

การบำบัดไนโตรเจนร่วมกับฟอสฟอรัสในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์สำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียน  
ระบบปิด

นางสาววรรณภา หนูเนตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PHOSPHORUS AND NITROGEN REMOVAL SIMULTANEOUSLY IN SEQUENCING BATCH  
REACTOR FOR CLOSED RECIRCULATING AQUACULTURE SYSTEM.

Miss Wannapa Noonath



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดไนโตรเจนร่วมกับฟอสฟอรัสในถังปฏิกรณ์เอสบีอาร์สำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนระบบปิด
โดย	นางสาววรรณภา หนูเนตร
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.สุรเชษฐ์ บุรุษอาชาไนย

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์)  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร.สุรเชษฐ์ บุรุษอาชาไนย)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิ้มปียากร)

.....กรรมการ  
(ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข)

วรรณภา หนูเนตร : การบำบัดไนโตรเจนร่วมกับฟอสฟอรัสในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์สำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนระบบปิด (PHOSPHORUS AND NITROGEN REMOVAL SIMULTANEOUSLY IN SEQUENCING BATCH REACTOR FOR CLOSED RECIRCULATING AQUACULTURE SYSTEM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.สุรเชษฐ์ บุรุษอาชาไนย , 126 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนระบบปิดโดยสนใจไนโตรเจนในรูปไนเตรตและฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตในระบบการทดลองในถังปฏิกรณ์ เอสปีอาร์ แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ช่วง การทดลองช่วงแรกศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกระตุ้นการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ โดยทำการทดลองในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ขนาด 2 ล. ใช้หัวเชื้อตะกอนชีวภาพเริ่มต้นจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำจริง เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและฟอสฟอรัสในสถานะที่เติมโซเดียมอะซิเตตและเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน ที่อัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัส (COD:P) เท่ากับ 7:1, 14:1 และ 25:1 ผลการทดลองพบว่าชุดทดลองที่เติมเมทานอลสามารถบำบัดไนเตรตได้ร้อยละ 65, 64 และ 61 ตามลำดับ และบำบัดฟอสเฟตได้ร้อยละ 93, 95 และ 94 ตามลำดับ ขณะที่ชุดทดลองที่เติมอะซิเตตบำบัดไนเตรตได้ร้อยละ 62, 60 และ 55 ตามลำดับ และบำบัดฟอสเฟตได้ร้อยละ 87, 88 และ 86 ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งสองชนิดที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัสทั้ง 3 ระดับมีอัตราการบำบัดไนเตรตและฟอสฟอรัสได้ไม่แตกต่างกัน จึงเลือกใช้การเติมเมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัส 7:1 สำหรับการทดลองต่อไป การทดลองช่วงที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟตในถังปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์ที่เดินระบบภายใต้สภาวะไร้อากาศและไร้อากาศสลบกับมีอากาศ ผลการทดลองพบว่า การบำบัดทั้งไนเตรตและฟอสเฟตสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะของการเดินระบบแบบไร้อากาศเพียงสภาวะเดียว โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับร้อยละ 69 และ 97 ตามลำดับ การทดลองที่ 3 ศึกษาการใช้อาหารกึ่งทดแทนผงยีสต์สกัดเพื่อเป็นธาตุอาหารเสริมร่วมกับสารอินทรีย์คาร์บอนในการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟต ผลการทดลองพบว่า การเติมอาหารกึ่งช่วยกระตุ้นการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟตได้ร้อยละ 62 และ 88 ตามลำดับซึ่งน้อยกว่าชุดที่เติมผงยีสต์สกัดที่มีประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟตคิดเป็นร้อยละ 63 และ 92 ตามลำดับ ในการทดลองช่วงสุดท้ายทำการประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ขนาด 16 ล. เดินระบบตามสภาวะการทดลองที่เหมาะสมจากช่วงที่ผ่านมา (การทดลองช่วงที่ 1, 2 และ 3) คือเดินระบบแบบไร้อากาศโดยใช้ เมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 7:1 เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนและใช้ผงยีสต์สกัดเป็นธาตุอาหารเสริม พบว่าใช้เวลาอย่างน้อย 15 วันเพื่อกระตุ้นให้ถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์นี้มีประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟตคงที่ โดยสามารถบำบัดได้ร้อยละ 69 และ 85 ตามลำดับ

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต	.....
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	.....
ปีการศึกษา	2559	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม	.....

# # 5770461121 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: NITROGEN AND PHOSPHORUS REMOVAL / CLOSED RECIRCULATING AQUACULTURE SYSTEM / DENITRIFICATION

WANNAPA NOONATH: PHOSPHORUS AND NITROGEN REMOVAL SIMULTANEOUSLY IN SEQUENCING BATCH REACTOR FOR CLOSED RECIRCULATING AQUACULTURE SYSTEM.

ADVISOR: ASSOC. PROF.WIBOONLUK PUNGRASMI, Ph.D., CO-ADVISOR: SURACHET BURUTARCHANAI, Ph.D. , 126 pp.

This research studied the removal of nitrogen (N) and phosphorus (P) using Sequencing Batch Reactor (SBR) for a recirculating aquaculture system (RAS), which nitrogen and phosphorus were commonly found in the form of nitrate and phosphate, respectively. The experiment consisted of 4 parts. Firstly, the optimal conditions to stimulate the biological phosphorus removal was investigated. This part was conducted in 2-Liter SBR reactors using activated sludge from the existing RAS as initial seed. The effects of different organic carbon sources, such as sodium acetate and methanol, were studied. To compare the removal efficiency, the varied concentrations of organic carbon per phosphorus (COD:P) of 7:1, 14:1 and 25:1 were employed. The results showed that addition of methanol in different COD:P ratios could attain the N removal of 65% 64% and 61% and P removal of 93% 95% and 94%, respectively. While the addition of acetate could attain the N removal of 62% 60% and 55% and P removal of 87% 88% and 86%, respectively. Nevertheless, it also suggested that those three COD:P ratios did not show significant effect on N and P removal. Thus, the COD:P of 7:1 in methanol addition was used in further studies. Secondly, the efficiency of N and P removal under anaerobic condition and anaerobic/aerobic condition of SBRs was studied. It was found that full-time anaerobic condition in SBR could effectively remove N and P of 69% and 97%, respectively. In the next part, shrimp feed and yeast extract, which was commonly used as nutritional supplements along with organic carbon, were investigated. Although the replacing of the yeast extract with shrimp feed could remove 62% and 88% of N and P, respectively, these removal efficiencies were slightly lower than those found in the SBR supplemented with yeast extract, 63% and 92% of N and P. The last experiment was performed in 16-Liter SBRs with the same conditions obtained from previous results. Briefly, the SBR was operated under full-time anaerobic condition, addition of methanol at the COD:P ratio of 7:1, and supplementing with yeast extract. The result indicated that the SBR required at least 15 days for promoting the stable efficiency in N and P removal. After acclimatization period, SBR could remove N and P 69% and 85%, respectively.

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

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

Academic Year:2016 Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และดร.สุรเชษฐ์ บุรุษอาษา นาย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้คำปรึกษา ให้ความรู้ หลักการในการดำเนินงานวิจัย การออกแบบถึงปฏิกรณ์และการติดตั้งระบบ ตลอดจนความช่วยเหลือในด้านต่างๆ พร้อมคำแนะนำในแก้ไขปัญหาและสิ่งที่บกพร่องตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย รวมทั้งตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จนมีความสมบูรณ์ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผศ.ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิ้มปิยากร อาจารย์ ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ กรรมการ และอาจารย์ ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้กรุณาชี้แนะตรวจทาน ให้คำแนะนำ และแก้ไขจนวิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน ให้ความรู้ ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ อันเป็นประโยชน์

ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับทำวิจัย และให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี ตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ณ ห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล ที่ช่วยเกื้อหนุนเป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือซึ่งกันและกันมาโดยตลอดระหว่างการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จากศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ และขอขอบคุณการสนับสนุนเครื่องมือ Microplate Spectrophotometer จากโครงการ Thai Government Stimulus Package 2 (TKK2555) จนทำให้งานวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง และเพื่อนๆ ทุกคนเป็นอย่างมากที่คอยให้การสนับสนุน ให้ความช่วยเหลือ และคำปรึกษา พร้อมทั้งเป็นกำลังใจตลอดมา จนทำให้ผู้วิจัยสามารถผ่านพ้นปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ได้อย่างเข้มแข็งและภาคภูมิใจ

## สารบัญ

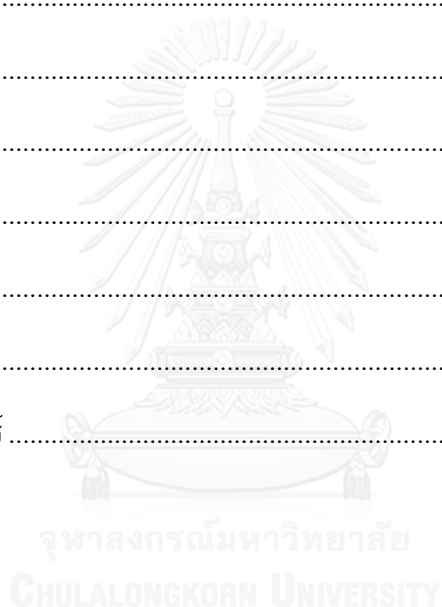
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียน (Recirculating Aquaculture Systems).....	5
2.2 คุณภาพน้ำสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	5
2.2.1 ความเป็นกรด-ด่างหรือค่าพีเอช (pH).....	6
2.2.2 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H <sub>2</sub> S).....	6
2.2.3 ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity).....	7
2.2.4 ค่าความกระด้าง (Hardness).....	7
2.3 สารประกอบไนโตรเจนน้ำ.....	8
2.3.1 สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic-nitrogen compound).....	8
2.3.2 สารประกอบแอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia-nitrogen compounds).....	8
2.3.3 สารประกอบไนไตรต์ (Nitrite-nitrogen compounds).....	9

2.3.4 สารประกอบไนเตรต (Nitrate-nitrogen compounds) .....	9
2.4 การบำบัดไนโตรเจนทางชีวภาพ .....	10
2.4.1 กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) .....	10
2.4.2 กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) .....	10
2.4.3 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) .....	11
2.4.3.1 วิธีแอสสิมิเลชัน (Assimilatory denitrification) .....	11
2.4.3.2 วิธีดิสสิมิเลชัน (Dissimilatory denitrification) .....	11
2.5 สารประกอบอินทรีย์คาร์บอนสำหรับกระบวนการบำบัดไนโตรเจน .....	12
2.6 ค่าศักยภาพออกซิเดชัน-รีดักชันกับปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน .....	13
2.7 สารประกอบฟอสฟอรัสในน้ำ .....	14
2.7.1 ออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphates) .....	14
2.7.2 โพลีฟอสเฟต (Polyphosphates) .....	15
2.7.3 สารอินทรีย์ฟอสเฟต (Organic Phosphates) .....	15
2.8 การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ .....	15
2.9 สภาวะแอโรบิก แอนีอ็อกซิกและแอนแอโรบิก .....	17
2.10 สารประกอบอินทรีย์คาร์บอนสำหรับกระบวนการบำบัดฟอสฟอรัส .....	18
2.11 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ (Sequencing batch reactor ;SBR) .....	19
2.12 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	21
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย .....	28
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี .....	28
3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง .....	28
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ .....	29
3.1.3 สารเคมี .....	30



3.2	แผนการทดลอง .....	31
3.3	วัสดุอุปกรณ์สำหรับการทดลอง .....	39
3.4	การดำเนินการทดลอง .....	41
3.4.1	การทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นปฏิกิริยาการบำบัด ฟอสฟอรัสทางชีวภาพ .....	41
3.4.2	การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและฟอสฟอรัส ภายใต้สภาวะไร้อากาศ/มีอากาศและไร้อากาศในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ .....	43
3.4.3	การทดลองช่วงที่ 3 การศึกษาใช้อาหารกึ่งสำเร็จรูปทดแทนผงยีสต์สกัดเพื่อใช้เป็น ธาตุอาหารเสริมร่วมกับสารอินทรีย์คาร์บอนในการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟต .....	44
3.4.4	การทดลองช่วงที่ 4 การทดลองขยายขนาดถังปฏิกรณ์และเดินระบบบำบัดน้ำเสีย จากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด .....	45
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผล .....	47
4.1	การทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นปฏิกิริยาการบำบัดฟอสฟอรัส ทางชีวภาพ .....	47
4.1.1	การทดลองช่วงที่ 1.1 ศึกษาชนิดของอินทรีย์คาร์บอนและอัตราส่วนซีโอดีต่อ ฟอสฟอรัสที่เหมาะสมในการกระตุ้นปฏิกิริยาการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ โดย เปรียบเทียบระหว่างการใช้เมทานอลและอะซิเตทเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน .....	47
4.1.2	การทดลองช่วงที่ 1.2 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาการบำบัด ฟอสฟอรัสทางชีวภาพโดยกลุ่ม จุลินทรีย์พีเอโอ เมื่อใช้ชนิดอินทรีย์คาร์บอนที่ เหมาะสม .....	58
4.2	การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟตภายใต้สภาวะ ไร้อากาศ/มีอากาศและไร้อากาศในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ .....	61
4.3	การทดลองช่วงที่ 3 การศึกษาใช้อาหารกึ่งสำเร็จรูปทดแทนผงยีสต์สกัดเพื่อใช้เป็นธาตุ อาหารเสริมให้กับจุลินทรีย์ PAOs ควบคู่กับการใช้อินทรีย์คาร์บอนในการบำบัดไนเตรต และฟอสฟอรัส .....	66

4.4 การทดลองช่วงที่ 4 การทดลองขยายขนาดถึงปฏิกรณ์และเดินระบบบำบัดน้ำเสียจาก ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด .....	73
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	80
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	80
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	83
รายการอ้างอิง .....	84
ภาคผนวก ก .....	90
ภาคผนวก ข .....	99
ภาคผนวก ค .....	108
ภาคผนวก ง .....	111
ภาคผนวก จ .....	113
ภาคผนวก ฉ .....	119
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	126



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ระดับค่าพีเอชที่มีผลต่อสัตว์น้ำ.....	6
ตารางที่ 2.2 การแบ่งประเภทของน้ำตามระดับความกระด้าง .....	8
ตารางที่ 2.3 สารให้อิเล็กตรอน สารรับอิเล็กตรอน ผลของปฏิกิริยา และชื่อปฏิกิริยารีดอกซ์ .....	18
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรต่างๆ ที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 1.1 .....	42
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรต่างๆ สำหรับการทดลองช่วงที่ 2.....	44
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรต่างๆ สำหรับการทดลองช่วงที่ 3.....	45
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรต่างๆ ที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 4.....	46
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงอัตราส่วนสารอินทรีย์คาร์บอน.....	57
ตารางที่ 4.2 ทบทวนเอกสารอัตราการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของงานวิจัยอื่นเทียบกับงานวิจัยนี้ .....	79

## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	การทำงานของ Polyphosphate Accumulating Organisms (PAOs) .....	16
รูปที่ 2.2	ลำดับขั้นตอนและการทำงานในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ .....	21
รูปที่ 3.1	แผนผังสรุปภาพรวมแนวทางในการดำเนินงานวิจัย .....	32
รูปที่ 3.2	แผนผังการทดลองที่ 1.....	35
รูปที่ 3.3	แผนผังการทดลองที่ 2.....	36
รูปที่ 3.4	แผนผังการทดลองที่ 3.....	37
รูปที่ 3.5	แผนผังการทดลองที่ 4.....	38
รูปที่ 3.6	บ่อเลี้ยงปลาในในระบบปิดในโรงเรือน(ซ้าย) ตะกอนชีวภาพเริ่มต้น(ขวา) .....	39
รูปที่ 3.7	ถังปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์ขนาด 2 ลิตร .....	40
รูปที่ 3.8	ถังปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์ขนาด 16 ลิตร.....	41
รูปที่ 4.1	กราฟแสดงความเข้มข้นของฟอสเฟตในถังปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์ชุดควบคุม และชุดที่ เติมด้วยอะซิเตทและเมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัส.....	49
รูปที่ 4.2	กราฟแสดงปริมาณการสะสมฟอสฟอรัสในตะกอนในถังปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์ชุด ควบคุม และชุดที่เติมด้วยอะซิเตทและเมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัส .....	50
รูปที่ 4.3	กราฟแสดงความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนทั้งหมดในถังปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์ชุด ควบคุม และชุดที่เติมด้วยอะซิเตทและเมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัส .....	52
รูปที่ 4.4	กราฟแสดงความเข้มข้นของไนไตรต์-ไนโตรเจนในถังปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์ชุดควบคุม และชุดที่เติมด้วยอะซิเตทและเมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัส.....	53
รูปที่ 4.5	กราฟแสดงความเข้มข้นของไนเตรต-ไนโตรเจนในถังปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์ชุดควบคุม และชุดที่เติมด้วยอะซิเตทและเมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัส.....	54
รูปที่ 4.6	กราฟค่าศักยภาพออกซิเดชัน-รีดักชันในถังปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์ ชุดที่เติมด้วยอะซิเตท เม ทานอลและชุดควบคุม.....	56
รูปที่ 4.7	กราฟแสดงความเข้มข้นฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนตรท์- ไนโตรเจน และไนเตรต-ไนโตรเจนในชุดทดลองที่เติมเมทานอลและชุดควบคุม .....	60

รูปที่ 4.8 กราฟแสดงปริมาณฟอสเฟตและปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์ที่ เดินระบบแอนีอกซิกและแอนีอกซิก/แเอโรบิก.....	62
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความเข้มข้น แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนโตรท์-ไนโตรเจน และไนเตรต- ไนโตรเจน ในปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์ที่เดินระบบแอนีอกซิกและแอนีอกซิก/แเอโรบิก .....	64
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าศักยภาพออกซิเดชัน-รีดักชันในถังปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์ที่เดินระบบแอนีอก ซิก และแอนีอกซิก/แเอโรบิก.....	66
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความเข้มข้นของฟอสเฟต การสะสมของฟอสฟอรัสทั้งหมด และปริมาณ ตะกอน ชุดควบคุมที่เติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับผงยีสต์สกัด ชุด ทดลองที่เติมเมทานอลสารอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับอาหารกุ้ง ชุดทดลองที่เติมเฉพาะ เมทานอล และชุดทดลองที่เติมเฉพาะอาหารกุ้ง .....	68
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนทั้งหมด ไนไตรต์-ไนโตรเจน และไนเตรต-ไนโตรเจน ชุดควบคุมที่เติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับผง ยีสต์สกัด ชุดทดลองที่เติมเมทานอลสารอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับอาหารกุ้ง ชุดทดลอง ที่เติมเฉพาะเมทานอล และชุดทดลองที่เติมเฉพาะอาหารกุ้ง .....	70
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าศักยภาพออกซิเดชัน-รีดักชันในถังปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์ ชุดควบคุมที่เติมเม ทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับผงยีสต์สกัด ชุดทดลองที่เติมเมทานอล สารอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับอาหารกุ้ง ชุดทดลองที่เติมเฉพาะเมทานอล และชุด ทดลองที่เติมเฉพาะอาหารกุ้ง .....	72
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความเข้มข้นของฟอสเฟต การสะสมของฟอสฟอรัสทั้งหมด และปริมาณ ตะกอนทั้งหมด ในถังปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์ขนาด 16 ลิตร.....	74
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนทั้งหมด ไนไตรต์-ไนโตรเจน และไนเตรต-ไนโตรเจน ในถังปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์ขนาด 16 ลิตร.....	76
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าศักยภาพออกซิเดชัน-รีดักชันในถังปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์ ชุดควบคุมที่เดิน ระบบแบบไร้อากาศที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนและธาตุอาหารเสริม และชุด ทดลองที่เดินระบบแบบไร้อากาศใช้เวลา 24 ชม./รอบการบำบัด โดยใช้เมทานอลที่ ความเข้มข้นซีไอดีต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 7:1 เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนระบบ และใช้ผงยีสต์สกัดเป็นธาตุอาหารเสริม.....	77

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนระบบปิด (Close Recirculating Aquaculture Systems) เป็นรูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการบำบัดของเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นและหมุนเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ จึงเป็นระบบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม คือลดการใช้น้ำและลดการทิ้งสารอาหารสู่สิ่งแวดล้อม สารอาหารหลักที่ตกค้างอยู่ในระบบ คือ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เนื่องจากการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนระบบปิดได้รับแสงในปริมาณที่น้อยระบบจึงไม่มีแพลงก์ตอนพืชนำฟอสฟอรัสไปใช้ในการเจริญเติบโตทำให้มีการสะสมฟอสฟอรัสในปริมาณที่สูงจากการศึกษาในห้องทดลองพบว่าตะกอนพื้นก้นบ่อเป็นแหล่งสะสมฟอสฟอรัสที่สำคัญ (Thakur และ Lin, 2003) โดยปริมาณของฟอสฟอรัสที่สะสมจะยิ่งเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปหรือบ่อมีอายุการใช้งานมากขึ้นเมื่อปล่อยน้ำที่ผ่านการเลี้ยงจากระบบออกสู่สิ่งแวดล้อมจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการกำจัดธาตุอาหารโดยเฉพาะฟอสฟอรัสเพื่อป้องกันปัญหาที่เกิดขึ้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในภาวะปัจจุบันที่แหล่งน้ำสะอาดนับวันจะเหลือน้อยลงทุกที

โดยทั่วไปการบำบัดไนโตรเจนจะเกิดขึ้นผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ทำให้แอมโมเนียถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไนไตรต์ และไนไตรต์จะถูกออกซิไดซ์ต่อไปเป็นไนเตรตซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำน้อยกว่า จากนั้นไนเตรตที่สะสมในระบบจะถูกบำบัดด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ภายใต้สภาวะที่ไร้อากาศ ซึ่งเป็นการรีดิวซ์ไนเตรตให้เป็นก๊าซไนโตรเจนออกจากระบบเลี้ยง ส่วนการบำบัดฟอสฟอรัสแบบดั้งเดิมจะอาศัยพื้นฐานทางเคมีที่สัมพันธ์กับปริมาณตะกอนส่วนมากจะใช้เกลือโลหะ (Iron salts) และเกลืออลูมิเนียม (Aluminium salts) แต่วิธีการนี้ไม่เหมาะสมต่อระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ เนื่องจากเกลือโลหะหนักมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต การกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการทางชีวภาพจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม โดยการบำบัดแบบ Enhanced Biological Phosphorus Removal (EBPR) นี้จะอาศัยจุลินทรีย์ที่สามารถจับใช้ฟอสฟอรัสได้เป็นพิเศษที่มีชื่อว่า Polyphosphate Accumulating Organisms หรือ PAOs ซึ่งสะสมฟอสฟอรัสไว้ในเซลล์และทำงานได้ดีในสภาวะไร้อากาศ นอกจากนี้ยังมี PAOs อีกกลุ่มที่สามารถใช้ในเทรตหรือไนไตรต์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนได้ภายใต้สภาวะกึ่งไร้อากาศ (แอน็อกซิก) ทำให้ภายใต้

สภาวะดังกล่าวจะพบการลดลงของไนเตรตและฟอสเฟตควบคู่กัน จึงเรียก PAOs กลุ่มนี้ว่า Denitrifying Polyphosphate Accumulating Organisms หรือ DNPAOs จากกิจกรรมของ DNPAOs ทำให้สามารถบำบัดได้ทั้งไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ทั้งนี้ DNPAOs จะมีกระบวนการเมตาบอลิซึมคล้ายกับ PAOs ต่างกันที่ DNPAOs สามารถใช้ในเทรตหรือไนไตรต์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนภายใต้สภาวะแอน็อกซิกได้ ทำให้การบำบัดฟอสเฟตและไนเตรตหรือไนไตรต์ควบคู่กันโดยไม่ต้องใช้แหล่งคาร์บอนจากภายนอก (Tsunede และ Hirata, 2005)

งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาพัฒนาให้ถึงปฏิกรณ์เอสปีอาร์เพื่อให้สามารถกำจัดไนโตรเจนร่วมกับฟอสฟอรัสจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนระบบปิดได้ โดยทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์กลุ่ม PAOs/DNPAOs ในการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ หากการทดลองนี้เป็นไปตามสมมุติฐานถึงปฏิกรณ์เอสปีอาร์สามารถบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไปพร้อมๆ กันด้วยจุลินทรีย์กลุ่ม PAOs/DNPAOs จะเกิดประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นอย่างมากเพราะมีการกำหนดมาตรฐานการปล่อยน้ำทิ้งที่มีการสะสมฟอสฟอรัสออกสู่สิ่งแวดล้อมตั้งนั้นเมื่อถึงปฏิกรณ์เอสปีอาร์สามารถบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไปพร้อมกันได้ สามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดฟอสฟอรัสเนื่องจากสามารถใช้ถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์เพียงใบเดียวสามารถบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ ลดปริมาณการใช้น้ำ และที่สำคัญหากมีการจำแนกแบคทีเรียกลุ่ม PAOs/DNPAOs นำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้จะเกิดประโยชน์กับสิ่งแวดล้อมอย่างมาก

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1.1 เพื่อศึกษาชนิดและความเข้มข้นสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมในการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์
- 2.1.2 เพื่อประเมิน ในการใช้ถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์บำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนระบบปิดในโรงเรือน

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการ ณ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกำหนดขอบเขตดังนี้

- 2.2.1 การทดลองที่ 1 2 และ 3 ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ ที่ทำจากขวดแก้วทรงกระบอกขนาด 2 ลิตร ส่วนการทดลองช่วงที่ 4 เติลระบบในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ขนาดใหญ่ขึ้น โดยเป็นถังพลาสติกใสทรงกระบอกขนาด 16 ลิตร ภายในติดตั้งไบโอฟัดกวนสาร
- 2.2.2 ตะกอนชีวภาพที่ใช้ในการทดลองเป็นตะกอนอินทรีย์จริงที่เกิดขึ้นเองในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำโดยเป็นอาหารที่เหลือจากการกินและการขับถ่ายของสัตว์น้ำ โดยการกรองเก็บด้วยผ้ากรองที่มีขนาดตา 50 ไมครอน
- 2.2.3 เติลระบบการทดลองแบบแบทช์ เพื่อเปรียบเทียบการใช้เมทานอลและอะซิเตทเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน โดยแปรค่าความเข้มข้นซีไอดีต่อฟอสเฟตของสารอินทรีย์คาร์บอนที่แตกต่างกัน 3 ระดับคือ 7:1, 14:1 และ 25:1 เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์
- 2.2.4 เติลระบบการทดลองแบบแบทช์ เพื่อเปรียบเทียบการใช้ผงยีสต์สกัดและอาหารกุ้งเป็นแหล่งธาตุอาหารเสริมควบคู่กับสารอินทรีย์คาร์บอน เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่เติมอินทรีย์คาร์บอนเพียงอย่างเดียว ทดลองใช้อาหารกุ้งสำเร็จรูป ทดแทนการใช้สารมูลค่า คือสารสกัดจากยีสต์
- 2.2.5 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดขนาดใหญ่ที่ระดับความหนาแน่นสูง ในบ่อผ้าใบขนาด 3,000 ลิตร ในโรงเรือน ให้อาหารสัตว์น้ำทุกวันด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาด ซึ่งมีปริมาณโปรตีนไม่น้อยกว่าร้อยละ 15.5
- 2.2.6 ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำและตะกอนตามวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWA, WPCE, 2005) ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS)



แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (TAN) ไนไตรต์ (Nitrite) ไนเตรต (Nitrate)  
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ฟอสเฟต (Phosphates) และซีโอดี (COD)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถพัฒนาถึงปฏิกรณ์ที่สามารถบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ภายในถังปฏิกรณ์เพียง  
ใบเดียว เพื่อประโยชน์ในการเลี้ยงสัตว์น้ำความหนาแน่นสูงเชิงพาณิชย์ในอนาคต



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียน (Recirculating Aquaculture Systems)

การเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดเป็นรูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการปรับสภาพน้ำที่มีการใช้แล้วในบ่อเลี้ยง ผ่านระบบบำบัดเพื่อลดปริมาณของเสียทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น จากนั้นนำน้ำที่ผ่านระบบการบำบัดแล้วมาหมุนเวียนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ทำให้ลดการเปลี่ยนถ่ายน้ำ และแก้ปัญหาการปล่อยน้ำทิ้งออกจากระบบเลี้ยงซึ่งจะเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้การเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนจะมีของเสียจากเศษอาหารที่เหลือจากการกินของสัตว์น้ำและสิ่งปฏิกูลที่สัตว์น้ำขับถ่ายออกมา ซึ่งมีธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในปริมาณที่สูง ธาตุอาหารเหล่านี้ก่อให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) เมื่อปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารหลักที่สำคัญในการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตจึงทำให้มีการเพิ่มจำนวนของแพลงก์ตอนพืชอย่างรวดเร็ว (Plankton blooms) จนแหล่งน้ำนั้นเข้าสู่สภาวะเสื่อมโทรม สังเกตได้จากสีของน้ำที่เข้มขึ้น โดยอาจเป็นสีเขียว สีน้ำตาล หรือสีแดง ขึ้นอยู่กับชนิดของแพลงก์ตอนพืชต่างๆ นอกจากนี้ยังทำให้ค่าพีเอชในบ่อเลี้ยงเปลี่ยนแปลงอย่างมากในรอบวัน และหากมีการจัดการไม่ดี แพลงก์ตอนพืชเหล่านั้นจะตายอย่างรวดเร็วที่เรียกกันว่า แพลงก์ตอนดรอป (Plankton drop) ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะมีผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและสัตว์น้ำโดยตรง น้ำเสียมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำลดลงอย่างรวดเร็วในขณะที่แอมโมเนียเพิ่มขึ้นจากการเน่าสลายของแพลงก์ตอนที่ตาย ซึ่งแอมโมเนียดังกล่าวมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำมาก (ธงชัย พรธนสวัสดิ์, 2544)

#### 2.2 คุณภาพน้ำสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ

คุณภาพน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการเลี้ยงสัตว์น้ำ เนื่องจากปัญหาคุณภาพน้ำในการเลี้ยงที่ไม่ดีนั้นย่อมส่งผลกระทบต่อสุขภาพสัตว์น้ำและอาจรวมไปถึงทำให้สัตว์น้ำตายได้ แม้ว่าการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนระบบปิดนั้นเกษตรกรจะสามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ ทางสิ่งแวดล้อมได้ แต่อย่างไรก็ตามการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบนี้ก็ยังคงมีความเสี่ยงต่อการติดเชื้อของสัตว์น้ำ โดยสัตว์น้ำอาจตายในระหว่าง

การเลี้ยงเนื่องจากการสะสมของเสียและสิ่งขับถ่ายในบ่อเลี้ยงทั้งนี้ปัจจัยต่างๆ ที่มีความสำคัญกับการเลี้ยงสัตว์น้ำประกอบไปด้วย

### 2.2.1 ความเป็นกรด-ด่างหรือค่าพีเอช (pH)

ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนจะเป็นตัวกำหนดว่าน้ำมีคุณสมบัติเป็นกรดหรือต่างค่าพีเอชที่สูงหรือต่ำเกินไปจะทำให้สัตว์น้ำเกิดการเครียดและมีผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของปลา (มันสิน ตันตุลเวศน์ และ ไพพรรณ พรประภา, 2536) โดยทั่วไปพีเอชที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำควรอยู่ระหว่าง 6-9 โดยพีเอชที่สูงหรือต่ำกว่านี้จะทำให้การเติบโตของสัตว์น้ำช้า (คณิต ไชยาคำ และยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร, 2557) ระดับค่าพีเอชต่างๆ ที่มีผลต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ระดับค่าพีเอชที่มีผลต่อสัตว์น้ำ

ค่าพีเอช	ผลต่อสัตว์น้ำ
น้อยกว่า 5	เป็นอันตรายและอาจทำให้สัตว์น้ำตายได้อย่างรวดเร็ว
ระหว่าง 5-7	การเจริญเติบโตลดลง กินอาหารลดลง ส่งผลต่อสุขภาพ และอาจตายได้หากอยู่สภาพนั้นนานๆ
ระหว่าง 7.5-8.5	<b>เหมาะสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ</b>
ระหว่าง 8.5-10.5	การเจริญเติบโตลดลง กินอาหารลดลง สุขภาพสัตว์น้ำแย่ง และอาจตายได้หากอยู่สภาพนั้นนานๆ
มากกว่า 10.5	เป็นอันตรายและอาจทำให้สัตว์น้ำตายได้อย่างรวดเร็ว

(ที่มา: วิชัย ลากจตุพร และอรทัย เตียววามิชัย, 2535)

### 2.2.2 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S)

เนื่องจากในสภาวะที่ขาดออกซิเจนแบคทีเรียสามารถใช้ซัลเฟอร์ในรูปของซัลเฟตและสารประกอบของซัลเฟอร์ตัวอื่นๆ ที่อยู่ในรูปออกไซด์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงสารประกอบเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของซัลไฟด์ซึ่งก็คือ แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งจะขึ้นกับพีเอชของน้ำ ถ้าน้ำมีพีเอชต่ำอาจทำให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์มากกว่าน้ำที่มีพีเอชสูง สถาบันการเพาะเลี้ยงชายฝั่ง (2536) ได้รายงานว่ไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นแก๊สพิษที่มีผลต่อสัตว์น้ำ โดยจะไปสกัดกั้นการแพร่ของออกซิเจนในเซลล์ ทั้งนี้

ระดับความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทำให้สัตว์น้ำตายจะอยู่ในช่วง 0.01-0.05 พีพีเอ็ม โดยความเป็นพิษจากไฮโดรเจนซัลไฟด์จะรุนแรงกว่าการขาดออกซิเจน (ชโล ลัมสุวรรณ, 2535) ดังนั้นในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจึงไม่ควรมีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์

### 2.2.3 ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity)

สภาพความเป็นด่างของน้ำ คือความสามารถในการรับโปรตอนหรือไฮโดรเจนไอออนของน้ำ เพื่อให้สภาพความเป็นกรดกลายเป็นกลาง ความเป็นด่างของน้ำเกิดจาก 3 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ คาร์บอเนต ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) ไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) และไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) นอกจากนี้ยังรวมถึงซิลิเกต (Silicates) ฟอสเฟต และสารอินทรีย์ต่างๆ เล็กน้อย ปกติค่าความเป็นด่างของน้ำธรรมชาติสามารถพบได้ในช่วงกว้างตั้งแต่ 5 มล.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. จนถึงหลักร้อย โดยสภาพความเป็นด่างสามารถควบคุมไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพีเอชในแหล่งน้ำอย่างรวดเร็วด้วยระบบบัฟเฟอร์ (Buffer system) ทั้งนี้ค่าความเป็นด่างที่เหมาะสมในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีค่าอยู่ในช่วง 20-150 มล.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. (วิรัช จิวแหยม, 2544)

### 2.2.4 ค่าความกระด้าง (Hardness)

ความกระด้างเกิดจากองค์ประกอบหลักของพวกเกลือของแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) และแมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ ) โดยทั่วไปความกระด้างไม่จัดเป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพสัตว์น้ำ แต่เนื่องจากความกระด้างมีความสัมพันธ์กับคุณภาพน้ำ โดยเกี่ยวข้องกับค่าพีเอชและสภาพความเป็นด่าง นอกจากนี้ความกระด้างยังสามารถลดความเป็นพิษของปรอทและตะกั่วได้ในระดับหนึ่ง โดยน้ำที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำต้องมีความกระด้างในระดับปานกลางหรือสูง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 80-200 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. (ภาณุ และคณะ, 2545) การเพิ่มความกระด้างของน้ำที่มีค่าความเป็นด่างต่ำสามารถทำได้โดยการเติมปูนขาว ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ส่วนน้ำที่ความกระด้างสูงสามารถลดความกระด้างได้โดยการเติมแคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) ทั้งนี้สามารถแบ่งประเภทของน้ำตามระดับความกระด้างได้ดังตารางที่ 2.2

## ตารางที่ 2.2 การแบ่งประเภทของน้ำตามระดับความกระด้าง

ประเภท	ค่าความกระด้าง (มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)
น้ำอ่อน (Soft)	0-75
น้ำกระด้างปานกลาง (Moderately)	75-150
น้ำกระด้างค่อนข้างมาก (Hard)	150-300
น้ำกระด้างมาก (Very hard)	>300

(ที่มา: มั่นสิน ตัญจกุลเวศน์ และ ไพโรพรรณ พรประภา, 2538)

## 2.3 สารประกอบไนโตรเจนน้ำ

สารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำมีหลายรูปแบบ แต่ที่พบบ่อยและมีความสำคัญต่อกระบวนการบำบัดน้ำสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำจำแนกออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่

### 2.3.1 สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic-nitrogen compound)

เป็นสารอินทรีย์ที่มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างพืชและสัตว์ สิ่งขับถ่ายจากสัตว์และการย่อยสลายของสิ่งมีชีวิต ได้แก่ โปรตีน คลอโรฟิลล์ กรดอะมิโน กรดยูริก และยูเรีย เป็นต้น

### 2.3.2 สารประกอบแอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia-nitrogen compounds)

สัตว์น้ำทุกชนิดจะขับถ่ายของเสียออกมาในรูปของแอมโมเนีย ซึ่งแอมโมเนียบางส่วนจะระเหยออกสู่ชั้นบรรยากาศได้ แต่อย่างไรก็ตามแอมโมเนียปริมาณเพียงเล็กน้อยอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพสัตว์น้ำได้ โดยแอมโมเนียที่อยู่ในรูปไม่แตกตัว (Un-ionized ammonia ;  $\text{NH}_3$ ) จะเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมากกว่าแอมโมเนียที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียมแตกตัวได้ (Ionized ammonia ;  $\text{NH}_4^+$ ) ส่วนใหญ่ในน้ำที่มีพีเอชประมาณ 7 จะมีปริมาณแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ต่ำกว่าในน้ำที่มีพีเอชประมาณ 9 เนื่องจากแหล่งน้ำเค็มจะมีพีเอชในช่วง 7.8-8.5 ดังนั้นสัตว์น้ำเค็มจึงมีความเสี่ยงต่อการเป็นพิษของแอมโมเนีย โดยสัตว์น้ำจะเริ่มเครียดเมื่อน้ำมีปริมาณแอมโมเนียประมาณ 0.1 มก./ล. ซึ่งเป็นผลเสียต่อกระบวนการทางเคมีในร่างกายของสัตว์น้ำ ทำให้มีความต้องการออกซิเจนสูงขึ้นและทำให้สัตว์น้ำอ่อนแอ ติดโรคง่าย ถึงแม้ว่า  $\text{LC}_{50}$  ของแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) มีความเป็นพิษต่อปลาที่ระดับ 0.5 มก./ล.

