น.	32.02	230.10	3.21	211.97	1.10	226.07	6.46	229.20	3.56
16/09/2555 10:00 น.	33.02	244.70	0.20	251.43	1.31	248.50	1.11	246.87	1.76
17/09/2555 9:40 น.	34.01	254.53	1.25	229.10	2.69	256.37	1.72	251.73	2.75
18/09/2555 9:30 น.	35.00	246.83	1.45	244.37	1.06	253.93	4.07	242.13	1.88
21/09/2555 10:15 น.	38.03	234.37	4.03	233.80	5.57	235.57	0.06	224.73	1.46
22/09/2555 11:00 น.	39.06	252.87	0.55	248.27	1.99	255.40	1.71	246.03	0.50
23/09/2555 11:15 น.	40.07	247.50	1.01	233.40	3.15	236.37	4.23	230.60	5.31
24/09/2555 11:15 น.	41.07	234.13	2.03	233.57	2.61	232.93	3.23	233.90	2.55
26/09/2555 9:10 น.	42.99	256.13	1.81	224.83	0.35	256.63	2.32	239.60	6.20
27/09/2555 9:20 น.	43.99	23.93	15.16	38.37	2.40	-139.43	178.19	65.40	55.64
28/09/2555 9:25 น.	45.00	152.60	7.23	-133.20	95.15	-38.50	185.93	136.30	3.18
29/09/2555 9:00 น.	45.98	129.83	12.07	-137.73	68.62	161.00	2.86	-19.63	33.01
1/10/2555 10:00 น.	48.02	120.73	8.58	-65.47	76.47	140.90	3.60	68.00	23.72
3/10/2555 10:20 น.	50.03	161.63	3.66	140.20	3.70	149.03	2.54	172.30	2.89
7/10/2555 15:00 น.	54.23	187.47	0.70	189.30	1.42	181.03	1.27	187.13	1.89
8/10/2555 10:00 น.	55.02	226.67	3.07	76.73	14.22	-306.10	61.39	-275.50	65.89
9/10/2555 10:00 น.	56.02	152.90	37.21	82.90	7.86	-103.00	251.07	-138.57	197.10
10/10/2555 10:00 น.	57.02	136.87	16.76	133.33	1.59	46.70	20.73	-73.40	106.20
11/10/2555 10:20 น.	58.03	186.43	4.47	134.07	8.26	143.37	8.05	-173.50	127.26
12/10/2555 10:30 น.	59.04	204.70	1.45	210.07	3.35	190.97	6.88	157.40	4.92
13/10/2555 11:15 น.	60.07	204.50	2.81	185.73	8.02	207.67	20.33	157.33	5.28
14/10/2555 11:20 น.	61.08	254.77	4.24	260.00	1.04	259.00	3.27	227.50	22.75
15/10/2555 11:40 น.	62.09	261.53	0.85	198.13	1.87	253.63	5.67	190.07	2.75
16/10/2555 11:30 น.	63.08	264.90	0.87	247.77	0.46	262.57	0.76	230.80	13.20
17/10/2555 15:30 น.	64.25	251.10	1.06	255.80	0.70	257.00	0.92	252.50	1.42
18/10/2555 10:15 น.	65.03	224.73	1.05	139.00	5.89	229.37	7.98	138.93	8.60
19/10/2555 10:40 น.	66.05	65.23	3.25	54.27	2.55	90.50	26.89	54.87	18.37
20/10/2555 9:45 น.	67.01	147.97	1.76	144.20	2.34	152.77	1.59	128.43	6.45

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พีในชั้นหินพัมมิส (มิลลิโวลต์)							
		ชุดการทดลองที่ 1		ชุดการทดลองที่ 2		ชุดการทดลองที่ 3		ชุดการทดลองที่ 4	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
21/10/2555 10:30 น.	68.04	224.43	2.44	190.83	5.00	226.90	4.85	180.13	1.97
22/10/2555 9:50 น.	69.01	237.50	2.51	229.17	0.57	228.67	3.54	239.13	0.85
23/10/2555 10:00 น.	70.02	253.40	0.20	244.70	4.08	246.33	1.53	248.93	0.78
24/10/2555 10:00 น.	71.02	160.93	1.58	149.35	2.47	168.43	7.11	143.83	4.08
26/10/2555 10:30 น.	73.04	173.70	2.25	167.63	1.05	173.37	0.25	169.53	2.40
27/10/2555 9:10 น.	73.99	61.37	15.11	78.83	3.67	-348.97	8.81	-311.13	6.81
28/10/2555 9:15 น.	74.99	60.77	7.84	77.60	4.77	-192.60	12.69	-222.47	90.59
29/10/2555 17:00 น.	76.31	132.60	11.52	106.60	3.77	63.93	8.54	-105.30	11.40
30/10/2555 10:00 น.	77.02	141.40	7.70	121.60	8.41	91.17	9.82	49.10	14.33
31/10/2555 15:30 น.	78.25	212.40	10.44	172.33	10.13	163.70	4.97	88.00	31.39
1/11/2555 10:00 น.	79.02	224.27	3.30	216.57	1.44	237.50	13.53	218.80	1.95
2/11/2555 10:30 น.	80.04	9.20	0.66	2.53	5.06	21.57	4.32	0.23	4.49
3/11/2555 9:45 น.	81.01	76.50	1.67	65.63	4.72	57.03	6.83	55.77	3.23
4/11/2555 9:45 น.	82.01	116.63	6.22	137.97	2.38	114.73	9.59	106.20	2.86
5/11/2555 9:35 น.	83.00	150.63	7.59	161.00	1.08	121.60	3.42	143.80	0.61
6/11/2555 10:15 น.	84.03	169.67	7.03	156.00	3.68	186.23	1.10	138.17	17.33
7/11/2555 9:30 น.	85.00	194.60	4.07	184.27	3.04	200.10	4.50	148.13	8.34
10/11/2555 10:20 น.	88.03	176.97	1.15	181.27	1.25	160.20	3.22	168.77	0.70
11/11/2555 10:40 น.	89.05	62.40	7.55	34.47	6.15	-270.03	30.98	-289.67	44.03
12/11/2555 9:20 น.	89.99	29.70	5.48	65.67	13.12	-120.87	66.08	-113.13	100.02
13/11/2555 9:20 น.	90.99	169.43	6.66	147.57	4.75	73.10	12.48	66.03	2.18
14/11/2555 15:00 น.	92.23	149.33	20.29	187.33	7.99	103.77	5.26	79.53	3.97
15/11/2555 10:00 น.	93.02	129.63	13.56	104.60	18.17	41.87	27.25	60.63	6.31
16/11/2555 13:40 น.	94.17	-29.40	6.61	-50.47	4.62	145.87	2.55	135.73	3.90
17/11/2555 10:30 น.	95.04	-22.80	30.74	-27.43	95.77	161.10	3.17	136.57	5.21
18/11/2555 9:45 น.	96.01	-47.43	22.64	-6.67	6.31	-85.50	5.27	-100.73	8.37
19/11/2555 9:45 น.	97.01	79.27	9.67	28.17	4.90	-99.93	8.40	-19.23	10.20
20/11/2555 10:00 น.	98.02	34.37	7.30	60.50	5.54	-30.57	7.97	-72.83	12.74
21/11/2555 10:00 น.	99.02	116.67	8.33	138.90	4.83	-74.90	20.43	-80.13	17.89
22/11/2555 10:00 น.	100.02	66.77	9.55	107.87	6.33	-122.43	12.95	-80.27	9.80
24/11/2555 9:30 น.	102.00	118.33	10.45	133.53	3.93	-60.57	15.19	-26.50	4.29

ตารางที่ ค-11 ค่าซีโอดีที่ทำการตรวจวัดเมื่อทำการเติมเมทานอลของชุดการทดลองที่ 1 (บรรจุหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอล) และชุดการทดลองที่ 2 (บรรจุไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอล) ชุดการทดลองละ 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ซีโอดี (มก./ล.)			
		ชุดการทดลองที่ 1		ชุดการทดลองที่ 2	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
15/09/2555 10:00 น.	32.02	90.63	3.02	123.75	27.95
15/09/2555 17:20 น.	32.33	90.63	15.97	123.75	7.99

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ซีโอดี (มก./ล.)			
		ชุดการทดลองที่ 1		ชุดการทดลองที่ 2	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
16/09/2555 10:00 น.	33.02	7.83	5.24	19.86	19.28
21/09/2555 10:15 น.	38.03	100.44	5.55	100.44	5.55
21/09/2555 19:00 น.	38.40	87.04	8.49	85.19	6.42
22/09/2555 11:00 น.	39.06	14.04	5.78	22.97	12.25
26/09/2555 9:10 น.	42.99	87.18	0.00	94.02	24.23
27/09/2555 9:20 น.	43.99	35.90	17.76	52.99	2.96
28/09/2555 9:25 น.	45.00	0.00	0.00	7.89	7.44
17/10/2555 15:30 น.	64.25	96.73	11.98	96.73	11.98
18/10/2555 10:15 น.	65.03	78.43	13.83	101.09	7.99
18/10/2555 17:00 น.	65.31	39.32	2.96	52.99	7.83
19/10/2555 10:40 น.	66.05	21.37	5.34	21.50	13.10
19/10/2555 17:00 น.	66.31	11.97	7.83	3.99	2.71
31/10/2555 15:30 น.	78.25	88.89	11.34	80.50	0.00
1/11/2555 10:00 น.	79.02	69.33	23.70	49.78	6.71
1/11/2555 17:00 น.	79.31	49.78	11.10	48.00	9.61
2/11/2555 10:30 น.	80.04	22.22	5.92	18.63	2.60
2/11/2555 18:15 น.	80.36	33.94	4.85	27.52	4.65
3/11/2555 9:45 น.	81.01	16.16	2.80	14.47	3.13
15/11/2555 10:00 น.	93.02	85.33	10.67	78.22	6.16
15/11/2555 19:00 น.	93.40	76.44	8.15	65.78	3.08
16/11/2555 13:40 น.	94.17	48.00	5.33	44.44	3.08
16/11/2555 20:00 น.	94.44	32.00	0.00	33.00	3.93
17/11/2555 10:30 น.	95.04	14.22	3.08	10.60	11.07
17/11/2555 17:25 น.	95.33	12.20	7.99	14.56	3.56
18/11/2555 9:45 น.	96.01	12.20	6.04	11.15	12.09

ตารางที่ ค-12 ค่าซีโอดีที่ทำการตรวจวัดเมื่อทำการเติมเมทานอลของชุดการทดลองที่ 3 (บรรจุหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์และเมทานอลพร้อมกัน และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอลลงไปอีกครั้ง) และชุดการทดลองที่ 4 (บรรจุไบโอคอร์ดและหินพัมมิสบด เติมแอมโมเนียมคลอไรด์และเมทานอลพร้อมกัน และบำบัดไนเทรตที่เกิดขึ้นต่อด้วยการเติมเมทานอลลงไปอีกครั้ง) ชุดการทดลองละ 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ซีโอดี (มก./ล.)			
		ชุดการทดลองที่ 3		ชุดการทดลองที่ 4	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
8/09/2555 15:00 น.	25.23	70.22	59.47	84.44	3.08
9/09/2555 9:30 น.	26.00	47.11	12.02	55.11	11.10
9/09/2555 17:00 น.	26.31	8.80	8.07	5.05	9.68
10/09/2555 9:20 น.	26.99	1.76	3.05	6.58	4.36
15/09/2555 10:00 น.	32.02	67.97	9.06	97.60	16.81
15/09/2555 17:20 น.	32.33	66.23	7.99	97.60	7.99
16/09/2555 10:00 น.	33.02	0.00	5.33	2.04	3.54

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ซีโอดี (มก./ล.)			
		ชุดการทดลองที่ 3		ชุดการทดลองที่ 4	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
21/09/2555 10:15 น.	38.03	56.89	17.14	80.00	14.11
21/09/2555 19:00 น.	38.40	62.96	3.21	66.67	5.56
22/09/2555 11:00 น.	39.06	14.81	3.21	16.67	10.02
26/09/2555 9:10 น.	42.99	75.21	10.68	90.60	13.16
27/09/2555 9:20 น.	43.99	18.80	11.84	51.28	18.49
28/09/2555 9:25 น.	45.00	11.85	10.26	10.03	8.69
7/10/2555 15:00 น.	54.23	87.15	13.16	95.86	28.80
8/10/2555 10:00 น.	55.02	50.54	25.79	66.23	13.16
8/10/2555 18:00 น.	55.35	47.06	17.14	50.54	10.57
9/10/2555 10:00 น.	56.02	38.22	8.57	32.00	9.24
9/10/2555 17:30 น.	56.33	30.22	8.15	11.56	8.57
10/10/2555 10:00 น.	57.02	3.63	6.28	1.81	3.14
17/10/2555 15:30 น.	64.25	94.12	9.06	89.76	9.18
18/10/2555 10:15 น.	65.03	92.37	6.04	86.27	4.53
18/10/2555 17:00 น.	65.31	42.74	7.83	38.46	11.18
19/10/2555 10:40 น.	66.05	17.09	7.83	2.55	2.67
19/10/2555 17:00 น.	66.31	5.98	6.45	3.73	6.10
26/10/2555 10:30 น.	73.04	116.78	10.88	117.65	6.92
26/10/2555 18:00 น.	73.35	54.70	10.68	66.67	8.88
27/10/2555 9:10 น.	73.99	35.22	5.03	40.25	8.71
27/10/2555 17:10 น.	74.32	17.78	10.10	13.33	5.33
28/10/2555 9:15 น.	74.99	7.11	6.16	10.67	5.33
28/10/2555 17:15 น.	75.32	0.00	0.00	10.67	5.33
1/11/2555 17:00 น.	79.31	80.50	13.3	77.99	6.66
2/11/2555 10:30 น.	80.04	39.32	15.67	30.77	10.26
2/11/2555 18:15 น.	80.36	50.10	11.20	48.48	0.00
3/11/2555 9:45 น.	81.01	33.94	0.00	18.42	18.73
3/11/2555 17:40 น.	81.34	28.44	3.08	8.04	7.10
4/11/2555 9:45 น.	82.01	12.44	3.08	19.56	6.16
10/11/2555 10:20 น.	88.03	85.26	8.31	84.35	8.16
10/11/2555 18:00 น.	88.35	70.75	5.44	79.82	3.14
11/11/2555 10:40 น.	89.05	43.54	5.44	27.21	10.88
11/11/2555 18:15 น.	89.36	23.11	16.29	30.22	6.16
12/11/2555 9:20 น.	89.99	8.89	11.10	7.11	8.15
12/11/2555 18:00 น.	90.35	7.11	8.15	5.33	9.24
17/11/2555 17:25 น.	95.33	78.43	0.00	65.36	11.98
18/11/2555 9:45 น.	96.01	44.44	16.81	37.47	10.57
18/11/2555 17:00 น.	96.31	40.09	16.81	36.60	13.83
19/11/2555 9:45 น.	97.01	24.40	3.02	18.27	2.61
19/11/2555 17:00 น.	97.31	0.00	0.00	12.57	17.15

ภาคผนวก ง

ข้อมูลคุณภาพน้ำที่ทำการตรวจวัดในการทดลองช่วงที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ตารางที่ ง-1 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตในระหว่างการเตรียมและปรับสภาพไนทริฟิเคชันของหินพัมมิสบด

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
20/12/2555 10:30 น.	0.00	17.00	0.23	0.03	0.01	19.88	0.42
21/12/2555 16:25 น.	1.25	6.42	0.05	1.73	0.07	19.59	0.30
22/12/2555 12:00 น.	2.06	4.69	0.10	2.58	0.13	20.75	0.69
23/12/2555 12:00 น.	3.06	3.43	0.06	3.79	0.05	21.11	0.37
24/12/2555 10:15 น.	3.99	2.19	0.11	4.35	0.29	22.70	0.79
25/12/2555 10:00 น.	4.98	0.96	0.07	4.50	0.07	25.44	0.54
26/12/2555 10:00 น.	5.98	0.07	0.00	3.07	0.08	25.71	0.66
27/12/2555 12:00 น.	7.06	0.00	0.00	0.09	0.00	29.69	0.51
28/12/2555 9:45 น.	7.97	0.01	0.01	0.01	0.00	29.59	0.68
29/12/2555 15:00 น.	9.19	13.48	0.20	0.02	0.01	30.15	0.65
30/12/2555 14:45 น.	10.18	0.34	0.00	4.52	0.39	36.09	1.05
31/12/2555 15:30 น.	11.21	0.04	0.02	0.02	0.00	42.09	1.51
1/01/2556 17:30 น.	12.29	14.46	0.68	0.01	0.00	43.68	1.00
2/01/2556 12:30 น.	13.08	0.36	0.01	3.92	0.07	47.72	1.17
3/01/2556 13:10 น.	14.11	0.02	0.00	0.02	0.00	58.08	2.50
4/01/2556 11:00 น.	15.02	13.17	0.18	0.02	0.01	54.90	0.65
5/01/2556 17:00 น.	16.27	0.04	0.01	0.05	0.00	68.81	2.38
6/01/2556 18:10 น.	17.32	0.03	0.00	0.01	0.00	68.56	0.58
7/01/2556 10:30 น.	18.00	15.60	0.39	0.01	0.00	67.36	0.79
8/01/2556 11:00 น.	19.02	0.06	0.00	0.75	0.09	77.18	2.61
9/01/2556 10:50 น.	20.01	0.02	0.01	0.01	0.01	80.75	2.60
10/01/2556 15:20 น.	21.20	15.48	0.35	0.01	0.00	79.84	3.28
11/01/2556 10:20 น.	21.99	0.21	0.01	2.34	0.07	89.14	1.54
12/01/2556 15:00 น.	23.19	0.01	0.01	0.09	0.01	95.99	4.07

ตารางที่ ง-2 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตของชุดควบคุม-1 (ถังเลี้ยงปลานิลที่ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์) จำนวน 1 ถังทดลอง (วิเคราะห์ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
21/01/2556 9:00 น.	0.00	0.04	0.02	0.01	0.01	1.16	0.04
22/01/2556 8:30 น.	0.98	0.66	0.00	0.01	0.00	1.87	0.51
22/01/2556 11:30 น.	1.10	0.69	0.01	0.02	0.00	1.33	0.02

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
23/01/2556 8:45 น.	1.99	1.49	0.08	0.02	0.00	1.59	0.02
24/01/2556 8:45 น.	2.99	2.91	0.03	0.09	0.00	1.63	0.03
25/01/2556 8:50 น.	3.99	3.98	0.31	0.03	0.01	1.76	0.03
26/01/2556 16:00 น.	5.29	5.18	0.11	0.04	0.00	1.79	0.03
27/01/2556 9:40 น.	6.03	5.59	0.27	0.04	0.00	1.90	0.05
28/01/2556 12:30 น.	7.15	6.86	0.26	0.07	0.01	1.67	0.03
29/01/2556 9:30 น.	8.02	8.44	0.10	0.08	0.00	1.93	0.02
30/01/2556 9:40 น.	9.03	9.44	0.24	0.13	0.00	2.05	0.10
31/01/2556 10:00 น.	10.04	9.71	0.42	0.26	0.00	2.07	0.04
1/02/2556 10:00 น.	11.04	10.88	0.30	0.66	0.02	2.32	0.02
2/02/2556 10:00 น.	12.04	9.06	0.34	2.31	0.13	2.92	0.21
3/02/2556 10:00 น.	13.04	6.70	0.05	7.90	0.33	2.34	0.41
4/02/2556 9:40 น.	14.03	0.06	0.01	13.98	0.36	5.18	0.49
5/02/2556 13:00 น.	15.17	0.02	0.00	16.35	0.78	6.04	0.86
6/02/2556 9:30 น.	16.02	0.06	0.03	14.38	1.15	10.54	0.61
7/02/2556 9:45 น.	17.03	0.05	0.01	18.52	1.58	8.23	1.24
8/02/2556 9:40 น.	18.03	0.06	0.02	22.20	0.95	7.09	0.29
9/02/2556 9:45 น.	19.03	0.05	0.00	20.00	0.53	10.01	0.51
10/02/2556 10:20 น.	20.06	0.05	0.01	23.79	0.86	8.79	0.57
11/02/2556 10:00 น.	21.04	0.02	0.02	22.34	0.89	10.92	1.51
12/02/2556 9:30 น.	22.02	0.07	0.00	24.01	0.59	9.83	0.88
13/02/2556 8:30 น.	22.98	0.01	0.01	25.05	0.62	12.59	1.02
13/02/2556 11:00 น.	23.08	0.06	0.00	24.11	1.32	12.88	1.10
14/02/2556 8:45 น.	23.99	0.01	0.01	22.91	1.18	12.07	0.66
15/02/2556 8:45 น.	24.99	0.10	0.03	20.47	2.77	17.61	4.30
16/02/2556 9:30 น.	26.02	0.04	0.02	13.31	0.69	22.30	2.05
18/02/2556 11:00 น.	28.08	0.08	0.03	0.03	0.00	39.38	0.54
19/02/2556 10:00 น.	29.04	0.02	0.02	0.04	0.00	41.18	0.93
20/02/2556 10:00 น.	30.04	0.05	0.07	0.06	0.00	39.91	2.21
21/02/2556 9:35 น.	31.02	0.05	0.05	0.04	0.00	43.47	0.55
22/02/2556 12:40 น.	32.15	0.03	0.01	0.04	0.00	40.19	1.10
23/02/2556 10:00 น.	33.04	0.08	0.01	0.06	0.02	46.28	2.38
24/02/2556 10:00 น.	34.04	0.04	0.02	0.06	0.01	42.20	0.25
25/02/2556 10:00 น.	35.04	0.05	0.03	0.12	0.00	49.77	0.99
26/02/2556 9:30 น.	36.02	0.03	0.00	0.06	0.00	51.72	0.45
27/02/2556 9:30 น.	37.02	0.01	0.02	0.11	0.00	50.16	2.04
28/02/2556 10:00 น.	38.04	0.06	0.02	0.06	0.00	53.37	0.86
1/03/2556 9:30 น.	39.02	0.04	0.01	0.07	0.00	55.80	1.13
3/03/2556 11:00 น.	41.08	0.05	0.02	0.06	0.00	57.82	2.68
5/03/2556 10:00 น.	43.04	0.07	0.01	0.17	0.00	58.44	1.41
7/03/2556 9:30 น.	45.02	0.08	0.02	0.08	0.00	65.85	1.97
8/03/2556 10:00 น.	46.04	0.09	0.01	0.10	0.00	67.14	1.02
9/03/2556 10:30 น.	47.06	0.01	0.01	0.18	0.01	70.82	0.25
10/03/2556 9:45 น.	48.03	0.12	0.06	0.10	0.00	72.48	2.38
11/03/2556 10:00 น.	49.04	0.09	0.04	0.09	0.00	76.16	3.58
12/03/2556 9:45 น.	50.03	0.07	0.00	0.08	0.00	73.16	1.19
14/03/2556 10:00 น.	52.04	0.05	0.01	0.08	0.01	73.73	0.52
16/03/2556 8:45 น.	53.99	0.09	0.01	0.39	0.01	81.61	2.46
16/03/2556 13:30 น.	54.19	0.11	0.03	0.50	0.01	83.38	8.23
17/03/2556 9:30 น.	55.02	0.12	0.01	0.29	0.01	87.95	3.36

