

2022

พลของรูปแบบการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียของตะกอน
ไบโอฟลอคในระบบการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนา

ศาสตราจารย์ ดร. ฐานกาน
คณะวิศวกรรมศาสตร์

Follow this and additional works at: <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd>



Part of the [Environmental Engineering Commons](#)

Recommended Citation

ฐานกาน, ศาสตราจารย์ ดร., "พลของรูปแบบการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟลอคในระบบการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนา" (2022). *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 6592.
<https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6592>

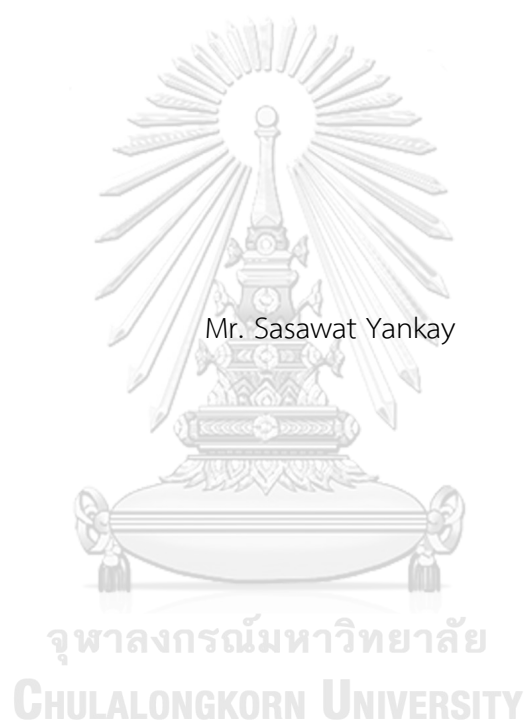
This Thesis is brought to you for free and open access by Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD) by an authorized administrator of Chula Digital Collections. For more information, please contact ChulaDC@car.chula.ac.th.

ผลของรูปแบบการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกในระบบ
การเลี้ยงกุ้งขาวแบบปิด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effects of Different Aeration Systems on Ammonia Removal Efficiency of Biofloc
in Closed Aquaculture System for *Litopenaeus vannamei*



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2022
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของรูปแบบการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการ กำจัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกในระบบการเลี้ยง กุ้งขาวแบบปิด
โดย	นายศาสวัต ญาณกาย
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.อรรถ วิชาการฤทธิ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์)

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

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.เสจ ไชยเพ็ชร)

ศาศวัต ญาณกาย : ผลของรูปแบบการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกในระบบการเลี้ยงกุ้งแบบปิด. (Effects of Different Aeration Systems on Ammonia Removal Efficiency of Biofloc in Closed Aquaculture System for *Litopenaeus vannamei*) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟิงรัศมี, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข

งานวิจัยนี้ศึกษารูปแบบการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกในระบบการเลี้ยงกุ้งแบบปิด แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง ช่วงที่ 1 ศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนแตกต่างกัน 3 ระดับเท่ากับ 5:1, 10:1 และ 15:1 เพื่อให้ได้สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกเพื่อกำจัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจน ผลการทดลองพบว่า 5:1 เป็นอัตราส่วนที่เพียงพอต่อการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์ทั้งในรูปแอมโมเนียและไนไตรต์ผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันในเวลา 30 วัน โดยสามารถกำจัดแอมโมเนียและไนไตรต์จากค่าเริ่มต้น 5.95 ± 0.77 และ 1.59 ± 0.46 มก.ไนโตรเจน/ล. จนมีค่าต่ำกว่า 0.30 และ 0.50 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ภายในเวลา 12 วัน และมีปริมาณไนเตรดคงค้างในระบบเท่ากับ 44.2 ± 10.5 มก.-ไนโตรเจน/ล. โดยมีปริมาณตะกอนไบโอฟล็อกที่ถูกผลิตขึ้นเท่ากับ 470.00 ± 14.1 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. การทดลองช่วงที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศแบบหัวทรายและแบบเวนจูร์ดัดแปลง พบว่าอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูร์ดัดแปลงมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบหัวทราย โดยมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิใดๆ เท่ากับ 0.70 ± 0.01 /ชม. มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐานเท่ากับ 1.38 ± 0.18 กก.-ออกซิเจน/ชม. มีประสิทธิภาพถ่ายเทอากาศที่สภาวะมาตรฐานเท่ากับ 57.68 ± 0.18 กก.-ออกซิเจน/กิโวลต์-ชม.และมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนที่มาตรฐานเท่ากับร้อยละ 7.73 ± 0.99 ตามลำดับ การทดลองช่วงสุดท้ายศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่ผนวกกับส่วนบำบัดไบโอฟล็อก โดยเริ่มต้นจากการเตรียมตะกอนไบโอฟล็อกล่วงหน้าให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ 5:1 เป็นระยะเวลา 45 วัน จากนั้นแยกเฉพาะส่วนตะกอนไบโอฟล็อกเพื่อเดินระบบร่วมกับการเลี้ยงกุ้งในระบบปิดที่ความหนาแน่นเริ่มต้น 0.3 กก./ลบ.ม. ทำการทดลองเป็นเวลา 60 วัน เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ติดตั้งอุปกรณ์เติมอากาศแบบหัวทราย และชุดทดลองที่ติดตั้งอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูร์ ผลการทดลองพบว่ารูปแบบเติมอากาศที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อขนาดตะกอนไบโอฟล็อก โดยมีขนาดเฉลี่ยใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 70–150 ไมครอน และมีปริมาณตะกอนไบโอฟล็อกอยู่ในช่วง 160–190 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. ทั้งนี้ตะกอนไบโอฟล็อกในระบบมีความสามารถในการควบคุมปริมาณแอมโมเนียและไนไตรต์ให้มีค่าต่ำกว่า 1 มก.-ไนโตรเจน/ล. ผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน และพบการสะสมไนเตรดเท่ากับ 30 มก.-ไนโตรเจน/ล. อย่างไรก็ตามปริมาณออกซิเจนละลายเฉลี่ยในชุดควบคุม (7.33 ± 0.33 มก./ล.) มีค่าสูงกว่าชุดทดลอง (6.70 ± 0.34 มก./ล.) ซึ่งเมื่อพิจารณาร่วมกับอุณหภูมิเฉลี่ยในชุดควบคุม (25.85 ± 1.21 °ซ) และชุดทดลอง (28.57 ± 0.34 °ซ) พบว่าอุณหภูมิในชุดทดลองสูงกว่าชุดควบคุม โดยผลจากความร้อนในการทำงานของเครื่องสูบน้ำในระบบเติมอากาศแบบเวนจูร์ทำให้อุณหภูมิของน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำสูงขึ้น ทั้งนี้อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในชุดทดลองต่ำลง

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6370275221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: Biofloc Technology; BFT, Venturi Aeration System, Particle size, Closed Aquaculture System
 Sasawat Yankay : Effects of Different Aeration Systems on Ammonia Removal Efficiency of Biofloc
 in Closed Aquaculture System for *Litopenaeus vannamei* . Advisor: Assoc. Prof. WIBOONLUK
 PUNGRASMI Co-advisor: Prof. Sorawit Powtongsook

This research evaluated the effects of different aeration systems on the ammonia removal efficiency of biofloc in a closed aquaculture system for whiteleg shrimp cultivation. The study consisted of three experiments. The first experiment investigated 3 different levels of initial carbon-to-nitrogen (C/N) ratio as 5:1, 10:1, and 15:1 to induce synthetic biofloc production for inorganic nitrogen removal. The results showed that the 30-day acclimation at a C/N ratio of 5:1 was sufficient to produce biofloc that effectively removed inorganic nitrogen, including ammonia and nitrite, through a complete nitrification process. Ammonia and nitrite could be removed from 5.95 ± 0.77 and 1.59 ± 0.46 mg-N/L to below 0.30 and 0.50 mg-N/L, respectively, within 12 days, while nitrate accumulated to 44.2 ± 10.5 mg-N/L with biofloc production at 470.00 ± 14.1 mg-TSS/L. The second experiment investigated the efficiencies of aeration systems, between an aeration diffuser and a modified venturi. The results showed that the modified venturi had higher efficiency than the aeration diffuser, which has an oxygen transfer coefficient ($K_L a$) of 0.70 ± 0.01 /hour, a standard oxygen transfer rate (SOTR) of 57.68 ± 0.18 kg-O₂/hour, a standard aeration efficiency (SAE) of 57.68 ± 0.18 kg-O₂/Kilowatt-hour, and a standard oxygen transfer efficiency (SOTE) of $7.73 \pm 0.99\%$. The last experiment investigated the performance of aeration systems applied in a closed aquaculture system with a biofloc system. Beginning with the pre-induced biofloc at a C/N ratio of 5:1 then combine into the whiteleg shrimp cultivation at an initial density of 0.3 kg/m³ for 60 days, comparing between a control set with an aeration diffuser and a treatment set with a modified venturi. The results showed that different aeration systems did not affect the particle size of biofloc, with an average size in the ranges of 70–150 micron and the amount of biofloc in the ranges of 160–190 mg-TSS/L. Biofloc could control ammonia and nitrite below 1 mg-N/L through the nitrification process with nitrate accumulation of 30 mg-N/L. However, the dissolved oxygen level in the control (7.33 ± 0.33 mg/L) was higher than in the treatment (6.70 ± 0.34 mg/L). Considering the higher temperature of the treatment (28.57 ± 0.34 °C) was above the control (25.85 ± 1.21 °C), this was a result of the heat generated by the installed pump which led to an increased water temperature. The higher water temperature leads to lower dissolved oxygen levels in the aquaculture tank of treatment set

Field of Study: Environmental Engineering
 Academic Year: 2022

Student's Signature
 Advisor's Signature
 Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่านผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ต่อไปนี้

อันดับแรกขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม สำหรับวิชาการและองค์ความรู้ที่ให้ประโยชน์ต่อการวางแผนออกแบบงานวิจัย รวมถึงความเอาใจใส่ดูแล การให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนความช่วยเหลือในทุกขั้นตอนระหว่างการทำดำเนินงานจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.อรรถัย ขวาลภาฤทธิ์ ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน กรรมการ และ ดร.เสจ ไซเพ็ชร ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงคำชี้แนะ และแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่อบรมสั่งสอน และมอบความรู้ที่เป็นประโยชน์สำหรับการประกอบวิชาชีพวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ขอขอบพระคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์ด้านสถานที่ วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมีในการทำงานวิจัย รวมถึงขอขอบคุณ คุณปวีณา ตปนิยรรวงศ์ คุณเพ็ญพิชา สท้านวัตร คุณกิตติคุณ สุคันโธวงศ์ และคุณเสรี ดอนเหนือ ตลอดจนบุคลากรศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเลทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการทำงานและการวิเคราะห์ทางด้านวิทยาศาสตร์

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (รหัสโครงการ CU_FRB65_food (18)_165_21_31) ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายตลอดการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบคุณพระบิดา มารดา บุคคลในครอบครัว รวมไปถึงเพื่อนสนิททุกคนที่คอยสนับสนุน เป็นแรงผลักดัน และเป็นกำลังใจที่ดีสำหรับผู้วิจัยเสมอมา ตลอดจนสำเร็จการศึกษาและได้รับปริญญามหาบัณฑิตตามที่ตั้งใจ

ศาสวัต ญาณกาย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	5
2.1.1 การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบน้ำหมุนเวียน (Recirculating Aquaculture System; RAS)	7
2.1.2 การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบปิด (Closed Aquaculture System; CAS).....	9
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	9
2.2.1 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen)	9
2.2.2 ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD).....	10
2.2.3 อุณหภูมิ (Temperature).....	10
2.2.4 สารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำ.....	11

2.2.5 ค่าความเป็นกรด-ด่างหรือพีเอช (pH)	13
2.2.6 ค่าความขุ่น (Turbidity)	13
2.2.7 ค่าความกระด้าง (Hardness)	13
2.2.8 ค่าอัลคาไลน์ตี (Alkalinity)	14
2.2.9 ค่าความเค็ม (Salinity)	14
2.3 ตะกอนอินทรีย์ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ	15
2.4 เทคโนโลยีไบโอฟล็อกกับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Biofloc Technology, BFT)	15
2.4.1 หลักการบำบัดด้วยไบโอฟล็อก	16
2.4.2 กระบวนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบไบโอฟล็อกผ่านวัฏจักรไนโตรเจนในน้ำ	19
2.4.3 การเติมอากาศในระบบบำบัดไบโอฟล็อก	21
2.5 กุ้งขาวและการเพาะเลี้ยงกุ้งขาว	29
2.5.1 สรีรวิทยาและอนุกรมวิธานของกุ้งขาว	29
2.5.2 ลักษณะคุณภาพน้ำในการเลี้ยงกุ้งขาวตามค่ามาตรฐานการเลี้ยงกุ้ง	31
2.6 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
2.6.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งขาว	34
2.6.2 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไบโอฟล็อกในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	38
2.6.3 ความสัมพันธ์ของขนาดและปริมาณตะกอนไบโอฟล็อกต่อประสิทธิภาพการบำบัด	44
2.6.4 ประสิทธิภาพของระบบการเติมอากาศ	46
2.7 สรุปประเด็นสำคัญจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	50
บทที่3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย	53
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี	53
3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง	53
3.1.2 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์น้ำ	53

3.1.3 สารเคมี.....	54
3.2 แผนการทดลอง	55
3.3 การดำเนินงานวิจัย.....	60
3.3.1 การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในโตรเจน	60
3.3.1.1 การแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในการสร้างตะกอนไบโอฟล็อก ..	60
3.3.1.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนไบโอฟล็อก	60
3.3.2 การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษารูปแบบการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน	61
3.3.2.1 การศึกษารูปแบบการเติมอากาศต่ออัตราการถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพการเติมอากาศ	61
3.3.3 การทดลองช่วงที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่ผนวกส่วนบำบัดแบบไบโอฟล็อก	64
3.3.3.1 การเตรียมตะกอนไบโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ..	64
3.3.3.2 การเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่ผนวกกับระบบบำบัดแบบตะกอนไบโอฟล็อก	65
3.3.3.3 การประเมินอัตราการกำจัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อก	66
3.3.3.4 การประเมินอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อก.....	66
3.3.3.5 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนไบโอฟล็อก	67
3.3.3.6 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพสัตว์น้ำ.....	67
3.4 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด	70
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	72
4.1 การศึกษาอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟล็อกเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในโตรเจน.....	72
4.1.1 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพตะกอน	72

4.1.2 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ	77
4.2 การศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศของอุปกรณ์เติมอากาศเพื่อใช้ในระบบบำบัดแบบ ไบโอฟล๊อค	82
4.2.1 การศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนลงไปใต้น้ำ ($K_L a$)	82
4.2.2 อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTR)	83
4.2.3 ประสิทธิภาพการเติมอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (SAE) และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTE)	84
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดผนวกกับส่วนบำบัด ไบโอฟล๊อค	86
4.3.1 การเตรียมตะกอนไบโอฟล๊อคที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 5:1	86
4.3.2 การเลี้ยงกุ้งขาวระบบปิดผนวกที่กับส่วนบำบัดไบโอฟล๊อคเมื่อเติมอากาศด้วยรูปแบบแตกต่างกัน	95
4.3.3 อัตราการกำจัดแอมโมเนียและการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล๊อค	106
4.3.4 การเจริญเติบโตของสัตว์น้ำในระหว่างการทดลอง	109
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	112
5.1 สรุปผลการทดลอง	112
5.2 ข้อเสนอแนะ	114
บรรณานุกรม	116
ภาคผนวก ก	122
ภาคผนวก ข	128
ภาคผนวก ค	136
ภาคผนวก ง	139
ประวัติผู้เขียน	166

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต.....	10
ตารางที่ 2.2 ค่ามาตรฐานบีโอดีในน้ำเสียของแหล่งน้ำ.....	10
ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของค่าพีเอชกับการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ.....	13
ตารางที่ 2.4 ประเภทของน้ำตามระดับความกระด้าง	14
ตารางที่ 2.5 ค่าความเค็มของน้ำ	15
ตารางที่ 2.6 การใช้งานระบบเติมอากาศแบบเวนจูรีตามสภาวะการติดตั้ง	29
ตารางที่ 2.7 พารามิเตอร์สรุปคุณภาพน้ำที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงกุ้งขาว	33
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรต่างๆ ค่าที่ใช้ในการทดลอง และพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ในการทดลองช่วงที่ 1	61
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรต่างๆ ค่าที่ใช้ในการทดลอง และพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ในการทดลองช่วงที่ 2	64
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรต่างๆ ค่าที่ใช้ในการทดลอง และพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ในการทดลองช่วงที่ 3	69
ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ตะกอนในการทดลอง.....	70
ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์คุณภาพสัตว์น้ำ.....	71
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์คุณภาพตะกอนระหว่างการบ่มตะกอนไปโอฟล็อกเป็นเวลา 30 วัน	75
ตารางที่ 4.2 สารอินทรีย์ในโตรเจนระหว่างการบ่มตะกอนไปโอฟล็อกเป็นเวลา 30 วัน	79
ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์คุณภาพน้ำระหว่างการบ่มตะกอนไปโอฟล็อกเป็นเวลา 30 วัน.....	81
ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ประสิทธิภาพการเติมอากาศรูปแบบหัวทรายและเวนจูรี	85
ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ทางคุณภาพตะกอนในระหว่างเตรียมตะกอนไปโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1	87
ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำในระหว่างเตรียมตะกอนไปโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1	93
ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ทางคุณภาพตะกอนในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน	96
ตารางที่ 4.8 สารอินทรีย์ในโตรเจนระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน.....	102

ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน	106
ตารางที่ 4.10 พารามิเตอร์การเจริญเติบโตของกุ้งขาวในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน	111



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำร่วมกับการสร้างตะกอนไบโอฟล็อก.....	18
รูปที่ 2.2 รูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแยกถังกับการสร้างตะกอนไบโอฟล็อก	18
รูปที่ 2.3 หลักการการเติมอากาศของระบบเวนจูรี	23
รูปที่ 2.4 กุ้งขาวแวนนาไม	30
รูปที่ 2.5 แผนภาพการชุดการทดลองที่มีการติดตั้งระบบตกตะกอนของแข็ง	39
รูปที่ 3.1 แผนผังภาพรวมงานวิจัย	56
รูปที่ 3.2 แผนผังภาพการทดลองช่วงที่ 1	57
รูปที่ 3.3 แผนผังภาพการทดลองช่วงที่ 2	58
รูปที่ 3.4 แผนผังภาพการทดลองช่วงที่ 3	59
รูปที่ 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการเติมอากาศ.....	62
รูปที่ 3.6 การติดตั้งอุปกรณ์การเตรียมตะกอนไบโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1	65
รูปที่ 3.7 การวิเคราะห์การเจริญเติบโตของกุ้งขาว	68
รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลง (ก) ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (ข) ปริมาณตะกอนที่ตกในเวลา 30 นาที และ (ค) ค่าดัชนีปริมาณตะกอน ในระหว่างการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกเป็นเวลา 30 วัน	76
รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลง (ก) ปริมาณแอมโมเนียทั้งหมด (ข) ปริมาณไนไตรต์ และ (ค) ปริมาณ ไนเตรตในระหว่างการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกเป็นเวลา 30 วัน	80
รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำในแต่ละช่วงเวลาจนเข้าใกล้จุดอิ่มตัว	83
รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลง (ก) ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (ข) ปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนในเวลา 30 นาที และ (ค) ค่าดัชนีตะกอน ระหว่างการเตรียมตะกอนไบโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1	88
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลง (ก) ขนาดตะกอน และ (ข) การกระจายตัวของขนาดตะกอน ในระหว่างการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1	90

รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลง (ก) ปริมาณแอมโมเนียทั้งหมด (ข) ปริมาณไนไตรต์ และ (ค) ปริมาณ ไน เทรต ในระหว่างการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1	92
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลง (ก) ปริมาณออกซิเจนละลาย (ข) พีเอช (ค) อุณหภูมิ และ (ง) อัลคาลินิตี ในระหว่างการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1	94
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลง (ก) ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (ข) ปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนใน เวลา 30 นาที และ (ค) ค่าดัชนีปริมาณตะกอน ในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน	97
รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงขนาดตะกอนไบโอฟล็อกในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน.....	99
รูปที่ 4.10 การกระจายตัวของขนาดตะกอนไบโอฟล็อกในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน	100
รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลง (ก) ปริมาณแอมโมเนียทั้งหมด (ข) ปริมาณไนไตรต์ และ (ค) ปริมาณ ไน เทรต ในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน.....	103
รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลง (ก) ปริมาณออกซิเจนละลาย (ข) อุณหภูมิ (ค) พีเอช และ (ง) ค่าอัลคาลิ นิตีในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน	105
รูปที่ 4.13 อัตราการกำจัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกระหว่างเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน	107
รูปที่ 4.14 อัตราการกำจัดการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อกระหว่างเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็น เวลา 60 วัน.....	109
รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลง (ก) น้ำหนักกุ้ง และ (ข) ความยาวกุ้งในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์ น้ำเป็นเวลา 60 วัน.....	110

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันรูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิด (Closed Aquaculture System) มีบทบาทหลักในอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยเฉพาะการเลี้ยงกุ้งขาว โดยสามารถลดการเกิดโรคติดต่อได้ดีกว่าระบบการเลี้ยงแบบเปิด และยังสามารถรองรับการเลี้ยงสัตว์น้ำที่ระดับความหนาแน่นสูงขึ้น ทำให้ได้ผลผลิตที่มีปริมาณมากเพียงพอตามความต้องการของตลาดและผู้บริโภค นอกจากนี้ระบบยังมีเสถียรภาพที่ดีและสามารถหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้ลดต้นทุนค่าน้ำในการผลิต และมีปริมาณการปล่อยน้ำเสียออกจากระบบการเลี้ยงสู่สิ่งแวดล้อมน้อยลง (Hisano และคณะ, 2021) ทั้งนี้เทคโนโลยีไบโอฟล็อก (Biofloc Technology; BFT) เป็นรูปแบบหนึ่งของการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิดที่ควบคุมสารอินทรีย์ไนโตรเจนในระบบได้ดี โดยอาศัยการทำงานของตะกอนจุลชีพแบบแขวนลอยหรือตะกอนไบโอฟล็อก (Biofloc) ซึ่งเจริญเติบโตโดยใช้แหล่งไนโตรเจนจากสารประกอบแอมโมเนียที่มาจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำ และถูกกระตุ้นให้เพิ่มจำนวนมากขึ้นจากการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปกากน้ำตาลตามสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ที่เหมาะสมลงในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำตามรายงานวิจัยของ Abakari และคณะ (2021) ในทางปฏิบัติระบบไบโอฟล็อกมักถูกควบคุมอัตราส่วนดังกล่าวในช่วง 10-15 ต่อ 1 (Panigrahi และคณะ, 2018) เพื่อกระตุ้นให้เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของตะกอนชีวภาพ (Bio-flocculation) สำหรับกิจกรรมในระบบช่วงแรกจะพบการทำงานร่วมกันระหว่างแบคทีเรียสองกลุ่มคือ กลุ่มเฮเทอโอโทรฟ (Heterotrophic Bacteria) ซึ่งมีอัตราการเจริญเติบโตสูง และมีบทบาทหลักในการควบคุมปริมาณแอมโมเนียผ่านกระบวนการแอสซิมิเลชัน (Assimilation) จากนั้นเมื่อเดินระบบต่อเนื่องแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟ (Autotrophic Bacteria) ที่มีอัตราการเจริญเติบโตต่ำกว่าจะเพิ่มจำนวนมากขึ้นเพียงพอและมีบทบาทในการกำจัดแอมโมเนียที่เหลือผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ส่งผลให้ความเป็นพิษของแอมโมเนียที่เกิดจากสิ่งขับถ่ายของสัตว์น้ำในระบบถูกออกซิไดซ์เปลี่ยนไปอยู่ในรูปไนไตรต์และไนเตรตซึ่งมีความเป็นพิษน้อยกว่า และสามารถกำจัดออกจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้ในที่สุด (Emerenciano และคณะ, 2017) ทั้งนี้กิจกรรมทางชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นลำดับขั้นดังกล่าวต้องอาศัยระยะเวลาช่วงหนึ่งเพื่อให้จุลินทรีย์สองกลุ่มทำงานต่อเนื่องกันและการกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนเกิดขึ้นอย่างสมดุล แตกต่างจากระบบไบโอฟล็อกที่เริ่มต้นการเดินระบบจากตะกอนอินทรีย์

ที่ผ่านการบ่มตะกอนมาแล้วล่วงหน้า ซึ่งกลุ่มจุลินทรีย์ในตะกอนชีวภาพจะทำงานได้ทันทีอย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถควบคุมปริมาณสารอินทรีย์ในโตรเจนผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังเป็นการลดปริมาณการใช้สารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อกระตุ้นตะกอนไบโอฟล็อกและลดระยะเวลาการเตรียมระบบได้เป็นอย่างดี (Vilani และคณะ, 2016)

อย่างไรก็ตามปัจจัยสำคัญในการเดินระบบไบโอฟล็อกคือกระบวนการเติมอากาศ ซึ่งต้องมีความเหมาะสมและทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากปริมาณความต้องการออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อกในช่วงระหว่างการเติมและไม่เติมสารอินทรีย์คาร์บอนมีค่าแตกต่างกัน โดยความต้องการออกซิเจนมักสัมพันธ์กับชนิดของแบคทีเรียและปริมาณตะกอนที่เติบโตแขวนลอยอยู่ในระบบ นอกจากนี้ระบบไบโอฟล็อกยังจำเป็นต้องมีรูปแบบการกวนผสมที่ดี เพื่อช่วยกระจายให้ทุกพื้นที่ของบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำมีค่าปริมาณออกซิเจนละลายเท่ากันทุกจุด และป้องกันการตกตะกอนซึ่งจะส่งผลให้เกิดภาวะอับอากาศที่พื้นบ่อ (De Schryver และคณะ, 2008) สำหรับหลักการทั่วไปของการเติมอากาศจะเป็นการผลิตฟองอากาศขนาดเล็กเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำ โดยรูปแบบที่นิยมใช้ในระบบไบโอฟล็อกคือ การเติมอากาศผ่านหัวทราย (Diffused Aeration) เนื่องจากไม่ต้องการการดูแลรักษามาก ฟองอากาศขนาดเล็กที่ถูกสร้างออกมาจะทำให้อากาศเคลื่อนที่และเกิดการกวนผสมได้ดี แต่ทั้งนี้รูปแบบการกวนจะเป็นลักษณะการผสมจากด้านล่างไปยังด้านบนจึงเหมาะกับถังปฏิกรณ์ทรงสูง ในการใช้งานจะต้องพิจารณาถึงขนาดถังและจำนวนเครื่องเติมอากาศให้เหมาะสมกับการเพาะเลี้ยงด้วย ในสภาวะปัจจุบันเนื่องจากมุ่งเน้นการเลี้ยงสัตว์น้ำที่ความหนาแน่นสูงเพื่อให้ได้ผลผลิตปริมาณมาก จึงเริ่มมีการประยุกต์ใช้รูปแบบการเติมอากาศแบบเวนจูรี (Venturi Aeration) เป็นทางเลือกเพื่อสร้างฟองอากาศละเอียดในการเพิ่มออกซิเจนถ่ายเทในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ และเกิดบริเวณออกซิโดซ์สารอินทรีย์จากการสูบน้ำให้ผสมกับอากาศผ่านเครื่องสูบน้ำในระบบไบโอฟล็อก ทำให้ตะกอนอินทรีย์แขวนลอยถูกบดตีจนมีขนาดเล็กลงขณะหมุนเวียนผ่านเครื่องสูบน้ำ ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อก

งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของรูปแบบการเติมอากาศต่อขนาดตะกอน และประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกสำหรับรองรับการเลี้ยงกุ้งขาวที่ความหนาแน่นสูงในระบบปิด โดยข้อมูลที่ได้จะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบรูปแบบการเติมอากาศที่เหมาะสมสำหรับระบบบำบัดไบโอฟล็อกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเติมอากาศและการกำจัดสารอินทรีย์ในโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงสามารถประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่มีการหมุนเวียนน้ำขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของรูปแบบการเติมอากาศแบบหัวทรายและแบบเวนจูรีต่อขนาดตะกอนและอัตราการกำจัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อก
2. เพื่อประเมินประสิทธิภาพของรูปแบบการเติมอากาศแบบหัวทรายและแบบเวนจูรีในการรองรับการเลี้ยงกุ้งความหนาแน่นสูงในระบบบำบัดไบโอฟล็อก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับปฏิบัติการ ดำเนินการที่อุณหภูมิตั้งที่ ๒๕ องศาเซลเซียสในห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกำหนดขอบเขตของงานวิจัย ดังนี้

1. การทดลองที่ 1 และ 3 ทำการทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous experiment) ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำขนาดทดลอง (Laboratory scale) โดยการทดลองที่ 1 ทำในบ่อปริมาตร 2 ลิตร เป็นเวลา 30 วัน และการทดลองที่ 3 ทำในบ่อปริมาตร 200 ลิตร โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำเป็นเวลา 60 วัน ส่วนการทดลองที่ 2 ทำการทดสอบประสิทธิภาพการเติมอากาศของเครื่องเติมอากาศแบบแบทช์ (Batch experiment) ในถังขนาดทดลองปริมาตร 250 ลิตร
2. พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา คืออัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในการบ่มตะกอนไบโอฟล็อก 3 ค่า (5:1 10:1 และ 15:1) เทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน โดยตะกอนไบโอฟล็อกใช้ในการทดลองเป็นตะกอนอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจริงในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจากการกระตุ้นด้วยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปกากน้ำตาล
3. ศึกษารูปแบบเติมอากาศแตกต่างกัน 2 รูปแบบ คือ การเติมอากาศแบบหัวทราย และการเติมอากาศแบบเวนจูรี
4. สัตว์น้ำที่ใช้ในการทดลอง คือกุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*) โดยในการทดลองที่ 3 จะทำการเลี้ยงที่ความหนาแน่นเริ่มต้นเท่ากับ 0.3 กก./ลบ.ม. ของปริมาตรน้ำในจืดบ่อ และให้อาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีทั่วไปตามท้องตลาดทุกวัน ด้วยอัตราร้อยละ 3-5 ต่อวันของน้ำหนักกุ้งทั้งหมด
5. พารามิเตอร์ที่ศึกษา คือ ประสิทธิภาพการเติมอากาศในระบบบำบัดแบบไบโอฟล็อก โดยติดตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและชีวภาพของตะกอนไบโอฟล็อก ได้แก่ ขนาดตะกอน การกระจายตัวของตะกอน อัตราการกำจัดแอมโมเนีย และอัตราการใช้ออกซิเจน เป็นต้น

6. ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอน ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต ปริมาณออกซิเจนละลาย ปริมาณของแข็งแขวนลอย ฯลฯ ตามวิธีมาตรฐานที่ระบุใน Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017)
7. ติดตามอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการรอดชีวิตของสัตว์น้ำ โดยเก็บตัวอย่างกุ้งขาวเพื่อชั่งน้ำหนัก-วัดความยาว และตรวจนับจำนวนกุ้งที่มีชีวิตเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลการเติมอากาศแบบหัวทรายและแบบเวนจูร์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกในระบบเลี้ยงกุ้งขาวแบบปิด ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบรูปแบบการเติมอากาศที่เหมาะสมของระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบไบโอฟล็อกที่มีประสิทธิภาพการเติมอากาศและการกำจัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนสูงสุด เพื่อรองรับการเลี้ยงสัตว์น้ำที่ความหนาแน่นสูง โดยเป็นทางเลือกหนึ่งที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อส่งเสริมให้มีการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นับแต่อดีตประเทศไทยจัดเป็นหนึ่งในผู้นำของโลกในภาคการประมงด้านการเกษตรและการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งสามารถสร้างผลผลิตสัตว์น้ำจืดอันดับ 1 ใน 20 ของโลกจากการประเมินปริมาณและมูลค่าการผลิตในรอบต่อปี โดยพบว่าเมื่ออัตราการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจอย่างมาก ในปี 2550 จนถึงปัจจุบัน ซึ่งผลผลิตดังกล่าวใช้ในการบริโภคภายในประเทศและนำส่งออกในปริมาณมาก เนื่องด้วยลักษณะของสภาพภูมิประเทศของประเทศไทยนั้นเหมาะสมกับการเพาะเลี้ยงทั้งในรูปแบบการประมงน้ำจืดและชายฝั่งหรือการเพาะเลี้ยงในเชิงอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากการพัฒนาูปแบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและการแปรรูปผลผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเพาะเลี้ยงกุ้ง เนื่องจากมีแรงจูงใจในปัจจัยด้านราคาสูง ทำให้มีการเพาะเลี้ยงมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีมูลค่าส่งออกคิดเป็นร้อยละ 32 จากสินค้าทางการประมงและเพาะเลี้ยงของประเทศไทย

ทั้งนี้จากความต้องการทางการตลาดโลกที่เพิ่มสูงขึ้น ประกอบกับคู่แข่งทางด้านการค้าชะลอตัวลง ส่งผลให้การเพาะเลี้ยงกุ้งเพื่อการส่งออกสู่ตลาดมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น จึงต้องมีแนวทางควบคุมผลผลิตให้มีคุณภาพและปริมาณที่มากพอโดยเป็นไปตามมาตรฐานที่ต่างประเทศกำหนด เป็นเหตุผลที่ทำให้ต้องมีการพัฒนาศักยภาพของเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงเพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพเพื่อให้สอดคล้องกับสถานการณ์ทางการค้าที่มีความต้องการสูง ซึ่งมุ่งเน้นไปที่ด้านการลดต้นทุนการผลิต การพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ได้ตามมาตรฐานและปลอดภัยต่อผู้บริโภค รวมถึงการลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น

2.1 ระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ในปัจจุบันนวัตกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำรูปแบบใหม่ที่ลดการใช้น้ำมาผลิต (Smart Aquaculture หรือ Recirculating Aquaculture System; RAS) เป็นระบบที่สามารถหมุนเวียนน้ำที่ถูกใช้ในระบบเพาะเลี้ยงและนำเข้าสู่ระบบบำบัดแล้วสามารถนำมาใช้ในระบบเพาะเลี้ยงได้ใหม่ ซึ่งเป็นการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่สามารถประเมินปริมาณและคุณภาพของผลผลิตล่วงหน้าได้ดีกว่าการเพาะเลี้ยงในระบบเปิด เช่น การเลี้ยงในบ่อดิน และยังสามารถเพาะเลี้ยงได้ในระดับความหนาแน่นสูง ซึ่งรูปแบบนี้สามารถควบคุมปริมาณสารอาหารที่ใช้เลี้ยงสัตว์น้ำในระบบควบคุมค่าคุณภาพน้ำ และ

สารอินทรีย์ในน้ำได้ จึงทำให้ได้ผลผลิตที่ตรงตามความต้องการของตลาด (นิวุฒิ หวังชัย, 2562) อาจกล่าวได้ว่าระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดถูกนำมาใช้สำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างแพร่หลาย ซึ่งระบบจะมีการบำบัดและหมุนเวียนน้ำรวมไปถึงการควบคุมปริมาณสารประกอบไนโตรเจนในน้ำในรูปของแอมโมเนียและไนไตรต์ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้ปริมาณและคุณภาพแย่ลง เนื่องจากสร้างความเป็นพิษในน้ำและทำให้การแลกเปลี่ยนออกซิเจนของสัตว์น้ำได้น้อยลง กระบวนการบำบัดที่เกิดขึ้นจะอาศัยกิจกรรมของจุลชีพในน้ำเพื่อเปลี่ยนแปลงสิ่งปฏิกูลที่มาจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำให้อยู่ในรูปของสารอนินทรีย์ไนโตรเจนที่มีความเป็นพิษน้อยที่สุดตามขั้นตอนในปฏิกิริยานิไตรฟิเคชัน (Nitrification) (Abakari และคณะ, 2021; Luo และคณะ, 2020) ทั้งนี้ข้อดีของการมีระบบบำบัดคือ สามารถเพิ่มผลผลิตให้ได้ตามความต้องการของผู้บริโภคตามท้องตลาดและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ดี เนื่องจากการไม่มีการปล่อยน้ำเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม

จากการศึกษาพบว่าเทคโนโลยีไบโอฟล็อกเป็นรูปแบบหนึ่งของการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิดที่สามารถควบคุมสารอนินทรีย์ไนโตรเจนได้ดี และยังสามารถพัฒนาให้เป็นการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างยั่งยืนผ่านการเติบโตสีน้ำเงิน (Blue Growth) ในการลดปริมาณของเสียจากระบบเพาะเลี้ยงออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ในอนาคต โดยสิ่งที่คงเหลืออยู่ในระบบไบโอฟล็อกส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถถูกย่อยสลายจนเกิดการสะสมเป็นสารอนินทรีย์ไนโตรเจนโดยเฉพาะแอมโมเนียในปริมาณสูง แอมโมเนียดังกล่าวจะถูกกำจัดโดยการทำงานร่วมกันระหว่างแบคทีเรีย 2 กลุ่มคือ กลุ่มเฮเทอโรโทรฟที่สามารถดูดซึมแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ผ่านกระบวนการแอสซิมิเลชันเพื่อนำไปสร้างส่วนประกอบของเซลล์ โดยมีแบคทีเรียกลุ่มเส้นใย (Filamentous bacteria) ช่วยในการสร้างสารเหนียวจำพวกโพลีแซ็กคาไรด์เพื่อรวมตัวสารแขวนลอยขนาดเล็กในมวลน้ำร่วมกับสาหร่าย แพลงก์ตอนพืช และโปรโตซัวผ่านกระบวนการสมานตะกอนหรือฟล็อกคูเลชัน (Flocculation) จากนั้นกลุ่มออโตโทรฟจะทำหน้าที่ในการกำจัดแอมโมเนียที่สะสมในระบบผ่านกระบวนการไนไตรฟิเคชันต่อไป (Samocha และคณะ, 2019) ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างการเดินระบบไบโอฟล็อกมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำออกจากระบบน้อยมากหรือแทบเป็นศูนย์ ปัญหาที่อาจพบได้คือการสะสมของปริมาณตะกอนไบโอฟล็อกมากเกินไปส่งผลทำให้เกิดการอุดตันบริเวณเหงือกและขัดขวางกระบวนการหายใจของสัตว์น้ำ อีกทั้งการสะสมของปริมาณตะกอนไบโอฟล็อกที่เกิดจากการรวมตัวของกลุ่มจุลชีพยังส่งผลต่อการลดลงของปริมาณออกซิเจนละลายในระบบอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการควบคุมอัตราส่วนสารอินทรีย์คาร์บอนที่เติมเข้าระบบจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการเดินระบบไบโอฟล็อก นอกจากจะช่วยลดปัญหาการสะสมของแอมโมเนียแล้วยังส่งผลให้ปริมาณตะกอนไบโอฟล็อกที่เกิดขึ้นเหมาะสมต่อระบบเพาะเลี้ยง และ

สามารถกำหนดกลุ่มประชากรจุลินทรีย์เพื่อช่วยกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนในระบบได้อีกด้วย (Chen และคณะ, 2019) นอกจากนี้ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบไบโอฟล็อกในการกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนคือ การเติมอากาศซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบ โดยมีส่วนช่วยในการรวมตัวของไบโอฟล็อก ทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำในระบบที่ดี ส่งผลให้แบคทีเรียและสัตว์น้ำได้รับออกซิเจนอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ ช่วยป้องกันการตกตะกอนของไบโอฟล็อกในสภาวะอับอากาศที่มึนบ่อได้ และยังช่วยลดการสลายตัวของโปรตีนในการยึดเกาะของตะกอนไบโอฟล็อกซึ่งส่งผลโดยตรงกับการกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนและอัตราการรอดของสัตว์น้ำในระบบ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจำเป็นต้องควบคุมทั้งค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนควบคู่ไปกับการเลือกใช้ระบบการเติมอากาศที่เหมาะสม เพื่อให้การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.1.1 การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบน้ำหมุนเวียน (Recirculating Aquaculture System; RAS)

ในปัจจุบันนวัตกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำรูปแบบใหม่ที่ลดการใช้น้ำมาผลิต (Smart Aquaculture หรือ Recirculating Aquaculture System; RAS) เป็นระบบที่สามารถหมุนเวียนน้ำที่ถูกใช้ในระบบเพาะเลี้ยงและนำเข้าสู่ระบบบำบัดแล้วสามารถนำมาใช้ในระบบเพาะเลี้ยงได้ใหม่ ซึ่งเป็นการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่สามารถประเมินปริมาณและคุณภาพของผลผลิตล่วงหน้าได้ดีกว่าการเพาะเลี้ยงในระบบเปิด เช่น การเลี้ยงในบ่อดิน และยังสามารถเพาะเลี้ยงได้ในระดับความหนาแน่นสูง ซึ่งรูปแบบนี้สามารถควบคุมปริมาณสารอาหารที่ใช้เลี้ยงสัตว์น้ำในระบบควบคุมค่าคุณภาพน้ำ และสารอินทรีย์ในน้ำได้ จึงทำให้ได้ผลผลิตที่ตรงตามความต้องการของตลาด (นิวุฒิ หวังชัย, 2562) อาจกล่าวได้ว่าระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดถูกนำมาใช้สำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างแพร่หลาย ซึ่งระบบจะมีการบำบัดและหมุนเวียนน้ำรวมไปถึงการควบคุมปริมาณสารประกอบไนโตรเจนในน้ำในรูปแบบของแอมโมเนียและไนไตรต์ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้ปริมาณและคุณภาพแย่งลง เนื่องจากสร้างความเป็นพิษในน้ำและทำให้การแลกเปลี่ยนออกซิเจนของสัตว์น้ำได้น้อยลง กระบวนการบำบัดที่เกิดขึ้นจะอาศัยกิจกรรมของจุลชีพในน้ำเพื่อเปลี่ยนแปลงสิ่งปฏิกูลที่มากจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำให้อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ไนโตรเจนที่มีความเป็นพิษน้อยที่สุดตามขั้นตอนในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification) (Abakari และคณะ, 2021; Luo และคณะ, 2020) ทั้งนี้ข้อดีของการมีระบบบำบัด คือ สามารถเพิ่มผลผลิตให้ได้ตามความต้องการของผู้บริโภคตามท้องตลาดและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ดี เนื่องจากไม่มีการปล่อยน้ำเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม

จากการศึกษาพบว่าเทคโนโลยีไบโอฟล็อกเป็นรูปแบบหนึ่งของการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิดที่สามารถควบคุมสารอินทรีย์ไนโตรเจนได้ดี และยังสามารถพัฒนาให้เป็นการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างยั่งยืนผ่านการเติบโตสีน้ำเงิน (Blue Growth) ในการลดปริมาณของเสียจากระบบเพาะเลี้ยงออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ในอนาคต โดยสิ่งที่คงเหลืออยู่ในระบบไบโอฟล็อกส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถถูกย่อยสลายจนเกิดการสะสมเป็นสารอินทรีย์ไนโตรเจนโดยเฉพาะแอมโมเนียในปริมาณสูง แอมโมเนียดังกล่าวจะถูกกำจัดโดยการทำงานร่วมกันระหว่างแบคทีเรีย 2 กลุ่มคือ กลุ่มเฮเทอโรโทรฟที่สามารถดูดซึมแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ผ่านกระบวนการแอสซิมิเลชันเพื่อนำไปสร้างส่วนประกอบของเซลล์ โดยมีแบคทีเรียกลุ่มเส้นใย (Filamentous bacteria) ช่วยในการสร้างสารเหนียวจำพวกโพลีแซ็กคาไรด์เพื่อรวมตัวสารแขวนลอยขนาดเล็กในมวลน้ำร่วมกับสาหร่าย แพลงก์ตอนพืช และโปรโตซัวผ่านกระบวนการสมานตะกอนหรือฟล็อกคูเลชัน (Flocculation) จากนั้นกลุ่มออโตโทรฟจะทำหน้าที่ในการกำจัดแอมโมเนียที่สะสมในระบบผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันต่อไป (Samocha และคณะ, 2019) ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างการเดินระบบไบโอฟล็อกมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำออกจากระบบน้อยมากหรือแทบเป็นศูนย์ ปัญหาที่อาจพบได้คือการสะสมของปริมาณตะกอนไบโอฟล็อกมากเกินไปส่งผลทำให้เกิดการอุดตันบริเวณเหงือกและขัดขวางกระบวนการหายใจของสัตว์น้ำ อีกทั้งการสะสมของปริมาณตะกอนไบโอฟล็อกที่เกิดจากการรวมตัวของกลุ่มจุลชีพยังส่งผลต่อการลดลงของปริมาณออกซิเจนละลายในระบบอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการควบคุมอัตราส่วนสารอินทรีย์คาร์บอนที่เติมเข้าระบบจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการเดินระบบไบโอฟล็อก ซึ่งนอกจากจะช่วยลดปัญหาการสะสมของแอมโมเนียแล้วยังส่งผลให้ปริมาณตะกอนไบโอฟล็อกที่เกิดขึ้นเหมาะสมต่อระบบเพาะเลี้ยง และสามารถกำหนดกลุ่มประชากรจุลินทรีย์เพื่อช่วยกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนในระบบได้อีกด้วย (Chen และคณะ, 2019) นอกจากนี้ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบไบโอฟล็อกในการกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนคือ การเติมอากาศซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบ โดยมีส่วนช่วยในการรวมตัวของไบโอฟล็อก ทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำในระบบที่ดี ส่งผลให้แบคทีเรียและสัตว์น้ำได้รับออกซิเจนอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ ช่วยป้องกันการตกตะกอนของไบโอฟล็อกในสภาวะอับอากาศที่มุมบ่อได้ และยังช่วยลดการสลายตัวของโปรตีนในการยึดเกาะของตะกอนไบโอฟล็อกซึ่งส่งผลโดยตรงกับการกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนและอัตราการรอดของสัตว์น้ำในระบบ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจำเป็นต้องควบคุมทั้งค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนควบคู่ไปกับการเลือกใช้ระบบการเติมอากาศที่เหมาะสม เพื่อให้การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.1.2 การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบปิด (Closed Aquaculture System; CAS)

เป็นรูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการผนวกหน่วยบำบัดเข้าไปในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อรองรับการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นสูงและตอบโจทย์ฟาร์มที่มีพื้นที่จำกัด โดยรูปแบบที่ได้รับความนิยมได้แก่ ระบบไบโอฟล็อกที่สามารถลดต้นทุนได้ดีทั้งด้านอาหารในระหว่างการเพาะเลี้ยงและปริมาณการใช้น้ำในระบบการเลี้ยง เนื่องจากสามารถควบคุมปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นและลดการปล่อยน้ำเสียออกจากระบบ การเลี้ยงสัตว์น้ำรูปแบบนี้อาศัยบทบาทของแบคทีเรียในการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกซึ่งเป็นตะกอนอินทรีย์แขวนลอยในมวลน้ำที่ประกอบไปด้วยแพลงก์ตอน โปรโตซัว และแบคทีเรียที่สำคัญทั้งกลุ่มเฮเทอโอโทรฟและออโทโทรฟ จุลชีพแขวนลอยเหล่านี้มีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนที่เกิดจากสิ่งขับถ่ายของสัตว์น้ำและอาหารตกค้างในระบบได้ดี ทั้งนี้ตะกอนไบโอฟล็อกสามารถเกิดเองได้ตามธรรมชาติโดยต้องอาศัยการไหลเวียนของอากาศภายในน้ำอย่างสม่ำเสมอ และมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสม โดยมีรายงานว่าหากต้องการนำระบบไบโอฟล็อกมาใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำให้มีประสิทธิภาพ จะต้องควบคุมอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนให้อยู่ในช่วงระหว่าง 10–15 ต่อ 1 ซึ่งทำได้โดยการเตรียมอาหารที่มีแหล่งคาร์บอนตามความต้องการของแบคทีเรีย ได้แก่ แป้ง น้ำตาล พวกกากใย และใช้แหล่งไนโตรเจนจากกรดอะมิโนหรือโปรตีน เป็นต้น

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

คุณภาพน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการบำบัดของระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และการดำรงชีวิตของทั้งสัตว์น้ำและแบคทีเรียที่จำเป็นในระบบเป็นอย่างมาก เนื่องจากคุณภาพน้ำที่ดีจะเป็นตัวกำหนดทิศทางการเดินระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทั้งทางตรงและทางอ้อม ดังนั้นในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการควบคุมคุณภาพน้ำและตะกอนอินทรีย์ที่สำคัญซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen)

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณออกซิเจนที่ละลายในแหล่งน้ำนั้นๆ ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงคุณภาพของน้ำได้ โดยปริมาณออกซิเจนเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ เนื่องจากมีบทบาทในการหายใจและควบคุมอัตราการเกิดกระบวนการเมตาบอลิซึมของสัตว์น้ำ รวมไปถึงการเกิดกิจกรรมของแบคทีเรียบางชนิด แพลงก์ตอนพืช และพืชน้ำต่างๆ เช่น กระบวนการ

สังเคราะห์ด้วยแสงซึ่งเป็นกระบวนการหลักในการสร้างอาหาร โดยจะมีความสัมพันธ์กันระหว่างปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (ม.ก./ล.)	ผลต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ
น้อยกว่า 2	ทำให้เกิดภาวะขาดออกซิเจนถ้าปล่อยไว้เป็นเวลานาน ทำให้สัตว์และพืชไม่สามารถมีชีวิตได้
น้อยกว่า 3	เริ่มเกิดสภาวะน้ำเน่าเสีย
อยู่ในช่วงมากกว่า 4 - 7	เป็นปริมาณที่ปกติและเหมาะสมสำหรับในแหล่งน้ำ เป็นสภาวะน้ำคุณภาพดีต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต

(มันสิน ตันกุลเวศม์ และคณะ, 2544)

2.2.2 ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD)

บีโอดีเป็นค่าของปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการดำรงชีวิตและการย่อยสลายสารอินทรีย์อนินทรีย์ในน้ำ (น้ำเสีย) ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำคือ เมื่อน้ำมีปริมาณบีโอดีที่สูงจะหมายถึงแหล่งน้ำที่พบเป็นน้ำเสียทำให้มีความต้องการออกซิเจนสูง หรือสื่อได้ว่าน้ำในแหล่งน้ำนั้นมีค่าออกซิเจนละลายน้ำต่ำ ไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้เพื่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ นอกจากนี้ยังสามารถใช้คาดการณ์การทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียได้ ซึ่งเกณฑ์ที่ใช้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพน้ำ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่ามาตรฐานบีโอดีในน้ำเสียของแหล่งน้ำ

ปริมาณบีโอดี (ม.ก./ล.)	ค่ามาตรฐานสำหรับ
ไม่เกิน 4	แหล่งน้ำธรรมชาติ
อยู่ในช่วง 5 - 8	การอุปโภคบริโภค
ไม่เกิน 20	โรงงานอุตสาหกรรมและการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
ไม่เกิน 30	ค่าเฉลี่ยจากอาคารชุด

(มันสิน ตันกุลเวศม์ และคณะ, 2544)

2.2.3 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นอีกหนึ่งปัจจัยในการกำหนดคุณภาพน้ำ และเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ เนื่องจากสัตว์ที่อาศัยอยู่ในน้ำหรือสัตว์เลือดเย็นจะมีอุณหภูมิของร่างกายเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของแหล่งน้ำ ซึ่งโดยปกติแล้วอุณหภูมิของแหล่งน้ำตามธรรมชาติจะสัมพันธ์กับแสงแดด

และอุณหภูมิอากาศ โดยส่งผลต่ออัตราการเจริญโตและอัตราเมตาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิต รวมไปถึงมีผลกับการละลายของสารและการละลายของออกซิเจนในแหล่งน้ำด้วย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของระบบการเพาะเลี้ยงโดยตรงซึ่งจะสามารถควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตได้ จึงทำให้สิ่งมีชีวิตที่มาจากการเพาะเลี้ยงอาจมีอัตราการอยู่รอดได้มากกว่าตามแหล่งน้ำธรรมชาติ

2.2.4 สารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำ

สารประกอบไนโตรเจนที่พบในแหล่งน้ำนั้นเป็นแร่ธาตุรูปแบบละลายน้ำ โดยส่วนใหญ่มาจากอาหารที่เติมให้แก่สัตว์น้ำทั้งในธรรมชาติหรือการเพาะเลี้ยง และมาจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต เนื่องจากเป็นปัจจัยที่มีผลในการจำกัดการเจริญเติบโต (Limiting Factor)

1) แอมโมเนีย

แอมโมเนียในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึม การขับถ่ายของสัตว์น้ำ และรวมถึงกระบวนการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ของแบคทีเรียในน้ำผ่านกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) ซึ่งแอมโมเนียที่เกิดในน้ำจะมี 2 รูปแบบคือ แอมโมเนีย (NH_3) เป็นรูปแบบ Un-ionized form ซึ่งจะสร้างความเป็นพิษในน้ำได้มากกว่าเพราะเป็นรูปแบบที่ละลายในน้ำได้ดีกว่า แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ซึ่งเป็นรูปแบบ Ionized form ทั้งนี้กระบวนการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ไนโตรเจนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านพีเอชและอุณหภูมิของน้ำ เนื่องจากค่าพีเอชที่ต่ำจะก่อให้เกิดผลเสียต่อสัตว์น้ำ เนื่องจากจะไปยับยั้งอัตราการไหลเวียนออกซิเจนของสัตว์น้ำทำให้สามารถแลกเปลี่ยนออกซิเจนได้น้อยลง นอกจากนี้จะเกิดการสะสมแอมโมเนียในเลือด ส่งผลให้พีเอชในเลือดสูง และยังมีผลต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของเอนไซม์ในสัตว์น้ำ โดยทั่วไปในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะควบคุมระดับแอมโมเนียละลายน้ำไม่ให้เกิน 0.02 พีพีเอ็ม และหากแอมโมเนียมีปริมาณสูงถึง 1 พีพีเอ็ม จะส่งผลเสียต่อระบบการหายใจของสัตว์น้ำจนไม่สามารถแลกเปลี่ยนออกซิเจนได้ (Timmons และคณะ, 2018) ในส่วนของการเลี้ยงกุ้งปริมาณแอมโมเนียที่สูงขึ้นจะส่งผลทำให้กุ้งเกิดความเครียดและทำให้อัตราการเจริญโตลดลง แต่อย่างไรก็ตามปริมาณแอมโมเนียในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถควบคุมได้โดยด้วยค่าพีเอช อุณหภูมิ ตลอดจนค่าความเค็มของแหล่งน้ำเพื่อให้มีปริมาณแอมโมเนียในน้ำที่เหมาะสม (Abakari และคณะ, 2021)

2) ไนไตรต์ (NO_2^-)

ไนไตรต์ เป็นสารประกอบไนโตรเจนในน้ำที่เกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชันในสภาวะที่มีออกซิเจนเหมาะสม โดยทั่วไปจะไม่สะสมในน้ำมากเนื่องจากจะถูกออกซิไดซ์อย่างรวดเร็วโดยกลุ่มแบคทีเรียที่ช่วยในการออกซิไดซ์แอมโมเนียในน้ำ (Ammonia Oxidizing Bacteria หรือ AOB) ในบางกรณีที่เกิดในสภาวะไร้อากาศจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปผ่านกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน หรืออาจเกิดการสะสมได้ถ้ามีปริมาณแอมโมเนียที่สูงแต่จะถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรตอย่างรวดเร็ว ซึ่งค่ามาตรฐานในแหล่งน้ำทั่วไปจะพบความเข้มข้นของไนไตรต์เพียง 0.007 มก.-ไนโตรเจน/ล. แต่สำหรับในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีความหนาแน่นต่อหน่วยการเลี้ยงสูงจะส่งผลให้ไนไตรต์มีค่าสูงกว่าแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งไนไตรต์มีความเป็นพิษสูง เพราะสามารถเกิดการออกซิไดซ์กับเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) เปลี่ยนเป็นรูปเฟอร์ริก (Fe^{3+}) เมื่อไปจับตัวกับฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) จะทำให้สัตว์น้ำเกิดโรคเมธิโมโกลบิน (Methemoglobin) ส่งผลให้ไม่สามารถแลกเปลี่ยนออกซิเจนในเลือดได้ นอกจากนี้ไนไตรต์ในน้ำยังมีความสัมพันธ์กับค่าความเค็มของน้ำ โดยตรวจพบความเป็นพิษของไนไตรต์มากในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีค่าความเค็มต่ำ ดังนั้นการรักษาระดับความเค็มของน้ำจะช่วยลดความเป็นพิษของไนไตรต์ได้ และสอดคล้องกับผลของค่าพีเอชและออกซิเจนละลายน้ำคือ เมื่อค่าพีเอชและออกซิเจนละลายน้ำลดลง ทำให้ระดับความเป็นพิษของไนไตรต์จะเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการป้องกันความเป็นพิษของไนไตรต์ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถทำได้โดยการควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 7.5-8.5 ร่วมการเติมอากาศเพื่อให้มีปริมาณออกซิเจนที่เหมาะสมกับการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ

3) ไนเตรต (NO_3^-)

ไนเตรต เป็นสารประกอบไนโตรเจนในน้ำที่มีความเสถียรมากที่สุด ซึ่งเกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชันในสภาวะที่มีออกซิเจนผ่านการออกซิไดซ์ของแบคทีเรียกลุ่มออกซิไดซ์ไนไตรต์ (Nitrite Oxidizing Bacteria หรือ NOB) โดยทั่วไปในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมักพบความเข้มข้นของไนเตรตในช่วง 0-50 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามปกติแล้วไนเตรตมีความเป็นพิษน้อย แต่หากมีการสะสมในปริมาณสูงจะส่งผลในระยะยาวต่อสุขภาพสัตว์น้ำ ทำให้อัตราการเจริญเติบโตช้า หรือถึงขั้นตายได้ นอกจากนี้ถ้ามีปริมาณไนเตรตในแหล่งน้ำธรรมชาติมากจะทำให้เกิดการเจริญเติบโตของพืชน้ำสาหร่าย และแพลงก์ตอนในน้ำที่มากเกินไป หรือเรียกว่าปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication หรือ Algae Bloom) ทำให้มีการเติบโตของพืชน้ำจนปกคลุมผิวน้ำบดบังการส่องผ่านของแสงแดด และทำให้สัตว์น้ำบริเวณนั้นได้รับออกซิเจนที่ละลายลงมาน้ำน้อยลง เพิ่มความขุ่นของน้ำ ส่งผลทำให้สัตว์น้ำตายและเกิดปัญหาน้ำเน่าเสียตามมาได้

2.2.5 ค่าความเป็นกรด-ด่างหรือพีเอช (pH)

พีเอช เป็นการวัดระดับความเป็นกรดหรือด่างในน้ำ โดยทราบได้จากค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในน้ำ (H^+) ซึ่งแสดงค่าเป็นค่า $-\log$ ของความเข้มข้นในสารละลายต่างๆ โดยค่าพีเอชในแหล่งน้ำกร่อยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 7-8 แต่สำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำนั้นค่าพีเอชที่เหมาะสมจะมีอิทธิพลต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ทั้งแพลงก์ตอนในน้ำ พืชน้ำ และสัตว์น้ำ รวมไปถึงธาตุอาหารในแหล่งน้ำที่เป็นส่วนสำคัญในการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต และในขณะเดียวกันถ้าค่าพีเอชในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำไม่เหมาะสมจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบและการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ดังนั้นจึงต้องควบคุมค่าที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำตามความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของค่าพีเอชกับการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ

ค่าพีเอช	ผลต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ
4 หรือต่ำกว่า	เป็นช่วงที่มีความเป็นกรดมาก เป็นช่วงอันตรายทำให้สัตว์น้ำตายได้
อยู่ในช่วง 4 - 6	สัตว์น้ำบางชนิดอาจจะไม่ถึงตาย แต่จะให้ผลผลิตที่ต่ำ เนื่องจากเจริญเติบโตช้าหรือหยุดการสืบพันธุ์ชั่วคราว
อยู่ในช่วง 6.5 - 9	เป็นช่วงที่เหมาะสมกับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
อยู่ในช่วง 9 - 11	ไม่เหมาะสมกับการเลี้ยงและดำรงชีวิตของสัตว์น้ำในช่วงระยะยาว
11 หรือมากกว่า	จะสร้างเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ

(กรมประมง, 2556)

2.2.6 ค่าความขุ่น (Turbidity)

ค่าความขุ่น เป็นการวัดค่าปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solid หรือ TSS) และสารแขวนลอย (Colloidal Matter) ในน้ำว่ามีปริมาณมากหรือน้อยผ่านการดูดซับและการกระจายของแสง เนื่องจากสารดังกล่าวจะเป็นสิ่งขัดขวางการส่องผ่านของแสง ที่สำคัญยังส่งผลกระทบต่อ การแลกเปลี่ยนออกซิเจนของสัตว์น้ำแบคทีเรียที่มีประโยชน์ในแหล่งน้ำ และตลอดจนการสังเคราะห์ด้วยแสงของแพลงก์ตอนพืชและพืชน้ำได้