แต่ความเข้มข้นของแอมโมเนียเพียง 0.025 มก./ล. ก็สามารถส่งผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตของปลาได้ (มันสิน ตัณฑุลเวศน์ และไพพรรณ พรประภา, 2544) โดยทั่วไประดับแอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ ) ต่ำสุดที่ยอมรับได้คือ 1.0 มก./ล. ในช่วงฟิชและอุณหภูมิต่ำที่ไม่ทำให้ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) มีค่าเกิน 0.02 มล./ก. (Liao และ Mayo, 1972 อ้างโดยศิริวัฒน์ คูเจริญไพบูลย์, 2544)

### 2.3.3 สารประกอบไนไตรต์ (Nitrite-nitrogen compounds)

สารประกอบไนไตรต์ ( $\text{NO}_2^-$ ) เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบไนโตรเจนอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) โดยแบคทีเรียที่อยู่ในน้ำและตะกอน โดยทั่วไปปริมาณไนไตรต์ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำนั้นมักจะมีปริมาณที่ไม่สูงมาก เนื่องจากไนไตรต์นั้นไม่คงตัวมักจะเปลี่ยนรูปไปเป็นไนเตรต อย่างไรก็ตามหากในบ่อเลี้ยงมีปริมาณแอมโมเนียที่สูงมากจะส่งผลให้มีโอกาสที่จะเกิดการสะสมของไนไตรต์ในบ่อมากขึ้น (ธีรพงษ์ จรรย์ญาณ, 2545) ผลของไนไตรต์ที่มีผลต่อปลานั้นเกิดจากการที่เฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ซึ่งอยู่ในโมเลกุลฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) ในเลือดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและเปลี่ยนเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ทำให้ฮีโมโกลบินเปลี่ยนเป็นเมทธิโมโกลบิน (methemoglobin) ซึ่งมีความสามารถในการรับออกซิเจนได้ต่ำกว่าปกติ (Hypoxia) ความเป็นพิษของไนไตรต์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณออกซิเจนต่ำและมีอุณหภูมิสูง ปริมาณไนไตรต์ที่สูงเกินกว่า 1 มก./ล. จะเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำได้ (มันสิน ตัณฑุลเวศน์ และไพพรรณ พรประภา, 2539)

### 2.3.4 สารประกอบไนเตรต (Nitrate-nitrogen compounds)

สารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สมบูรณ์ของสารประกอบไนโตรเจนอื่น และหากมีออกซิเจนในปริมาณมากพอแล้วสารประกอบไนเตรตจะเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่มีความเสถียรที่สุด เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายของวงจรไนโตรเจน ไนเตรตจึงเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่มีความเป็นพิษน้อยกว่าแอมโมเนียและไนไตรต์ แต่หากมีการสะสมไนเตรตในปริมาณที่มากขึ้นพบว่าจะมีผลกระทบต่อสัตว์น้ำได้เช่นกัน โดย Epifano และ Srna (1975) พบว่าไนเตรตมีความเป็นพิษต่อหอยสองฝาที่ความเค็ม 27 พีพีที โดยค่า  $\text{LC}_{50}$  ของหอย *Crassostrea virginica* ที่ 96 ชั่วโมงเป็น 2,604 มก.ไนเตรตไนโตรเจน/ล. ในตัวเต็มวัย นอกจากนี้ Zweig และคณะ (1999) รายงานว่าเมื่อไนเตรตเกิดการสะสมถึงระดับหนึ่งจะมีผลต่อ

กระบวนการ Osmoregulation หรือการขนส่งออกซิเจนและมีความเป็นพิษต่อดับปลา โดยระดับไนเตรตที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำจะต้องมีค่าต่ำกว่า 23 มก./ล. แต่ความเข้มข้นของไนเตรตที่สามารถปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ต้องมีไนเตรตต่ำกว่า 11 มก./ล.

## 2.4 การบำบัดไนโตรเจนทางชีวภาพ

เป็นการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำโดยอาศัยปฏิกิริยา 3 ส่วน ได้แก่ แอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) ไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) มีรายละเอียดดังนี้ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

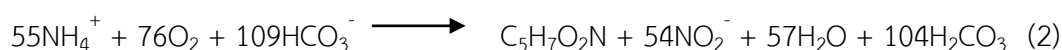
### 2.4.1 กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification)

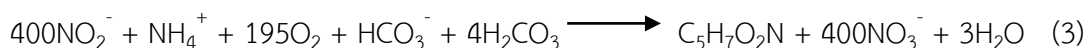
เป็นการเปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน พวกเศษอาหารที่เหลือ เซลล์สัตว์ที่ตายแล้ว ซึ่งอยู่ในรูปของโปรตีนและกรดนิวคลีอิกไปอยู่ในรูปแอมโมเนีย ดังแสดงในสมการ (1) และหากค่าพีเอชในน้ำเพิ่มขึ้นแอมโมเนีย ( $\text{NH}_4^+$ ) จะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ซึ่งจะมีบางส่วนที่จะถูกปลดปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)



### 2.4.2 กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

เป็นการเปลี่ยนแอมโมเนียที่เกิดจากกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันและจากการขับถ่ายของเสียออกจากร่างกายสัตว์น้ำไปเป็นไนไตรต์ซึ่งแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนย่อยคือไนไตรเทชัน (Nitritation) หรือเรียกอีกอย่างว่า ไนไตรทิฟิเคชัน (Nitritification) โดยแบคทีเรียกลุ่ม Ammonia Oxidizing bacteria หรือ AOB เช่น *Nitrosomonas* spp. (Dytczak และคณะ, 2008) ดังแสดงในสมการ (2) จากนั้นแบคทีเรียกลุ่ม Nitrite Oxidizing bacteria หรือ NOB เช่น *Nitrobacter* spp. (Dytczak และคณะ, 2008) จะเปลี่ยนไนไตรต์ต่อจนไปอยู่ในรูปของไนเตรตซึ่งเรียกว่า ไนเตรเทชัน (Nitratation) ซึ่งเรียกอีกอย่างว่าไนเตรฟิเคชัน (Nitrification) สมการ (3)





#### 2.4.3 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)

เป็นการเปลี่ยนไนเตรตไปเป็นไนไตรต์และแก๊สไนโตรเจนตามลำดับ โดยอาศัยแบคทีเรียไนตริไฟเออร์ (Denitrifying bacteria) เช่น Chemo-autotrophic bacteria (Menasveta และคณะ, 2001) กระบวนการนี้เกิดขึ้นในสภาวะแอน็อกซิก (Anoxic) ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนอิสระแต่มีไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนอิสระในกระบวนการหายใจของแบคทีเรีย ซึ่งไนเตรตจะสามารถถูกลดรูปหรือกำจัดออกได้ 2 วิธีดังนี้

##### 2.4.3.1 วิธีแอสสิมิเลชัน (Assimilatory denitrification)

แบคทีเรียต้องการไนโตรเจนสำหรับการสังเคราะห์โปรตีน ไนโตรเจนที่ดีที่สุดสำหรับการสังเคราะห์โปรตีนคือไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย แต่ถ้ามีแอมโมเนียไม่เพียงพอแบคทีเรียบางชนิดสามารถลดรูปไนเตรตไปเป็นแอมโมเนียและนำไปใช้ได้ ซึ่งมีสัดส่วนน้อยเมื่อเทียบกับวิธีที่สองคือวิธีดีไนตริฟิเคชันแบบดิสสิมิเลชัน

##### 2.4.3.2 วิธีดิสสิมิเลชัน (Dissimilatory denitrification)

แบคทีเรียดีไนตริฟายอิงในกระบวนการดิสสิมิเลชันเป็นได้ทั้งแบบเฮเทอโรโทรฟ (Heterotroph) และออโตโทรฟ (Autotroph) แต่แบคทีเรียแบบเฮเทอโรโทรฟจะมีบทบาทมากกว่า ซึ่งต้องการสารอินทรีย์คาร์บอนและใช้ในเทรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน เป็นกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic respiration) คือมีไนเตรตแต่ไม่มีออกซิเจนอิสระ โดยไนเตรตจะถูกรีดิวซ์ไปเป็นไนไตรต์ ( $\text{NO}_2^-$ ) แก๊สไนตริกออกไซด์ ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ไนตรัสออกไซด์ ( $\text{N}_2\text{O}$ ) และแก๊สไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) ดังแสดงในสมการ (4) ซึ่งแก๊สไนโตรเจนละลายน้ำได้น้อยมาก จึงถูกกำจัดออกจากมวลของน้ำได้ง่าย

##### - *Autotrophic Denitrifying Bacteria*

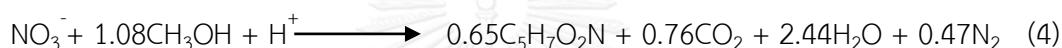
เป็นแบคทีเรียที่สามารถสร้างอาหารเองได้โดยใช้สารอนินทรีย์เป็นวัตถุดิบซึ่งถือว่าเป็นการสร้างอาหารเองได้โดยไม่ต้องอาศัยสิ่งมีชีวิตอื่น โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เป็นแหล่งคาร์บอน จัดว่าเป็นแบคทีเรียที่มีความสามารถสูงในการสังเคราะห์



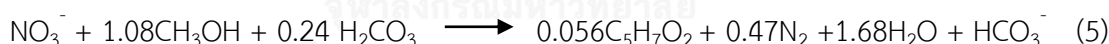
อาหารต้องพลังงานแสงอาทิตย์ หรือจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์และคาร์บอนไดออกไซด์ ก็สามารถดำรงชีพและสร้างส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์ได้

- *Heterotrophic Denitrifying Bacteria*

เป็นแบคทีเรียที่ไม่สามารถสร้างอาหารเองได้ ต้องใช้สารอินทรีย์หรือซากของสิ่งมีชีวิตที่มีชีวิตอื่นเป็นวัตถุดิบ ดังนั้นในการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันของแบคทีเรียประเภทนี้จึงจำเป็นต้องเติมสารอินทรีย์คาร์บอนให้แก่ระบบ ซึ่งอินทรีย์คาร์บอนมีหลายชนิด ได้แก่ น้ำตาล เมทานอล เอทานอล เป็นต้น แบคทีเรียประเภทนี้ ได้แก่ *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Achromobacter* และ *Bacillus*



ในทางทฤษฎีแล้ว 1 มก.ไนเตรตไนโตรเจน/ล. ที่ถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สไนโตรเจนจะให้ค่าสภาพต่างเท่ากับ 3.57 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ซึ่งจะตรงข้ามกับการเกิดไนตริฟิเคชันที่จะลดสภาพต่าง แต่การเกิดดีไนตริฟิเคชันจะไปทำการเพิ่มสภาพต่าง กลไกทางชีวภาพของปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน โดยใช้เมทานอลเป็นแหล่งคาร์บอน แสดงดังสมการต่อไปนี้

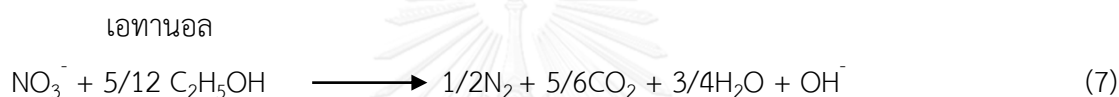
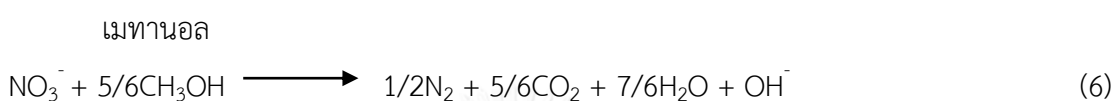


สมการข้างต้นจะเป็นการยืนยันว่า การเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน โดยมีแหล่งคาร์บอน เช่น เมทานอล จะช่วยเพิ่มค่าสภาพต่างได้ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543)

## 2.5 สารประกอบอินทรีย์คาร์บอนสำหรับกระบวนการบำบัดไนโตรเจน

กระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่เกิดจากแบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟนั้นจำเป็นต้องมีแหล่งอินทรีย์คาร์บอนเพื่อใช้ในการสร้างส่วนประกอบของเซลล์และเป็นแหล่งพลังงานให้กับดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย โดยทั่วไปสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนในการหายใจของแบคทีเรียจะมาจาก 3 แหล่ง คือ สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียนั้นๆ การให้ตะกอนจุลินทรีย์จากภายนอก และการเติมสารอินทรีย์จากแหล่งภายนอก เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดซิตริก (Citric acid)

เมทานอล (Methanol) เอทานอล (Ethanol) และน้ำตาล (Glucose) เป็นต้น โดยเฉพาะเมทานอล เอทานอล และน้ำเสียจากกระบวนการหมักแอลกอฮอล์ (Alcoholic wastewater) พบว่าถ้ามี ปริมาณที่เหมาะสมแล้วจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเพิ่มขึ้นเป็น 5-10 เท่าได้โดยไม่มี ผลกระทบกับสารอื่น จึงทำให้การเติมเมทานอลและเอทานอลเป็นแหล่งคาร์บอนจากภายนอกนิยมใช้ กันอย่างแพร่หลาย (Lewandowski, 1985) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการใช้เมทานอลและเอทานอล เป็นตัวให้อิเล็กตรอนแสดงดังสมการที่ (6) และ (7)



## 2.6 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันกับปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน

ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation Reduction Potential; ORP) เป็นปริมาณความ ต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่เกิดจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนในน้ำ โดยจะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันซึ่งเกิดขึ้นในน้ำ (มันสิน ตันกุลเวศน์, 2542) โดยออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาที่โมเลกุลหรือ ไอออนสูญเสียอิเล็กตรอน ส่วนรีดักชันเป็นปฏิกิริยาที่โมเลกุลหรือไอออนได้รับอิเล็กตรอน ทั้งนี้ค่า ศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันที่วัดได้อาจเป็นบวกหรือลบ โดยทั่วไปจะวัดค่านี้ได้เป็นบวก ในน้ำที่มี ออกซิเจนหรือมีไนเตรต และวัดค่าได้เป็น ลบในน้ำเสียที่ปราศจากออกซิเจน เช่น ถ้าวัดค่า ORP เป็น บวกมากๆ เช่น +300 mV แสดงว่าสารละลายนี้มีสารให้อิเล็กตรอนได้เป็นอย่างดีหรือมีออกซิเจน ละลายน้ำ เป็นต้น แต่ถ้าวัด ORP ได้ค่าติดลบ เช่น -300 mV แสดงว่าสารละลายมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ โดยหน่วยของค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน คือ โวลต์ (V) หรือ มิลลิโวลต์ (mV) (มันสิน ตันกุลเวศน์, 2538)

เนื่องจากปฏิกิริยาในสารเคมีเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ปฏิกิริยาแต่ละประเภทจึง แสดงค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันออกมาต่างๆ กัน เช่น ไนตริฟิเคชันมีค่า ORP เป็น +100 mV ดีไนตริฟิเคชันมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนการย่อยสลายออกซิเจนจะมีค่าอยู่ในช่วง -300 ถึง -500 mV (ธงชัย

พรรณสวัสดิ์, 2544) จากข้อมูลของ Sillen (1965) รายงานว่าค่า ORP ที่ -200 mV นั้นสามารถทำให้ไนเตรดเปลี่ยนรูปเป็นไนไตรต์ และหากค่าดังกล่าวลดลงเป็น -235 mV ไนไตรต์จะเปลี่ยนเป็นไนเตรด โดยค่า ORP ในช่วง -375 ถึง -400 mV ระบบสามารถบำบัดไนเตรดได้ถึง 50% ดังนั้นค่า ORP ที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนเตรดจึงอยู่ในช่วง -325 ถึง -400 mV นอกจากนี้ในการศึกษาของ Lee และคณะ, (2000) ได้รายงานในช่วง ORP ที่มากกว่า -200 mV จะพบปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันแบบไม่สมบูรณ์

## 2.7 สารประกอบฟอสฟอรัสในน้ำ

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารหลักเพื่อใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึมและสร้างส่วนประกอบของเซลล์ มีผลทำให้แพลงก์ตอนพืชสามารถแบ่งเซลล์และเติบโตได้อย่างรวดเร็ว (Plankton blooms) (Vanderploeg และคณะ, 2001) ซึ่งสังเกตได้จากน้ำในบ่อมีสีเขียวเข้มขึ้น โดยอาจเป็นสีเขียว สีนํ้าตาล หรือสีแดง ขึ้นอยู่กับชนิดของแพลงก์ตอนพืชชนิดนั้นๆ ทำให้ค่าพีเอชในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถเปลี่ยนแปลงหรือแปรปรวนได้ในรอบวัน และหากระบบจัดการของการเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ดีหรือไม่สามารถควบคุมคุณภาพน้ำทางด้านเคมีและชีวภาพได้ หรือเกิดสภาวะสารอาหารเกิน (Eutrophication) ก็จะส่งผลให้การเติบโตของแพลงก์ตอนพืชเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเข้าสู่ระยะ Death phase อย่างรวดเร็วเช่นกัน จนทำให้ควบคุมปัจจัยทางคุณภาพน้ำต่างๆ ไม่ได้ส่งผลให้แพลงก์ตอนพืชตายอย่างรวดเร็ว จึงเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า แพลงก์ตอนดรอป (Plankton drop) ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะมีผลกระทบต่อคุณภาพน้ำโดยตรงรวมถึงตัวสัตว์น้ำด้วย เช่น การขาดออกซิเจนกะทันหัน แอมโมเนียเพิ่มขึ้นจากการเน่าสลายของแพลงก์ตอนที่ตาย สัตว์น้ำอ่อนแอไม่กินอาหารและตายในที่สุด ดังนั้นระบบเลี้ยงสัตว์น้ำควรควบคุมปริมาณออร์โธฟอสเฟตในบ่อให้มีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.5 มก.ฟอสฟอรัส/ล. (มันสิน ตุนกุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา, 2538) ทั้งนี้ฟอสฟอรัสเกือบทั้งหมดที่พบในน้ำจะอยู่ในรูปของสารประกอบฟอสเฟต (Phosphates) ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มคือ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

### 2.7.1 ออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphates)

หรืออาจเรียกอีกอย่างว่าฟอสฟอรัสละลายน้ำ (Soluble Relative Phosphorus) สารประกอบนี้สามารถละลายน้ำได้ดีและแพลงก์ตอนพืชสามารถนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต ได้แก่

ไตรโซเดียมฟอสเฟต ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ) โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ) ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ) ฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) ไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) และไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ ) เป็นต้น

### 2.7.2 โพลีฟอสเฟต (Polyphosphates)

เป็นสารประกอบที่พบได้มากในน้ำทิ้งที่มาจากบ้านเรือนหรือโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นส่วนผสมของน้ำยาทำความสะอาด มีคุณสมบัติเป็น Dehydrated phosphate กล่าวคือสามารถแตกตัวกลับไปเป็นออร์โธฟอสเฟตได้ตามเดิม อัตราการแตกตัวนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น พีเอช อุณหภูมิ และองค์ประกอบที่มีอยู่ในน้ำ โดยการย่อยสลายจะเกิดขึ้นได้ช้าในน้ำสะอาด 4-50 วัน แต่จะเกิดขึ้นเร็วในน้ำสกปรกประมาณ 20 ชม. เช่น โซเดียมเมตาฟอสเฟต ( $\text{Na}_3(\text{PO}_3)_6$ ) โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต ( $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ ) โซเดียมไพโรฟอสเฟต ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ) เป็นต้น

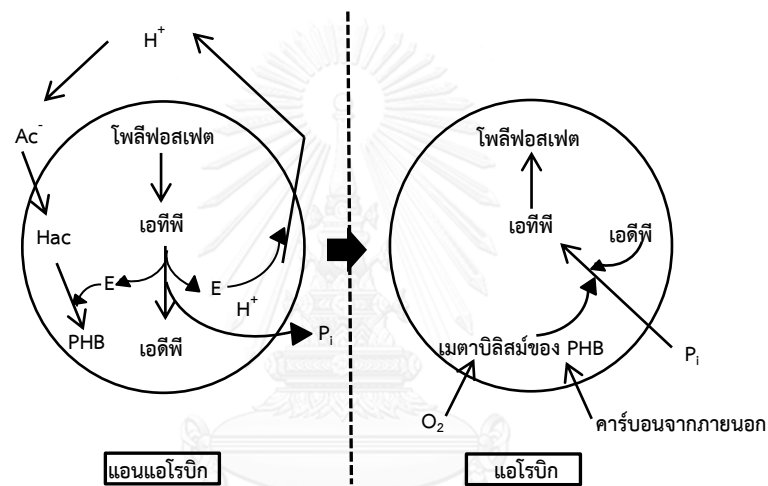
### 2.7.3 สารอินทรีย์ฟอสเฟต (Organic Phosphates)

เป็นฟอสฟอรัสที่ได้จากกระบวนการทางชีวภาพ สารฟอสฟอรัสเหล่านี้พบได้ในสารละลาย สารแขวนลอย หรืออินทรีย์วัตถุที่กำลังเน่าสลายหรือเป็นองค์ประกอบในร่างกายสิ่งมีชีวิต เช่น โปรตีน กรดนิวคลีอิก ฟอสโฟไลพิด เป็นต้น

## 2.8 การกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

การกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียสามารถทำได้ 2 วิธีการใหญ่ๆ คือ วิธีทางเคมีและทางชีวภาพ วิธีทางเคมีนั้นจะอาศัยพื้นฐานทางเคมีที่สัมพันธ์กับปริมาณตะกอน ส่วนมากจะใช้เกลือโลหะ (Iron salts) และ เกลืออะลูมิเนียม (Aluminium salts) แต่การกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการทางชีวภาพเป็นอีกหนึ่งทางเลือกแก่เกษตรกร เพราะใช้สิ่งที่มีอยู่แล้วในระบบ ซึ่งจะเป็นการลดการใช้เทคโนโลยีและกระบวนการทางเคมี ซึ่งวิธีบำบัดที่เป็นที่รู้จักมากที่สุดคือ Enhanced Biological Phosphorus Removal (EBPR) ที่อาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการจับใช้ฟอสฟอรัสได้เป็นพิเศษ ที่มีชื่อว่า Polyphosphate Accumulating Organisms หรือ PAOs เช่น *Paracoccus denitrificans* (Barak และ van Rijn, 2000) PAOs เป็นแบคทีเรียที่สามารถทำงานได้ดีในสภาวะที่เป็นแอนแอโรบิกสลับกับแอโรบิกหรือแอน็อกซิก แสดงดังรูปที่ 2.1 ในสภาวะที่เป็นแอน

แอโรบิกนั้น PAOs จะดูดซึมเอาสารประกอบอินทรีย์โมเลกุลต่ำ เช่น อะซิเตท เปลี่ยนไปเป็น Polyhydroxyalkanoate (PHA) โดยการลดโพลีฟอสเฟต (Polyphosphate) กับไกลโคเจน (Glycogen) และการปล่อยฟอสเฟตควบคู่กันไป ส่วนในสภาวะที่เป็นแอโรบิกหรือแอน็อกซิก PAOs จะสลายอินทรีย์คาร์บอนเมื่อมีออกซิเจนเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในการสร้างเซลล์ใหม่ PHA จะเปลี่ยนไปเป็นไกลโคเจน ในขณะที่ฟอสเฟตจะถูกดูดซึมมาเก็บไว้ภายในเซลล์ในรูปของโพลีฟอสเฟต จากนั้นแบคทีเรียจะเจริญเติบโตและใช้ฟอสเฟตเป็นพลังงานจากการสลายตัวของ PHA ทำให้ฟอสฟอรัสในน้ำมีปริมาณลดลง (van Rijn และ Barak, 2001)



รูปที่ 2. 1 การทำงานของ Polyphosphate Accumulating Organisms (PAOs)  
(ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

ในสภาวะที่มีฟอสฟอรัสและไนโตรเจนควบคู่กันในระบบจะมี PAOs ที่มีชื่อว่า Denitrifying Polyphosphate Accumulating Organisms หรือ DNPAOs ซึ่งมีเมตาบอลิซึม (Metabolism) คล้ายกับ PAOs แต่การจับใช้ฟอสฟอรัสของ DNPAOs จะใช้ในเทรตหรือไนโทรต์เป็นตัวรับอิเล็กตรอน สามารถใช้คาร์บอนเดียวกันสำหรับดึงฟอสฟอรัสเข้าเซลล์และกำจัดไนเตรตไปพร้อมกัน ภายใต้สภาวะแอน็อกซิก หรือสะสมฟอสเฟตเข้าสู่เซลล์โดยไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งคาร์บอนจากภายนอก (Tsunede และ Hirata, 2005) ตัวอย่างของแบคทีเรีย DNPAOs ได้แก่ *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas denitrificans* และ *Pseudomonas sp.* เป็นต้น (van Rijn และ Barak, 2000)

## 2.9 สภาวะแอโรบิก แอน็อกซิกและแอนแอโรบิก

### - สภาวะแอโรบิก (Aerobic condition)

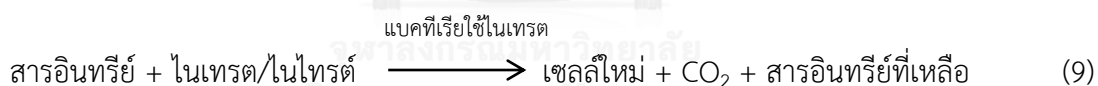
เป็นกระบวนการใช้อากาศจะมีแบคทีเรียใช้ออกซิเจนในการหายใจ โดยทั่วไปปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำเสียนั้น จะมีปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิเดชัน-รีดักชันเกิดขึ้นซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดขึ้นระหว่างสารให้และรับอิเล็กตรอน โดยมีสารอินทรีย์เป็นตัวให้อิเล็กตรอน และมีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน กระบวนการนี้สามารถเขียนได้เป็นสมการดังต่อไปนี้



โดยเซลล์ใหม่ที่เกิดขึ้นของแบคทีเรียจะมีเกิดขึ้นมากเมื่อเทียบกับกระบวนการที่ไม่ใช้อากาศ

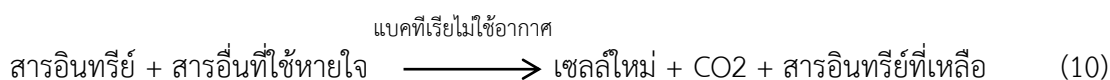
### - สภาวะแอน็อกซิก (Anoxic condition)

เป็นกระบวนการที่ไม่ใช้อากาศจะมีแบคทีเรียใช้ในเทรตในการหายใจซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้จะเป็นแบคทีเรียกลุ่มดีไนทริไฟเออร์ หรือ สามารถเรียกกระบวนการนี้ว่าเป็นกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน โดยมีสารอินทรีย์เป็นตัวให้อิเล็กตรอน และมีไนเทรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน



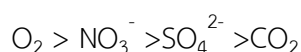
### - สภาวะแอนแอโรบิก (Anaerobic condition)

เป็นกระบวนการที่ไม่ใช้อากาศจะมีแบคทีเรียใช้สารอื่นในการหายใจ กระบวนการนี้สามารถเขียนได้เป็นสมการดังต่อไปนี้



โดยเซลล์ใหม่ที่เกิดขึ้นของแบคทีเรียที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นน้อยเมื่อเทียบกับกระบวนการใช้อากาศ นอกจากนี้สารอื่นที่ใช้หายใจ เช่น  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_2$  เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน

และมีสารอินทรีย์เป็นตัวให้อิเล็กตรอน โดยทั่วไป ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดว่าสารใดเป็นตัวรับอิเล็กตรอนนั้นจะขึ้นกับการมีอากาศ การไม่มีอากาศ และอีกส่วนหนึ่งจะขึ้นพลังงานที่แบคทีเรียจะได้รับจากการใช้สารรับอิเล็กตรอนตัวนั้น ซึ่งสามารถเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้



ซึ่งสามารถสรุปสารให้อิเล็กตรอน สารรับอิเล็กตรอน ผลของปฏิกิริยาและชื่อปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.3 สารให้อิเล็กตรอน สารรับอิเล็กตรอน ผลของปฏิกิริยา และชื่อปฏิกิริยารีดอกซ์

สารให้อิเล็กตรอน	สารรับอิเล็กตรอน	ผลของปฏิกิริยา	ชื่อปฏิกิริยารีดอกซ์
Organic Matter	$\text{O}_2$	$\text{CO}_2$	Aerobic Oxidation
Organic Matter	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_2$	Denitrification
Organic Matter	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{S}^{2-}$	Sulfate Reduction
Organic Matter	$\text{CO}_2$	$\text{CH}_4$	Methanogenesis

(ดัดแปลงมาจาก มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

## 2.10 สารประกอบอินทรีย์คาร์บอนสำหรับกระบวนการบำบัดฟอสฟอรัส

การบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ Enhanced Biological Phosphorus Removal (EBPR) อาศัยจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการจับใช้ฟอสฟอรัสได้เป็นพิเศษที่มีชื่อว่า Polyphosphate Accumulating Organisms หรือ PAOs ซึ่งแหล่งอินทรีย์คาร์บอนจะมีบทบาทสำคัญมากในการแข่งขันของ PAOs และ Glycogen Accumulating Organisms (GAO) เนื่องจาก GAO สามารถใช้อินทรีย์คาร์บอนภายใต้สภาวะเดียวกันแต่ไม่มีส่วนช่วยในการบำบัดฟอสฟอรัส ดังนั้นการเลือกใช้อินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญมากในการเดินระบบ ชนิดอินทรีย์คาร์บอนที่ใช้ในการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพได้แก่ อะซิเตท โพรไพโอเนท กลูโคส แอลกอฮอล์ กลีซอรอล กรดอะมิโน ผงยีสต์สกัด และเพปโตน โดยแหล่งอินทรีย์คาร์บอนที่นิยมใช้มากที่สุดจะเป็นอะซิเตท และโพรไพโอเนท Gonzalez และ Holliger (2011) ; He และคณะ, (2010); Lv และคณะ, (2014); Tu และ Schuler, (2013) เนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่ม PAOs สามารถใช้อะซิเตทในการเผาผลาญฟอสเฟตได้ดีว่าการเผาผลาญไกลโคเจน PAOs สามารถใช้อะซิเตทเป็นแหล่งพลังงานได้ดีกว่าจุลินทรีย์กลุ่ม GAO

นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้อะซิเตทเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอนในปริมาณที่ไม่มากจนเกินไปในกระบวนการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดนั้นคงที่ Burow และคณะ 2008 รายงานว่าความเข้มข้นอะซิเตทต่ำสามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้ดีกว่าความเข้มข้นสูง โดยการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพยังต้องคำนึงถึง พีเอช และอุณหภูมิด้วย มีรายงานว่าพีเอชที่เหมาะสมต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 7.5 ส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมต้องอยู่ระหว่าง 25-30°C เนื่องจากพีเอชที่ต่ำกว่า 7.25 และอุณหภูมิที่สูงกว่าที่กล่าวมาจะทำให้จุลินทรีย์กลุ่ม GAO เจริญได้ดีมีผลทำให้ระบบบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพล้มได้ (Nan และ Yan, 2016.)

## 2.11 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ (Sequencing batch reactor ;SBR) (สันตติ สิริอนันต์ ไพบูลย์, 2552)

เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งชนิดหนึ่งที่มีการพัฒนาขึ้นเพื่อความเหมาะสมและแก้ปัญหาหลากหลายที่เกิดขึ้นในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งทั่วไป เช่น ปัญหาโรงงานมีการปล่อยน้ำเสียออกจากกระบวนการผลิตเป็นช่วงๆ ปัญหาคุณภาพของตะกอนในถังเดิมอากาศหรือถังปฏิกรณ์ของระบบบำบัดแบบตะกอนเร่งทั่วไป เช่น การจับตัวของตะกอน หรือปัญหาการเกิดกระบวนการ ไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันในระบบบำบัดน้ำเสีย การเกิดตะกอนลอยในถังตกตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งทั่วไปจากสาเหตุของกระบวนการดีไนทริฟิเคชันรวมทั้งความต้องการที่จะลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างถังตกตะกอนลง โดยระบบเอสบีอาร์ดังกล่าวถูกออกแบบให้มีหลักการที่แตกต่างไปจากระบบบำบัดแบบเลี้ยงตะกอนเร่งทั่วไป คือใช้ถังเดิมอากาศและถังตกตะกอนเป็นถังเดียวกัน กล่าวคือระบบเลี้ยงตะกอนเร่งทั่วไปนั้นจะมีการเติมอากาศให้จุลินทรีย์บำบัดสารอินทรีย์และมีการตกตะกอนแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำเสียในถังปฏิกรณ์คนละถัง ส่วนระบบเอสบีอาร์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ทั้งสองกระบวนการในถังปฏิกรณ์ใบเดียวกัน

ขั้นตอนการเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอสบีอาร์ แบ่งลำดับการทำงานออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

### - ช่วงเติมน้ำเสีย (Fill)

เป็นการเติมน้ำเสียเข้าถังปฏิกรณ์ที่มีตะกอนจุลินทรีย์บรรจุอยู่ ปริมาตรของน้ำเสียเริ่มต้นในถังปฏิกรณ์จะอยู่ในปริมาณที่ต่ำ คือประมาณร้อยละ 25 ของปริมาตรถัง และมีการเติมน้ำเสียจนถึงระดับสูงสุดที่กำหนดไว้ เวลาที่ใช้ในการเติมน้ำเสียนี้ขึ้นอยู่กับปริมาตรของถังปฏิกรณ์และอัตราไหล



ของน้ำเสีย โดยทั่วไปแล้วเวลาที่มีการเติมน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์จะมีการเติมอากาศไปด้วยหรืออาจจะเป็นไปตามการออกแบบระบบ

- *ช่วงเกิดปฏิกิริยา (Reaction)*

เป็นช่วงเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ ในช่วงนี้มีการเติมอากาศให้แก่ระบบเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนหรือสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ระยะเวลาในช่วงนี้ประมาณร้อยละ 35 ของ 1 วัฏจักร

- *ช่วงตกตะกอน (Settle)*

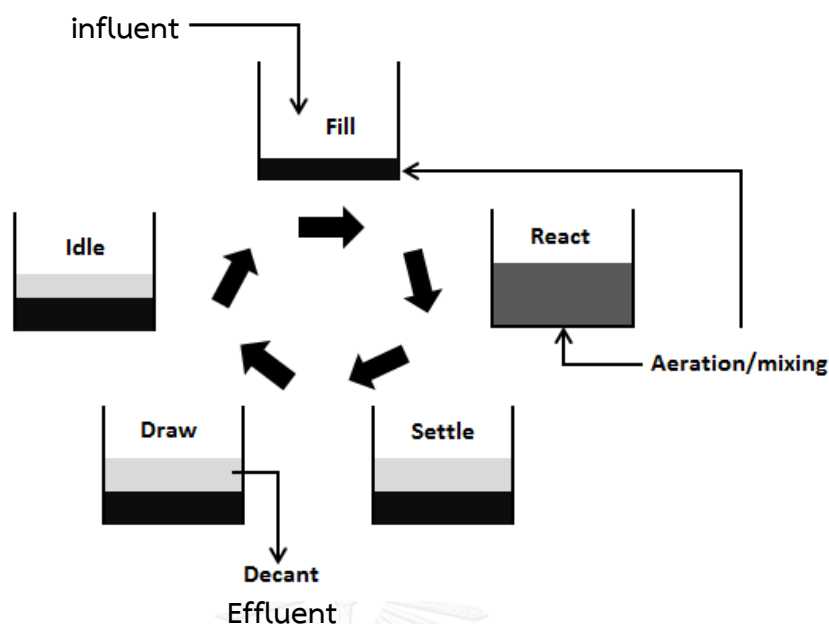
เป็นช่วงเวลาที่ใช้แยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว การตกตะกอนในระบบเอสปีอาร์จะมีประสิทธิภาพมากกว่าในระบบตะกอนเร่งแบบต่อเนื่อง เพราะของเหลวอยู่ในสภาพน้ำนิ่ง ระยะเวลาของการตกตะกอนไม่ควรยาวนานเกินไปเพราะอาจจะทำให้ตะกอนลอยตัว ระยะเวลาที่ใช้ควรจะนานประมาณ 1 ชั่วโมง

- *ช่วงระบายน้ำทิ้ง (Draw)*

ช่วงเวลาที่มีการระบายน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วออกจากถังปฏิกรณ์ประมาณร้อยละ 5-30 ของเวลา 1 วัฏจักร แต่ไม่ควรปล่อยให้ระยะเวลาการปล่อยน้ำทิ้งนานเกินไปเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการหลุดทิ้งของตะกอนออกจากระบบ

- *ช่วงพัก (Idle)*

ช่วงหลังจากระบายน้ำที่ผ่านการบำบัดออกจากถังปฏิกรณ์และก่อนที่จะเติมน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ใหม่อีกครั้ง ช่วงนี้จะมีการเติมอากาศหรือไม่ก็ได้ ช่วงพักไม่ค่อยมีความสำคัญมากนัก จะมีหรือไม่ก็ได้ขึ้นอยู่กับความต้องการของระบบ ส่วนมากแล้วช่วงนี้มักมีไว้สำหรับกรณีที่ระบบมีปัญหาต้องการแก้ไขข้อบกพร่อง ส่วนในช่วงพักของระบบเอสปีอาร์แบบหลายถังมีไว้เพื่อเตรียมเวลาสำหรับถังปฏิกรณ์ถังแรกให้มีช่วงเวลาริเติมน้ำเสียที่สมบูรณ์ก่อนที่จะนำน้ำเสียเข้าสู่ถังใหม่ ลำดับขั้นตอนของการทำงานและระยะเวลาที่เหมาะสมของระบบเอสปีอาร์ ดังแสดงในรูป 2.2



รูปที่ 2. 2 ลำดับขั้นตอนและการทำงานในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์

## 2.12 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### - การบำบัดไนโตรเจน

Lee และคณะ, (2000) ได้พัฒนาระบบกำจัดไนโตรเจนเพื่อใช้ในการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนเชิงพาณิชย์ให้ประสบความสำเร็จ ทำการออกแบบโดยรวมกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันเข้าด้วยกันเพื่อลดค่าใช้จ่ายและลดพื้นที่ที่จำเป็น ใช้เมทานอลเป็นแหล่งคาร์บอน ใช้ระบบคอมพิวเตอร์ในการควบคุมอัตราการเติมเมทานอล อัตราการไหลเวียนน้ำ และเวลาที่น้ำอยู่ในบริเวณต่างๆ ด้วยโปรแกรม (FIX DMACS™) ผลการทดลองพบว่าการใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมระบบนั้นเป็นวิธีที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อน แต่ทั้งนี้ก็จำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์และความเชี่ยวชาญจากผู้เชี่ยวชาญในการป้อนข้อมูลเข้าระบบคอมพิวเตอร์ด้วย

Shnel และคณะ, (2002) ทำการออกแบบและเดินระบบเพื่อกำจัดของเสียในระบบการเลี้ยงปลาในระบบปิด ทำการเลี้ยงปลานิลขนาดตลาดเพื่อใช้ในการทดลองเป็นเวลา 331 วัน ใช้ตะกอนภายใต้สภาวะแอน็อกซิกในการบำบัดซึ่งจะทำหน้าที่ในการย่อยตะกอนและลดรูปไนเตรตเพื่อเปลี่ยนเป็นแก๊สไนโตรเจนออกจากระบบ ผลการศึกษาพบว่าแอมโมเนียถูกกำจัดออกด้วยแบคทีเรีย

กลุ่มไนตริไฟอิงในถังกรอง ไนเตรตและฟอสฟอรัสถูกกำจัดออกภายใต้สภาวะแอน็อกซิกในถังตกตะกอนและถังย่อยตะกอน

Pungrasmi และคณะ, (2015) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดด้วยคอลัมน์ร่วมย่อยตะกอน-ดีไนตริฟิเคชันเพื่อหมุนเวียนน้ำน้ำกลับไปใช้ในการเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยใช้ถังปฏิกรณ์ทรงกระบอกสูงรูปแบบไหลขึ้น (Up flow) ปริมาตรรวม 20 ลิตร สร้างจากอะคริลิกใส 2 ท่อวางซ้อนกัน ทำการศึกษาอัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมที่มีผลต่อการแยกตะกอน การบำบัดไนเตรตออกจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเมื่อใช้เมทานอลเป็นอินทรีย์คาร์บอน และสุดท้ายเป็นการประยุกต์ใช้คอลัมน์ร่วมย่อยตะกอน-ดีไนตริฟิเคชันเพื่อบำบัดน้ำเสียจริงจากระบบเลี้ยงปลานิลแบบปิดความหนาแน่นสูง จากการศึกษาพบว่าอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 360 ล./ชม. ประสิทธิภาพการแยกตะกอนออกจากน้ำได้มากที่สุด และการเติมเมทานอลเพื่อเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนที่อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนเท่ากับ 3:1 มีประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรตสูงสุดถึงร้อยละ 82