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
18/03/2556 9:45 น.	56.03	0.17	0.01	0.24	0.00	87.19	4.39
19/03/2556 9:30 น.	57.02	0.21	0.02	0.16	0.00	93.95	2.19
20/03/2556 9:30 น.	58.02	0.14	0.01	0.21	0.01	100.94	2.60
21/03/2556 9:00 น.	59.00	0.17	0.01	0.29	0.01	94.62	3.27
22/03/2556 9:00 น.	60.00	0.18	0.02	0.34	0.03	104.90	1.81
23/03/2556 9:00 น.	61.00	0.18	0.01	0.31	0.01	102.27	1.79
24/03/2556 9:15 น.	62.01	0.18	0.00	0.23	0.00	109.96	2.03
25/03/2556 9:10 น.	63.01	0.24	0.03	0.19	0.03	111.33	2.02
26/03/2556 9:00 น.	64.00	0.21	0.02	0.12	0.01	119.61	2.30
27/03/2556 10:00 น.	65.04	0.19	0.03	0.29	0.00	113.13	0.79
28/03/2556 10:15 น.	66.05	0.15	0.00	0.03	0.00	119.67	0.28
29/03/2556 9:30 น.	67.02	0.14	0.01	0.04	0.00	126.32	0.35
30/03/2556 9:00 น.	68.00	0.11	0.01	0.08	0.00	131.04	3.23
31/03/2556 10:00 น.	69.04	0.11	0.01	0.09	0.00	128.36	3.47
1/04/2556 9:00 น.	70.00	0.18	0.01	0.08	0.00	131.49	4.45
2/04/2556 9:00 น.	71.00	0.18	0.01	0.09	0.00	137.78	2.67
4/04/2556 9:30 น.	73.02	0.20	0.05	0.08	0.00	145.88	1.68
7/04/2556 14:00 น.	76.21	0.22	0.03	0.08	0.00	152.64	1.24
8/04/2556 10:15 น.	77.05	0.17	0.05	0.08	0.00	163.81	9.69
8/04/2556 15:30 น.	77.27	0.19	0.02	0.24	0.01	161.90	6.82
9/04/2556 10:00 น.	78.04	0.05	0.05	0.13	0.00	160.13	2.17
10/04/2556 9:45 น.	79.03	0.18	0.06	0.11	0.00	164.44	4.75
11/04/2556 10:00 น.	80.04	0.20	0.00	0.14	0.00	169.26	2.66
12/04/2556 10:15 น.	81.05	0.11	0.01	0.10	0.00	176.78	6.64
13/04/2556 10:15 น.	82.05	0.07	0.01	0.14	0.00	168.85	0.87
14/04/2556 10:00 น.	83.04	0.02	0.00	0.16	0.00	170.80	1.09
15/04/2556 10:20 น.	84.06	0.05	0.02	0.10	0.01	170.84	2.43
17/04/2556 10:00 น.	86.04	0.03	0.02	0.17	0.02	177.49	1.35
18/04/2556 9:30 น.	87.02	0.03	0.02	0.33	0.00	187.07	5.09
19/04/2556 9:40 น.	88.03	0.11	0.03	0.28	0.01	190.71	7.27
20/04/2556 9:40 น.	89.03	0.20	0.08	0.22	0.01	202.39	2.69
21/04/2556 10:00 น.	90.04	0.10	0.02	0.16	0.00	202.08	0.96
22/04/2556 10:45 น.	91.07	0.04	0.04	0.13	0.01	204.26	2.06
22/04/2556 16:30 น.	91.31	0.10	0.03	0.24	0.01	199.71	5.29
23/04/2556 9:45 น.	92.03	0.09	0.05	0.18	0.01	202.22	7.89
24/04/2556 10:00 น.	93.04	0.04	0.02	0.13	0.01	204.97	3.39
25/04/2556 9:45 น.	94.03	0.01	0.01	0.14	0.00	216.44	9.08
26/04/2556 9:30 น.	95.02	0.04	0.00	0.12	0.00	215.03	7.96
27/04/2556 10:00 น.	96.04	0.02	0.04	0.16	0.00	217.30	7.88
28/04/2556 10:00 น.	97.04	0.00	0.00	0.08	0.00	224.66	0.77
29/04/2556 9:40 น.	98.03	0.01	0.01	0.07	0.00	224.56	2.34
30/04/2556 12:40 น.	99.15	0.04	0.01	0.08	0.00	231.07	4.00
1/05/2556 9:30 น.	100.02	0.03	0.01	0.06	0.00	232.78	8.67
1/05/2556 16:15 น.	100.30	0.03	0.01	0.13	0.01	230.50	4.52
2/05/2556 9:10 น.	101.01	0.03	0.01	0.08	0.00	238.14	5.93
3/05/2556 9:30 น.	102.02	0.04	0.00	0.11	0.00	246.43	8.63
4/05/2556 9:30 น.	103.02	0.05	0.01	0.09	0.00	230.63	2.92
5/05/2556 13:30 น.	104.19	0.05	0.01	0.09	0.00	246.33	10.82
6/05/2556 9:40 น.	105.03	0.06	0.01	0.09	0.00	251.22	4.66

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
7/05/2556 10:00 น.	106.04	0.07	0.00	0.10	0.00	246.16	7.11
8/05/2556 10:00 น.	107.04	0.05	0.02	0.09	0.00	265.96	10.76
9/05/2556 10:00 น.	108.04	0.06	0.03	0.09	0.00	267.45	7.36
10/05/2556 10:00 น.	109.04	0.05	0.00	0.11	0.01	271.35	0.74
11/05/2556 11:30 น.	110.10	0.09	0.02	0.11	0.00	296.65	4.99
11/05/2556 17:30 น.	110.35	0.41	0.03	0.24	0.00	283.21	2.82
12/05/2556 10:40 น.	111.07	0.08	0.04	0.12	0.01	269.11	9.59
13/05/2556 10:45 น.	112.07	0.08	0.03	0.12	0.02	295.55	14.05
14/05/2556 10:00 น.	113.04	0.10	0.03	0.12	0.00	293.80	26.62
15/05/2556 10:00 น.	114.04	0.12	0.01	0.14	0.01	291.00	17.56
16/05/2556 10:15 น.	115.05	0.06	0.00	0.12	0.00	301.52	7.80
17/05/2556 9:50 น.	116.03	0.06	0.02	0.14	0.01	299.91	4.84
18/05/2556 10:30 น.	117.06	0.04	0.00	0.14	0.00	315.61	13.74
19/05/2556 10:30 น.	118.06	0.11	0.00	0.14	0.00	330.75	13.88
20/05/2556 9:50 น.	119.03	0.06	0.00	0.10	0.00	327.11	4.33
22/05/2556 10:00 น.	121.04	0.14	0.02	0.12	0.00	352.47	9.67

ตารางที่ ง-3 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตของชุดควบคุม-2 (ถังเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน) จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
21/01/2556 9:00 น.	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	4.63	1.73
22/01/2556 8:30 น.	0.98	0.19	0.01	0.02	0.00	4.98	0.96
22/01/2556 11:30 น.	1.10	0.16	0.02	0.02	0.00	5.04	0.93
23/01/2556 8:45 น.	1.99	0.36	0.11	0.06	0.01	5.36	0.97
24/01/2556 8:45 น.	2.99	0.34	0.07	0.11	0.02	6.71	1.15
25/01/2556 8:50 น.	3.99	0.27	0.10	0.12	0.03	7.41	1.35
26/01/2556 16:00 น.	5.29	0.30	0.16	0.10	0.04	8.45	1.37
27/01/2556 9:40 น.	6.03	0.16	0.02	0.09	0.02	9.06	1.14
28/01/2556 12:30 น.	7.15	0.21	0.14	0.10	0.01	8.84	1.23
29/01/2556 9:30 น.	8.02	0.17	0.10	0.08	0.01	10.02	1.16
30/01/2556 9:40 น.	9.03	0.06	0.00	0.08	0.02	10.81	1.10
31/01/2556 10:00 น.	10.04	0.07	0.02	0.08	0.03	11.41	1.01
1/02/2556 10:00 น.	11.04	0.07	0.03	0.10	0.05	12.00	1.07
2/02/2556 10:00 น.	12.04	0.16	0.18	0.17	0.14	12.24	1.08
3/02/2556 10:00 น.	13.04	0.11	0.08	0.12	0.06	12.52	1.89
4/02/2556 9:40 น.	14.03	0.07	0.01	0.15	0.02	13.46	1.04
5/02/2556 13:00 น.	15.17	0.08	0.01	0.11	0.04	14.35	0.94
6/02/2556 9:30 น.	16.02	0.06	0.00	0.07	0.03	15.04	1.01
7/02/2556 9:45 น.	17.03	0.06	0.01	0.06	0.01	15.42	1.25
8/02/2556 9:40 น.	18.03	0.08	0.02	0.06	0.01	16.54	1.14
9/02/2556 9:45 น.	19.03	0.05	0.01	0.11	0.07	17.29	1.22
10/02/2556 10:20 น.	20.06	0.09	0.01	0.08	0.01	18.18	1.44
11/02/2556 10:00 น.	21.04	0.04	0.01	0.04	0.00	17.92	0.64
12/02/2556 9:30 น.	22.02	0.08	0.00	0.13	0.13	19.35	1.22

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
13/02/2556 8:30 น.	22.98	0.10	0.09	0.05	0.00	20.44	1.48
13/02/2556 11:00 น.	23.08	0.15	0.03	0.17	0.19	20.40	1.61
14/02/2556 8:45 น.	23.99	0.09	0.02	0.12	0.09	21.01	1.90
15/02/2556 8:45 น.	24.99	0.20	0.09	0.06	0.00	21.28	1.20
16/02/2556 9:30 น.	26.02	0.10	0.04	0.03	0.01	22.38	1.66
18/02/2556 11:00 น.	28.08	0.07	0.06	0.03	0.01	24.94	1.70
19/02/2556 10:00 น.	29.04	0.04	0.03	0.05	0.02	26.77	1.73
20/02/2556 10:00 น.	30.04	0.08	0.05	0.07	0.06	27.89	1.56
21/02/2556 9:35 น.	31.02	0.08	0.01	0.04	0.01	28.27	1.91
22/02/2556 12:40 น.	32.15	0.08	0.03	0.05	0.01	28.74	2.01
23/02/2556 10:00 น.	33.04	0.10	0.02	0.13	0.02	29.24	2.17
24/02/2556 10:00 น.	34.04	0.09	0.02	0.18	0.04	29.30	0.71
25/02/2556 10:00 น.	35.04	0.17	0.04	0.29	0.09	31.21	1.17
26/02/2556 9:30 น.	36.02	0.08	0.03	0.12	0.02	33.41	2.11
27/02/2556 9:30 น.	37.02	0.09	0.01	0.12	0.03	32.31	1.31
28/02/2556 10:00 น.	38.04	0.07	0.03	0.14	0.04	35.46	2.52
1/03/2556 9:30 น.	39.02	0.08	0.03	0.16	0.03	35.97	2.35
3/03/2556 11:00 น.	41.08	0.11	0.03	0.12	0.04	38.74	2.78
5/03/2556 10:00 น.	43.04	0.23	0.05	0.22	0.02	39.27	3.29
7/03/2556 9:30 น.	45.02	0.11	0.02	0.21	0.03	38.79	9.47
8/03/2556 10:00 น.	46.04	0.14	0.01	0.17	0.03	39.84	9.43
9/03/2556 10:30 น.	47.06	0.12	0.03	0.18	0.03	42.06	9.33
10/03/2556 9:45 น.	48.03	0.13	0.06	0.20	0.01	42.95	10.09
11/03/2556 10:00 น.	49.04	0.09	0.04	0.21	0.03	46.01	10.62
12/03/2556 9:45 น.	50.03	0.11	0.03	0.20	0.03	45.69	9.58
14/03/2556 10:00 น.	52.04	0.14	0.03	0.18	0.10	44.67	16.26
16/03/2556 8:45 น.	53.99	0.22	0.07	0.40	0.28	45.22	20.61
16/03/2556 13:30 น.	54.19	0.25	0.14	0.41	0.31	45.99	20.17
17/03/2556 9:30 น.	55.02	0.21	0.08	0.16	0.05	48.00	21.55
18/03/2556 9:45 น.	56.03	0.20	0.03	0.42	0.28	43.01	21.57
19/03/2556 9:30 น.	57.02	0.18	0.06	0.29	0.17	49.74	21.71
20/03/2556 9:30 น.	58.02	0.13	0.02	0.25	0.14	52.89	22.64
21/03/2556 9:00 น.	59.00	0.15	0.04	0.23	0.13	51.34	18.90
22/03/2556 9:00 น.	60.00	0.14	0.01	0.21	0.10	57.10	22.01
23/03/2556 9:00 น.	61.00	0.20	0.08	0.16	0.09	56.09	21.79
24/03/2556 9:15 น.	62.01	0.16	0.02	0.22	0.12	58.84	21.75
25/03/2556 9:10 น.	63.01	0.12	0.02	0.20	0.10	63.13	20.93
26/03/2556 9:00 น.	64.00	0.11	0.04	0.12	0.08	63.16	18.59
27/03/2556 10:00 น.	65.04	0.06	0.03	0.32	0.15	60.50	18.14
28/03/2556 10:15 น.	66.05	0.12	0.03	0.14	0.08	62.35	17.69
29/03/2556 9:30 น.	67.02	0.14	0.02	0.16	0.09	69.25	18.92
30/03/2556 9:00 น.	68.00	0.12	0.02	0.22	0.08	68.71	23.00
31/03/2556 10:00 น.	69.04	0.13	0.04	0.26	0.13	69.91	22.08
1/04/2556 9:00 น.	70.00	0.12	0.03	0.27	0.16	72.58	21.83
2/04/2556 9:00 น.	71.00	0.14	0.04	0.36	0.23	71.82	19.64
4/04/2556 9:30 น.	73.02	0.16	0.11	0.13	0.06	76.34	21.67
7/04/2556 14:00 น.	76.21	0.14	0.03	0.17	0.08	82.68	20.42
8/04/2556 10:15 น.	77.05	0.14	0.02	0.16	0.08	85.22	21.93
8/04/2556 15:30 น.	77.27	0.24	0.02	0.18	0.08	87.30	21.89

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
9/04/2556 10:00 น.	78.04	0.19	0.07	0.23	0.04	87.07	21.68
10/04/2556 9:45 น.	79.03	0.14	0.05	0.17	0.10	89.70	23.64
11/04/2556 10:00 น.	80.04	0.12	0.04	0.09	0.05	90.62	22.30
12/04/2556 10:15 น.	81.05	0.08	0.03	0.07	0.05	90.68	23.49
13/04/2556 10:15 น.	82.05	0.12	0.04	0.08	0.04	89.36	20.33
14/04/2556 10:00 น.	83.04	0.09	0.07	0.17	0.10	90.44	21.17
15/04/2556 10:20 น.	84.06	0.11	0.04	0.15	0.07	91.77	21.25
17/04/2556 10:00 น.	86.04	0.08	0.00	0.10	0.05	94.30	21.35
18/04/2556 9:30 น.	87.02	0.12	0.07	0.24	0.03	96.86	21.78
19/04/2556 9:40 น.	88.03	0.19	0.10	0.26	0.14	98.67	22.36
20/04/2556 9:40 น.	89.03	0.16	0.04	0.27	0.19	101.36	22.02
21/04/2556 10:00 น.	90.04	0.14	0.05	0.18	0.02	101.08	22.09
22/04/2556 10:45 น.	91.07	0.13	0.10	0.21	0.12	104.34	22.60
22/04/2556 16:30 น.	91.31	0.17	0.08	0.21	0.12	105.19	22.14
23/04/2556 9:45 น.	92.03	0.11	0.08	0.18	0.16	100.74	21.24
24/04/2556 10:00 น.	93.04	0.11	0.04	0.23	0.14	104.70	23.89
25/04/2556 9:45 น.	94.03	0.13	0.07	0.29	0.17	108.94	24.52
26/04/2556 9:30 น.	95.02	0.13	0.05	0.22	0.12	109.67	20.29
27/04/2556 10:00 น.	96.04	0.08	0.06	0.26	0.19	106.44	21.39
28/04/2556 10:00 น.	97.04	0.09	0.05	0.19	0.12	112.40	20.94
29/04/2556 9:40 น.	98.03	0.12	0.06	0.25	0.13	111.92	22.38
30/04/2556 12:40 น.	99.15	0.15	0.07	0.22	0.09	114.91	20.75
1/05/2556 9:30 น.	100.02	0.09	0.03	0.14	0.09	118.26	23.33
1/05/2556 16:15 น.	100.30	0.21	0.08	0.26	0.13	116.82	22.31
2/05/2556 9:10 น.	101.01	0.17	0.09	0.27	0.18	118.00	21.36
3/05/2556 9:30 น.	102.02	0.18	0.13	0.29	0.30	117.43	21.06
4/05/2556 9:30 น.	103.02	0.15	0.07	0.25	0.18	117.25	21.89
5/05/2556 13:30 น.	104.19	0.23	0.08	0.31	0.19	125.80	22.74
6/05/2556 9:40 น.	105.03	0.15	0.05	0.33	0.19	123.35	21.64
7/05/2556 10:00 น.	106.04	0.13	0.06	0.21	0.16	123.38	21.99
8/05/2556 10:00 น.	107.04	0.08	0.03	0.15	0.10	130.27	23.67
9/05/2556 10:00 น.	108.04	0.15	0.05	0.25	0.21	129.16	23.63
10/05/2556 10:00 น.	109.04	0.13	0.04	0.20	0.14	130.19	22.42
11/05/2556 11:30 น.	110.10	0.11	0.01	0.11	0.05	128.47	22.81
11/05/2556 17:30 น.	110.35	0.21	0.09	0.19	0.08	130.89	22.53
12/05/2556 10:40 น.	111.07	0.09	0.03	0.27	0.23	128.89	21.50
13/05/2556 10:45 น.	112.07	0.15	0.06	0.31	0.28	134.58	22.14
14/05/2556 10:00 น.	113.04	0.14	0.05	0.40	0.44	134.10	19.06
15/05/2556 10:00 น.	114.04	0.16	0.06	0.28	0.14	136.46	23.70
16/05/2556 10:15 น.	115.05	0.12	0.03	0.22	0.07	137.09	22.51
17/05/2556 9:50 น.	116.03	0.11	0.03	0.26	0.12	136.67	20.47
18/05/2556 10:30 น.	117.06	0.13	0.05	0.20	0.10	143.63	19.56
19/05/2556 10:30 น.	118.06	0.13	0.04	0.24	0.11	143.01	22.82
20/05/2556 9:50 น.	119.03	0.15	0.04	0.22	0.07	140.19	20.40
22/05/2556 10:00 น.	121.04	0.16	0.02	0.21	0.09	145.31	21.88