2.2.7 ค่าความกระด้าง (Hardness)

ค่าความกระด้างในน้ำเกิดจากปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่ละลายอยู่ในรูปของไอออน คือ แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) โดยแคลเซียมจะช่วยในการสร้างเปลือก และโครงสร้างของสัตว์น้ำและยังเป็นตัวเร่ง (Co-factor) ในการทำงานของร่างกายในสัตว์บางชนิด

ส่วนแมกนีเซียมเป็นธาตุอาหารจำเป็นในการเจริญเติบโตของพืชและแพลงก์ตอนในน้ำ โดยจะเกิดความกระด้างได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ ความกระด้างชั่วคราวหรือสภาพต่าง (Temporary Hardness) เกิดจากสารละลายแคลเซียมหรือแมกนีเซียมไบคาร์บอเนตตกตะกอนเป็นหินปูน และความกระด้างถาวร (Permanent Hardness) ที่เกิดจากเกลือของคลอไรด์หรือซัลเฟตของแคลเซียมหรือแมกนีเซียมจะไม่ตกตะกอนแต่จะละลายในน้ำ โดยทั่วไปค่าความกระด้างจะมีหลายระดับแบ่งตามประเภทของน้ำดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ประเภทของน้ำตามระดับความกระด้าง

ระดับความกระด้างของน้ำ (มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)	ประเภทของน้ำตามความกระด้าง
0– 75	น้ำอ่อน
75 – 150	น้ำกระด้างปานกลาง
150 - 300	น้ำกระด้าง
300 ขึ้นไป	น้ำกระด้างมาก

(กรมประมง, 2556)

2.2.8 ค่าอัลคาไลน์ตี (Alkalinity)

ค่าอัลคาไลน์ตีคือ ค่าความสามารถของน้ำในการเปลี่ยนความเป็นกรดให้กลายเป็นกลางโดยการรับไฮโดรเจนไอออนหรือเรียกว่าความสามารถในการสะเทินของน้ำ ซึ่งค่าความเป็นด่างในน้ำเกิดจากไฮดรอกไซด์ (OH^-) คาร์บอเนต (HCO_3^-) และไบคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) น้ำที่มีสภาพความเป็นด่างมากจะสามารถต้านความเป็นกรดได้เมื่อในแหล่งน้ำนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช ทำให้สามารถควบคุมเสถียรภาพของพีเอชในระบบได้

2.2.9 ค่าความเค็ม (Salinity)

ค่าความเค็ม เป็นค่าที่วัดความเข้มข้นของเกลือที่อยู่ในรูปโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ซึ่งเป็นปัจจัยที่บ่งบอกถึงอัตราการอยู่รอดของสัตว์น้ำ โดยการวัดค่าของของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved Solid; TDS) ในหน่วย มก./ล. หรือ พีพีที หรืออีกวิธีคือการวัดค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) โดยจัดประเภทน้ำตามระดับความเค็มได้ตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าความเค็มของน้ำ

ระดับความเข้มข้นของความเค็ม (พีพีที)	ประเภทของน้ำตามระดับความเค็ม
0 – 0.5	น้ำจืด
0.5 – 30	น้ำกร่อย
30 - 50	น้ำเค็ม

(กรมประมง, 2556)

2.3 ตะกอนอินทรีย์ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ

ตะกอนอินทรีย์ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเกิดจากการรวมตัวของสารต่างๆ ที่อยู่ในน้ำได้แก่ อาหารเหลือตกค้างในระบบ ของเสียจากสัตว์น้ำขับถ่ายออกมา รวมไปถึงจุลชีพต่างๆ เช่น โปรโตซัวและเซลล์แบคทีเรีย จนกลายเป็นอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่แขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยทั่วไปมีการรายงานถึงอนุภาคของแข็งแขวนลอยในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีขนาดอยู่ในช่วง 150-250 ไมโครเมตร (Timmons และคณะ, 2018) และตะกอนแขวนลอยที่เกิดขึ้นเองในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำนั้นมีส่วนช่วยควบคุมความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรต์ให้ต่ำกว่า 1.0 มก./ล. เมื่อควบคุมความเข้มข้นของตะกอนให้อยู่ในช่วง 200-800 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. ซึ่งมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียอยู่ระหว่าง 0.007-0.023 มก.-ไนโตรเจน/มก.-ของแข็งแขวนลอย/วัน ตามรายงานของ พรณทภรณ์ สิทธิพลางกูร (2556) อย่างไรก็ตามตะกอนอินทรีย์เหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของสัตว์น้ำในระบบเพาะเลี้ยง คุณภาพน้ำ และส่งผลเสียแก่สิ่งแวดล้อมได้เมื่อปล่อยน้ำทิ้งโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัด ที่สำคัญคือส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของจุลชีพที่มีหน้าที่กำจัดสารอินทรีย์ในไนโตรเจนทั้งในรูปแอมโมเนียและไนไตรต์ ทำให้เกิดการสะสมความเป็นพิษร่วมกันในปริมาณมากซึ่งเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำในระบบ ดังนั้นในควบคุมปริมาณตะกอนอินทรีย์ที่เกิดขึ้นด้วยกระบวนการของแบคทีเรียที่ใช้ในระบบเพาะเลี้ยงจึงเป็นอีกแนวทางที่ลดปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการเพาะเลี้ยง

2.4 เทคโนโลยีไบโอฟล็อกกับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Biofloc Technology, BFT)

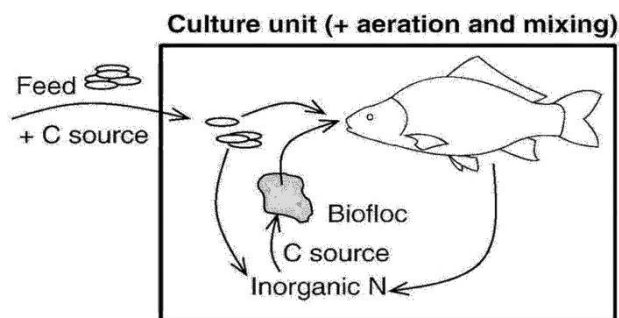
จากปัญหาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในรูปแบบเดิมที่ทำให้ผลผลิตสัตว์น้ำลดลง เนื่องจากคุณภาพน้ำที่ไม่เหมาะสมจนเกิดการปนเปื้อนทั้งจุลชีพและปรสิตของสัตว์น้ำ ส่งผลทำให้เกิดการแพร่ระบาดของโรคในสัตว์น้ำเป็นอย่างมาก ดังนั้นการพัฒนาระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบหมุนเวียนแบบปิดจึงมีบทบาทมากขึ้นในกลุ่มอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงเพื่อการส่งออก เนื่องจากจะลดผลกระทบจากปัญหาดังกล่าว แต่อย่างไรก็ดีการเลี้ยงในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดอาจยังไม่ตอบโจทย์สำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ระดับความหนาแน่นสูงมากนัก ด้วยข้อจำกัดที่ไม่มีการถ่ายเทหรือเปลี่ยนน้ำจาก

ระบบเพาะเลี้ยง และต้องมีระบบแยกตะกอนเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นเมื่อของเสียมีการสะสมปริมาณมากจนอาจจะส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำในระบบ ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการประยุกต์ใช้แนวทางและเทคโนโลยีของระบบการเลี้ยงที่สามารถเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำร่วมกับระบบกำจัดสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นได้คือ เทคโนโลยีไบโอฟล็อกที่สามารถสร้างผลผลิตได้ปริมาณมากในระยะเวลาที่จำกัด และสามารถทำการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ระดับความหนาแน่นสูงต่อปริมาตรน้ำในบ่อเลี้ยงได้ ทั้งนี้ปัญหาที่มักพบตามมามีคือ มีการสะสมของสารอินทรีย์ในโตรเจนในระบบมาก หลักๆ คือพบแอมโมเนียละลายที่สูงขึ้นตามปริมาณอาหารที่ให้แก่สัตว์น้ำ หรือมาจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำ เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำในระบบ แต่ปัญหาดังกล่าวระบบไบโอฟล็อกสามารถจัดการได้ผ่านบทบาทของแบคทีเรียที่สามารถสร้างตะกอนไบโอฟล็อก ซึ่งมีหน้าที่ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นภายในระบบ โดยอาศัยการควบคุมอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนให้เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย นอกจากนี้ยังช่วยประหยัดและลดปริมาณอาหารที่ให้แก่สัตว์น้ำในระบบได้ เนื่องจากตะกอนไบโอฟล็อกที่เกิดขึ้นสัตว์น้ำสามารถบริโภคเป็นอาหารได้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

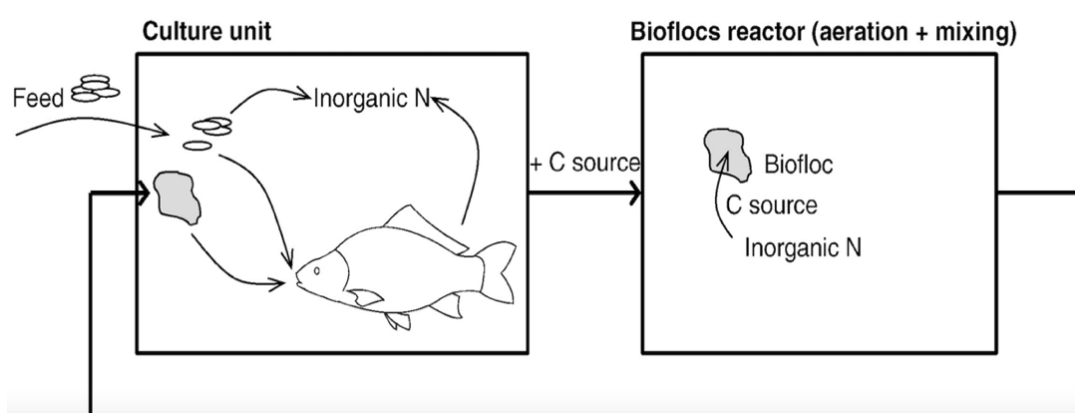
2.4.1 หลักการบำบัดด้วยไบโอฟล็อก

เทคโนโลยีไบโอฟล็อกเป็นเทคนิคการกำจัดของเสียประเภทสารประกอบไนโตรเจนที่มาจากสิ่งขับถ่ายและอาหารที่ให้แก่สัตว์น้ำในระบบเพาะเลี้ยงที่มีความหนาแน่นสูง โดยอาศัยแบคทีเรียที่มีบทบาทหลักในการสร้างและรวมตะกอนสารอินทรีย์แขวนลอย ควบคู่กับการควบคุมสัดส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนในบ่อเลี้ยง โดยระบบไบโอฟล็อกเป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำระดับความหนาแน่นที่สูงและไม่มีการถ่ายเทน้ำ ดังนั้นการเพาะเลี้ยงรูปแบบนี้จึงเหมาะกับผู้ที่มีความต้องการผลผลิตสูงแต่มีพื้นที่จำกัด การเดินระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกเป็นรูปแบบหนึ่งของการบำบัดทางชีวภาพในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่ต้องอาศัยแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟและออโทโทรฟเป็นหลัก โดยต้องทำการกระตุ้นให้เกิดตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยในปริมาณมากและเกิดการรวมตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่เรียกว่า “ไบโอฟล็อก” เพื่อให้มาย่อยสลายสารอินทรีย์ในโตรเจนให้เป็นอนินทรีย์ไนโตรเจน นอกจากจะช่วยในการกำจัดแอมโมเนียในน้ำแล้วยังสามารถเป็นแหล่งอาหารให้กับสัตว์น้ำได้ ทั้งนี้การเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกต้องคำนึงถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรียในระบบให้เกิดประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียได้อย่างสูงสุด โดยไม่ส่งผลเสียต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำและคุณภาพน้ำเลี้ยง (Hargreaves, 2013) ซึ่งการควบคุมอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและกิจกรรมของแบคทีเรีย โดยทั่วไปมักมีค่าอยู่ระหว่าง 10-15 ต่อ 1 (Abakari และ

คณะ, 2021) ซึ่งอัตราส่วนที่มากกว่าค่าดังกล่าวไม่ส่งผลต่อการกระบวนการบำบัดที่เกิดขึ้นภายในระบบไบโอฟล็อกแต่อย่างใด แต่จะนิยมใช้ในการเพาะเลี้ยงที่ไม่น้อยกว่า 10:1 (Avnimelech, 1999) หรือขึ้นอยู่กับประเภทของสัตว์น้ำที่เพาะเลี้ยงด้วย สำหรับสารอินทรีย์คาร์บอนที่ถูกใช้ทั่วไปในปัจจุบัน คือ กากน้ำตาล (Molasses) และ แป้งมันสำปะหลัง (Tapioca starch) โดยในงานวิจัยของ Tinh พบว่าผลของการใช้แป้งข้าวโพด (Corn starch) มีส่วนช่วยเร่งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย อีกทั้งยังสามารถควบคุมปริมาณของเสียจากไบโอฟล็อก และมีความผันผวนของสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนน้อย (Tinh และคณะ, 2021) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งคาร์บอนเชิงซ้อนด้วยกัน พบว่าการใช้แป้งมันสำปะหลังสามารถควบคุมปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียได้ดีกว่า และพบว่าการใช้แป้งมันสำปะหลังใช้ต้นทุนในการเดินระบบน้อยกว่าการใช้แป้งข้าวโพด แต่เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับแหล่งคาร์บอนเชิงเดี่ยวในรูปแบบกากน้ำตาล พบว่าระยะเวลาในการกำจัดแอมโมเนียที่เกิดขึ้นในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำสิ้นกว่าระบบที่ใช้แป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เท่ากัน เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายทำให้กระตุ้นแบคทีเรียในกระบวนการบำบัดช้ากว่า และนอกจากนี้ยังใช้ต้นทุนสูงกว่า 1.5 เท่าของราคากากน้ำตาล (Azhar และคณะ, 2016) นอกจากการพิจารณาแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมแล้วอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมความเข้มข้นของแอมโมเนียคือ ปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอระหว่างการเดินระบบดังนั้นการเลือกระบบการเติมอากาศที่ให้ปริมาณออกซิเจนที่สม่ำเสมอทั่วทั้งระบบขณะเกิดกระบวนการบำบัดแอมโมเนีย จะส่งผลช่วยให้แบคทีเรียมีการเจริญเติบโตและทำให้ตะกอนไบโอฟล็อกเกิดการรวมตัวได้ดีมากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นผลดีที่ช่วยลดการเติมแหล่งคาร์บอนได้ (Harun และคณะ, 2019) นอกจากนี้จากงานวิจัยที่ได้นำเทคโนโลยีไบโอฟล็อกมาใช้ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำพบว่า ตะกอนไบโอฟล็อกที่เกิดขึ้นนอกจากจะช่วยลดปริมาณของเสียในรูปแอมโมเนียจากสัตว์น้ำแล้วเมื่อได้รับการกระตุ้นจากการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนจะกระตุ้นแบคทีเรียให้เกิดการรวมตัว และดูดซึมแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์เพื่อนำมาใช้ในการสร้างเซลล์แบคทีเรียใหม่และเพิ่มจำนวนจนเกิดการรวมตัวกันเป็นตะกอนไบโอฟล็อกทำให้ปริมาณแอมโมเนียลดลง ทั้งนี้ตะกอนไบโอฟล็อกสามารถใช้เป็นแหล่งโปรตีนทดแทนอาหารที่ให้แก่สัตว์น้ำในระบบเพาะเลี้ยง จึงช่วยลดต้นทุนค่าอาหารที่ให้แก่สัตว์น้ำได้ (รูปที่ 2.1) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบแยกถังกับตะกอนไบโอฟล็อก (รูปที่ 2.2) พบว่าการเลี้ยงสัตว์น้ำร่วมกับตะกอนไบโอฟล็อกมีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียมากกว่าการเลี้ยงแยกถัง และยังประหยัดระยะเวลาในการเดินระบบบำบัด ตลอดจนส่งผลโดยตรงกับผลผลิตที่มากขึ้นเนื่องจากสัตว์น้ำมีอัตราการเจริญเติบโต และรอดชีวิตที่สูงขึ้น



รูปที่ 2.1 รูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำร่วมกับการสร้างตะกอนไบโอฟล็อก (Crab และคณะ, 2012)



รูปที่ 2.2 รูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแยกกับการสร้างตะกอนไบโอฟล็อก (Crab และคณะ, 2012)

การบำบัดของเสียจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยไบโอฟล็อกเป็นแนวทางการบำบัดทางชีวภาพระบบปิดที่ใช้กำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียเป็นหลัก ซึ่งแอมโมเนียเป็นพิษต่อสัตว์น้ำในระบบเพาะเลี้ยง ผ่านการกระตุ้นแบคทีเรียโดยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อให้เกิดการสร้างตะกอนไบโอฟล็อก และเกิดการรวมกันของโปรโตซัว แพลงก์ตอน และแบคทีเรียที่อาศัยในระบบ ซึ่งแบคทีเรียจะมีการสร้างสารเหนียวจากตัวเซลล์แบคทีเรียที่มีบทบาทในการรวมตัวของไบโอฟล็อกที่เรียกว่า Extracellular Polymeric Substances (EPS) ร่วมกับแบคทีเรียเส้นใยหรือแรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic forces) (De Schryver และคณะ, 2008) ซึ่งแบคทีเรียที่พบจะอาศัยอยู่ในช่วงเวลาเดียวกัน โดยประกอบด้วยแบคทีเรียออโตโทรฟ (Autotrophic Bacteria) และเฮเทอโรโทรฟ (Heterotrophic Bacteria) ซึ่งจะมีบทบาทต่างกันในแต่ละกระบวนการกำจัดแอมโมเนียที่เกิดขึ้นในระบบ โดยแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟที่มีอัตราการเจริญเติบโตสูงและรวดเร็วจะมีบทบาทในการดูดซึมและควบคุมปริมาณแอมโมเนียที่เกิดขึ้นผ่านกระบวนการแอสซิมิเลชัน (Assimilation) ทำให้ปริมาณแอมโมเนียในระบบลดลง ต่อมาแบคทีเรียออโตโทรฟที่มี

อัตราการเจริญเติบโตช้ากว่าจะมีบทบาทในการกำจัดแอมโมเนียที่เหลือผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันต่อไป ซึ่งเป็นไปตามวัฏจักรไนโตรเจน (Nitrogen cycle)

2.4.2 กระบวนการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบไบโอฟล็อกผ่านวัฏจักรไนโตรเจนในน้ำ

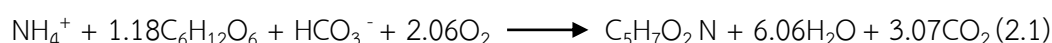
กระบวนการบำบัดที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดในที่เพาะเลี้ยงจะเป็นไปตามแนวความคิดการบำบัดสารประกอบไนโตรเจนที่เกิดจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำ และรวมไปถึงอาหารสำเร็จรูปที่มีแหล่งโปรตีนที่ให้แกสัตว์น้ำ (Abakari และคณะ, 2021; Avnimelech, 1999) ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification)

เป็นกระบวนการการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปโปรตีนเป็นส่วนใหญ่ให้กลายเป็นสารอนินทรีย์คือ แอมโมเนีย โดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรียสร้างแอมโมเนีย (Ammonifying bacteria) และแอมโมเนียที่เกิดขึ้นนั้นจะถูกออกซิไดซ์ต่อไปขึ้นอยู่กับปริมาณไนโตรเจนและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในสารอาหารที่กำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยานี้

2) กระบวนการแอสสิมิเลชัน (Ammonia Assimilation)

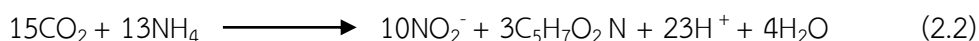
เป็นกระบวนการที่แบคทีเรียนำแอมโมเนียในรูปแอมโมเนียมไอออนเปลี่ยนเป็นสารประกอบไนโตรเจน เพื่อให้แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟดึงไปใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ และเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียเพื่อให้เกิดการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนต่อไป (ดังสมการที่ 2.1) เป็นการสร้างเซลล์แบคทีเรียจากการสลายแอมโมเนียมไอออนเปลี่ยนเป็นไนเตรต



3) กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

เป็นกระบวนการหลักของการกำจัดแอมโมเนียโดยการเปลี่ยนแอมโมเนียและแอมโมเนียมไอออนบางส่วนให้เป็นไนไตรต์และไนเตรต ตามลำดับผ่านทางกิจกรรมของแบคทีเรียกลุ่มออโทโทรฟ คือ แบคทีเรียกลุ่มไนตริไฟอิง (Nitrifying bacteria) ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนย่อย คือ

- (1) กระบวนการเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรต์ โดยแบคทีเรียกลุ่มออกซิไดซ์แอมโมเนีย (Ammonia Oxidizing Bacteria หรือ AOB) ได้แก่ *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus* และ *Nitrosospira* sp. ซึ่งเป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียให้ได้ผลผลิตเป็นไนไตรต์ (ตามสมการที่ 2.2)



- (2) กระบวนการเปลี่ยนไนไตรต์เป็นไนเตรต โดยแบคทีเรียกลุ่มออกซิไดซ์ไนเตรต (Nitrite Oxidizing Bacteria หรือ NOB) ได้แก่ *Nitrobacter* และ *Nitrosospira* sp. ซึ่งเป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่ออกซิไดซ์ไนไตรต์ให้ได้ผลผลิตเป็นไนเตรต (ตามสมการที่ 2.3)

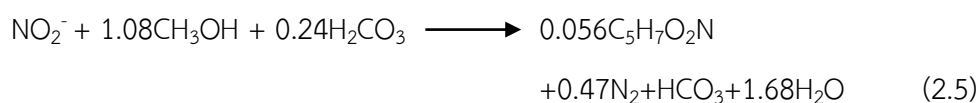


และสุทธิจะได้สมการรวมของการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน ดังสมการที่ 2.4



4) กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)

เป็นกระบวนการในการกำจัดแอมโมเนียออกจากระบบโดยเกิดในสภาวะที่มีออกซิเจนน้อยหรือสภาวะไร้ออกซิเจน ผ่านกิจกรรมของแบคทีเรียกลุ่มดีไนตริฟิอิง (Denitrifying bacteria) ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟมีบทบาทในการออกซิไดซ์ไนเตรตที่เกิดขึ้นในระบบให้เปลี่ยนเป็นไนไตรต์ตามลำดับ โดยใช้ไนไตรต์หรือไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน และใช้สารอินทรีย์หรือแหล่งคาร์บอนใดๆ ที่เติมเพิ่มลงในระบบเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งจะทำให้ระบบนั้นกำจัดและเปลี่ยนรูปไนเตรตเป็นก๊าซไนโตรเจนรวมไปถึงก๊าซอื่นๆ บางส่วนได้แก่ ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และไนตริกออกไซด์ (NO) ซึ่งในภายหลังจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจน (N_2) และปลดปล่อยออกจากระบบเพาะเลี้ยงได้ในที่สุด ทั้งนี้แบคทีเรียกลุ่มที่ทำงานและมีบทบาทหลักภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic bacteria) เช่น *Pseudomonas* หรือ *Bacillus* sp. เป็นต้น (ดังสมการที่ 2.5)



นอกจากการเพิ่มประสิทธิภาพของเทคโนโลยีไบโอฟล็อกด้วยการควบคุมอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมเพื่อกระตุ้นให้เกิดการรวมตัวของตะกอนไบโอฟล็อก และการเพิ่มจำนวน

แบคทีเรียที่จำเป็นในกระบวนการบำบัดด้วยไบโอฟล็อกเพื่อกำจัดแอมโมเนียที่เกิดในระบบเพาะเลี้ยงแล้ว ยังต้องคำนึงถึงปัจจัยที่สำคัญอีกประการคือ การเติมอากาศ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลอย่างมากต่อปริมาณและการกระจายตัวของออกซิเจนในระบบบำบัดให้ได้อย่างทั่วถึงทั้งในระบบ เพราะนอกจากจะเป็นการเพิ่มระดับออกซิเจนให้สัตว์น้ำแล้วยังส่งผลให้แบคทีเรียในระบบกระจายตัวและทำงานได้ดีเป็นผลทำให้กระบวนการบำบัดเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

2.4.3 การเติมอากาศในระบบบำบัดไบโอฟล็อก

การเติมอากาศเป็นการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในระบบเพาะเลี้ยง เนื่องจากจัดเป็นแหล่งออกซิเจนหลักสำหรับระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำรูปแบบอื่นๆ ที่เป็นบ่อเลี้ยงธรรมชาติพบว่าปริมาณออกซิเจนจะไม่สม่ำเสมอตลอดเวลา เมื่อเกิดสภาวะที่ออกซิเจนลดต่ำลงในขณะที่ใช้ ออกซิเจนของสัตว์น้ำนั้นยังเกิดขึ้นตลอดเวลาส่งผลให้ค่าออกซิเจนในน้ำลดต่ำกว่า 2 มก./ล. ซึ่งเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำในระบบเพาะเลี้ยง ถึงแม้ว่าจะมีแหล่งออกซิเจนที่เกิดจากการแพร่ของบรรยากาศ และปริมาณออกซิเจนที่น้อยเพียงร้อยละ 20 ของอากาศที่ละลายรวมกับน้ำ ก็ยังไม่สามารถให้ปริมาณออกซิเจนที่เหมาะสมได้ รวมถึงยังมีผลของอุณหภูมิและความดันอากาศที่จะส่งผลต่อการละลายของออกซิเจนที่ไม่เหมาะสมอีกด้วย ดังนั้นการเติมอากาศแก่ระบบเพาะเลี้ยงจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีความหนาแน่นสูงโดยเฉพาะกับระบบไบโอฟล็อก เนื่องจากช่วยเติมให้ออกซิเจนละลายน้ำแก่ระบบเพาะเลี้ยง และส่งผลดีต่อการย่อยสลายทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในโตรเจนที่เป็นพิษแก่สัตว์น้ำ ซึ่งเป็นส่วนช่วยในกิจกรรมของแบคทีเรียและจุลินทรีย์ให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเติมอากาศส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย เครื่องเติมอากาศเครื่องเป่าอากาศ และท่ออากาศ โดยทั่วไปการเลือกใช้เครื่องเติมอากาศจะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของระบบเพาะเลี้ยง รูปทรงของถังเพาะเลี้ยงและราคา อาจรวมไปถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นหลังจากการเลือกใช้เครื่องเติมอากาศ ซึ่งสามารถแบ่งรูปแบบการเติมอากาศออกเป็น 2 รูปแบบหลัก ได้แก่

1) การเติมอากาศแบบกระจายอากาศ (Diffused Aeration)

เป็นรูปแบบการเติมอากาศที่อาศัยแรงดันของอากาศด้วยเครื่องเป่าอากาศอัดลงใต้น้ำโดยตรง เมื่ออากาศผ่านอุปกรณ์กระจายอากาศทำให้เกิดฟองอากาศและเกิดการแพร่กระจายของออกซิเจนซึ่งสามารถแบ่งได้ตามขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นได้แก่ ฟองอากาศขนาดเล็ก (Fine Bubble) ฟองอากาศขนาดกลาง (Medium Bubble) และฟองอากาศขนาดใหญ่ (Coarse Bubble) ทั้งนี้การ

เติมอากาศรูปแบบนี้เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เนื่องจากให้ขนาดฟองอากาศที่แตกต่างกันออกไปตามความเหมาะสมของงานเพาะเลี้ยง โดยขนาดฟองอากาศจะสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการแพร่กระจายของออกซิเจนและอัตราการไหลเวียนของการเติมอากาศคือ เครื่องเติมอากาศที่ให้ฟองอากาศขนาดเล็กจะมีความสามารถในการกวนผสมน้ำให้ออกซิเจนทั่วถึงทั้งระบบได้มากกว่าเครื่องเติมอากาศฟองขนาดใหญ่ แต่มีข้อเสียคืออาจจะเกิดอุดตันได้ง่ายกว่าเครื่องเติมอากาศที่ให้ฟองอากาศขนาดใหญ่

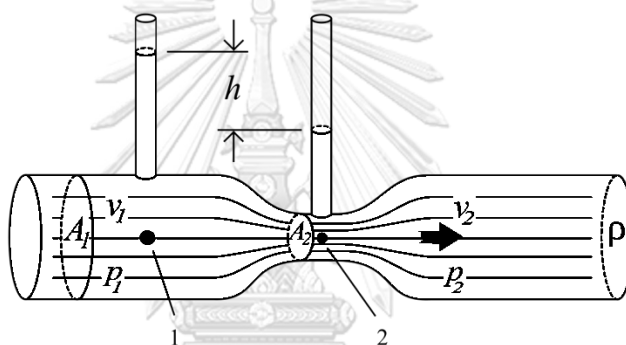
2) การเติมอากาศแบบทางกล (Mechanical Aeration)

เป็นรูปแบบการเติมอากาศที่ใช้กลไกของเพลลา (Rotating shaft) หรือใบพัด (Propeller blade) หมุนด้วยความเร็วสูง ทำให้การเติมอากาศรูปแบบนี้จะมีการผสมและเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่เหมาะสมกับการติดตั้งในระบบบริเวณสูง แต่ข้อเสียคือแพร่กระจายออกซิเจนได้น้อยกว่ารูปแบบการเติมอากาศแบบกระจาย โดยทั่วไปจะสามารถแบ่งรูปแบบตามบริเวณที่ติดตั้งเพื่อเติมอากาศ ได้แก่ การเติมอากาศทางกลบนผิวน้ำ (Surface Mechanical Aerator) และการเติมอากาศทางกลใต้น้ำ (Submerged Mechanical Aerator) นอกจากนี้ยังมีการเติมอากาศรูปแบบอื่นๆ ที่ถูกใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำหรือถูกประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเติมอากาศ ทั้งการประยุกต์รูปแบบกระจายอากาศร่วมกับทางกล (Combined Compressed Air and Mechanical Aerator) รูปแบบการเติมอากาศแบบปั๊มของเหลว (Pumped Liquid Aerator) และอีกหนึ่งรูปแบบที่ถูกนำมาประยุกต์กับการเพาะเลี้ยงในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำในปัจจุบันคือ การเติมอากาศแบบเวนจูรี

3) การเติมอากาศแบบเวนจูรี (Venturi Air Injection)