#### - การบำบัดฟอสฟอรัส

Gunther และคณะ, (2009) ศึกษาจุลินทรีย์กลุ่ม PAOs ที่สามารถจับใช้ฟอสฟอรัสได้มากเป็นพิเศษ ในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยค้นหาด้วยวิธีคัดเลือกด้วย DAPI (4',6'-Diamidino-2-Phenylindole) และ Tetracycline ผลการศึกษาพบว่าการเพาะเลี้ยงเชื้อไม่ประสบความสำเร็จ จุลินทรีย์กลุ่มที่สามารถจับใช้ฟอสฟอรัสได้มากเป็นพิเศษจะเกิดขึ้นเองในระบบที่มีสภาวะแอกแอโรบิกสลับกับแอโรบิกเท่านั้น

Kapagiannidis และคณะ, (2011) ศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดธาตุอาหารจากน้ำเสียชุมชนโดยใช้กระบวนการดีฟาน็อกซ์แบบประยุกต์ (Modified Dephanox process) โดยทำการลดสัดส่วนการเติมอากาศ (Aerobic mass fraction) เป็นร้อยละ 40-50 ของตะกอน ผลการศึกษาพบว่าการลดสัดส่วนการเติมอากาศที่ร้อยละ 11 ทำให้สามารถบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ที่ร้อยละ 81 และ 83 ตามลำดับ แต่มีผลทำให้ตะกอน (Floc) แตกกระจายเป็นตะกอนขนาดเล็ก (Pin floc) และหลุดลอยออกจากระบบได้ง่าย นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนการหมุนเวียนตะกอนไม่ส่งผลต่อการบำบัดฟอสฟอรัส แต่มีผลด้านลบต่อการบำบัดไนโตรเจน เพราะทำให้ค่าทีเคเอ็น (TKN) เพิ่มขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์ตะกอนโดยวิธี Fluorescence in Situ

Hybridization (FISH) พบว่าจุลินทรีย์กลุ่ม PAOs ที่สามารถจับใช้ฟอสฟอรัสได้มากเป็นพิเศษ มีปริมาณประมาณร้อยละ 15 ของจุลินทรีย์ทั้งหมดในระบบ โดยจำแนกเป็นจุลินทรีย์กลุ่ม *Candidatus accumulibacter phosphatis* และสามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเดินระบบไปแล้ว 5 สัปดาห์

Kapagiannidis และคณะ, (2013) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท (Batch reactor) ระหว่างสภาวะแอโรบิกและแอน็อกซิกเมื่อใช้อะซิเตทเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด 4 ความเข้มข้น ได้แก่ 0, 50, 100 และ 150 มก.-ซีโอดี/ล. ตามลำดับ โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ชุด ชุดแรกเดินระบบภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกสลับกับแอโรบิกเรียกชุดการทดลองนี้ว่า AO และชุดที่สองเดินระบบภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกสลับกับแอน็อกซิกเรียกการทดลองชุดนี้ว่า A2 ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นอะซิเตททำให้ภายใต้สภาวะแอนแอโรบิก จุลินทรีย์กลุ่ม PAOs ที่สามารถจับใช้ฟอสฟอรัสได้มากเป็นพิเศษสามารถเก็บ Polyhydroxyalkanoates (PHB) เข้าสู่เซลล์และปล่อยฟอสเฟตควบคู่กันในปริมาณที่สูง ในขณะเดียวกัน ส่งผลให้ภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกจุลินทรีย์กลุ่มนี้มีการจับใช้ฟอสฟอรัสได้มากขึ้นด้วย ในส่วนของประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสพบว่าทั้งสองชุดการทดลองสามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้ใกล้เคียงกัน แต่ในชุดการทดลอง AO จะใช้เวลาที่สั้นกว่าชุดการทดลอง A2

#### - การบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

Barak และ van Rijn, (2000) ศึกษาการสะสมโพลีฟอสเฟตของดีไนทริไฟอิงแบคทีเรีย ดำเนินการทดลองภายใต้สภาวะแอโรบิกแอน็อกซิก และแอนแอโรบิก โดยใช้แบคทีเรีย *P. denitrificans* จากถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดที่ใช้สำหรับการบำบัดไนเตรตของระบบเลี้ยงปลาแบบหมุนเวียนระบบปิด จากการทดลองพบว่าการสะสมโพลีฟอสเฟตของดีไนทริไฟอิงแบคทีเรียดังกล่าว จะเกิดขึ้นได้ในสภาวะที่มีสารอินทรีย์คาร์บอนจากภายนอกเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและใช้ออกซิเจนหรือไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน สามารถสรุปได้ว่าแบคทีเรีย *Pseudomonas denitrificans* นั้นเป็นแบคทีเรียกลุ่ม DNPAOs ที่สามารถบำบัดไนเตรตควบคู่กับฟอสเฟตได้ในสภาวะแอน็อกซิกเพียงสภาวะเดียว โดยไม่จำเป็นต้องเดินระบบแบบแอโรบิกสลับกับแอนแอโรบิกหรือแอนแอโรบิกสลับกับแอน็อกซิก

Shnel และคณะ, (2002) ออกแบบและศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำจากระบบเลี้ยงปลานิลแบบหมุนเวียนระบบปิด ดำเนินการทดลองโดยการติดตามประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในแต่ละส่วนของระบบบำบัด ระบบการเลี้ยงปลานิลแบบหมุนเวียนระบบปิดจะประกอบไปด้วย บ่อเลี้ยงปลานิล ถังตกตะกอน(Sedimentation/Digestion Basin) ถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์แบด ถังกรอง(Trickling Filter) และบ่อเติมอากาศ ผลการทดลองพบว่า แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดและไนไตรต์ไนโตรเจนถูกกำจัดโดยจุลินทรีย์กลุ่มไนทริฟายอิงในถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์แบด และถังกรอง ซึ่งเดินระบบภายใต้สภาวะแอโรบิก ส่วนไนเตรตไนโตรเจนและฟอสฟอรัสกว่าร้อยละ 70 ถูกกำจัดในถังตกตะกอนซึ่งภายในถังเป็นสภาวะแอน็อกซิก นอกจากนี้ยังพบว่าฟอสฟอรัสส่วนใหญ่ถูกกักเก็บไว้ในชั้นตะกอน การลดลงของไนเตรตและฟอสฟอรัสในถังตกตะกอนภายใต้สภาวะแอน็อกซิกนั้นทำให้ Barak และ van Rijn, (2000) ทำการศึกษาต่อเพื่อหากกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญในการในกระบวนการบำบัดไนเตรตและฟอสฟอรัส โดยทำการศึกษาในระบบบำบัดน้ำที่มีอยู่แล้วในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนระบบปิดซึ่งประกอบไปด้วยถังตกตะกอน(Sedimentation/Digestion Basin) ถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์แบด และถังกรอง (Trickling Filter) โดยติดตามประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสและเก็บตัวอย่างกลุ่มจุลินทรีย์ในแต่ละส่วนของระบบเพื่อระบุชนิดและบทบาทของจุลินทรีย์ *Pseudomonas aeruginosa*, *Paracoccus denitrificans* และ *Pseudomonas sp.* โดยใช้อะซิเตทเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน ผลการทดลองพบว่า กลุ่มจุลินทรีย์ Denitrifying มีบทบาทสำคัญในการกำจัดฟอสฟอรัสโดยจะสามารถจับใช้ฟอสฟอรัสได้ดีในกระบวนการเมตาบอลิซึมเมื่อปริมาณไนเตรตในปริมาณที่สูงเนื่องจากมีการพบว่าเมื่อไนเตรตหมดลงแล้วการจับใช้ฟอสฟอรัสของจุลินทรีย์ Denitrifying จะสิ้นสุดตามไปด้วย นอกจากนี้ยังพบว่ากระบวนการจับใช้ฟอสฟอรัสนี้จะเกิดขึ้นภายในสภาวะแอน็อกซิกที่มีสารอินทรีย์คาร์บอนที่เพียงพอเท่านั้น และจากการย้อมสี Niesser และดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่ากลุ่มจุลินทรีย์นี้มีการเก็บฟอสฟอรัสไว้ในเซลล์ Barak และ van Rijn, (2000) สรุปว่าจุลินทรีย์กลุ่ม Denitrifying Polyphosphate Accumulating Organisms หรือ DNPAOs เป็นจุลินทรีย์ที่ทำให้ระบบ EBPR สามารถบำบัดน้ำเสียในการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนได้

Barak และคณะ, (2003) ทำการออกแบบการบำบัดฟอสฟอรัสในระบบการเพาะเลี้ยงหมุนเวียนน้ำทะเลที่ไม่มีการปล่อยน้ำทิ้งโดยใช้การหมุนเวียนน้ำเพื่อบำบัดฟอสฟอรัสแบบสองทาง ทางแรกจะใช้น้ำออกของน้ำผิวหน้าด้านบนของบ่อเลี้ยง ทางที่สองจะให้น้ำก้นบ่อไหลไปยังบ่อ

ตกตะกอน การทดลองนี้พบว่าฟอสฟอรัสจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นในตะกอนของระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำทะเลแบบหมุนเวียน และฟอสเฟตสามารถลดลงได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยการบำบัดภายใต้สภาวะแอน็อกซิก ดังนั้นกระบวนการดีไนตริฟิเคชันมีความสัมพันธ์ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสอย่างมีนัยสำคัญ และอาจจะนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำกับระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบกึ่งปิดและระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนต่อไปในอนาคต

van Rijn และคณะ, (2006) ศึกษาทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ดีไนตริฟิเคชันในระบบหมุนเวียนโดยกล่าวว่าผลกำไรจากการเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบหมุนเวียนนั้นจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการจัดการของเสียโดยเฉพาะไนโตรเจน ซึ่งการจัดการของเสียนั้นทำได้โดยกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันในระบบ พบว่าการกำจัดไนโตรเจนโดยการเติมแหล่งคาร์บอนจากภายนอกเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดและการกำจัดไนโตรเจนด้วยดีไนตริฟิเคชันนี้มีความเกี่ยวข้องกับวัฏจักรกำมะถันและฟอสฟอรัสด้วย ระบบหมุนเวียนจะกำจัดแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) และแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) โดยดีไนตริฟิเคชันจากการตกตะกอนหรือกรองกล ส่วนไนเตรตนั้นจะกำจัดไนเตรตทางชีวภาพโดยใช้ทั้งวิธี Assimilatory และ Dissimilatory กล่าวสรุปว่าในปัจจุบันการประยุกต์ใช้ดีไนตริฟิเคชันในระบบหมุนเวียนเชิงพาณิชย์ ในระดับที่เต็มรูปแบบนั้นมีความเป็นไปได้แต่ขาดการศึกษากระบวนการในระบบอย่างลึกซึ้งและยังขาดความรู้และข้อมูลเกี่ยวกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

Tsuneda และคณะ, (2006) ศึกษาการบำบัดไนโตรเจนควบคู่กับฟอสฟอรัสในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ ภายใต้สภาวะแอนแอโรบิก (Anaerobic) แอโรบิก (Oxic) และแอน็อกซิก (Anoxic)(AOA) โดยมีการใช้แหล่งคาร์บอนในการบำบัดฟอสเฟตในสภาวะแอโรบิก ผลที่ได้ทำให้ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสลดลงร้อยละ 83 และ 92 ตามลำดับ แสดงให้เห็นความสามารถในการใช้ออกซิเจนจากไนเตรตของ PAOs นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่า Denitrification Polyphosphate Accumulating Organisms (DNPAOs) มีชีวิตอยู่ในกระบวนการ AOA นั้นคือสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการ AOA ที่มี DNPAOs อยู่ในส่วนของ SBR จะสามารถบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไปพร้อมกันได้ไนสภาวะแอโรบิกที่มีการเติมแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสม

Krom และคณะ, (2014) ศึกษาการบำบัดฟอสฟอรัส ไนเตรต และซัลเฟต โดยอาศัยแบคทีเรียบนชั้นกรองชีวภาพในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำทะเลแบบหมุนเวียนระบบปิด ซึ่งระบบเลี้ยงสัตว์น้ำทะเลแบบหมุนเวียนระบบปิดจะประกอบไปด้วย ถังกรอง บ่อเลี้ยง หน่วยแยกตะกอน ถังย่อยตะกอน และถังปฏิกรณ์ฟลูอิดไคต์เบด โดยจะแบ่งสูบน้ำ 2 เส้นทาง ประกอบด้วยเส้นทางที่เป็นแอโรบิกและ

แอนีอกซิก ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาในส่วนของเส้นทางการสูบน้ำแอนีอกซิกและติดตามปริมาณฟอสฟอรัส ไนเตรต และซัลเฟตในชั้นตะกอนของถังย่อยตะกอน จากการศึกษาพบว่าถังย่อยตะกอนสามารถบำบัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนออกจากระบบได้โดยอาศัยแบคทีเรียกลุ่มดีไนตริไฟอิง บริเวณชั้นบนของตะกอนในถังย่อยตะกอนที่มีปริมาณซัลเฟตและไนเตรตที่เพียงพอแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟจะเป็นแบคทีเรียที่มีบทบาทในการลดรูปซัลไฟด์และถูกกำจัดด้วยแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟภายใต้กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน งานวิจัยนี้กล่าวสรุปว่าภายใต้สภาวะแอนีอกซิกในถังย่อยตะกอนที่มีความเข้มข้นของไนเตรตและซัลเฟตในปริมาณสูงนั้นสามารถบำบัดอนินทรีย์ฟอสเฟตออกจากระบบได้

Hai และคณะ, (2015) ศึกษาการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรด้วยถังปฏิกรณ์กวนผสมแบบฟิล์มชีวภาพ (Sequencing Batch Biofilm Reactor ;SBBR) ถังปฏิกรณ์ที่ใช้มีปริมาตรรวม 9.7 ลิตร ภายในติดตั้งแอกติเวตเต็ดคาร์บอนแบบเส้นใย (Activated Carbon Fiber) ความยาว 40 ซม. จำนวน 12,000 เส้นใยในแนวตั้ง ทำการเดินระบบภายใต้สภาวะแอนแอโรบิก เป็นเวลา 3 ชม. สลับกับแอโรบิกเป็นเวลา 7 ชม. ผลการทดลองพบว่าสามารถบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 98 และ 95 ตามลำดับ แต่มีข้อเสียตรงที่แอกติเวตเต็ดคาร์บอนที่ติดตั้งอุดตันได้ง่าย

Zubrowska-Sudol และคณะ, (2015) ศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสโดยใช้สลัดจ์ส่วนเกินในระบบเป็นแหล่งคาร์บอนในถังปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์ โดยเดินระบบภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกสลับกับแอโรบิก โดยที่ในรอบการทดลองจะแบ่งการเติมน้ำเสียลงถังปฏิกรณ์เป็น 2 ช่วง ช่วงที่ 1 เติมน้ำเสียสองในสามส่วนลงในถังปฏิกรณ์ เดินระบบแอนแอโรบิก 50 นาที แอโรบิก 120 นาที ช่วงที่ 2 เติมน้ำเสียอีกหนึ่งในสามส่วนเดินระบบแอนแอโรบิก 30 นาที แอโรบิก 60 นาที จากนั้นใช้เวลาตกตะกอน 80 นาที นำน้ำใสออก 10 นาที และเติมน้ำใหม่ 10 นาที ผลการทดลองพบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการดีไนตริฟิเคชันถึงร้อยละ 50-76 โดยพบว่าสามารถบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้อย่างมีนัยสำคัญ

- สรุปประเด็นสำคัญจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1). กระบวนการดีไนตริฟิเคชันเป็นการเปลี่ยนไนเตรตไปเป็นไนไตรต์และแก๊สไนโตรเจนโดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟ กระบวนการนี้เกิดขึ้นในสภาวะแอนีอกซิก ซึ่งไม่มี

ออกซิเจนอิสระโดยมีไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน โดยที่ปริมาณความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่เกิดจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนในน้ำหรือค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) ที่ -200 ถึง -400 มิลลิโวลต์ ไนเตรตจะสามารถถูกลดรูปหรือกำจัดออกนอกระบบได้

2). การกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการทางชีวภาพ อาศัยจุลินทรีย์มีความสามารถในการจับใช้ฟอสฟอรัสได้เป็นพิเศษที่มีชื่อว่า Polyphosphate Accumulating Organisms หรือ PAOs ในสถานะแอนแอโรบิก PAOs จะดูดซึมเอาสารประกอบอินทรีย์โมเลกุลต่ำเพื่อเปลี่ยนไปเป็น Polyhydroxyalkanoate (PHA) โดยการลดโพลีฟอสเฟตกับไกลโคเจนและการปล่อยฟอสเฟตควบคู่กันไป ในสถานะที่เป็นแอโรบิก หรือ แอนอกซิก PAOs จะสลายอินทรีย์คาร์บอนเมื่อมีออกซิเจนเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในการสร้างเซลล์ใหม่ PHA จะเปลี่ยนไปเป็นไกลโคเจนและฟอสเฟตจะถูกดูดซึมมาเก็บไว้ภายในเซลล์ในรูปของโพลีฟอสเฟต จากนั้นแบคทีเรียจะเจริญเติบโตและใช้ฟอสเฟตเป็นพลังงานจากการสลายตัวของ PHA ทำให้ฟอสฟอรัสในน้ำมีปริมาณลดลง

3). การบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพสามารถเกิดขึ้นพร้อมกันได้ หากทำการควบคุมสภาวะการมีอากาศ-ไม่มีอากาศและการเติมอินทรีย์คาร์บอนในระบบให้เหมาะสม ทั้งนี้แอมโมเนียจะถูกบำบัดได้ในสภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอ เกิดเป็นไนไตรต์และไนเตรตซึ่งถูกบำบัดต่อได้ในสภาวะแอน็อกซิกซึ่งสภาวะดังกล่าวฟอสเฟตสามารถถูกบำบัดควบคู่กันได้

4). งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ทำการศึกษาค้นคว้าจาก Pungrasmi และคณะ, (2015) ที่ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดด้วยคอลัมน์ร่วมย่อยตะกอน-ดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งคอลัมน์ทรงสูงจะทำหน้าที่แทนถังปฏิกรณ์ในการตกและกักเก็บตะกอนจากน้ำที่ไหลออกจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำผลการทดลองพบว่ามีเกิดการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันภายในถังปฏิกรณ์สามารถบำบัดไนเตรตสูงสุดถึงร้อยละ 82 เมื่อเติมเมทานอลเพื่อเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนที่อัตราส่วนซีไอต่อไนโตรเจนเท่ากับ 3:1 งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะประยุกต์ใช้กระบวนการร่วมนี้กับระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำโดยพัฒนาถังปฏิกรณ์ที่สามารถบำบัดไนเตรตและฟอสฟอรัสได้ในถังเดียว และใช้ตะกอนจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจากแหล่งที่มาเดียวกันนี้มาทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สามารถกระตุ้นให้เกิดแบคทีเรียกลุ่ม DNPAOs ที่สามารถใช้ไนเตรตหรือไนไตรต์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนได้ภายใต้สภาวะแอน็อกซิกทำให้ภายใต้สภาวะนี้ทั้งไนเตรตและฟอสเฟตจะถูกบำบัดควบคู่กันจนสามารถหมุนเวียนน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำได้



### บทที่ 3

#### แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

- กระบอบอกฉีดยา
- กล่องพลาสติก
- ขวดแก้วขนาด 2 ลิตร
- เครื่องเติมอากาศ
- ถังพลาสติกขนาด 20 ลิตร
- ท่อพีวีซีและข้อต่อ
- สายไฟ
- สายยางซิลิโคน
- สายยางพลาสติก
- หัวทรายพ่นอากาศ
- เครื่องกวนสารชนิดแผ่นแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
- เครื่องควบคุมค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP controller) ยี่ห้อ SUNTEK รุ่น PC-310
- เครื่องควบคุมค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP controller) ยี่ห้อ HANNA รุ่น BL 932700
- หัววัดค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP electrode) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 2001
- เครื่องเก็บและบันทึกข้อมูล (Data logger) ยี่ห้อ WISCO รุ่น ML21
- เครื่องวัดค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP meter) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 9125
- บ่อพักน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 ลิตร
- อุปกรณ์แปลงไฟ (Adapter) ยี่ห้อ Rysonic รุ่น 3489 DC 1.5-12 V

- เครื่องควบคุมเวลา (Timer) ยี่ห้อ OMRON รุ่น H3CR

### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

- แท่งแก้วคนสาร
- บิวเรต
- ปีกเกอร์
- กระจกบอทดวง
- ขวดน้ำกลั่น
- ขวดรูปชมพู
- ขวดวัดปริมาตร
- หลอดฉีดยา
- หลอดทดลอง
- หลอดหยด
- ชุดกรองสำหรับกระจกฉีดยา (Syringe filter holder)
- เครื่องเขย่าสาร (Vortex Mixer GENIE 2) ยี่ห้อ Scientific Industries รุ่น G560E
- เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP210s
- เครื่องอ่านค่าไมโครเพลท (Microplate reader) ยี่ห้อ BioTek รุ่น PowerWave XS2
- ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)
- ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ Memmert
- กระดาษกรอง Whatman GF/C ขนาด 25 และ 47 มม. (Whatman®)
- โถดูดความชื้น (Desiccator)
- ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)
- ไมโครปิเปต
- หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ยี่ห้อ HIRAYAMA รุ่น HICLAVE HVE-50

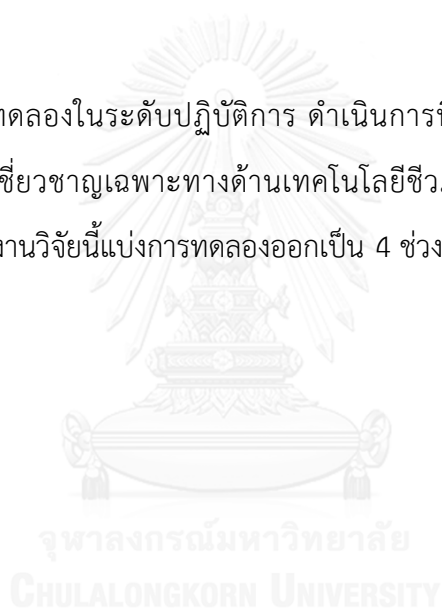
### 3.1.3 สารเคมี

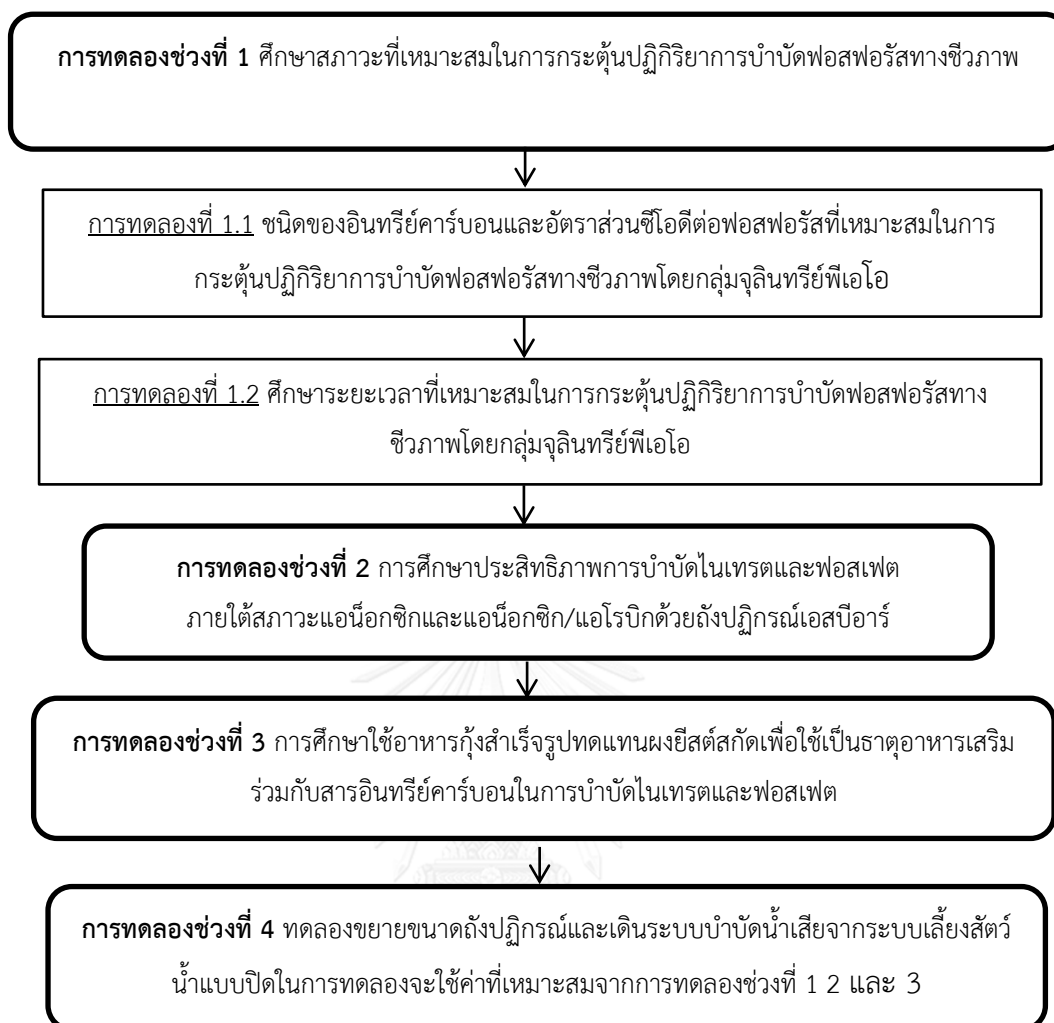
- 1,10-Phenanthroline monohydrate ( $C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$ )
- Ammonium sulfate ( $(NH_4)_2SO_4$ )
- Ammonium iron (II) sulfate hexahydrate ( $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ )
- Ammoniummolybdate solution  $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$
- ascorbic acid
- Boric acid ( $H_3BO_3$ )
- De - ionized water (DI)
- Ferrous chloride ( $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ )
- Ferrous sulfate ( $FeSO_4 \cdot H_2O$ )
- Hydrochloric acid (HCl) Iron (II) sulfate heptahydrate ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ )
- Manganous chloride ( $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ )
- Mercury (II) sulphate ( $HgSO_4$ )
- Methanol ( $CH_3OH$ )
- Methyl salicylate ( $C_8H_8O_3$ )
- NNED (N - (1 - Naphthyl) - Ethylenediamine Dihydrochloride)
- Potassium antimonyl- tartrate
- Potassium dichromate ( $K_2Cr_2O_7$ )
- Potassium dihydrogen Phosphate ( $KH_2PO_4$ )
- Potassium nitrate ( $KNO_3$ )
- Potassium persulfate ( $K_2O_8S_2$ )
- Silver sulfate ( $AgSO_4$ )
- Sodium bicarbonate ( $NaHCO_3$ )
- Sodium citrate dihydrate ( $Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$ )
- Sodium hydroxide (NaOH)
- Sodium hypochlorite (NaOCl)

- Sodium nitrate ( $\text{NaNO}_3$ )
- Sodium nitrite ( $\text{NaNO}_2$ )
- Sodium nitroprusside dihydrate ( $\text{Na}_2\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )
- Sodium salicylate ( $\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})\text{COONa}$ )
- Sulfuric acid ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
- Sulphanilamide ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2\text{S}$ )
- Tri-Sodium citrate ( $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

### 3.2 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับปฏิบัติการ ดำเนินการที่อุณหภูมิต้อง ณ ห้องปฏิบัติการ เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ช่วง ดังแสดงสรุปในแผนภาพรูปที่ 3.2





รูปที่ 3. 1 แผนผังสรุปภาพรวมแนวทางในการดำเนินงานวิจัย

**การทดลองช่วงที่ 1** เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นปฏิกิริยาการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ การทดลองช่วงนี้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อย ดังมีรายละเอียดการทดลองแสดงด้วยแผนผังรูปที่ 3.2 และในหัวข้อ 3.4.1

**การทดลองที่ 1.1** ศึกษาชนิดของอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสม โดยเปรียบเทียบระหว่างใช้เมทานอล และอะซิเตทเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน โดยแปรค่าความเข้มข้นซีไอดีต่อฟอสฟอรัสของสารอินทรีย์คาร์บอนที่แตกต่างกัน 3 ระดับคือ 7:1 14:1 และ 25:1 เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน ทำการเดินระบบการทดลองแบบแบทช์ด้วยถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์

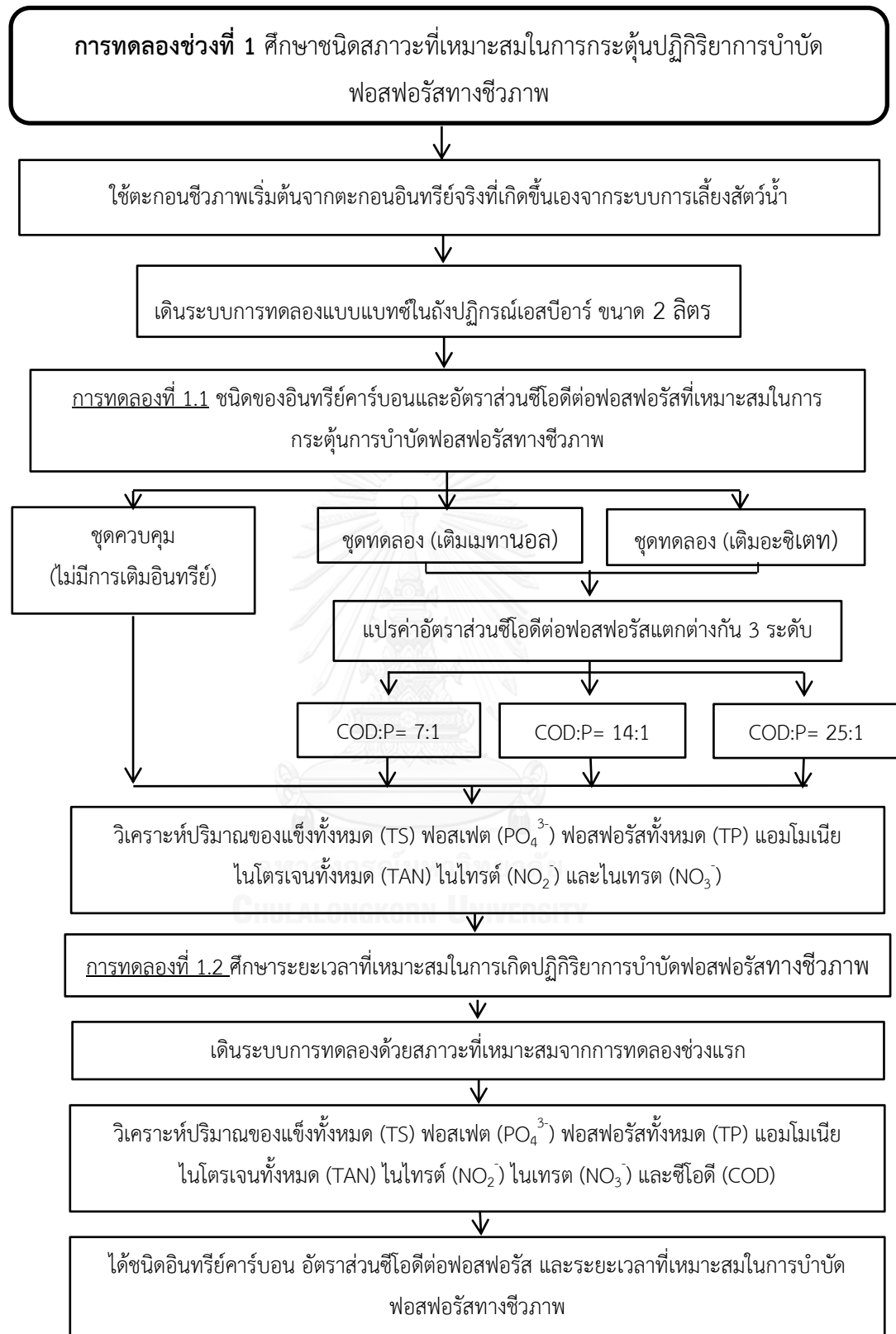
**การทดลองที่ 1.2** ศึกษาระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการบำบัดฟอสฟอรัสโดยกลุ่มจุลินทรีย์พีเอโอ เมื่อใช้ชนิดอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1.1 เดินระบบการทดลองแบบแบทช์ในถังปฏิกรณ์แบบเอสปีโดยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำ (ฟอสเฟต) และฟอสฟอรัสทั้งหมดทุกๆ 2 นาที ต่อเนื่องกันเป็นเวลา 8 ชั่วโมง

**การทดลองช่วงที่ 2** การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟตภายใต้ไร้อากาศในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ โดยใช้ชนิดของอินทรีย์คาร์บอน ความเข้มข้นซีไอดีต่อฟอสฟอรัสและระยะเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1 เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่เดินระบบในสภาวะมีไร้อากาศสลับกับมีอากาศ ทำการทดลองแบบแบทช์ด้วยถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ล. ติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าออกซิเดชันรีดักชัน (ORP) อย่างละเอียด ดังมีรายละเอียดการทดลองแสดงด้วยแผนผังรูปที่ 3.3 และในหัวข้อ 3.4.2

**การทดลองช่วงที่ 3** การศึกษาใช้อาหารกึ่งสำเร็จรูปทดแทนผงยีสต์สกัดเพื่อใช้เป็นธาตุอาหารเสริมร่วมกับสารอินทรีย์คาร์บอนในการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟต โดยใช้ผงยีสต์สกัดและอาหารกึ่งร่วมกับชนิดของอินทรีย์คาร์บอนเดินระบบการทดลองแบบแบทช์ด้วยสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1 ในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ภายใต้สภาวะแอน็อกซิก ดังมีรายละเอียดการทดลองแสดงด้วยแผนผังรูปที่ 3.4 และในหัวข้อ 3.4.3

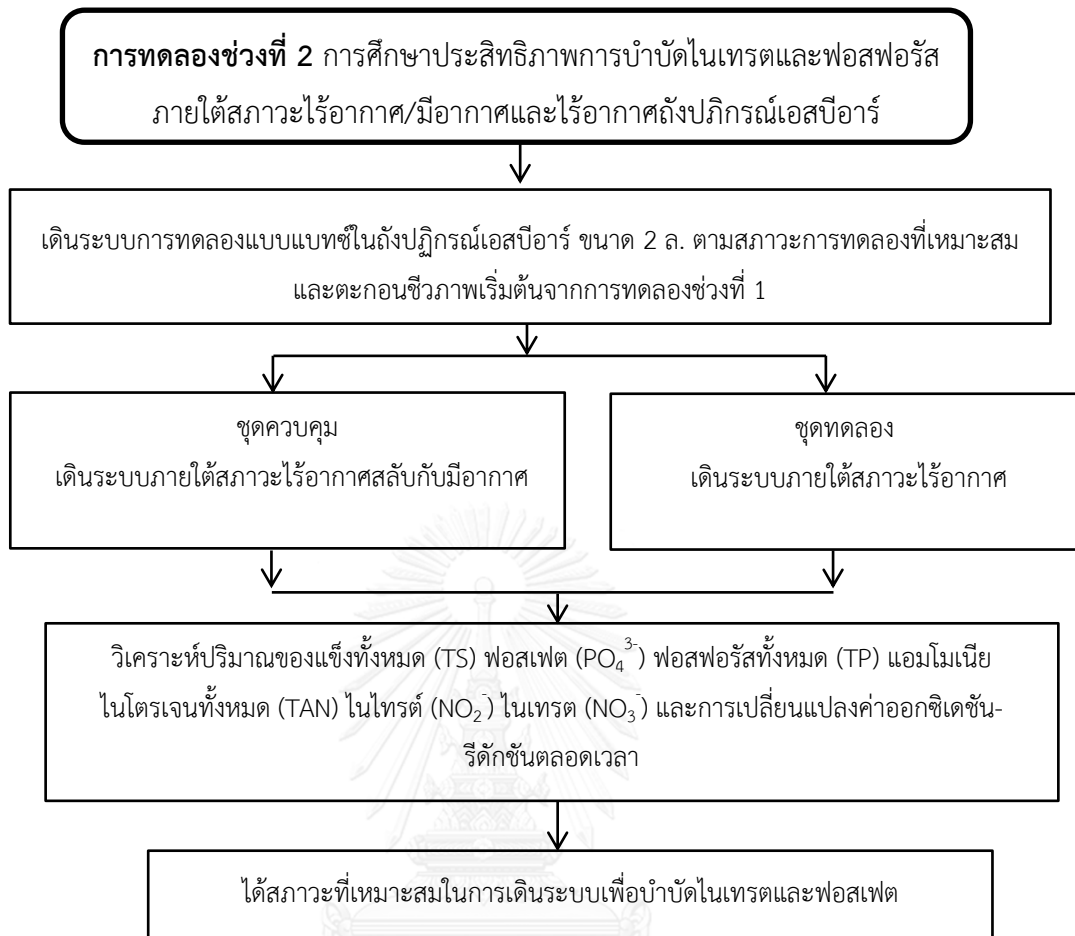
**การทดลองช่วงที่ 4** การทดลองขยายขนาดถังปฏิกรณ์และเดินระบบบำบัดน้ำเสียจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดในการทดลองจะใช้ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1 2 และ 3 โดยใช้ถังปฏิกรณ์ทรงกระบอกทำด้วยพลาสติกใส มีปริมาตรใช้งานรวม 20 ล. ฝาปิดมีประเก็นยางเพื่อป้องกันอากาศเข้า ภายในถังติดตั้งไบโอฟิลท์เพื่อให้เกิดการกวนผสมอย่างทั่วถึง ติดตั้งหัวตรวจวัดค่า ORP ที่บริเวณก้นถัง น้ำจากบ่อพักน้ำจะถูกสูบเข้าทางด้านบนของถัง เดินระบบการทดลองโดยใช้ชนิดอินทรีย์คาร์บอน อัตราส่วนซีโอติต่อฟอสฟอรัส ระยะเวลาการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟต และเติมธาตุอาหารเสริมที่เหมาะสมจากการทดลองที่ผ่านมา เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน ดังมีรายละเอียดการทดลองแสดงด้วยแผนผังรูปที่ 3.5 และในหัวข้อ 3.4.4