ตารางที่ ง-4 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตของชุดควบคุม-2 (ถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน) จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
21/01/2556 9:00 น.	0.00	0.03	0.03	0.01	0.00	4.16	0.87
22/01/2556 8:30 น.	0.98	0.13	0.01	0.02	0.00	4.97	0.86
22/01/2556 11:30 น.	1.10	0.11	0.01	0.02	0.01	4.93	0.95
23/01/2556 8:45 น.	1.99	0.28	0.10	0.07	0.01	5.36	0.97
24/01/2556 8:45 น.	2.99	0.22	0.05	0.11	0.02	6.27	1.20
25/01/2556 8:50 น.	3.99	0.13	0.04	0.11	0.04	7.30	1.06
26/01/2556 16:00 น.	5.29	0.25	0.10	0.08	0.04	8.65	1.45
27/01/2556 9:40 น.	6.03	0.07	0.02	0.06	0.03	9.02	1.34
28/01/2556 12:30 น.	7.15	0.05	0.02	0.04	0.03	9.13	0.98
29/01/2556 9:30 น.	8.02	0.05	0.00	0.04	0.01	10.37	1.11
30/01/2556 9:40 น.	9.03	0.03	0.01	0.04	0.00	10.59	1.12
31/01/2556 10:00 น.	10.04	0.02	0.00	0.04	0.00	11.21	0.91
1/02/2556 10:00 น.	11.04	0.00	0.00	0.02	0.00	11.94	0.94
2/02/2556 10:00 น.	12.04	0.01	0.00	0.02	0.01	12.35	1.13
3/02/2556 10:00 น.	13.04	0.06	0.05	0.03	0.01	13.06	0.98
4/02/2556 9:40 น.	14.03	0.05	0.01	0.15	0.02	13.56	1.07
5/02/2556 13:00 น.	15.17	0.01	0.01	0.06	0.02	14.49	1.15
6/02/2556 9:30 น.	16.02	0.03	0.01	0.03	0.00	14.92	1.13
7/02/2556 9:45 น.	17.03	0.03	0.01	0.03	0.01	15.49	1.09
8/02/2556 9:40 น.	18.03	0.02	0.00	0.03	0.00	16.70	1.29
9/02/2556 9:45 น.	19.03	0.01	0.00	0.03	0.00	17.36	1.33
10/02/2556 10:20 น.	20.06	0.02	0.01	0.04	0.00	18.07	1.21
11/02/2556 10:00 น.	21.04	0.01	0.01	0.02	0.00	18.06	1.48
12/02/2556 9:30 น.	22.02	0.04	0.01	0.03	0.00	19.46	1.31
13/02/2556 8:30 น.	22.98	0.07	0.03	0.03	0.00	21.06	1.24
13/02/2556 11:00 น.	23.08	0.03	0.01	0.04	0.00	20.40	1.36
14/02/2556 8:45 น.	23.99	0.02	0.01	0.04	0.00	21.15	1.15
15/02/2556 8:45 น.	24.99	0.11	0.00	0.04	0.01	21.49	1.45
16/02/2556 9:30 น.	26.02	0.04	0.01	0.02	0.00	22.32	1.44
18/02/2556 11:00 น.	28.08	0.03	0.01	0.02	0.00	24.85	1.75
19/02/2556 10:00 น.	29.04	0.01	0.02	0.04	0.01	26.84	2.04
20/02/2556 10:00 น.	30.04	0.01	0.02	0.04	0.01	27.58	1.90
21/02/2556 9:35 น.	31.02	0.03	0.04	0.03	0.01	28.34	2.80
22/02/2556 12:40 น.	32.15	0.05	0.01	0.03	0.01	28.54	1.66
23/02/2556 10:00 น.	33.04	0.02	0.00	0.09	0.02	28.37	2.12
24/02/2556 10:00 น.	34.04	0.00	0.00	0.12	0.05	25.51	3.74
25/02/2556 10:00 น.	35.04	0.00	0.00	0.10	0.07	31.47	2.03
26/02/2556 9:30 น.	36.02	0.05	0.01	0.09	0.03	33.51	2.37
27/02/2556 9:30 น.	37.02	0.04	0.01	0.09	0.02	32.34	2.30
28/02/2556 10:00 น.	38.04	0.04	0.01	0.11	0.03	34.74	2.29
1/03/2556 9:30 น.	39.02	0.06	0.01	0.13	0.03	35.96	2.20
3/03/2556 11:00 น.	41.08	0.07	0.04	0.10	0.04	37.35	3.29
5/03/2556 10:00 น.	43.04	0.13	0.00	0.21	0.03	39.91	3.05
7/03/2556 9:30 น.	45.02	0.09	0.04	0.19	0.04	38.79	9.76
8/03/2556 10:00 น.	46.04	0.11	0.00	0.15	0.03	41.13	13.26

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
9/03/2556 10:30 น.	47.06	0.08	0.06	0.16	0.04	41.95	10.25
10/03/2556 9:45 น.	48.03	0.14	0.01	0.17	0.01	43.06	10.28
11/03/2556 10:00 น.	49.04	0.03	0.02	0.18	0.01	46.20	10.43
12/03/2556 9:45 น.	50.03	0.06	0.01	0.17	0.02	46.44	11.48
14/03/2556 10:00 น.	52.04	0.09	0.04	0.15	0.08	45.27	17.21
16/03/2556 8:45 น.	53.99	0.11	0.06	0.37	0.25	38.90	18.28
16/03/2556 13:30 น.	54.19	0.08	0.04	0.37	0.27	44.73	21.66
17/03/2556 9:30 น.	55.02	0.13	0.04	0.14	0.04	46.95	21.26
18/03/2556 9:45 น.	56.03	0.16	0.04	0.39	0.30	47.55	21.18
19/03/2556 9:30 น.	57.02	0.11	0.04	0.25	0.15	49.82	21.46
20/03/2556 9:30 น.	58.02	0.11	0.06	0.23	0.13	52.37	22.12
21/03/2556 9:00 น.	59.00	0.10	0.05	0.25	0.15	49.46	19.54
22/03/2556 9:00 น.	60.00	0.06	0.02	0.24	0.12	57.34	22.18
23/03/2556 9:00 น.	61.00	0.11	0.06	0.16	0.10	55.36	22.04
24/03/2556 9:15 น.	62.01	0.08	0.02	0.21	0.14	58.93	22.28
25/03/2556 9:10 น.	63.01	0.05	0.01	0.21	0.12	61.08	23.57
26/03/2556 9:00 น.	64.00	0.07	0.03	0.13	0.08	62.84	22.30
27/03/2556 10:00 น.	65.04	0.02	0.00	0.30	0.10	60.59	21.19
28/03/2556 10:15 น.	66.05	0.05	0.01	0.15	0.06	63.78	22.33
29/03/2556 9:30 น.	67.02	0.07	0.01	0.11	0.07	69.96	24.06
30/03/2556 9:00 น.	68.00	0.07	0.02	0.23	0.09	69.86	22.85
31/03/2556 10:00 น.	69.04	0.05	0.01	0.23	0.08	69.99	21.10
1/04/2556 9:00 น.	70.00	0.06	0.02	0.26	0.12	71.72	22.09
2/04/2556 9:00 น.	71.00	0.07	0.01	0.30	0.12	72.75	20.87
4/04/2556 9:30 น.	73.02	0.08	0.01	0.15	0.06	77.12	21.26
7/04/2556 14:00 น.	76.21	0.10	0.01	0.19	0.11	82.33	23.65
8/04/2556 10:15 น.	77.05	0.03	0.01	0.16	0.07	83.62	22.90
8/04/2556 15:30 น.	77.27	0.12	0.01	0.15	0.04	82.78	21.13
9/04/2556 10:00 น.	78.04	0.08	0.06	0.16	0.09	87.16	22.50
10/04/2556 9:45 น.	79.03	0.11	0.04	0.17	0.12	87.37	22.05
11/04/2556 10:00 น.	80.04	0.08	0.01	0.13	0.04	88.23	23.70
12/04/2556 10:15 น.	81.05	0.08	0.03	0.11	0.05	89.86	23.33
13/04/2556 10:15 น.	82.05	0.04	0.04	0.10	0.03	89.42	23.11
14/04/2556 10:00 น.	83.04	0.04	0.03	0.26	0.10	91.04	22.74
15/04/2556 10:20 น.	84.06	0.05	0.02	0.22	0.04	90.07	23.04
17/04/2556 10:00 น.	86.04	0.03	0.02	0.23	0.14	92.75	23.41
18/04/2556 9:30 น.	87.02	0.07	0.03	0.18	0.08	97.47	22.91
19/04/2556 9:40 น.	88.03	0.14	0.02	0.23	0.12	97.54	22.77
20/04/2556 9:40 น.	89.03	0.18	0.07	0.27	0.18	100.20	22.23
21/04/2556 10:00 น.	90.04	0.20	0.01	0.12	0.05	98.81	21.63
22/04/2556 10:45 น.	91.07	0.21	0.05	0.20	0.08	104.14	24.38
22/04/2556 16:30 น.	91.31	0.09	0.03	0.16	0.07	103.14	21.93
23/04/2556 9:45 น.	92.03	0.01	0.01	0.14	0.10	101.13	24.18
24/04/2556 10:00 น.	93.04	0.06	0.02	0.21	0.10	103.05	22.82
25/04/2556 9:45 น.	94.03	0.11	0.01	0.30	0.18	107.17	22.45
26/04/2556 9:30 น.	95.02	0.07	0.03	0.26	0.14	110.78	23.35
27/04/2556 10:00 น.	96.04	0.03	0.03	0.23	0.04	105.22	22.27
28/04/2556 10:00 น.	97.04	0.02	0.02	0.19	0.07	111.88	22.86
29/04/2556 9:40 น.	98.03	0.06	0.01	0.22	0.10	112.94	23.14

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
30/04/2556 12:40 น.	99.15	0.09	0.02	0.25	0.13	114.69	22.79
1/05/2556 9:30 น.	100.02	0.05	0.01	0.16	0.08	112.67	24.10
1/05/2556 16:15 น.	100.30	0.13	0.02	0.20	0.08	115.19	21.52
2/05/2556 9:10 น.	101.01	0.06	0.03	0.21	0.13	114.62	20.26
3/05/2556 9:30 น.	102.02	0.07	0.02	0.21	0.14	116.08	21.94
4/05/2556 9:30 น.	103.02	0.06	0.01	0.27	0.24	113.71	23.14
5/05/2556 13:30 น.	104.19	0.17	0.05	0.45	0.25	124.73	21.83
6/05/2556 9:40 น.	105.03	0.09	0.04	0.29	0.15	121.56	21.79
7/05/2556 10:00 น.	106.04	0.12	0.03	0.30	0.15	120.04	21.94
8/05/2556 10:00 น.	107.04	0.04	0.03	0.15	0.08	125.67	23.33
9/05/2556 10:00 น.	108.04	0.08	0.03	0.22	0.13	128.59	23.08
10/05/2556 10:00 น.	109.04	0.07	0.01	0.35	0.34	128.11	23.43
11/05/2556 11:30 น.	110.10	0.18	0.06	0.12	0.05	128.45	23.47
11/05/2556 17:30 น.	110.35	0.14	0.01	0.19	0.07	128.21	22.30
12/05/2556 10:40 น.	111.07	0.05	0.01	0.14	0.09	127.16	23.87
13/05/2556 10:45 น.	112.07	0.14	0.02	0.19	0.15	127.68	21.30
14/05/2556 10:00 น.	113.04	0.14	0.03	0.26	0.18	129.69	25.77
15/05/2556 10:00 น.	114.04	0.12	0.05	0.21	0.08	133.64	24.18
16/05/2556 10:15 น.	115.05	0.10	0.06	0.25	0.06	134.28	21.38
17/05/2556 9:50 น.	116.03	0.07	0.02	0.18	0.11	134.62	21.13
18/05/2556 10:30 น.	117.06	0.08	0.02	0.23	0.16	140.02	21.21
19/05/2556 10:30 น.	118.06	0.07	0.04	0.21	0.07	139.49	25.16
20/05/2556 9:50 น.	119.03	0.09	0.04	0.03	0.01	141.10	21.69
22/05/2556 10:00 น.	121.04	0.11	0.04	0.19	0.10	141.95	22.31

ตารางที่ ง-5 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตของชุดทดลอง (ถังเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน - ดีไนทริฟิเคชัน) จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
21/01/2556 9:00 น.	0.00	0.04	0.02	0.01	0.01	4.59	0.31
22/01/2556 8:30 น.	0.98	0.35	0.01	0.01	0.00	4.89	0.43
22/01/2556 11:30 น.	1.10	0.42	0.03	0.01	0.00	5.11	0.42
23/01/2556 8:45 น.	1.99	0.84	0.08	0.05	0.02	5.31	0.48
24/01/2556 8:45 น.	2.99	1.38	0.11	0.11	0.04	5.55	0.63
25/01/2556 8:50 น.	3.99	1.85	0.13	0.20	0.09	5.45	1.15
26/01/2556 16:00 น.	5.29	2.46	0.43	0.54	0.28	5.64	0.83
27/01/2556 9:40 น.	6.03	2.19	0.55	0.63	0.33	6.15	1.10
28/01/2556 12:30 น.	7.15	1.58	0.77	0.91	0.51	5.64	0.94
29/01/2556 9:30 น.	8.02	1.26	0.98	1.51	0.64	6.53	1.11
30/01/2556 9:40 น.	9.03	0.45	0.61	2.45	0.37	7.02	1.19
31/01/2556 10:00 น.	10.04	0.07	0.01	3.01	0.98	7.49	0.91
1/02/2556 10:00 น.	11.04	0.09	0.01	2.86	1.07	8.20	1.12
2/02/2556 10:00 น.	12.04	0.08	0.01	2.62	1.33	8.80	1.40

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
3/02/2556 10:00 น.	13.04	0.07	0.03	2.69	1.96	9.28	1.89
4/02/2556 9:40 น.	14.03	0.08	0.00	2.08	1.86	10.44	1.42
5/02/2556 13:00 น.	15.17	0.09	0.01	1.68	1.80	11.66	1.64
6/02/2556 9:30 น.	16.02	0.11	0.01	1.36	1.51	12.34	1.75
7/02/2556 9:45 น.	17.03	0.13	0.00	1.18	1.32	12.88	1.38
8/02/2556 9:40 น.	18.03	0.13	0.01	1.01	0.88	14.19	1.01
9/02/2556 9:45 น.	19.03	0.07	0.01	0.71	0.55	14.95	1.28
10/02/2556 10:20 น.	20.06	0.10	0.00	0.40	0.20	16.16	0.82
11/02/2556 10:00 น.	21.04	0.11	0.03	0.26	0.07	16.12	1.00
12/02/2556 9:30 น.	22.02	0.11	0.01	0.29	0.07	17.19	1.16
13/02/2556 8:30 น.	22.98	0.11	0.01	0.29	0.06	18.69	1.15
13/02/2556 11:00 น.	23.08	0.17	0.01	0.29	0.06	18.27	1.19
14/02/2556 8:45 น.	23.99	0.16	0.03	0.41	0.05	19.41	1.19
15/02/2556 8:45 น.	24.99	0.20	0.03	0.45	0.06	20.38	1.18
16/02/2556 9:30 น.	26.02	0.16	0.02	0.48	0.05	21.49	1.08
18/02/2556 11:00 น.	28.08	0.13	0.02	0.28	0.02	25.57	0.80
19/02/2556 10:00 น.	29.04	0.10	0.00	0.34	0.02	27.25	1.16
20/02/2556 10:00 น.	30.04	0.14	0.03	0.52	0.07	29.25	1.62
21/02/2556 9:35 น.	31.02	0.15	0.01	0.62	0.16	31.00	1.48
22/02/2556 12:40 น.	32.15	0.11	0.01	0.26	0.05	21.18	2.14
23/02/2556 10:00 น.	33.04	0.12	0.03	0.33	0.07	21.80	1.82
24/02/2556 10:00 น.	34.04	0.17	0.01	0.35	0.14	22.40	2.43
25/02/2556 10:00 น.	35.04	0.12	0.02	0.41	0.08	24.66	1.54
26/02/2556 9:30 น.	36.02	0.17	0.03	0.44	0.10	25.58	1.60
27/02/2556 9:30 น.	37.02	0.14	0.01	0.50	0.13	25.84	1.31
28/02/2556 10:00 น.	38.04	0.11	0.02	0.45	0.13	26.90	1.14
1/03/2556 9:30 น.	39.02	0.13	0.04	0.41	0.10	28.28	1.16
3/03/2556 11:00 น.	41.08	0.13	0.02	0.31	0.05	30.34	1.17
5/03/2556 10:00 น.	43.04	0.21	0.03	0.34	0.04	32.20	0.93
7/03/2556 9:30 น.	45.02	0.14	0.01	0.33	0.04	30.81	5.27
8/03/2556 10:00 น.	46.04	0.20	0.02	0.29	0.03	32.96	5.76
9/03/2556 10:30 น.	47.06	0.17	0.01	0.30	0.03	33.97	5.43
10/03/2556 9:45 น.	48.03	0.20	0.01	0.31	0.07	35.73	5.58
11/03/2556 10:00 น.	49.04	0.09	0.01	0.29	0.01	36.76	5.90
12/03/2556 9:45 น.	50.03	0.13	0.02	0.27	0.06	38.96	5.88
14/03/2556 10:00 น.	52.04	0.17	0.02	0.35	0.10	38.89	5.24
16/03/2556 8:45 น.	53.99	0.19	0.02	0.57	0.08	42.27	5.37
16/03/2556 13:30 น.	54.19	0.32	0.03	0.57	0.01	42.40	5.01
17/03/2556 9:30 น.	55.02	0.48	0.06	0.13	0.02	47.70	5.98
18/03/2556 9:45 น.	56.03	0.42	0.05	1.21	0.12	48.25	6.11
19/03/2556 9:30 น.	57.02	0.22	0.04	0.74	0.14	52.66	5.02
20/03/2556 9:30 น.	58.02	0.13	0.02	0.50	0.07	58.01	6.53
21/03/2556 9:00 น.	59.00	0.14	0.02	0.55	0.18	57.97	5.49
22/03/2556 9:00 น.	60.00	0.10	0.03	0.57	0.11	64.78	6.15
23/03/2556 9:00 น.	61.00	0.15	0.02	0.45	0.14	64.42	4.01
24/03/2556 9:15 น.	62.01	0.13	0.05	0.28	0.11	68.27	4.29
25/03/2556 9:10 น.	63.01	0.10	0.05	0.51	0.60	70.69	6.55
26/03/2556 9:00 น.	64.00	0.21	0.04	0.22	0.16	67.66	5.05