การเติมอากาศแบบเวนจูรีเป็นรูปแบบที่เพิ่มประสิทธิภาพการเติมอากาศให้ได้มากที่สุด ซึ่งระบบนี้อาศัยการทำงานของเครื่องสูบลมที่ฉีดน้ำผ่านหัวพ่นเวนจูรี (Venturi Nozzle) ที่มีลักษณะคอคอด เพื่อเพิ่มความเร็วของน้ำจนกระทั่งเกิดแรงดูดทางอากาศ (Vacuum Pressure) ลงมาผสมกับน้ำ ทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำ (รูปที่ 2.3) และเกิดฟองอากาศที่ขนาดเล็ก (Microbubbles) ส่งผลให้การละลายของออกซิเจนเกิดได้ง่าย นอกจากนี้ยังทำให้มีอัตราการแพร่กระจายออกซิเจนสูง (Oxygen Transfer Rate; OTR) ซึ่งสามารถอธิบายหลักการเติมอากาศด้วยเวนจูรีผ่านกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Law of Conservation) ด้วยสมการแบร์นูลลี (Bernoulli's Equation) อธิบายถึงของไหลอุดมคติแบบบีบอัดไม่ได้ (Ideal and Incompressible fluid) ที่มีการไหลแบบเสถียรในท่อ แต่เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทำให้ความดันภายในท่อเปลี่ยนแปลงส่งผลให้ความเร็วและทิศทางการไหลของไหลเปลี่ยนแปลงตามแต่ไม่เกิดการเปลี่ยนของอัตราการไหล

ของปริมาตรภายในท่อ (Volumetric Flow) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความลึกของท่อ ซึ่งบริเวณที่พื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่จะมีความดันภายในท่อต่ำทำให้ความเร็วในการไหลต่ำ แตกต่างจากบริเวณที่พื้นที่หน้าตัดขนาดเล็กทำให้ความดันลดต่ำลงส่งผลให้ความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านบริเวณนี้สูงขึ้น และเมื่อมีการติดตั้งท่อลักษณะคอคอดบริเวณดังกล่าวจะเกิดการลดความดันสถิตเกิดเป็นพื้นที่สูญญากาศ ทำให้เกิดแรงดูดอากาศจากภายนอกท่อเข้ามายังภายในท่อ และเกิดการผสมระหว่างอากาศและน้ำ เกิดการลดขนาดของฟองอากาศทำให้การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำเพิ่มขึ้น โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นในระบบการใช้พลังงานทั้งหมดของของไหลไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่เป็นเพียงการเปลี่ยนรูปจากพลังงานจลน์ภายใน (Internal Kinetic Energy) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบสุ่มทิศทางไปเป็นพลังงานจลน์ภายนอก (External Kinetic Energy) แสดงความสัมพันธ์ด้วยสมการดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 หลักการการเติมอากาศของระบบเวนจูรี (Krause, 2010)

จากกฎการอนุรักษ์พลังงานที่อธิบายการไหลแบบต่อเนื่องผ่านจุดที่ 1 และจุดที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของไหลและพื้นที่หน้าตัดด้วยอัตราการไหลของปริมาตร (Flow rate, Q) ดังสมการ

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2.6)$$

เมื่อ	Q	คือ	อัตราการไหลของปริมาตร (ลบ.ม./วินาที)
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดที่ของไหลผ่าน (ตร.ม.)
	V	คือ	ความเร็วของการไหล (ม./วินาที)

จากสมการ Bernoulli สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ 1 และ 2 โดยไม่คิดว่าการสูญเสียพลังงานได้ว่า

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$$

$$P_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 \quad (2.7)$$

ในกรณีนี้เราจู่คิดจากสภาวะสมดุลที่ระดับความสูงเท่ากันทุกระดับ จึงไม่ต้องคำนึงถึงพจน์ที่ผลของความสูงได้ว่า

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2$$

และในบริเวณที่ 2 เป็นบริเวณที่เกิดสภาวะความดันสถิตซึ่งมีการคิดเรื่องความสูงในกรณีนี้
อนุมานว่ามีค่าเท่ากับ 0 ได้ว่า

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2$$

หรือ

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2} (V^2)$$

$$V = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (2.8)$$

เมื่อแทนค่าความเร็วของการไหล (V) จากสมการที่ 2.8 ในสมการ 2.6 เพื่อหาอัตราการไหล
ของปริมาตรจะได้ว่า

$$Q = A_1 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1}}$$

หรือ

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 - 1}} \quad (2.9)$$

เมื่อ	Q	คือ	อัตราการไหลของปริมาตร (ลบ.ม./วินาที)
	P ₁	คือ	ความดันของไหล ณ ตำแหน่งที่ 1 (นิวตัน/ตร.ม. หรือ ปาสคัล)
	P ₂	คือ	ความดันของไหล ณ ตำแหน่งที่ 2 (นิวตัน/ตร.ม. หรือ ปาสคัล)
	A ₁	คือ	พื้นที่หน้าตัดตำแหน่ง ณ ตำแหน่งที่ 1 (ตร.ม.)
	A ₂	คือ	พื้นที่หน้าตัดตำแหน่ง ณ ตำแหน่งที่ 2 (ตร.ม.)

ทั้งนี้ในการนำเครื่องเติมอากาศไปติดตั้งในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ นอกจากจะต้องคำนึงเรื่องความเร็วในการไหลของน้ำจากท่อเวนจูรีแล้ว เพื่อให้ได้ความแม่นยำในการให้อากาศที่เหมาะสมกับระบบควรต้องทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทอากาศโดยการหาข้อมูลค่าออกซิเจน ณ จุดวัดต่างๆ จากการทดลอง ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำ (K_La) โดยนำข้อมูลมาวิเคราะห์ในรูปแบบสมการถดถอยแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น (Linear and Nonlinear Regression) ระหว่างค่าออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นหลังหักลบค่าออกซิเจนละลายอิ่มตัวที่สภาวะคงที่ (Steady-state DO Saturation Concentration, C_s) เทียบกับในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของข้อมูลระหว่างค่า K_La และ C_s ดังสมการที่ 2.10 และปรับแก้ค่าผลกระทบของอุณหภูมิที่ 20 °ซ เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Aeration Efficiency, SOTR) ดังสมการที่ 2.12 ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Aeration Efficiency, SAE) ดังสมการที่ 2.13 และค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Efficiency, SOTE) ดังสมการที่ 2.14 ซึ่งต้องกำหนดค่าอัตราการไหลเชิงมวลของออกซิเจนในกระแสอากาศ (Mass flow of Oxygen in Air stream, W_{O_2}) โดยคิดจากปริมาณออกซิเจนที่มีในอากาศเท่ากับร้อยละ 20-23

$$K_{La_T} = \frac{\ln (C_s - C_0) - \ln(C_s - C_t)}{t} \quad (2.10)$$

เมื่อ	$K_{La(T)}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิใดๆ (1/วินาที)
	C_s	คือ ค่าออกซิเจนละลายอิ่มตัวที่สภาวะคงที่ (มก.-ออกซิเจน/ล.) มีค่าเท่ากับ 8.24 มก.-ออกซิเจน/ล. ของน้ำประปา
	C_0	คือ ค่าออกซิเจนละลายที่เวลาเริ่มต้น (มก.-ออกซิเจน/ล.)
	C_t	คือ ค่าออกซิเจนละลายเวลาใดๆ (มก.-ออกซิเจน/ล.)
	t	คือ เวลา (วินาที)

แต่เนื่องจากอุณหภูมิมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการละลายของออกซิเจน และอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ดังนั้นในการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์ของอุปกรณ์แต่ละประเภทจำเป็นต้องคิดค่าผลกระทบจากอุณหภูมิต่อการถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิเดียวกันตามสมการของ Van't Hoff Arrhenius ดังสมการที่ 2.11

$$K_{La(T)} = K_{La(20^{\circ}C)} \times \theta^{(T-20)} \quad (2.11)$$

เมื่อ $K_{La(T)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิใดๆ (1/วินาที)

$K_{La(20^{\circ}C)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิ 20 °ซ (1/วินาที)

θ คือ ค่าคงที่ซึ่งโดยมากอยู่ในช่วง 1.015-1.024 สำหรับอุปกรณ์เติมอากาศใต้น้ำและผิวน้ำและมีค่าเท่ากับ 1.024 สำหรับน้ำบริสุทธิ์ (Boyd, 1998)

T คือ อุณหภูมิขณะเติมอากาศ (°ซ)

ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิใดๆ ภายหลังทำการปรับแก้ค่าที่สภาวะสมดุลแล้วและทำการแปลงหน่วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนจากหน่วย 1/วินาที เป็น 1/ชม. จะสามารถนำไปใช้ในการคำนวณค่าความสามารถในการเติมออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศต่อไป

- อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Oxygen transfer rate, SOTR)

อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน คือ ค่าความสามารถในการการถ่ายเทออกซิเจนต่อเวลาที่ใช้ในการเติมอากาศของอุปกรณ์เติมอากาศใช้ในการเติมอากาศที่สภาวะมาตรฐานที่อุณหภูมิ 20 °ซ โดยคำนวณจากสมการดังนี้

$$SOTR = K_{La(20^{\circ}C)} \times C_s V \quad (2.12)$$

เมื่อ SOTR คือ อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 20 °ซ

(กก.-ออกซิเจน/ชม.)

$K_{La(20^{\circ}C)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิ 20 °ซ (1/ชม.)

C_s คือ ค่าออกซิเจนละลายอิ่มตัวที่สภาวะคงที่ (มก.-ออกซิเจน/ล.) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.24 มก.-ออกซิเจน/ล.

V คือ ปริมาตรน้ำในระบบที่เติมอากาศ (ล.)

จากค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐานสามารถอธิบายถึงความสามารถในการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในระบบต่อเวลาที่ใช้ซึ่งเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศ ณ สภาวะมาตรฐานของแต่ละรูปแบบได้

- ประสิทธิภาพการเติมอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Aeration Efficiency, SAE)

ประสิทธิภาพการเติมอากาศที่สภาวะมาตรฐาน คือ ความสัมพันธ์ในรูปอัตราส่วนระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนต่อพลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศ โดยคำนวณจากสมการดังนี้

$$SAE = \frac{SOTR}{P} \quad (2.13)$$

เมื่อ SAE คือ ประสิทธิภาพการเติมอากาศที่สภาวะมาตรฐาน

(กก.-ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม.)

SOTR คือ อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 20 °ซ

(กก.-ออกซิเจน/ล.-ชม.)

P คือ ค่าพลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศ (กิโลวัตต์)

- ประสิทธิภาพถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Efficiency, SOTE)

ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน คือ ความสัมพันธ์ในรูปอัตราส่วนร้อยละระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจนต่อพลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศ โดยคำนวณจากสมการดังนี้

$$SOTE = \frac{SOTR}{A} \quad (2.14)$$

$$A = O_a p_a \quad (0.23)$$

SOTE คือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (ร้อยละ)

A คือ อัตราการไหลเชิงมวลของออกซิเจนในกระแสอากาศ

Q_a คือ อัตราการไหลของอากาศ (ล./ชม.)

p_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ ณ อุณหภูมิใดๆ (p_a ที่อุณหภูมิ 25 °ซ เท่ากับ 1.184 ก./ลบ.ม.)

0.23 คือ น้ำหนักของออกซิเจนต่อหนึ่งหน่วยอากาศ

ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมออกาสนิยมเปรียบเทียบโดยใช้ค่าที่สภาวะมาตรฐาน ซึ่งจากคำนวณดังสมการข้างต้นพบว่าเครื่องเติมอากาศด้วยเครื่องเติมอากาศเวนจูรีมีความสามารถในการเติมออกซิเจนได้ดีกว่าแบบอื่นๆ ร้อยละ 30 เมื่อใช้พลังงานเท่ากัน และสามารถติดตั้งระบบเวนจูรีได้หลายรูปแบบเพื่อให้เหมาะกับการใช้ประโยชน์ได้แก่

1) ระบบเติมอากาศแบบเวนจูรีชนิดติดตั้งใต้น้ำ

เป็นรูปแบบที่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมที่ต้องการลดเสียงดังจากการทำงานของระบบลดการเกิดโอโซนหรือละออง รวมไปถึงการไหลซึมของของเหลวซึ่งอาจจะไหลจากบ่อบำบัด ประกอบไปด้วยเครื่องสูบน้ำและหัวพ่นน้ำซึ่งทั้งหมดจะถูกติดตั้งไว้ใต้น้ำภายในถังบำบัดหรือบ่อเพาะเลี้ยงโดยมีท่ออากาศต่อไปยังหัวพ่นรูปร่างคอคอดซึ่งทำให้เกิดแรงดูดอากาศผ่านท่ออากาศทำให้เกิดการฉีดพ่นจนเกิดฟองอากาศขนาดเล็กมาก เหมาะแก่การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและรวมไปถึงติดตั้งในระบบบำบัดน้ำได้

2) ระบบเติมอากาศแบบเวนจูรีชนิดติดตั้งภายนอก

เป็นรูปแบบที่ติดตั้งอากาศเหนือระดับพื้นดินโดยสามารถควบคุมทิศทางการพ่นผสมภายในถังลักษณะเป็นชุดได้ โดยการติดตั้งหลายหัวพ่นหรือออกแบบเพื่อใช้กับบ่อบำบัดรูปทรงสี่เหลี่ยมแนวยาว โดยเครื่องสูบน้ำและเครื่องพ่นน้ำนั้นถูกติดตั้งไว้ด้านนอกถังโดยมีท่อดูดและท่อพ่นน้ำกลับเข้าไปในถังเมื่อเกิดการทำงานของเครื่องสูบน้ำจะมีแรงดูดอากาศไหลผ่านท่อเข้าไปผสมภายในถัง

3) ระบบเติมอากาศแบบเวนจูรีชนิดติดตั้งกับทุ่นลอย

เป็นรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับบ่อบำบัดน้ำเสียหรือบ่อเติมอากาศขนาดใหญ่ ซึ่งมีความยืดหยุ่นในการทำงานมาก สามารถเคลื่อนย้ายเพื่อปรับเปลี่ยนตำแหน่งในตำแหน่งที่ต้องการได้ ซึ่งสามารถติดตั้งตลอดหรือชั่วคราว โดยมีท่ออากาศต่อลงไปยังเครื่องสูบน้ำและหัวพ่นน้ำอยู่ใต้ทุ่นลอย เมื่อเครื่องสูบน้ำทำงานจะดูดให้ไหลผ่านคอคอดของหัวพ่นน้ำแล้วเข้าไปผสมรวมกันจึงเกิดการฉีดพ่น

เมื่อเปรียบเทียบระบบเติมอากาศแบบเวนจูรีทั้งการติดตั้ง 3 รูปแบบ จะสามารถสรุปลักษณะการใช้งานของแต่ละชนิดการติดตั้งได้ดังตารางที่ 2.6 เพื่อเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำดังนี้

ตารางที่ 2.6 การใช้งานระบบเติมอากาศแบบเวนจูรีตามสภาวะการติดตั้ง

ชนิดการติดตั้ง	ลักษณะการใช้งาน
ติดตั้งใต้น้ำ	เหมาะสำหรับใช้งานเพื่อลดระดับเสียง มีการถ่ายเทออกซิเจนที่ผสมกับน้ำได้ดีสม่ำเสมอไม่มีการกระจายของน้ำ และลดค่าพลังงานในการเดินระบบ
ติดตั้งภายนอก	ติดตั้งกับระบบที่มีถังเติมอากาศนอกระบบและลอยเหนือพื้นดินดูแลรักษาง่าย และปรับแต่งให้เข้ากับระบบได้ง่าย
ติดตั้งกับทุ่นลอย	เหมาะสำหรับใช้บำบัดในบ่อบำบัดขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งได้ง่าย

(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน และคณะ)

2.5 กุ้งขาวและการเพาะเลี้ยงกุ้งขาว

กุ้งขาวเป็นสัตว์น้ำเศรษฐกิจที่ถูกให้ความสำคัญทางการตลาดทดแทนกุ้งกุลาดำ เนื่องจากสามารถผสมพันธุ์ได้ง่ายกว่าโดยไม่ต้องรอให้ตัวเมียลอกคราบ เพียงตัดตาตัวเมียที่ลอกคราบเพื่อสร้างไข่แก่แล้วนำไปไ้บ่อเดียวกับตัวผู้ ซึ่งโดยทั่วไปใช้เวลาในการผสมพันธุ์เพียง 16-17 ชม. กุ้งเลี้ยงง่าย โตเร็ว มีอัตราการปล่อยกุ้งต่อบ่อที่สูง และยังทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมและการเกิดโรคต่างๆ ที่พบในกุ้ง เช่น โรคตายด่วน (EMS) หรือโรคชี้ขาว และโรคไวรัสต่างๆ ซึ่งเป็นปัญหาหลักที่เกิดในกุ้งกุลาดำ (กรมประมง, 2556)

2.5.1 สรีรวิทยาและอนุกรมวิธานของกุ้งขาว

กุ้งขาวมีต้นกำเนิดมาจากในทวีปอเมริกาใต้บริเวณชายฝั่งของมหาสมุทรแปซิฟิกมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Litopenaeus vannamei* (ชื่อสามัญคือ Whiteleg shrimp) เป็นกุ้งที่ลำตัวขาวใส ขามีสีขาวย ปลายหางสีแดง และมีลักษณะเด่นคือกรีกจะมีแนวตรงปลายงุ้มลงเล็กน้อย และจะเห็นลำไส้ที่ชัดเจนเป็นสีดำ ตัวเมียมักจะมีขนาดใหญ่กว่าตัวผู้

การจัดอันดับอนุกรมวิธานของกุ้งขาวเป็นดังนี้

Kingdom: Animalia

Phylum: Arthropoda

Subphylum: Crustacea

Class: Malacostraca

Order: Decapoda

Family: Penaeidae

Genus: Litopenaeus

Species: *L. vannamei* (*Litopenaeus vannamei*)



รูปที่ 2.4 กุ้งขาวแวนนาไม (*Litopenaeus vannamei*)

ลักษณะสำคัญของกุ้งขาวคือ สามารถหากินได้ทุกระดับความลึกของน้ำ ลอกคราบไว้มาก สัปดาห์ หนึ่งทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้ดี สามารถอาศัยในแหล่งน้ำที่มีความกระด้าง 120 มก./ล. และมีค่าอัลคาไลน์ในช่วง 80-150 มก./ล. สามารถเพาะเลี้ยงได้ทั้งแหล่งน้ำธรรมชาติ และระบบเพาะเลี้ยงเชิงอุตสาหกรรมที่มีความหนาแน่นสูง นอกจากนี้กุ้งขาวยังทนทานต่อการเกิด โรคติดต่อ อาศัยได้ทุกช่วงความเค็ม และอุณหภูมิที่ต่ำ มีความต้องการโปรตีนที่ต่ำกว่ากุ้งกุลาดำ รวมถึงมีการตอบสนองต่อการปรับปรุงพันธุ์ได้ดี ซึ่งในปัจจุบันจึงมีการพัฒนารูปแบบการเพาะเลี้ยง กุ้งขาวให้เหมาะสม โดยสามารถจำแนกการเพาะเลี้ยงกุ้งขาวออกเป็น 2 รูปแบบโดยแบ่งตามระดับความ เเค็ม ได้แก่

1) การเลี้ยงด้วยความเค็มต่ำ เป็นการเลี้ยงเพื่อเศรษฐกิจเป็นหลักในพื้นที่น้ำจืดโดยมีความเค็มต่ำจนเกือบเป็นน้ำจืด ซึ่งการเลี้ยงนี้จะมีระดับความเค็มจากนาเกลือที่ 100-200 พีพีที แล้วนำกุ้งมาเพาะเลี้ยงในระบบปิดโดยเติมน้ำให้เหลือระดับความเค็มที่ 3-4 พีพีที ให้มีการถ่ายเทน้ำน้อย ความลึกที่ 80 ซม. แล้วจึงปรับความเค็มที่หลังจาการเตรียมระบบ โดยใช้ลูกกุ้งระยะโพสลาร์วา (Post larvae; PL) 10-12 เป็นเวลา 2 สัปดาห์ ความหนาแน่นที่เหมาะสมคือช่วง 70,000-80,000 ตัวต่อไร่

2) การเลี้ยงความเค็มปกติ เป็นการเลี้ยงที่ใช้ระดับความเค็มที่ 10 พีพีที ขึ้นไป นิยมเลี้ยงกับพื้นที่ใกล้ทะเลมากกว่า เนื่องจากการปล่อยลูกกุ้งอย่างหนาแน่นถึง 120,000 ตัวต่อไร่ โดยมีอัตราการรอดประมาณร้อยละ 80 แต่เป็นการเลี้ยงแบบระบบเปิดมีการถ่ายเทน้ำซึ่งไม่สามารถควบคุมคุณภาพน้ำได้

2.5.2 ลักษณะคุณภาพน้ำในการเลี้ยงกุ้งขาวตามค่ามาตรฐานการเลี้ยงกุ้ง

คุณภาพน้ำเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญในการเพาะเลี้ยงกุ้ง เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโต อัตราการรอด และอัตราแลกเนื้อ (Feed Conversion Ratio; FCR) หากการจัดการคุณภาพน้ำไม่ดีจะส่งผลกระทบเป็นอยู่ของกุ้งและก่อให้เกิดโรคติดต่อกันมาได้ ทั้งนี้ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ ได้แก่

1) อุณหภูมิ กุ้งขาวมีความสามารถในการทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่ากุ้งกุลาดำ ซึ่งช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงคือ 28-32 °ซ แต่ถ้ามีอุณหภูมิที่ต่ำกว่านี้ (24-26 °ซ) ก็ยังสามารถเจริญเติบโตได้อยู่แต่จะช้ากว่าในช่วงที่อุณหภูมิเหมาะสม โดยมีอัตราการกินอาหารที่น้อยลง ในกรณีที่ระบบมีอุณหภูมิที่สูงกว่านี้อาจส่งผลกระทบต่ออัตราการกินอาหาร การผสมพันธุ์ การลอกคราบ และกุ้งมีอัตราเมตาบอลิซึมที่ต่ำลงได้ (Samocho และคณะ, 2019)

2) พีเอช น้ำที่เหมาะสมแก่การเลี้ยงกุ้งขาวควรอยู่ในช่วงระหว่าง 7.5-8.5 โดยช่วงค่าพีเอชที่ต่ำสุดไม่ควรต่ำกว่า 7.5 และในช่วงบ่ายไม่ควรสูงเกิน 8.5 และการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในแต่ละรอบวันไม่ควรมากกว่า 0.5 ถ้าค่าพีเอชในน้ำเลี้ยงต่ำกว่า 4 หรือมากกว่า 11 กุ้งจะไม่สามารถดำรงชีวิตในระบบและตายได้ ทำให้มีอัตราการรอดต่ำ

3) ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งขาวส่งผลกระทบต่ออัตราการกินอาหาร การเจริญเติบโตและการเกิดโรค โดยช่วงเวลาที่ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำน้อยที่สุดคือ ช่วงเช้ามืดเนื่องจากถูกใช้ในการหายใจและไม่มีการสร้างออกซิเจนในช่วงเวลานี้ ปริมาณออกซิเจนละลาย

น้ำจะมีค่าสูงขึ้นในช่วงบ่าย โดยปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจะขึ้นอยู่กับค่าความเค็มและอุณหภูมิในน้ำด้วย โดยค่าที่เหมาะสมในการเลี้ยงกุ้งคือมากกว่า 4-5 มก./ล. เนื่องจากกุ้งมีการตอบสนองได้ดี กินอาหาร และเจริญเติบโตได้ดี รวมไปถึงทำให้สารอินทรีย์ละลายได้ดี ไม่ขัดขวางการหายใจและการย่อยอาหารของกุ้ง แต่ถ้าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำน้อยกว่า 1 มก./ล. จะทำให้กุ้งเกิดความเครียด อ่อนแอ และเจริญเติบโตได้น้อยลงส่งผลต่อผลผลิตโดยตรง

4) ความเค็ม ปริมาณความเข้มข้นของเกลือหรือไอออนในน้ำ ได้แก่ Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} และอื่นๆ ซึ่งส่งผลต่อการดำรงชีวิต และปริมาณน้ำในร่างกายของกุ้ง เนื่องจากเกี่ยวข้องกับแรงดันออสโมติก โดยกุ้งสามารถทนต่อความเค็มได้ต่างกันตามช่วงวัยของกุ้ง โดยค่าความเค็มในช่วง 33-40 พีพีที เหมาะสำหรับลูกกุ้ง โดยทั่วไปจะเลี้ยงให้ความเค็มอยู่ในช่วง 1-40 พีพีที หรือบางการเพาะเลี้ยงใช้ 2-35 พีพีที เพื่อให้ครอบคลุมทุกช่วงอายุของกุ้ง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับรูปแบบการเลี้ยงอีกด้วย ในที่ระดับความเค็มต่ำจะพบว่ากุ้งมีการลอกคราบน้อยกว่าการเลี้ยงด้วยความเค็มปานกลางถึงสูง (เป็นการเลี้ยงในช่วงความเค็มปกติ)

5) ความโปร่งแสง เป็นการวัดระยะความลึกของน้ำที่ใช้เลี้ยงกุ้ง โดยสามารถนำข้อมูลความโปร่งแสงเปรียบเทียบกับความอุดมสมบูรณ์และข้อมูลอื่นๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำได้ โดยช่วงความโปร่งแสงที่เหมาะสมกับการเลี้ยงอยู่ระหว่าง 25-50 ซม. ซึ่งความเข้มของน้ำเลี้ยงสามารถลดความตึงเครียดและอาการตกใจของกุ้งได้

6) อัลคาลินิตี ค่าสภาพความเป็นด่างสำคัญต่อการเลี้ยงกุ้ง เนื่องจากสัมพันธ์กับอัตราการรอดและการเจริญเติบโตของกุ้ง เนื่องจากกุ้งต้องการธาตุแมกนีเซียมสูง จึงต้องรักษาระดับความเป็นด่างเพื่อให้มีไอออนของแมกนีเซียมเหลือในระบบ เนื่องจากเป็นส่วนช่วยในการเจริญเติบโตลอกคราบ และการเสริมสร้างส่วนต่างๆ ของร่างกายกุ้ง โดยทั่วไปจะควบคุมให้ค่ามากกว่า 100 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.

7) แอมโมเนียอิสระ ในการเลี้ยงกุ้งจะเกิดแอมโมเนียที่มาจากการขับถ่ายหรือจากการย่อยสลายอาหารที่เติมให้กุ้ง แอมโมเนียเป็นสารซึ่งเป็นพิษโดยจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตและอัตราการรอดตายของกุ้ง หรือถ้ามีค่าที่สูงมากอาจจะทำให้กุ้งตายได้ในเวลาอันสั้น โดยทั่วไปสามารถพบได้ 2 รูปคือ แอมโมเนียและแอมโมเนียมไอออน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของระบบ ทั้งนี้ในการเพาะเลี้ยงกุ้งจะควบคุมให้ค่าแอมโมเนียที่เกิดขึ้นน้อยกว่า 0.1 มก./ล. เพราะถ้ามากกว่านี้จะส่งผลต่อการขนส่งออกซิเจนในตัวของกุ้งได้

8) ไนไตรต์ เป็นสารตัวกลางที่เกิดจากกระบวนการไนทริฟิเคชัน โดยปกติในระบบเพาะเลี้ยง จะไม่มีการสะสมไนไตรต์เนื่องจากเปลี่ยนรูปได้ไว แต่ในบางกรณีที่อัตราการออกซิไดซ์แอมโมเนีย มากกว่าการออกซิไดซ์ไนไตรต์จะเกิดการสะสมที่มากขึ้น ซึ่งมักเกิดขึ้นในการเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีความหนาแน่นสูง โดยจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเติมอาหารมาก ทำให้ค่าพีเอชและออกซิเจนละลายน้ำลดลง โดยช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงจะควบคุมให้ไม่เกิน 1 มก./ล.

จากข้อมูลทั้งหมดสามารถสรุปเพื่อใช้เป็นมาตรฐานคุณภาพน้ำสำหรับการเลี้ยงกุ้งได้ตามตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 พารามิเตอร์สรุปคุณภาพน้ำที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงกุ้งขาว

พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ	ค่าที่เหมาะสม
- อุณหภูมิของน้ำ (°C)	28 - 32
- พีเอช	7.5 - 8.5
- ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	> 4-5
- ความเค็ม (พีพีที)	1 - 40 หรือ 2 - 35 (ขึ้นอยู่กับรูปแบบการเลี้ยง)
- ความโปร่งแสงของน้ำ (ซม.)	25 - 50
- อัลคาลินิตี (มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)	> 100
- แอมโมเนียอิสระ (มก./ล.)	< 0.1
- ไนไตรต์ (มก./ล.)	< 1

2.6 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งขาว

Alves Neto และคณะ (2019) ศึกษาผลของของความเป็นพิษที่เกิดจากไนเตรดต่อการเลี้ยงตัวอ่อนกุ้งขาวที่สภาวะความเค็มต่ำ เพื่อหาระดับความเข้มข้นของไนเตรดที่ปลอดภัยไม่ก่อความเป็นพิษต่อกุ้งขาวในระบบเพาะเลี้ยง ทำการทดลองในน้ำปริมาตร 20 ลิตรโดยเปรียบเทียบความเค็มที่แตกต่างกัน 2 ระดับคือ ความเค็ม 5 ก./ล. ทดสอบกับไนเตรดที่ความเข้มข้น 100, 500, 1,500, 2,500 และ 3,500 มก./ล. และที่ความเค็ม 10 ก./ล. ทดสอบกับไนเตรดที่ความเข้มข้น 100, 500, 1,500, 2,500, 3,500 และ 4,500 มก./ล. เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมโซเดียมไนเตรด ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของไนเตรดที่เหมาะสมและไม่เกิดอันตรายต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งขาวที่ระดับความเค็ม 5 และ 10 กรัม/ล. คือ 60.05 และ 127.61 มก.-ไนเตรด/ล.