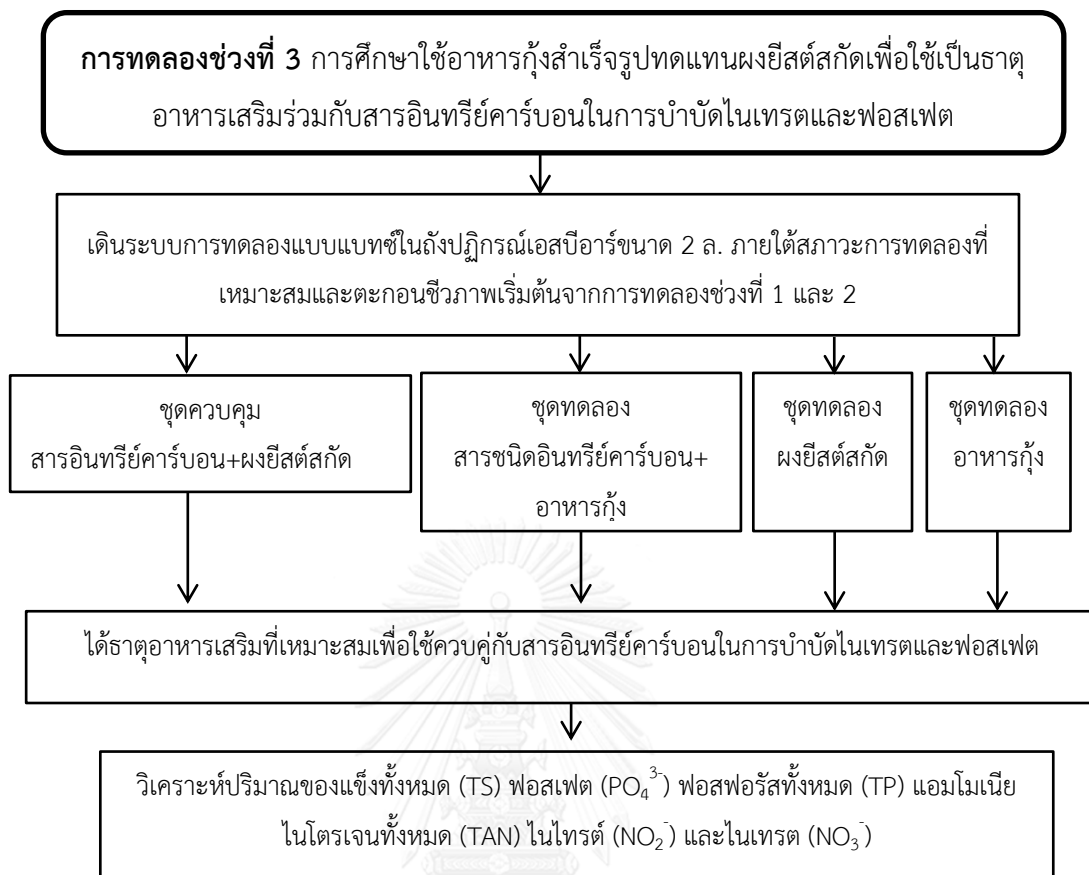


รูปที่ 3. 2 แผนผังการทดลองที่ 1

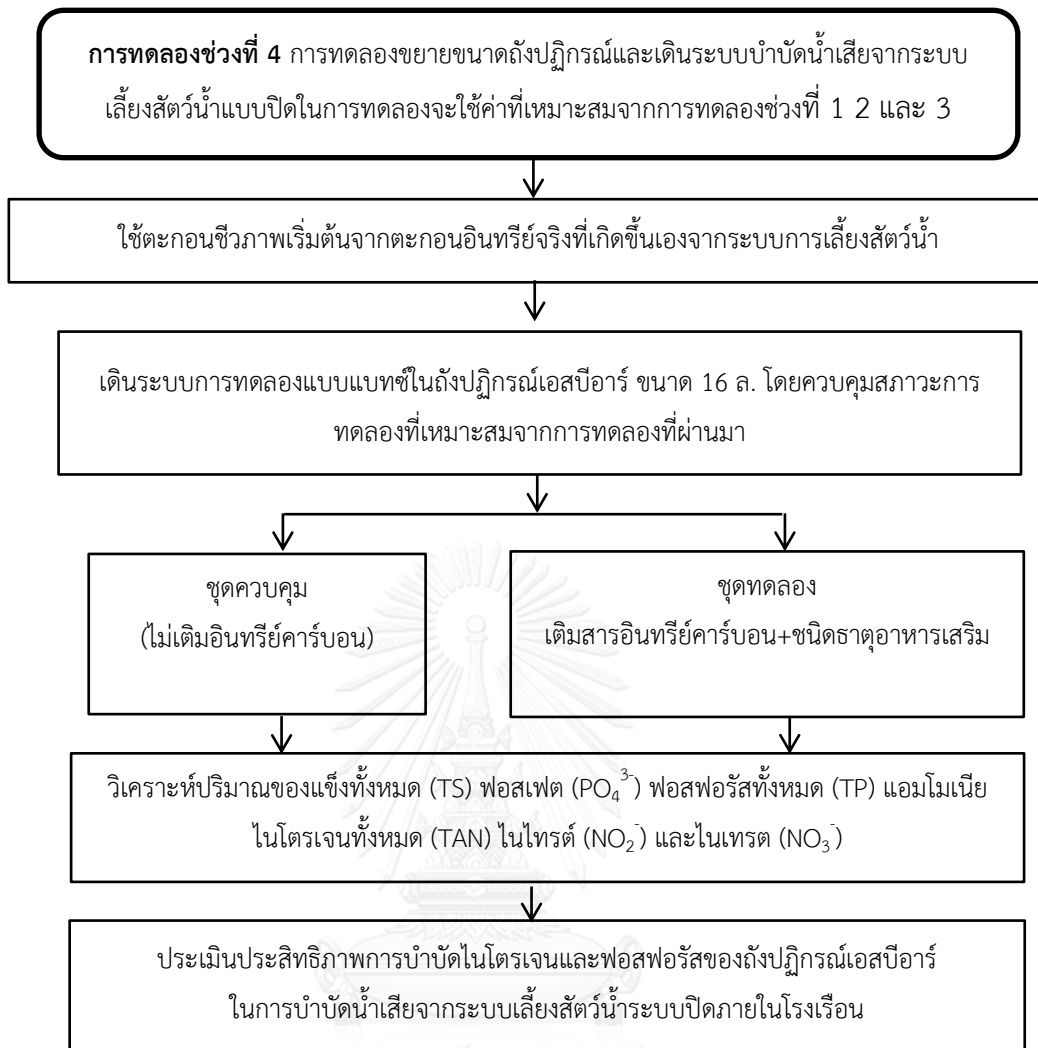




รูปที่ 3. 3 แผนผังการทดลองที่ 2



รูปที่ 3. 4 แผนผังการทดลองที่ 3



รูปที่ 3. 5 แผนผังการทดลองที่ 4

### 3.3 วัสดุอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

#### - ตะกอนชีวภาพ

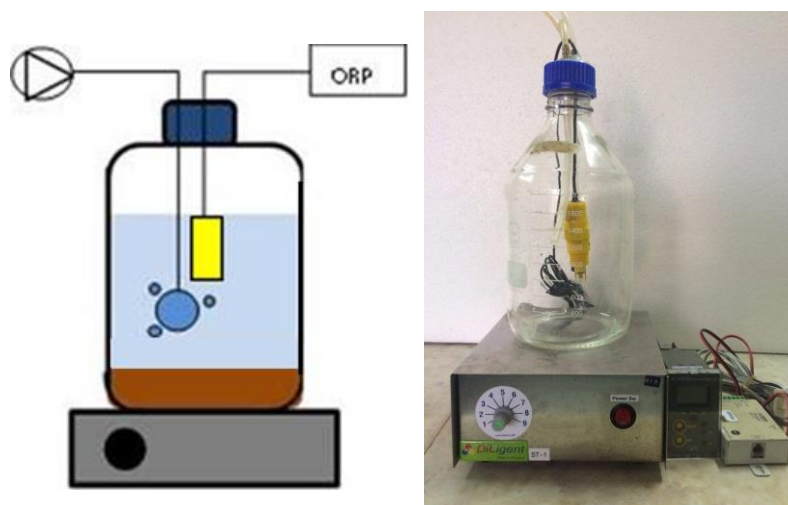
ตะกอนชีวภาพที่ใช้ในการทดลองเป็นตะกอนอินทรีย์จริงที่เกิดขึ้นเองจากอาหารที่เหลือจากการกินและการขับถ่ายของสัตว์น้ำจากบ่อเลี้ยงปลานิลในระบบปิดในโรงเรือนที่ไม่มีการเวียนน้ำเข้าสู่ระบบบำบัด ตักเก็บตะกอนจากบ่อแล้วกรองออกจากน้ำด้วยผ้ากรองไนลอนขนาดตา 50 ไมครอน ดังแสดงในรูป 3.6



รูปที่ 3.6 บ่อเลี้ยงปลานิลในระบบปิดในโรงเรือน(ซ้าย) ตะกอนชีวภาพเริ่มต้น(ขวา)

#### - ถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ขนาด 2 ลิตร

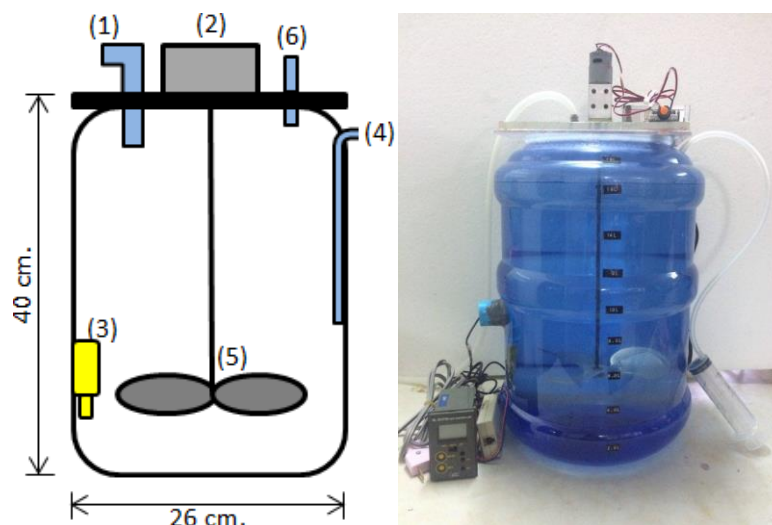
ถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ ปริมาตร 2 ลิตร เป็นขวดแก้ว (Duran) ทรงกระบอกมีฝาปิดติดตั้งเครื่องเติมอากาศเพื่อควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายน้ำให้มีค่ามากกว่า 4 มก./ล. ใช้หัวตรวจวัดค่า ORP เพื่อติดตามสภาวะไร้อากาศในระบบการทดลอง วางถังปฏิกรณ์บนเครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer) เพื่อให้เกิดการกวนผสมอย่างทั่วถึงตลอดเวลา ดังแสดงในรูป 3.7



รูปที่ 3.7 ถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ขนาด 2 ลิตร

- ถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ขนาด 16 ลิตร

เป็นถังพลาสติกใสทรงกระบอกสูง 40 ซม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 ซม. มีปริมาตรใช้งานรวม 16 ลิตร ฝาปิดทำด้วยแผ่นอะคริลิกใสมีประเก็นยางเพื่อป้องกันอากาศเข้าในถัง ด้านบนติดตั้งมอเตอร์ควบคุมความเร็วรอบของใบพัดกวนผสม ติดตั้งหัวตรวจวัดค่า ORP ที่บริเวณก้นถังเพื่อติดตามสถานะไร้อากาศในระบบการทดลอง ทำการสูบน้ำจากบ่อกักน้ำและเติมอินทรีย์คาร์บอนเข้าทางด้านบนของถัง ภายหลังการบำบัดจะทำการสูบน้ำออกทางสายทางด้านข้าง ดังแสดงในรูป 3.8



รูปที่ 3. 8 ถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ขนาด 16 ล. โดย (1) ท่อเติมน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิด (2) มอเตอร์ควบคุมความเร็วของใบพัดกวนผสม (3) หัวตรวจวัดค่า ORP (4) ท่อสำหรับเก็บน้ำตัวอย่าง และถ่ายน้ำหลังการบำบัด (5) ใบพัดกวนผสม และ (6) ท่อสำหรับเติมสารอินทรีย์คาร์บอน

### 3.4 การดำเนินการทดลอง

#### 3.4.1 การทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นปฏิกิริยาการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

เป็นการศึกษาชนิดของอินทรีย์คาร์บอน อัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัสและระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพกลุ่มจุลินทรีย์พีเอไอ การทดลองช่วงนี้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

การทดลองที่ 1.1 ศึกษาชนิดของอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสม โดยเปรียบเทียบการใช้เมทานอล และอะซิเตทควบคู่กับผงยีสต์สกัดเป็นแหล่งของสารอาหาร เติในระบบการทดลองในถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ล. บรรจุตะกอนชีวภาพเริ่มต้นปริมาณ 500 มล. และน้ำเสีย 1,500 มล. โดยควบคุมค่าพีเอชในระบบให้อยู่ในช่วง 7.5-8.5 ทำการทดลองทั้งหมด 3 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอินทรีย์คาร์บอน ชุดทดลองที่เติมโซเดียมอะซิเตทและชุดทดลองที่เติมเมทานอล โดยแปรค่าความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัสของสารอินทรีย์คาร์บอนที่แตกต่างกัน 3 ระดับคือ 7:1, 14:1 และ 25:1 (ปริมาณสารอินทรีย์ที่ใช้ในแต่ละช่วงการทดลองจะมีปริมาณที่ต่างกันแต่จะคงอัตราส่วนที่ใช้เท่าเดิมโดยคำนวณจากฟอสฟอรัสเริ่มต้นเสมอ เนื่องจากน้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียจริงจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

ความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้นในแต่ละการทดลองจึงไม่เท่ากัน) แบ่งการเดินระบบเป็น 4 ช่วงเวลา ได้แก่ หยุดให้อากาศ (Anaerobic) 4 ชม. ให้อากาศ (Aerobic) 4 ชม. ตกตะกอน (Sediment) 15 นาที เอน้ำใสออก (Decant) 5 นาที เติมน้ำเสียใหม่พร้อมเติมอินทรีย์คาร์บอน (Fill) 5 นาที เก็บน้ำตัวอย่างในช่วงสิ้นสุดการให้อากาศ 4 ชั่วโมงโดยแบ่งเก็บตัวอย่างน้ำเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก เก็บน้ำตัวอย่างส่วนใสเมื่อตกตะกอน เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ ได้แก่ ฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (TAN) ไนไตรต์ ( $\text{NO}_2^-$ ) ไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) และซีโอดี และส่วนที่สองเก็บตัวอย่างน้ำที่มีตะกอนในขณะที่มีการกวนผสมอย่างทั่วถึงเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำ และเลือกชนิดและความเข้มข้นอินทรีย์คาร์บอนที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ดีที่สุด

ตารางที่ 3. 1 ตัวแปรต่างๆ ที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 1.1

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ชนิดของอินทรีย์คาร์บอน	อะซิเตทและเมทานอล โดยใช้อัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 7:1 14:1 และ 25:1
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ชนิดของธาตุอาหารเสริม	ผงยีสต์สกัด, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ปริมาณ 4, 0.014, 0.09 และ 0.12 มก./ล.ตามลำดับ
ปริมาณตะกอนเริ่มต้น	500 มล.
ค่าพีเอช	ในช่วง 6.5-8.5
ปริมาณน้ำเสีย	1,500 มล.
ระยะเวลาในการเดินระบบ	21 วันหรือจนกว่าอัตราการทำบำบัดจะคงที่
ปริมาตรของถังปฏิกรณ์	2 ล.
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาวิเคราะห์
ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส	ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (TAN) ไนไตรต์ ( $\text{NO}_2^-$ ) ไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) ซีโอดี พีเอช และสภาพความเป็นต่าง

การทดลองที่ 1.2 ศึกษาระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพจากกิจกรรมของกลุ่มจุลินทรีย์พีเอโอ โดยใช้ชนิดอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1.1 เติมน้ำในระบบการทดลองเช่นเดิมและติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำ โดยแบ่งเก็บตัวอย่างน้ำเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก เก็บน้ำตัวอย่างส่วนใสเมื่อตกตะกอน เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ ได้แก่ ฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (TAN) ไนไตรต์ ( $\text{NO}_2^-$ ) ไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) และซีโอดี และส่วนที่สองเก็บตัวอย่างน้ำที่มีตะกอนในขณะที่มีการกวนผสมอย่างทั่วถึงเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ทุกๆ ชั่วโมง ต่อเนื่อง 8 ชม. เพื่อประเมินระยะเวลาที่เหมาะสมในการเดินระบบเพื่อการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

### 3.4.2 การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและฟอสฟอรัสภายใต้สภาวะไร้อากาศ/มีอากาศและไร้อากาศในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์

เดินระบบการทดลองด้วยถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ขนาด 2 ล. เช่นเดียวกับการทดลองในการทดลองช่วงที่ 1 โดยใช้ชนิดสารอินทรีย์คาร์บอน ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัสที่เหมาะสม และระยะเวลาในการกระตุ้นกิจกรรมของกลุ่มจุลินทรีย์พีเอโอ จากการทดลองช่วงที่ 1.1 และ 1.2 ตามลำดับ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุดควบคุมที่เดินระบบแบบมีไร้อากาศและมีอากาศ สลับกันโดยหยุดให้อากาศ (Anaerobic) 4 ชม. ให้อากาศ (Aerobic) 4 ชม. ตกตะกอน (Sediment) 15 นาที เอน้ำใสออก (Decant) 5 นาที เติมน้ำเสียใหม่พร้อมเติมอินทรีย์คาร์บอน (Fill) 5 นาที และชุดทดลองที่เดินระบบแบบไร้อากาศ เก็บน้ำตัวอย่างในช่วงสิ้นสุดการให้อากาศ 4 ชม. ในชุดควบคุมและเก็บตัวอย่างน้ำเมื่อเวลาครบ 8 ชม. ในชุดทดลอง โดยแบ่งเก็บตัวอย่างน้ำเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก เก็บน้ำตัวอย่างส่วนใสเมื่อตกตะกอน เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ ได้แก่ ฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (TAN) ไนไตรต์ ( $\text{NO}_2^-$ ) ไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) และซีโอดี และส่วนที่สองเก็บตัวอย่างน้ำที่มีตะกอนในขณะที่มีการกวนผสมอย่างทั่วถึงเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) โดยทำการทดลองจนกว่าอัตราการบำบัดจะคงที่ เพื่อติดตามความเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่มีในน้ำและประเมินประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟตภายใต้สภาวะแอน็อกซิกเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่เดินระบบไร้อากาศสลับกับมีอากาศ



ตารางที่ 3. 2 ตัวแปรต่างๆ สำหรับการทดลองช่วงที่ 2

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
สภาวะการเติมอากาศ	แบบไร้อากาศ และแบบไร้อากาศสลับกับมีอากาศ
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ปริมาณตะกอนเริ่มต้น	500 มล.
ปริมาณน้ำเสีย	1,500 มล.
ระยะเวลาในการเดินระบบ	7 วันหรือจนกว่าอัตราการบำบัดจะคงที่
ปริมาตรของถังปฏิกรณ์	2 ล.
ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน	ชนิดที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1.1
ความเข้มข้นซีไอดีต่อฟอสเฟต	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1.1
ระยะเวลาของการเดินระบบ	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1.2
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส	ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ฟอสเฟต ( $PO_4^{3-}$ ) แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (TAN) ไนไตรต์ ( $NO_2^-$ ) ไนเตรต ( $NO_3^-$ ) พีเอช และค่าสภาพต่าง

### 3.4.3 การทดลองช่วงที่ 3 การศึกษาใช้อาหารกึ่งสำเร็จรูปทดแทนผงยีสต์สกัดเพื่อใช้เป็นธาตุอาหารเสริมร่วมกับสารอินทรีย์คาร์บอนในการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟต

เป็นการเปรียบเทียบชนิดของธาตุอาหารระหว่างผงยีสต์สกัดและอาหารกึ่งสำเร็จรูปในการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟตเพื่อเพื่อกระตุ้นการเจริญของจุลินทรีย์พีเอไอ ควบคู่กับการใช้สารอินทรีย์คาร์บอนเดินระบบการทดลองตามสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ผ่านมา แบ่งทำการทดลองออกเป็น 4 ชุด ได้แก่ ชุดควบคุมที่เติมชนิดอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 ควบคู่กับผงยีสต์สกัด ชุดทดลองที่เติมชนิดสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 ควบคู่กับอาหารกึ่งสำเร็จรูป ชุดทดลองที่เติมเฉพาะเมทานอล และชุดทดลองที่เติมเฉพาะอาหารกึ่งสำเร็จรูป เก็บตัวอย่างน้ำโดยแบ่งเก็บตัวอย่างน้ำเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก เก็บตัวอย่างส่วนใสเมื่อตกตะกอน เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ ได้แก่ ฟอสเฟต ( $PO_4^{3-}$ ) แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (TAN) ไนไตรต์ ( $NO_2^-$ ) และไนเตรต ( $NO_3^-$ ) และส่วนที่สองเก็บตัวอย่างน้ำที่มีตะกอนในขณะที่มีการกวนผสมอย่างทั่วถึงเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) โดยทำการ

ทดลองทั้งหมด 10 วัน เพื่อคัดเลือกธาตุอาหารเสริมที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเพื่อใช้ควบคู่กับสารอินทรีย์คาร์บอนในการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟต

ตารางที่ 3. 3 ตัวแปรต่างๆ สำหรับการทดลองช่วงที่ 3

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
แหล่งของธาตุอาหาร	ผงยีสต์สกัดและอาหารกุ้ง
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ปริมาณตะกอนเริ่มต้น	500 มล.
ปริมาณน้ำเสีย	1,500 มล.
ระยะเวลาในการเดินระบบ	7 วันหรือจนกว่าอัตราการบำบัดจะคงที่
ปริมาตรของถังปฏิกรณ์	2 ล.
ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน	ชนิดที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1.1
ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสเฟต	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1.1
ระยะเวลาในการเดินระบบ	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1.2
สภาวะการเติมอากาศ	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 2
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส	ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ฟอสเฟต ( $PO_4^{3-}$ ) แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (TAN) ไนไตรต์ ( $NO_2^-$ ) ไนเตรต ( $NO_3^-$ ) พีเอช และค่าสภาพต่าง

#### 3.4.4 การทดลองช่วงที่ 4 การทดลองขยายขนาดถังปฏิกรณ์และเดินระบบบำบัดน้ำเสียจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด

เป็นการประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ภายใต้สภาวะแอน็อกซิกในการบำบัดน้ำเสียจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด โดยใช้ถังปฏิกรณ์ทรงกระบอกสูงทำด้วยพลาสติกใส มีปริมาตรใช้งานรวม 16 ล. ฝาปิดมีปะเก็นยางเพื่อป้องกันอากาศเข้าภายในถัง ภายในถังติดตั้งใบพัดเพื่อให้ตะกอนผสมกันอย่างทั่วถึง ติดตั้งหัวตรวจวัดค่า ORP ที่บริเวณก้นถัง ทำการสูบน้ำจากบ่อพักน้ำและเติมอินทรีย์คาร์บอนเข้าทางด้านบนของถัง เมื่อการบำบัดสิ้นสุดในแต่ละวันจะทำการถ่ายน้ำออกทางสายทางด้านข้างถัง เดินระบบโดยใช้ชนิดอินทรีย์คาร์บอน อัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัส ระยะเวลาการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส สภาวะการควบคุมการมีอากาศ และชนิดของธาตุอาหารเสริมที่เหมาะสม

จากการทดลองที่ 1 2 และ 3 เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน เก็บตัวอย่างน้ำทุกวัน โดยแบ่งเก็บตัวอย่างน้ำเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก เก็บน้ำตัวอย่างส่วนใสเมื่อตกตะกอนเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ ได้แก่ ฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (TAN) ไนไตรต์ ( $\text{NO}_2^-$ ) และไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) และส่วนที่สองเก็บตัวอย่างน้ำที่มีตะกอนในขณะที่มีการกวนผสมอย่างทั่วถึงเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) โดยทำการทดลองจนกว่าอัตราการบำบัดจะคงที่

ตารางที่ 3. 4 ตัวแปรต่างๆ ที่ทำการศึกษาในการทดลองช่วงที่ 4

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
สารอินทรีย์คาร์บอน	สารอินทรีย์คาร์บอน
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ชนิดของถังปฏิกรณ์	ถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์
ชนิดของน้ำเสีย	น้ำเสียจากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนระบบปิด
ปริมาตรของถังปฏิกรณ์	20 ล.
ชนิดของสารอินทรีย์คาร์บอน	สารที่ได้จากผลการทดลองที่ 1
อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจน	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1.1
ระยะเวลาการเดินระบบ	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1.2
สภาวะการเติมอากาศ	สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2
แหล่งของธาตุอาหาร	ชนิดที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 3
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส	ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (TAN) ไนไตรต์ ( $\text{NO}_2^-$ ) ไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) พีเอช และค่าสภาพต่าง

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 การทดลองช่วงที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นปฏิกิริยาการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

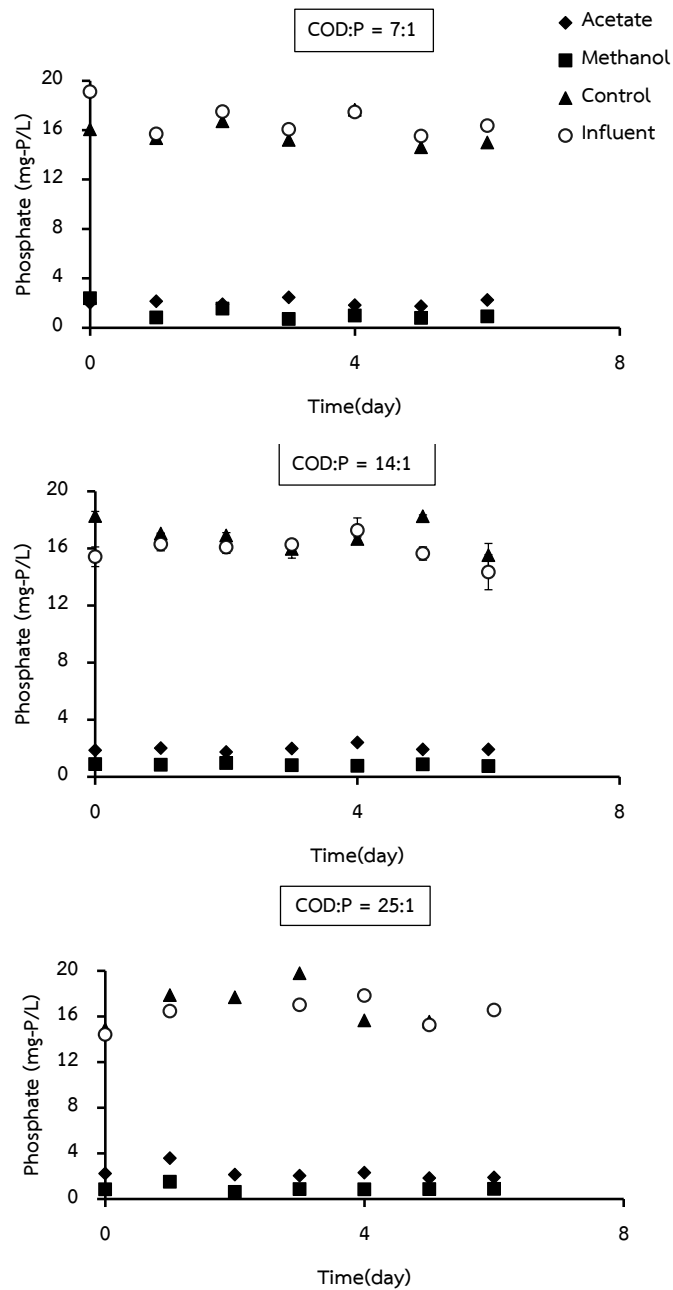
การทดลองช่วงนี้เป็นการศึกษาชนิดของอินทรีย์คาร์บอน อัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัส และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาการบำบัดฟอสฟอรัสโดยกลุ่มจุลินทรีย์ฟีเอโอ ในระบบ เพื่อให้ได้ชนิดความเข้มข้นอินทรีย์คาร์บอนที่มีประสิทธิภาพ และระยะเวลาในการเดินระบบที่เหมาะสมสำหรับบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ดีที่สุดเพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยผลการทดลองมีดังนี้

4.1.1 การทดลองช่วงที่ 1.1 ศึกษาชนิดของอินทรีย์คาร์บอนและอัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัสที่เหมาะสมในการกระตุ้นปฏิกิริยาการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้เมทานอลและอะซิเตทเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอน

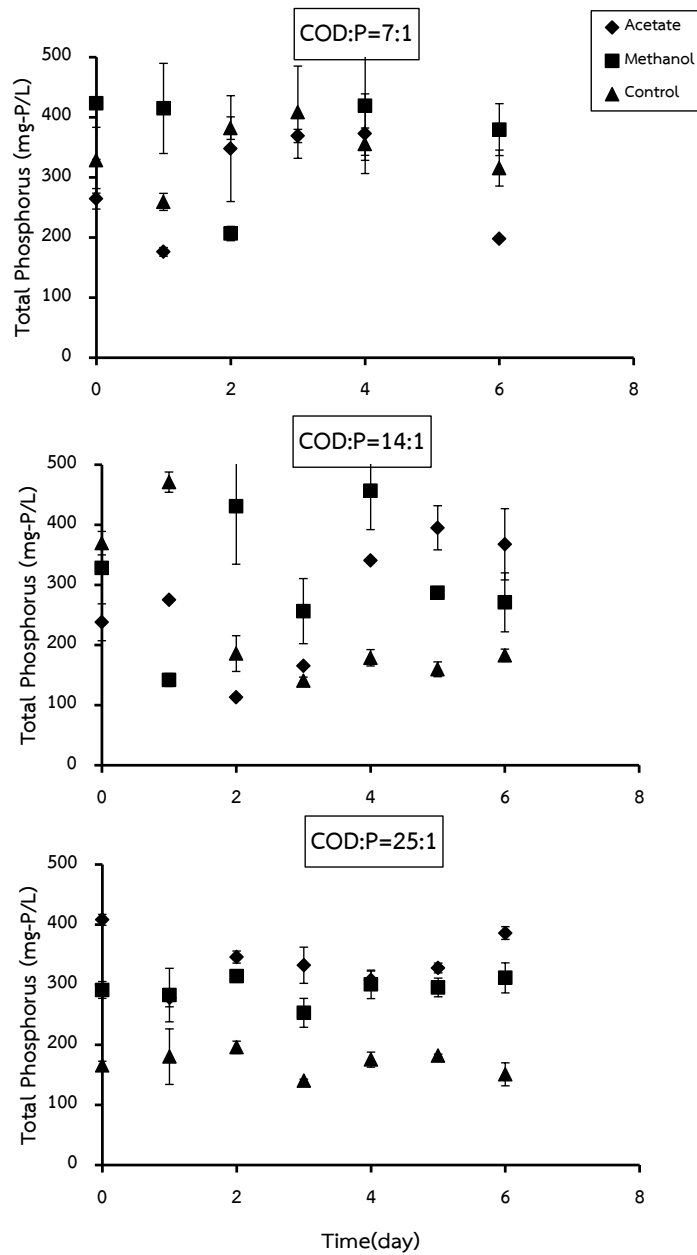
4.1.1.1 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส

ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตละลายน้ำที่สะสมในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16.7 มก.ฟอสฟอรัส/ล. เมื่อนำน้ำดังกล่าวมาบำบัดในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ในสภาวะที่มีการเติมอะซิเตทและเมทานอลเป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนและมีการเติมผงยีสต์สกัดเป็นธาตุอาหารเสริมทั้ง 2 ชุดการทดลอง โดยแปรค่าความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัสของสารอินทรีย์คาร์บอนที่แตกต่างกัน 3 ระดับคือ 7:1 14:1 และ 25:1 (ดังแสดงในตารางที่ 4.1) พบว่าทั้ง 3 ความเข้มข้นในชุดการทดลองที่เติมอะซิเตทสามารถบำบัดฟอสเฟตได้จนเหลือเพียง  $2.05 \pm 0.08$ ,  $1.97 \pm 0.04$  และ  $2.28 \pm 0.05$  มก.ฟอสฟอรัส/ล. ตามลำดับ หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตเท่ากับร้อยละ 87 88 และ 86 ตามลำดับ ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตะกอนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $288 \pm 32.12$ ,  $271 \pm 20.36$  และ  $340 \pm 20.36$  มก.ฟอสฟอรัส/ล. และในชุดการทดลองที่เติมเมทานอลสามารถบำบัดฟอสเฟตได้จนเหลือเพียง  $1.17 \pm 0.02$ ,  $0.83 \pm 0.04$  และ  $0.91 \pm 0.08$  มก.ฟอสฟอรัส/ล. ตามลำดับหรือคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตเท่ากับร้อยละ 93 95 และ 94 ตามลำดับ ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตะกอน (ฟอสฟอรัสทั้งหมด) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $428 \pm 51.15$ ,

310±40.89 และ 293±21.67 มก.ฟอสฟอรัส/ล. ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ) ในขณะที่ไม่พบการบำบัดฟอสเฟตในชุดควบคุม ชุดการทดลองที่ใช้เมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนจึงมีการลดลงของฟอสฟอรัสละลายน้ำ (ฟอสเฟต) และมีการสะสมของฟอสฟอรัสในตะกอนมากที่สุดเนื่องจากโครงสร้างทางโมเลกุลของเมทานอลนั้นมีความซับซ้อนน้อยกว่าอะซิเตทจุลินทรีย์จึงนำไปใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึมได้ง่ายกว่า นอกจากนั้นที่อัตราส่วนซีไอดีต่อฟอสฟอรัสทั้ง 3 ความเข้มข้นได้แก่ 7:1 14:1 และ 25:1 พบว่ามีอัตราการบำบัดที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากผลการทดลองทั้ง 3 ความเข้มข้นของไนเตรต-ไนโตรเจนคงเหลือหลังการบำบัดอยู่ที่ประมาณ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. (ผลการทดลองแสดงในหัวข้อที่ 4.1.1.2) ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำมาก เนื่องจากวิธีวัดปริมาณไนเตรต-ไนโตรเจนที่ใช้เป็นวิธียูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ซึ่งสามารถวัดค่าต่ำสุดได้เพียง 2 มก.ไนโตรเจน/ล. ดังนั้นมีความเป็นไปได้ว่าไนเตรต-ไนโตรเจนซึ่งเป็นตัวที่จุลินทรีย์กลุ่ม DNPAOs ใช้รับอิเล็กตรอนได้หมดลงดังนั้นจึงทำให้การจับใช้ฟอสฟอรัสได้สิ้นสุดลงด้วย (Barak และ Rijn, 2000) ทำให้ทั้งประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสทั้ง 3 ความเข้มข้นใกล้เคียงกัน จึงเลือกใช้เมทานอลเป็นอินทรีย์คาร์บอนที่ความเข้มข้นซีไอดีต่อฟอสฟอรัส 7:1 เพื่อเป็นการประหยัดทรัพยากรและลดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเมื่อประยุกต์ใช้กับฟาร์มเชิงพาณิชย์



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความเข้มข้นของฟอสเฟตในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ชุดควบคุม และชุดที่เติมด้วยอะซิเตทและเมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัส 7:1 (บน) 14:1 (กลาง) และ 25:1 (ล่าง)



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงปริมาณการสะสมฟอสฟอรัสในตะกอนในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ชุดควบคุม และชุดที่เติมด้วยอะซิเตทและเมทานอลที่ความเข้มข้นซีไอต่อฟอสฟอรัส 7:1 (บน) 14:1 (กลาง) และ 25:1 (ล่าง)

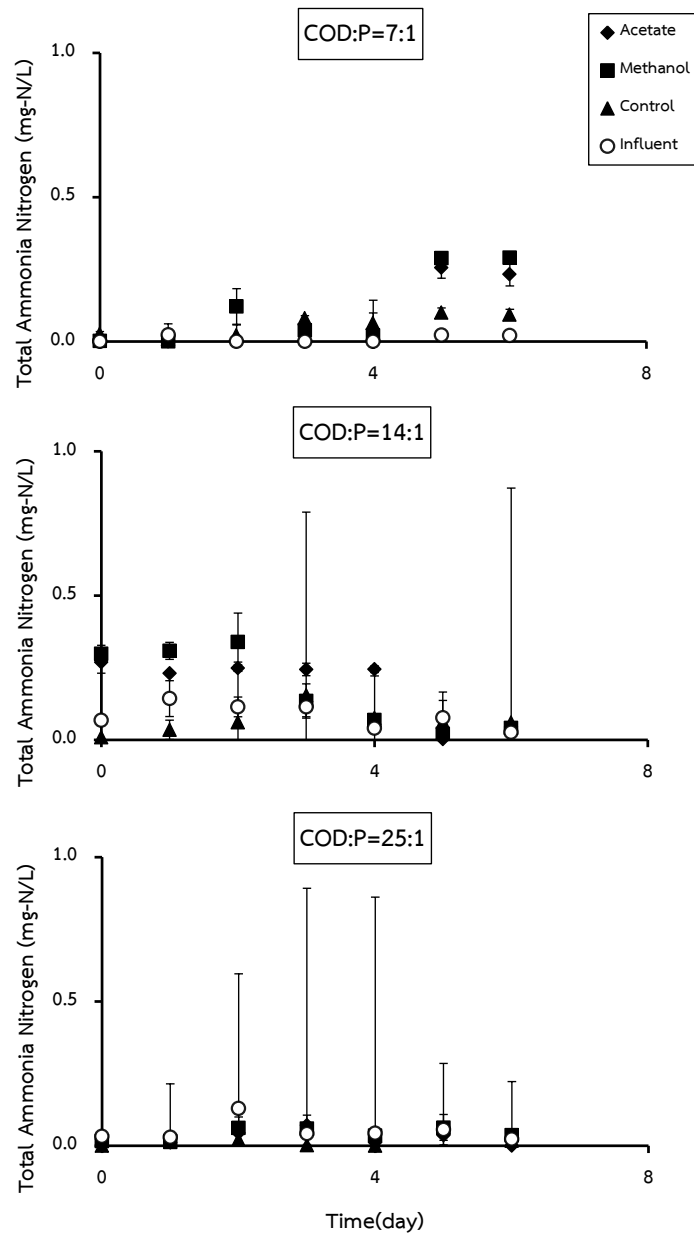
#### 4.1.1.2 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจน

เมื่อติดตามความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจนในรูปต่างๆ คือ แอมโมเนียทั้งหมด, ไนไตรต์ และ ไนเตรต ในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ชุดควบคุม ชุดที่เติมด้วยอะซิเตท และชุดที่เติมด้วย เมทานอล ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) (ANOVA และ Duncan's) ในส่วนของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนและไนไตรต์-ไนโตรเจนทั้ง 3 ชุดการทดลองและทั้ง 3 ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัสที่ 7:1 14:1 และ 25:1 ตามลำดับ เนื่องจากน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจริงจากบ่อเลี้ยงปลานิลแบบหมุนเวียนระบบปิดที่ผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ด้วยเทคโนโลยีไบโอฟลอคทำให้มีปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนและไนไตรต์-ไนโตรเจนสะสมอยู่ในปริมาณที่น้อยมาก โดยที่มีการสะสมแอมโมเนียและไนไตรต์ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียน มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $0.05 \pm 0.19$  และ  $0.04 \pm 0.02$  มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