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
27/03/2556 10:00 น.	65.04	0.18	0.02	0.71	0.53	59.54	8.47
28/03/2556 10:15 น.	66.05	0.18	0.01	0.19	0.12	56.01	2.69
29/03/2556 9:30 น.	67.02	0.13	0.02	0.26	0.15	70.82	11.70
30/03/2556 9:00 น.	68.00	0.06	0.02	0.26	0.12	86.67	7.45
31/03/2556 10:00 น.	69.04	0.07	0.01	0.26	0.09	86.20	5.14
1/04/2556 9:00 น.	70.00	0.06	0.01	0.22	0.11	92.48	6.16
2/04/2556 9:00 น.	71.00	0.37	0.15	0.64	0.14	53.40	4.19
4/04/2556 9:30 น.	73.02	0.19	0.06	0.25	0.08	57.44	4.10
7/04/2556 14:00 น.	76.21	0.25	0.08	0.22	0.05	58.98	3.75
8/04/2556 10:15 น.	77.05	0.11	0.03	0.27	0.06	62.02	4.06
8/04/2556 15:30 น.	77.27	0.30	0.05	0.34	0.09	62.66	4.59
9/04/2556 10:00 น.	78.04	0.27	0.08	0.54	0.29	64.73	5.08
10/04/2556 9:45 น.	79.03	0.33	0.02	0.68	0.34	65.90	4.10
11/04/2556 10:00 น.	80.04	0.33	0.05	0.42	0.29	68.06	4.77
12/04/2556 10:15 น.	81.05	0.18	0.03	0.22	0.10	71.27	5.63
13/04/2556 10:15 น.	82.05	0.16	0.04	0.23	0.10	70.17	5.66
14/04/2556 10:00 น.	83.04	0.10	0.01	0.47	0.12	73.62	5.19
15/04/2556 10:20 น.	84.06	0.12	0.04	0.66	0.17	74.19	4.55
17/04/2556 10:00 น.	86.04	0.04	0.05	0.50	0.11	79.89	4.43
18/04/2556 9:30 น.	87.02	0.04	0.01	0.45	0.16	85.60	4.24
19/04/2556 9:40 น.	88.03	0.10	0.02	0.41	0.16	88.10	2.43
20/04/2556 9:40 น.	89.03	0.16	0.02	0.37	0.16	91.87	3.92
21/04/2556 10:00 น.	90.04	0.29	0.10	0.16	0.08	55.90	2.51
22/04/2556 10:45 น.	91.07	0.18	0.05	0.20	0.10	61.33	2.05
22/04/2556 16:30 น.	91.31	0.20	0.08	0.20	0.10	57.64	4.83
23/04/2556 9:45 น.	92.03	0.12	0.05	0.11	0.05	60.94	3.27
24/04/2556 10:00 น.	93.04	0.17	0.05	0.19	0.05	60.92	2.33
25/04/2556 9:45 น.	94.03	0.20	0.02	0.30	0.08	64.53	4.48
26/04/2556 9:30 น.	95.02	0.17	0.02	0.30	0.09	67.93	4.09
27/04/2556 10:00 น.	96.04	0.09	0.01	0.37	0.12	67.11	3.53
28/04/2556 10:00 น.	97.04	0.09	0.02	0.47	0.14	73.24	4.23
29/04/2556 9:40 น.	98.03	0.08	0.02	0.50	0.08	76.73	6.58
30/04/2556 12:40 น.	99.15	0.15	0.05	0.11	0.03	52.51	3.99
1/05/2556 9:30 น.	100.02	0.14	0.02	0.10	0.06	51.21	3.68
1/05/2556 16:15 น.	100.30	0.22	0.03	0.21	0.15	53.17	4.89
2/05/2556 9:10 น.	101.01	0.28	0.05	0.27	0.04	52.23	2.99
3/05/2556 9:30 น.	102.02	0.26	0.11	0.41	0.20	53.86	3.48
4/05/2556 9:30 น.	103.02	0.19	0.08	0.32	0.16	54.58	5.52
5/05/2556 13:30 น.	104.19	0.18	0.11	0.37	0.13	62.84	8.03
6/05/2556 9:40 น.	105.03	0.14	0.05	0.36	0.23	64.34	7.44
7/05/2556 10:00 น.	106.04	0.11	0.06	0.38	0.27	62.04	5.90
8/05/2556 10:00 น.	107.04	0.03	0.02	0.37	0.23	68.13	10.28
9/05/2556 10:00 น.	108.04	0.14	0.07	0.10	0.06	44.99	6.82
10/05/2556 10:00 น.	109.04	0.15	0.10	0.13	0.10	45.74	9.98
11/05/2556 11:30 น.	110.10	0.17	0.09	0.09	0.02	45.63	9.06
11/05/2556 17:30 น.	110.35	0.33	0.14	0.13	0.06	47.23	8.99
12/05/2556 10:40 น.	111.07	0.51	0.28	0.42	0.38	48.98	9.63
13/05/2556 10:45 น.	112.07	0.54	0.28	1.33	1.55	52.52	9.44
14/05/2556 10:00 น.	113.04	0.31	0.17	0.91	1.10	55.68	6.97

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
15/05/2556 10:00 น.	114.04	0.27	0.07	0.68	0.20	58.40	10.57
16/05/2556 10:15 น.	115.05	0.12	0.03	0.54	0.06	60.21	7.80
17/05/2556 9:50 น.	116.03	0.05	0.02	0.40	0.15	63.40	7.00
18/05/2556 10:30 น.	117.06	0.07	0.02	0.41	0.06	66.93	7.55
19/05/2556 10:30 น.	118.06	0.11	0.04	0.09	0.02	43.45	6.92
20/05/2556 9:50 น.	119.03	0.10	0.05	0.07	0.02	44.42	7.41
22/05/2556 10:00 น.	121.04	0.15	0.06	0.11	0.07	46.89	8.45

ตารางที่ ง-6 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตของชุดทดลอง (ถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน) จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
21/01/2556 9:00 น.	0.00	0.08	0.05	0.00	0.00	4.53	0.62
22/01/2556 8:30 น.	0.98	0.34	0.06	0.01	0.00	5.08	0.41
22/01/2556 11:30 น.	1.10	0.35	0.01	0.02	0.00	5.19	0.27
23/01/2556 8:45 น.	1.99	0.87	0.03	0.06	0.02	5.21	0.52
24/01/2556 8:45 น.	2.99	1.42	0.04	0.12	0.05	5.64	0.73
25/01/2556 8:50 น.	3.99	2.12	0.09	0.22	0.07	5.66	0.76
26/01/2556 16:00 น.	5.29	2.20	0.34	0.52	0.26	5.55	0.84
27/01/2556 9:40 น.	6.03	2.02	0.45	0.67	0.29	5.78	1.15
28/01/2556 12:30 น.	7.15	1.46	0.75	0.95	0.51	5.94	1.02
29/01/2556 9:30 น.	8.02	1.23	0.93	1.51	0.61	6.55	0.97
30/01/2556 9:40 น.	9.03	0.46	0.65	2.57	0.51	6.65	1.29
31/01/2556 10:00 น.	10.04	0.03	0.01	3.02	1.00	7.43	0.94
1/02/2556 10:00 น.	11.04	0.05	0.01	2.66	1.14	8.23	1.14
2/02/2556 10:00 น.	12.04	0.06	0.01	2.49	1.58	8.78	1.58
3/02/2556 10:00 น.	13.04	0.03	0.01	2.23	1.68	9.62	1.37
4/02/2556 9:40 น.	14.03	0.12	0.09	2.11	1.92	10.20	1.55
5/02/2556 13:00 น.	15.17	0.03	0.01	1.71	1.84	11.46	1.51
6/02/2556 9:30 น.	16.02	0.09	0.02	1.36	1.52	12.18	1.39
7/02/2556 9:45 น.	17.03	0.07	0.00	1.16	1.30	13.00	1.23
8/02/2556 9:40 น.	18.03	0.09	0.01	1.06	1.01	13.82	1.04
9/02/2556 9:45 น.	19.03	0.04	0.00	0.71	0.55	15.15	1.06
10/02/2556 10:20 น.	20.06	0.07	0.00	0.42	0.22	16.22	0.76
11/02/2556 10:00 น.	21.04	0.09	0.02	0.27	0.07	16.35	1.05
12/02/2556 9:30 น.	22.02	0.10	0.02	0.29	0.08	17.37	0.90
13/02/2556 8:30 น.	22.98	0.09	0.03	0.38	0.01	18.77	0.93
13/02/2556 11:00 น.	23.08	0.09	0.03	0.28	0.07	18.03	1.08
14/02/2556 8:45 น.	23.99	0.00	0.00	0.12	0.07	17.42	0.95
15/02/2556 8:45 น.	24.99	0.08	0.01	1.01	0.57	14.19	1.85
16/02/2556 9:30 น.	26.02	0.14	0.12	1.87	0.94	10.94	2.37
18/02/2556 11:00 น.	28.08	0.55	0.17	1.05	0.44	9.78	2.28
19/02/2556 10:00 น.	29.04	0.33	0.23	0.68	0.47	10.07	2.14
20/02/2556 10:00 น.	30.04	0.23	0.22	0.36	0.34	10.15	1.49
21/02/2556 9:35 น.	31.02	0.18	0.21	0.25	0.32	10.64	1.33

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
22/02/2556 12:40 น.	32.15	0.10	0.00	0.25	0.06	19.67	3.78
23/02/2556 10:00 น.	33.04	0.10	0.02	0.35	0.07	21.42	1.45
24/02/2556 10:00 น.	34.04	0.12	0.03	0.30	0.06	22.48	0.49
25/02/2556 10:00 น.	35.04	0.12	0.04	0.38	0.07	24.67	1.62
26/02/2556 9:30 น.	36.02	0.14	0.00	0.48	0.12	25.37	1.48
27/02/2556 9:30 น.	37.02	0.11	0.02	0.51	0.12	25.37	1.68
28/02/2556 10:00 น.	38.04	0.11	0.04	0.49	0.12	27.44	1.44
1/03/2556 9:30 น.	39.02	0.08	0.02	0.41	0.10	28.41	1.10
3/03/2556 11:00 น.	41.08	0.12	0.04	0.31	0.06	29.70	0.23
5/03/2556 10:00 น.	43.04	0.14	0.01	0.32	0.06	30.91	1.55
7/03/2556 9:30 น.	45.02	0.09	0.03	0.34	0.05	30.97	5.40
8/03/2556 10:00 น.	46.04	0.14	0.01	0.28	0.04	32.46	5.83
9/03/2556 10:30 น.	47.06	0.15	0.05	0.34	0.03	33.92	5.67
10/03/2556 9:45 น.	48.03	0.18	0.08	0.36	0.08	35.05	6.02
11/03/2556 10:00 น.	49.04	0.03	0.01	0.30	0.06	36.55	5.75
12/03/2556 9:45 น.	50.03	0.08	0.03	0.31	0.06	39.31	6.66
14/03/2556 10:00 น.	52.04	0.13	0.00	0.38	0.15	38.80	4.90
16/03/2556 8:45 น.	53.99	0.17	0.03	0.67	0.07	41.45	5.57
16/03/2556 13:30 น.	54.19	0.14	0.01	0.61	0.11	41.92	5.43
17/03/2556 9:30 น.	55.02	0.39	0.05	0.86	0.13	41.27	5.53
18/03/2556 9:45 น.	56.03	0.10	0.17	1.80	1.21	30.03	1.58
19/03/2556 9:30 น.	57.02	0.00	0.00	3.83	2.95	20.32	4.20
20/03/2556 9:30 น.	58.02	0.49	0.16	4.43	3.35	12.12	4.85
21/03/2556 9:00 น.	59.00	1.50	0.25	3.47	2.02	8.12	3.11
22/03/2556 9:00 น.	60.00	1.82	0.19	2.95	1.40	7.01	3.16
23/03/2556 9:00 น.	61.00	2.62	0.23	2.27	1.20	5.86	2.47
24/03/2556 9:15 น.	62.01	2.68	0.26	1.68	1.08	5.22	2.15
25/03/2556 9:10 น.	63.01	2.79	0.14	1.36	1.08	4.66	1.79
26/03/2556 9:00 น.	64.00	2.48	0.21	1.05	0.99	3.73	1.19
27/03/2556 10:00 น.	65.04	1.69	0.52	0.65	0.48	2.45	0.52
28/03/2556 10:15 น.	66.05	1.62	0.25	0.88	0.87	2.32	1.15
29/03/2556 9:30 น.	67.02	1.39	0.05	1.28	0.54	3.25	1.24
30/03/2556 9:00 น.	68.00	1.60	0.27	0.90	0.59	4.30	1.14
31/03/2556 10:00 น.	69.04	1.42	0.29	0.79	0.47	3.56	1.15
1/04/2556 9:00 น.	70.00	1.06	0.50	0.66	0.38	3.77	1.37
2/04/2556 9:00 น.	71.00	0.31	0.16	0.70	0.10	54.19	1.57
4/04/2556 9:30 น.	73.02	0.10	0.06	0.28	0.06	57.35	4.64
7/04/2556 14:00 น.	76.21	0.16	0.05	0.23	0.04	57.13	4.05
8/04/2556 10:15 น.	77.05	0.10	0.05	0.27	0.06	60.69	4.37
8/04/2556 15:30 น.	77.27	0.12	0.01	0.29	0.07	60.56	4.89
9/04/2556 10:00 น.	78.04	0.07	0.06	0.28	0.02	59.48	4.70
10/04/2556 9:45 น.	79.03	0.00	0.00	1.33	0.50	48.67	4.39
11/04/2556 10:00 น.	80.04	0.11	0.01	4.27	2.19	32.27	0.69
12/04/2556 10:15 น.	81.05	0.90	0.15	5.48	2.86	19.80	1.42
13/04/2556 10:15 น.	82.05	1.84	0.13	5.33	2.08	15.85	1.46
14/04/2556 10:00 น.	83.04	2.46	0.17	5.44	1.81	12.99	1.55
15/04/2556 10:20 น.	84.06	2.36	0.40	5.05	1.51	11.38	2.23
17/04/2556 10:00 น.	86.04	2.31	0.54	4.66	0.85	9.45	1.23
18/04/2556 9:30 น.	87.02	0.38	0.33	1.49	0.65	12.94	1.87
19/04/2556 9:40 น.	88.03	0.02	0.01	0.02	0.02	14.26	1.04

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
20/04/2556 9:40 น.	89.03	0.10	0.09	0.01	0.00	14.58	1.12
21/04/2556 10:00 น.	90.04	0.28	0.03	0.17	0.08	55.83	2.81
22/04/2556 10:45 น.	91.07	0.09	0.12	0.23	0.08	60.83	1.22
22/04/2556 16:30 น.	91.31	0.15	0.06	0.24	0.10	58.96	1.87
23/04/2556 9:45 น.	92.03	0.12	0.19	0.56	0.07	54.67	2.11
24/04/2556 10:00 น.	93.04	0.03	0.05	2.97	0.89	41.51	2.69
25/04/2556 9:45 น.	94.03	0.44	0.21	4.23	1.35	28.67	2.97
26/04/2556 9:30 น.	95.02	1.56	0.15	3.95	1.57	23.78	3.19
27/04/2556 10:00 น.	96.04	2.54	0.16	4.55	1.59	20.00	4.17
28/04/2556 10:00 น.	97.04	2.30	0.20	4.95	1.99	17.75	2.39
29/04/2556 9:40 น.	98.03	0.37	0.21	1.59	0.82	20.03	2.84
30/04/2556 12:40 น.	99.15	0.14	0.04	0.11	0.05	52.47	4.56
1/05/2556 9:30 น.	100.02	0.09	0.03	0.10	0.03	51.50	4.04
1/05/2556 16:15 น.	100.30	0.15	0.05	0.18	0.14	53.46	3.35
2/05/2556 9:10 น.	101.01	0.00	0.00	1.70	0.27	44.92	5.85
3/05/2556 9:30 น.	102.02	0.05	0.07	4.35	0.79	30.17	4.43
4/05/2556 9:30 น.	103.02	0.14	0.07	3.33	0.57	17.32	6.13
5/05/2556 13:30 น.	104.19	1.60	0.24	3.12	0.66	15.65	7.58
6/05/2556 9:40 น.	105.03	1.54	0.24	2.57	0.82	13.56	6.57
7/05/2556 10:00 น.	106.04	1.77	0.44	2.08	1.15	13.29	4.80
8/05/2556 10:00 น.	107.04	0.01	0.02	0.04	0.05	13.78	5.74
9/05/2556 10:00 น.	108.04	0.11	0.08	0.10	0.06	43.45	6.25
10/05/2556 10:00 น.	109.04	0.11	0.08	0.14	0.10	45.91	8.97
11/05/2556 11:30 น.	110.10	0.14	0.02	0.09	0.02	45.96	8.30
11/05/2556 17:30 น.	110.35	0.15	0.00	0.12	0.03	46.34	8.63
12/05/2556 10:40 น.	111.07	0.06	0.05	0.78	0.34	41.02	7.43
13/05/2556 10:45 น.	112.07	0.08	0.11	2.38	0.73	30.73	7.52
14/05/2556 10:00 น.	113.04	0.36	0.41	2.65	0.73	19.12	7.20
15/05/2556 10:00 น.	114.04	1.35	0.57	2.31	0.60	16.16	10.86
16/05/2556 10:15 น.	115.05	1.69	0.65	1.84	0.76	14.05	10.43
17/05/2556 9:50 น.	116.03	1.88	0.71	1.46	0.96	12.43	9.97
18/05/2556 10:30 น.	117.06	0.02	0.00	0.02	0.02	13.67	9.71
19/05/2556 10:30 น.	118.06	0.07	0.03	0.08	0.03	43.20	6.50
20/05/2556 9:50 น.	119.03	0.06	0.01	0.07	0.03	43.88	7.51
22/05/2556 10:00 น.	121.04	0.13	0.04	0.11	0.07	46.07	8.31

ตารางที่ ง-7 ปริมาณตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิลของชุดควบคุม-1 (ถังเลี้ยงปลานิลที่ไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์) จำนวน 1 ถัง ชุดควบคุม-2 (ถังเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งถังเข้ากับปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน) และชุดทดลอง (ถังเลี้ยงปลานิลที่มีการติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน - ดีไนทริฟิเคชัน) ชุดการทดลองละ 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ปริมาณตะกอนแขวนลอย(มก./ล.)					
		ชุดควบคุม-1		ชุดควบคุม-2		ชุดทดลอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
13/02/2013 8:30 น.	22.98	125.33	9.87	6.00	5.29	6.67	1.76
16/03/2013 8:45 น.	53.99	379.33	19.43	9.33	6.11	16.89	7.31
1/04/2013 9:00 น.	70.00	488.89	72.44	26.30	3.39	273.70	5.59
8/04/2013 10:15 น.	77.05	562.67	22.03	40.89	9.37	35.11	0.77
20/04/2013 9:40 น.	89.03	696.67	10.41	17.78	2.55	170.00	56.74
29/04/2013 9:40 น.	98.03	678.33	12.58	41.11	11.82	113.33	43.72
10/05/2013 10:00 น.	109.04	795.00	45.83	20.00	5.77	14.44	0.96
22/05/2013 10:00 น.	121.04	955.00	52.92	30.56	5.85	19.44	5.36

ตารางที่ ง-8 ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิของชุดควบคุม-1 (ถังเลี้ยงปลานิลไม่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์) จำนวน 3 ถังทดลอง

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)	ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	พีเอช	อุณหภูมิ (^{o}ซ)
21/01/2556 9:00 น.	0.00	150.00	7.80	8.11	26.60
22/01/2556 8:30 น.	0.98	130.00	7.40	7.65	26.70
23/01/2556 8:45 น.	1.99	130.00	6.80	7.63	27.10
24/01/2556 8:45 น.	2.99	130.00	6.90	7.64	27.30
25/01/2556 8:50 น.	3.99	120.00	6.90	7.73	27.60
26/01/2556 16:00 น.	5.29	130.00	7.00	7.74	27.50
27/01/2556 9:40 น.	6.03	120.00	6.50	7.88	27.20
28/01/2556 12:30 น.	7.15	140.00	7.00	8.47	26.10
29/01/2556 9:30 น.	8.02	160.00	6.50	7.81	25.50
30/01/2556 9:40 น.	9.03	150.00	6.50	7.82	26.10
31/01/2556 10:00 น.	10.04	180.00	6.70	7.89	27.60
1/02/2556 10:00 น.	11.04	150.00	6.90	7.86	26.70
2/02/2556 10:00 น.	12.04	170.00	6.60	7.88	27.10
4/02/2556 9:40 น.	14.03	70.00	6.50	7.40	27.30
5/02/2556 13:00 น.	15.17	90.00	6.30	7.38	28.00
6/02/2556 9:30 น.	16.02	80.00	6.40	7.25	28.20
7/02/2556 9:45 น.	17.03	150.00	5.90	7.39	28.50
8/02/2556 9:40 น.	18.03	110.00	5.90	7.72	28.70
9/02/2556 9:45 น.	19.03	120.00	6.20	7.88	28.70
10/02/2556 10:20 น.	20.06	110.00	6.50	7.35	28.30
11/02/2556 10:00 น.	21.04	110.00	6.10	7.47	28.40
12/02/2556 9:30 น.	22.02	100.00	6.60	7.58	28.50
13/02/2556 8:30 น.	22.98	110.00	6.60	7.56	28.60