Araneda และคณะ (2020) ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและการเลือกความหนาแน่นของการเลี้ยงกุ้งขาวในน้ำจืด โดยทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงกุ้งขาวที่ในน้ำจืดที่ความเค็มเป็นศูนย์โดย แปรค่าอุณหภูมิแตกต่างกันระหว่าง 11.5-31.6 °ซ ใช้ระดับความหนาแน่นต่างกัน 6 ระดับคือ 90, 120, 180, 230, 280 และ 330 ตัวต่อตร.ม. และเก็บผลการทดลองโดยการชั่งน้ำหนัก และคำนวณอัตราแลกเนื้อและอัตราการรอดชีวิตสุดท้าย ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 26 °ซ เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกุ้ง เนื่องจากกุ้งมีอัตราการเจริญเติบโตสูงและผลผลิตกุ้งมากที่สุด ในขณะที่อุณหภูมิต่ำกว่า 22 °ซ ลงมาประสิทธิภาพการเจริญเติบโตจะลดลง ส่วนผลของความหนาแน่นที่ 90-180 และ 230-330 ตัวต่อตร.ม. ได้น้ำหนักกุ้งเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 12.6 และ 8.8 ก. ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเลี้ยงกุ้งที่ระดับความหนาแน่นสูงจะทำให้น้ำหนักกุ้งลดลง จึงสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงกุ้งขาวในน้ำจืดคืออุณหภูมิตั้งแต่ 26 °ซ เป็นต้นไป และความหนาแน่นไม่เกิน 180 ตัวต่อตร.ม.

Duan และคณะ (2018) ศึกษาโครงสร้างเยื่อเมือกและการตอบสนองของภูมิคุ้มกันในลำไส้ของกุ้งขาวเมื่อได้รับอุณหภูมิสูง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิสูงที่ก่อให้เกิดความเครียดต่อกุ้งขาว ทำการทดลองด้วยกุ้งขาวที่เลี้ยงด้วยน้ำความเค็ม 30 พีพีที ก่อนทำการทดลอง 1 สัปดาห์ทำการคัดกุ้งที่อยู่ในระยะลอกคราบจำนวน 180 ตัว แบ่งเป็น 2 ชุดการทดลองคือ ชุดควบคุมที่อุณหภูมิเท่ากับ 28 °ซ และชุดทดลองที่เพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 28-33 °ซ ด้วยอัตรา 1 °ซ/ชม. และเก็บตัวอย่างเนื้อเยื่อจากลำไส้ที่เวลา 0, 6, 12, 24, 48, 72 ชม. หลังเริ่มการทดลองและพบว่ากุ้ง

เริ่มเข้าสู่สภาวะเครียด เพื่อนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะของเนื้อเยื่อ และการแสดงออกของยีน ผลการทดลองพบว่าอนุมูลอิสระสูงทำให้เกิดสภาวะเครียดกับกึ่งขามีผลกระทบต่อเกราะป้องกันผนังลำไส้ เนื่องจากทำให้โครงสร้างเยื่อเมือกเสียหาย รวมไปถึงเกิดสภาวะเครียดออกซิเดชัน (Oxidative stress) เป็นภาวะและกระบวนการที่กระตุ้นให้ดีเอ็นเอ โปรตีน และเยื่อหุ้มเซลล์อักเสบ เป็นผลให้ภูมิคุ้มกันและการเผาผลาญของกึ่งขาลดต่ำลง

Furtado และคณะ (2015) ศึกษาผลของความเป็นพิษที่เกิดจากไนเตรดต่อการเลี้ยงกึ่งขาวในระบบไบโอฟล็อก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาระดับความเข้มข้นของไนเตรดต่อการเจริญเติบโตและการอยู่รอดของกึ่ง แบ่งการทดลองตามความเข้มข้นไนเตรดเป็น 4 ระดับ คือ 75, 150, 300 และ 600 มก.-ไนเตรด/ล. ในถังทดลองขนาด 45 ล. โดยไม่มีการเติมแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนเพิ่มเติม เนื่องจากระบบมีระดับแอมโมเนียทั้งหมดไม่ถึง 1 มก./ล. จึงไม่ต้องเร่งประสิทธิภาพของไบโอฟล็อก ภายหลังการทดลองทั้งสิ้น 42 วัน พบว่าค่าคุณภาพน้ำเลี้ยงของแต่ละความเข้มข้นไม่แตกต่างกัน (ยกเว้นค่าความเข้มข้นของไนเตรดเท่านั้น) แต่ส่งผลต่อการเลี้ยงกึ่งในระบบคือ ระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของไนเตรดจะส่งผลต่ออัตราการรอด และน้ำหนักตัวสุดท้าย (เมื่อคิดเทียบจากน้ำหนักเริ่มต้นกับน้ำหนักสุดท้ายที่เพิ่มขึ้น) ซึ่งผู้วิจัยสรุปว่า ความเป็นพิษของไนเตรดจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่าความเค็ม โดยระดับความเข้มข้นของไนเตรดที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพการเลี้ยงกึ่งคือ 300 มก.-ไนเตรด/ล. ถ้ามากกว่านี้จะส่งผลเสียต่อลักษณะทางเนื้อเยื่อหรือจุลพยาธิวิทยา (Histopathology) ในเหงือกและตับของกึ่งจนทำให้มีอัตราการรอดลดลง

Huang และคณะ (2020) ศึกษาผลของความเป็นพิษที่เกิดจากไนไตรต์เรื้อรังต่อการเจริญเติบโตและสุขภาพของกึ่งขาว โดยทำการเปรียบเทียบผลความเข้มข้นไนไตรต์แตกต่างกัน 4 ระดับคือ 0, 2, 6.67 และ 20 มก./ล. แบ่งชุดการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลองอย่างละ 2 ซ้ำ โดยแต่ละชุดการทดลองบรรจุกึ่งในบ่อๆ ละ 30 ตัว และควบคุมคุณภาพน้ำให้เหมาะสมตลอดระยะเวลา 30 วัน ทำการตรวจวัดการเจริญเติบโตของกึ่งหลังครบระยะเวลาการทดลอง ควบคู่กับการสุ่มเก็บตัวอย่างตับอ่อนของกลุ่มตัวอย่างชุดการทดลองละ 8 ตัว เพื่อนำไปวิเคราะห์การทำงานของเอนไซม์ที่เกิดขึ้นรวมไปถึงการวิเคราะห์ทางชีวโมเลกุลด้วยการสกัดดีเอ็นเอเพื่อดูลักษณะการแสดงออกยีนที่ควบคุมกิจกรรมที่เกิดขึ้นภายในตัวกึ่งและกลุ่มจุลินทรีย์ในลำไส้ของกึ่งขาว ผลการทดลองพบว่ากึ่งที่ได้รับไนไตรต์ที่ความเข้มข้นเท่ากับหรือสูงกว่า 20 มก./ล. มีผลต่อการเจริญเติบโตที่ต่ำลงและเกิดการเปลี่ยนแปลงต่อภูมิคุ้มกันของกึ่ง โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการสร้างอนุมูลอิสระ เมื่อตรวจสอบพบว่าระดับความเข้มข้นของไนไตรต์ที่แตกต่างกันจะเพิ่มความหลากหลายกลุ่มจุลินทรีย์ในลำไส้กึ่ง ซึ่งอาจส่งผล

กระทบต่อการย่อยอาหารและการเผาผลาญผ่านการสร้างไมโครไบโอมที่เป็นกลุ่มจุลินทรีย์สำคัญในการปรับสมดุลลำไส้ของกุ้ง

Jaffer และคณะ (2020) ศึกษาผลของการเลี้ยงกุ้งขาวที่ระดับความเค็มต่ำต่อการเจริญเติบโตและการรอดชีวิต รวมไปถึงกระบวนการออสโมซิสและองค์ประกอบไอออนิกของกุ้งขาวที่สภาวะความเค็มต่ำ ทำการทดลองโดยเลี้ยงกุ้งขาวในน้ำความเค็มต่างกัน 5 ระดับคือ 1, 5, 7, 15 และ 25 พีพีที การทดลองละ 3 ซ้ำ เป็นระยะ 3 สัปดาห์ ทำการตรวจวัดพารามิเตอร์สัตว์น้ำโดยสุ่มตัวอย่างในวันที่ 8 และ 21 ของการทดลอง รวมไปถึงสุ่มเก็บตัวอย่างเม็ดเลือดแดงของแต่ละชุดการทดลองตัวอย่างละ 1 มล. เพื่อตรวจสอบการเกิดกระบวนการออสโมซิสและตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของไอออนของแร่ธาตุหลักได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม และโซเดียมผ่านเครื่อง Inductive coupled plasma mass spectrometry (ICP-OES) ผลการทดลองพบว่ากุ้งขาวไม่ได้รับผลกระทบจากระดับความเค็มแม้ที่ระดับความเค็มเท่ากับ 1 พีพีที ลักษณะของเม็ดเลือดแดงไม่มีความแตกต่างกันในแต่ละระดับความเค็มเมื่อเปรียบเทียบกับค่าไอโซออสโมติกมาตรฐานที่ระดับความเค็มเท่ากับ 21.1 พีพีที เท่ากับ 671.3 ออสโมลาลิตี เนื่องจากกุ้งขาวสามารถปรับตัวของเม็ดเลือดต่อการเปลี่ยนแปลงความเค็มจากกระบวนการควบคุมไฮเปอร์และไฮโปออสโมติก แต่ในการรักษาระดับสมดุลความเข้มข้นของไอออนแร่ธาตุของเม็ดเลือดแดง พบว่าที่ระดับความเค็มเท่ากับ 15 พีพีที ค่าความเข้มข้นของแคลเซียม แมกนีเซียม และโซเดียมสูงแตกต่างจากระดับความเค็มอื่น ซึ่งเป็นกระบวนการรักษาสมดุลที่เกิดขึ้นเมื่อระดับออสโมติกภายนอกสูงกว่าระดับโซเดียมในเม็ดเลือดเพื่อรักษาความเค็มภายในตัวกุ้งเป็นการชดเชยการสูญเสียเกลือแบบทางอ้อม ซึ่งกรณีดังกล่าวไม่ส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของกุ้งแสดงให้เห็นจากอัตราการรอดชีวิต และการเจริญเติบโตสูงไม่แตกต่างกันในแต่ละระดับความเค็ม

Lin และคณะ (2001) ศึกษาความเป็นพิษฉับพลันของแอมโมเนียต่อการเลี้ยงลูกกุ้งขาวในระดับความเค็มที่แตกต่างกัน โดยทำการทดลองแบ่งการเลี้ยงกุ้งขาวด้วยระดับความเค็มต่างกัน 3 ระดับคือ ร้อยละ 15, 25 และ 35 และทำการวัดค่าแอมโมเนียที่เกิดขึ้นในช่วง 20-100 มก.-แอมโมเนีย/ล. โดยใช้กุ้งขาว 10 ตัวต่อแต่ละการทดลอง และวิเคราะห์ค่าความเป็นพิษของแอมโมเนียช่วงเวลาสั้นแบบ LC50 คือการวัดค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ละลายในน้ำที่กุ้งได้รับแล้วตายไปครึ่งหนึ่งของจำนวนทั้งหมด จากการสุ่มตัวอย่างการตายที่เกิดขึ้น พบว่าผลของความเค็มมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของแอมโมเนียและเวลาระยะเวลาก่อให้เกิดผลต่อตัวกุ้งขาวเมื่อระดับความเค็มระหว่างร้อยละ 25-35 จะสามารถต้านทานผลของความเป็นพิษที่เพิ่มขึ้นได้ถึง 50 มก.-แอมโมเนีย/ล. ตั้งแต่ช่วงระยะเวลาการทดลองที่ 60 ชม. ได้

Maicá และคณะ (2011) ศึกษาผลของความเค็มต่อการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนทางสรีระของการเลี้ยงตัวอ่อนกุ้งขาวที่ความหนาแน่นสูง ทำการทดลองโดยเลี้ยงกุ้งขาวด้วยความหนาแน่นเท่ากับ 140 ตัวต่อตร.ม. ที่ระดับความเค็มต่างกัน 3 ระดับคือ 4, 16 และ 32 พีพีที ในบ่อสังเคราะห์ไฟเบอร์ซีเมนต์ขนาด 200 ล ภายในบ่อบรรจุตะกอนจุลินทรีย์ที่ถูกกระตุ้นการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปกากน้ำตาลด้วยสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 20:1 ก่อนทำการทดลอง 3 วัน ซึ่งช่วยในการควบคุมปริมาณสารอินทรีย์ในไนโตรเจนในระบบ วิเคราะห์ค่าคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาทดลอง และสุ่มเก็บตัวอย่างกุ้งในวันที่ 20 และวันสุดท้ายของการทดลองชุดการทดลองละ 20 ตัว เพื่อตรวจวัดการเจริญเติบโตและการรอดชีวิตของกุ้งขาว ผลการทดลองพบว่าพบว่าคุณภาพน้ำระหว่างการเพาะเลี้ยงที่แตกต่างกันในแต่ละชุดการทดลองที่ระดับความเค็มต่างกัน พบค่าของแข็งแขวนลอยและความเข้มข้นฟอสเฟตสูงที่ระดับความเท่ากับ 32 พีพีที ในส่วนของสารอินทรีย์พบว่าระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียต่ำ และความเข้มข้นของไนเตรตสูง สอดคล้องกับผลของการเจริญเติบโตกุ้ง อัตราการรอดชีวิต และการเจริญเติบโตที่วัดจากน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นในชุดการทดลองที่ระดับความเค็มสูง

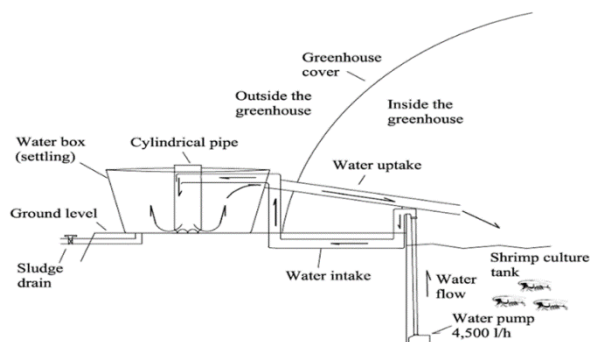
Wang และคณะ (2019) ศึกษาการตอบสนองทางสรีระของกุ้งขาวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในน้ำที่มีความเค็มต่ำ ทำการทดลองออกเป็น 3 ซ้ำโดยใช้กุ้งการทดลองละ 21 ตัว ทั้งหมด 63 ตัว ทดลองในน้ำที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 28 °ซ และลดอุณหภูมิทุก 7.5 °ซ ต่อวัน จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงเหลือ 13 °ซ จนครบ 24 ชม. จะเพิ่มอุณหภูมิกลับมาที่ 28 °ซ ด้วยอัตราเดียวกัน ทำการวิเคราะห์การตอบสนองต่อการเปลี่ยนทางสรีระของกุ้งด้วยการเก็บตัวอย่างตัวอ่อนของกุ้งคู่แรกที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 28, 23, 18, 13 และที่ 13 °ซ เมื่อครบ 24 ชม. และเก็บเม็ดเลือดแดงจากแอ่งเลือดบริเวณใต้ท้องขาวนำมาวิเคราะห์ผลทางวิธีทางชีวโมเลกุล เพื่อศึกษาการแสดงออกของยีนที่เกิดขึ้นขณะเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 28 °ซ เป็นสภาวะที่เซลล์ต่างๆ ภายในตัวกุ้งทำงานได้ปกติ แต่เมื่อลดอุณหภูมิลงเรื่อยๆ จะส่งผลต่อเยื่อในลำไส้ขยายตัวและแควคิวโอบางส่วนแตกหรือผนังเซลล์บางลง ทำให้ B-cell เพิ่มจำนวนมากขึ้นเพื่อเป็นการป้องกันเซลล์ภายในไม่ให้ถูกทำลาย และในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ พบว่าโปรตีนและไขมันจะเป็นแหล่งพลังงานหลักของกุ้งขาว ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการตอบสนองของตัวอ่อนที่สามารถปรับตัวเมื่อกุ้งได้รับผลกระทบจากปัจจัยภายนอกได้ค่อนข้างเร็ว สามารถสรุปได้ว่ากุ้งขาวสามารถปรับตัวให้อยู่รอดได้เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ต่ำ

Xu และคณะ (2019) ศึกษาการตอบสนองภูมิคุ้มกันของกุ้งขาวเมื่อสัมผัสกับอุณหภูมิต่ำและสัมผัสกับอากาศ ทำการทดลองโดยทำการสลับกุ้งขาวด้วยการใช้ความเย็นที่อุณหภูมิ 13 °ซ หลังจากนั้นจะนำกุ้งไปแช่ที่อุณหภูมิสำหรับการทดลองคือ 15 °ซ โดยมีการให้ออกซิเจนตลอดระยะเวลาการทดลองเป็นระยะเวลา 12 ชม. เมื่อครบระยะเวลาจะปล่อยกุ้งให้สัมผัสอากาศที่อุณหภูมิปกติที่ 25 °ซ ซึ่งจะมีการเก็บตัวอย่างเม็ดเลือดแดงจากแองเกล็ดบริเวณใต้ท้องขวาย่น้ำคูลูกแรกก่อนทำการทดลอง 3, 6 และ 9 ชม. และ 10 นาที่หลังจากที่กุ้งกลับสู่สภาวะปกติที่น้ำอุณหภูมิปกติ นำตัวอย่างไปวิเคราะห์วิธีทางชีวโมเลกุลเพื่อดูการแสดงออกของยีนที่สภาวะที่แตกต่างกันของตัวอย่าง รวมไปถึงการนับจำนวนเม็ดเลือดผ่านฟลิวไซโตเมตรี (Flow Cytometry) และลักษณะของเซลล์เม็ดเลือดที่เปลี่ยนแปลงไปผ่านกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป พบว่าอุณหภูมิที่ต่ำและความเครียดที่เกิดจากการสัมผัสอากาศของกุ้งขาวส่งผลต่อภูมิคุ้มกันของกุ้งอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่สร้างความเสียหายหรือการเปลี่ยนแปลงของเม็ดเลือดแดง แสดงการตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกันแบบปรับตัวเพื่อลดความเครียดขณะอุณหภูมิต่ำ โดยกุ้งขาวสามารถทนต่อสภาวะอุณหภูมิต่ำได้ 9 ชม. ซึ่งสามารถกลับมาในสภาวะปกติได้เมื่ออยู่อุณหภูมิปกติโดยโครงสร้างของเม็ดเลือดไม่ได้รับความเสียหาย

2.6.2 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไบโอฟล็อกในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

Boyd (2018) ศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกด้วยอาหารสัตว์ และสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเพื่อใช้สำหรับระบบบำบัดแบบไบโอฟล็อกร่วมกับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ จากงานวิจัยนี้พบว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งบ่มตะกอน โดยการบ่มบนดินมีค่าที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 10:1-12:1 ส่วนอัตราส่วนที่เหมาะสมในบ่อดินอยู่ระหว่าง 6:1-12:1 กรณีที่ใช้อัตราส่วนที่มากกว่านี้จะทำให้เกิดการสะสมของไนโตรเจนในมวลชีวภาพของแบคทีเรียจนอาจก่อความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำได้ ซึ่งการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกที่อัตราส่วน 5:1 ตามน้ำหนักแห้งเป็นตะกอนที่มีแบคทีเรียที่พร้อมสำหรับกิจกรรมในกระบวนไนโทรฟิเคชัน เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟมีช่วงชีวิตที่สั้น และย่อยสลายได้ง่ายดังนั้นการเลือกอัตราส่วนที่ต่ำมีส่วนลดปริมาณการเติมสารเพื่อควบคุมสัดส่วนคาร์บอนและไนโตรเจน รวมไปถึงลดการสะสมปริมาณสารพิษที่เกิดจากสารประกอบไนโตรเจน แต่ในสภาวะที่บ่มตะกอนตามแหล่งธรรมชาติจะพบการสะสมของแอมโมเนียมาก การเลือกใช้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ต่ำซึ่งเป็นสัดส่วนที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย แต่อาจส่งผลให้ปริมาณไบโอฟล็อกที่ได้ไม่เพียงพอต่อการบำบัดแอมโมเนียที่เกิดขึ้นในแหล่งน้ำธรรมชาติ ทั้งนี้ในการประยุกต์การบ่มตะกอนดังกล่าวในบ่อสังเคราะห์จำเป็นต้องคำนึงปัจจัยที่ต่างกันออกไป

Gaona และคณะ (2011) ศึกษาผลของการกำจัดของแข็งต่อคุณภาพน้ำ การเจริญเติบโต และการอยู่รอดของกุ้งขาวในการเพาะเลี้ยงด้วยระบบไบโอฟล็อก โดยการทดลองนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลอง คือชุดการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งระบบตกตะกอนและชุดการทดลองที่มีการติดตั้งระบบตกตะกอนแบบแยกส่วนระหว่างบ่อเลี้ยงกุ้งและส่วนการตกตะกอนซึ่งมีการไหลเวียนของน้ำเชื่อมต่อกัน (รูปที่ 2.5) โดยระบบเพาะเลี้ยงกุ้งถูกตั้งในบริเวณเรือนกระจกด้วยถังขนาด 35 ลบ.ม. ภายในบรรจุน้ำทะเลที่มีความเค็มร้อยละ 90 ซึ่งถูกบำบัดด้วยคลอรีน 10 พีพีเอ็ม ไบโอฟล็อกอยู่ร้อยละ 10 ของปริมาตรถัง และมีการเติมอากาศรูปแบบหัวทรายก่อนเริ่มการทดลอง และส่วนการตกตะกอนเป็นถังน้ำพลาสติกที่ภายในมีท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มม. และความสูง 700 มม. ติดตั้งตรงกลางของถังที่สามารถควบคุมปริมาณของแข็งให้น้อยกว่า 500 มก./ล. ซึ่งเป็นปริมาณของแข็งที่ยังไม่ส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำในระบบเพาะเลี้ยง ในขณะการทดลองบ่อเลี้ยงกุ้งจะมีการสูบน้ำทำให้มีการไหลเวียนน้ำบริเวณก้นบ่อไปยังทางด้านบนของท่อในส่วนการตกตะกอนและเคลื่อนที่ลงไปยังก้นถังส่วนตกตะกอนทำให้เกิดการตกตะกอนของแข็งหรือตะกอนส่วนเกินจากบ่อเลี้ยงกุ้งออกไปจากระบบ และน้ำที่ผ่านกำจัดของแข็งจะถูกหมุนเวียนไปยังบ่อเลี้ยง เมื่อเปรียบเทียบ 2 ชุดการทดลองนี้ได้ข้อสรุปว่า คุณภาพน้ำในช่วง 6-8 สัปดาห์แรกของการทดลองทั้งสองชุดไม่มีความแตกต่างกัน แต่ปริมาณของของแขวนลอยในชุดการทดลองที่มีการติดตั้งระบบการตกตะกอนน้อยกว่าชุดการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งระบบการตกตะกอน และเห็นผลชัดเจนหลังผ่านไป 10 สัปดาห์ว่าปริมาณของแข็งที่ลดลงในชุดการทดลองที่มีการติดตั้งระบบการกรองส่งผลให้อัตราการอยู่รอด และผลผลิตสุดท้ายของกุ้งขาวมากกว่าชุดการทดลองที่ไม่มีการติดตั้งระบบการกรอง สรุปคือการกำจัดอนุภาคแขวนลอยโดยการกรองที่มีประสิทธิภาพต้องคงสภาพของแข็งแขวนลอยทั้งหมดไม่เกิน 500 มก./ล. ถึงจะมีผลต่อคุณภาพน้ำที่ดี มีออกซิเจนที่มากสำหรับการเจริญเติบโตของกุ้ง และสามารถใช่วิธีการเลี้ยงรูปแบบนี้กับการเพาะเลี้ยงกุ้งที่มีความหนาแน่นมากได้



รูปที่ 2.5 แผนภาพการชุดการทดลองที่มีการติดตั้งระบบตกตะกอนของแข็ง

Kunwong และคณะ (2022) ศึกษาของหน่วยแยกตะกอนโดยดัดแปลงใช้ในระบบที่ทำการเลี้ยงตะกอนไบโอฟล็อกร่วมกับสัตว์น้ำ เพื่อประเมินผลในการควบคุมปริมาณของแข็งแขวนลอยและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ไนโตรเจนในการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนระบบปิด เป็นการวิจัยต่อยอดความรู้จากการทดลองถึงปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกแบบแยกส่วนในการควบคุมคุณภาพน้ำของการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนระบบปิด โดยทำการทดลองด้วยการแยกส่วนไบโอฟล็อกด้านบนกับส่วนเลี้ยงสัตว์น้ำด้านล่างเชื่อมต่อกัน โดยส่วนที่ไบโอฟล็อกด้านบนจะติดตั้งตะแกรงที่ขนาดรูตะแกรงแตกต่างกัน 5 ขนาด ได้แก่ 43, 76, 100, 130 และ 160 ไมโครเมตร ซึ่งมีการปล่อยน้ำให้ไหลเวียนในระบบด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 3,000 ล./วัน เป็นเวลา 5 วัน และมีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนที่สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1 ในช่วงวันที่ 1-38 เท่านั้น เปรียบเทียบกันระหว่าง 2 ชุดการทดลอง คือ (1) ชุดการทดลองที่แยกส่วนระหว่างส่วนไบโอฟล็อกกับส่วนเลี้ยงสัตว์น้ำ และ (2) ชุดการทดลองที่เลี้ยงตะกอนไบโอฟล็อกร่วมกับสัตว์น้ำ พบว่าที่รูตะแกรงขนาด 100 ไมโครเมตรเหมาะสมสำหรับการใช้ในระบบไบโอฟล็อกนี้พบว่าเมื่อหลังจากการทดลองผ่านไป 30 ในหน่วยกรองสามารถรักษาระดับปริมาณของแข็งแขวนลอยให้ต่ำกว่า 50 มก./ล. (อยู่ในช่วงระหว่าง 200-500 มก./ล. สำหรับรองรับสัตว์น้ำที่ความหนาแน่นน้อยกว่า 11 กก./ลบ.ม.) ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมกับการเลี้ยงสัตว์น้ำของทั้ง 2 ชุดการทดลอง แต่ถ้าเพิ่มอัตราการไหลมากเกินไป 3,000 ล./วัน จะทำให้เกิดการอุดตันได้ และผลของการกรองแยกของแข็งแขวนลอยพบว่าประสิทธิภาพการกรองของชุดการทดลองที่ 1 ดีกว่าชุดการทดลองที่ 2 โดยมีการรวมตะกอนไบโอฟล็อกในช่วง 3-4 สัปดาห์แรกสามารถรักษาระดับแอมโมเนีย และไนไตรต์ต่ำกว่า 1 มก./ล. และเห็นผลชัดเจนของอัตราการบำบัดที่ดีขึ้นในช่วงหลังโดยสังเกตจากปริมาณไนเตรดเพิ่มสูงขึ้นในสัปดาห์ที่ 5 ซึ่งหมายถึงแบคทีเรียทำงานได้ดี และเกิดกระบวนการไนทริฟิเคชันเปลี่ยนแอมโมเนียและไนไตรต์เป็นไนเตรดได้ดี นอกจากนี้หน่วยการกรองที่ควบคุมปริมาณของแข็งแขวนลอยเป็นผลดีกับสัตว์น้ำ และคุณภาพน้ำที่ดีมากขึ้น สรุปคือหน่วยแยกตะกอนแขวนลอยเหมาะสำหรับการใช้ในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำหมุนเวียนแบบปิดที่แยกส่วนกับส่วนถึงปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกมากกว่า

Nootong และคณะ (2011) ศึกษาผลการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในการควบคุมความเข้มข้นของสารอินทรีย์ไนโตรเจนในระบบไบโอฟล็อก ทำการทดลองด้วยการเลี้ยงปลานิลในถังน้ำขนาด 500 ล. โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำเป็นเวลา 50 วัน ให้อาหารปลาด้วยอาหารเม็ดที่มีโปรตีนร้อยละ 35 ปริมาณร้อยละ 3 ของน้ำหนักปลานิล และมีการเติมแหล่งอินทรีย์คาร์บอนในรูปแป้งมันสำปะหลังด้วยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 16:1 ผลการทดลองพบว่า ในช่วงแรกของการทดลองสารอินทรีย์คาร์บอนที่เติมลงไปจะกระตุ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ

แอมโมเนียในระบบถูกกำจัดและควบคุมด้วยกระบวนการดูดซึมเข้าสู่เซลล์ แต่เมื่อผ่านไป 5 สัปดาห์พบว่า การเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในระบบไม่มีผลกับการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนียถูกกำจัดและลดลงโดยกลุ่มแบคทีเรียไนโตรไฟอิง พบการสะสมไนไตรต์และไนเตรตมากขึ้น และในที่สุดท้ายของการทดลองพบไนเตรตมีความเข้มข้นสูงถึง 43.7 มก.-ไนเตรต/ล.