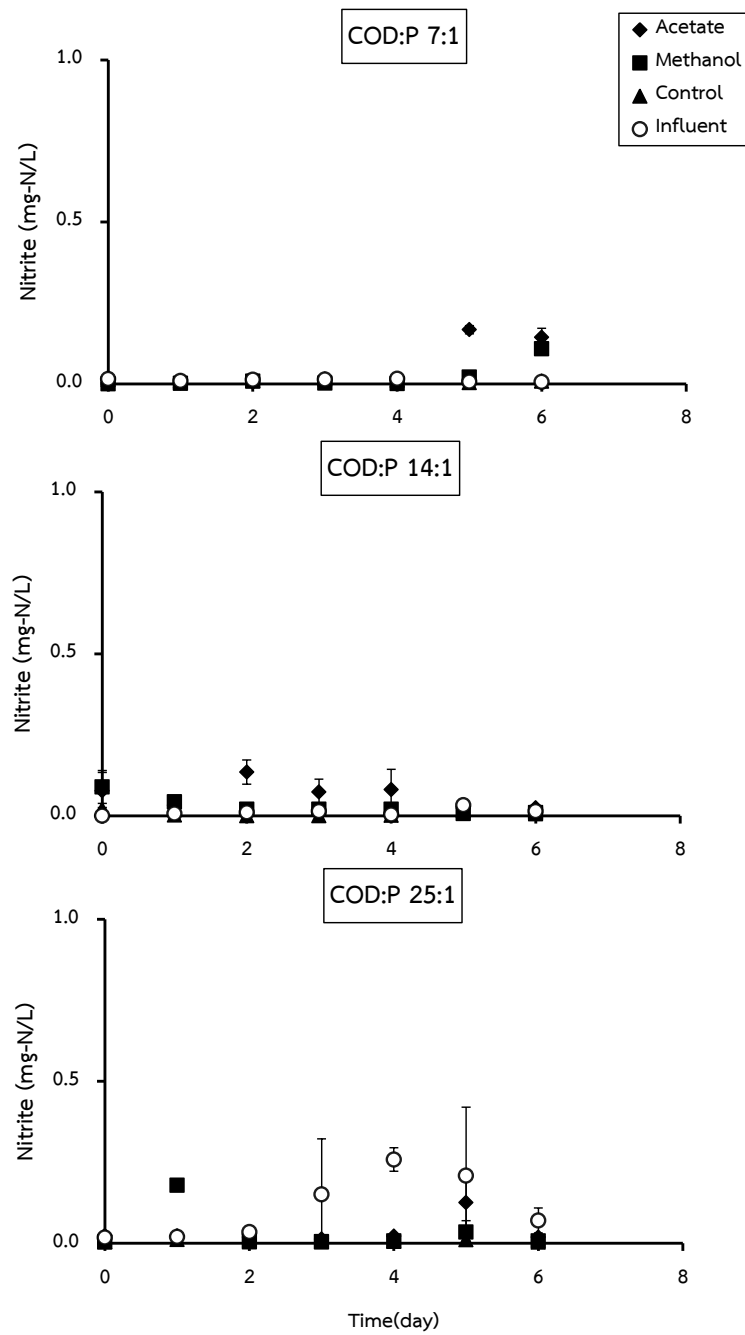
ไนเตรต-ไนโตรเจนมีการสะสมในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 5.09 มก.ไนโตรเจน/ล. เมื่อนำน้ำดังกล่าวมาผ่านการบำบัดในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ที่เติมด้วยอะซิเตทและผงยีสต์สกัด ที่แปรค่าความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัสของสารอินทรีย์คาร์บอนที่แตกต่างกัน 3 ระดับคือ 7:1 14:1 และ 25:1 (ดังแสดงในตารางที่ 4.1) พบว่า พบว่าสามารถบำบัดไนเตรต-ไนโตรเจนเหลือเพียง  $1.95 \pm 0.08$ ,  $2.01 \pm 0.05$  และ  $2.29 \pm 0.21$  มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตร้อยละ 62 60 และ 55 ตามลำดับ และเมื่อนำน้ำดังกล่าวมาผ่านการบำบัดในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ที่เติมด้วยด้วยเมทานอล พบว่าสามารถบำบัดไนเตรต-ไนโตรเจนเหลือเพียง  $1.76 \pm 0.06$ ,  $2.34 \pm 0.07$  และ  $1.97 \pm 0.17$  มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ) หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตร้อยละ 65 54 และ 61 ตามลำดับ (สำหรับไนเตรต-ไนโตรเจนที่คงเหลือหลังการบำบัดทั้ง 3 ความเข้มข้นถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำมากเนื่องจากวิธีวัดปริมาณไนเตรตไนโตรเจนที่ใช้เป็นวิธียูวีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ซึ่งสามารถวัดค่าต่ำสุดได้เพียง 2 มก.ไนโตรเจน/ล.) ในขณะที่ไม่พบการบำบัดไนเตรต-ไนโตรเจนในชุดควบคุม ดังนั้นชุดการทดลองที่ใช้เมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัส 7:1 จึงมีการลดลงของไนเตรต-ไนโตรเจนมากที่สุด สำหรับเมทานอล เอทานอล และน้ำเสียจากกระบวนการหมักแอลกอฮอล์ (Alcoholic wastewater) พบว่าถ้ามีปริมาณที่เหมาะสมแล้วจะทำให้อัตราการ



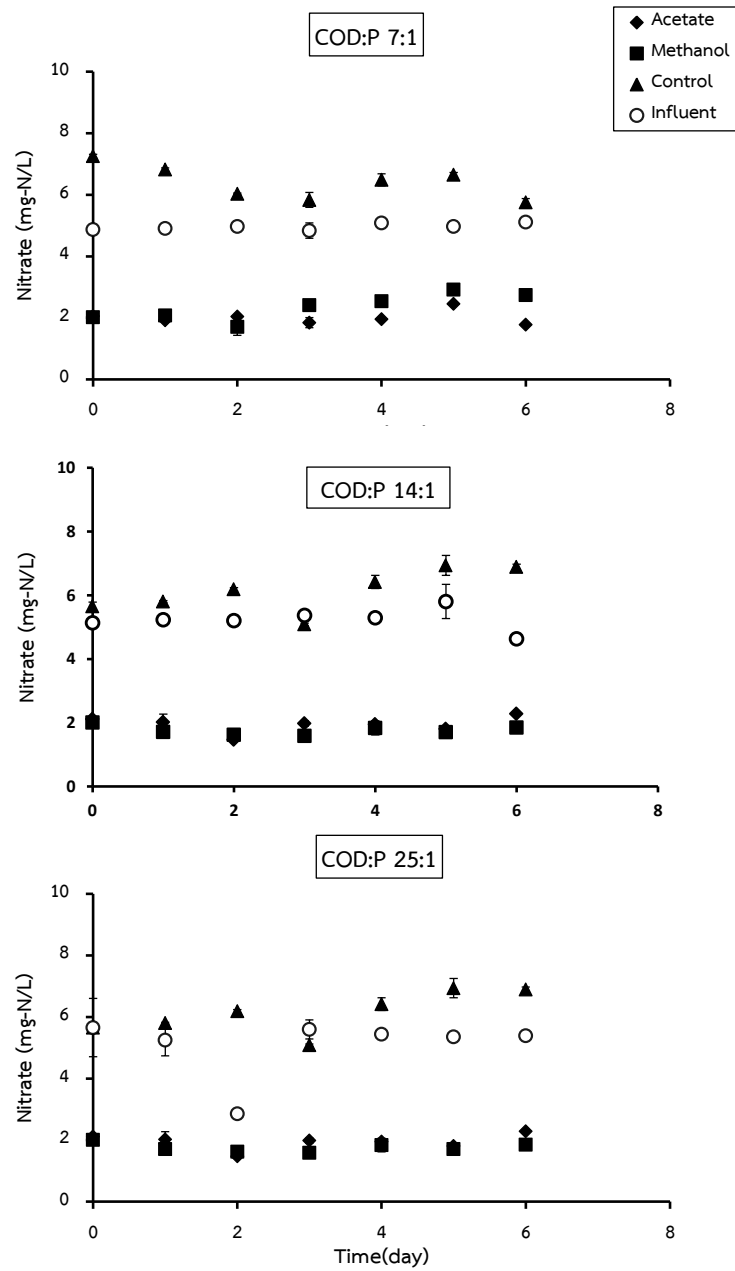
เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเพิ่มขึ้นเป็น 5-10 เท่าได้โดยไม่มีผลกระทบต่อสารอื่น จึงทำให้การเติมเมทานอลและเอทานอลเป็นแหล่งคาร์บอนจากภายนอกนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย (Lewandowski, 1985)



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความเข้มข้นของแอมเนีย-ไนโตรเจนทั้งหมดในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ชุดควบคุม และชุดที่เติมด้วยอะซิเตทและเมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัส 7:1 (บน) 14:1 (กลาง) และ 25:1 (ล่าง)



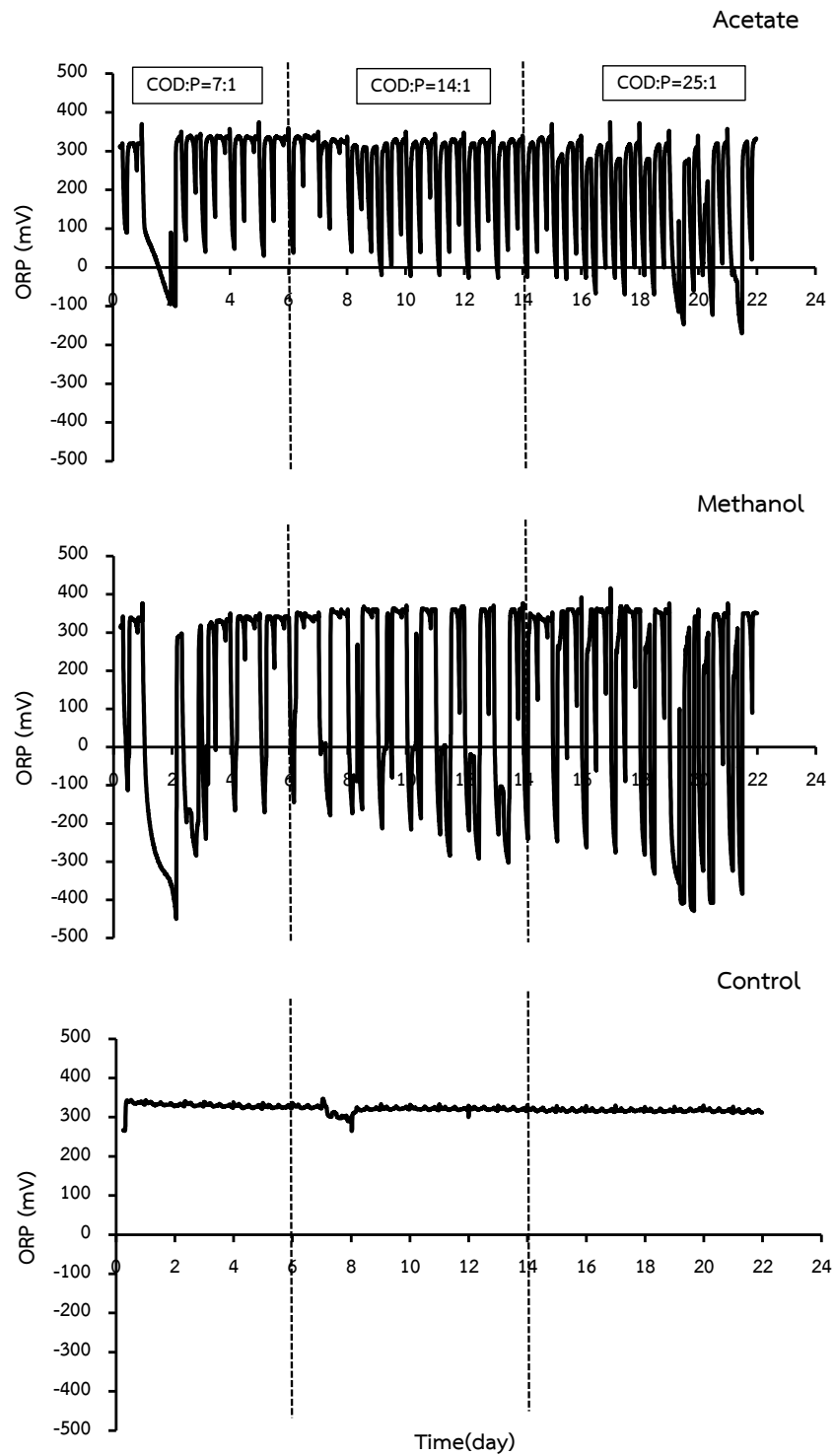
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความเข้มข้นของไนไตรต์-ไนโตรเจนในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ชุดควบคุม และชุดที่เติมด้วยอะซิเตทและเมทานอลที่ความเข้มข้นซีไอดีต่อฟอสฟอรัส 7:1 (บน) 14:1 (กลาง) และ 25:1 (ล่าง)



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความเข้มข้นของไนเตรต-ไนโตรเจนในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ชุดควบคุม และชุดที่เติมด้วยอะซิเตทและเมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัส 7:1 (บน) 14:1 (กลาง) และ 25:1 (ล่าง)

#### 4.1.1.3 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน

ผลการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) แสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นปริมาณความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่เกิดจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนในน้ำที่วิเคราะห์ได้จากถังปฏิกรณ์ ทั้ง 3 ชุดการทดลอง (ชุดควบคุม ชุดที่เติมอะซิเตทและชุดที่เติมเมทานอล) ในช่วงเดิมอากาศนั้น ทั้ง 3 ชุดการทดลองมีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง 0 ถึง 400 ในช่วงที่หยุดเติมอากาศพบว่าชุดทดลองที่เติมด้วยด้วยอะซิเตทมีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง 0 ถึง -200 มิลลิโวลต์ ส่วนชุดทดลองที่เติมด้วยด้วยเมทานอลมีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง 0 ถึง -400 มิลลิโวลต์ และในชุดควบคุมมีค่าโออาร์พีตลอดการทดลองอยู่ที่ 300 มิลลิโวลต์ (ดังแสดงในรูปที่ 4.6) ทั้งนี้ผลการทดลองดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับสุวิมล ตันทสุกิจวงนิช (2545) ที่รายงานว่าค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในช่วง -50 ถึง -200 มิลลิโวลต์จะพบการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันแบบสมบูรณ์ ทำให้การบำบัดไนเตรตเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพในระบบบำบัดไนเตรตแบบท่อยาว และพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตได้สูงถึงร้อยละ 84-97 โดยไม่มีการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ และ Sillen (1965) ที่รายงานว่าค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันที่ -200 มิลลิโวลต์ นั้นสามารถทำให้ไนเตรตเปลี่ยนรูปเป็นไนไตรต์ และที่ -235 มิลลิโวลต์ไนไตรต์จะเปลี่ยนเป็นไนเตรตและเมื่อค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันที่อยู่ในช่วง -375 ถึง -400 มิลลิโวลต์ ระบบสามารถบำบัดไนเตรตได้ถึงร้อยละ 50 และกล่าวสรุปว่าค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนเตรตจะอยู่ในช่วง -325 ถึง -400 มิลลิโวลต์



รูปที่ 4.6 กราฟค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ ชุดที่เติมด้วยอะซิเตท (บน) เมทานอล (กลาง) และชุดควบคุม (ล่าง) ที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัส 7:1 14:1 และ 25:1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงอัตราส่วนสารอินทรีย์คาร์บอน

ชนิดสารอินทรีย์คาร์บอน	mg-COD	mg-C	ปริมาณฟอสฟอรัสเริ่มต้น mg-P/L	ปริมาณไนโตรเจนเริ่มต้น mg-N/L	อัตราส่วน COD:C:P	อัตราส่วน COD:C:NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
น้ำตาล	98	36.6	14	5	7:3:1	20:7:1
	196	73.2	14	5	14:5:1	40:15:1
	350	130.8	14	5	25:10:1	70:26:1
ไขมัน	98	24.5	14	5	7:2:1	20:5:1
	196	49	14	5	14:4:1	40:10:1
	350	87.5	14	5	25:7:1	70:18:1

\*หมายเหตุ: 1 mgAcetate = 1.07mgCOD, 1 mgMeOH = 1.5mgCOD

4.1.2 การทดลองช่วงที่ 1.2 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพโดยกลุ่ม จุลินทรีย์ฟิเอโอ เมื่อใช้ชนิดอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสม

จากการทดลองที่ 4.1.1 พบว่าเมทานอลที่ความเข้มข้นซีไอดีต่อฟอสฟอรัส 7:1 เป็นสารอินทรีย์คาร์บอนมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ดีที่สุด การทดลองในหัวข้อนี้จึงใช้ชนิดอินทรีย์คาร์บอนอัตราส่วนดังกล่าวศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพโดยกลุ่มจุลินทรีย์ฟิเอโอ โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำ ต่อเนื่อง 8 ชม. เพื่อประเมินระยะเวลาที่เหมาะสมในการเดินระบบในการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เหมาะสม

#### 4.1.2.1 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดฟอสฟอรัส

จากการติดตามปริมาณการลดลงของฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตละลายน้ำและปริมาณการสะสมฟอสฟอรัสในตะกอนในหนึ่งรอบของการบำบัดดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตละลายน้ำที่สะสมในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 15.9 มก.ฟอสฟอรัส/ล. เมื่อนำน้ำดังกล่าวมาบำบัดในถังปฏิกรณ์เอสปีอารีในสถานะที่มีการเติมเมทานอลเป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนพบว่าการลดลงของฟอสเฟตตั้งแต่ในช่วงแรกของการทำงานและเป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนพบว่าการลดลงของฟอสเฟตตั้งแต่ในช่วงแรกของการทำงานทดลองและมีการลดลงต่อเนื่องเล็กน้อยในช่วงชั่วโมงที่ 4 เป็นต้นไปซึ่งเป็นช่วงที่ไม่มีการเติมอากาศ โดยมีปริมาณฟอสเฟตคงเหลือหลังการบำบัดเท่ากับ  $1.54 \pm 0.13$  มก.ฟอสฟอรัส/ล. และมีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในระบบเฉลี่ยเท่ากับ  $523 \pm 80.74$  มก.ฟอสฟอรัส/ล. ในขณะที่ไม่พบการบำบัดฟอสเฟตในชุดควบคุมและมีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในระบบเฉลี่ยเท่ากับ  $259 \pm 43.16$  มก.ฟอสฟอรัส/ล. (ดังแสดงในรูปที่ 4.7) ผลการทดลองที่แสดงให้เห็นถึงการลดลงของปริมาณความเข้มข้นฟอสเฟตเพียงเล็กน้อยในช่วงชั่วโมงที่ 4 เป็นต้นไปซึ่งเป็นช่วงที่มีการเติมอากาศแสดงให้เห็นว่าการเดินระบบภายใต้สภาวะไร้อากาศเพียงสภาวะเดียวชุดทดลองที่มีการเติมเมทานอลสามารถบำบัดฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในน้ำได้ Barak และ van Rijn, (2000) ได้รายงานว่ามีแบคทีเรีย *Pseudomonas denitrificans* นั้นเป็นแบคทีเรียกลุ่มฟิเอโอที่สามารถบำบัดไนเตรตควบคู่กับฟอสเฟตได้ในสภาวะแอน็อกซิกเพียงสภาวะเดียว โดยไม่จำเป็นต้องเดินระบบแบบแอโรบิกสลับกับแอนอโรบิกหรือแอนอโรบิกสลับกับแอน็อกซิก

#### 4.1.2.2 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดไนโตรเจน

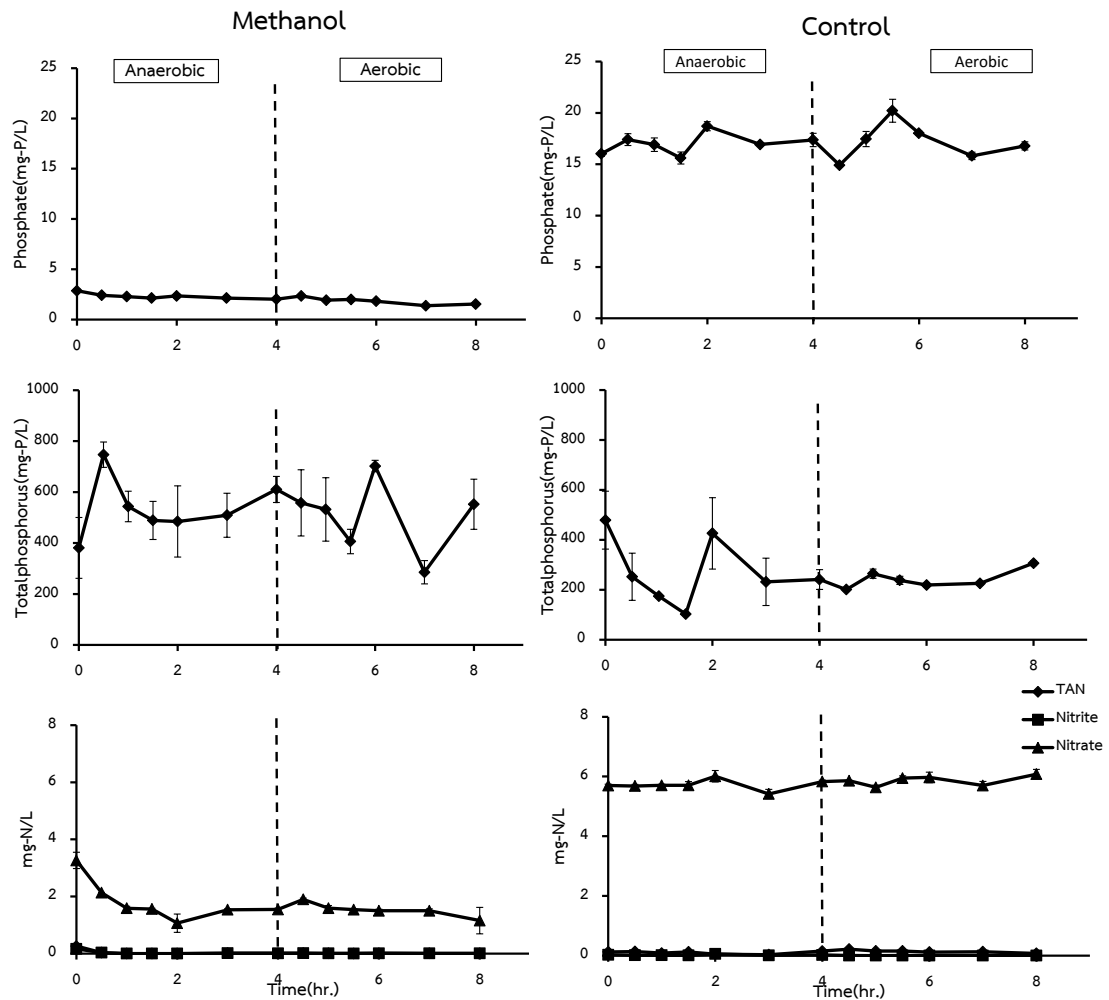
เมื่อติดตามความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจนในรูปต่างๆ คือ แอมโมเนียทั้งหมด, ไนไตรต์ และไนเตรต ในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ชุดที่เติมด้วยเมทานอลและชุดควบคุม ผลแสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) (ANOVA และ Duncan's) ในส่วนของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนและไนไตรต์-ไนโตรเจนเนื่องจากน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจริงจากบ่อเลี้ยงปลาชนิดแบบหมุนเวียนระบบปิดที่ผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ด้วยเทคโนโลยีไบโอฟลอคทำให้มีปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนและไนไตรต์-ไนโตรเจนสะสมอยู่ในปริมาณที่น้อยมาก โดยที่มีการสะสมแอมโมเนีย-ไนโตรเจนและไนไตรต์-ไนเตรตในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียน มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.08 และ 0.01 มก.ไนโตรเจน/ล. ในส่วนของไนเตรต-ไนโตรเจนมีการสะสมในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 5.24 มก.ไนโตรเจน/ล. เมื่อนำน้ำดังกล่าวมาผ่านการบำบัดในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ที่เติมด้วยเมทานอลและติดตามประสิทธิภาพการบำบัดในหนึ่งรอบการทดลองพบว่า ชุดทดลองที่มีการเติมเมทานอลสามารถบำบัดไนเตรตได้ในชั่วโมงแรกของรอบการบำบัดและลดลงต่ำสุดในชั่วโมงที่ 2 เป็นต้นไปและมีไนเตรต-ไนโตรเจนเหลือเพียง  $1.15 \pm 0.08$  มก.ไนโตรเจน/ล. ในขณะที่ไม่พบการบำบัดไนเตรต-ไนโตรเจนในชุดควบคุม (ดังแสดงในรูปที่ 4.7) นั่นคือชุดการทดลองที่ใช้เมทานอลเป็นอินทรีย์คาร์บอนมีการลดลงของไนเตรต-ไนโตรเจนได้โดยอาศัยสภาวะไร้อากาศเพียงสภาวะเดียว เช่นเดียวกับผลในหัวข้อระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดฟอสฟอรัสที่กล่าวมาข้างต้น

#### 4.1.2.3 ผลการติดตามการใช้สารอินทรีย์คาร์บอนในรูปซีโอดี

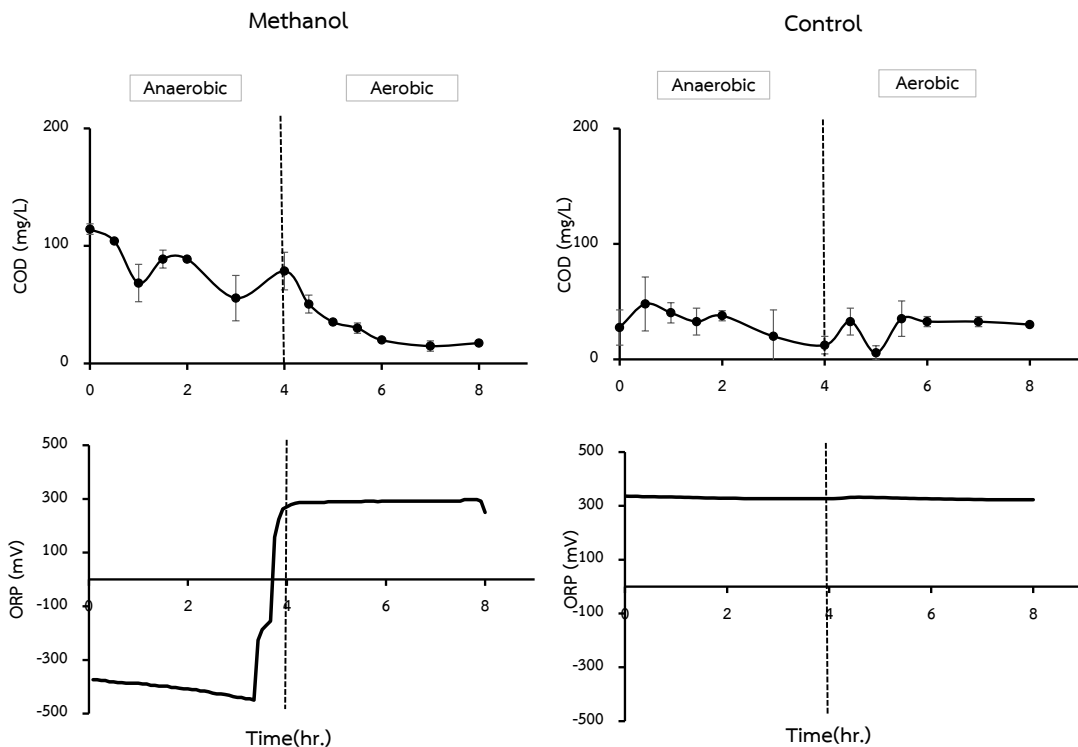
การติดตามการใช้สารอินทรีย์คาร์บอนในรูปซีโอดีเพื่อเป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ในหนึ่งรอบของการบำบัดดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าปริมาณสารอินทรีย์ในชุดควบคุมมีค่าคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลง เนื่องจากไม่ได้มีการเติมอินทรีย์คาร์บอนจากภายนอก ส่วนในชุดการทดลองที่มีการเติมเมทานอลนั้นพบว่า มีการลดลงของปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนตั้งแต่ชั่วโมงที่ 2 และ 3 และจะลดลงจนต่ำสุดในชั่วโมงที่ 4 เป็นต้นไปซึ่งเป็นช่วงที่มีการเติมอากาศ โดยผลการทดลองที่ได้จะสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่าโออาร์พีลดลงในช่วงที่หยุดเติมอากาศ ซึ่งจะพบว่าชุดทดลองที่มีการเติมเมทานอลมีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ในชุดทดลองนั้นคงที่ตลอดการทดลอง (ดังแสดงในรูปที่ 4.8) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Barak และคณะ (2000) ที่รายงานการสะสมโพลีฟอสเฟต



ของดีไนทริไฟอิงแบคทีเรีย *Pseudomonas denitrificans* นั้นจะเกิดขึ้นได้ในสภาวะที่มีสารอินทรีย์คาร์บอนจากภายนอกเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและใช้ออกซิเจนหรือไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความเข้มข้นฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ไนไตรต์-ไนโตรเจน และไนเตรต-ไนโตรเจนในชุดทดลองที่เติมเมทานอล (ซ้าย) และชุดควบคุม (ขวา)



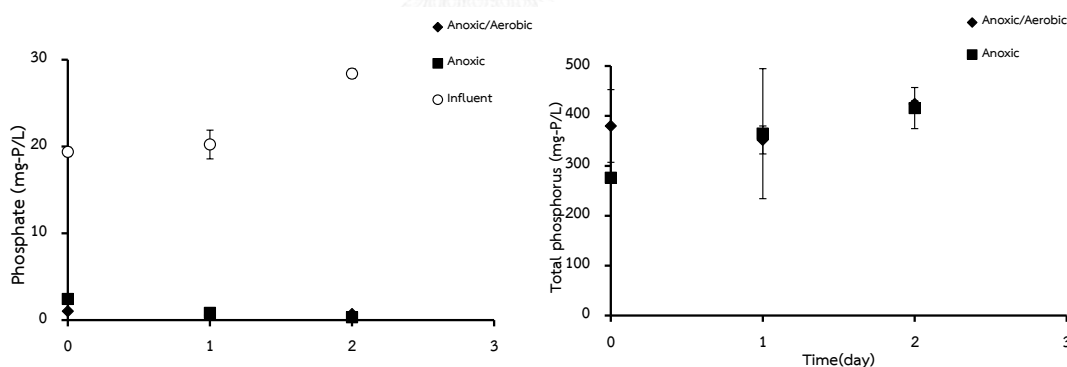
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการติดตามการใช้สารอินทรีย์คาร์บอนในรูปซีโอดี ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในชุดทดลองที่เติมเมทานอล (ซ้าย) และชุดควบคุม (ขวา)

4.2 การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟตภายใต้สภาวะไร้อากาศ/มีอากาศและไร้อากาศในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟตภายใต้สภาวะไร้อากาศ/มีอากาศและไร้อากาศ เติมนระบบการทดลองโดยใช้ถังปฏิกรณ์เช่นเดียวกับการทดลองในช่วงที่ 1 โดยใช้เมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน ที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัส 7:1 แบ่งทำการทดลองออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุดควบคุมเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนเติมนระบบแบบมีอากาศสลับกับไร้อากาศ และชุดทดลองที่เติมเมทานอลเติมนระบบแบบไร้อากาศเพียงสภาวะเดียว เพื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟตภายใต้สภาวะแอน็อกซิก โดยผลการทดลองมีดังนี้

4.2.1 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสภายใต้สภาวะไร้อากาศ/มีอากาศและและไร้อากาศ ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตละลายน้ำที่สะสมในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 22.6 มก.ฟอสฟอรัส/ล. เมื่อนำน้ำดังกล่าวมาบำบัดในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์

ในสภาวะที่มีการเมทานอลเป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนเดินระบบแบบมีอากาศสลับกับไร้อากาศและเดินระบบแบบไร้อากาศเพียงสภาวะเดียว พบว่าทั้ง 2 ชุดการทดลองสามารถบำบัดฟอสเฟตได้จนเหลือเพียง  $0.7 \pm 0.09$  และ  $0.3 \pm 0.00$  มก.ฟอสฟอรัส/ล. ตามลำดับ หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตเท่ากับร้อยละ 96.9 และ 98.6 ตามลำดับ ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตะกอน (ฟอสฟอรัสทั้งหมด) เมื่อสิ้นสุดการบำบัดเท่ากับ  $424 \pm 6.41$  และ  $416 \pm 41.31$  มก.ฟอสฟอรัส/ล. ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 4.9) ดังนั้นการใช้เมทานอลที่ความเข้มข้นซีไอดีต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 7:1 เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนและเดินระบบแบบไร้อากาศเพียงสภาวะเดียวสามารถบำบัดฟอสเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kapagiannidis และคณะ, (2013) ที่รายงานว่าประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสในชุดทดลองที่เดินระบบภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกสลับกับแอโรบิกและชุดทดลองที่เดินระบบภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกสลับกับแอน็อกซิกพบว่าทั้งสองชุดการทดลองสามารถบำบัดฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตละลายน้ำได้ใกล้เคียงกัน เพียงแต่ในชุดทดลองที่เดินระบบภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกสลับกับแอโรบิกจะใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่าชุดทดลองที่เดินระบบภายใต้สภาวะแอนแอโรบิกสลับกับแอน็อกซิก



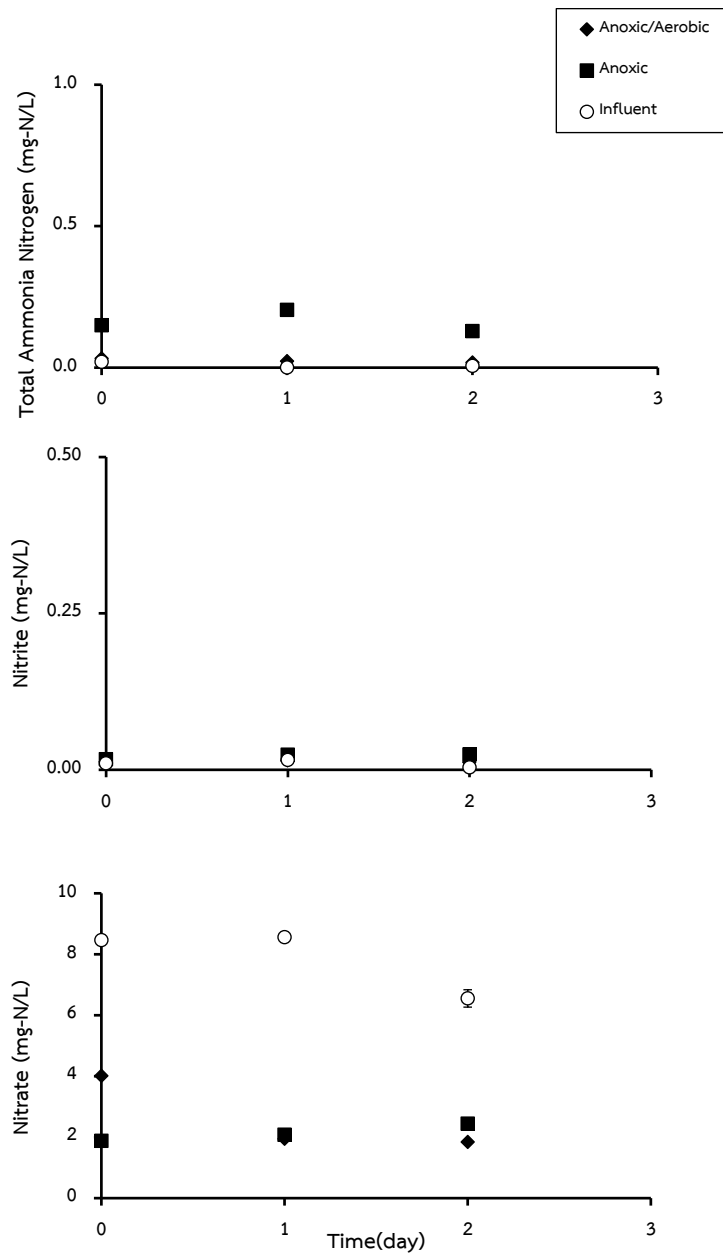
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงปริมาณฟอสเฟต(ซ้าย) และปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด(ขวา) ในปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์ที่เดินระบบไร้อากาศ/มีอากาศและไร้อากาศ

#### 4.2.2 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนภายใต้สภาวะไร้อากาศ/มีอากาศและไร้อากาศ

เมื่อติดตามความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจนในรูปต่างๆ คือ แอมโมเนียทั้งหมด, ไนไตรต์และไนเตรต ในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ชุดควบคุมเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนเดินระบบแบบมีอากาศสลับกับไร้อากาศ และชุดทดลองที่เติมเมทานอลเดินระบบแบบไร้อากาศเพียง

สภาวะเดียว ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.10 ในส่วนของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนและไนไตรต์-ไนโตรเจนทั้ง 2 ชุดการทดลองพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) (ANOVA และ Duncan's) เนื่องจากน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจริงจากบ่อเลี้ยงปลาชนิดแบบหมุนเวียนระบบปิดที่ผ่านกระบวนการบำบัดไนโตรเจนด้วยเทคโนโลยีไบโอฟลอคทำให้มีปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนและไนไตรต์-ไนโตรเจนสะสมอยู่ในปริมาณที่น้อยมาก โดยที่มีการสะสมแอมโมเนียและไนไตรต์ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนเฉลี่ยอยู่ที่  $0.009 \pm 0.00$  และ  $0.01 \pm 0.00$  มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

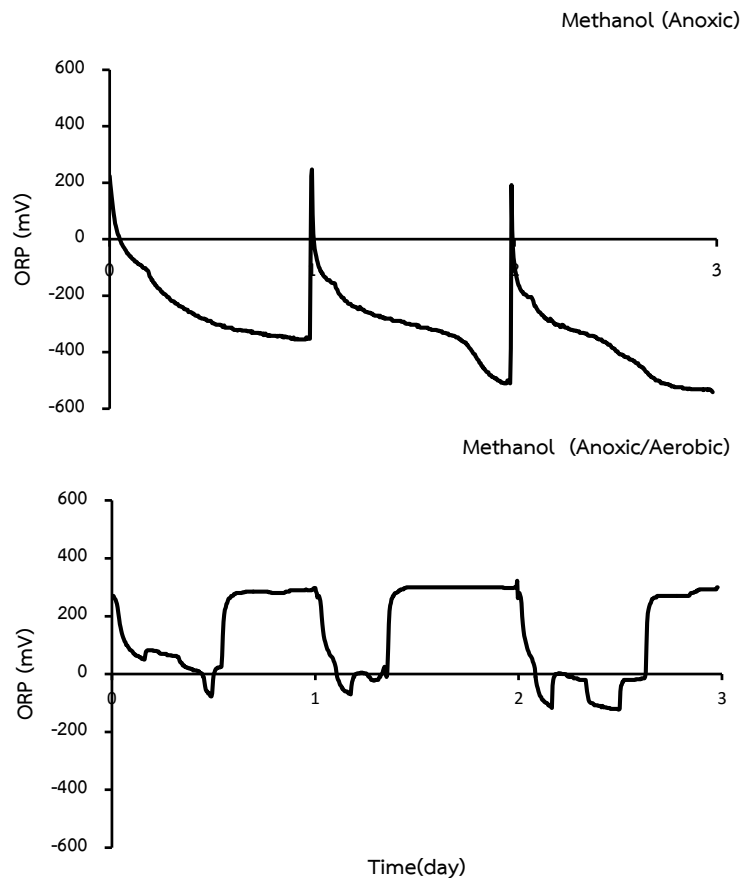
ในส่วนของไนเตรต-ไนโตรเจนที่มีการสะสมในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $7.85$  มก.ไนโตรเจน/ล. เมื่อนำน้ำดังกล่าวมาผ่านการบำบัดในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ชุดควบคุมเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนเดินระบบแบบมีอากาศสลับกับไร้อากาศ และชุดทดลองที่เติมเมทานอลเดินระบบแบบไร้อากาศเพียงสภาวะเดียว พบว่าสามารถบำบัดไนเตรต-ไนโตรเจนเหลือเพียง  $1.84 \pm 0.04$  และ  $2.44 \pm 0.09$  มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตร้อยละ  $76.5$  และ  $68.9$  ตามลำดับชุดควบคุมเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนเดินระบบแบบมีอากาศสลับกับไร้อากาศจึงมีการลดลงของไนเตรต-ไนโตรเจนมากที่สุด (ดังแสดงในรูปที่ 4.10)



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความเข้มข้น แอมโมเนีย-ไนโตรเจน (บน) ไนไตรต์-ไนโตรเจน (กลาง) และ ไนเตรต-ไนโตรเจน (ล่าง) ในปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์ที่เดินระบบแอน็อกซิกและแอน็อกซิก/แอโรบิก