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)	ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)
14/02/2556 8:45 น.	23.99	100.00	6.70	7.70	28.00
15/02/2556 8:45 น.	24.99	80.00	6.70	8.17	28.10
16/02/2556 9:30 น.	26.02	100.00	6.30	8.17	28.80
18/02/2556 11:00 น.	28.08	90.00	6.50	7.60	28.40
20/02/2556 10:00 น.	30.04	150.00	6.20	7.71	29.00
21/02/2556 9:35 น.	31.02	120.00	6.10	7.55	28.70
22/02/2556 12:40 น.	32.15	130.00	6.70	7.74	28.60
23/02/2556 10:00 น.	33.04	120.00	6.70	7.78	26.80
24/02/2556 10:00 น.	34.04	100.00	6.80	7.50	27.50
25/02/2556 10:00 น.	35.04	120.00	6.20	7.36	27.90
26/02/2556 9:30 น.	36.02	100.00	6.10	7.43	28.80
27/02/2556 9:30 น.	37.02	100.00	6.00	7.44	28.90
28/02/2556 10:00 น.	38.04	150.00	5.70	7.38	28.80
1/03/2556 9:30 น.	39.02	140.00	6.00	7.48	28.80
5/03/2556 10:00 น.	43.04	150.00	6.50	7.35	26.10
7/03/2556 9:30 น.	45.02	100.00	5.90	7.84	27.10
8/03/2556 10:00 น.	46.04	110.00	6.80	7.74	28.80
9/03/2556 10:30 น.	47.06	110.00	5.90	7.49	28.50
10/03/2556 9:45 น.	48.03	110.00	6.20	7.49	28.20
11/03/2556 10:00 น.	49.04	150.00	6.40	7.61	28.40
12/03/2556 9:45 น.	50.03	120.00	6.20	7.96	28.60
14/03/2556 10:00 น.	52.04	90.00	6.10	7.83	28.80
16/03/2556 8:45 น.	53.99	90.00	5.80	7.32	27.80
17/03/2556 9:30 น.	55.02	80.00	5.50	7.36	28.40
18/03/2556 9:45 น.	56.03	150.00	5.40	7.23	28.80
19/03/2556 9:30 น.	57.02	140.00	5.80	7.46	28.90
20/03/2556 9:30 น.	58.02	110.00	5.60	7.47	29.10
21/03/2556 9:00 น.	59.00	100.00	5.60	7.34	29.10
22/03/2556 9:00 น.	60.00	90.00	6.00	7.33	29.00
23/03/2013 9:00 น.	61.00	70.00	5.40	7.44	29.00
24/03/2556 9:15 น.	62.01	150.00	5.40	7.17	29.40
25/03/2556 9:10 น.	63.01	140.00	5.50	7.61	29.60
29/03/2556 9:30 น.	67.02	110.00	5.30	7.38	30.10
30/03/2556 9:00 น.	68.00	110.00	5.40	7.40	30.00
31/03/2556 10:00 น.	69.04	80.00	5.70	7.53	29.90
1/04/2556 9:00 น.	70.00	150.00	5.70	7.43	30.00
2/04/2556 9:00 น.	71.00	120.00	5.40	7.72	30.30
4/04/2556 9:30 น.	73.02	100.00	5.70	7.70	30.40
7/04/2556 14:00 น.	76.21	80.00	5.80	7.42	29.60
8/04/2556 10:15 น.	77.05	60.00	5.70	7.33	29.70
9/04/2556 10:00 น.	78.04	150.00	5.20	7.17	29.60
10/04/2556 9:45 น.	79.03	130.00	6.30	7.70	29.40
11/04/2556 10:00 น.	80.04	130.00	5.80	7.74	30.00
12/04/2556 10:15 น.	81.05	100.00	6.50	7.66	28.10
13/04/2556 10:15 น.	82.05	70.00	6.20	7.48	28.20
14/04/2556 10:00 น.	83.04	150.00	5.80	7.26	29.00
15/04/2556 10:20 น.	84.06	130.00	6.40	7.75	27.10
17/04/2556 10:00 น.	86.04	120.00	6.00	7.63	27.90
18/04/2556 9:30 น.	87.02	110.00	5.80	7.58	28.50

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)	ปริมาณออกซิเจน ละลายน้ำ (มก./ล.)	พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)
19/04/2556 9:40 น.	88.03	100.00	5.90	7.42	28.50
20/04/2556 9:40 น.	89.03	150.00	5.70	7.24	29.20
21/04/2556 10:00 น.	90.04	110.00	5.60	7.58	30.10
22/04/2556 10:45 น.	91.07	120.00	6.00	7.73	30.10
23/04/2556 9:45 น.	92.03	90.00	5.50	7.20	29.00
24/04/2556 10:00 น.	93.04	150.00	6.00	7.09	28.90
25/04/2556 9:45 น.	94.03	160.00	5.30	7.42	29.40
26/04/2556 9:30 น.	95.02	140.00	5.10	7.21	29.80
27/04/2556 10:00 น.	96.04	150.00	5.30	7.20	30.00
28/04/2556 10:00 น.	97.04	170.00	5.30	7.33	29.80
29/04/2556 9:40 น.	98.03	140.00	5.50	7.23	29.90
30/04/2556 12:40 น.	99.15	130.00	6.00	7.35	30.10
1/05/2556 9:30 น.	100.02	120.00	5.40	7.21	29.80
2/05/2556 9:10 น.	101.01	120.00	5.30	7.14	29.80
3/05/2556 9:30 น.	102.02	100.00	5.80	7.02	30.30
4/05/2556 9:30 น.	103.02	100.00	6.30	6.92	30.30
5/05/2556 13:30 น.	104.19	150.00	6.60	6.64	28.00
6/05/2556 9:40 น.	105.03	120.00	6.80	7.00	28.50
7/05/2556 10:00 น.	106.04	120.00	6.60	6.92	28.70
8/05/2556 10:00 น.	107.04	110.00	6.60	6.86	29.50
9/05/2556 10:00 น.	108.04	90.00	6.20	6.73	29.70
10/05/2556 10:00 น.	109.04	80.00	6.20	6.65	30.00
11/05/2556 11:30 น.	110.10	50.00	5.30	7.04	30.00
12/05/2556 10:40 น.	111.07	150.00	6.50	6.95	30.20
13/05/2556 10:45 น.	112.07	150.00	6.70	7.58	29.80
14/05/2556 10:00 น.	113.04	110.00	5.80	7.46	29.70
15/05/2556 10:00 น.	114.04	110.00	5.70	7.42	30.00
16/05/2556 10:15 น.	115.05	80.00	6.40	7.24	30.70
17/05/2556 9:50 น.	116.03	80.00	5.70	7.06	30.60
18/05/2556 10:30 น.	117.06	50.00	5.80	6.85	29.40
19/05/2556 10:30 น.	118.06	150.00	5.80	6.63	29.30
20/05/2556 9:50 น.	119.03	130.00	6.20	7.40	29.10
22/05/2556 10:00 น.	121.04	110.00	5.90	7.18	29.20

ตารางที่ ง-9 ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิของชุดควบคุม-2 (ถังเลี้ยงปลานิล) จำนวน 3 ถังทดลอง

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจน ละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
21/01/2556 9:00 น.	0.00	150.00	0.00	7.70	0.20	8.10	0.02	26.33	0.15
22/01/2556 8:30 น.	0.98	133.33	5.77	7.53	0.06	7.80	0.03	26.57	0.06
23/01/2556 8:45 น.	1.99	140.00	0.00	6.93	0.12	7.96	0.24	27.60	0.17
24/01/2556 8:45 น.	2.99	150.00	10.00	7.17	0.25	7.79	0.02	28.03	0.15
25/01/2556 8:50 น.	3.99	146.67	5.77	7.07	0.12	7.84	0.03	28.33	0.23

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
26/01/2556 16:00 น.	5.29	120.00	10.00	6.93	0.06	7.53	0.53	28.50	0.40
27/01/2556 9:40 น.	6.03	113.33	5.77	7.10	0.26	7.95	0.04	27.90	0.26
28/01/2556 12:30 น.	7.15	123.33	15.28	7.33	0.32	8.34	0.06	26.70	0.26
29/01/2556 9:30 น.	8.02	123.33	15.28	6.83	0.32	7.86	0.10	26.00	0.26
30/01/2556 9:40 น.	9.03	113.33	5.77	6.80	0.26	7.89	0.06	26.77	0.29
31/01/2556 10:00 น.	10.04	110.00	10.00	7.20	0.17	7.98	0.12	27.57	0.55
1/02/2556 10:00 น.	11.04	116.67	11.55	6.90	0.20	7.98	0.17	27.40	0.53
2/02/2556 10:00 น.	12.04	130.00	20.00	6.70	0.10	8.00	0.12	27.67	0.31
4/02/2556 9:40 น.	14.03	116.67	15.28	6.77	0.06	7.89	0.08	27.93	0.40
5/02/2556 13:00 น.	15.17	116.67	5.77	6.40	0.26	7.81	0.02	28.70	0.52
6/02/25556 9:30 น.	16.02	120.00	20.00	6.60	0.20	7.79	0.09	28.73	0.23
7/02/2556 9:45 น.	17.03	133.33	15.28	6.43	0.15	7.91	0.17	29.00	0.26
8/02/2556 9:40 น.	18.03	136.67	15.28	6.50	0.00	8.06	0.17	29.03	0.15
9/02/2556 9:45 น.	19.03	133.33	15.28	6.47	0.06	7.74	0.07	29.17	0.12
10/02/2556 10:20 น.	20.06	123.33	5.77	6.27	0.31	7.69	0.04	28.87	0.29
11/02/2556 10:00 น.	21.04	116.67	5.77	6.37	0.06	7.73	0.03	29.23	0.58
12/02/2556 9:30 น.	22.02	113.33	23.09	6.73	0.06	7.80	0.13	29.03	0.23
13/02/2556 8:30 น.	22.98	123.33	5.77	6.53	0.15	7.76	0.03	29.23	0.15
14/02/2556 8:45 น.	23.99	113.33	15.28	6.87	0.21	7.83	0.08	28.47	0.29
15/02/2556 8:45 น.	24.99	126.67	5.77	6.80	0.00	8.15	0.12	28.37	0.31
16/02/2556 9:30 น.	26.02	113.33	5.77	6.37	0.06	7.99	0.15	28.70	0.17
18/02/2556 11:00 น.	28.08	116.67	20.82	6.63	0.12	7.85	0.05	29.10	0.20
20/02/2556 10:00 น.	30.04	150.00	0.00	6.77	0.12	7.83	0.17	28.93	0.15
21/02/2556 9:35 น.	31.02	136.67	5.77	6.67	0.29	7.82	0.04	29.13	0.06
22/02/2556 12:40 น.	32.15	150.00	10.00	6.90	0.17	8.03	0.13	28.83	0.25
23/02/2556 10:00 น.	33.04	150.00	10.00	7.03	0.49	8.20	0.16	27.20	0.26
24/02/2556 10:00 น.	34.04	150.00	17.32	7.03	0.42	7.88	0.22	27.67	0.31
25/02/2556 10:00 น.	35.04	126.67	5.77	6.20	0.20	7.63	0.05	28.47	0.55
26/02/2556 9:30 น.	36.02	113.33	5.77	6.40	0.26	7.71	0.06	29.20	0.10
27/02/2556 9:30 น.	37.02	123.33	15.28	6.10	0.10	7.72	0.03	29.53	0.32
28/02/2556 10:00 น.	38.04	123.33	5.77	6.17	0.50	7.77	0.06	29.43	0.40
1/03/2556 9:30 น.	39.02	116.67	11.55	6.50	0.26	7.54	0.07	29.53	0.40
5/03/2556 10:00 น.	43.04	150.00	0.00	6.73	0.06	7.62	0.08	26.33	0.35
7/03/2556 9:30 น.	45.02	126.67	23.09	6.67	0.35	7.92	0.06	27.33	0.25
8/03/2556 10:00 น.	46.04	120.00	10.00	6.60	0.46	7.89	0.20	28.50	0.40
9/03/2556 10:30 น.	47.06	116.67	15.28	6.20	0.10	7.63	0.08	28.90	0.26
10/03/2556 9:45 น.	48.03	123.33	20.82	6.30	0.10	7.67	0.06	28.63	0.06
11/03/2556 10:00 น.	49.04	150.00	0.00	6.60	0.20	7.78	0.10	28.87	0.12
12/03/2556 9:45 น.	50.03	136.67	5.77	6.40	0.10	7.97	0.08	29.03	0.15
14/03/2556 10:00 น.	52.04	103.33	5.77	6.47	0.12	7.95	0.04	29.20	0.17
16/03/2556 8:45 น.	53.99	110.00	17.32	5.87	0.25	7.51	0.07	28.83	0.25
17/03/2556 9:30 น.	55.02	113.33	5.77	6.10	0.26	7.64	0.09	28.93	0.15
18/03/2556 9:45 น.	56.03	150.00	0.00	5.83	0.15	7.52	0.07	29.17	0.12
19/03/2556 9:30 น.	57.02	123.33	5.77	6.13	0.25	7.65	0.04	29.37	0.15
20/03/2556 9:30 น.	58.02	120.00	0.00	6.13	0.21	7.77	0.09	29.57	0.12
21/03/2556 9:00 น.	59.00	123.33	5.77	6.10	0.10	7.68	0.09	29.50	0.17
22/03/2556 9:00 น.	60.00	106.67	5.77	6.40	0.10	7.66	0.08	29.17	0.35
23/03/2556 9:00 น.	61.00	106.67	20.82	5.97	0.12	7.82	0.07	29.23	0.15

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
24/03/2556 9:15 น.	62.01	150.00	0.00	6.13	0.31	7.60	0.04	29.57	0.21
25/03/2556 9:10 น.	63.01	136.67	15.28	5.87	0.21	7.93	0.13	30.00	0.17
29/03/2556 9:30 น.	67.02	116.67	5.77	5.67	0.23	7.62	0.07	30.30	0.17
30/03/2556 9:00 น.	68.00	113.33	5.77	6.03	0.32	7.67	0.03	30.20	0.20
31/03/2556 10:00 น.	69.04	130.00	0.00	6.07	0.12	7.77	0.06	29.97	0.12
1/04/2556 9:00 น.	70.00	150.00	0.00	6.37	0.40	7.76	0.08	30.13	0.15
2/04/2556 9:00 น.	71.00	136.67	5.77	5.87	0.25	7.97	0.09	30.20	0.10
4/04/2556 9:30 น.	73.02	110.00	10.00	6.10	0.10	7.98	0.05	30.60	0.17
7/04/2556 14:00 น.	76.21	116.67	15.28	6.37	0.35	7.83	0.07	29.90	0.20
8/04/2556 10:15 น.	77.05	100.00	10.00	5.97	0.40	7.74	0.06	29.93	0.15
9/04/2556 10:00 น.	78.04	150.00	0.00	6.13	0.12	7.67	0.10	29.80	0.17
10/04/2556 9:45 น.	79.03	136.67	5.77	6.37	0.12	7.91	0.04	29.93	0.15
11/04/2556 10:00 น.	80.04	133.33	15.28	6.17	0.12	8.05	0.13	30.27	0.21
12/04/2556 10:15 น.	81.05	123.33	15.28	6.60	0.10	8.01	0.04	29.17	0.31
13/04/2556 10:15 น.	82.05	120.00	10.00	6.33	0.23	7.85	0.05	28.83	0.15
14/04/2556 10:00 น.	83.04	120.00	0.00	6.07	0.25	7.65	0.04	29.30	0.10
15/04/2556 10:20 น.	84.06	113.33	15.28	6.77	0.15	7.84	0.04	27.93	0.25
17/04/2556 10:00 น.	86.04	123.33	25.17	6.33	0.29	7.80	0.04	28.57	0.21
18/04/2556 9:30 น.	87.02	113.33	25.17	6.63	0.21	7.77	0.03	28.50	0.10
19/04/2556 9:40 น.	88.03	96.67	15.28	6.70	0.36	7.72	0.09	28.70	0.17
20/04/2556 9:40 น.	89.03	143.33	11.55	6.17	0.12	7.69	0.06	29.57	0.15
21/04/2556 10:00 น.	90.04	120.00	20.00	6.17	0.40	7.85	0.11	30.10	0.10
22/04/2556 10:45 น.	91.07	120.00	17.32	6.50	0.00	7.86	0.09	30.03	0.15
23/04/2556 9:45 น.	92.03	110.00	10.00	6.07	0.06	7.67	0.16	29.47	0.21
24/04/2556 10:00 น.	93.04	120.00	26.46	6.57	0.15	7.67	0.28	29.30	0.17
25/04/2556 9:45 น.	94.03	113.33	23.09	5.87	0.32	7.59	0.15	29.87	0.15
26/04/2556 9:30 น.	95.02	100.00	10.00	6.17	0.58	7.41	0.12	29.97	0.12
27/04/2556 10:00 น.	96.04	150.00	0.00	5.77	0.12	7.33	0.06	30.23	0.15
28/04/2556 10:00 น.	97.04	133.33	5.77	5.67	0.32	7.46	0.01	29.87	0.15
29/04/2556 9:40 น.	98.03	116.67	5.77	6.13	0.29	7.39	0.07	30.10	0.10
30/04/2556 12:40 น.	99.15	133.33	5.77	6.30	0.20	7.41	0.03	30.40	0.10
1/05/2556 9:30 น.	100.02	123.33	5.77	6.27	0.25	7.42	0.04	30.30	0.17
2/05/2556 9:10 น.	101.01	123.33	11.55	5.90	0.20	7.34	0.08	30.20	0.26
3/05/2556 9:30 น.	102.02	120.00	10.00	5.77	0.15	7.27	0.08	30.50	0.26
4/05/2556 9:30 น.	103.02	103.33	15.28	6.53	0.21	7.26	0.09	30.63	0.23
5/05/2556 13:30 น.	104.19	150.00	0.00	6.57	0.25	7.03	0.08	29.43	0.42
6/05/2556 9:40 น.	105.03	143.33	5.77	7.00	0.17	7.64	0.36	29.17	0.29
7/05/2556 10:00 น.	106.04	130.00	0.00	6.63	0.15	7.35	0.12	29.20	0.26
8/05/2556 10:00 น.	107.04	130.00	10.00	6.43	0.06	7.24	0.07	30.00	0.26
9/05/2556 10:00 น.	108.04	106.67	5.77	6.10	0.10	7.17	0.06	30.40	0.17
10/05/2556 10:00 น.	109.04	100.00	10.00	6.67	0.15	7.13	0.08	30.53	0.23
11/05/2556 11:30 น.	110.10	103.33	5.77	5.73	0.12	7.87	0.25	30.60	0.17
12/05/2556 10:40 น.	111.07	150.00	0.00	6.87	0.12	7.95	0.16	30.53	0.23
13/05/2556 10:45 น.	112.07	130.00	17.32	7.13	0.06	8.13	0.06	30.13	0.23
14/05/2556 10:00 น.	113.04	140.00	10.00	6.60	0.10	8.04	0.09	29.97	0.21
15/05/2556 10:00 น.	114.04	130.00	0.00	6.27	0.15	8.09	0.05	30.53	0.32
16/05/2556 10:15 น.	115.05	113.33	5.77	6.60	0.10	8.05	0.06	30.93	0.32
17/05/2556 9:50 น.	116.03	110.00	10.00	6.27	0.12	8.02	0.06	30.80	0.27

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
18/05/2556 10:30 น.	117.06	100.00	0.00	6.07	0.06	7.95	0.12	30.30	0.26
19/05/2556 10:30 น.	118.06	130.00	10.00	6.50	0.20	7.93	0.11	29.97	0.21
20/05/2556 9:50 น.	119.03	123.33	15.28	6.83	0.15	7.82	0.14	29.63	0.23
22/05/2556 10:00 น.	121.04	103.33	5.77	6.27	0.06	7.81	0.05	29.90	0.26

ตารางที่ ง-10 ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิของชุดควบคุม-2 (ถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน) จำนวน 3 ถังทดลอง

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
21/01/2556 9:00 น.	0.00	150.00	0.00	6.97	0.25	8.07	0.04	26.10	0.00
22/01/2556 8:30 น.	0.98	133.33	15.28	7.47	0.12	7.81	0.03	26.70	0.26
23/01/2556 8:45 น.	1.99	136.67	11.55	6.80	0.20	7.72	0.02	27.47	0.06
24/01/2556 8:45 น.	2.99	146.67	15.28	7.00	0.26	7.82	0.02	28.17	0.29
25/01/2556 8:50 น.	3.99	136.67	5.77	6.93	0.15	7.81	0.04	28.40	0.17
26/01/2556 16:00 น.	5.29	126.67	5.77	7.03	0.35	7.56	0.55	28.20	0.10
27/01/2556 9:40 น.	6.03	110.00	10.00	6.63	0.25	7.91	0.03	27.77	0.15
28/01/2556 12:30 น.	7.15	106.67	5.77	7.13	0.12	7.79	0.01	26.67	0.12
29/01/2556 9:30 น.	8.02	103.33	23.09	6.83	0.06	7.95	0.03	26.00	0.17
30/01/2556 9:40 น.	9.03	116.67	5.77	6.70	0.20	7.89	0.04	26.70	0.17
31/01/2556 10:00 น.	10.04	123.33	11.55	7.13	0.06	8.06	0.04	27.40	0.17
1/02/2556 10:00 น.	11.04	106.67	5.77	7.23	0.15	8.05	0.04	27.03	0.31
2/02/2556 10:00 น.	12.04	120.00	0.00	7.17	0.12	8.13	0.02	27.33	0.21
4/02/2556 9:40 น.	14.03	110.00	0.00	6.53	0.25	7.98	0.04	28.00	0.20
5/02/2556 13:00 น.	15.17	106.67	5.77	6.73	0.06	7.87	0.02	28.50	0.10
6/02/2556 9:30 น.	16.02	106.67	5.77	6.67	0.15	7.86	0.02	28.80	0.10
7/02/2556 9:45 น.	17.03	150.00	0.00	6.47	0.25	8.11	0.03	29.03	0.15
8/02/2556 9:40 น.	18.03	126.67	15.28	6.57	0.12	8.19	0.06	29.00	0.10
9/02/2556 9:45 น.	19.03	136.67	11.55	6.57	0.15	7.70	0.03	29.20	0.35
10/02/2556 10:20 น.	20.06	110.00	17.32	6.77	0.06	7.73	0.03	28.90	0.20
11/02/2556 10:00 น.	21.04	113.33	5.77	6.43	0.06	7.77	0.04	29.13	0.25
12/02/2556 9:30 น.	22.02	123.33	15.28	6.83	0.15	8.02	0.03	28.97	0.21
13/02/2556 8:30 น.	22.98	126.67	11.55	6.57	0.21	7.82	0.06	29.13	0.15
14/02/2556 8:45 น.	23.99	116.67	15.28	6.60	0.20	7.88	0.07	28.53	0.15
15/02/2556 8:45 น.	24.99	116.67	5.77	6.53	0.12	7.80	0.04	28.33	0.15
16/02/2556 9:30 น.	26.02	110.00	0.00	6.13	0.21	7.95	0.03	28.63	0.40
18/02/2556 11:00 น.	28.08	100.00	0.00	6.63	0.21	8.31	0.01	29.10	0.17
20/02/2556 10:00 น.	30.04	150.00	0.00	6.57	0.12	7.69	0.02	28.90	0.17
21/02/2556 9:35 น.	31.02	120.00	10.00	6.40	0.26	7.82	0.06	29.17	0.12
22/02/2556 12:40 น.	32.15	146.67	11.55	6.33	0.23	7.93	0.03	28.87	0.12
23/02/2556 10:00 น.	33.04	150.00	10.00	6.67	0.06	7.78	0.02	27.10	0.20
24/02/25556 10:00 น.	34.04	133.33	5.77	6.53	0.12	8.04	0.07	27.53	0.25
25/02/2556 10:00 น.	35.04	120.00	10.00	6.27	0.23	7.66	0.03	28.43	0.25
26/02/2556 9:30 น.	36.02	133.33	20.82	6.13	0.06	7.87	0.09	29.43	0.23

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
27/02/2556 9:30 น.	37.02	120.00	20.00	6.07	0.06	7.75	0.04	29.50	0.17
28/02/2556 10:00 น.	38.04	120.00	10.00	5.73	0.06	7.91	0.05	29.47	0.21
1/03/2556 9:30 น.	39.02	123.33	5.77	5.90	0.26	7.61	0.08	29.47	0.21
5/03/2556 10:00 น.	43.04	150.00	0.00	6.27	0.15	7.50	0.07	26.33	0.25
7/03/2556 9:30 น.	45.02	123.33	5.77	6.27	0.50	7.61	0.03	27.63	0.25
8/03/2556 10:00 น.	46.04	120.00	0.00	6.17	0.25	7.67	0.04	28.73	0.15
9/03/2556 10:30 น.	47.06	120.00	17.32	6.13	0.21	7.67	0.05	28.97	0.21
10/03/2556 9:45 น.	48.03	120.00	10.00	6.00	0.10	7.93	0.11	28.63	0.15
11/03/2556 10:00 น.	49.04	150.00	0.00	6.33	0.40	7.85	0.06	29.10	0.26
12/03/2556 9:45 น.	50.03	136.67	11.55	6.23	0.06	7.71	0.01	29.17	0.21
14/03/2556 10:00 น.	52.04	116.67	15.28	5.67	0.49	7.68	0.05	29.37	0.29
16/03/2556 8:45 น.	53.99	100.00	10.00	5.33	0.31	7.42	0.05	29.10	0.30
17/03/2556 9:30 น.	55.02	126.67	15.28	5.33	0.38	7.53	0.08	28.90	0.10
18/03/2556 9:45 น.	56.03	150.00	0.00	5.23	0.40	7.53	0.01	29.10	0.10
19/03/2556 9:30 น.	57.02	123.33	5.77	5.67	0.45	7.69	0.08	29.43	0.15
20/03/2556 9:30 น.	58.02	120.00	10.00	5.60	0.69	7.65	0.03	29.53	0.15
21/03/2556 9:00 น.	59.00	120.00	10.00	5.67	0.32	7.55	0.04	29.40	0.10
22/03/2556 9:00 น.	60.00	123.33	11.55	6.10	0.10	7.56	0.03	29.20	0.10
23/03/2556 9:00 น.	61.00	120.00	10.00	5.63	0.21	7.67	0.09	29.20	0.10
24/03/2556 9:15 น.	62.01	150.00	0.00	5.80	0.30	7.59	0.05	29.53	0.15
25/03/2556 9:10 น.	63.01	146.67	20.82	5.53	0.21	7.78	0.01	29.80	0.30
29/03/2556 9:30 น.	67.02	120.00	0.00	5.57	0.42	7.60	0.06	30.30	0.10
30/03/2556 9:00 น.	68.00	130.00	0.00	5.63	0.55	7.60	0.05	30.13	0.15
31/03/2556 10:00 น.	69.04	126.67	15.28	6.00	0.53	7.60	0.03	29.87	0.06
1/04/2556 9:00 น.	70.00	150.00	0.00	5.90	0.26	7.58	0.02	30.10	0.10
2/04/2556 9:00 น.	71.00	133.33	5.77	5.43	0.64	7.69	0.07	30.17	0.15
4/04/2556 9:30 น.	73.02	126.67	5.77	6.17	0.35	7.84	0.01	30.60	0.10
7/04/2556 14:00 น.	76.21	113.33	5.77	5.90	0.36	7.70	0.05	30.00	0.17
8/04/2556 10:15 น.	77.05	106.67	5.77	5.47	0.31	7.64	0.05	29.93	0.15
9/04/2556 10:00 น.	78.04	150.00	0.00	6.03	0.35	7.59	0.06	29.87	0.12
10/04/2556 9:45 น.	79.03	130.00	10.00	6.07	0.60	7.80	0.06	30.00	0.10
11/04/2556 10:00 น.	80.04	146.67	15.28	6.13	0.31	7.89	0.07	30.23	0.15
12/04/2556 10:15 น.	81.05	136.67	20.82	6.83	0.29	7.99	0.05	29.17	0.21
13/04/2556 10:15 น.	82.05	116.67	5.77	6.50	0.26	7.89	0.06	28.90	0.10
14/04/2556 10:00 น.	83.04	110.00	0.00	6.00	0.36	7.71	0.05	29.30	0.10
15/04/2556 10:20 น.	84.06	103.33	15.28	6.37	0.23	7.79	0.02	27.93	0.15
17/04/2556 10:00 น.	86.04	100.00	0.00	6.40	0.17	7.76	0.03	28.50	0.10
18/04/2556 9:30 น.	87.02	96.67	15.28	6.33	0.35	7.76	0.05	28.30	0.10
19/04/2556 9:40 น.	88.03	93.33	15.28	6.17	0.51	7.79	0.03	28.67	0.12
20/04/2556 9:40 น.	89.03	116.67	28.87	5.93	0.40	7.75	0.08	29.60	0.30
21/04/2556 10:00 น.	90.04	123.33	15.28	6.13	0.21	7.91	0.07	30.07	0.15
22/04/2556 10:45 น.	91.07	120.00	20.00	6.93	0.45	7.87	0.08	30.00	0.10
23/04/2556 9:45 น.	92.03	100.00	10.00	5.73	0.06	7.82	0.07	29.47	0.12
24/04/2556 10:00 น.	93.04	120.00	10.00	6.23	0.32	7.69	0.12	29.23	0.15
25/04/2556 9:45 น.	94.03	113.33	23.09	5.33	0.23	7.68	0.21	29.83	0.15
26/04/2556 9:30 น.	95.02	100.00	17.32	5.23	0.25	7.41	0.03	30.03	0.23
27/04/2556 10:00 น.	96.04	150.00	0.00	5.83	0.29	7.33	0.06	30.13	0.15

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
28/04/2556 10:00 น.	97.04	140.00	10.00	5.33	0.21	7.53	0.05	30.03	0.15
29/04/2556 9:40 น.	98.03	123.33	5.77	6.07	0.21	7.39	0.06	30.00	0.17
30/04/2556 12:40 น.	99.15	126.67	5.77	5.77	0.40	7.38	0.03	30.50	0.20
1/05/2556 9:30 น.	100.02	123.33	5.77	5.57	0.32	7.46	0.05	30.30	0.17
2/05/2556 9:10 น.	101.01	120.00	10.00	6.03	0.35	7.40	0.05	30.13	0.23
3/05/2556 9:30 น.	102.02	110.00	10.00	5.57	0.42	7.27	0.06	30.47	0.21
4/05/2556 9:30 น.	103.02	110.00	0.00	6.17	0.35	7.28	0.06	30.60	0.17
5/05/2556 13:30 น.	104.19	150.00	0.00	5.97	0.49	7.08	0.08	29.43	0.15
6/05/2556 9:40 น.	105.03	143.33	11.55	6.87	0.61	7.42	0.05	29.23	0.23
7/05/2556 10:00 น.	106.04	133.33	11.55	6.17	0.40	7.27	0.05	29.23	0.23
8/05/2556 10:00 น.	107.04	136.67	15.28	6.13	0.21	7.28	0.06	30.07	0.21
9/05/2556 10:00 น.	108.04	110.00	0.00	5.60	0.44	7.22	0.06	30.47	0.21
10/05/2556 10:00 น.	109.04	116.67	11.55	6.47	0.76	7.15	0.06	30.60	0.17
11/05/2556 11:30 น.	110.10	113.33	5.77	5.90	0.17	8.01	0.05	30.57	0.12
12/05/2556 10:40 น.	111.07	150.00	0.00	6.60	0.53	8.03	0.07	30.53	0.15
13/05/2556 10:45 น.	112.07	140.00	10.00	6.83	0.29	8.12	0.06	30.17	0.12
14/05/2556 10:00 น.	113.04	126.67	11.55	6.33	0.55	8.03	0.08	29.87	0.21
15/05/2556 10:00 น.	114.04	136.67	20.82	6.43	0.47	8.09	0.05	30.33	0.12
16/05/2556 10:15 น.	115.05	116.67	5.77	6.73	0.50	8.06	0.03	30.97	0.21
17/05/2556 9:50 น.	116.03	120.00	17.32	6.17	0.15	8.05	0.04	30.77	0.21
18/05/2556 10:30 น.	117.06	116.67	11.55	5.90	0.26	8.03	0.03	30.33	0.23
19/05/2556 10:30 น.	118.06	133.33	11.55	6.57	0.21	7.97	0.03	29.93	0.23
20/05/2556 9:50 น.	119.03	120.00	0.00	6.93	0.31	7.98	0.02	29.50	0.36
22/05/2556 10:00 น.	121.04	116.67	5.77	5.77	0.06	7.87	0.01	29.97	0.29

ตารางที่ ง-11 ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิของชุดทดลอง (ถังเลี้ยงปลานิล) จำนวน 3 ถังทดลอง

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
21/01/2556 9:00 น.	0.00	150.00	0.00	7.30	0.17	7.91	0.07	26.83	0.21
22/01/2556 8:30 น.	0.98	130.00	10.00	7.00	0.00	7.64	0.04	27.33	0.15
23/01/2556 8:45 น.	1.99	143.33	5.77	6.60	0.40	7.83	0.22	28.67	0.25
24/01/2556 8:45 น.	2.99	150.00	0.00	6.50	0.36	8.09	0.72	28.87	0.21
25/01/2556 8:50 น.	3.99	140.00	17.32	6.57	0.45	7.77	0.12	29.40	0.17
26/01/2556 16:00 น.	5.29	113.33	5.77	6.30	0.53	7.82	0.19	29.40	0.30
27/01/2556 9:40 น.	6.03	126.67	5.77	6.33	0.59	7.88	0.07	28.97	0.29
28/01/2556 12:30 น.	7.15	113.33	30.55	6.97	0.15	8.21	0.25	27.47	0.29
29/01/2556 9:30 น.	8.02	110.00	26.46	6.50	0.20	7.72	0.01	26.80	0.30
30/01/2556 9:40 น.	9.03	110.00	20.00	6.53	0.23	7.68	0.15	27.67	0.32
31/01/2556 10:00 น.	10.04	110.00	26.46	6.97	0.40	7.75	0.07	28.27	0.25
1/02/2556 10:00 น.	11.04	103.33	15.28	6.80	0.10	7.86	0.05	28.27	0.35
2/02/2556 10:00 น.	12.04	106.67	25.17	6.57	0.15	7.84	0.07	28.50	0.44

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
4/02/2556 9:40 น.	14.03	106.67	25.17	6.47	0.31	7.69	0.06	28.90	0.46
5/02/2556 13:00 น.	15.17	96.67	15.28	6.37	0.42	7.65	0.14	29.37	0.40
6/02/2556 9:30 น.	16.02	106.67	25.17	6.40	0.20	7.60	0.03	29.80	0.36
7/02/2556 9:45 น.	17.03	140.00	17.32	6.00	0.26	7.72	0.03	29.97	0.31
8/02/2556 9:40 น.	18.03	120.00	10.00	6.17	0.21	7.83	0.14	30.13	0.25
9/02/2556 9:45 น.	19.03	136.67	15.28	6.03	0.12	7.69	0.16	30.23	0.21
10/02/2556 10:20 น.	20.06	123.33	5.77	5.90	0.10	7.50	0.08	29.73	0.70
11/02/2556 10:00 น.	21.04	120.00	0.00	6.30	0.35	7.57	0.06	30.27	0.35
12/02/2556 9:30 น.	22.02	133.33	15.28	6.37	0.32	7.59	0.02	30.33	0.29
13/02/2556 8:30 น.	22.98	113.33	5.77	6.13	0.15	7.59	0.06	30.43	0.21
14/02/2556 8:45 น.	23.99	113.33	11.55	6.10	0.10	7.65	0.07	28.87	0.25
15/02/2556 8:45 น.	24.99	123.33	5.77	6.43	0.25	7.77	0.04	28.63	0.29
16/02/2556 9:30 น.	26.02	113.33	5.77	6.13	0.40	7.71	0.06	29.03	0.21
18/02/2556 11:00 น.	28.08	110.00	17.32	6.30	0.20	7.57	0.06	29.17	0.23
20/02/2556 10:00 น.	30.04	150.00	0.00	6.57	0.42	7.51	0.04	29.00	0.17
21/02/2556 9:35 น.	31.02	110.00	10.00	6.10	0.35	7.60	0.07	29.17	0.15
22/02/2556 12:40 น.	32.15	146.67	11.55	6.10	0.26	7.87	0.14	29.93	0.21
23/02/2556 10:00 น.	33.04	153.33	5.77	6.17	0.55	7.92	0.22	28.53	0.38
24/02/2556 10:00 น.	34.04	136.67	5.77	6.27	0.55	7.58	0.03	28.70	0.26
25/02/2556 10:00 น.	35.04	133.33	11.55	6.20	0.53	7.49	0.14	29.37	0.40
26/02/2556 9:30 น.	36.02	126.67	11.55	5.80	0.35	7.38	0.16	30.07	0.12
27/02/2556 9:30 น.	37.02	123.33	15.28	5.60	0.10	7.53	0.08	30.53	0.25
28/02/2556 10:00 น.	38.04	123.33	11.55	5.60	0.20	7.68	0.09	30.40	0.36
1/03/2556 9:30 น.	39.02	126.67	11.55	5.97	0.12	7.43	0.06	30.27	0.46
5/03/2556 10:00 น.	43.04	150.00	0.00	6.23	0.38	7.38	0.11	27.60	0.44
7/03/2556 9:30 น.	45.02	130.00	10.00	5.63	0.55	7.60	0.10	28.43	0.38
8/03/2556 10:00 น.	46.04	133.33	25.17	5.83	0.25	7.59	0.07	29.60	0.26
9/03/2556 10:30 น.	47.06	130.00	17.32	5.87	0.40	7.45	0.10	29.87	0.32
10/03/2556 9:45 น.	48.03	116.67	11.55	5.87	0.38	7.47	0.06	29.67	0.15
11/03/2556 10:00 น.	49.04	150.00	0.00	6.07	0.50	7.54	0.05	29.87	0.21
12/03/2556 9:45 น.	50.03	113.33	11.55	6.07	0.45	7.67	0.05	30.13	0.21
14/03/2556 10:00 น.	52.04	113.33	5.77	5.97	0.45	7.63	0.09	30.40	0.10
16/03/2556 8:45 น.	53.99	110.00	0.00	5.57	0.12	7.42	0.02	29.77	0.23
17/03/2556 9:30 น.	55.02	113.33	11.55	5.60	0.10	7.70	0.06	28.90	0.26
18/03/2556 9:45 น.	56.03	150.00	0.00	5.63	0.40	7.52	0.03	29.07	0.23
19/03/2556 9:30 น.	57.02	116.67	5.77	6.10	0.26	7.51	0.05	29.17	0.23
20/03/2556 9:30 น.	58.02	120.00	17.32	6.03	0.32	7.72	0.10	29.60	0.17
21/03/2556 9:00 น.	59.00	93.33	5.77	5.87	0.21	7.65	0.12	29.30	0.35
22/03/2556 9:00 น.	60.00	100.00	17.32	6.10	0.26	7.61	0.15	29.17	0.32
23/03/2013 9:00 น.	61.00	83.33	15.28	5.57	0.31	7.41	0.02	29.10	0.26
24/03/2556 9:15 น.	62.01	150.00	0.00	5.53	0.25	7.84	0.24	29.37	0.32
25/03/2556 9:10 น.	63.01	120.00	10.00	5.37	0.31	7.72	0.11	29.77	0.32
29/03/2556 9:30 น.	67.02	93.33	11.55	5.40	0.35	7.50	0.18	30.27	0.15
30/03/2556 9:00 น.	68.00	150.00	0.00	5.73	0.06	7.47	0.10	30.17	0.15
31/03/2556 10:00 น.	69.04	123.33	20.82	5.87	0.23	7.80	0.42	29.93	0.21
1/04/2556 9:00 น.	70.00	110.00	17.32	6.20	0.26	7.83	0.04	29.93	0.29
2/04/2556 9:00 น.	71.00	180.00	10.00	5.80	0.26	7.87	0.12	30.97	0.21
4/04/2556 9:30 น.	73.02	160.00	20.00	6.13	0.23	7.89	0.04	31.57	0.21