#### 4.2.3 ค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในการบำบัดไนเตรตและฟอสฟอรัสภายใต้สภาวะไร้ อากาศ/มีอากาศและและไร้อากาศ

ผลการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) ในการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและฟอสฟอรัสภายใต้สภาวะแอโนดิก แสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นปริมาณความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่เกิดจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนในน้ำที่วิเคราะห์ได้จากถึงปฏิกรณ์ ทั้ง 2 ชุดการทดลอง พบว่าชุดควบคุมเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนเดินระบบแบบมีอากาศ สลับกับไร้อากาศมีค่าโออาร์พีในช่วงหยุดเติมอากาศอยู่ในช่วง 0 ถึง -50 มิลลิโวลต์ และชุดทดลองที่เติมเมทานอลเดินระบบแบบไร้อากาศเพียงสภาวะเดียวมีค่าโออาร์พีในช่วงหยุดเติมอากาศอยู่ในช่วง 0 ถึง -500 มิลลิโวลต์ (ดังแสดงในรูปที่ 4.11) โดยค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนเตรตจะอยู่ในช่วง -325 ถึง -400 มิลลิโวลต์ (Sillen และคณะ, 1965) ดังนั้นแม้ว่าชุดควบคุมเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนเดินระบบแบบมีอากาศสลับกับไร้อากาศจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรต-ไนโตรเจนที่สูงกว่าชุดทดลองที่เติมเมทานอลเดินระบบแบบไร้อากาศเพียงสภาวะเดียวแต่ชุดทดลองที่เติมเมทานอลเดินระบบแบบไร้อากาศเพียงสภาวะเดียวมีแนวโน้มที่จะบำบัดไนเตรต-ไนโตรเจนได้ดีเช่นกันเนื่องจากมีค่าโออาร์พีที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนเตรต-ไนโตรเจนมากกว่าในชุดควบคุมเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนเดินระบบแบบมีอากาศสลับกับไร้อากาศ อย่างไรก็ตามการทดลองต่อไปเลือกใช้ชุดทดลองที่เติมเมทานอลเดินระบบแบบไร้อากาศเพียงสภาวะเดียวเนื่องจากระบบจะมีค่าใช้จ่ายในการเติมอากาศที่ต่ำ



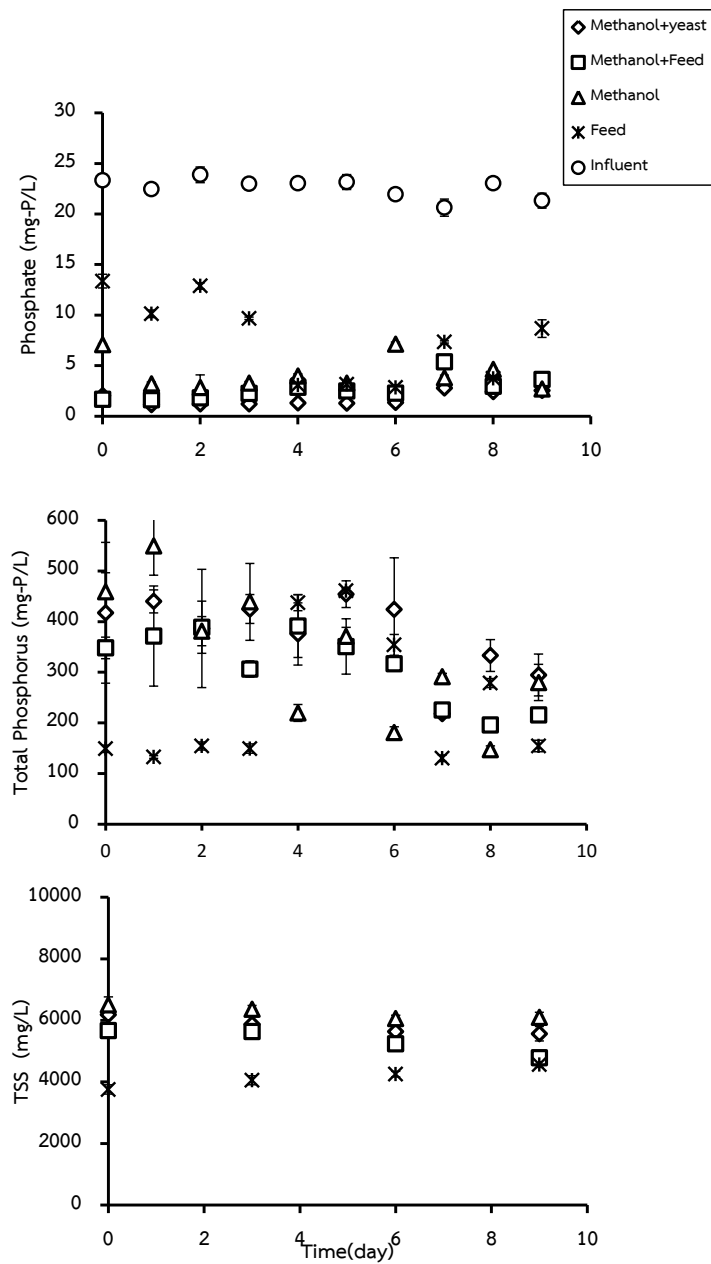
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ที่เดินระบบแอน็อกซิก(บน) และแอน็อกซิก/แอโรบิก(ล่าง)

4.3 การทดลองช่วงที่ 3 การศึกษาใช้อาหารกึ่งสำเร็จรูปทดแทนผงยีสต์สกัดเพื่อใช้เป็นธาตุอาหารเสริมให้กับจุลินทรีย์ PAOs ควบคู่กับการใช้อินทรีย์คาร์บอนในการบำบัดไนเตรตและฟอสฟอรัส

การทดลองช่วงนี้เป็นการทดลองใช้อาหารกึ่งสำเร็จรูปทดแทนผงยีสต์สกัดโดยเพื่อลดต้นทุนในการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟตควบคู่กับการใช้เมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อเลือกใช้ธาตุอาหารเสริมที่ประสิทธิภาพที่สุดในการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟต การปรับอาหารทดแทนนี้อ้างอิงจากค่าไนโตรเจนที่เติมลงไปในระบบ คือ ในการทดลองนี้ใช้ ยีสต์ 4 มก. มีปริมาณโปรตีน 0.25 มก. จึงใช้อาหารกึ่ง 6.578 มก. ซึ่งมีปริมาณโปรตีน 0.25 มก. เท่ากัน โดยผลการทดลองมีดังนี้

4.3.1 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้ธาตุอาหารเสริม ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตละลายน้ำที่สะสมในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบ หมุนเวียนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 22.6 มก.ฟอสฟอรัส/ล. เมื่อนำน้ำดังกล่าวมาบำบัดในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ ที่เดินระบบในสภาวะไร้อากาศ พบว่าทั้ง 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดควบคุมที่เติมเมทานอลเป็น สารอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับผงยีสต์สกัด ชุดทดลองที่เติมเมทานอลสารอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับ อาหารกุ้ง ชุดทดลองที่เติมเฉพาะเมทานอล และชุดทดลองที่เติมเฉพาะอาหารกุ้ง พบว่าทั้ง 4 ชุดการ ทดลองสารบำบัดฟอสเฟตได้จนเหลือเพียง  $1.73 \pm 0.06$ ,  $2.71 \pm 0.06$ ,  $4.19 \pm 0.29$  และ  $7.49 \pm 0.30$  มก.ฟอสฟอรัส/ล. ตามลำดับ หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตเท่ากับร้อยละ 92.3, 88.00, 81.46 และ 66.85 ตามลำดับ ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตะกอน (ฟอสฟอรัสทั้งหมด) เมื่อ สิ้นสุดการบำบัดเท่ากับ  $377 \pm 57.61$ ,  $311 \pm 32.52$ ,  $332 \pm 29.41$  และ  $240 \pm 9.56$  มก.ฟอสฟอรัส/ล. ตามลำดับ และมีปริมาณตะกอนทั้งหมดหลังการบำบัดเท่ากับ  $5,818 \pm 104.21$ ,  $5,335 \pm 131.84$ ,  $6,256 \pm 160.26$  และ  $4,155 \pm 120.48$  9 ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 4.12) จะเห็นได้ว่าชุดทดลองที่มีการ เติมอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับผงยีสต์สกัดจะมีการลดลงของฟอสเฟตมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) (ANOVA และ Duncan's) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fukushima และคณะ 2007 ที่มีการรายงานว่าชุดการทดลองที่มีการเติมอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับผงยีสต์สกัดนั้นจะมี ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสและมีความอุดมสมบูรณ์ของ *Candidatus 'Accumulibacter phosphatis'* ซึ่งเป็นจุลินทรีย์กลุ่มบีโอโอที่ทำหน้าที่บำบัดฟอสฟอรัสในระบบมากกว่าในชุดทดลองที่ เติมอินทรีย์คาร์บอนเพียงอย่างเดียว ดังนั้นชุดทดลองที่มีการเดินระบบแบบไร้อากาศโดยใช้เมทานอล ที่ความเข้มข้นซีไอต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 7:1 เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนระบบและใช้ผงยีสต์ สกัดเป็นธาตุอาหารเสริมสามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

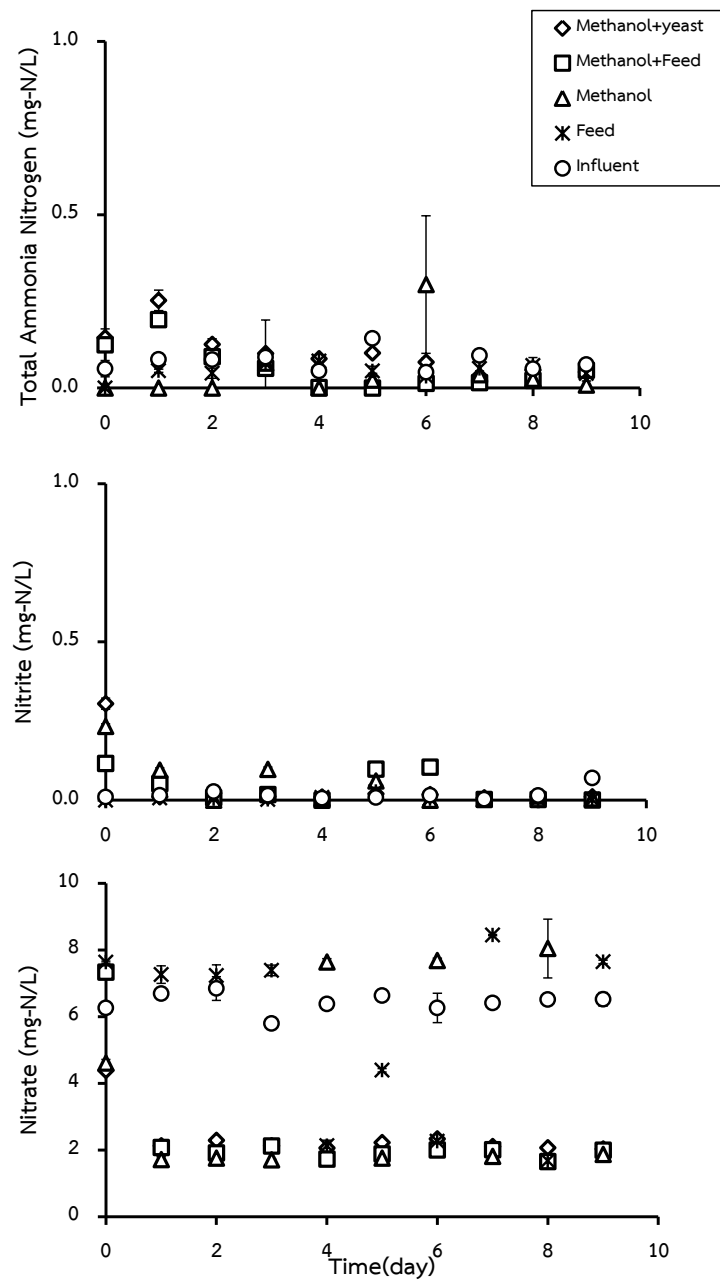




รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความเข้มข้นของฟอสเฟต(บน) การสะสมของฟอสฟอรัสทั้งหมด (กลาง) และ ปริมาณตะกอน(ล่าง) ชุดควบคุมที่เติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับผงยีสต์สกัด ชุดทดลองที่เติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับอาหารกุ้ง ชุดทดลองที่เติมเฉพาะเมทานอล และชุดทดลองที่เติมเฉพาะอาหารกุ้ง

4.3.2 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้ธาตุอาหารเสริม เมื่อติดตามความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจนในรูปต่างๆ คือ แอมโมเนียทั้งหมด, ไนไตรต์และไนเตรต ในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ชุดควบคุมที่เติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับผงยีสต์สกัด ชุดทดลองที่เติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับอาหารกุ้ง ชุดทดลองที่เติมเฉพาะเมทานอล และชุดทดลองที่เติมเฉพาะอาหารกุ้ง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) (ANOVA และ Duncan's) ในส่วนของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนและไนไตรต์-ไนโตรเจนทั้ง 4 ชุดการทดลอง (ดังแสดงในรูปที่ 4.13) เนื่องจากน้ำเสียจากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการทดลองนี้ได้ผ่านปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์แล้ว โดยที่มีการสะสมแอมโมเนีย-ไนโตรเจนและไนไตรต์-ไนโตรเจนในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนเฉลี่ยอยู่ที่  $0.08 \pm 0.01$  และ  $0.07 \pm 0.00$  มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

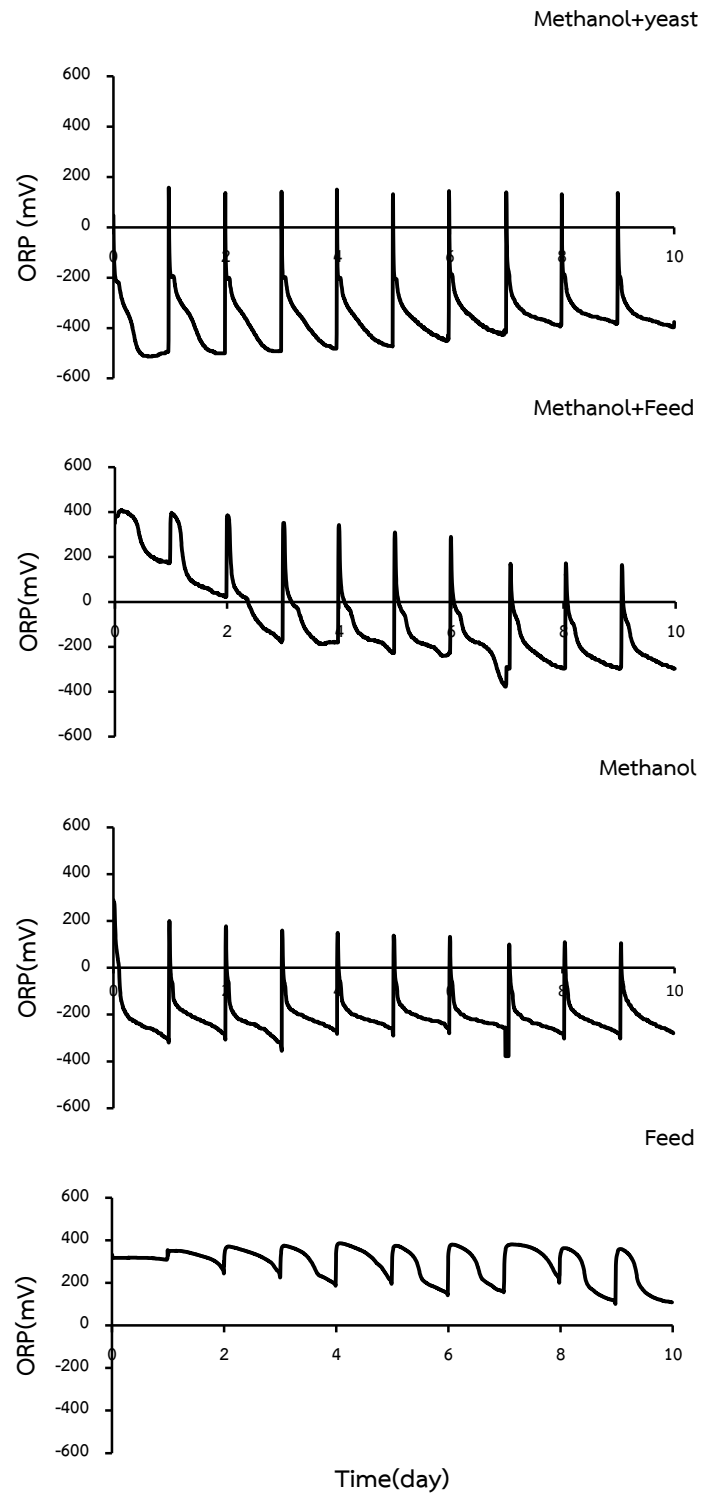
ในส่วนของไนเตรต-ไนโตรเจนมีการสะสมในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $6.43$  มก.ไนโตรเจน/ล. เมื่อนำน้ำดังกล่าวมาผ่านการบำบัดในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ทั้ง 4 ชุดการทดลอง พบว่าสามารถบำบัดไนเตรต-ไนโตรเจนเหลือเพียง  $2.38 \pm 0.06$ ,  $2.47 \pm 0.09$ ,  $3.86 \pm 0.14$  และ  $5.61 \pm 0.12$  มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตร้อยละ 63.0, 61.6, 40.0 และ 12.7 ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 4.13) ดังนั้นชุดควบคุมที่มีการเดินระบบแบบไร้อากาศโดยใช้เมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 7:1 เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนระบบและใช้ผงยีสต์สกัดเป็นธาตุอาหารเสริมจึงมีการลดลงของไนเตรต-ไนโตรเจนมากที่สุด



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนทั้งหมด(บน) ไนไตรต์-ไนโตรเจน (กลาง) และไนเตรต-ไนโตรเจน(ล่าง) ชุดควบคุมที่เติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับผง ยีสต์สกัด ชุดทดลองที่เติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับอาหารกุ้ง ชุดทดลองที่เติม เฉพาะเมทานอล และชุดทดลองที่เติมเฉพาะอาหารกุ้ง

#### 4.3.3 ศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟตเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการใช้ธาตุอาหารเสริม

ผลการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) ในการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของยีสต์สกัดและอาหารกุ้งในการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟตเพื่อเป็นธาตุอาหารเสริมให้กับจุลินทรีย์ PAOs ควบคู่กับการใช้อินทรีย์คาร์บอน ผลแสดงดังรูปที่ 4.14 จากถึงปฏิกรณ์ทั้ง 4 ชุดทดลอง ได้แก่ ชุดควบคุมที่เติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับยีสต์สกัด ชุดทดลองที่เติมเมทานอลสารอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับอาหารกุ้ง ชุดทดลองที่เติมเฉพาะเมทานอล และชุดทดลองที่เติมเฉพาะอาหารกุ้ง พบว่ามีค่าโออาร์พีในช่วงไร้อากาศอยู่ในช่วง 0 ถึง -500, 0 ถึง -300, 0 ถึง -300 และ 0 ถึง 400 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 4.14) โดยค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนเตรตจะอยู่ในช่วง -325 ถึง -400 มิลลิโวลต์ (Sillen และคณะ, 1965) ดังนั้นชุดควบคุมที่มีการเดินระบบแบบไร้อากาศโดยใช้เมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 7:1 เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนระบบและใช้ยีสต์สกัดเป็นธาตุอาหารเสริมจึงมีค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดไนเตรตที่สุด ซึ่งผลของค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันที่ได้นี้ยังสอดคล้องกับปริมาณไนเตรตที่ลดลงในชุดควบคุมอีกด้วย



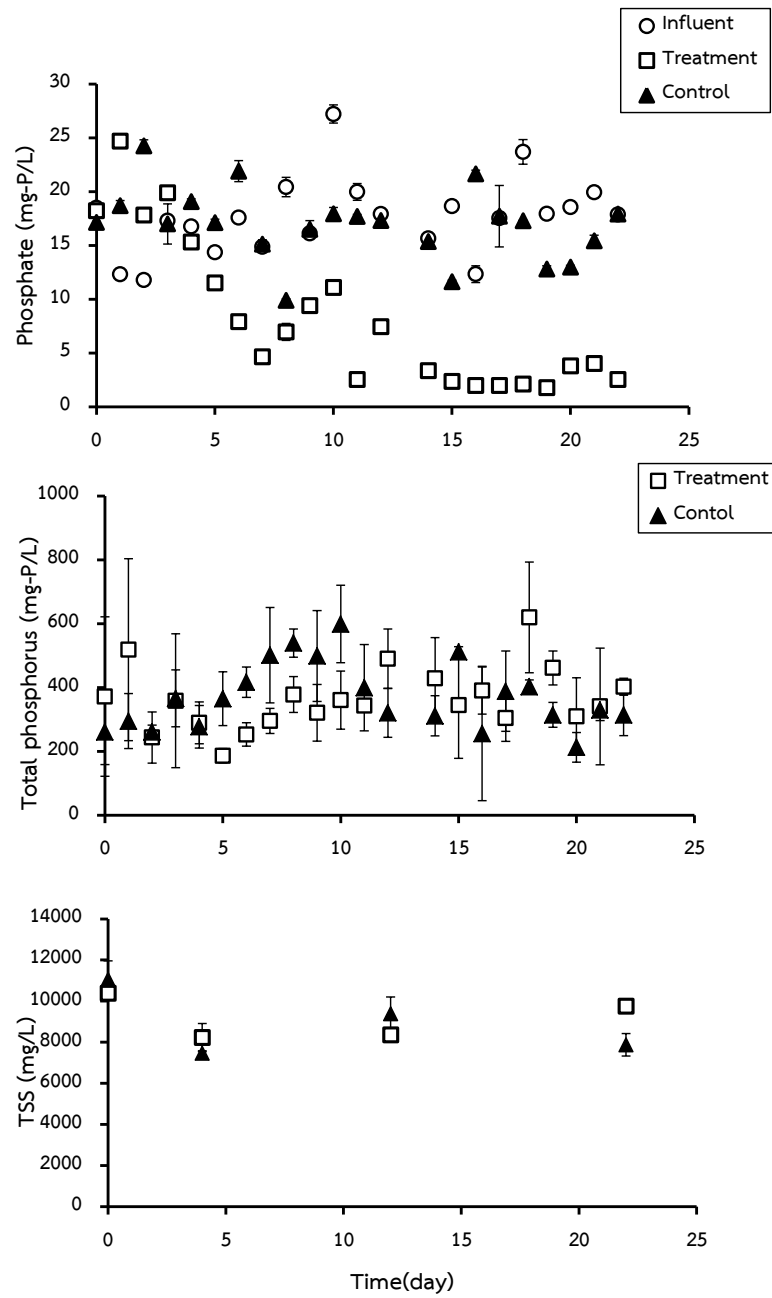
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ ชุดควบคุมที่เติมเมทานอล เป็นสารอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับผงยีสต์สกัด ชุดทดลองที่เติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน ควบคู่กับอาหารกุ้ง ชุดทดลองที่เติมเฉพาะเมทานอล และชุดทดลองที่เติมเฉพาะอาหารกุ้ง

#### 4.4 การทดลองช่วงที่ 4 การทดลองขยายขนาดถึงปฏิกรณ์และเดินระบบบำบัดน้ำเสียจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด

เป็นการประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ภายใต้สภาวะไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด โดยใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ล. เดินระบบโดยเดินระบบแบบไร้อากาศใช้เวลา 24 ชม./รอบการบำบัด โดยใช้เมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 7:1 เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนระบบและใช้ผงยีสต์สกัดเป็นธาตุอาหารเสริม ผลการทดลองมีดังนี้

##### 4.4.1 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสเมื่อประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ล.

ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตละลายน้ำที่สะสมในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 17.61 มก.ฟอสฟอรัส/ล. เมื่อนำน้ำดังกล่าวมาบำบัดในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ชุดควบคุมที่เดินระบบแบบไร้อากาศที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนและธาตุอาหารเสริม และชุดทดลองที่เดินระบบแบบไร้อากาศใช้เวลา 24 ชม./รอบการบำบัด โดยใช้เมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 7:1 เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนระบบและใช้ผงยีสต์สกัด 4 มก./ล. เป็นธาตุอาหารเสริม ผลการทดลองในชุดควบคุมพบว่าไม่สารถบำบัดฟอสเฟตได้โดยพบว่าหลังจากทำการทดลองชุดควบคุมมีฟอสเฟตคงเหลือในระบบเฉลี่ยสูงถึง 16.94 มก.ฟอสฟอรัส/ล. หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดได้เพียงร้อยละ 3.8 เท่านั้น ส่วนผลการทดลองในชุดทดลองที่มีการเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนและผงยีสต์สกัดเป็นธาตุอาหารเสริมนั้นพบว่าระบบจะเริ่มมีประสิทธิภาพการบำบัดและมีอัตราการบำบัดคงที่ตั้งแต่วันที่ 15 ของการทดลองเป็นต้นไป สามารถบำบัดฟอสเฟตได้จนเหลือเพียง  $2.59 \pm 0.01$  มก.ฟอสฟอรัส/ล. หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตเท่ากับร้อยละ 85 นอกจากนี้ ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตะกอน (ฟอสฟอรัสทั้งหมด) เมื่อสิ้นสุดการบำบัดชุดควบคุมและชุดทดลองเท่ากับ  $315 \pm 32.52$  และ  $403 \pm 26.65$  มก.ฟอสฟอรัส/ล. ตามลำดับ และมีปริมาณตะกอนทั้งหมดหลังการบำบัดเท่ากับ  $7,873 \pm 87.18$  และ  $9,760 \pm 543.07$  ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 4.15) ดังนั้นชุดทดลองที่มีการเดินระบบแบบไร้อากาศโดยใช้เมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 7:1 เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนระบบและใช้ผงยีสต์สกัดเป็นธาตุอาหารเสริมสามารถบำบัดฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ



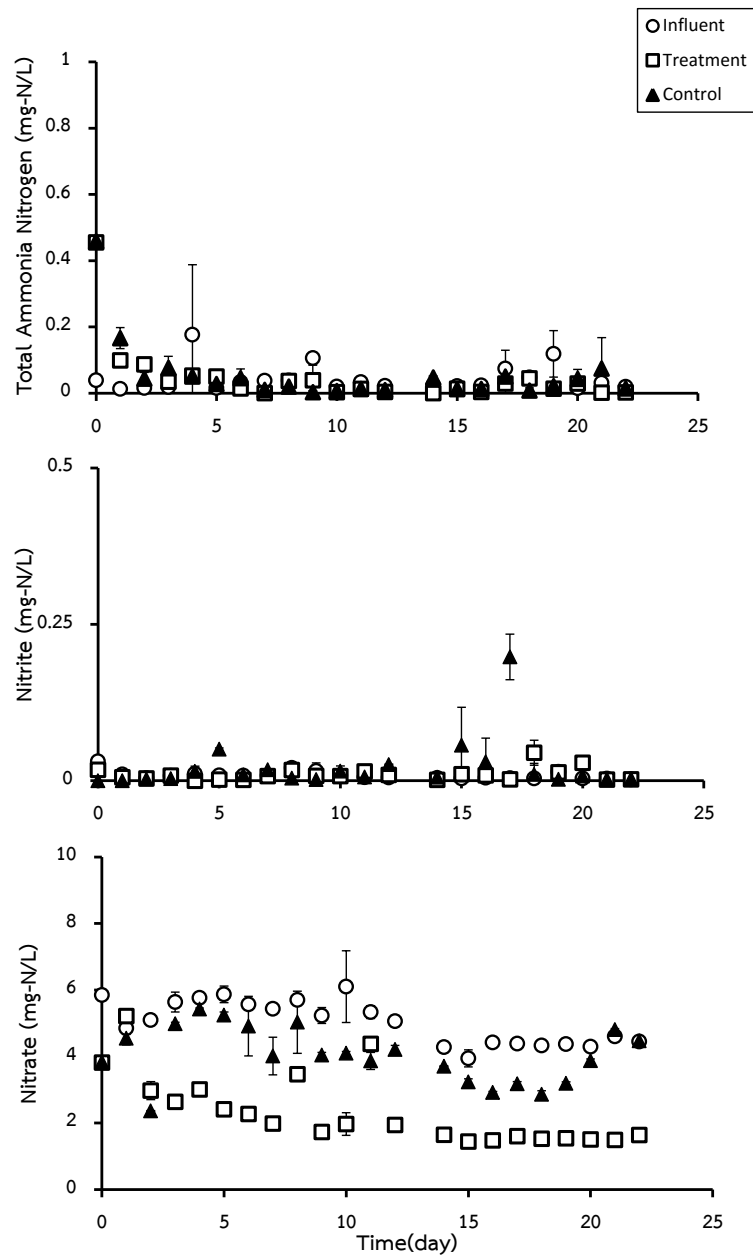
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความเข้มข้นของฟอสเฟต(บน) การสะสมของฟอสฟอรัสทั้งหมด(กลาง) และ ปริมาณตะกอนทั้งหมด(ล่าง) ในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ขนาด 16 ล.

#### 4.4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนเมื่อประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ล.

เมื่อติดตามความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจนในรูปต่างๆ คือ แอมโมเนียทั้งหมด, ไนไตรต์และไนเตรต ในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ชุดควบคุมที่เดินระบบแบบไร้อากาศไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนและธาตุอาหารเสริม และชุดทดลองที่เดินระบบแบบไร้อากาศใช้เวลา 24 ชม./รอบการบำบัด โดยใช้เมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 7:1 เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนระบบและใช้ผงยีสต์สกัดเป็นธาตุอาหารเสริม ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) (ANOVA และ Duncan's) ในส่วนของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนและไนไตรต์-ไนโตรเจนทั้ง 2 ชุดการทดลอง (ดังแสดงในรูปที่ 4.16) เนื่องจากน้ำเสียจากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการทดลองนี้ได้ผ่านปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์แล้ว โดยที่มีการสะสมแอมโมเนียและไนไตรต์ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนเฉลี่ยอยู่ที่  $0.004 \pm 0.02$  และ  $0.008 \pm 0.00$  มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

ในส่วนของไนเตรต-ไนโตรเจนมีการสะสมในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $5.03$  มก.ไนโตรเจน/ล. เมื่อนำน้ำดังกล่าวมาผ่านการบำบัดในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ในชุดควบคุมพบว่าไนเตรต-ไนโตรเจนเฉลี่ยหลังการบำบัดเท่ากับ  $4.04 \pm 0.18$  มก.ไนโตรเจน/ล. หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตได้เพียงร้อยละ 19.7 ส่วนในชุดทดลองพบว่าระบบจะเริ่มมีประสิทธิภาพการบำบัดและมีอัตราการบำบัดคงที่ตั้งแต่วันที่ 12 ของการทดลองเป็นต้นไปโดยสามารถบำบัดไนเตรต-ไนโตรเจนเหลือเพียง  $1.58 \pm 0.08$  มก.ไนโตรเจน/ล. (ดังแสดงในรูปที่ 4.16) หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตร้อยละ 68.6 (สำหรับไนเตรต-ไนโตรเจนที่คงเหลือหลังการบำบัดทั้ง 3 ความเข้มข้นถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำมากเนื่องจากวิธีวัดปริมาณไนเตรตไนโตรเจนที่ใช้เป็นวิธียูริสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ซึ่งสามารถวัดค่าต่ำสุดได้เพียง 2 มก.ไนโตรเจน/ล.) ดังนั้นชุดทดลองที่เดินระบบแบบไร้อากาศใช้เวลา 24 ชม./รอบการบำบัด โดยใช้เมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 7:1 เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนระบบและใช้ผงยีสต์สกัดเป็นธาตุอาหารเสริมจึงมีการลดลงของไนเตรต-ไนโตรเจนมากที่สุด

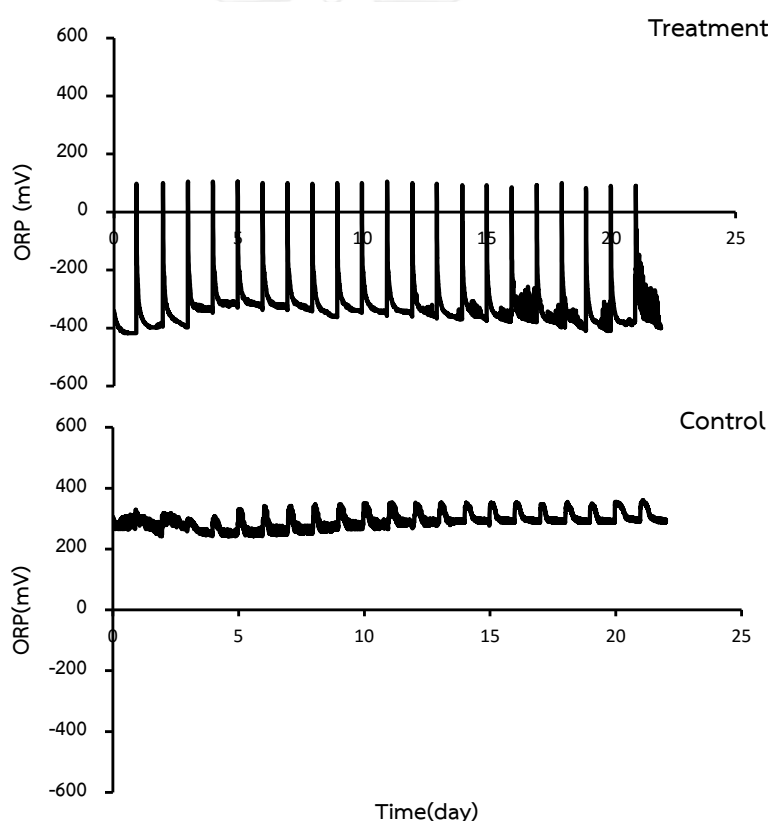




รูปที่ 4.16 กราฟแสดงปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนทั้งหมด(บน) ไนไตรต์-ไนโตรเจน (กลาง) และไนเตรต-ไนโตรเจน(ล่าง) ในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ขนาด 16 ล.

4.4.3 ศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในการบำบัดไนเตรตและฟอสฟอรัสเมื่อประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์ ขนาด 16 ล.

ผลการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) เมื่อประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์ ขนาด 16 ล. เพื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากระบบการเลี้ยง สัตว์น้ำแบบหมุนเวียน เมื่อเดินระบบโดยเดินระบบแบบไร้อากาศใช้เวลา 24 ชม./รอบการบำบัด โดยใช้เมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 7:1 เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนระบบ และใช้ผงยีสต์สกัดเป็นธาตุอาหารเสริมพบว่าค่าโออาร์พีในช่วงไร้อากาศอยู่ในช่วง 0 ถึง -400 มิลลิ โวลต์ (ดังแสดงในรูปที่ 4.17) ซึ่งเป็นค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการ บำบัดไนเตรต ในขณะที่ชุดควบคุมไม่มีการติดลบของค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ ชุดควบคุมที่เดินระบบแบบ ไร้อากาศที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนและธาตุอาหารเสริม และชุดทดลองที่เดินระบบแบบไร้ อากาศใช้เวลา 24 ชม./รอบการบำบัด โดยใช้เมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 7:1 เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนระบบและใช้ผงยีสต์สกัดเป็นธาตุอาหารเสริม

สำหรับพารามิเตอร์ต่างๆทางคุณภาพน้ำของน้ำในถังปฏิกรณ์โดยคุณภาพน้ำต่างๆที่วัดได้ทั้ง 4 การทดลองที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.5-8 อุณหภูมิ 28 °ซ ตลอดการทดลองซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อกระบวนการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ดังที่ Nan และ Yan, 2016 รายงานว่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการบำบัดฟอสฟอรัสต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 7.5 ส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมต้องอยู่ระหว่าง 25-30°ซ เนื่องจากพีเอชที่ต่ำกว่า 7.25 และอุณหภูมิที่สูงกว่าที่กล่าวมาจะทำให้จุลินทรีย์กลุ่ม GAO เจริญได้ดีมีผลทำให้ระบบบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพล้มได้ และ Bitton, 1994 กล่าวว่า การเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในน้ำเสียที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดจะเกิดที่พีเอช 7.0-8.5 ส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 30-35°ซ อุณหภูมิที่ต่ำก็สามารถเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้แต่อัตราการเกิดจะต่ำกว่า

จากผลการทดลองดังกล่าวมาข้างต้นนี้อาจกล่าวได้ว่าจุลินทรีย์ที่มีบทบาทในการบำบัดไนเตรตและฟอสฟอรัสในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ในงานวิจัยนี้เป็นจุลินทรีย์กลุ่ม Denitrifying Polyphosphate Accumulating Organisms หรือ DNPAOs เนื่องจากพบว่ากระบวนการบำบัดไนเตรตและไนโตรเจนนั้นเกิดขึ้นโดยการใช้สารอินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งพลังงานได้สภาวะไร้อากาศหรือแอน็อกซิกโดยสังเกตได้จาก ค่าศักยภาพออกซิเดชัน-รีดักชันที่มีค่าการติดลบอยู่ในช่วง 0 ถึง - 400 มิลลิโวลต์ นอกจากนั้นยังพบว่ามีสารสะสมฟอสฟอรัสทั้งหมดที่อยู่ในระบบจะสะสมอยู่ในตะกอนในปริมาณที่สูง ซึ่งงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shnel และคณะ, (2002) Barak และ van Rijn, (2000) เก็บฟอสฟอรัสไว้ในเซลล์ซึ่งอยู่ในชั้นตะกอนเช่นเดียวกัน ดังนั้นมีความเป็นไปได้ว่าในงานวิจัยของ Pungrasmi และคณะ, (2015) ที่ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดด้วยคอลัมน์ร่วมย่อยตะกอน-ดีไนตริฟิเคชัน โดยการใช้เมทานอลเป็นอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 3:1 ซึ่งทำการทดลองไปก่อนหน้านี้หากมีการปรับสภาวะการเดินระบบและการเพิ่มความเข้มข้นสารอินทรีย์คาร์บอนที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่ม DNPAOs ระบบอาจจะสามารถบำบัดไนเตรตและฟอสฟอรัสออกจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำได้เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.2 ทบทวนเอกสารอัตราการใช้บำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของงานวิจัยอื่นเทียบกับงานวิจัยนี้

ที่มา	น้ำเสียที่บำบัด	รูปแบบถังปฏิกรณ์	ชนิดและความเข้มข้นอินทรีย์คาร์บอน	คุณภาพน้ำก่อนการบำบัด (มก./ล.)	คุณภาพน้ำหลังการบำบัด (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
McMahon และ คณฯ 2002	บำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชน	ถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์	อะซิเตท (COD:P=16:1)	$PO_4^{3-} = 12.6$	$PO_4^{3-} = 0.1$	99
Tsuneda และ คณฯ 2006	บำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์	ถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์	อะซิเตท (COD:P=27:1)	$PO_4^{3-} = 11.0$ $NO_3^- = 30.0$	$PO_4^{3-} = 0.88$ $NO_3^- = 5.1$	92 83
Xiao และคณฯ 2014	บำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์	ถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์	อะซิเตท (COD:P=33:1)	$PO_4^{3-} = 6.0$ $NO_3^- = 20.0$	$PO_4^{3-} = 0.72$ $NO_3^- = 2.0$ - 7.0	88 65-90
Xiao และคณฯ 2016	บำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียชุมชน	ถังฟลูอิดไดซ์ เติน ระบบแบบ $A_2O$	ไม่ใช้อินทรีย์คาร์บอน	$PO_4^{3-} = 8.27$ $NO_3^- = 44.05$ $NH_3 = 21.98$	$PO_4^{3-} = 0.32$ $NO_3^- = 8.07$ $NH_3 = 0.81$	99 82 96
งานวิจัยนี้	บำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนระบบปิด	ถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์	เมทานอล(COD:P=7:1) และผงยีสต์สกัดเป็นธาตุอาหารเสริม	$PO_4^{3-} = 17.61$ $NO_3^- = 5.03$	$PO_4^{3-} = 2.56$ $NO_3^- = 1.53$	85 70

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดไนโตรเจนร่วมกับฟอสฟอรัสสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนระบบปิดโดยสนใจไนโตรเจนในรูปแบบไนเตรตและฟอสฟอรัสในรูปแบบฟอสเฟตดำเนินการทดลองในถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ เพื่อพัฒนาถึงปฏิกรณ์ในสามารถบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ในถังปฏิกรณ์เพียงใบเดียว เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายลดปริมาณการใช้น้ำและลดพื้นที่ในส่วนของการติดตั้งระบบบำบัดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับฟาร์มเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์ในอนาคต ช่วงแรกของการทดลองจะเป็นการศึกษาหาชนิดของอินทรีย์คาร์บอน อัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัสเมื่อแปรค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัสในระบบ และระยะเวลาที่เหมาะสมในการเดินระบบเพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นปฏิกิริยาการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพต่อการทดลองช่วงที่สองที่ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟตภายใต้สภาวะไร้อากาศสลักับมีอากาศและสภาวะไร้อากาศเพียงสภาวะเดียวเพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบหลังจากนั้นจะเป็นการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพผงยีสต์สกัดและอาหารกุ้งในการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟตเพื่อเป็นธาตุอาหารเสริมให้กับจุลินทรีย์ PAOs ควบคู่กับการใช้อินทรีย์คาร์บอนเพื่อเลือกใช้ธาตุอาหารเสริมที่ประสิทธิภาพที่สุดในการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟตและการทดลองช่วงสุดท้ายจะเป็นการปรับขนาดถึงปฏิกรณ์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการใช้ถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ในการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนระบบปิดโดยสามารถสรุปได้ดังนี้

การศึกษาชนิดของอินทรีย์คาร์บอนและอัตราส่วนซีโอดีต่อฟอสฟอรัสที่เหมาะสมในการกระตุ้นปฏิกิริยาการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้เมทานอลและอะซิเตทเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอนโดยแปรค่าความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัสของสารอินทรีย์คาร์บอนที่แตกต่างกัน 3 ระดับคือ 7:1 14:1 และ 25:1 ผลการทดลองพบว่าชุดทดลองที่ใช้เมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนสามารถบำบัดไนเตรตและฟอสเฟตได้ดีกว่าชุดทดลองที่เติมอะซิเตทเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน นอกจากนั้นยังพบว่าที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัสทั้ง 3 ระดับ มีอัตราการบำบัดที่ใกล้เคียงกัน โดยชุดการทดลองที่เติมเมทานอลสามารถบำบัดฟอสเฟตได้จนเหลือเพียง

1.17±0.02, 0.83±0.04 และ 0.91±0.08 มก.ฟอสฟอรัส/ล. ตามลำดับหรือคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสเท่ากับร้อยละ 93 95 และ 94 ตามลำดับ และสามารถบำบัดไนเตรต-ไนโตรเจนเหลือเพียง 1.76±0.06, 2.34±0.07 และ 1.97±0.17 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตร้อยละ 65 54 และ 61 ตามลำดับ สำหรับไนเตรต-ไนโตรเจนที่คงเหลือหลังการบำบัดทั้ง 3 ความเข้มข้นถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำมากเนื่องจากวิธีวัดปริมาณไนเตรต-ไนโตรเจนที่ใช้เป็นวิธียูริสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ซึ่งสามารถวัดค่าต่ำสุดได้เพียง 2 มก.ไนโตรเจน/ล. จึงเลือกใช้เมทานอลเป็นอินทรีย์คาร์บอนที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัส 7:1 เพื่อเป็นการประหยัดทรัพยากรและลดค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเมื่อประยุกต์ใช้กับฟาร์มเชิงพาณิชย์

ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพโดยกลุ่มจุลินทรีย์พีเอโอเมื่อใช้เมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนโดยติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในหนึ่งรอบของการบำบัดเพื่อประเมินระยะเวลาที่เหมาะสมในการเดินระบบ ผลการทดลองพบว่าการเดินระบบภายใต้สภาวะไร้อากาศเพียงสภาวะเดียวมีแนวโน้มที่จะสามารถบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในน้ำได้เนื่องจากการลดลงของปริมาณไนเตรตและฟอสเฟตในช่วง 2-3 ชม. แรกซึ่งเป็นช่วงที่หยุดให้อากาศ

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและฟอสเฟตภายใต้สภาวะไร้อากาศสลับกับมีอากาศและสภาวะไร้อากาศเพียงสภาวะเดียวด้วยถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์เดินระบบโดยใช้โดยใช้เมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน ที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัส 7:1 แบ่งทำการทดลองออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุดควบคุมเติมเมทานอลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนเดินระบบแบบมีอากาศสลับกับไร้อากาศ และชุดทดลองที่เติมเมทานอลเดินระบบแบบไร้อากาศเพียงสภาวะเดียว ผลการทดลองพบว่าทั้ง 2 ชุดการทดลองสามารถบำบัดฟอสเฟตได้จนเหลือเพียง 0.7±0.09 และ 0.3±0.00 มก.ฟอสฟอรัส/ล. ตามลำดับ หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสเท่ากับร้อยละ 96.9 และ 98.6 ตามลำดับ ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด เมื่อสิ้นสุดการบำบัดเท่ากับ 424±6.41 และ 416±41.31 มก.ฟอสฟอรัส/ล. ตามลำดับ และสามารถบำบัดไนเตรต-ไนโตรเจนเหลือเพียง 1.84±0.04 และ 2.44±0.09 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตร้อยละ 76.5 และ 68.9 ตามลำดับ ดังนั้นการใช้เมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอดีต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 7:1 เป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอนระบบแบบไร้อากาศเพียงสภาวะเดียวสามารถบำบัดไนโตรเจนฟอสฟอรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การศึกษาการใช้อาหารกึ่งทดแทนผงยีสต์สกัดเพื่อเป็นธาตุอาหารเสริมให้กับจุลินทรีย์ PAOs ควบคู่กับการใช้อินทรีย์คาร์บอนเพื่อเลือกใช้ธาตุอาหารเสริมที่ประสิทธิภาพที่สุดในการบำบัดไนเตรต และฟอสเฟต ผลการทดลองพบว่าแม้ว่าจะใช้อาหารกึ่งที่มีปริมาณโปรตีนที่เท่ากับผงยีสต์สกัด แต่ชุดทดลองที่มีการเติมอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับผงยีสต์สกัดยังคงมีประสิทธิภาพในการบำบัด ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสมากกว่าการใช้อาหารกึ่งเป็นธาตุอาหารเสริมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) (ANOVA และ Duncan's)

การประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ภายใต้สภาวะไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียจากระบบเลี้ยง สัตว์น้ำแบบปิด โดยใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิ. เติลระบบโดยเติลระบบแบบไร้อากาศใช้เวลา 24 ชม./รอบการบำบัด โดยใช้เมทานอลที่ความเข้มข้นซีโอติต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 7:1 เป็นแหล่งของ สารอินทรีย์คาร์บอนระบบและใช้ผงยีสต์สกัดเป็นธาตุอาหารเสริม พบว่าระบบจะเริ่มมีประสิทธิภาพ การบำบัดและมีอัตราการบำบัดฟอสฟอรัสที่ตั้งแต่วันที่ 15 ของการทดลองเป็นต้นไปโดยสามารถ บำบัดฟอสเฟตได้จนเหลือเพียง  $2.59 \pm 0.01$  มก.ฟอสฟอรัส/ล.หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด ฟอสฟอรัสเท่ากับร้อยละ 85 นอกจากนั้น ปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมในตะกอน (ฟอสฟอรัสทั้งหมด) เมื่อสิ้นสุดการบำบัดเท่ากับ  $403 \pm 26.65$  มก.ฟอสฟอรัส/ล. ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรต พบว่าระบบจะเริ่มมีประสิทธิภาพการบำบัดและมีอัตราการบำบัดที่ตั้งแต่วันที่ 12 ของการทดลอง เป็นต้นไปโดยสามารถบำบัดไนเตรต-ไนโตรเจนเหลือเพียง  $1.58 \pm 0.08$  มก.ไนโตรเจน/ล. หรือคิดเป็น ประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตร้อยละ 68.6 (สำหรับไนเตรต-ไนโตรเจนที่คงเหลือหลังการบำบัดทั้ง 3 ความเข้มข้นถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำมากเนื่องจากวิธีวัดปริมาณไนเตรตไนโตรเจนที่ใช้เป็นวิธียูวีสเปก โตรโฟโตมิเตอร์ซึ่งสามารถวัดค่าต่ำสุดได้เพียง 2 มก.ไนโตรเจน/ล.) แม้ว่าประสิทธิภาพการบำบัด ฟอสฟอรัสที่ได้จากงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพที่ไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น (แสดงดังตารางที่ 4.1 ) แต่เมื่อคำนวณปริมาณฟอสเฟตที่ถูกบำบัดกลับพบว่างานวิจัยนี้สามารถบำบัดฟอสเฟตได้สูงถึง 15.05 มก.ฟอสฟอรัส/ล. ในขณะที่งานวิจัยที่สามารถบำบัดฟอสเฟตที่สูงที่สุดอย่าง McMahon และ คณะ (2002) แต่กลับว่าปริมาณฟอสเฟตที่ถูกบำบัดมีเพียง 12.5 มก.ฟอสฟอรัส/ล. ซึ่งต่ำกว่าใน งานวิจัยนี้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนระบบปิดโดยใช้ถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ในการควบคุมคุณภาพน้ำ จะเป็นการลดปริมาณน้ำเสียที่จะเกิดขึ้น และช่วยป้องกันมลพิษทางน้ำก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นการศึกษาวิจัยหาแนวทางเพิ่มเติมเพื่อหาแนวทางให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ ซึ่งข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางการศึกษาเพิ่มเติมสำหรับงานวิจัยนี้ได้แก่

5.2.1 แม้ว่า การประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์ภายใต้สภาวะไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด โดยใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ล. จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสได้ถึงร้อยละ 85 แต่สำหรับงานวิจัยนี้จะนำน้ำที่ได้หลังการบำบัดวนกลับไปใช้ใหม่ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ ดังนั้นหากจะใช้ระบบบำบัดในงานวิจัยนี้บำบัดน้ำเพื่อปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมควรศึกษาพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่สูงกว่านี้เนื่องจากปริมาณฟอสเฟตหลังการบำบัดยังคงสูงกว่ากฎหมายกำหนดจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาแนวทางในการพัฒนาระบบบำบัดให้น้ำเสียที่ได้ผ่านมาตรฐานตามกฎหมาย

5.2.2 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมทางด้านชีววิทยาระดับโมเลกุลเพื่อระบุชนิดของจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในระบบให้ได้อย่างชัดเจนเพื่อประโยชน์ในการพัฒนาระบบการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสน้ำเสียจากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนระบบปิดที่มีประสิทธิภาพในอนาคต



## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2543. วิศวกรรมกรรมการกำจัดน้ำเสียเล่มที่ 4. พิมพ์ครั้งที่ 1 มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพมหานคร. 645 หน้า
- คณิต ไชยาคำ และยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร. 2537. แนวทางป้องกันเพื่อลดผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมจากการพัฒนาการเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนา. สถาบันวิจัยสัตว์น้ำชายฝั่งสงขลา. กรมประมง. กระทรวงการเกษตรและสหกรณ์. 27 หน้า.
- ชลอ ลิมสุวรรณ. 2535. คัมภีร์การเลี้ยงกุ้งกุลาดำ. พิมพ์ครั้งที่ 2 สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพมหานคร
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1 สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพมหานคร 703 หน้า.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2538. การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจน. เอกสารประกอบการอบรมการจัดการโครงการก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสีย วันที่ 15-25 สิงหาคม 2538 ฝ่ายการศึกษาต่อเนื่องจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมเล่ม 2. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร 245 หน้า.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์ และไพโรพรรณ พรประภา. 2536. การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. กรุงเทพมหานคร.
- ธัญญา พันธุ์ฤทธิ์ดำ. 2541. ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่มีระบบดีไนตริฟิเคชันสำหรับการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*). วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธีรพงษ์ จริญญากรณ์. 2545. การใช้สาหร่ายช่อพริกไทย *Caulerpa lentillifera* เพื่อควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิชัย ลาภจตุพร และอรทัย เตี้ยววณิชย์. 2335. พีเอช. ฝ่ายวิชาการบริษัทแลปอินเตอร์จำกัด.
- ศิริวัฒน์ คุณเจริญไพบูลย์. 2544. การกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในตู้เลี้ยงปลาน้ำจืดระบบปิดโดยกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเลคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์. 2552. ระบบบำบัดน้ำเสีย : การเลือกใช้ การออกแบบ การควบคุม และการแก้ไข้ปัญหา. กรุงเทพฯท้อป. 560 หน้า

### ภาษาอังกฤษ

APHA, AWWA, WEF. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater (19<sup>th</sup> edition). United book press, Washington, D.C. 1193 p.

Barak, Y., Cytryn, E., Gelfand, I., Krom, M. and van Rijn, J. 2003. Phosphorus removal in a marine prototype, recirculating aquaculture system. Aquaculture 220, 313-326.

Barak, Y. and van Rijn, J., 2000. Atypical Polyphosphate Accumulation by the Denitrifying Bacterium *Paracoccusdenitrificans*. Applied and Environmental Microbiology 66, 1209-1212.

Barak, Y. and van Rijn, J. 2000. Biological phosphate removal in a prototype recirculating aquaculture treatment system. Aquacultural Engineering 22, 121-136.

Bitton, G.B. 1994. Wastewater microbiology. New York, USA: John Willey &Son. 51-61p.

Burut-Archanai, S., Julian, J., Incharoensakdi, A. and Powtongsook, S. 2013 Phosphorus removal in a closed recirculating aquaculture system using the cyanobacterium, *Synechocystis* sp. PCC 6803 strain lacking the SphU regulator of the Pho regulon. Biochemical Engineering Journal 74, 69-75.

Chen, J. and Chin, T. 1988. Acute toxicity of nitrite of Tiger prawn *Penaeus monodon*, larva. Aquaculture 69, 253-262.

Epifano, C.F. and Srna, R.F. 1975. Toxicity of ammonia, nitrite ion, nitrate ion, orthophosphate to *Mercenaria mercenaria* and *Crassostrea virginica*. Marine Biology 33, 241-246.

Fukushima, T., Uda, N., Okamoto, M., Satoh. H. and Mino, T. 2007. Abundance of *Candidatus 'Accumulibacter phosphatis'* in enhanced biological phosphorus

- removal activated sludge acclimatized with different carbon sources. Microbes Environment 22(4), 346-354.
- Gonzalez-Gil G., Holliger C. 2011. Dynamics of microbial community structure of and enhanced biological phosphorus removal by aerobic granules cultivated on propionate or acetate. Applied Environmental Microbiology 77(22), 8041–8051.
- He SM, Bishop FI, McMahon KD. 2010. Bacterial community and *Candidatus Accumulibacter* population dynamics in laboratoryscale enhanced biological phosphorus removal reactors. Applied Environmental Microbiology 76(16), 5479-5487.
- Kapagiannidis, A.G., Zafiriadis, I. and Aivasidis, A., 2011. Upgrading the efficiency of an external nitrification BNR system-The modified Dephanox process. Chemical Engineering Journal 175. 124-135.
- Katherine, D.M., Michael, A.D., Norman, R.P., David, J. and Jay D.K. 2002. Polyphosphate Kinase from Activated Sludge Performing Enhanced Biological Phosphorus Removal. Applied and Environmental Microbiology. 4971-4978
- Keke, X., Lu, Z., Beiping, He., Liang, Q., Shuo, W. and Liping, Q. 2016. Nitrogen and Phosphorus removal using Fluidized-carriers in a Full-scale A<sup>2</sup>O biofilm system. Biochemical Engineering Journal 115. 47-55.
- Lee, P.G., Lea, R.N., Dohmann, E., Prebilsky, W., Turk, P.E., Ying, H. and Whitson, J.L. 2000. Denitrification in aquaculture systems: an example of a fuzzy logic control problem. Aquacultural Engineering 23, 37-59.
- Liao, P.B. and Mayo, R.D. 1972. Salmonid hatchery water re-use system. Aquaculture 1, 317-335
- Liu, W.T., Nielsen, A.T., Wu, J.H., Tsai, C.S., Matsuo, T. and Molin, S. 2001. In situ identification of polyphosphate and polyhydroxyalkanoate-accumulating traits for microbial populations in a biological phosphorus removal process. Environ Microbiol. 3, 110–122.
- Luo, G.Z., Avnimelech, Y., Pan, Y.F. and Tan, H.X. 2013. Inorganic nitrogen dynamics in sequencing batch reactors using biofloc technology to treat aquaculture sludge. Aquacultural Engineering. 52: 73-79.

- Lv XM., Shao MF., Li CL., Li J., Xia X., Liu DY. 2014. Bacterial diversity and community structure of denitrifying phosphorus removal sludge in strict anaerobic/anoxic systems operated with different carbon sources. Chemical Technology and Biotechnology 89(12), 1842–1849.
- Menasveta, P., Panritdam, T., Sihanonth, P., Powtongsook, S., Chuntapa, B. and Lee, P. 2001. Design and function of a closed, recirculating seawater systems with denitrification for the culture of blacktiger shrimp broodstock. Aquacultural Engineering 25, 35-49.
- Monika, Z.S. and Justyna, W., 2015. Enhancing combined biological nitrogen and phosphorus removal from wastewater by applying mechanically disintegrated excess sludge. Water research 76. 10-18.
- Nan, S., and Yan, Z. 2016. Enhanced biological phosphorus removal with different carbon sources. Applied Biotechnology 100. 4735-4745.
- Nootong, K., Nurit, S. and Powtongsook, S. 2013. Control of Inorganic Nitrogen and Suspended Solids Concentrations in a Land-Based Recirculating Aquaculture System. Engineering Journal 17-49.
- Reti, H., Yiqun, H., Xiaohui, W. and Yuan, L., 2015. Simultaneous removal of nitrogen and phosphorus from swine wastewater in a sequencing batch biofilm reactor. Chinese Journal Chemical Engineering 23. 303-308
- Sauthier, N., Grasmick, A. and Blancheton, J.P. 1998. Biological denitrification applied to a marine closed aquaculture system. Water Research 32, 1932-1938.
- Shnel, N., Barak, Y., Ezer, T., Dfni, Z. and van Rijn, J. 2000. Design and performance of a Zero-discharge tilapia recirculation system. Aquaculture Engineering 26. 191-203.
- Strickland, J.D.H. and Parsons T.R. 1972. A Practical Handbook of Seawater Analysis 2<sup>nd</sup> edition. Department of Fisheries and the Environment, Ottawa, Canada. 310 p.
- Spotte, S. 1979. Fish and invertebrate culture. Water management in closed system. 2<sup>nd</sup> Edition. John Wiley & Sons. New York.
- Sorawit Powtongsook. 2005. Recirculating Seawater System with Nitrate Treatment for Tiger Prawn Broodstock Culture Pond. Marine Biotechnology Research, 12-30.

- Thakur, D.P. and Lin, C.K. 2002. Water quality and nutrient budget in closed shrimp (*Penaeus monodon*) culture systems. Aquacultural Engineering 27, 159-176.
- Tsuneda.S., Ohno.T., Soejima. K. and Hirata. A. 2006. Simultaneous nitrogen and phosphorus removal using denitrifying phosphate-accumulating organisms in a sequencing batch reactor. Biochemical Engineering Journal 27, 191-196.
- Tu YJ., and Schuler AJ. 2013. Low acetate concentrations favor polyphosphate-accumulating organisms over glycogen accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal from wastewater. Environmental Science Technology 47(8), 3816-3824.
- Vanderploeg, H.A., Liebig, J.R., Carmichael, W.W., Agy, M.A., Johengen, T.H., Fahnenstiel, G.L. and Nalepa, T.F. 2001. Zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) selective filtration promoted toxic *Microcystis* blooms in Saginaw Bay (Lake Huron) and Lake Erie. Can. J. Fish. Aquatic Sciences. 58,1208-1221.
- Van Rijn, J., Tal, Y. and Schreier, H.J. 2006. Denitrification in recirculating systems : Theory and applications. Aquacultural Engineering 34, 364-376.
- Wiboonluk, P., Ratchadaporn, C., Ekachai, M. and Sorawit, P., 2015. Efficiency of a hybrid solid digestion-denitrification column in suspended solid and nitrate removal from recirculating aquaculture. Environment Engineering. 175-180.
- Xiao-MEI, Lv., Ming-Fei, Shao., Chao-Lin, Li., Xin-Lei, Gao. And Fei-Yun, Sun. 2014. A Comparative Study of the Bacterial Community in Denitrifying and Traditional Enhanced Biological Phosphorus Removal Processes. Microbes Environ Vol.29 No.3. 261-268.
- Zweig, D.R., Morton, J.D. and Stewart, M.M. 1999. Source water quality for aquaculture: a guide for assessment. Environmentally and Socially Sustainable Development, The World Bank, Washington, D.C. 533.





## 1. วิธีวิเคราะห์ซีโอดี

การวิเคราะห์ซีโอดีในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงมาจาก Standard Method (2005) โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 30 มล. ควรทำการวิเคราะห์ทันที ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc.H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) แล้วนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 °ซ

### - การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต (Standard Potassium Dichromate Solution) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล เตรียมโดยละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 4.913 ก. (ซึ่งถูกทำให้แห้งด้วยการอบ 103 °ซ เป็นเวลา 2 ชม.) ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มล. เติมกรดซัลฟิวริก 167 มล. และเติมเมอร์คิวริคซัลเฟต (HgSO<sub>4</sub>) 33.3 ก. คนให้ละลายและตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วจึงทำการปรับปริมาตรให้เป็น 1 ล.

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

3. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous Ammonim Sulfate; FAS) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล เตรียมโดยละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต [Fe (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O] 39 ก. ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มล. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มล. คนให้ละลายและตั้งให้เย็น แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 1 ล. เนื่องจากสารละลายนี้ความเข้มข้นลดลงทุกวันจึงจำเป็นต้องหาความเข้มข้นที่แน่นอนทุกวันที่ใช้ ซึ่งสามารถทำได้ดังนี้ ตวงน้ำกลั่น 50 มล. ลงในขวดชมพูขนาด 250 มล. ปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 0.1 นอร์มัล 5 มล. แล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 15 มล. เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งให้เย็น แล้วนำมาไทเทรตกับ FAS โดยใช้เพอโรอิน 2-3 หยดเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง

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



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

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

ปิเปตตัวอย่างน้ำ 5 มล. ลงในหลอดย่อยสลาย (Digestion Tubes) ขนาด 20 x 150 มม. เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตปริมาตร 3 มล. เติมกรดซัลฟิวริกและซิลเวอร์ซัลเฟต 7 มล. ปิดฝาหลอดย่อยสลายให้แน่นพอดี แกว่งหลอดเพื่อให้สารละลายผสมเข้ากันอย่างทั่วถึง นำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}C$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็น ทำการเปิดฝาหลอดและเติมเฟอโรอิน 2–3 หยด แล้วนำไปไทเทรตด้วย 0.1 นอร์มอล เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต จุดยุติจะเปลี่ยนอย่างรวดเร็วจากสีฟ้าอมเขียวเป็นน้ำตาลแดง สำหรับแบลนด์ใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างน้ำและทำทุกขั้นตอนเหมือนตัวอย่างน้ำ จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณหาปริมาณซีโอดีด้วยสมการต่อไปนี้

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

เมื่อ A = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตแบลนด์ (มล.)

B = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำ (มล.)

N = นอร์มัลลิตีของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต

## 2. วิธีวิเคราะห์แอมโมเนีย

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีของ Bower และ Holm - Hansen (1980) โดยทำการเก็บน้ำตัวอย่างใส่ขวดพลาสติกขนาด 30 มิลลิลิตร จากนั้นจึงทำการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C ควรทำการวิเคราะห์ทันทีหลังเก็บน้ำตัวอย่าง แต่หากยังไม่สามารถวิเคราะห์ได้ทันทีควรนำน้ำตัวอย่างแช่แข็งไว้ที่อุณหภูมิ  $-15^{\circ}C$

- การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายซาลิไซเลตคะตะลิสต์ (Salicylate – catalyst solution) เตรียมโดยชั่งสารโซเดียมซาลิไซเลต 440 กรัม และชั่งสารโซเดียมไนโตรพอสไซด์ 0.28 กรัม ใส่ขวดปรับปริมาตร 1 ลิตร จากนั้นเติมน้ำ De-ionized เก็บไว้ในขวดสีชา

2. สารละลายอัลคาไลน์ซิเตรต (Alkaline – citrate solution) เตรียมโดยชั่งสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18.5 กรัม และชั่งสารโซเดียมซิเตรต 100 กรัม ใส่ขวดปรับปริมาตร 1 ลิตร จากนั้นเติมน้ำ De-ionized เก็บไว้ในขวดสีชา

3. สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodium hypochlorite solution) ใช้สารละลายไฮโปคลอไรต์ทางการค้าซึ่งมีความเข้มข้น 1.5 นอร์มอล

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

#### -ขั้นตอนการวิเคราะห์

ปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 250 ไมโครลิตร ใส่ลงในไมโครเพลท (*Microplate*) เติมสารละลายซาลิไซเลตอะซิเตตปริมาตร 30 ไมโครลิตรและเติมสารละลายอัลคาไลน์ไฮโปคลอไรต์ที่เตรียมขึ้น ปริมาตร 5 ไมโครลิตร จากนั้นผสมให้เข้ากันและนำไปเก็บไว้ในที่มืด โดยตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง และไม่เกิน 3 ชั่วโมง สำหรับแบลนค์ (Blank) ใช้น้ำ De-ionized ที่มีการเติมสารเคมีเหมือนกับน้ำตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ทำการเตรียมสารละลายแอมโมเนียมาตรฐาน (Standard ammonia solution) ที่ความเข้มข้น 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากสารละลายสต็อกแอมโมเนีย (Stock ammonia solution) ความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้กราฟมาตรฐานแสดงดังรูปที่ ก-1

### 3. วิธีวิเคราะห์ไนโตรต์

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของไนโตรต์ในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีของ Stickland and Parson (1972) โดยเก็บน้ำตัวอย่างใส่ขวดพลาสติกขนาด 30 มิลลิลิตร จากนั้นจึงทำการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C ควรทำการวิเคราะห์ทันทีหลังจากเก็บตัวอย่างน้ำ แต่ถ้าหากไม่สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทันที ควรเก็บตัวอย่างน้ำที่กรองแล้วใส่ขวดพลาสติกและนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ  $-15^{\circ}\text{C}$

#### -การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายซัลฟานิลาไมด์ (Sulfanilamide solution) เตรียมโดยชั่งสารซัลฟานิลาไมด์ 5 กรัมและปิเปตกรดไฮโดรคลอริก 50 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดปรับปริมาตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำ De-ionized เป็น 500 มิลลิลิตร

2. สารละลายเอ็นเอ็นอีดี (NNED solution) เตรียมโดยละลาย N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride 0.5 กรัม ในน้ำ De-ionized และปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร

#### -ขั้นตอนการวิเคราะห์

ปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 250 ไมโครลิตร ใส่ลงในไมโครเพลท (*Microplate*) เติมสารละลายซัลฟานิลไมด์ ปริมาตร 5 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันและทิ้งไว้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา 2 นาที แต่ไม่เกิน 10 นาที จากนั้นเติมสารละลายเอ็นเอ็นอีดี ปริมาตร 5 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันโดยตั้งทิ้งไว้ประมาณ 30 นาทีแต่ไม่เกิน 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับแบลนค์ (Blank) ใช้ น้ำ De-ionized ที่มีการเติมสารเคมีเหมือนกับน้ำตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 543 นาโนเมตร ทำการเตรียมสารละลายไนไตรต์มาตรฐาน (Standard nitrite solution) ที่ความเข้มข้น 0.01 0.05 0.10.5 และ 1.0 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากสารละลายสต็อกไนไตรต์ (Stock nitrite solution) ความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้กราฟมาตรฐานแสดงดังรูปที่ ก-1

#### 4. วิธีวิเคราะห์ไนเตรต

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของไนเตรตในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจากวิธีของ APHA และคณะ (1995) โดยเก็บน้ำตัวอย่างใส่ขวดพลาสติกขนาด 30 มิลลิลิตร จากนั้นจึงทำการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C ควรทำการวิเคราะห์ทันทีหลังจากเก็บตัวอย่างน้ำ แต่ถ้าหากไม่สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทันที ควรเก็บตัวอย่างน้ำที่กรองแล้วใส่ขวดพลาสติกและนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ  $-15^{\circ}\text{C}$

ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไนเตรตในน้ำทำได้โดยปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 250 ไมโครลิตร วางลงในเครื่องอ่านไมโครเพลท (*Microplate reader*) โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 220 และ 275 นาโนเมตร สำหรับแบลนค์ (Blank) ใช้ น้ำ De-ionized ที่ไม่มีการเติมสารเคมีลงไป โดยผลต่างที่ได้จากการวัดทั้งสองความยาวคลื่นจะนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณไนเตรต ซึ่งค่าไนเตรตที่คำนวณได้ต้องนำไปลบด้วยปริมาณไนไตรต์ที่วิเคราะห์จากน้ำตัวอย่างเดียวกัน เนื่องจากการวิเคราะห์ไนเตรตด้วยวิธีนี้จะมีปริมาณไนไตรต์รวมอยู่ด้วย ทำการเตรียมสารละลายไนเตรตมาตรฐาน (Standard nitrate solution) ที่ความเข้มข้น 2 4 6 8 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากสารละลายสต็อกไนเตรต (Stock nitrate solution) ความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้กราฟมาตรฐานแสดงดังรูปที่ ก-1

## 5. วิธีวิเคราะห์ฟอสเฟต

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีของ Stickland และ Parson (1972) โดยเก็บน้ำตัวอย่างใส่ขวดพลาสติกขนาด 30 มิลลิลิตร จากนั้นจึงทำการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C ควรทำการวิเคราะห์ทันทีหลังจากเก็บตัวอย่างน้ำ แต่ถ้าหากไม่สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทันที ควรเก็บตัวอย่างน้ำที่กรองแล้วใส่ขวดพลาสติกและนำไปแช่แข็งที่ อุณหภูมิ  $-15^{\circ}\text{C}$

### - การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายแอมโมเนียมโพลิบเดส Ammoniummolybdate solution เตรียมโดยละลาย  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  15 กรัม ด้วยน้ำ De-ionized ปริมาตร 500 มิลลิลิตร นำสารละลายที่ได้เก็บไว้ในขวดพลาสติกและปราศจากแสง
2. กรดซัลฟูริก Sulfuric acid Solution เตรียมโดยเติม Sulfuric acid concentrated ปริมาตร 140 มิลลิลิตรในน้ำ De-ionized ปริมาณ 900 มิลลิลิตร นำสารละลายที่ได้เก็บไว้ในขวดแก้วและนำไปแช่ไว้ในช่องเย็น
3. กรดแอสคอร์บิก Ascorbic acid Solution เตรียมโดยละลาย Ascorbic acid (AR grade) ปริมาณ 27 กรัม ด้วยน้ำ De-ionized ปริมาตร 500 มิลลิลิตรเก็บสารละลายที่ได้ในขวดพลาสติกและนำไปแช่ไว้ในช่องเย็น
4. สารละลาย Potassium antimonyl- tartrate Solution เตรียมโดยละลาย Potassium antimonyl- tartrate ปริมาณ 0.34 กรัม ด้วยน้ำ De-ionized ปริมาตร 250 มิลลิลิตร เก็บสารละลายที่ได้ในขวดแก้วหรือขวดพลาสติก สารละลายดังกล่าวจะเก็บไว้ได้นานหลายเดือน
5. รีเอเจนต์ Mixed reagent เตรียมโดยทำการผสมสารละลายข้างต้น (Ammoniummolybdate solution, Sulfuric acid Solution, Ascorbic acid Solution, Potassium antimonyl- tartrate Solution) โดยปิเปตสารละลายดังกล่าวผสมกันในอัตราส่วนดังต่อไปนี้ Ammoniammolybdate solution อัตราส่วน 2 มิลลิลิตร Sulfuric acid Solution อัตราส่วน 5 มิลลิลิตร Ascorbic acid Solution อัตราส่วน 2 มิลลิลิตร และ Potassium antimonyl- tartrate Solution อัตราส่วน 1

มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองและเขย่าจนเข้ากัน (ควรเตรียมใหม่ทุกครั้งที่ใช้ ไม่สามารถเก็บสารได้นานเกิน 6 ชั่วโมง)

- **ขั้นตอนการวิเคราะห์**

ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำทำได้โดยปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตร บรรจุลงในหลอดทดลองจากนั้นเติมรีเอเจนต์ที่เตรียมไว้ปริมาณ 0.5 มิลลิลิตร เขย่าให้กัน วางทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที แต่ไม่เกิน 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับแบลнк (Blank) ใช้น้ำ De-ionized ที่มีการเติมสารเคมีเหมือนกับน้ำตัวอย่าง แล้วจึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 885 นาโนเมตร ทำการเตรียมสารละลายฟอสเฟตมาตรฐาน (Standard phosphate solution) ที่ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.4 0.6 และ 0.8 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากสารละลายสต็อกไนเทรต (Stock phosphate solution) ความเข้มข้น 100 มก. ฟอสฟอรัส/ล. ได้กราฟมาตรฐานแสดงดังรูปที่ ก-1

## 6. วิธีวิเคราะห์ฟอสฟอรัสทั้งหมด

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีของ Grasshoff (1999) โดยเก็บน้ำตัวอย่างใส่ขวดพลาสติกขนาด 30 มิลลิลิตร ควรทำการวิเคราะห์ทันทีหลังจากเก็บตัวอย่างน้ำ แต่ถ้าหากไม่สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทันที ควรเก็บตัวอย่างน้ำที่กรองแล้วใส่ขวดพลาสติกและนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ  $-15^{\circ}\text{C}$

- **การเตรียมสารเคมี**

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เตรียมโดยละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.075 นอร์มัล ในน้ำ De-ionized ปริมาตร 250 มิลลิลิตร เก็บไว้ในขวดพลาสติกปิดสนิท
2. สารออกซิไดซ์ซิงค์รีเอเจนต์เตรียมโดยละลาย Potassium persulphate ( $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ) ปริมาณ 0.5 กรัม และกรดบอริก ( $\text{H}_2\text{BO}_3$ ) ปริมาณ 0.3 กรัม ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.075 นอร์มัล ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เก็บรักษาสารละลายที่ได้ในขวดพลาสติกที่มีฝาปิดสนิทในสภาวะอุณหภูมิห้องโดยเก็บรักษาสารละลายได้ไม่ป็นระยะเวลา 7 วัน

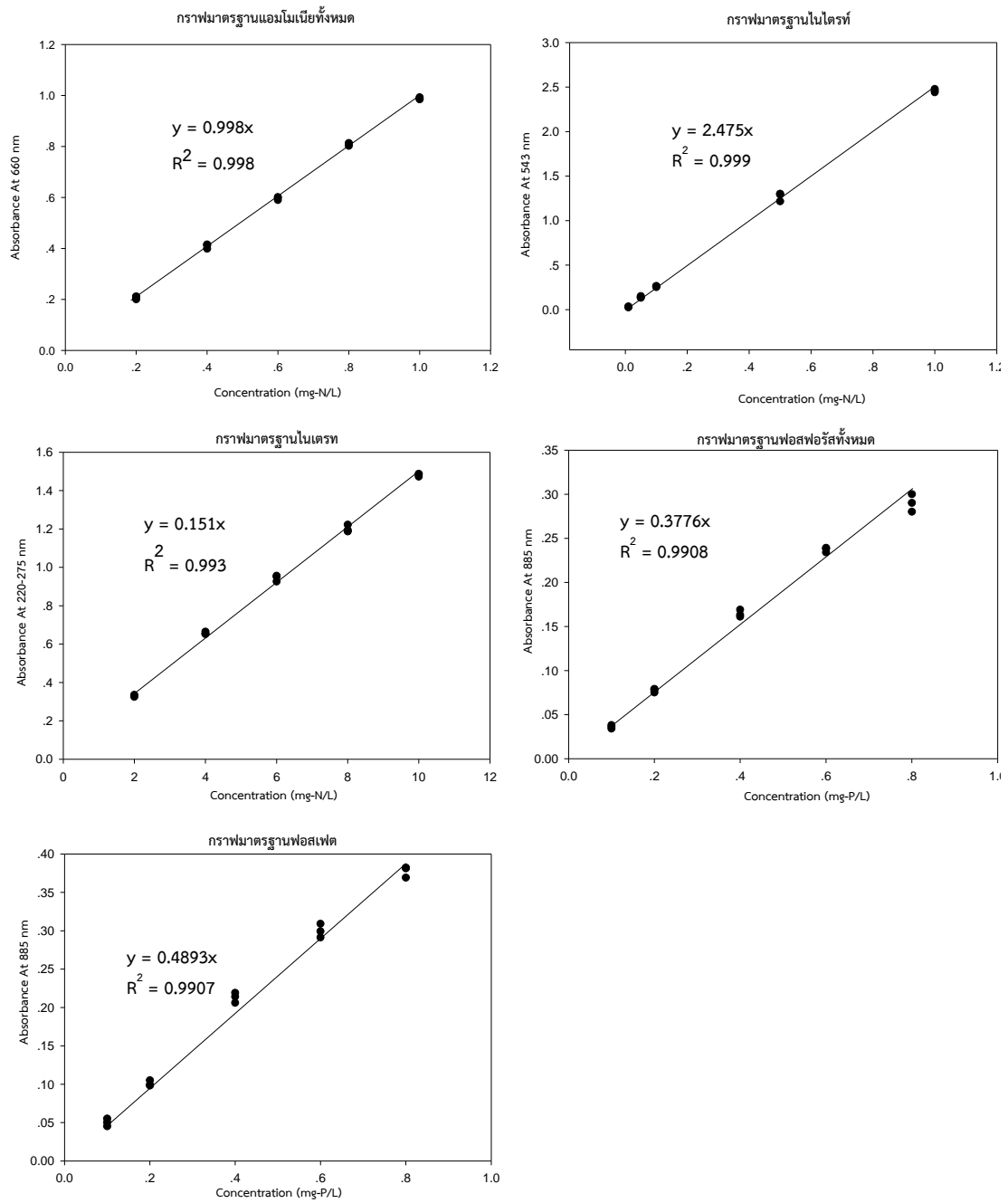
### - ขั้นตอนการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำทำได้โดยปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร บรรจุลงในหลอดทดลอง จากนั้นเติมออกซิไดซ์ซิงค์รีเอเจนต์ปริมาณ 0.5 มิลลิลิตร ปิดฝาให้แน่นก่อนนำเข้าเครื่องนิ่งฆ่าเชื้อโรค (autoclaved) ที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นก่อนเขย่าตัวอย่างให้ตะกอนขาวละลาย โดยใช้น้ำ De-ionized เป็นแบลนค์ (Blank) และใส่สารเคมีแบบเดียวกันกับตัวอย่างน้ำ แล้วจึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวิธีการเดียวกับการวิเคราะห์ฟอสเฟต ได้กราฟมาตรฐานแสดงดังรูปที่ ก-1