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียม คาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
7/04/2556 14:00 น.	76.21	160.00	0.00	6.23	0.42	7.83	0.04	31.20	0.26
8/04/2556 10:15 น.	77.05	170.00	17.32	5.67	0.25	7.73	0.03	30.97	0.35
9/04/2556 10:00 น.	78.04	150.00	0.00	5.93	0.06	7.72	0.05	29.90	0.30
10/04/2556 9:45 น.	79.03	140.00	17.32	6.37	0.06	7.83	0.11	29.73	0.31
11/04/2556 10:00 น.	80.04	143.33	5.77	6.27	0.06	7.81	0.07	29.93	0.38
12/04/2556 10:15 น.	81.05	130.00	0.00	6.80	0.00	7.88	0.10	29.13	0.38
13/04/2556 10:15 น.	82.05	106.67	11.55	6.60	0.10	7.80	0.10	28.70	0.26
14/04/2556 10:00 น.	83.04	120.00	26.46	6.30	0.10	7.62	0.09	29.13	0.21
15/04/2556 10:20 น.	84.06	120.00	45.83	6.50	0.35	7.76	0.22	27.97	0.25
17/04/2556 10:00 น.	86.04	140.00	17.32	6.47	0.29	7.70	0.24	28.40	0.26
18/04/2556 9:30 น.	87.02	123.33	5.77	6.30	0.46	7.72	0.21	28.27	0.25
19/04/2556 9:40 น.	88.03	113.33	11.55	6.33	0.58	7.76	0.29	28.53	0.25
20/04/2556 9:40 น.	89.03	103.33	15.28	6.13	0.40	7.99	0.30	29.30	0.26
21/04/2556 10:00 น.	90.04	193.33	20.82	5.87	0.46	8.03	0.16	30.80	0.20
22/04/2556 10:45 น.	91.07	180.00	17.32	6.80	0.20	7.97	0.22	30.77	0.31
23/04/2556 9:45 น.	92.03	156.67	25.17	6.00	0.44	7.96	0.12	29.43	0.21
24/04/2556 10:00 น.	93.04	186.67	30.55	6.87	0.32	7.95	0.13	29.07	0.23
25/04/2556 9:45 น.	94.03	160.00	26.46	6.07	0.50	7.89	0.16	29.50	0.26
26/04/2556 9:30 น.	95.02	156.67	35.12	6.03	0.21	7.93	0.36	29.63	0.29
27/04/2556 10:00 น.	96.04	150.00	36.06	6.03	0.15	7.46	0.16	29.87	0.23
28/04/2556 10:00 น.	97.04	113.33	30.55	6.10	0.20	7.61	0.21	29.70	0.17
29/04/2556 9:40 น.	98.03	96.67	32.15	6.40	0.17	7.37	0.16	29.70	0.26
30/04/2556 12:40 น.	99.15	200.00	40.00	6.40	0.20	7.56	0.11	31.03	0.46
1/05/2556 9:30 น.	100.02	196.67	5.77	6.43	0.06	7.60	0.11	31.07	0.32
2/05/2556 9:10 น.	101.01	200.00	40.00	6.50	0.26	7.58	0.18	30.13	0.38
3/05/2556 9:30 น.	102.02	183.33	30.55	6.10	0.36	7.44	0.16	30.27	0.32
4/05/2556 9:30 น.	103.02	160.00	34.64	6.70	0.20	7.49	0.16	30.27	0.32
5/05/2556 13:30 น.	104.19	166.67	32.15	6.70	0.40	7.27	0.19	29.33	0.31
6/05/2556 9:40 น.	105.03	150.00	45.83	7.03	0.49	7.54	0.48	29.03	0.38
7/05/2556 10:00 น.	106.04	146.67	45.09	6.50	0.35	7.35	0.28	29.03	0.38
8/05/2556 10:00 น.	107.04	133.33	45.09	6.57	0.32	7.23	0.23	29.73	0.29
9/05/2556 10:00 น.	108.04	196.67	23.09	5.87	0.38	7.39	0.19	31.17	0.32
10/05/2556 10:00 น.	109.04	183.33	45.09	6.63	0.42	7.38	0.21	31.40	0.26
11/05/2556 11:30 น.	110.10	193.33	20.82	5.73	0.12	8.21	0.13	31.63	0.29
12/05/2556 10:40 น.	111.07	166.67	32.15	6.67	0.31	8.20	0.12	30.53	0.29
13/05/2556 10:45 น.	112.07	173.33	37.86	7.07	0.12	8.13	0.08	29.97	0.32
14/05/2556 10:00 น.	113.04	166.67	32.15	6.60	0.10	8.13	0.11	29.73	0.38
15/05/2556 10:00 น.	114.04	143.33	28.87	6.33	0.15	8.09	0.14	30.23	0.38
16/05/2556 10:15 น.	115.05	140.00	26.46	6.83	0.23	8.10	0.12	30.63	0.29
17/05/2556 9:50 น.	116.03	130.00	36.06	6.33	0.06	8.09	0.17	30.53	0.38
18/05/2556 10:30 น.	117.06	126.67	41.63	6.07	0.06	8.03	0.12	30.20	0.35
19/05/2556 10:30 น.	118.06	243.33	63.51	6.60	0.00	8.30	0.17	30.73	0.38
20/05/2556 9:50 น.	119.03	220.00	45.83	6.97	0.06	8.32	0.15	30.57	0.42
22/05/2556 10:00 น.	121.04	243.33	55.08	6.27	0.12	8.26	0.20	30.90	0.36

ตารางที่ ง-12 ค่าสภาพด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และอุณหภูมิของชุดทดลอง (ถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน) จำนวน 3 ถังทดลอง

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
21/01/2556 9:00 น.	0.00	150.00	0.00	7.17	0.25	8.02	0.02	26.60	0.00
22/01/2556 8:30 น.	0.98	126.67	11.55	6.07	0.49	7.64	0.05	27.37	0.21
23/01/2556 8:45 น.	1.99	150.00	0.00	3.80	0.53	7.52	0.13	28.90	0.26
24/01/2556 8:45 น.	2.99	133.33	23.09	4.67	0.35	7.63	0.20	29.17	0.23
25/01/2556 8:50 น.	3.99	120.00	0.00	3.73	0.42	7.62	0.24	29.53	0.29
26/01/2556 16:00 น.	5.29	146.67	5.77	4.47	0.31	7.72	0.20	29.47	0.35
27/01/2556 9:40 น.	6.03	136.67	20.82	4.17	0.25	7.88	0.05	29.10	0.35
28/01/2556 12:30 น.	7.15	93.33	15.28	3.47	0.95	7.48	0.41	27.80	0.26
29/01/2556 9:30 น.	8.02	103.33	11.55	4.17	1.19	7.80	0.21	27.10	0.44
30/01/2556 9:40 น.	9.03	110.00	26.46	3.83	0.93	7.78	0.30	27.83	0.38
31/01/2556 10:00 น.	10.04	116.67	25.17	3.93	0.64	7.88	0.31	28.43	0.38
1/02/2556 10:00 น.	11.04	100.00	20.00	4.53	0.84	8.02	0.20	28.50	0.44
2/02/2556 10:00 น.	12.04	110.00	30.00	4.17	0.32	7.98	0.19	28.67	0.42
4/02/2556 9:40 น.	14.03	113.33	20.82	4.20	0.46	7.85	0.18	29.20	0.44
5/02/2556 13:00 น.	15.17	100.00	26.46	3.53	0.06	7.81	0.25	29.77	0.42
6/02/2556 9:30 น.	16.02	113.33	20.82	3.63	0.12	7.69	0.26	30.00	0.44
7/02/2556 9:45 น.	17.03	140.00	17.32	3.43	0.32	7.85	0.17	30.23	0.29
8/02/2556 9:40 น.	18.03	136.67	11.55	3.27	0.12	7.85	0.19	30.33	0.29
9/02/2556 9:45 น.	19.03	123.33	5.77	3.67	0.15	7.40	0.08	30.43	0.38
10/02/2556 10:20 น.	20.06	120.00	17.32	3.43	0.31	7.44	0.10	30.27	0.49
11/02/2556 10:00 น.	21.04	126.67	5.77	3.83	1.07	7.57	0.19	30.47	0.49
12/02/2556 9:30 น.	22.02	116.67	20.82	3.73	0.42	7.56	0.05	30.50	0.35
13/02/2556 8:30 น.	22.98	126.67	5.77	3.80	0.30	7.52	0.04	30.43	0.15
14/02/2556 8:45 น.	23.99	136.67	5.77	1.73	0.47	7.51	0.22	30.07	0.67
15/02/2556 8:45 น.	24.99	153.33	35.12	0.27	0.06	7.18	0.07	29.93	0.47
16/02/2556 9:30 น.	26.02	136.67	11.55	0.27	0.29	7.26	0.03	30.33	0.67
18/02/2556 11:00 น.	28.08	153.33	11.55	2.47	0.15	7.73	0.19	30.17	0.61
20/02/2556 10:00 น.	30.04	133.33	5.77	2.70	0.56	7.50	0.06	30.10	0.53
21/02/2556 9:35 น.	31.02	133.33	11.55	2.67	0.67	7.49	0.05	30.30	0.70
22/02/2556 12:40 น.	32.15	160.00	10.00	3.83	0.46	7.58	0.07	30.17	0.32
23/02/2556 10:00 น.	33.04	166.67	20.82	2.90	0.30	7.34	0.09	28.77	0.32
24/02/2556 10:00 น.	34.04	140.00	17.32	4.10	0.56	7.68	0.12	28.93	0.40
25/02/2556 10:00 น.	35.04	143.33	11.55	3.27	0.87	7.44	0.16	29.50	0.46
26/02/2556 9:30 น.	36.02	140.00	10.00	3.73	0.70	7.57	0.39	30.37	0.40
27/02/2556 9:30 น.	37.02	136.67	5.77	2.97	0.67	7.62	0.16	30.80	0.44
28/02/2556 10:00 น.	38.04	136.67	5.77	3.43	1.40	7.74	0.15	30.77	0.49
1/03/2556 9:30 น.	39.02	130.00	10.00	3.60	0.46	7.38	0.07	30.70	0.44
5/03/2556 10:00 น.	43.04	150.00	0.00	3.63	0.15	7.27	0.08	27.60	0.36
7/03/2556 9:30 น.	45.02	126.67	15.28	3.27	0.32	7.44	0.14	28.70	0.44
8/03/2556 10:00 น.	46.04	133.33	11.55	3.83	0.06	7.46	0.03	29.57	0.25
9/03/2556 10:30 น.	47.06	123.33	11.55	2.97	1.02	7.46	0.14	30.20	0.35
10/03/2556 9:45 น.	48.03	116.67	15.28	3.57	0.51	7.48	0.16	29.70	0.20
11/03/2556 10:00 น.	49.04	150.00	0.00	3.47	0.75	7.55	0.22	30.13	0.38
12/03/2556 9:45 น.	50.03	123.33	11.55	2.77	0.47	7.44	0.03	30.27	0.32

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
14/03/2556 10:00 น.	52.04	110.00	10.00	3.40	0.78	7.51	0.07	30.43	0.31
16/03/2556 8:45 น.	53.99	116.67	15.28	2.77	0.91	7.21	0.07	29.90	0.36
17/03/2556 9:30 น.	55.02	133.33	15.28	0.60	0.10	7.26	0.11	29.80	0.46
18/03/2556 9:45 น.	56.03	160.00	10.00	0.30	0.10	7.43	0.10	30.23	0.67
19/03/2556 9:30 น.	57.02	203.33	15.28	0.40	0.10	7.54	0.21	30.47	0.92
20/03/2556 9:30 น.	58.02	206.67	11.55	0.40	0.10	7.55	0.10	30.37	0.84
21/03/2556 9:00 น.	59.00	210.00	26.46	0.73	0.29	7.63	0.17	30.40	0.87
22/03/2556 9:00 น.	60.00	266.67	32.15	0.93	0.35	7.73	0.10	30.33	0.91
23/03/2013 9:00 น.	61.00	220.00	26.46	0.80	0.20	7.61	0.18	30.43	0.99
24/03/2556 9:15 น.	62.01	253.33	47.26	0.97	0.32	7.96	0.25	30.63	0.90
25/03/2556 9:10 น.	63.01	253.33	30.55	0.83	0.29	7.76	0.12	30.83	0.90
29/03/2556 9:30 น.	67.02	233.33	11.55	0.93	0.46	7.81	0.02	31.23	0.64
30/03/2556 9:00 น.	68.00	286.67	64.29	1.03	0.31	7.79	0.02	31.20	0.69
31/03/2556 10:00 น.	69.04	260.00	43.59	1.03	0.35	7.76	0.11	30.93	0.57
1/04/2556 9:00 น.	70.00	263.33	20.82	4.03	0.55	7.86	0.03	30.93	0.64
2/04/2556 9:00 น.	71.00	183.33	25.17	2.93	0.38	7.60	0.02	31.23	0.29
4/04/2556 9:30 น.	73.02	146.67	11.55	3.50	0.35	7.76	0.10	31.87	0.32
7/04/2556 14:00 น.	76.21	150.00	20.00	4.13	0.38	7.75	0.07	31.23	0.35
8/04/2556 10:15 น.	77.05	143.33	11.55	3.70	0.26	7.66	0.08	31.27	0.32
9/04/2556 10:00 น.	78.04	153.33	5.77	0.60	0.36	7.41	0.03	31.07	0.68
10/04/2556 9:45 น.	79.03	183.33	20.82	0.37	0.12	7.53	0.01	31.23	0.90
11/04/2556 10:00 น.	80.04	263.33	5.77	0.67	0.12	7.68	0.01	31.07	0.68
12/04/2556 10:15 น.	81.05	256.67	20.82	0.63	0.15	7.82	0.02	30.00	0.70
13/04/2556 10:15 น.	82.05	246.67	20.82	0.80	0.17	7.80	0.08	29.93	0.81
14/04/2556 10:00 น.	83.04	246.67	20.82	1.07	0.06	7.78	0.10	30.27	0.84
15/04/2556 10:20 น.	84.06	273.33	32.15	1.37	0.31	7.85	0.11	29.23	0.98
17/04/2556 10:00 น.	86.04	276.67	32.15	1.03	0.15	7.90	0.19	29.30	0.87
18/04/2556 9:30 น.	87.02	290.00	20.00	5.97	0.21	8.21	0.15	29.30	0.87
19/04/2556 9:40 น.	88.03	316.67	28.87	6.13	0.32	8.31	0.16	29.67	0.87
20/04/2556 9:40 น.	89.03	253.33	20.82	5.90	0.69	8.61	0.21	30.57	1.10
21/04/2556 10:00 น.	90.04	170.00	40.00	4.27	0.55	8.03	0.15	30.87	0.23
22/04/2556 10:45 น.	91.07	190.00	10.00	3.80	0.95	7.91	0.10	31.00	0.44
23/04/2556 9:45 น.	92.03	206.67	20.82	0.50	0.10	7.56	0.05	30.63	0.72
24/04/2556 10:00 น.	93.04	236.67	15.28	0.57	0.15	7.55	0.04	30.33	0.72
25/04/2556 9:45 น.	94.03	293.33	15.28	0.43	0.15	7.56	0.06	30.73	0.90
26/04/2556 9:30 น.	95.02	290.00	17.32	0.93	0.25	7.45	0.03	30.57	0.68
27/04/2556 10:00 น.	96.04	316.67	41.63	1.50	0.17	7.48	0.10	30.90	0.79
28/04/2556 10:00 น.	97.04	283.33	15.28	0.80	0.00	7.60	0.13	31.10	0.95
29/04/2556 9:40 น.	98.03	300.00	20.00	5.00	0.20	7.55	0.12	30.83	0.90
30/04/2556 12:40 น.	99.15	206.67	41.63	5.07	0.25	7.52	0.14	31.07	0.49
1/05/2556 9:30 น.	100.02	213.33	30.55	5.00	0.70	7.57	0.08	31.20	0.44
2/05/2556 9:10 น.	101.01	206.67	25.17	0.57	0.15	7.39	0.09	31.27	0.78
3/05/2556 9:30 น.	102.02	256.67	40.41	0.43	0.12	7.25	0.14	31.73	0.81
4/05/2556 9:30 น.	103.02	266.67	46.19	0.57	0.21	7.36	0.12	31.60	1.22
5/05/2556 13:30 น.	104.19	356.67	41.63	1.20	0.36	7.27	0.11	30.80	0.89
6/05/2556 9:40 น.	105.03	350.00	26.46	1.70	0.26	7.42	0.12	30.23	0.81
7/05/2556 10:00 น.	106.04	353.33	56.86	1.53	0.06	7.36	0.12	30.27	0.93
8/05/2556 10:00 น.	107.04	350.00	60.83	5.77	0.21	7.44	0.10	30.87	0.92

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าสภาพด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
9/05/2556 10:00 น.	108.04	180.00	55.68	4.87	0.42	7.40	0.25	31.23	0.38
10/05/2556 10:00 น.	109.04	193.33	20.82	5.77	0.47	7.34	0.23	31.53	0.38
11/05/2556 11:30 น.	110.10	176.67	40.41	5.20	0.17	8.14	0.14	31.77	0.32
12/05/2556 10:40 น.	111.07	210.00	51.96	0.70	0.10	7.93	0.16	31.43	0.64
13/05/2556 10:45 น.	112.07	220.00	40.00	0.63	0.15	7.97	0.12	31.20	0.87
14/05/2556 10:00 น.	113.04	283.33	35.12	0.90	0.20	8.02	0.20	30.97	0.95
15/05/2556 10:00 น.	114.04	276.67	45.09	0.73	0.25	8.09	0.20	31.63	0.90
16/05/2556 10:15 น.	115.05	280.00	60.83	1.03	0.45	8.16	0.22	32.00	0.96
17/05/2556 9:50 น.	116.03	310.00	52.92	1.50	0.40	8.18	0.24	31.90	0.96
18/05/2556 10:30 น.	117.06	376.67	72.34	5.67	0.40	8.44	0.13	31.47	0.93
19/05/2556 10:30 น.	118.06	243.33	37.86	6.37	0.12	8.28	0.19	30.77	0.42
20/05/2556 9:50 น.	119.03	226.67	40.41	5.87	0.75	8.28	0.16	30.77	0.15
22/05/2556 10:00 น.	121.04	236.67	65.06	5.50	0.56	8.26	0.27	31.07	0.55

ตารางที่ ง-13 ค่าโออาร์พีในชั้นน้ำและชั้นหินพัมมิสของชุดควบคุม-2 (ถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน) และชุดทดลอง (ถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน) ชุดการทดลองละ 3 ถังทดลอง

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พีในชั้นน้ำ (มิลลิโวลต์)				ค่าโออาร์พีในชั้นหินพัมมิส (มิลลิโวลต์)			
		ชุดควบคุม-2		ชุดทดลอง		ชุดควบคุม-2		ชุดทดลอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
21/01/2556 9:00 น.	0	125.33	3.49	127.73	4.05	117.80	1.85	115.67	1.68
22/01/2556 8:30 น.	0.98	139.00	0.96	139.17	2.71	140.53	1.36	139.17	1.97
23/01/2556 8:45 น.	1.99	159.47	3.71	160.50	22.15	157.97	1.22	159.17	18.82
24/01/2556 8:45 น.	2.99	177.07	3.14	168.63	24.86	176.57	4.44	166.40	24.02
25/01/2556 8:50 น.	3.99	170.37	2.05	178.37	18.06	172.07	4.20	176.13	22.09
26/01/2556 16:00 น.	5.29	191.63	5.09	183.73	7.25	187.77	6.43	187.20	3.66
27/01/2556 9:40 น.	6.03	174.03	3.07	175.87	18.22	175.27	3.50	176.00	16.27
28/01/2556 12:30 น.	7.15	173.90	3.46	164.37	6.01	172.80	2.88	163.77	6.56
29/01/2556 9:30 น.	8.02	175.97	4.60	166.60	5.11	177.53	0.15	167.87	7.05
30/01/2556 9:40 น.	9.03	189.83	0.35	170.50	8.78	187.50	1.90	173.43	9.81
31/01/2556 10:00 น.	10.04	188.70	4.27	167.33	5.69	189.00	4.35	169.67	7.56
1/02/2556 10:00 น.	11.04	187.07	3.31	168.97	3.51	187.20	3.80	170.93	5.02
2/02/2556 10:00 น.	12.04	188.30	4.62	167.10	7.74	189.33	3.80	170.20	5.36
4/02/2556 9:40 น.	14.03	187.53	6.18	174.00	11.10	189.33	6.17	173.30	5.84
5/02/2556 13:00 น.	15.17	192.13	1.99	183.97	2.27	192.83	2.55	184.93	2.87
6/02/2556 9:30 น.	16.02	193.50	4.26	177.30	14.90	196.03	3.76	178.23	8.56
7/02/2556 9:45 น.	17.03	195.67	5.83	185.53	16.51	201.80	5.81	182.40	9.70
8/02/2556 9:40 น.	18.03	198.93	8.35	187.20	5.52	203.97	6.71	189.33	1.02
9/02/2556 9:45 น.	19.03	207.73	6.65	192.20	5.80	209.23	4.24	193.77	6.45
10/02/2556 10:20 น.	20.06	216.23	7.20	206.73	12.11	221.40	5.67	201.77	2.84
11/02/2556 10:00 น.	21.04	227.73	28.73	199.03	15.38	211.50	2.95	201.33	1.76
12/02/2556 9:30 น.	22.02	205.37	9.22	193.70	17.42	210.80	4.89	188.47	10.28
13/02/2556 8:30 น.	22.98	210.70	8.16	197.20	17.11	212.97	3.11	30.20	0.00
14/02/2556 8:45 น.	23.99	200.07	9.68	179.57	11.51	199.63	3.89	-28.50	0.00
15/02/2556 8:45 น.	24.99	188.80	8.46	145.57	1.08	191.93	3.32	-40.80	0.00
16/02/2556 9:30 น.	26.02	197.20	1.93	157.20	6.87	194.57	1.27	17.20	0.00

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พีในชั้นน้ำ (มิลลิโวลต์)				ค่าโออาร์พีในชั้นหินพัมมิส (มิลลิโวลต์)			
		ชุดควบคุม-2		ชุดทดลอง		ชุดควบคุม-2		ชุดทดลอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
18/02/2556 11:00 น.	28.08	198.47	1.88	190.80	3.16	198.77	2.05	94.70	0.00
20/02/2556 10:00 น.	30.04	201.53	9.42	202.90	5.58	204.13	4.87	200.53	1.62
21/02/2556 9:35 น.	31.02	201.90	10.51	189.77	20.33	205.57	11.86	193.03	12.70
22/02/2556 12:40 น.	32.15	214.43	2.06	211.13	1.76	213.47	3.16	208.90	2.54
23/02/2556 10:00 น.	33.04	198.37	6.40	193.13	10.59	203.23	10.05	192.13	7.21
24/02/2556 10:00 น.	34.04	191.37	7.06	185.50	13.86	191.67	7.89	183.60	7.41
25/02/2556 10:00 น.	35.04	183.30	10.85	177.13	14.52	186.57	16.07	174.77	11.70
26/02/2556 9:30 น.	36.02	197.30	7.69	185.77	9.24	197.17	7.85	187.17	8.17
27/02/2556 9:30 น.	37.02	204.50	3.73	190.07	10.74	202.70	4.42	193.73	8.20
28/02/2556 10:00 น.	38.04	202.63	3.50	185.90	4.81	200.13	3.74	186.37	6.31
1/03/2556 9:30 น.	39.02	207.30	9.25	190.40	13.51	206.73	5.06	190.60	12.52
5/03/2556 10:00 น.	43.04	213.63	9.25	193.37	11.91	219.87	7.34	197.17	6.85
7/03/2556 9:30 น.	45.02	208.67	5.80	200.67	7.68	209.64	4.64	199.23	5.26
8/03/2556 10:00 น.	46.04	211.83	6.05	205.37	5.16	210.40	3.40	205.87	1.99
9/03/2556 10:30 น.	47.06	220.80	2.71	204.27	0.91	220.57	2.95	207.63	1.10
10/03/2556 9:45 น.	48.03	222.40	7.75	206.90	11.66	223.47	5.04	206.83	11.32
11/03/2556 10:00 น.	49.04	204.03	5.81	212.70	5.80	209.13	4.91	211.67	5.44
12/03/2556 9:45 น.	50.03	224.10	4.81	211.87	1.60	226.10	2.34	209.80	4.46
14/03/2556 10:00 น.	52.04	220.43	5.71	203.60	11.62	221.00	4.71	202.10	8.81
16/03/2556 8:45 น.	53.99	221.30	5.52	208.97	4.20	222.37	5.70	58.00	0.00
17/03/2556 9:30 น.	55.02	184.00	10.18	175.63	2.40	186.97	8.00	-173.70	0.00
18/03/2556 9:45 น.	56.03	172.57	1.96	52.20	3.90	171.93	1.27	-480.10	0.00
19/03/2556 9:30 น.	57.02	174.10	4.60	123.60	21.91	177.23	0.67	-567.10	0.00
20/03/2556 9:30 น.	58.02	159.63	2.65	129.43	20.31	157.20	0.75	-529.30	0.00
21/03/2556 9:00 น.	59.00	150.87	5.44	117.63	8.24	149.60	2.95	-407.60	0.00
22/03/2556 9:00 น.	60.00	146.93	6.05	110.50	13.94	142.33	1.69	-412.60	0.00
23/03/2556 9:00 น.	61.00	145.67	4.36	125.53	8.66	142.10	4.07	-472.60	0.00
24/03/2556 9:15 น.	62.01	179.57	4.22	161.37	7.85	173.37	1.07	-446.80	0.00
25/03/2556 9:10 น.	63.01	174.17	2.07	161.47	1.31	169.10	4.45	-438.70	0.00
29/03/2556 9:30 น.	67.02	150.93	6.21	138.13	4.99	145.60	1.83	-485.30	0.00
30/03/2556 9:00 น.	68.00	164.67	1.21	151.23	4.87	161.67	0.86	-444.40	0.00
31/03/2556 10:00 น.	69.04	163.77	1.72	159.43	1.56	159.40	1.95	-277.70	0.00
1/04/2556 9:00 น.	70.00	178.10	3.31	153.23	11.29	168.87	3.98	143.27	5.49
2/04/2556 9:00 น.	71.00	167.23	2.90	151.83	1.15	158.90	1.08	142.33	6.33
4/04/2556 9:30 น.	73.02	169.07	3.24	166.33	21.03	168.47	2.27	146.50	2.82
7/04/2556 14:00 น.	76.21	167.60	2.17	174.97	12.82	164.23	2.54	166.07	15.74
8/04/2556 10:15 น.	77.05	191.50	4.92	181.57	5.50	184.37	2.73	169.93	7.59
9/04/2556 10:00 น.	78.04	195.30	1.78	187.90	0.89	193.00	1.21	-79.70	0.00
10/04/2556 9:45 น.	79.03	195.43	3.10	166.93	9.74	192.13	4.26	-204.60	0.00
11/04/2556 10:00 น.	80.04	187.13	1.84	162.93	2.80	186.40	1.50	-232.60	0.00
12/04/2556 10:15 น.	81.05	178.30	2.52	169.93	0.32	176.63	2.73	-367.30	0.00
13/04/2556 10:15 น.	82.05	183.70	2.60	164.80	1.65	182.07	1.06	-159.30	0.00
14/04/2556 10:00 น.	83.04	185.77	1.93	150.13	2.35	184.80	1.28	-139.10	0.00
15/04/2556 10:20 น.	84.06	195.37	2.40	176.50	2.91	192.33	3.15	-50.90	0.00
17/04/2556 10:00 น.	86.04	165.53	3.15	144.93	2.71	164.97	2.63	85.90	0.00
18/04/2556 9:30 น.	87.02	200.33	2.71	191.37	3.43	198.30	1.77	176.90	1.57
19/04/2556 9:40 น.	88.03	186.50	3.08	169.17	0.78	184.47	2.35	154.97	4.46
20/04/2556 9:40 น.	89.03	199.47	2.22	177.73	0.80	197.97	3.72	165.23	3.98
21/04/2556 10:00 น.	90.04	175.20	2.92	176.63	1.45	172.60	2.78	157.63	1.80

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าโออาร์พีในชั้นน้ำ (มิลลิโวลต์)				ค่าโออาร์พีในชั้นหินพัมมิส (มิลลิโวลต์)			
		ชุดควบคุม-2		ชุดทดลอง		ชุดควบคุม-2		ชุดทดลอง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
22/04/2556 10:45 น.	91.07	196.53	3.11	184.17	1.34	193.00	0.70	181.40	0.98
23/04/2556 9:45 น.	92.03	201.10	6.73	174.03	1.10	200.30	6.58	23.80	0.00
25/04/2556 9:45 น.	94.03	177.37	1.36	151.63	1.52	176.63	1.86	-90.40	0.00
26/04/255 9:30 น.	95.02	196.90	0.60	168.37	1.11	194.47	2.84	-190.90	0.00
27/04/2556 10:00 น.	96.04	185.63	3.81	167.40	0.90	183.17	2.21	-30.90	0.00
28/04/2556 10:00 น.	97.04	192.47	1.05	171.97	6.55	189.47	2.25	-104.80	0.00
29/04/2556 9:40 น.	98.03	197.07	1.46	194.20	3.57	196.40	1.35	175.23	1.27
30/04/2556 12:40 น.	99.15	193.00	3.17	184.20	0.95	191.97	1.08	176.23	1.62
1/05/25566 9:30 น.	100.02	191.90	0.61	185.43	13.60	189.97	0.59	164.53	6.29
2/05/2556 9:10 น.	101.01	198.17	1.72	181.40	1.21	196.93	1.32	-92.80	0.00
3/05/2556 9:30 น.	102.02	192.63	2.72	170.13	3.02	191.00	1.32	-388.80	0.00
4/05/2556 9:30 น.	103.02	179.73	14.06	141.30	4.35	171.37	2.51	-358.60	0.00
5/05/2556 13:30 น.	104.19	203.23	8.17	174.80	3.76	198.40	5.73	-321.50	0.00
6/05/2556 9:40 น.	105.03	203.37	6.35	183.50	5.90	198.47	10.29	-216.10	0.00
7/05/2556 10:00 น.	106.04	183.97	3.45	171.80	3.12	180.90	3.02	168.47	0.78
8/05/2556 10:00 น.	107.04	201.87	6.73	178.47	0.96	202.37	8.50	174.97	3.87
9/05/2556 10:00 น.	108.04	204.53	2.21	189.10	1.54	202.53	3.39	174.10	2.80
10/05/2556 10:00 น.	109.04	193.10	2.19	165.97	2.70	191.93	1.11	159.23	2.79
11/05/2556 11:30 น.	110.10	201.07	1.75	175.83	1.72	199.83	2.52	171.63	1.85
12/05/2556 10:40 น.	111.07	190.33	0.50	174.90	2.25	187.87	1.48	-5.10	0.00
13/05/2556 10:45 น.	112.07	199.83	1.38	175.90	1.67	198.27	2.64	-310.90	0.00
14/05/2556 10:00 น.	113.04	177.57	2.22	163.03	0.45	175.33	2.32	-171.10	0.00
15/05/2556 10:00 น.	114.04	191.63	4.39	156.10	1.51	187.00	2.45	-455.60	0.00
16/05/2556 10:15 น.	115.05	166.30	2.92	146.67	1.17	165.97	4.27	-415.70	0.00
17/05/2556 9:50 น.	116.03	174.90	2.46	156.53	0.42	170.57	1.85	143.27	3.92
18/05/2556 10:30 น.	117.06	195.60	3.18	158.80	0.53	191.63	1.55	152.97	0.50
19/05/2556 10:30 น.	118.06	212.83	21.18	176.53	2.08	211.17	20.13	149.33	0.61
20/05/2556 9:50 น.	119.03	180.60	3.15	171.83	1.81	178.57	5.01	162.07	1.71
22/05/2556 10:00 น.	121.04	188.70	1.65	150.43	0.15	188.43	1.07	145.93	0.71

ตารางที่ ง-14 ค่าซีโอดีที่ทำการตรวจวัดในระหว่างการทดลองของชุดควบคุม-1 (ถังเลี้ยงปลานิล) จำนวน 1 ถังทดลอง ชุดควบคุม-2 (ถังเลี้ยงปลานิลและปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน) และชุดทดลอง (ถังเลี้ยงปลานิล) ชุดการทดลองละ 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ค่าซีโอดี (มก./ล.)						
		ชุดควบคุม-1 (ถังเลี้ยงปลานิล)	ชุดควบคุม-2 (ถังเลี้ยงปลานิล)		ชุดควบคุม-2 (ถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชัน)		ชุดทดลอง (ถังเลี้ยงปลานิล)	
			ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
21/01/2556 9:00 น.	0	35.56	29.63	10.26	44.44	30.79	41.48	10.26
13/02/2556 8:30 น.	22.98	52.80	18.08	9.04	18.08	9.04	27.12	0.00
16/03/2556 8:45 น.	53.99	61.90	17.46	9.91	19.05	19.05	41.27	7.27
8/04/2556 10:15 น.	77.05	98.77	32.92	15.09	29.63	19.75	32.92	10.28
22/04/2556 10:45 น.	91.07	110.34	33.72	14.05	24.52	14.05	58.24	14.05
1/05/2556 9:30 น.	100.02	111.83	45.88	13.14	45.88	21.65	68.82	8.60
11/05/2556 11:30 น.	110.10	106.67	24.89	12.32	32.00	10.67	56.89	12.32
22/05/2556 10:00 น.	121.04	85.71	12.70	11.00	9.52	9.52	19.05	25.20

ตารางที่ ง-15 ค่าซีโอดีที่ทำการตรวจวัดในระหว่างการทดลองของชุดทดลอง (ถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน) จำนวน 3 ถังทดลอง (วิเคราะห์ถังละ 3 ซ้ำ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ซีโอดี (มก./ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD
21/01/2556 9:00 น.	0.00	38.52	18.50
13/02/2556 8:30 น.	22.98	69.30	57.41
13/02/2556 11:00 น.	23.08	142.22	15.40
14/02/2556 8:45 น.	23.99	112.59	10.26
15/02/2556 8:45 น.	24.99	56.30	13.58
16/02/2556 9:30 น.	26.02	55.21	3.25
18/02/2556 11:00 น.	28.08	44.44	8.89
19/02/2556 10:00 น.	29.04	28.44	3.08
22/02/2556 12:40 น.	32.15	29.63	13.58
16/03/2556 8:45 น.	53.99	34.92	7.27
16/03/2556 13:30 น.	54.19	266.67	34.21
17/03/2556 9:30 น.	55.02	256.79	17.11
18/03/2556 9:45 น.	56.03	160.11	6.98
19/03/2556 9:30 น.	57.02	81.56	15.00
20/03/2556 9:30 น.	58.02	41.40	24.90
21/03/2556 9:00 น.	59.00	57.78	30.77
22/03/2556 9:00 น.	60.00	55.41	12.64
2/04/2556 9:00 น.	71.00	58.24	29.56
8/04/2556 10:15 น.	77.05	49.38	9.88
8/04/2556 15:30 น.	77.27	343.30	34.81
9/04/2556 10:00 น.	78.04	315.71	28.09
10/04/2556 9:45 น.	79.03	251.34	19.14
11/04/2556 10:00 น.	80.04	112.35	10.35
12/04/2556 10:15 น.	81.05	64.25	11.42
13/04/2556 10:15 น.	82.05	73.62	11.72
21/04/2556 10:00 น.	90.04	71.11	8.89
22/04/2556 10:45 น.	91.07	49.04	5.31
22/04/2556 16:30 น.	91.31	337.78	44.44
23/04/25556 9:45 น.	92.03	337.78	0.00
24/04/2556 10:00 น.	93.04	180.31	6.12
25/04/2556 9:45 น.	94.03	76.96	35.73
26/04/2556 9:30 น.	95.02	80.83	12.15
30/04/2556 12:40 น.	99.15	64.00	10.67
1/05/2556 9:30 น.	100.02	65.95	4.97
1/05/2556 16:15 น.	100.30	277.33	28.22
2/05/2556 9:10 น.	101.01	284.44	34.29
3/05/2556 9:30 น.	102.02	155.04	9.77
4/05/2556 9:30 น.	103.02	60.21	0.65
5/05/2556 13:30 น.	104.19	21.33	67.89
6/05/2556 9:40 น.	105.03	83.20	5.66
9/05/2556 10:00 น.	108.04	61.54	0.00
11/05/2556 11:30 น.	110.10	49.78	6.16
11/05/2556 17:30 น.	110.35	300.85	31.33
12/05/2556 10:40 น.	111.07	283.76	21.35
13/05/2556 10:45 น.	112.07	159.29	8.63

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ซีโอดี (มก./ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD
14/05/2556 10:00 น.	113.04	65.19	7.71
15/05/2556 10:00 น.	114.04	45.78	13.53
16/05/2556 10:15 น.	115.05	50.00	5.05
19/05/2556 10:30 น.	118.06	34.92	19.83
22/05/2556 10:00 น.	121.04	31.75	11.00

ตารางที่ ง-16 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตในการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของหินพัมมิสบดเมื่อเริ่มต้นการทดลอง

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
14/01/2556 10:15 น.	0.00	0.86	0.03	0.00	0.00	1.32	0.55
14/01/2556 11:00 น.	0.03	0.77	0.05	0.03	0.00	2.24	0.17
14/01/2556 11:35 น.	0.06	0.77	0.02	0.03	0.00	2.46	0.10
14/01/2556 12:20 น.	0.09	0.72	0.03	0.04	0.01	2.60	0.02
14/01/2556 13:00 น.	0.11	0.71	0.04	0.06	0.02	2.87	0.23
14/01/2556 14:00 น.	0.16	0.65	0.07	0.06	0.01	3.03	0.20
14/01/2556 15:00 น.	0.20	0.57	0.07	0.07	0.01	3.24	0.11
14/01/2556 16:00 น.	0.24	0.49	0.08	0.08	0.02	3.51	0.11
14/01/2556 18:00 น.	0.32	0.31	0.06	0.10	0.02	3.91	0.30
14/01/2556 19:00 น.	0.36	0.20	0.05	0.11	0.02	3.81	0.21
14/01/2556 20:30 น.	0.43	0.12	0.04	0.10	0.01	3.80	0.12
14/01/2556 22:40 น.	0.52	0.04	0.02	0.07	0.01	4.08	0.13
15/01/2556 8:45 น.	0.94	0.01	0.01	0.00	0.00	4.11	0.09

ตารางที่ ง-17 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตในการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิลของชุดควบคุม-1 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
23/05/2556 13:30 น.	0.00	1.23	0.04	0.09	0.00	344.06	6.26
23/05/2556 14:00 น.	0.02	1.23	0.07	0.19	0.09	342.10	9.81
23/05/2556 14:15 น.	0.03	1.10	0.05	0.20	0.02	349.87	6.41
23/05/2556 14:30 น.	0.04	1.22	0.12	0.20	0.01	332.98	6.58
23/05/2556 14:45 น.	0.05	1.05	0.15	0.21	0.02	354.62	17.95
23/05/2556 15:05 น.	0.07	0.95	0.13	0.23	0.03	331.08	17.78
23/05/2556 15:35 น.	0.09	0.89	0.20	0.28	0.03	341.66	7.12
23/05/2556 16:10 น.	0.11	0.84	0.20	0.31	0.03	344.33	17.64
23/05/2556 17:15 น.	0.16	0.54	0.14	0.39	0.01	346.17	11.96
23/05/2556 18:30 น.	0.21	0.20	0.11	0.41	0.05	343.87	20.86
23/05/2556 20:00 น.	0.27	0.07	0.04	0.35	0.08	342.94	2.39
24/05/2556 9:40 น.	0.84	0.04	0.00	0.03	0.01	349.83	8.66

ตารางที่ ง-18 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตในการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของหินพัมมิสบดในถังปฏิกรณ์ไนทริฟิเคชันเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
23/05/2556 13:30 น.	0.00	0.84	0.06	0.01	0.01	5.46	0.67
23/05/2556 14:00 น.	0.02	0.68	0.05	0.02	0.01	10.22	2.35
23/05/2556 14:15 น.	0.03	0.67	0.04	0.02	0.00	10.50	2.86
23/05/2556 14:30 น.	0.04	0.63	0.06	0.02	0.00	11.16	3.11
23/05/2556 14:45 น.	0.05	0.56	0.09	0.01	0.00	11.51	3.15
23/05/2556 15:05 น.	0.07	0.54	0.09	0.01	0.00	11.51	2.61
23/05/2556 15:35 น.	0.09	0.46	0.09	0.01	0.01	11.95	3.05
23/05/2556 16:10 น.	0.11	0.37	0.12	0.01	0.00	12.33	2.87
23/05/2556 17:15 น.	0.16	0.24	0.11	0.01	0.00	12.85	3.01
23/05/2556 18:30 น.	0.21	0.13	0.08	0.01	0.01	13.42	3.37
23/05/2556 20:00 น.	0.27	0.14	0.06	0.00	0.00	13.21	3.37
24/05/2556 9:40 น.	0.84	0.08	0.05	0.01	0.01	14.63	2.45

ตารางที่ ง-19 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรตในการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของหินพัมมิสบดในถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชันเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไทรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเทรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
23/05/2556 13:30 น.	0.00	0.85	0.06	0.01	0.00	2.09	0.57
23/05/2556 14:00 น.	0.02	0.68	0.04	0.01	0.00	3.71	0.31
23/05/2556 14:15 น.	0.03	0.71	0.05	0.02	0.01	3.52	0.35
23/05/2556 14:30 น.	0.04	0.63	0.03	0.02	0.01	3.72	0.41
23/05/2556 14:45 น.	0.05	0.56	0.05	0.02	0.01	4.09	0.39
23/05/2556 15:05 น.	0.07	0.48	0.06	0.02	0.01	4.28	0.58
23/05/2556 15:35 น.	0.09	0.35	0.04	0.02	0.01	4.36	0.58
23/05/2556 16:10 น.	0.11	0.29	0.05	0.02	0.01	4.51	0.48
23/05/2556 17:15 น.	0.16	0.16	0.07	0.02	0.01	4.96	0.44
23/05/2556 18:30 น.	0.21	0.13	0.13	0.02	0.01	4.61	0.52
23/05/2556 20:00 น.	0.27	0.01	0.01	0.00	0.00	4.78	0.28
24/05/2556 9:40 น.	0.84	0.01	0.01	0.00	0.00	5.20	0.17

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเพ็ญพิชญา พินิจธนภาคย์ เกิดเมื่อวันที่ 23 กรกฎาคม พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดฉะเชิงเทรา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 โดยขณะที่ศึกษานั้นได้รับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุนสนับสนุนบางส่วนของโครงการในแผนพัฒนาวิชาการจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (รหัสโครงการ CU56–FW14) ทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภทบัณฑิตศึกษาประจำปี 2556 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และทุนสนับสนุนเพิ่มเติมจากโครงการส่งเสริมการวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (รหัสโครงการ FW1017A)

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

เพ็ญพิชญา พินิจธนภาคย์, วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี และสรวิศ เผ่าทองศุข. 2555. การบำบัดไนโตรเจนในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน. การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9, หน้า 355-362. 6 – 7 ธันวาคม 2555 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม. (นำเสนอผลงานแบบบรรยายมีเรื่องเต็ม)

เพ็ญพิชญา พินิจธนภาคย์, วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี และสรวิศ เผ่าทองศุข. 2556. การบำบัดด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์เดียวเพื่อบำบัดไนโตรเจนจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 12, หน้า 217 – 218. 27 – 29 มีนาคม 2556 ณ โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออร์คิด จังหวัดขอนแก่น. (นำเสนอผลงานแบบบรรยายมีเรื่องเต็ม)