### 7. วิธีวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ

การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอยก่อนการทดลองต้องทำการเตรียมกระดาศกรองโดยนำกระดาศกรองมาอบและชั่งน้ำหนักที่ นำน้ำตัวอย่างมากรองผ่านกระดาศกรอง ซึ่งต้องบันทึกปริมาตรของน้ำตัวอย่างที่กรองไว้ จากนั้นนำกระดาศมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (APHA, 1998) เมื่อนำกระดาศกรองออกจากตู้อบจะนำมาใส่ในโถดูดความชื้นจนกระดาศกรองเย็นลง หลังจากนั้นนำกระดาศกรองมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง เพื่อนำค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมาคำนวณหาปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ (มก.ของแข็งแขวนลอย/ล.) ดังสมการต่อไปนี้

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



รูปที่ ก-1. เส้นกราฟมาตรฐานไนโตรเจนทั้งหมด (TAN) ไนโตรต์ ( $\text{NO}_2^-$ ) ไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) และฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) (จากซ้ายไปขวา)



ภาคผนวก ข

ข้อมูลคุณภาพน้ำ ปริมาณตะกอนที่ทำการตรวจวัดในการทดลองช่วงที่ 1.1 ศึกษาชนิดของอินทรีย์คาร์บอนและอัตราส่วนซีไอดีต่อฟอสฟอรัสที่เหมาะสมในการกระตุ้นปฏิกิริยาการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ตารางที่ ข-1 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต และปริมาณตะกอน ในถังปฏิกรณ์ที่เติมอะซิเตทเป็นอินทรีย์

COD:P	วัน ที่	ฟอสเฟต	ฟอสฟอรัสทั้งหมด	แอมโมเนีย	ไนไตรต์	ไนเตรต	ปริมาณตะกอน
		(มก.ฟอสฟอรัส/ ล.)	(มก.ฟอสฟอรัส/ล.)	(มก.ไนโตรเจน/ล.)	(มก.ไนโตรเจน/ล.)	(มก.ไนโตรเจน/ล.)	(มก./ล.)
		ค่าเฉลี่ย SD	ค่าเฉลี่ย SD	ค่าเฉลี่ย SD	ค่าเฉลี่ย SD	ค่าเฉลี่ย SD	ค่าเฉลี่ย SD
	0	2.03 0.04	264.40 16.87	0.01 0.01	0.00 0.00	2.06 0.03	6486.66 117.18
	1	2.15 0.09	176.27 7.15	0.00 0.00	0.00 0.00	1.92 0.02	
	2	1.90 0.12	347.86 88.06	0.00 0.00	0.00 0.00	2.04 0.03	
	3	2.46 0.12	368.92 10.81	0.00 0.00	0.00 0.00	1.84 0.17	
	4	1.82 0.07	372.82 66.24	0.04 0.04	0.01 0.00	1.96 0.04	
	5	1.74 0.05	-	0.26 0.04	0.17 0.01	2.46 0.04	
	6	2.25 0.03	198.11 3.57	0.23 0.04	0.14 0.01	1.78 0.05	
	7	1.84 0.04	237.89 30.54	0.27 0.04	0.08 0.06	2.11 0.03	5478.57 3163.05
	8	2.00 0.029	275.32 3.57	0.23 0.00	0.03 0.00	2.02 0.25	
	9	1.73 0.022	113.09 4.87	0.25 0.01	0.13 0.04	1.47 0.04	
	10	1.97 0.081	165.35 2.70	0.24 0.02	0.07 0.04	1.98 0.09	

ตารางที่ ข-1 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนโตรด ไนเตรด และปริมาณตะกอน ในถังปฏิกรณ์ที่เดิมอะซิเตทเป็นอินทรีย์ (ต่อ)

COD:P	วันที่	ฟอสเฟต (มก.ฟอสฟอรัส/ล.)	ฟอสฟอรัสทั้งหมด (มก.ฟอสฟอรัส/ล.)	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ไนเตรด		ไนเตรท		ปริมาณตะกอน (มก./ล.)	
					ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD		
	11	2.39	340.78	4.77	0.24	0.01	0.08	0.06	1.95	0.04
	12	1.91	395.03	36.70	0.00	0.00	0.02	0.00	1.81	0.03
14:1	13	1.91	367.53	59.35	0.04	0.01	0.02	0.00	2.28	0.05
	14	2.22	301.05	21.79	0.01	0.00	0.03	0.03	2.10	0.02
	15	2.22	408.02	9.17	0.02	0.03	0.02	0.00	2.24	0.00
	16	3.56	278.13	14.74	0.01	0.01	0.02	0.00	3.93	0.06
	17	2.14	346.13	9.99	0.04	0.06	0.02	0.00	1.97	0.03
25:1	18	2.04	332.38	29.98	0.07	0.04	0.01	0.00	2.05	0.64
	19	2.30	307.93	14.74	0.01	0.02	0.02	0.00	1.91	0.14
	20	1.82	327.79	8.26	0.04	0.03	0.13	0.09	2.13	0.45
	21	1.88	385.86	10.59	0.00	0.00	0.02	0.00	1.82	0.10
									6280.00	420.00
									6013.33	70.24

ตารางที่ ข-2 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนโตรต ไนเตรต และปริมาณตะกอน ในถังปฏิกรณ์ที่เติมเมทานอลเป็นอินทรีย์คาร์บอน

COD:P วัน ที่	ฟอสเฟต		ฟอสฟอรัสทั้งหมด		แอมโมเนีย		ไนโตรต		ไนเตรต		ปริมาณตะกอน	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
0	2.39	0.04	423.44	93.57	0.00	0.00	0.00	0.00	2.02	0.05	7406.67	270.06
1	0.84	0.02	414.80	74.96	0.00	0.00	0.00	0.00	2.08	0.03		
2	1.54	0.02	206.68	11.90	0.12	0.06	0.01	0.00	1.71	0.28		
3	0.71	0.02	727.34	51.86	0.04	0.02	0.00	0.00	2.42	0.02		
4	0.98	0.02	419.12	82.44	0.02	0.02	0.00	0.00	2.54	0.06		
5	0.79	0.01	-	-	0.29	0.02	0.02	0.01	2.92	0.04		
6	0.92	0.02	379.51	43.28	0.29	0.01	0.11	0.06	2.74	0.03		
7	0.87	0.07	328.38	3.74	0.30	0.02	0.09	0.05	2.01	0.03	6933.33	283.08
8	0.84	0.03	141.87	10.66	0.31	0.03	0.04	0.01	1.71	0.01		
9	0.96	0.12	430.64	96.19	0.34	0.10	0.02	0.01	1.62	0.01		
10	0.80	0.02	256.37	54.24	0.13	0.06	0.02	0.00	1.59	0.06		

ตารางที่ ข-2 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนเตรต และปริมาณตะกอน ในถังปฏิกรณ์เติมเมทานอลเป็นอินทรีย์คาร์บอน (ต่อ)

COD:P	วันที่	ฟอสเฟต		ฟอสฟอรัสทั้งหมด		แอมโมเนีย		ไนเตรต		ไนเตรท		ปริมาณตะกอน	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
		(มก.ฟอสฟอรัส/ล.)	(มก.ฟอสฟอรัส/ล.)	(มก.ฟอสฟอรัส/ล.)	(มก.ฟอสฟอรัส/ล.)	(มก.ไนโตรเจน/ล.)	(มก.ไนโตรเจน/ล.)	(มก.ไนโตรเจน/ล.)	(มก.ไนโตรเจน/ล.)	(มก.ไนโตรเจน/ล.)	(มก./ล.)	(มก./ล.)	(มก./ล.)
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
14:1	11	0.76	0.03	456.67	64.78	0.07	0.02	0.02	0.00	1.84	0.22		
	12	0.86	0.03	287.00	7.74	0.02	0.01	0.01	0.00	1.71	0.05		
	13	0.74	0.01	270.96	48.91	0.04	0.01	0.01	0.00	1.85	0.06		
	14	0.75	0.02	265.90	34.26	0.05	0.01	0.01	0.00	1.86	0.04	6520.00	124.90
	15	0.83	0.01	291.22	14.10	0.02	0.01	0.00	0.00	1.60	0.38		
	16	1.51	0.02	282.78	44.61	0.02	0.01	0.18	0.01	3.34	0.11		
	17	0.62	0.46	314.01	5.06	0.06	0.02	0.01	0.00	1.72	0.01		
	18	0.86	0.02	253.24	24.16	0.06	0.02	0.00	0.00	2.32	0.13		
	19	0.84	0.01	300.51	23.53	0.03	0.02	0.01	0.00	1.61	0.07		
	20	0.85	0.02	295.44	15.47	0.06	0.01	0.03	0.04	1.83	0.46		
	21	0.88	0.03	311.48	24.94	0.04	0.01	0.01	0.00	1.37	0.04	6510.67	286.39

ตารางที่ ข-3 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนโตรเจน ไนเตรต และปริมาณตะกอน ในถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม

COD:P	วัน ที่	ฟอสเฟต		ฟอสฟอรัสทั้งหมด		แอมโมเนีย		ไนโตรเจน		ไนเตรต		ปริมาณตะกอน	
		(มก.ฟอสฟอรัส/ ล.)	SD	(มก.ฟอสฟอรัส/ ล.)	SD	(มก.ไนโตรเจน/ ล.)	SD	(มก.ไนโตรเจน/ ล.)	SD	(มก.ไนเตรต/ ล.)	SD	(มก./ล.)	SD
	0	16.07	0.09	328.75	54.71	0.03	0.01	0.01	0.00	7.26	0.05	4473.33	152.75
	1	15.34	0.60	259.25	14.12	0.01	0.00	0.01	0.00	6.82	0.05		
	2	16.71	0.03	381.84	18.74	0.02	0.04	0.01	0.00	6.03	0.02		
	3	15.20	0.14	408.39	76.64	0.08	0.01	0.02	0.01	5.83	0.24		
	4	17.64	0.03	355.30	27.05	0.06	0.08	0.01	0.00	6.49	0.19		
	5	14.60	0.32	-	-	0.10	0.02	0.00	0.00	6.65	0.07		
	6	14.99	1.08	315.47	29.85	0.09	0.02	0.01	0.00	5.75	0.12		
	7	18.27	0.32	369.35	19.51	0.01	0.01	0.02	0.01	5.65	0.13	4693.33	296.87
	8	17.03	0.03	470.86	16.89	0.03	0.01	0.00	0.00	5.80	0.02		
	9	16.90	0.21	185.85	29.66	0.06	0.03	0.00	0.00	6.18	0.05		
	10	15.95	0.63	140.56	6.20	0.15	0.16	0.00	0.00	5.08	0.03		

ตารางที่ ข-3 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต และปริมาณตะกอน ในถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม (ต่อ)

COD:P	วันที่	ฟอสเฟต		ฟอสฟอรัสทั้งหมด		แอมโมเนีย		ไนไตรต์		ไนเตรต		ปริมาณตะกอน	
		(มก.ฟอสฟอรัส/ล.)	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	(มก.ไนโตรเจน/ล.)	SD	(มก.ไนโตรเจน/ล.)	SD	(มก.ไนโตรเจน/ล.)	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
14:1	11	16.65	0.15	178.71	13.54	0.08	0.02	0.00	0.00	6.42	0.20		
	12	18.24	0.10	159.85	12.30	0.06	0.06	0.02	0.02	6.94	0.31		
	13	15.52	0.81	182.81	10.24	0.06	0.07	0.01	0.00	6.89	0.08		
	14	17.92	0.53	165.59	16.37	0.00	0.01	0.00	0.00	4.79	3.55	3673.33	41.63
25:1	15	14.90	0.13	165.59	7.10	0.00	0.00	0.00	0.00	6.51	0.12		
	16	17.88	0.06	180.35	46.29	0.01	0.02	0.01	0.00	6.64	0.75		
	17	17.68	0.33	195.92	10.24	0.02	0.03	0.00	0.00	6.63	0.07		
	18	19.79	0.40	140.18	2.46	0.00	0.00	0.00	0.00	4.78	3.56		
	19	15.64	0.74	175.43	12.62	0.00	0.00	0.01	0.00	6.81	0.32		
	20	15.54	0.07	181.99	2.46	0.06	0.04	0.01	0.00	6.67	0.18		
	21	25.47	0.33	150.84	19.10	0.02	0.02	0.00	0.00	6.45	0.41	5853.33	2099.27

ตารางที่ ข-4 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนเตรต และไนเตรด ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนก่อนนำมาผ่าน ถังปฏิกรณ์

COD:P	วัน	ฟอสเฟต ที่ (มก.ฟอสฟอรัส/ ล.)	ฟอสฟอรัสทั้งหมด		แอมโมเนีย		ไนเตรต		ไนเตรด		ปริมาณตะกอน	
			ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
	0	19.11	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	4.87	0.01	
	1	15.69	0.43	0.02	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	4.91	0.06	
	2	17.49	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	4.97	0.08	
	3	16.07	0.25	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	4.84	0.25	
7:	4	17.45	0.26	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	5.08	0.04	
	5	15.52	1.23	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	4.97	0.09	
	6	16.36	0.67	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	5.11	0.07	
	7	15.41	0.69	0.07	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	5.14	0.05	
	8	16.30	0.48	0.14	0.06	0.01	0.01	0.00	0.00	5.23	0.02	
14:	9	16.07	0.43	0.11	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	5.20	0.04	
	10	16.26	0.32	0.11	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	5.37	0.07	

ตารางที่ ข-4 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนก่อนนำมาผ่าน  
ถึงปฏิบัติการณ์ (ต่อ)

COD:P	วันที่	ฟอสเฟต		ฟอสฟอรัสทั้งหมด		แอมโมเนีย		ไนไตรต์		ไนเตรท		ปริมาณตะกอน (มก./ล.)
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	
14:1	11	17.26	0.87	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	5.30	0.06	
	12	15.64	0.46	0.08	0.06	0.03	0.00	0.00	0.00	5.81	0.54	
	13	14.33	1.23	0.03	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	4.64	0.15	
	14	20.54	0.64	0.03	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	5.19	0.36	
25:1	15	14.42	1.11	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	5.66	0.95	
	16	16.47	0.19	0.03	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00	5.25	0.51	
	17	23.68	0.47	0.13	0.08	0.03	0.01	0.01	0.01	2.85	0.09	
	18	17.03	0.85	0.04	0.02	0.15	0.17	0.17	0.17	5.60	0.31	
	19	17.84	0.82	0.04	0.02	0.26	0.04	0.04	0.04	5.44	0.12	
	20	15.26	0.23	0.06	0.01	0.21	0.21	0.21	0.21	5.35	0.05	
	21	16.57	0.20	0.02	0.01	0.07	0.04	0.04	0.04	5.39	0.03	





ภาคผนวก ค

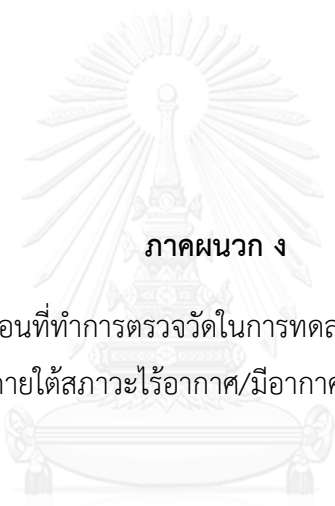
ข้อมูลคุณภาพน้ำ ปริมาณตะกอนที่ทำการตรวจวัดในการทดลองช่วงที่ 1.2 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพโดยกลุ่มจุลินทรีย์พีเอโอ

ตารางที่ ค-1 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนเตรต ไนเตรด และซีโอดี ในถังปฏิกรณ์ที่เติมเมทานอลเป็นอินทรีย์คาร์บอน

COD:P เวลา	ฟอสเฟต		ฟอสฟอรัสทั้งหมด		แอมโมเนีย		ไนเตรต		ไนเตรด		ซีโอดี			
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD		
0	2.86	0.18	380.95	119.36	0.26	0.01	0.16	0.06	0.06	0.06	3.26	0.28	114.32	4.42
0.5	2.41	0.10	746.81	49.45	0.03	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	2.13	0.01	104.12	0.00
1	2.29	0.08	543.37	60.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.59	0.07	68.39	15.94
1.5	2.14	0.07	488.77	74.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.56	0.03	88.80	7.66
2	2.35	0.22	484.37	139.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.06	0.32	88.80	0.00
3	2.14	0.06	509.03	86.11	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	1.53	0.04	55.63	19.27
4	2.02	0.05	610.30	51.43	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	1.54	0.05	78.60	15.94
4.5	2.35	0.02	557.46	129.75	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	1.90	0.05	50.53	7.66
5	1.93	0.03	531.92	124.38	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	1.59	0.09	35.22	0.00
5.5	2.00	0.04	405.99	47.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.54	0.02	30.11	4.42
6	1.83	0.09	701.89	22.47	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	1.50	0.06	19.90	0.00
7	1.37	0.04	285.34	45.76	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	1.50	0.07	14.80	4.42
8	1.54	0.14	552.18	98.61	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	1.15	0.46	17.35	4.42

ตารางที่ ค-2 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนโตรต ไนเตรต และซีโอดี ในถังปฏิบัติการชุดควบคุม

COD:P	เวลา	ฟอสเฟต		ฟอสฟอรัสทั้งหมด		แอมโมเนีย		ไนโตรต		ไนเตรท		ซีโอดี	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
๗	(มก.ฟอสฟอรัส/ล.)			(มก.ฟอสฟอรัส/ล.)		(มก.ไนโตรเจน/ล.)		(มก.ไนโตรเจน/ล.)		(มก.ไนโตรเจน/ล.)		(มก./ล.)	
	0	16.03	0.27	478.67	115.96	0.12	0.05	0.03	0.00	5.70	0.05	27.56	15.31
	0.5	17.40	0.58	252.58	94.31	0.14	0.02	0.01	0.01	5.68	0.05	47.97	23.39
	1	16.91	0.66	174.40	6.49	0.08	0.06	0.01	0.01	5.70	0.04	40.32	8.84
	1.5	15.61	0.58	103.09	5.15	0.12	0.03	0.01	0.00	5.70	0.12	32.66	11.69
	2	18.71	0.44	426.12	142.81	0.05	0.00	0.05	0.06	6.01	0.19	37.77	4.42
	3	16.93	0.09	231.96	94.63	0.03	0.00	0.01	0.00	5.41	0.15	19.90	22.97
	4	17.37	0.64	241.41	39.45	0.15	0.02	0.02	0.01	5.83	0.05	12.25	7.66
	4.5	14.92	0.14	201.03	4.46	0.22	0.05	0.00	0.00	5.86	0.01	32.66	11.69
	5	17.46	0.74	264.60	18.64	0.16	0.01	0.00	0.00	5.63	0.08	5.61	6.19
	5.5	20.21	1.11	237.97	16.57	0.16	0.01	0.00	0.00	5.94	0.07	35.22	15.31
	6	18.02	0.20	219.07	6.82	0.12	0.01	0.00	0.00	4.44	2.80	32.66	4.42
	7	15.82	0.36	225.95	6.49	0.13	0.02	0.00	0.00	5.70	0.14	32.66	4.42
	8	16.78	0.39	306.70	9.29	0.07	0.01	0.00	0.00	6.08	0.16	30.11	4.42

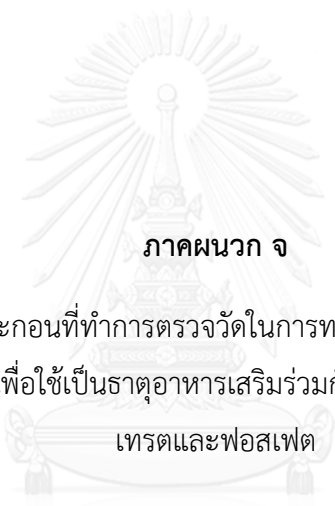


ภาคผนวก ง

ข้อมูลคุณภาพน้ำ ปริมาณตะกอนที่ทำการตรวจวัดในการทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนเตรตและฟอสฟอรัสภายใต้สภาวะไร้อากาศ/มีอากาศและไร้อากาศด้วยถังปฏิกรณ์เอสปีอาร์

ตารางที่ ง-1 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนโตรเจน ไนเตรต และปริมาณตะกอน

ถึงปฏิกรณ์	วันที่	ฟอสเฟต		ฟอสฟอรัสทั้งหมด		แอมโมเนีย		ไนเตรต		ไนเตรท		ปริมาณตะกอน	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
น้ำเสียจาก	0	19.38	0.54	-	-	0.02	0.00	0.01	0.00	8.47	0.05	-	-
ระบบเลี้ยง	1	20.23	1.66	-	-	0.00	0.00	0.02	0.00	8.56	0.04	-	-
สัตว์น้ำ	2	28.39	0.55	-	-	0.01	0.00	0.00	0.00	6.55	0.28	-	-
ชุดควบคุม	0	1.02	0.00	379.74	72.85	0.03	0.00	0.01	0.00	4.01	0.01	6460.00	87.18
	1	0.58	0.04	351.70	28.03	0.02	0.00	0.01	0.00	1.94	0.04	-	-
	2	0.69	0.09	423.91	6.41	0.02	0.01	0.01	0.00	7.98	0.33	5553.33	30.55
ชุดทดลอง (ไร้อากาศ)	0	2.41	0.04	275.95	2.65	0.15	0.00	0.02	0.00	1.88	0.06	6913.33	102.63
	1	0.81	0.04	364.40	130.24	0.20	0.01	0.02	0.00	2.07	0.04	-	-
	2	0.30	0.00	415.70	41.31	0.13	0.01	0.02	0.01	2.44	0.09	3693.33	160.42



ภาคผนวก จ

ข้อมูลคุณภาพน้ำ ปริมาณตะกอนที่ทำการตรวจวัดในการทดลองครั้งที่ 3 การศึกษาใช้อาหารกุ้ง  
สำเร็จรูปทดแทนผงยีสต์สกัดเพื่อใช้เป็นธาตุอาหารเสริมร่วมกับสารอินทรีย์คาร์บอนในการบำบัดไน

เทรตและฟอสเฟต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ จ-1 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนเตรต ไนไตรต์ และปริมาณตะกอน ในถังปฏิกรณ์ชุดควบคุมที่เติมเมทานอล เป็นสารอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับผงยีสต์สกัด

วันที่	ฟอสเฟต		ฟอสฟอรัสทั้งหมด		แอมโมเนีย		ไนเตรต		ไนไตรต์		ปริมาณตะกอน	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
0	2.04	0.21	417.45	138.94	0.15	0.02	0.30	0.02	4.39	0.10	6186.67	61.10
1	1.14	0.06	439.99	22.73	0.25	0.03	0.01	0.00	2.13	0.04		
2	1.21	0.04	386.56	116.95	0.13	0.02	0.02	0.01	2.30	0.03		
3	1.23	0.02	424.96	28.48	0.10	0.01	0.01	0.00	2.13	0.07	5880.00	20.00
4	1.32	0.06	375.70	61.40	0.08	0.01	0.01	0.00	2.06	0.07		
5	1.28	0.06	454.18	26.31	0.10	0.01	0.02	0.00	2.23	0.04		
6	1.36	0.02	424.13	101.87	0.07	0.01	0.02	0.00	2.33	0.06	5640.00	103.92
7	2.79	0.01	218.31	6.69	0.02	0.02	0.01	0.00	2.11	0.13		
8	2.42	0.06	333.17	31.34	0.05	0.01	0.01	0.00	2.07	0.02		
9	2.55	0.06	294.46	41.38	0.05	0.01	0.01	0.00	2.04	0.03	5566.67	231.80

ตารางที่ จ-2 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนเตรต ไนไตรต์ และปริมาณตะกอน ในถังปฏิกรณ์ชุดทดลองที่เดิมเมทานอล เป็นสารอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับอาหารกุ้ง

วันที่	ฟอสเฟต (มก.ฟอสฟอรัส/ ล.)	ฟอสฟอรัสทั้งหมด (มก.ฟอสฟอรัส/ล.)	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ไนเตรท (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ปริมาณตะกอน (มก./ล.)						
ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD					
0	1.69	0.08	348.15	21.40	0.12	0.01	0.12	0.01	7.34	0.13	5673.33	192.18
1	1.64	0.07	371.53	99.00	0.20	0.02	0.05	0.00	2.08	0.04		
2	1.82	0.01	389.06	51.41	0.09	0.01	0.01	0.00	1.92	0.16		
3	2.27	0.05	306.41	15.91	0.06	0.01	0.02	0.01	2.13	0.14	5640.00	34.64
4	2.88	0.05	391.32	62.05	0.00	0.00	0.00	0.00	1.73	0.14		
5	2.51	0.01	350.90	54.72	0.00	0.00	0.10	0.01	1.89	0.10		
6	2.28	0.04	316.91	7.29	0.01	0.00	0.10	0.00	2.01	0.06	5240.00	180.00
7	5.39	0.07	225.29	6.12	0.02	0.01	0.00	0.00	2.01	0.08		
8	2.96	0.07	196.10	3.30	0.02	0.02	0.00	0.00	1.65	0.06		
9	3.65	0.17	215.77	3.96	0.05	0.00	0.00	0.00	2.00	0.03	4786.67	120.55



ตารางที่ ๓-3 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนโตรเจน ไนเตรต และปริมาณตะกอน ในถังปฏิกรณ์ชุดทดลองที่เติมเฉพาะเมทา เป็นสารอินทรีย์คาร์บอน

วันที่	ฟอสเฟต		ฟอสฟอรัสทั้งหมด		แอมโมเนีย		ไนโตรเจน		ไนเตรต		ปริมาณตะกอน	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
0	7.07	0.12	459.29	37.21	0.00	0.00	0.23	0.01	4.62	0.11	6506.67	254.82
1	3.20	0.20	549.32	57.37	0.00	0.00	0.09	0.01	1.72	0.08		
2	2.85	1.23	381.21	28.68	0.00	0.00	0.00	0.00	1.76	0.06		
3	3.29	0.14	439.09	76.09	0.07	0.12	0.10	0.01	1.71	0.02	6360.00	121.66
4	3.99	0.19	219.54	16.61	0.00	0.00	0.01	0.01	7.65	0.10		
5	3.27	0.18	371.11	17.50	0.02	0.02	0.06	0.04	1.76	0.02		
6	7.14	0.19	180.96	11.14	0.30	0.20	0.00	0.00	7.69	0.07	6060.00	105.83
7	3.82	0.25	291.29	6.60	0.04	0.01	0.00	0.00	1.81	0.03		
8	4.63	0.12	147.23	7.21	0.03	0.01	0.01	0.01	8.05	0.88		
9	2.69	0.27	279.87	35.67	0.01	0.01	0.00	0.00	1.87	0.05	6100.00	158.75

ตารางที่ จ-4 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนโตรเจน ไนเตรต และปริมาณตะกอน ในถังปฏิกรณ์ชุดทดลองที่เต็มเฉพาะอาหารกุ้ง

วันที่	ฟอสเฟต (มก.ฟอสฟอรัส/ ล.)	ฟอสฟอรัสทั้งหมด (มก.ฟอสฟอรัส/ล.)	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ไนโตรเจน (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ปริมาณตะกอน (มก./ล.)						
ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD					
0	13.36	0.68	148.81	7.29	0.00	0.00	7.64	0.03	3753.33	150.11		
1	10.14	0.38	132.77	2.60	0.05	0.00	0.01	0.00	7.27	0.26		
2	12.88	0.32	154.46	7.95	0.04	0.01	0.00	0.00	7.24	0.32		
3	9.68	0.12	149.26	9.14	0.07	0.02	0.00	0.00	7.39	0.16	4053.33	150.11
4	3.08	0.17	437.36	15.62	0.08	0.01	0.01	0.01	2.13	0.17		
5	3.15	0.22	460.79	5.21	0.05	0.01	0.03	0.00	4.40	0.05		
6	2.85	0.02	354.05	20.66	0.03	0.01	0.00	0.00	2.27	0.14	4253.33	94.52
7	7.35	0.11	130.10	6.69	0.06	0.03	0.00	0.00	8.45	0.02		
8	3.75	0.10	278.60	9.00	0.06	0.02	0.00	0.00	1.68	0.03		
9	8.67	0.87	154.21	11.42	0.04	0.01	0.00	0.00	7.65	0.05	4560.00	87.18

ตารางที่ จ-5 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนโตร และไนเตรต ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนก่อนนำมาผ่านถังปฏิกรณ์

วันที่	ฟอสเฟต		ฟอสฟอรัสทั้งหมด		แอมโมเนีย		ไนโตร		ไนเตรต		ปริมาณตะกอน	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
0	23.34	0.26	-	-	0.06	0.02	0.01	0.00	6.27	0.18	-	-
1	22.45	0.35	-	-	0.08	0.01	0.02	0.00	6.69	0.13	-	-
2	23.88	0.77	-	-	0.08	0.01	0.03	0.00	6.85	0.36	-	-
3	22.99	0.31	-	-	0.09	0.01	0.01	0.00	5.80	0.07	-	-
4	23.05	0.57	-	-	0.05	0.00	0.01	0.00	6.38	0.18	-	-
5	23.17	0.75	-	-	0.14	0.02	0.01	0.01	6.64	0.15	-	-
6	21.96	0.23	-	-	0.05	0.03	0.02	0.00	6.26	0.44	-	-
7	20.63	0.85	-	-	0.09	0.01	0.00	0.00	6.41	0.16	-	-
8	23.03	0.47	-	-	0.06	0.00	0.01	0.00	6.52	0.16	-	-
9	21.32	0.73	-	-	0.07	0.02	0.07	0.00	6.52	0.20	-	-



ภาคผนวก ฉ

ข้อมูลคุณภาพน้ำ ปริมาณตะกอนที่ทำการตรวจวัดในการทดลองช่วงที่ 4 การทดลองขยายขนาดถึง  
ปฏิกรณ์และเดินระบบบำบัดน้ำเสียจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด

ตารางที่ ๑-1 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนโตรเจน ไนเตรต และปริมาณตะกอน ในถังปฏิกรณ์ชุดทดลอง

วันที่	ฟอสเฟต		ฟอสฟอรัสทั้งหมด		แอมโมเนีย		ไนเตรต		ไนเตรท		ปริมาณตะกอน	
	(มก.ฟอสฟอรัส/ล.)	SD	(มก.ฟอสฟอรัส/ล.)	SD	(มก.ไนโตรเจน/ล.)	SD	(มก.ไนโตรเจน/ล.)	SD	(มก.ไนโตรเจน/ล.)	SD	(มก./ล.)	SD
0	18.24	0.65	371.96	249.47	0.46	0.01	0.02	0.02	3.82	0.06	10386.67	136.14
1	24.72	0.25	519.05	285.01	0.10	0.01	0.01	0.00	5.21	0.07		
2	17.83	0.27	243.60	79.91	0.09	0.01	0.00	0.00	2.98	0.27		
3	19.92	0.25	358.84	210.00	0.03	0.00	0.01	0.00	2.64	0.09		
4	15.33	0.19	289.51	65.74	0.05	0.01	0.00	0.00	3.01	0.05	8226.67	688.57
5	11.52	0.25	186.45	22.72	0.05	0.00	0.00	0.00	2.41	0.04		
6	7.92	0.19	252.97	36.76	0.01	0.01	0.00	0.00	2.27	0.01		
7	4.67	0.14	295.59	39.39	0.00	0.00	0.01	0.00	1.99	0.16		
8	6.98	0.80	378.23	56.23	0.04	0.00	0.02	0.00	3.47	0.17		
9	9.42	0.40	321.02	88.76	0.04	0.05	0.01	0.00	1.73	0.04		
10	11.11	0.34	360.75	90.78	0.00	0.00	0.01	0.00	1.97	0.34		

ตารางที่ ๑-1 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนโตรเจนในเทรต และปริมาณตะกอน ในถังปฏิกรณ์ชุดทดลอง (ต่อ)

วันที่	ฟอสเฟต		ฟอสฟอรัสทั้งหมด		แอมโมเนีย		ไนโตรเจน		ไนเตรท		ปริมาณตะกอน	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
11	2.55	0.12	343.27	18.62	0.01	0.00	0.01	0.01	4.38	0.16		
12	7.45	0.05	490.27	93.13	0.00	0.00	0.01	0.00	1.94	0.10	8360.00	264.58
14	3.37	0.13	429.08	127.19	0.00	0.00	0.00	0.00	1.65	0.07		
15	2.37	0.05	344.69	166.33	0.01	0.01	0.01	0.01	1.44	0.03		
16	1.99	0.02	390.84	73.84	0.00	0.00	0.01	0.01	1.48	0.04		
17	2.00	0.02	304.49	72.86	0.03	0.05	0.00	0.00	1.60	0.03		
18	2.12	0.02	620.14	173.53	0.04	0.02	0.04	0.02	1.53	0.01		
19	1.79	0.03	461.57	52.96	0.01	0.00	0.01	0.00	1.54	0.02		
20	3.81	0.16	309.70	121.15	0.03	0.02	0.03	0.00	1.51	0.02		
21	4.05	0.03	340.96	182.98	0.00	0.00	0.00	0.00	1.49	0.02		
22	2.56	0.01	402.75	26.65	0.00	0.00	0.00	0.00	1.64	0.05	9760.00	87.18

ตารางที่ ๑-2 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนเตรต ไนไตรต์ และปริมาณตะกอน ในถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม

วันที่	ฟอสเฟต		ฟอสฟอรัสทั้งหมด		แอมโมเนีย		ไนเตรต		ไนไตรต์		ปริมาณตะกอน	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
0	17.16	0.08	261.40	102.27	0.46	0.01	0.00	0.00	3.84	0.05	11060.00	904.21
1	18.72	0.47	295.13	86.04	0.17	0.03	0.00	0.00	4.55	0.20		
2	24.26	0.56	261.40	21.22	0.04	0.02	0.00	0.00	2.36	0.02		
3	17.01	1.86	366.33	89.34	0.08	0.03	0.00	0.00	4.99	0.05		
4	19.08	0.26	277.33	66.89	0.05	0.02	0.01	0.01	5.43	0.04	7460.00	121.66
5	17.13	0.31	365.40	84.46	0.03	0.01	0.05	0.00	5.24	0.10		
6	21.91	0.98	416.93	47.89	0.05	0.03	0.01	0.00	4.92	0.90		
7	15.12	0.42	501.39	149.26	0.01	0.00	0.02	0.00	4.02	0.56		
8	9.90	0.15	539.53	44.04	0.02	0.00	0.00	0.00	5.03	0.94		
9	16.51	0.82	499.01	142.56	0.00	0.00	0.00	0.00	4.04	0.08		
10	17.95	0.60	599.13	121.42	0.01	0.01	0.02	0.01	4.10	0.05		

ตารางที่ ๘-2 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนเตรต ไนเตรต และปริมาณตะกอน ในถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม (ต่อ)

วันที่	ฟอสเฟต		ฟอสฟอรัสทั้งหมด		แอมโมเนีย		ไนเตรต		ไนเตรต		ปริมาณตะกอน	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
11	17.70	0.19	399.68	135.32	0.01	0.00	0.01	0.00	3.87	0.26		
12	17.33	0.16	321.02	77.11	0.01	0.01	0.03	0.00	4.21	0.12	9380.00	821.46
14	15.37	0.64	311.48	62.90	0.05	0.00	0.01	0.00	3.71	0.02		
15	11.65	0.14	512.19	16.16	0.01	0.01	0.06	0.06	3.23	0.09		
16	21.66	0.35	256.10	210.63	0.01	0.01	0.03	0.04	2.92	0.03		
17	17.73	2.86	388.61	125.77	0.05	0.03	0.20	0.04	3.18	0.07		
18	17.31	0.03	402.75	21.46	0.01	0.01	0.01	0.02	2.86	0.11		
19	12.81	0.30	314.59	38.79	0.02	0.01	0.00	0.00	3.19	0.05		
20	12.99	0.17	212.89	46.45	0.04	0.03	0.01	0.01	3.87	0.05		
21	15.44	0.52	329.95	32.95	0.07	0.09	0.00	0.00	4.81	0.03		
22	17.93	0.14	314.59	64.75	0.01	0.00	0.00	0.00	4.47	0.15	7873.33	543.08



ตารางที่ ๓-3 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนก่อนนำมาผ่านถังปฏิกรณ์

วันที่	ฟอสเฟต		ฟอสฟอรัสทั้งหมด		แอมโมเนีย		ไนไตรต์		ไนเตรท		ปริมาณตะกอน	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
0	18.52	0.17	-	-	0.04	0.01	0.03	0.01	5.85	0.10	-	-
1	12.33	0.13	-	-	0.01	0.01	0.01	0.00	4.85	0.19	-	-
2	11.79	0.13	-	-	0.02	0.01	0.00	0.00	5.09	0.05	-	-
3	17.31	0.14	-	-	0.02	0.00	0.01	0.00	5.64	0.30	-	-
4	16.77	0.33	-	-	0.18	0.21	0.01	0.00	5.77	0.07	-	-
5	14.38	0.14	-	-	0.02	0.01	0.01	0.00	5.87	0.25	-	-
6	17.60	0.24	-	-	0.03	0.00	0.01	0.00	5.57	0.02	-	-
7	14.88	0.27	-	-	0.04	0.02	0.01	0.00	5.44	0.04	-	-
8	20.44	0.91	-	-	0.04	0.00	0.02	0.00	5.70	0.06	-	-
9	16.13	0.04	-	-	0.11	0.02	0.02	0.01	5.23	0.24	-	-
10	27.23	0.84	-	-	0.02	0.00	0.01	0.00	6.10	1.08	-	-

ตารางที่ ๓-3 ความเข้มข้นของฟอสเฟต ฟอสฟอรัสทั้งหมด แอมโมเนีย ไนโตรเจน และไนเตรต ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนก่อนนำมาผ่านถึง  
 ปฏิกรณ์ (ต่อ)

วันที่	ฟอสเฟต		ฟอสฟอรัสทั้งหมด		แอมโมเนีย		ไนเตรต		ไนเตรท		ปริมาณตะกอน	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
11	19.99	0.78	-	-	0.03	0.02	0.01	0.00	5.33	0.19	-	-
12	17.94	0.15	-	-	0.02	0.00	0.01	0.00	5.06	0.09	-	-
14	15.66	0.04	-	-	0.02	0.01	0.00	0.00	4.28	0.10	-	-
15	18.66	0.39	-	-	0.02	0.01	0.00	0.00	3.95	0.25	-	-
16	12.34	0.77	-	-	0.02	0.01	0.00	0.00	4.42	0.05	-	-
17	17.55	0.40	-	-	0.07	0.06	0.00	0.00	4.39	0.03	-	-
18	23.70	1.15	-	-	0.05	0.02	0.00	0.00	4.33	0.01	-	-
19	17.94	0.20	-	-	0.12	0.07	0.01	0.00	4.38	0.07	-	-
20	18.58	0.33	-	-	0.01	0.00	0.00	0.00	4.30	0.09	-	-
21	19.95	0.20	-	-	0.03	0.01	0.00	0.00	4.61	0.03	-	-
22	17.89	0.32	-	-	0.02	0.01	0.00	0.00	4.45	0.13	-	-

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววรรณภา หนูเนตร เกิดเมื่อวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2534 ที่จังหวัด นครศรีธรรมราช ปัจจุบันอายุ 26 ปี จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนไชยวิทยา สุราษฎร์ธานี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการผลิตทาง ชีวภาพทางน้ำ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เมื่อปี การศึกษา 2556 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2557

### ผลงานที่ได้รับการเผยแพร่

วรรณภา หนูเนตร สุรเชษฐ์ บุรุษอาชาโนย สรวิต ผ่าทองสุข และวิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี ผลของชนิดอินทรีย์คาร์บอนต่อการบำบัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบ ปิดด้วยถังปฏิกรณ์แบบเอสปีอาร์. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 16, 17-18 พฤษภาคม 2560, จัดโดยสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. โรงแรมเดอะทวินทาว เวย์ กรุงเทพมหานคร. (นำเสนองานแบบบรรยายมีเรื่องเต็ม)