Panigrahi และคณะ (2018) ศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มจุลินทรีย์และการเจริญเติบโตที่ดีด้านภูมิคุ้มกันของกุ้งขาวในการเพาะเลี้ยงด้วยระบบไบโอฟล็อก โดยทำการทดลองเลี้ยงกุ้งขาวร่วมกับตะกอนไบโอฟล็อกในบ่อเลี้ยงขนาด 500 ล. ด้วยความหนาแน่นกุ้งเท่ากับ 150 ตัว/ลบ.ม. และเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปกากน้ำตาลด้วยสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนแตกต่างกัน 4 ระดับคือ 5:1, 10:1, 15:1 และ 20:1 เพื่อเปรียบเทียบผลต่างๆ กับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์ พบว่าผลของสัดส่วนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการสะสมของปริมาณของแข็ง สารอินทรีย์และอนินทรีย์ละลายน้ำทั้งหมด (TDS) และของของแข็งแขวนลอยทั้งหมดเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดตะกอนไบโอฟล็อกที่มากขึ้น แต่ผลที่ตามมาคือทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สัดส่วนคาร์บอนที่น้อยกว่าให้ผลว่าการกำจัดความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรต์ได้เพียง 0.46 มก.-แอมโมเนีย/ล. และ 0.14 มก.-ไนไตรต์/ล. ตามลำดับ ซึ่งผลในส่วนของกลุ่มแบคทีเรียที่พบในการใช้สัดส่วนคาร์บอนที่ 5:1 จะพบแบคทีเรียสกุล *Vibrio* ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มก่อโรคติดต่อในกุ้งขาวเช่นเดียวกับชุดควบคุมแต่ในสัดส่วนคาร์บอนอื่นๆ พบเพียงแบคทีเรียกลุ่มที่ช่วยในการสร้างและรวมตัวตะกอนไบโอฟล็อก ซึ่งสอดคล้องกับผลของอัตราการเจริญเติบโต น้ำหนักตัวเฉลี่ย และอัตราการรอดชีวิตของกุ้งขาวของชุดควบคุม และ 5:1 ที่น้อยกว่าชุดการทดลองที่ใช้สัดส่วนคาร์บอนเท่ากับ 10:1, 15:1 และ 20:1 แต่จากผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่า การเลือกใช้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ 15:1 ให้ผลที่ดีทั้งการกำจัดความเข้มข้นของแอมโมเนีย และไนไตรต์ในระดับ 0.55 มก.-แอมโมเนีย/ล. และ 0.21 มก.-ไนไตรต์/ล. ตามลำดับ ตลอดจนย่อยสลายกลายเป็นไนเตรต และทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายเหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของกุ้งขาวภายในระบบแสดงให้เห็นจากอัตราการรอด และผลผลิตสุดท้ายที่สูงกว่าชุดการทดลองอื่น

Rajkumar และคณะ (2016) ศึกษาการผลของรูปแบบการเลี้ยงไบโอฟล็อกที่ต่างกันต่อคุณภาพน้ำ องค์ประกอบไบโอฟล็อกและประสิทธิภาพในการเจริญเติบโตของกุ้งขาว โดยทำการทดลองเปรียบเทียบผลของตะกอนไบโอฟล็อกจากสารอินทรีย์คาร์บอนที่แตกต่างกัน 3 แหล่งคือ กากน้ำตาล แป้งมันสำปะหลัง และแป้งสาลี โดยทำการทดลองในระบบปิดด้วยถังไฟเบอร์กลาส (FRP) ขนาด 500 ล. ที่บรรจุน้ำที่ปรับค่าความเค็ม 25 ก./ล. ทั้งหมด 350 ล. ซึ่งภายในทำการเลี้ยง

กึ่งร่วมกับตะกอนไบโอฟล็อกของแต่ละแหล่งคาร์บอนโดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำเป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่าการใช้แ่งสาลีเป็นแหล่งอินทรีย์คาร์บอนส่งผลให้น้ำมีค่าออกซิเจนละลายที่สูงกว่าชุดการทดลองอื่น และบำบัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำจนความเข้มข้นสุดท้ายของแอมโมเนียไนไตรต์และไนเตรตน้อยในระดับ 0.24 มก.แอมโมเนีย/ล. 0.61 มก.-ไนไตรต์/ล. และ 2.09 มก.-ไนเตรต/ล. ตามลำดับและมีการสะสมของของแข็งละลายน้ำน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การใช้แ่งมันสำปะหลังที่ผลใกล้เคียงกัน ซึ่งระบบที่ได้รับแหล่งคาร์บอนจากแ่งสาลีพบว่าอัตราการเจริญเติบโตของกึ่งในระบบเท่ากับ 0.09 ก./วัน และมีอัตราการรอดชีวิตสูงถึงร้อยละ 90.3 เนื่องจากการใช้แ่งสาลีเป็นแหล่งคาร์บอนนอกจากทำให้คุณภาพน้ำดีเหมาะสำหรับใช้เพาะเลี้ยงแล้ว แ่งสาลียังย่อยสลายได้ง่ายทำให้จุลินทรีย์ในระบบสามารถดูดซึมแล้วเกิดการรวมตัวเป็นตะกอนไบโอฟล็อกได้อย่างรวดเร็วซึ่งตะกอนที่หลงเหลือภายในระบบหลังจากการกำจัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนสามารถใช้ทดแทนอาหารเลี้ยงกึ่งได้ทำให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรต์ที่เกิดจากสารอาหารตกค้างในระบบลดลง

Schweitzer และคณะ (2013) ศึกษาผลของระดับความเข้มข้นไบโอฟล็อกต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ คุณภาพน้ำ และคุณภาพของกึ่งขาวในระบบที่ไม่มีการแลกเปลี่ยนน้ำ ทำการทดลองในถังขนาด 850 ล. ที่ภายในบรรจุกึ่งขาวความหนาแน่นเท่ากับ 459 ตัว/ลบ.ม. และแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 3 ชุดตามระดับความเข้มข้นตะกอนไบโอฟล็อกคือ 200, 400-6000 และ 800-1,000 มก./ล. ที่ถูกควบคุมตะกอนโดยถังตกตะกอน ทำการวิเคราะห์กิจกรรมของแบคทีเรียปริมาณของตะกอนไบโอฟล็อกและคุณภาพของกึ่งขาว พบว่าที่ความเข้มข้นไบโอฟล็อก 400-600 มก./ล. เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงกึ่งขาวเนื่องจากกึ่งขาวสามารถใช้ไบโอฟล็อกเพื่อสร้างปัจจัยที่มีประโยชน์ต่อผลผลิตตัวกึ่ง และมีความเสถียรของจุลินทรีย์ที่มีส่วนช่วยในกระบวนการไนตริฟิเคชัน ช่วยควบคุมปริมาณแอมโมเนียและไนไตรต์ดีกว่าถึงแม้จะน้อยกว่าชุดการทดลองที่ความเข้มข้นของไบโอฟล็อกเท่ากับ 800-1,000 มก./ล. โดยความเข้มข้นตะกอนสูงจะส่งผลเสียต่อคุณภาพน้ำที่ตามมาได้ เนื่องจากจะทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดต่ำลง เป็นผลต่อเนื่องทำให้อัตราการรอดของกึ่งลดต่ำลงตาม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระดับตะกอนไบโอฟล็อกที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงกึ่งขาวและเกิดความเสถียรมากที่สุดอยู่ระหว่าง 400-600 มก./ล.

Vilani และคณะ (2016) ศึกษาผลจากแหล่งและปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในการเตรียมตะกอนไบโอฟล็อกต่อคุณภาพน้ำและคุณภาพกึ่งขาว ทำการทดลองโดยบ่มตะกอนไบโอฟล็อกล่วงหน้าด้วยแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนต่างกัน 2 ชนิดคือ ราข้าวและกากน้ำตาลต่างกัน 2 ระดับคือ

25 และ 100 มก./ล. ก่อนนำตะกอนไปใช้เป็นเวลา 7 วัน ในถังขนาด 850 ล. บรรจุน้ำความเค็มที่ 35 พีพีที เลี้ยงกุ้งขาวเป็นระยะเวลา 39 วัน ระหว่างทดลองทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำ กิจกรรมของจุลินทรีย์ในระบบและคุณภาพของกุ้งขาว ผลการทดลองพบว่าการใช้รำข้าวเป็นอินทรีย์คาร์บอนในการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกให้ผลผลิตของตะกอนไบโอฟล็อกร้อยละ 22 และลดอัตราการให้อาหารสำหรับกุ้งขาวในระบบถึงร้อยละ 15 ทั้งนี้การใช้แหล่งคาร์บอนต่างกันไม่พบความแตกต่างของกิจกรรมของจุลินทรีย์ในระบบ ส่วนคุณภาพน้ำพบว่าการใช้กากน้ำตาลอาจส่งผลให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียสูง กว่าแต่ระดับไนไตรต์และไนเตรตไม่แตกต่างกัน เช่นเดียวกันค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ไม่แตกต่างกัน ส่วนผลของคุณภาพสัตว์น้ำพบว่าไบโอฟล็อกที่มาจากการใช้รำข้าวส่งผลให้อัตราการรอดชีวิตของกุ้งสูงกว่ากากน้ำตาลไม่มาก แต่จะเห็นว่าอัตราการแลกเนื้อของรำข้าวต่ำกว่า และได้ผลของชีวมวลสุดท้ายของกุ้งสูงกว่ากากน้ำตาล แสดงว่าการใช้รำข้าวในการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกเพื่อใช้ในระบบเลี้ยงกุ้งให้ผลที่ดีกว่าการใช้กากน้ำตาล

พรรณทณณ์ สิริพิลากร (2556) ศึกษาความสามารถตะกอนชีวภาพในการควบคุมความเข้มข้นของสารอนินทรีย์ไนโตรเจนและการบำบัดแอมโมเนียในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด โดยการทดลองแรกเลี้ยงปลาไนที่ความหนาแน่นเริ่มต้น 3 กก./ลบ.ม. ในถังขนาด 500 ล. ซึ่งมีการให้อาหารด้วยร้อยละ 1-3 ของน้ำหนักตัวปลาไนด้วยอาหารสำเร็จรูปที่มีโปรตีนร้อยละ 15 ในสถานะที่ไม่มี การถ่ายเทน้ำและแยกตะกอนออกจากระบบเป็นระยะเวลา 60 วัน ผลการศึกษาพบว่า การควบคุมปริมาณตะกอนชีวภาพให้อยู่ระหว่าง 200-800 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. จะสามารถควบคุมความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรต์ น้อยลงกว่า 1 มก.-ไนโตรเจน/ล. หรือเท่ากับปริมาณของเสียไนโตรเจนในช่วง 2.9-9.6 มก.ไนโตรเจน/ล. และผลการทดลองของการศึกษาสถานะที่เหมาะสมของระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ พบว่าเมื่อทำการกระตุ้นตะกอนชีวภาพเพิ่มขึ้นในสถานะที่มีความหนาแน่นของสัตว์น้ำเพิ่มขึ้นจาก 3 กก./ลบ.ม เป็น 5 และ 7 กก./ลบ.ม ทำให้ความเข้มข้นของแอมโมเนีย และไนไตรต์ในระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามแต่จะถูกกำจัดผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันต่อไปได้

สุตา คุณวงศ์ (2559) ศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกที่ทำการแยกส่วนในการควบคุมคุณภาพน้ำออกจากส่วนเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด โดยทำการแยกส่วนระหว่างระบบบำบัดแบบไบโอฟล็อกที่มีการติดตั้งหน่วยแยกตะกอนรูปแบบตะแกรงกับส่วนเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยทดลองด้วยขนาดตะแกรงแตกต่างกัน 5 ขนาด ได้แก่ 43, 76, 100, 130 และ 160 ไมโครเมตร และแปรค่าอัตราการไหลของน้ำเข้าหน่วยกรองตะกอนต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ 1,500, 3,000, 4,500 และ 6,000 ล./วัน ผลการทดลองพบว่าที่ขนาดรูกรองเท่ากับ 100 ไมโครเมตร

และอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 3,000 ล./วัน สามารถบำบัดของเสียจากส่วนเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้อย่างเหมาะสม และมีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนออกจากส่วนเพาะเลี้ยงได้สูงถึงร้อยละ 89 และพบว่าปริมาณของเสียอินทรีย์ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย และไนไตรต์ลดลงภายในสัปดาห์ที่ 5 รวดเร็วชุดการทดลองอื่น อธิบายได้ว่าที่สภาวะดังกล่าวเกิดการบำบัดผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ และตะกอนส่วนเกินที่ไม่สามารถกรองได้ไม่ส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำ และยังสามารถใช้ตะกอนดังกล่าวในการเจริญเติบโตได้

2.6.3 ความสัมพันธ์ของขนาดและปริมาณตะกอนไบโอฟล็อกต่อประสิทธิภาพการบำบัด

Chen และคณะ (2019) ศึกษาผลของขนาดตะกอนไบโอฟล็อกต่ออัตราการกำจัดแอมโมเนียและองค์ประกอบของแบคทีเรียของไบโอฟล็อก โดยใช้ตัวอย่างตะกอนไบโอฟล็อกที่ผ่านการกระตุ้นด้วยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของน้ำตาลกลูโคสร่วมกับการเติมอาหารสัตว์น้ำรูปแบบบดละเอียดเป็นแหล่งไนโตรเจนเป็นเวลา 50 วันก่อนทำการทดลอง และนำตะกอนไบโอฟล็อกไปทดลองในถังปฏิกรณ์ SGRs เพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลา 12 ชั่วโมงในระบบที่แตกต่างกัน 3 การทดลองคือ (1) ระบบที่ไม่มีตะแกรงกรองของเสีย (2) ระบบที่มีตะแกรงกรองขนาดเล็กกว่า 50 ไมโครเมตร และ (3) ระบบที่มีตะแกรงกรองขนาดใหญ่กว่า 50 ไมโครเมตร พบว่าทั้ง 3 การทดลองการมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียทั้งหมดไม่มีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในสภาวะที่มีการเติมอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมซึ่งเท่ากับ 2.44, 2.49 และ 2.41 มก.-ไนโตรเจน/ก.-ของแข็งละลาย/ชั่วโมง ตามลำดับ และสอดคล้องกับกลุ่มแบคทีเรียที่พบคือ กลุ่ม *Proteobacteria Firmicutes* และ *Chloroflexi* ซึ่งเป็นกลุ่มแบคทีเรียที่ช่วยการรวมตัวของตะกอนไบโอฟล็อก ผู้วิจัยจึงสรุปว่าขนาดของตะกอนไม่ส่งผลต่ออัตราการบำบัดแอมโมเนียที่เกิดขึ้นแต่อาจส่งผลต่อแบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟที่สนับสนุนการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน

Gaona และคณะ (2011) ศึกษาผลของปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดต่อการเจริญเติบโตของกุ้งขาวที่เลี้ยงในระบบไบโอฟล็อก โดยทำการทดลองเลี้ยงกุ้งขาวในระบบไบโอฟล็อกในถังปริมาตร 200 ล. ที่ภายในบรรจุแข็งแขวนลอยแตกต่างกัน 5 ระดับความเข้มข้นคือ 250, 500, 1,000, 2,000 และ 4,000 มก./ล. ขณะทดลองจะมีการให้อาหารกุ้งและควบคุมพารามิเตอร์ทางกายภาพและเคมีของน้ำ โดยตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ตลอดระยะเวลาการทดลอง และวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอยทุกๆ 2 วันรวมไปถึงการเจริญเติบโตของกุ้งขาวแต่ละชุดการทดลอง ผลการทดลองพบว่าผลของคุณภาพน้ำของแต่ละชุดการทดลองไม่แตกต่างกัน แต่ที่ความเข้มข้นของแข็ง

แขวนลอยที่ต่ำ (250 มก./ล.) จะพบค่าแอมโมเนียและไนไตรต์สูงกว่าชุดการทดลองอื่น มีค่าเท่ากับ 0.33 และ 3.55 มก./ล. ซึ่งเป็นปริมาณไนเตรตที่ไม่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ขณะที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรต์สูงจะเกิดการสะสมของปริมาณไนเตรตที่สูงเช่นเดียวกัน สอดคล้องกับผลของอัตราการรอดชีวิตของกุ้งที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรต์สูงจะมีอัตราการรอดต่ำกว่าที่ระดับความเข้มข้นต่ำ จึงสรุปได้ว่าที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียไม่เกิน 500 มก./ล. ให้ผลการบำบัดสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนทั้งแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตอยู่ระดับที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงกุ้งขาว (0.18, 0.22 และ 55.4 มก./ล. ตามลำดับ) และพบว่าอัตราการรอดชีวิตของกุ้งขาวสูงถึงร้อยละ 92

Souza และคณะ (2019) ศึกษาหาความสัมพันธ์ขนาดของตะกอนไบโอฟล็อกต่อกระบวนการไนตริฟิเคชันด้วยการเพาะเลี้ยงระบบบำบัดไบโอฟล็อกอย่างไร โดยการศึกษาเป็นการนำความรู้จากงานวิจัยเรื่องขนาดอนุภาคตะกอนที่สามารถส่งผลต่อกระบวนการไนตริฟิเคชันในการกำจัดแอมโมเนียและไนเตรตในระบบไบโอฟล็อก โดยทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลของขนาดตะกอนที่แตกต่างกันต่อการเกิดกระบวนการบำบัดด้วยไนตริฟิเคชันในบ่อเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 10 วัน ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลองด้วยการใช้ตะแกรงกรองเพื่อคัดแยกขนาดตะกอนแต่ละการทดลองดังนี้ (1) ตะกอนขนาด 50, 150, 300 ไมโครเมตร และชุดควบคุมไม่มีการกรองตะกอน (2) ตะกอนขนาด 300 และ 600 ไมโครเมตร และชุดควบคุมไม่มีการกรองตะกอน และ (3) 150 ไมโครเมตร ตะแกรงกรองตะกอนบางส่วนและชุดควบคุมไม่มีการกรองตะกอน พบว่าขนาดตะกอนส่งผลต่ออัตราการบำบัดแอมโมเนียและไนไตรต์ผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน เนื่องจากขนาดตะกอนที่เล็กกว่าจะทำให้กระบวนการไนตริฟิเคชันเกิดได้ช้า และการรวมตัวของแบคทีเรียไฟอิงแตกต่างกันและตะกอนขนาดเล็กอาจเกิดการแตก และแยกส่วน หรือรวมตัวได้ยากกว่าตะกอนขนาดใหญ่ ถึงแม้ว่าอัตราการรอดของกุ้งในระบบไม่มีความแตกต่างกันแต่จะเห็นได้ว่าน้ำหนักสุดท้ายของกุ้งที่ใช้ตะกอนไบโอฟล็อกขนาดใหญ่ (300 และ 600 ไมโครเมตร) อยู่ในช่วง 9-10 ก. ซึ่งมากกว่าการใช้ตะกอนขนาดเล็กอย่างชัดเจน อาจกล่าวได้ว่าการกรองขนาดตะกอนส่งผลต่อการรวมตัวของไบโอฟล็อกซึ่งเป็นการรบกวนการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่ลดลง และขัดขวางการถ่ายเทออกซิเจนในระบบทำให้จุลินทรีย์สร้างไบโอฟล็อกหยุดการทำงานได้

2.6.4 ประสิทธิภาพของระบบการเติมอากาศ

Jamnongwong และคณะ (2016) ศึกษากลไกของระบบเติมอากาศแบบสร้างฟิล์มของเหลว (Liquid film forming apparatus; LFFA) ต่อการถ่ายเทออกซิเจนและอุทกพลศาสตร์ของ ฟองอากาศที่เกิดขึ้น จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปกลไกของ LFFA ได้ว่าลักษณะของระบบเติมอากาศ เป็นทรงกรวยตัวยอดคว่ำที่มีการให้อากาศผ่านหัวกระจายอากาศ เมื่อวางไว้บริเวณผิวน้ำฟองอากาศ จะออกจากหัวกระจายลอยขึ้นเหนือน้ำและเมื่อลอยขึ้นถึงบริเวณสร้างฟิล์มของเหลวหรือส่วนปลาย ของ LFFA ที่ลักษณะเป็นปลายตัด ฟองอากาศจะเกิดการรวมตัวกันและผลักดันให้น้ำพุ่งออกไป บริเวณปลายอีกด้านที่อยู่ใต้น้ำพร้อมกับฟองอากาศ ทำให้เกิดฟิล์มของเหลวบริเวณผิวน้ำ ซึ่งกลไกที่เกิดขึ้นจากระบบเติมอากาศนี้ไม่ต้องการพลังงานเพิ่ม มีพื้นที่การถ่ายเทออกซิเจนบริเวณผิวน้ำดีกว่า การเติมอากาศแบบหัวทรายซึ่งจะเหมาะสำหรับการเติมอากาศบริเวณผิวน้ำได้มากขึ้น

Harun และคณะ (2019) ศึกษาผลของหน่วยเติมอากาศ ชนิดของไนโตรเจนที่ต่างกัน และ หัวเชื้อในการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกเพื่อการปรับปรุงผลผลิตจากการเลี้ยงกุ้งขาว โดยทำการเลี้ยง ตะกอนไบโอฟล็อกที่เติมสารอินทรีย์คาร์บอนในอัตราส่วน 15:1 ร่วมกับกุ้งขาวระยะตัวอ่อนจำนวน 100 ตัวในถังกลมขนาด 250 ล. ภายในบรรจุน้ำที่ปรับความเค็มและปริมาตรเท่ากับ 200 ล. แบ่งการ ทดลองออกเป็น 3 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลของการใช้อาหารกุ้งที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบคือ แบบผง (Powdered fish meal) แบบเม็ดบดละเอียด (Grounded pellet fish meal) และแบบ เม็ด (Pellet fish meal) ควบคู่กับการเติมอากาศที่แตกต่างกัน 2 แบบคือ รูปแบบหัวทรายและท่อ เติมอากาศ กับชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมอาหารและเติมอากาศ ผลการทดลองพบว่า การใช้อาหาร รูปแบบอาหารเม็ดรวมกับการเติมอากาศทั้ง 2 แบบทำให้การรวมตัวของตะกอนไบโอฟล็อกมากกว่า อาหารรูปแบบอื่น เนื่องจากอาหารแบบเม็ดเป็นรูปแบบที่มีเสถียรของสารอาหาร ดูดซึมน้ำได้ดี ทำให้เกิดการย่อยสลายช้าทำให้กุ้งสามารถใช้เวลาบริโภคมากขึ้นส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโตและ การรอดชีวิตกุ้งมากขึ้นตาม นอกจากนี้การให้อากาศผ่านเครื่องเติมอากาศทั้ง 2 รูปแบบมีส่วน สนับสนุนในกระบวนการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกเนื่องจากสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก และมีการ หมุนเวียนของน้ำและอากาศที่ดีทำให้ตะกอนไบโอฟล็อกรวมตัวและเกาะกันแน่นพร้อมจะตกตะกอน และบางส่วนสามารถนำไปเป็นอาหารทดแทนของกุ้งภายในระบบได้ ตามผลการทดลองการเติม อากาศแบบท่อจ่ายอากาศรวม หรือ หัวทรายร่วมกับอาหารเม็ดทำให้ความเข้มข้นของไนโตรเจนเพิ่ม สูงขึ้นแสดงให้เห็นถึงเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่ดี แต่ข้อเสียที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวของตะกอน ไบโอฟล็อกไว และมากเกินไปในระยะยาวอาจขัดขวางการหายใจของกุ้งได้ ดังนั้นในการเลือกใช้เครื่อง

เติมอากาศและแหล่งไนโตรเจนส่งผลต่อการปริมาณตะกอนไบโอฟล็อก คุณภาพน้ำเลี้ยงและการดำรงชีวิตของกุ้งในระบบ

Lara และคณะ (2017) ศึกษาการใช้รูปแบบเครื่องเติมอากาศที่แตกต่างกันในการเลี้ยงกุ้งด้วยระบบไบโอฟล็อกต่อผลของคุณภาพน้ำ การเจริญเติบโตของกุ้งและลักษณะองค์ประกอบของตะกอนไบโอฟล็อก โดยทำการทดลองในถังสี่เหลี่ยมขนาด 35 ตร.ม. บรรจุน้ำที่ค่าความเค็มเท่ากับ 10 พีพีที ด้วยระดับความสูงน้ำเท่ากับ 1 ม. และทำการเพาะเลี้ยงกุ้งในระบบที่มีความหนาแน่นกุ้ง 140 ตัว/ตร.ม. ซึ่งทดสอบด้วยการติดตั้งเครื่องเติมอากาศที่แตกต่างกัน 3 แบบคือ เครื่องเติมอากาศแบบใบพัดหมุน (Propeller aspiration pump) เครื่องเติมอากาศแบบแนวตั้ง (Vertical pump aerator) และเครื่องเติมอากาศแบบพ่นอากาศ (Diffusion air blow) ในการทดลองจะเติมอากาศด้วยกำลัง $\frac{1}{2}$ แรงม้าของเครื่องเติมอากาศของการทดลอง พบว่าคุณภาพโดยรวมของการเติมอากาศแบบพ่นอากาศดีกว่ารูปแบบอื่นเนื่องจากความเข้มข้นของแอมโมเนียสุดท้ายน้อยกว่ารูปแบบอื่น รวมไปถึงความเข้มข้นของไนไตรต์ และไนเตรตที่เพิ่มสูงแตกต่างอย่างชัดเจนซึ่งหมายถึงภายในระบบเพาะเลี้ยงเกิดกระบวนการไนริฟิเคชันดีซึ่งสอดคล้องกับผลของของแข็งแขวนลอย และค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ที่มีค่าสูงแสดงถึงการรวมตัวของตะกอนไบโอฟล็อกได้มากกว่าการเติมอากาศรูปแบบอื่น ถึงแม้กลุ่มจุลินทรีย์และแบคทีเรียที่พบในแต่ละรูปแบบการเติมอากาศจะมีความแตกต่างกัน แต่การเติมอากาศแบบการพ่นอากาศเพียงช่วง 2-3 วันแรกของการทดลองพบโรติเฟอร์เป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่ใช้เป็นดัชนีชี้วัดถึงคุณภาพน้ำที่ดี นอกจากนี้ผลของอัตราการเจริญเติบโต และอัตราการอยู่รอดของกุ้งมีมากกว่าเป็นผลทำให้ได้ผลผลิตมากกว่าการใช้รูปแบบการเติมอากาศอื่น

Lim และคณะ (2021) ศึกษาผลของการเติมอากาศด้วยฟองอากาศขนาดเล็กต่อคุณภาพน้ำและการเจริญเติบโตของกุ้งขาวในระบบบำบัดแบบไบโอฟล็อก เพื่อศึกษาผลของการเติมอากาศด้วยฟองอากาศขนาดเล็กต่อการรวมตัวของตะกอนไบโอฟล็อก คุณภาพน้ำ และการเจริญเติบโตของกุ้งขาว ทำการทดลองเปรียบเทียบรูปแบบเติมอากาศที่ให้ขนาดฟองอากาศต่างกัน 3 รูปแบบได้แก่ ฟองอากาศขนาดเล็ก ฟองอากาศขนาดใหญ่ และแบบผสมผสานระหว่างฟองอากาศขนาดเล็กและใหญ่ เติบระบบเพาะเลี้ยงกุ้งขาวที่ผนวกกับระบบไบโอฟล็อกในถังขนาด 5 ลบ.ม. เป็นระยะเวลา 70 วันผลการทดลองพบว่า การเติมอากาศที่ให้ขนาดฟองอากาศเล็กส่งผลดีต่อคุณภาพน้ำ และการเจริญเติบโตทั้งจุลินทรีย์และกุ้งขาวในระบบ โดยช่วยเพิ่มค่าออกซิเจนละลายในน้ำ ช่วยให้การรวมตัวของตะกอนไบโอฟล็อกและการเกิดกระบวนการไนริฟิเคชันเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนเตรตได้รวดเร็วขึ้น นั่นคือปริมาณสารอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เป็นพิษในระบบลดลง ส่วนผลต่อการเจริญเติบโตของกุ้งพบว่า

น้ำหนักและความยาวเฉลี่ยเพิ่มขึ้น และมีอัตราการแลกเปลี่ยนที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเติมอากาศด้วยฟองอากาศขนาดใหญ่

De Morais และคณะ (2020) ศึกษาผลของความเข้มข้นในการเติมอากาศต่อกระบวนการไนตริฟิเคชันในระบบไบโอฟิล์มผนวกกับการเพาะเลี้ยงกุ้งด้วยระบบไบโอฟล็อก โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ช่วงคือ (1) ศึกษากระบวนการเติมอากาศที่ให้อัตราการไหลของน้ำต่างกับไบโอฟิล์มในระบบน้ำใสเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของแบคทีเรียไนตริไฟอิงต่อการบำบัดแอมโมเนีย และไนไตรต์ซึ่งแบ่งเป็น 4 ชุดการทดลองได้แก่ ชุดการทดลองที่ไม่มีการให้อากาศ และชุดการทดลองที่เติมอากาศด้วยอัตราการไหลของอากาศแตกต่างกัน 3 ระดับเท่ากับ 7.5, 33.75 และ 75 ล./นาที่ พบว่าการเติมอากาศที่ให้อัตราการไหลเท่ากับ 33.75 ล./นาที่ ในระบบไบโอฟิล์ม มีการบำบัดแอมโมเนียและไนไตรต์ได้ดี และทำให้คุณภาพน้ำเลี้ยงเหมาะสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และ (2) ศึกษาการเพาะเลี้ยงกุ้งในระบบไบโอฟล็อกและไบโอฟิล์มซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลองได้แก่ การใช้ไบโอฟล็อกและเติมอากาศด้วยอัตราการไหลของอากาศที่ 20 ล./น. การใช้ไบโอฟล็อกร่วมกับไบโอฟิล์มและเติมอากาศด้วยอัตราการไหลของอากาศที่ 33.75 ล./น. และการใช้ไบโอฟิล์มในระบบน้ำใสและเติมอากาศด้วยอัตราการไหลของอากาศที่ 33.75 ล./น. พบว่าผลของการใช้ไบโอฟล็อกร่วมกับไบโอฟิล์มทำให้ค่าของแอมโมเนียและไนไตรต์สุดท้ายเท่ากับ 0.51 1.13 มก.-แอมโมเนีย/ล. และ 1.13 มก.-ไนไตรต์/ล. ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าชุดการทดลองอื่น และที่การสะสมของไนไตรต์ใกล้เคียงกับการใช้ไบโอฟิล์มในระบบน้ำใส เช่นเดียวกับค่าของแอมโมเนียลอยเท่ากับ 346.30 มก.-ของแอมโมเนียลอย/ล. แสดงถึงการใช้ไบโอฟล็อกร่วมกับไบโอฟิล์มมีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียและไนไตรต์ใกล้เคียงกับระบบที่ใช้ไบโอฟิล์มในน้ำใส และผลดังกล่าวสอดคล้องกับอัตราการรอดชีวิตของกุ้งที่สูงกว่าการใช้เพียงระบบไบโอฟล็อกเพียงอย่างเดียว สามารถสรุปได้ว่าการเลือกรูปแบบเพาะเลี้ยงกุ้งมีผลต่ออัตราการรอดชีวิตและให้ผลผลิตที่ได้ การเลือกใช้ไบโอฟล็อกร่วมกับไบโอฟิล์มถือเป็นตัวเลือกหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียและไนไตรต์ได้ใกล้เคียงกับการใช้ไบโอฟิล์มในระบบน้ำใสซึ่งจัดการระบบยากกว่า นอกจากนี้สามารถใช้สารตั้งต้นจากระบบไบโอฟล็อกในการคงสภาพไบโอฟิล์มควบคู่กันได้ทั้งยังลดต้นทุนในการเดินระบบ เป็นประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมและได้ผลผลิตที่มีคุณภาพ

Ozkan และคณะ (2006) ศึกษากระบวนการเติมอากาศแบบเวนจูรีสำหรับการเติมอากาศและของเหลว ซึ่งอธิบายถึงอัตราการเติมอากาศและของเหลวผ่านเวนจูรี รวมไปถึงผลกระทบจากเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นท่อ และการกำหนดอัตราส่วนของท่อเวนจูรี การทดลองจะทำการแปรค่าเส้นผ่าน

ศูนย์กลางของท่อขาเข้าและขาออกของท่อเวนจูรี 3 ขนาดคือ 36, 42 และ 54 มม. อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณคอคอดต่อท่อขาเข้าของเวนจูรีที่ 0.5 และ 0.75 และกำหนดขนาดของมุมของท่อที่บรรจบกัน และมุมของท่อที่แยกออกจากกันเท่ากับ 21 และ 7 องศาตามลำดับ ทำการวิเคราะห์ห้อัตราการเติมอากาศ และประสิทธิภาพการเติมอากาศ พบว่าน้ำและอากาศที่ผ่านบริเวณคอคอดเป็นบริเวณที่มีความดันสูงทำให้เกิดการผสมกันระหว่างน้ำและอากาศจากภายนอกจนเกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟองอากาศขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำ และเกิดการแพร่ไปยังผิวน้ำได้มากกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ ดังนั้นการเติมอากาศด้วยเวนจูรีจะมีค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศที่สูงในขณะที่มีอัตราการไหลของน้ำคงที่ นอกจากนี้แล้วระบบเวนจูรีไม่จำเป็นต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก และมีอายุการใช้งานที่นานเนื่องจากระบบนี้ใช้หลักการสุญญากาศมากกว่าการใช้ความดันจึงลดโอกาสถูกกัดกร่อนจากสารเคมี

นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์ (2553) ได้ทำการวิเคราะห์ห้อุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นในกระบวนการเติมอากาศโดยทำการศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารของอุปกรณ์เติมอากาศ และศึกษาผลกระทบจากสภาวะต่างๆ ต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศ การอุดตันและการทำความสะอาดที่ลักษณะของท่ออย่าง และขนาดต่างกันพบว่าขนาดของท่อ และความหนานของท่อมีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูง และมีค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่มากขึ้น แสดงถึงการมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงตาม หรือคือเครื่องเติมอากาศที่มีขนาดท่อที่เหมาะสมจะใช้พลังงานที่น้อยต่อการเติมอากาศ และมีประสิทธิภาพของการให้ออกซิเจนที่สูง ในขณะเดียวกันต้องพิจารณาปัจจัยด้านขนาดฟองอากาศ เนื่องจากถ้ามีอัตราการไหลของน้ำที่สูงจะทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมาก และมีขนาดใหญ่ซึ่งอาจทำให้ออกซิเจนสัมผัสกับน้ำได้น้อยลง เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนลดลง และจากผลการศึกษาจากการทดลองพบว่า น้ำที่มีการปนเปื้อนด้วยของแข็งแขวนลอยตั้งแต่ 50-200 มก./ล. ซึ่งมากกว่าค่ามาตรฐานสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำนั้น ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศ และปัญหาจากการอุดตันของอุปกรณ์เติมอากาศ แต่อาจส่งผลกระทบต่อสภาวะการทำงานของอุปกรณ์การเติมอากาศหลักได้ เมื่อมีปริมาณของของแข็งแขวนลอยรวมตัวเซลล์จุลชีพที่มากเกินไป อาจส่งผลให้เกิดการอุดตันได้เมื่อหยุดการเติมอากาศนานเกิน 3 วัน นอกจากนี้จุลชีพยังแรงดึงดูดของน้ำลดลง สัมพันธ์กับรูปร่าง ขนาดและการรวมตัวของฟองอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านตัวกลางลดถึงแม้ฟองอากาศจะมีขนาดเล็ก

รัชกาล พันธิวิศิษฐ์ (2559) ศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรีที่ขนาดต่างกันและการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟิล์มเหลว ซึ่งพิจารณาประสิทธิภาพการเติมอากาศของอุปกรณ์เวนจูรีซึ่งวิเคราะห์จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และนำไปคำนวณหาค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง และศึกษาปัจจัยทางด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศที่เกิดจากอุปกรณ์เวนจูรีพร้อมทั้งเปรียบเทียบอุปกรณ์เติมอากาศเวนจูรีเทียบกับรูปแบบอื่น พบว่าการเลือกใช้อุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้วให้ประสิทธิภาพการเติมอากาศสูงสุด เนื่องจากมีค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ และค่าประสิทธิภาพการถ่ายออกซิเจนที่มากกว่าขนาดอื่น นอกจากนี้การเลือกเครื่องสูบน้ำที่เหมาะสมจะส่งผลดีกับอัตราการไหล และแรงดันที่เกิดจากอุปกรณ์เวนจูรี และจะสัมพันธ์กับการเลือกอุปกรณ์เวนจูรีที่มีหน้าตัดน้ำเข้าขนาดเล็กจะให้ฟองอากาศขนาดเล็ก และสม่ำเสมอเมื่อมีอัตราการไหลที่เหมาะสมกัน และเมื่อเปรียบประสิทธิภาพการเติมอากาศกับการเติมอากาศอื่นคือ หัวทราย และท่อยาง พบว่าท่อยางมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระดับพลังงานไฟฟ้า และความลึกเท่ากันกับเวนจูรีถึงแม้จะให้ขนาดฟองอากาศที่ไม่แตกต่างกันแต่ด้วยลักษณะการติดตั้งของท่อยางที่ติดตั้งได้ครอบคลุมพื้นที่ในระบบได้ดีกว่า แต่ทั้งนี้การประเมินประสิทธิภาพการใช้งานขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่นำไปใช้

2.7 สรุปประเด็นสำคัญจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. เทคโนโลยีไบโอฟิล็อกสามารถบำบัดแอมโมเนียในระหว่างการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบปิดที่มีความหนาแน่นสูง โดยอาศัยความสามารถของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟที่มีเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในการดูดซึมแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ในช่วงแรกของการเดินระบบ และแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟที่มีการเจริญโตค่อนข้างช้าในการบำบัดแอมโมเนียในเวลาต่อมา โดยทำการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของไนไตรต์และไนเตรตซึ่งมีความเป็นนํ้ายลงผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันภายใต้สภาวะที่มีการเติมอากาศอย่างเพียงพอในระบบ

2. การทำงานของแบคทีเรีย 2 กลุ่มจะแตกต่างกัน โดยแบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟต้องอาศัยการกระตุ้นการเจริญเติบโตด้วยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในช่วง 10–15 ต่อ 1 (Panigrahi และคณะ, 2018) โดยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในช่วง 4 สัปดาห์แรกของการเดินระบบมีส่วนช่วยให้แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว และสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนียที่เกิดขึ้นผ่านกระบวนการดูดซึมเข้าสู่เซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่หลังจากสัปดาห์ที่ 5 ของการเดินระบบ ไม่มีความจำเป็นต้องเติมสารอินทรีย์คาร์บอน เนื่องจากไนตริไฟอิงแบคทีเรียซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟที่มีการเจริญเติบโตที่ช้ากว่า

สามารถเพิ่มจำนวนได้อย่างเพียงพอและมีส่วนช่วยในการควบคุมแอมโมเนียโดยเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของไนไตรต์และไนเตรตผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ (Nootong และคณะ, 2011) ทั้งนี้การบ่มตะกอนไบโอฟล็อกก่อนนำไปใช้ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ผนวกกับระบบบำบัดแบบไบโอฟล็อกสามารถลดระยะเวลา และปริมาณสารอินทรีย์ที่เติมเพื่อกระตุ้นตะกอนไบโอฟล็อก เนื่องจากการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกล่วงหน้าก่อนการใช้งานจะทำให้ได้ตะกอนที่มีความเสถียรของแบคทีเรียซึ่งพร้อมกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน (Vilani และคณะ, 2016)

3. ปริมาณตะกอนชีวภาพในระบบไบโอฟล็อกส่งผลต่อการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจน ซึ่งทั่วไปจะต้องควบคุมปริมาณตะกอนให้อยู่ในช่วง 200-800 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. จะสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนียและไนไตรต์ในระบบให้มีค่าต่ำกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. (พรรณทรรณ สิริพิลากร, 2556) อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณตะกอนมีสูงกว่า 850 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. จะส่งผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำนั่นคือ ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนลดลง ขัดขวางการทำงานของระบบต่าง ๆ ในร่างกายสัตว์น้ำ โดยส่งผลให้มีอัตราการเจริญเติบโตลดลงและมีการตายเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ในระบบที่มีปริมาณตะกอนแขวนลอยสูง จะส่งผลให้อัตราการใช้ออกซิเจนในระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องเติมอากาศให้ระดับออกซิเจนละลายเหมาะสมกับระบบไบโอฟล็อกทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและค่าใช้จ่ายมากขึ้น ดังนั้นควรควบคุมความเข้มข้นของไบโอฟล็อกที่เกิดในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ให้เกิน 500 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. (Avnimelech, 1999; Rajkumar และคณะ, 2016)

4. การเติมอากาศในระบบไบโอฟล็อกสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนในระบบ โดยรูปแบบการเติมอากาศที่ให้ฟองอากาศขนาดเล็กจะส่งผลดีต่อกิจกรรมของแบคทีเรียในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต รวมถึงส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตและอัตราการรอดของสัตว์น้ำเพิ่มขึ้น (Lara และคณะ, 2017; Ozkan และคณะ, 2006) นอกจากนี้รูปแบบการเติมอากาศที่ให้ฟองอากาศขนาดเล็กพบว่าการรวมตัวของไบโอฟล็อกที่ดีกว่ารูปแบบการเติมอากาศที่ให้ขนาดฟองใหญ่ (Harun และคณะ, 2019) ดังนั้นควรพิจารณารูปแบบการเติมให้เหมาะสมกับระบบเพาะเลี้ยงที่ให้ขนาดของฟองอากาศและความถี่ในการเกิดฟองให้สัมพันธ์กับประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศ และประเมินผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากรูปแบบการเติมอากาศที่เลือกใช้ (นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์, 2553)

5. การเพาะเลี้ยงกุ้งขาวในระบบไบโอฟลอคเพื่อให้ได้ผลผลิตสุดท้ายสูงสุด จำเป็นอย่างยิ่งต้องควบคุมพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ เนื่องจากกุ้งขาวตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย กุ้งขาวสามารถอาศัยอยู่ในน้ำที่มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 11-30 °ซ แต่อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกุ้งขาวคือ 26 °ซ กรณีอุณหภูมิที่ต่ำหรือสูงเกินไปจะทำให้ยีนที่ควบคุมกิจกรรมต่างๆ ของกุ้งประสิทธิภาพด้อยลง (Araneda และคณะ, 2020) รวมไปถึงควรควบคุมระดับความเค็มในช่วงอนุบาลกุ้งและระหว่างการเพาะเลี้ยงให้เท่ากัน เพื่อป้องกันกุ้งไม่ให้เกิดอาการเนือคน้ำ ถึงแม้กุ้งขาวจะสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงความเค็มในช่วงกว้างตั้งแต่ความเค็ม 1 จนถึงระดับที่มากกว่า 30 พีพีที (Jaffer และคณะ, 2020; Maicá และคณะ, 2011) ก็ตาม



บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

- ถังก้นกลมปริมาตร 2 ล.
- ถังสี่เหลี่ยมปริมาตร 250 ล.
- เครื่องเติมอากาศแบบหัวทราย
- เครื่องเติมอากาศแบบแบบเวนจูรี
- แคลมป์มิเตอร์ (Clamp meter)
- มาตรวัดการไหลของอากาศ (Airflow meter)
- ท่อพีวีซีและข้อต่อ
- เครื่องชั่งน้ำหนัก
- สารอินทรีย์คาร์บอนในรูปกากน้ำตาล
- อาหารกุ้งสำเร็จรูปที่มีโปรตีนมากกว่าร้อยละ 36

3.1.2 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์น้ำ

- กระดาษกรอง (Whatman GF/C)
- เครื่องวัดค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (DO meter)
- เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter)
- เครื่องอ่านค่าบนไมโครเพลท (Microplate reader) ยี่ห้อ BioTek รุ่น PowerWave XS2
- เครื่องอบอุณหภูมิสูง (Hot air oven)
- โถดูดความชื้น (Desiccator)
- เครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer)
- เครื่องเขย่าสาร (Vortex Mixer GENIE 2)
- เครื่องสูบน้ำสุญญากาศ (Vacuum pump)
- ชุดกรองสำหรับกระบอกฉีดยา (Syringe filter holder)

- เครื่องชั่ง 2 และ 4 ตำแหน่ง
- ไมโครปิเปต
- เครื่องแก้ว เช่น หลอดทดลอง ปีกเกอร์ กระจกตวง ขวดวัดปริมาตร ขวดรูปชมพู่ ฯลฯ
- ชุดทดสอบแอมโมเนีย ไนไตรต์ และค่าความเป็นด่าง ยี่ห้อ AQUA-VBC ของ ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.3 สารเคมี

- Cobalt (II) chloride (CoCl_2)
- N-NED (N(1-Naphthyl) Ethylenediamine Dihydrochloride)
- Sodium bicarbonate (NaHCO_3)
- Sodium citrate ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$)
- Sodium hydroxide (NaOH)
- Sodium hypochlorite (NaOCl)
- Sodium nitrate (NaNO_3)
- Sodium nitrite (NaNO_2)
- Sodium nitroprusside ($\text{Na}_2(\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO})$)
- Sodium salicylate ($\text{C}_7\text{H}_5\text{NaO}_3$)
- Sodium sulfite (Na_2SO_3)
- Sulfanilamide ($\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2$)

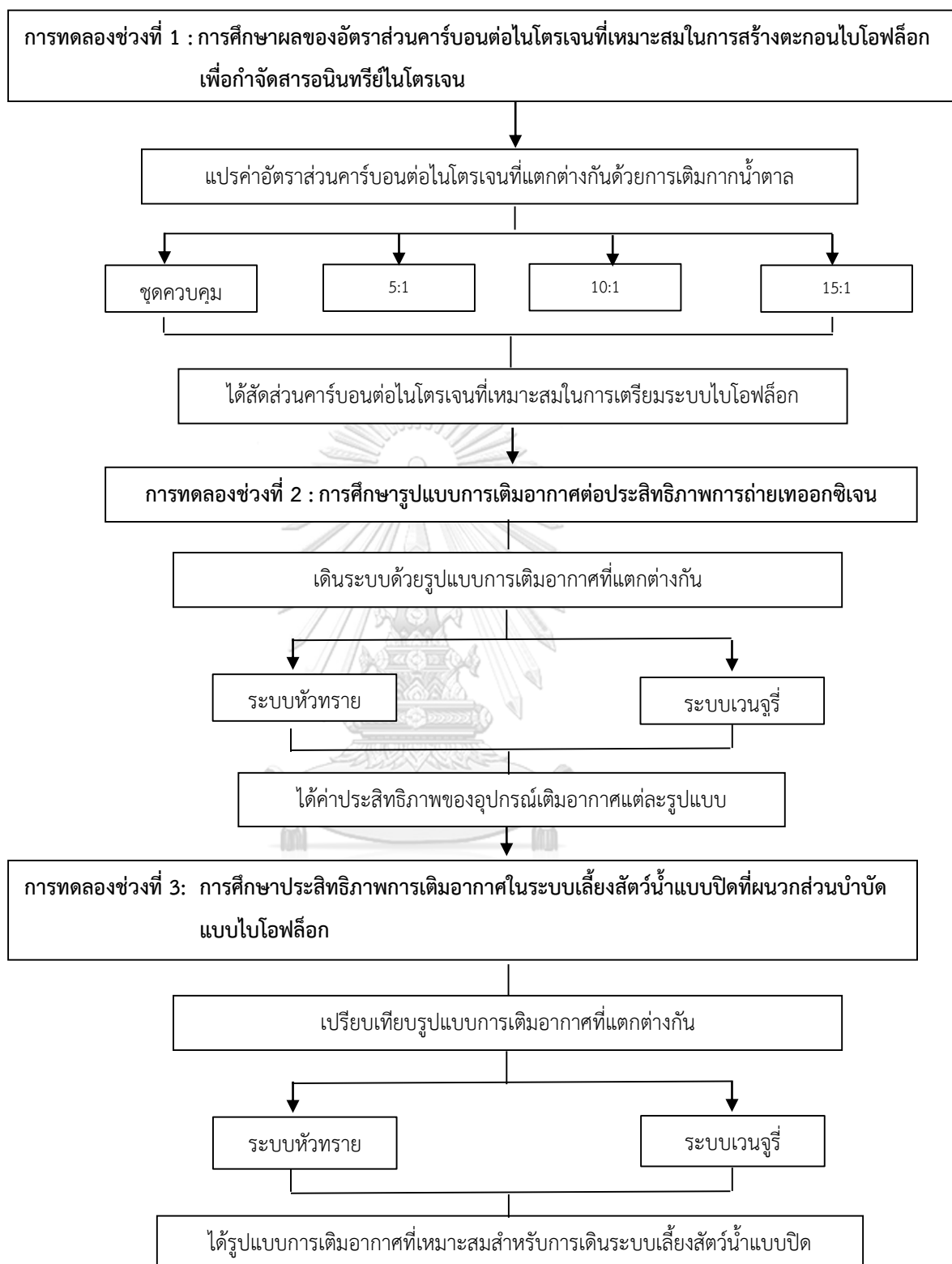
3.2 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง (รูปที่ 3.1) โดยมีรายละเอียดดังนี้

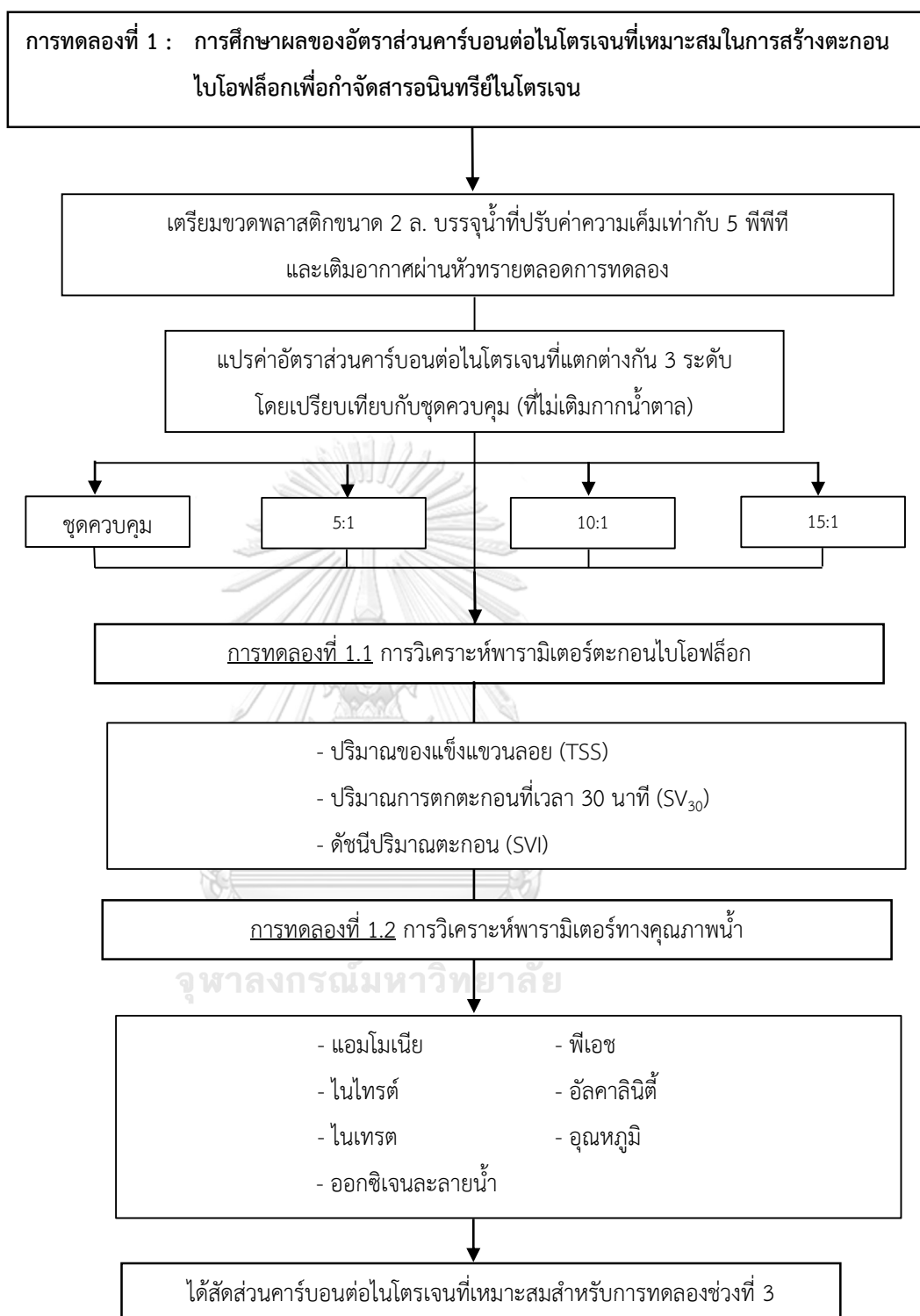
การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจน โดยเปรียบเทียบการเดินระบบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่เติมสารอินทรีย์คาร์บอนและชุดทดลองที่เติมสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปแบบกากน้ำตาล และแปรค่าสัดส่วนการเติมสารอินทรีย์แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 5:1, 10:1 และ 15:1 เพื่อให้ได้ค่าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมตะกอนไบโอฟล็อก ดังแผนผังการทดลองแสดงในรูปที่ 3.2

การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษารูปแบบการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน โดยเปรียบเทียบระหว่างการเติมอากาศ 2 รูปแบบ คือ แบบหัวทรายและแบบเวนจูรี เพื่อให้ได้รูปแบบการเติมอากาศที่เหมาะสมที่มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพการเติมอากาศสูงสุด ดังแผนผังแสดงในรูปที่ 3.3

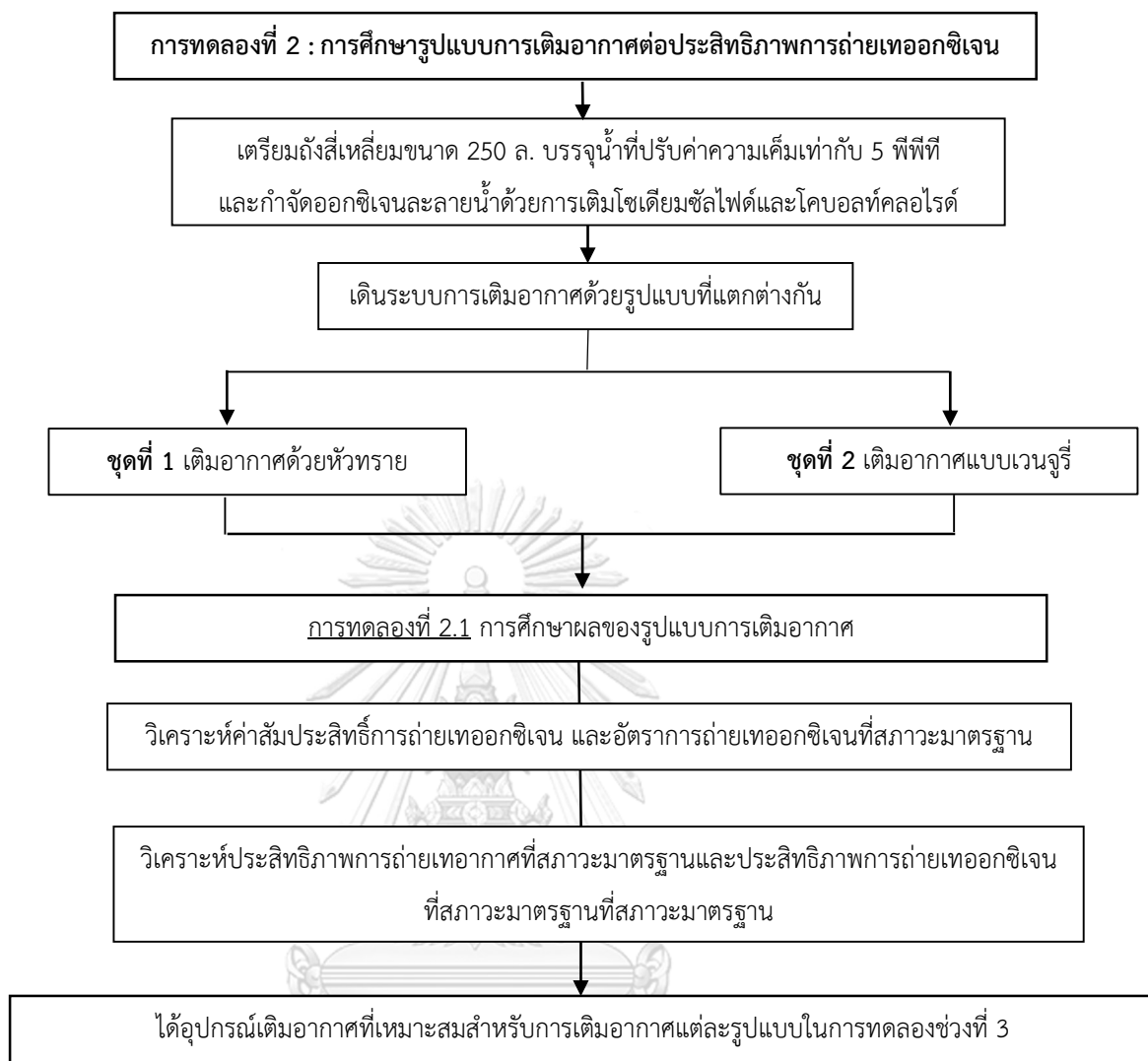
การทดลองช่วงที่ 3 การประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศแบบหัวทรายและแบบเวนจูรีในการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่ผนวกกับส่วนบำบัดแบบไบโอฟล็อก เพื่อหารูปแบบการเติมอากาศที่เหมาะสมสำหรับระบบไบโอฟล็อกเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการเดินระบบสูงสุด ดังแผนผังแสดงในรูปที่ 3.4

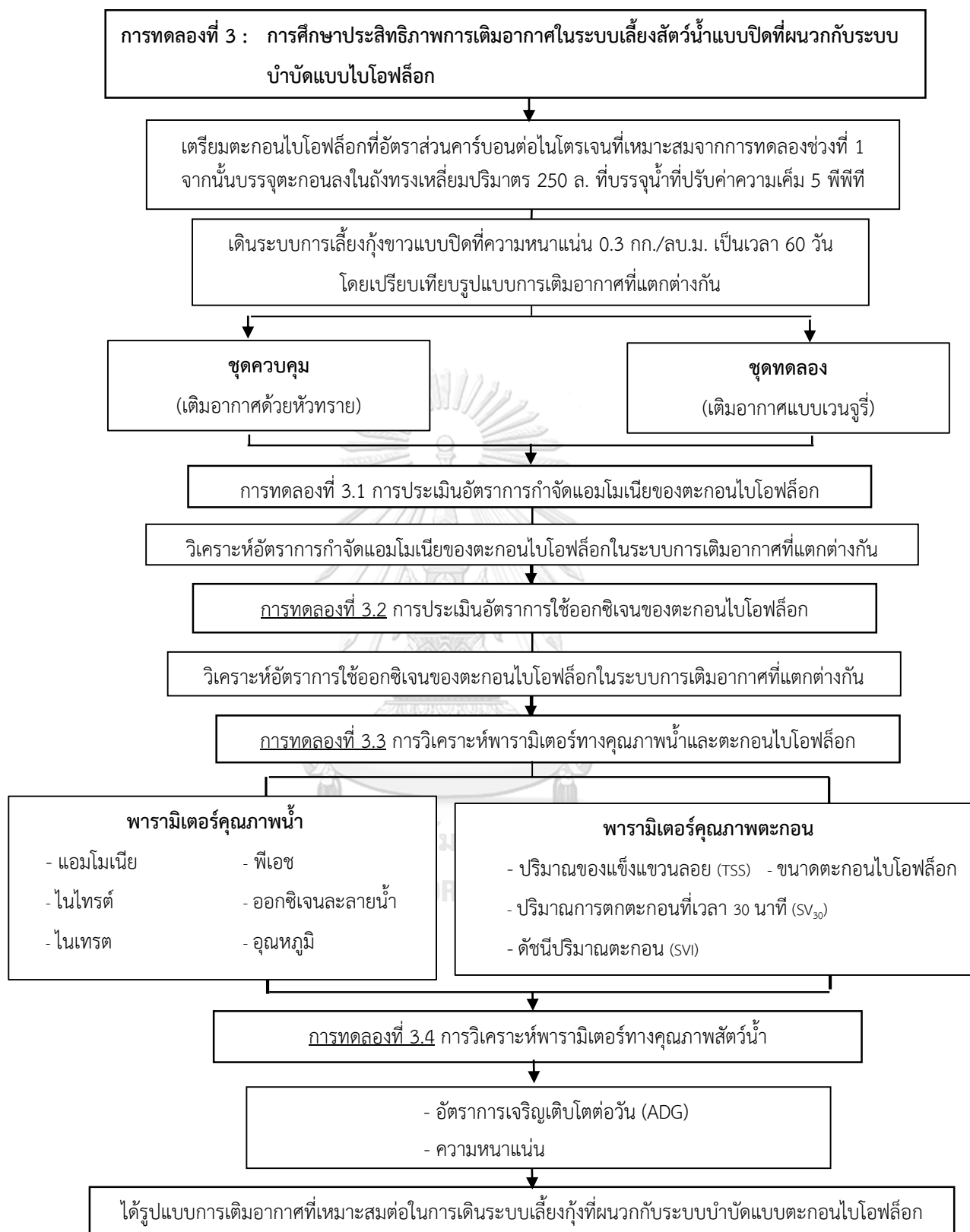


รูปที่ 3.1 แผนผังภาพรวมงานวิจัย



รูปที่ 3.2 แผนผังภาพการทดลองช่วงที่ 1





รูปที่ 3.4 แผนผังภาพการทดลองช่วงที่ 3

3.3 การดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจน

3.3.1.1 การแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในการสร้างตะกอนไบโอฟล็อก

การทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกที่มีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจน โดยทำการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกในขวดพลาสติกปริมาตร 2 ล. ที่มีการเติมน้ำเสียจากระบบเลี้ยงกุ้งปริมาตร 0.1 ล. (คิดเป็นร้อยละ 5 ของปริมาตรทั้งหมด) เติมนิโตรเจนเข้าสู่ระบบที่ความเข้มข้น เท่ากับ 123.9 มก.-ไนโตรเจน/ล. โดยแบ่งเป็นสารอินทรีย์ไนโตรเจนในรูปอาหารกุ้งบดละเอียดที่มีโปรตีนร้อยละ 38 รวมถึงสารอินทรีย์ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียมคลอไรด์และโซเดียมไนไตรต์ เพื่อเป็นแหล่งไนโตรเจนสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่มีบทบาทในวัฏจักรไนโตรเจน แปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนโดยเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน และชุดทดลองที่มีการเติมกากน้ำตาลที่มีองค์ประกอบคาร์บอนร้อยละ 46.9 ที่สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนแตกต่างกัน 3 ระดับ เท่ากับ 5:1, 10:1 และ 15:1 ตามลำดับ (การคำนวณปริมาณสารที่เติมแสดงดังภาคผนวก ข) โดยแบ่งการเติมออกเป็น 3 ครั้ง ในวันที่ 0, 3 และ 5 ของการทดลอง เนื่องจากการเติมสารอินทรีย์ปริมาณมากในครั้งเดียวอาจทำให้เกิดการลดลงของออกซิเจนอย่างรวดเร็ว นำไปสู่การเกิดสภาวะไร้อากาศขึ้นภายในระบบ เติมนิโตรเจนแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 30 วัน ที่ความเค็ม 5 พีพีที โดยควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายน้ำให้มีค่ามากกว่า 5 มก.-ออกซิเจน/ล. และควบคุมอัลคาลินิตีให้มีค่ามากกว่า 100 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต

3.3.1.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนไบโอฟล็อก

ในระหว่างการเดินระบบทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากแต่ละชุดการทดลองเพื่อตรวจวัดพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ ได้แก่ แอมโมเนียทั้งหมด ไนไตรต์ ไนเตรต ออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อัลคาลินิตี และอุณหภูมิ เป็นต้น ร่วมกับการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพตะกอน ได้แก่ ปริมาณของแข็งแขวนลอย ปริมาณตะกอนที่ตกในเวลา 30 นาที และค่าดัชนีปริมาณตะกอน เป็นต้น

ทั้งนี้การศึกษาผลของสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกและการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ มีรายละเอียดตัวแปรที่ทำการศึกษาดังตารางที่ 3.1

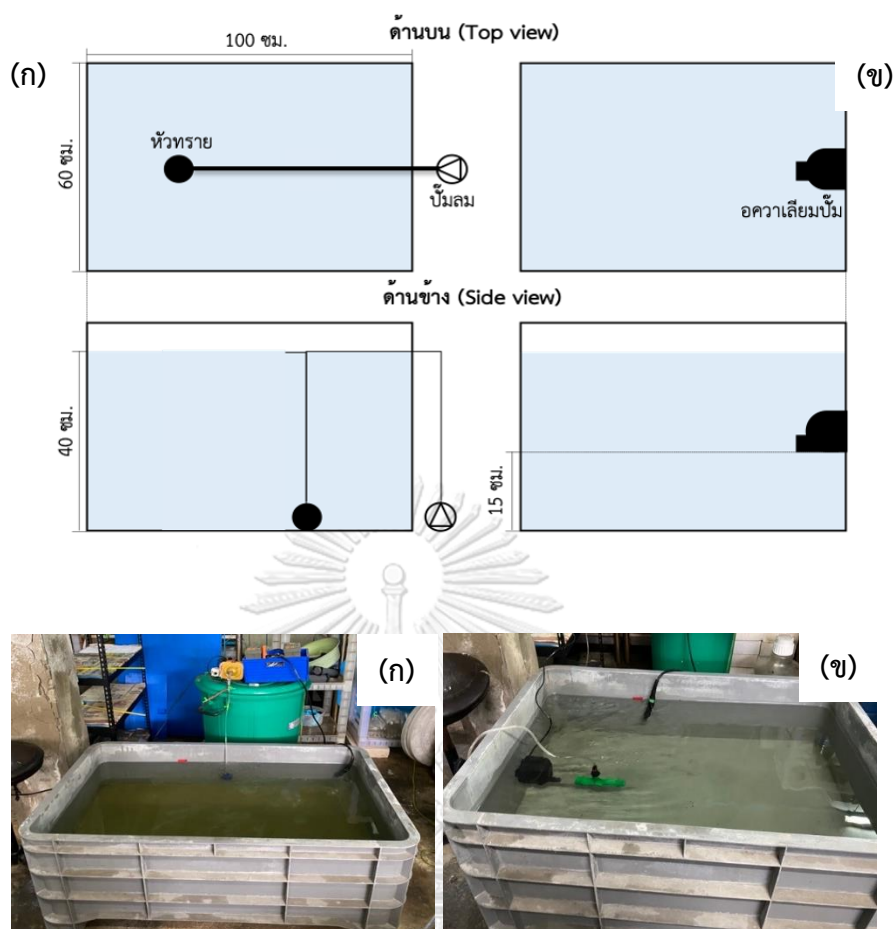
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรต่างๆ ค่าที่ใช้ในการทดลอง และพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ในการทดลองครั้งที่ 1

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	5:1, 10:1 และ 15:1
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ความเข้มข้นไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบ	123.9 มก.-ไนโตรเจน/ล.
ชนิดสารอินทรีย์คาร์บอน	กากน้ำตาล
ปริมาณน้ำที่ใช้	2 ล.
รูปแบบการเติมอากาศ	แบบหัวทราย
ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ	มากกว่า 5 มก./ล.
พีเอช	อยู่ในช่วง 7–8.5
อัลคาลินิตี	อยู่ในช่วง 120–150 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.
ความเค็ม	5 พีพีที
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์
ปริมาณตะกอนไบโอฟลอค	ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ปริมาณการตกตะกอนที่เวลา 30 นาที (SV_{30})
ความสามารถในการตกตะกอน	ดัชนีปริมาณตะกอน (SVI)
พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ	แอมโมเนียทั้งหมด ไนไตรต์ และไนเตรต

3.3.2 การทดลองครั้งที่ 2 การศึกษารูปแบบการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน

3.3.2.1 การศึกษารูปแบบการเติมอากาศต่ออัตราการถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพการเติมอากาศ

การทดลองนี้เป็นการติดตั้งระบบเติมอากาศในบ่อพลาสติกปริมาตร 250 ล. ที่บรรจุน้ำเค็ม 5 พีพีที ปริมาตร 240 ล. จำนวน 2 ถัง เพื่อแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ การเติมอากาศแบบหัวทราย โดยติดตั้งหัวทรายขนาด 6.5 ซม. จำนวน 1 หัว ในแนวกึ่งกลางของบ่อพลาสติกที่ระดับความสูงจากพื้นบ่อ 40 ซม. (รูปที่ 3.5(ก)) และการเติมอากาศแบบเวนจูรี โดยติดตั้งอควาเรียมปั๊มขนาด 35 วัตต์ ผูกกับเวนจูรีดัดแปลงขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว จำนวน 1 เครื่อง บริเวณขอบบ่อพลาสติกด้านแนวกว้างที่ระดับสูงจากพื้นบ่อ 15 ซม. (รูปที่ 3.5(ข)) ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการเติมอากาศ รูปแบบหัวทราย (ก) และแบบเวนจูรี (ข) สำหรับการทดลองช่วงที่ 2.1

ทำการกำจัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในระบบการทดลองให้มีค่าเท่ากับศูนย์ด้วยการเติม โซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3) และโคบอลท์คลอไรด์ (CoCl_2) เริ่มต้นทดสอบประสิทธิภาพเครื่องเติมอากาศโดยเปิดเครื่องเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง ตรวจวัดค่าความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำที่เพิ่มขึ้น ณ จุดต่างๆ (Determination points) ทุกนาที่ด้วยหัวโพรบแบบเคลื่อนที่และบันทึกค่า โดยทำการทดลองในแต่ละรูปแบบๆ ละ 3 ชั่วโมง ซึ่งตำแหน่งและจำนวนจุดวัดดังกล่าวจะถูกกำหนดเป็นตัวแทนของค่าการละลายออกซิเจนในปริมาตรน้ำนั้น นำข้อมูลค่าความเข้มข้นออกซิเจนละลาย ณ จุดต่างๆ ไปวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทของออกซิเจน และค่าออกซิเจนละลายอิ่มตัวคงที่ที่สภาวะคงตัวในรูปแบบของสมการถดถอยเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทของออกซิเจน ($K_L a$) และค่าออกซิเจนละลายอิ่มตัวคงที่ที่สภาวะคงตัวหลังถูกปรับแก้ที่ค่ามาตรฐาน ณ อุณหภูมิ 20°C เพื่อให้ได้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน ($K_L a_{(20^\circ\text{C})}$) และคำนวณอัตราการ

ถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (Standard oxygen transfer rate: SOTR) ประสิทธิภาพการเติมอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Aeration Efficiency: SAE) และประสิทธิภาพการเติมอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Efficiency: SOTE) ตามลำดับ ดังสมการต่อไปนี้

- อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTR)

$$SOTR = KLa_{(20^{\circ}C)} \times C_s \times V \quad (3.1)$$

เมื่อ SOTR คือ อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (กก.-ออกซิเจน/ชม.)

$KLa_{(20^{\circ}C)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิ 20 °ซ (1/ชม.)

C_s คือ ค่าออกซิเจนละลายอิ่มตัวที่สภาวะคงที่ (กก.-ออกซิเจน/ล.) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.24 มก.-ออกซิเจน/ล. หรือ 0.00824 กก.-ออกซิเจน/ล.

V คือ ปริมาตรน้ำในระบบ (ล.)

- ประสิทธิภาพการเติมอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (SAE)

$$SAE = \frac{SOTR}{P} \quad (3.2)$$

เมื่อ SAE คือ ประสิทธิภาพการเติมอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (กก.-ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม.)

SOTR คือ อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 20 °ซ (กก.-ออกซิเจน/ล.-ชม.)

P คือ ค่าพลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศ (กิโลวัตต์)

- ประสิทธิภาพถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTE)

$$SOTE = \frac{SOTR}{A} \quad (3.3)$$

$$A = Q_a \times \rho_a \times 0.23 \quad (3.4)$$

เมื่อ SOTE คือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (ร้อยละ)

A คือ อัตราการไหลเชิงมวลของออกซิเจนในกระแสอากาศ

Q_a คือ อัตราการไหลของอากาศ (ล./ชม.)

ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ (ρ_a ที่อุณหภูมิ 25 °ซ เท่ากับ 1.184 ก./ลบ.ม.)

0.23 คือ น้ำหนักของออกซิเจนต่อหนึ่งหน่วยอากาศ

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรต่างๆ ค่าที่ใช้ในการทดลอง และพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ในการทดลองครั้งที่ 2

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ระบบเติมอากาศ	แบบหัวทรายและแบบเวนจูรี
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ปริมาตรน้ำที่ใช้	240 ล.
ความเค็ม	5 พีพีที
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์
อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน	อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐานต่อปริมาตรน้ำ
ประสิทธิภาพเติมออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน	อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐานต่อพลังงานที่ใช้เติมอากาศ
ประสิทธิภาพถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน	ประสิทธิภาพถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐานต่ออัตราการไหลเชิงมวลของออกซิเจนในกระแสอากาศ

3.3.3 การทดลองครั้งที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่ผนวกส่วนบำบัดแบบไบโอฟลอค

3.3.3.1 การเตรียมตะกอนไบโอฟลอคที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1

การทดลองนี้เป็นการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่ผนวกส่วนบำบัดแบบไบโอฟลอค โดยเริ่มต้นจากการเตรียมตะกอนไบโอฟลอคในถังพลาสติกปริมาตร 250 ล. ด้วยการเติมน้ำจากระบบไบโอฟลอคเพื่อเป็นหัวเชื้อเริ่มต้นปริมาตร 12 ล. (คิดเป็นร้อยละ 5 ของปริมาตรทั้งหมด) และปรับปริมาตรด้วยน้ำเค็ม 5 พีพีที เพื่อให้ได้ปริมาตรรวมเท่ากับ 240 ล. (รูปที่ 3.6) เติมนสารอินทรีย์ไนโตรเจนในรูปอาหารกุ้งบด 168.51 ก. (คิดเป็นความเข้มข้น 42.7 มก.-ไนโตรเจน/ล.) และสารอินทรีย์ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียคลอไรด์ 13.17 ก. (คิดเป็นความเข้มข้น 14.4 มก.-ไนโตรเจน/ล.) และโซเดียมไนไตรต์ 25.25 ก. (คิดเป็นความเข้มข้น 21.3 มก.-ไนโตรเจน/ล.) เพื่อเป็นแหล่งไนโตรเจนสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่มีบทบาทในวัฏจักรไนโตรเจน จากนั้นเติมนสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปกากน้ำตาล (ซึ่งมีสัดส่วนคาร์บอนคิดเป็นร้อยละ 46.9) เพื่อกระตุ้นการรวมตัวของตะกอนไบโอฟลอคที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 5:1 มีค่าเท่ากับ 198.1 มล. โดยแบ่งการเติมออกเป็น 3 ครั้ง ในวันที่ 0, 3 และ 5 ของการทดลอง เนื่องจากการเติมนสารอินทรีย์ปริมาณมากในครั้งเดียวอาจทำให้เกิดการลดลงของออกซิเจนอย่างรวดเร็ว นำไปสู่การเกิดสภาวะไร้อากาศขึ้นภายในระบบ เดินระบบการทดลองแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 45 วัน ทำการควบคุมปริมาณออกซิเจน

ละลายให้มากกว่า 5 มก./ล. ด้วยการเติมอากาศผ่านทางหัวทราย และควบคุมค่าอัลคาไลน์ดีให้อยู่ในช่วง 120–150 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 การติดตั้งอุปกรณ์การเตรียมตะกอนไบโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1

3.3.3.2 การเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่ผนวกกับระบบบำบัดแบบตะกอนไบโอฟล็อก

ทำการบรรจุตะกอนไบโอฟล็อกปริมาตร 50 ล. ลงในบ่อพลาสติกปริมาตร 250 ล. และปรับปริมาตรด้วยน้ำเค็ม 5 พีพีที เพื่อให้ได้ปริมาตรรวมเท่ากับ 200 ล. ทำการติดตั้งระบบเติมอากาศโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด (การทดลองละ 3 ชั่วโมง) นั่นคือ ชุดการทดลองที่ 1 การเติมอากาศแบบหัวทราย โดยใช้หัวทรายขนาด 6.5 ซม. ติดตั้งจำนวน 4 ตำแหน่ง และชุดการทดลองที่ 2 การเติมอากาศแบบเวนจูรี ขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้วร่วมกับเครื่องสูบน้ำขนาด 45 วัตต์ จำนวน 4 ตำแหน่ง จากนั้นทำการเลี้ยงกุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*) ที่ความหนาแน่นเริ่มต้น 0.3 กก./ลบ.ม. ให้อาหารสำเร็จรูปทั่วไปที่มีโปรตีนร้อยละ 38 ในอัตราส่วนร้อยละ 3–5 ของน้ำหนักกุ้งรวมในระบบต่อวัน และมีการคำนวณปรับปริมาณอาหารที่ให้ตามน้ำหนักตัวของกุ้งที่เพิ่ม โดยแบ่งการให้อาหารเป็น 2 มื้อ/วันด้วยเครื่องให้อาหารอัตโนมัติที่สามารถปรับขนาดช่องให้อาหารได้ที่เวลา 6.00 และ 18.00 น. เดินระบบการทดลองแบบต่อเนื่องโดยไม่มีการเปลี่ยนน้ำเป็นเวลา 60 วัน ที่ความเค็มในช่วง 5 พีพีที โดยควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายให้มีค่ามากกว่า 5 มก.-ออกซิเจน/ล. ด้วยการเติมอากาศผ่านทางหัวทรายและเครื่องเติมอากาศแบบเวนจูรีเพื่อให้เกิดการกวนผสมมวลน้ำอย่างสมบูรณ์ และควบคุมค่าอัลคาไลน์ดีให้อยู่ในช่วง 120-150 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตตามลำดับ

3.3.3.3 การประเมินอัตราการกำจัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อก

ทำการเก็บตัวอย่างตะกอนไบโอฟล็อกทุกสัปดาห์ในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน เพื่อตรวจวัดอัตราการกำจัดแอมโมเนีย โดยบรรจุตะกอนปริมาตร 25 มล. ลงในกระป๋องพลาสติกปริมาตร 1 ล. ที่บรรจุน้ำความเค็ม 5 พีพีที ทำการทดลองละ 3 ซ้ำ เดินระบบการทดลองแบบแบทช์เป็นเวลา 6 ชม. โดยเติมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 มก.-ไนโตรเจน/ล. ควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายให้มีค่ามากกว่า 5 มก.-ออกซิเจน/ล. และอัลคาไลน์ดีให้ มีค่ามากกว่า 100 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. เก็บตัวอย่างน้ำทุก 2 ชม. เพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรด เป็นต้น เพื่อประเมินเสถียรภาพการกำจัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่ผนวกกับระบบบำบัดแบบตะกอนไบโอฟล็อก และเมื่อสิ้นสุดการทดลองนำข้อมูลจากการตรวจวัดเขียนกราฟระหว่างการลดลงของปริมาณแอมโมเนียเทียบกับเวลา เพื่อคำนวณอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกดังสมการที่ 3.5

- อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อก (มก.-ไนโตรเจน/ก.-ไบโอฟล็อก/วัน)

$$= ([TAN]_{\text{initial}} - [TAN]_{\text{final}}) / ([TSS] \times t) \quad (3.5)$$

เมื่อ $[TAN]_{\text{initial}}$ คือ ความเข้มข้นแอมโมเนียทั้งหมดเริ่มต้น (มก.-ไนโตรเจน/ล.)

$[TAN]_{\text{final}}$ คือ ความเข้มข้นแอมโมเนียทั้งหมดสิ้นสุด (มก.-ไนโตรเจน/ล.)

$[TSS]$ คือ ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (ก./ล.)

t คือ ระยะเวลาในการเดินระบบ (วัน)

3.3.3.4 การประเมินอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อก

ทำการเก็บตัวอย่างตะกอนไบโอฟล็อกในระหว่างการเดินระบบทุกสัปดาห์เพื่อตรวจวัดอัตราการใช้ออกซิเจน โดยบรรจุตะกอนไบโอฟล็อกในขวดแก้วปริมาตร 0.6 ล. เดินระบบการทดลองแบบแบทช์บนเครื่องกวนสารด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลาประมาณ 2-4 ชั่วโมง โดยตรวจวัดปริมาณออกซิเจนละลายในระบบทุก 15 นาที ด้วยหัวโพรบแบบเคลื่อนที่พร้อมบันทึกค่า เพื่อประเมินเสถียรภาพการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อกในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่ผนวกกับระบบบำบัดแบบตะกอนไบโอฟล็อก และเมื่อสิ้นสุดการทดลองนำข้อมูลจากการตรวจวัดเขียนกราฟระหว่างการลดลงของปริมาณออกซิเจนละลายเทียบกับเวลา เพื่อคำนวณอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อกดังสมการที่ 3.6

- อัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล๊อค (มก.-ออกซิเจน/ก.-ไบโอฟล๊อค/ชม.)

$$= \frac{([DO]_{\text{initial}} - [DO]_{\text{final}})/([TSS] \times t)}{(3.6)}$$

เมื่อ $[DO]_{\text{initial}}$ คือ ความเข้มข้นออกซิเจนละลายเริ่มต้น (มก.-ออกซิเจน/ล.)

$[DO]_{\text{final}}$ คือ ความเข้มข้นออกซิเจนละลายสิ้นสุด (มก.-ออกซิเจน/ล.)

$[TSS]$ คือ ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (ก./ล.)

t คือ ระยะเวลาในการเดินระบบ (ชั่วโมง)

3.3.3.5 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนไบโอฟล๊อค

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำในระหว่างการเดินระบบเพื่อตรวจวัดพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ ได้แก่ แอมโมเนียทั้งหมด ไนไตรต์ ไนเตรต ออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิและค่าอัลคาไลน์ เป็นต้น ร่วมกับการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพตะกอน ได้แก่ ปริมาณของแข็งแขวนลอย ปริมาณตะกอนที่ตกในเวลา 30 นาที ดัชนีปริมาณตะกอน ขนาดตะกอน และ การกระจายตัวของขนาดตะกอน เป็นต้น

3.3.3.6 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพสัตว์น้ำ

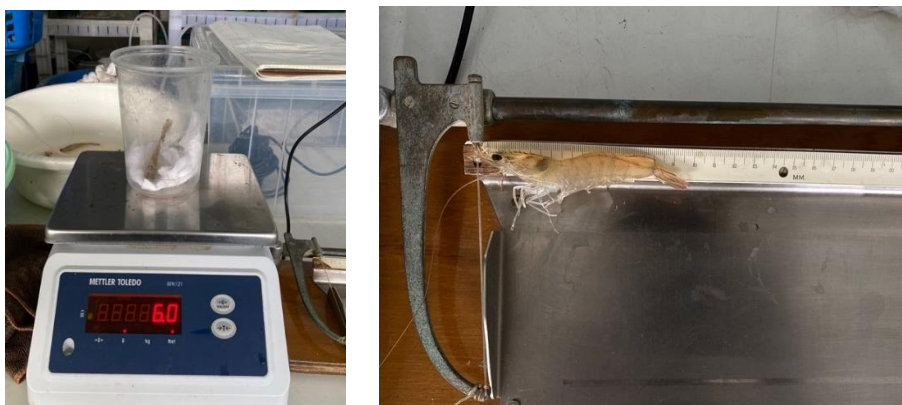
ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างกุ้งในระหว่างการเดินระบบในวันที่ 15, 30, 45 และ 60 เพื่อตรวจวัดพารามิเตอร์ทางคุณภาพสัตว์น้ำ ได้แก่ น้ำหนัก ความยาว และอัตราการรอด เป็นต้น (รูปที่ 3.7 ก และ ข) เพื่อใช้ในการคำนวณคำนวณอัตราการเจริญเติบโตของกุ้งต่อวัน (Average Daily Growth; ADG) และความหนาแน่น เป็นต้นซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{น้ำหนักกุ้งเฉลี่ยต่อตัว (ก./ตัว)} = \frac{\text{ผลรวมของน้ำหนักกุ้งทั้งหมด (ก.)}}{\text{จำนวนกุ้งทั้งหมด (ตัว)}}$$

$$\text{ความยาวของกุ้งเฉลี่ยต่อตัว (ชม./ตัว)} = \frac{\text{ผลรวมของความยาวกุ้งทั้งหมด (ชม.)}}{\text{จำนวนกุ้งทั้งหมด (ตัว)}}$$

$$\text{อัตราการเจริญเติบโตของกุ้งต่อวัน (ก./วัน)} = \frac{\text{น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้ายของกุ้ง (ก.)} - \text{น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้นของกุ้ง (ก.)}}{\text{ระยะเวลาการทดลองทั้งหมด (วัน)}}$$

$$\text{ความหนาแน่นของกุ้ง (กก./ลบ.ม.)} = \frac{\text{น้ำหนักกุ้งทั้งหมดในระบบ (กก.)}}{\text{ปริมาตรน้ำในระบบ (ลบ.ม.)}}$$



รูปที่ 3.7 การวิเคราะห์การเจริญเติบโตของกุ้งขาว (ก) การชั่งน้ำหนักสัตว์น้ำ
(ข) การวัดความยาวของสัตว์น้ำ



ทั้งนี้การศึกษาประสิทธิภาพของระบบเติมอากาศในการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่
ผนวกกับระบบบำบัดแบบตะกอนไบโอฟล็อก มีรายละเอียดตัวแปรที่ทำการศึกษาดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรต่างๆ ค่าที่ใช้ในการทดลอง และพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ในการทดลองครั้งที่ 3

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
รูปแบบการเติมอากาศ	แบบหัวทรายและแบบเวนจูรี
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ปริมาตรน้ำที่ใช้	240 ล.
ชนิดของสัตว์น้ำทดลอง	กุ้งขาว ที่ความหนาแน่นเริ่มต้น 0.3 กก./ลบ.ม.
ปริมาณอาหาร	ร้อยละ 3-5 ของน้ำหนักตัวกุ้ง
ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ	มากกว่า 5 มก./ล.
พีเอช	อยู่ในช่วง 7-8.5
อัลคาไลน์ตี	อยู่ในช่วง 120-150 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.
ความเค็ม	5 พีพีที
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองครั้งที่ 1
จำนวนการติดตั้งเครื่องเติมอากาศ	ค่าที่เหมาะสมจากการทดลองครั้งที่ 2
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์
อัตราการกำจัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อก	ความเข้มข้นแอมโมเนียที่ลดลงต่อน้ำหนักตะกอนต่อเวลา
อัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อก	ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ลดลงต่อน้ำหนักตะกอนต่อเวลา
ขนาดของตะกอนไบโอฟล็อก	ขนาดตะกอน และการกระจายตัวของขนาดตะกอน
ปริมาณตะกอนไบโอฟล็อก	ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ปริมาณการตกตะกอนที่เวลา 30 นาที (SV_{30})
ความสามารถในการตกตะกอน	ดัชนีปริมาณตะกอน (SVI)
พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ	แอมโมเนียทั้งหมด ไนไตรต์ และไนเตรต
การเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ	น้ำหนัก ความยาว และอัตราการเจริญเติบโตของกุ้ง

3.4 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด

พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดในระหว่างการเดินทางระบบทั้ง 3 ช่วง ประกอบด้วย พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ คุณภาพตะกอน และคุณภาพสัตว์น้ำ ซึ่งแสดงรายละเอียดและวิธีการวิเคราะห์ดังนี้

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ตะกอนในการทดลอง

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/ เครื่องมือวิเคราะห์	ความถี่ในการวิเคราะห์	
พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ		การทดลองที่	
		1	3
ค่าแอมโมเนียทั้งหมด (TAN)	Colorimetric and Spectrophotometric method	3 ครั้ง/สัปดาห์	3 ครั้ง/สัปดาห์
ไนไตรต์ (NO_2^- -N)	Colorimetric and Spectrophotometric method	3 ครั้ง/สัปดาห์	3 ครั้ง/สัปดาห์
ไนเตรต (NO_3^- -N)	Colorimetric and Spectrophotometric method	3 ครั้ง/สัปดาห์	3 ครั้ง/สัปดาห์
อุณหภูมิ (Temperature)	Thermometer	3 ครั้ง/สัปดาห์	3 ครั้ง/สัปดาห์
ออกซิเจนละลายน้ำ (DO)	DO meter method	3 ครั้ง/สัปดาห์	3 ครั้ง/สัปดาห์
พีเอช (pH)	pH meter	3 ครั้ง/สัปดาห์	3 ครั้ง/สัปดาห์
ค่าอัลคาไลน์ตี (Alkalinity)	ชุดทดสอบยี่ห้อ AQUA-VBC	3 ครั้ง/สัปดาห์	2 ครั้ง/สัปดาห์
พารามิเตอร์คุณภาพตะกอน			
ปริมาณสารแขวนลอยรวม (TSS)	กรองและอบที่อุณหภูมิ 103-105 °C	1 ครั้ง/สัปดาห์	1 ครั้ง/สัปดาห์
ปริมาณการตกตะกอนที่เวลา 30 นาที (SV_{30})	Imhoff cone ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที	1 ครั้ง/สัปดาห์	1 ครั้ง/สัปดาห์
ดัชนีปริมาณตะกอน (SVI)	ปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนใน 30 นาที ต่อ ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	1 ครั้ง/สัปดาห์	1 ครั้ง/สัปดาห์
ขนาดตะกอน	Laser particle size Distribution Analyzer	-	ทุกๆ 10 หรือ 15 วัน
อัตราการบำบัดแอมโมเนีย	เปรียบเทียบปริมาณแอมโมเนียที่ลดลงต่อ เวลา	1 ครั้ง/สัปดาห์	1 ครั้ง/สัปดาห์
อัตราการใช้ออกซิเจน	เปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนที่ลดลงต่อ เวลา	1 ครั้ง/สัปดาห์	1 ครั้ง/สัปดาห์

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์คุณภาพสัตว์น้ำ

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/ เครื่องมือวิเคราะห์	ความถี่ในการวิเคราะห์
พารามิเตอร์คุณภาพสัตว์น้ำ		การทดลองที่ 3
น้ำหนักกุ้ง	เครื่องชั่งตวงวัด 2 ตำแหน่ง	ทุกวันที่ 15, 30, 45 และ 60
ความยาวกุ้ง	เครื่องวัดความยาว	ทุกวันที่ 15, 30, 45 และ 60
อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน	เปรียบเทียบน้ำหนักกุ้งต่อระยะเวลาการเลี้ยง	ทุกวันที่ 30 และ 60
ความหนาแน่นของกุ้งในระบบ	น้ำหนักกุ้งต่อปริมาตรน้ำในระบบ	สิ้นสุดการทดลอง



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอพอลิเมอร์เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในโตรเจน

การทดลองส่วนนี้ศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับการบ่มตะกอนไบโอพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ในโตรเจนเพื่อนำไปใช้ในการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนไบโอพอลิเมอร์ระหว่างการบ่มตะกอนเป็นระยะเวลา 30 วัน ด้วยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปกากน้ำตาล มีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพตะกอน

จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพตะกอนไบโอพอลิเมอร์ในระหว่างการบ่มตะกอนเป็นเวลา 30 วัน ได้ผลดังตารางที่ 4.1 โดยในช่วง 5 วันแรกของการทดลองที่มีการเติมแหล่งไนโตรเจน (ในรูปของแอมโมเนียมคลอไรด์ โซเดียมไนไตรต์ และอาหารกุ้ง) เข้าสู่ระบบในวันที่ 0, 3 และ 5 ของการทดลองในชุดควบคุม พบว่ามีปริมาณของแข็งแขวนลอยเริ่มต้นเท่ากับ 91.67 ± 7.07 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. และเพิ่มขึ้นจนมีค่าในวันสุดท้ายของการทดลอง เท่ากับ 277.50 ± 17.68 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งแขวนลอยในชุดควบคุมเป็นผลโดยตรงมาจากตะกอนที่เกิดขึ้นจากอาหารกุ้งที่เติมเข้าสู่ระบบ โดยทั่วไปอาหารกุ้งจะประกอบด้วยสัดส่วนคาร์บอนประมาณร้อยละ 50 ซึ่งเมื่อพิจารณาสัดส่วนคาร์บอนจากอาหารกุ้งต่อไนโตรเจนที่เติมเข้าสู่ชุดควบคุม พบว่ามีค่าเท่ากับ 4.5:1 ซึ่งใกล้เคียงกับชุดทดลองที่มีการแปรค่าสัดส่วนการเติมกากน้ำตาลเข้าสู่ระบบ จึงเป็นไปได้ว่าในชุดควบคุมเกิดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟและเกิดการรวมตัวตะกอนไบโอพอลิเมอร์โดยอาศัยแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนจากอาหารกุ้งที่เติมเข้าสู่ระบบ

ในขณะที่ชุดทดลองมีการเติมแหล่งไนโตรเจนควบคู่กับการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน (ในรูปของกากน้ำตาล) เพื่กระตุ้นให้เกิดการสร้างตะกอนไบโอพอลิเมอร์ โดยมีการแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 3 ระดับ เท่ากับ 5:1, 10:1 และ 15:1 พบว่า มีปริมาณของแข็งแขวนลอยเริ่มต้นเท่ากับ 83.33 ± 0.00 , 130.00 ± 14.14 และ 170.00 ± 14.14 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. ตามลำดับ และต่อมาพบการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งแขวนลอยซึ่งเป็นผลมาจากการเติมกากน้ำตาลร่วมกับอาหารกุ้งที่

สามารถกระตุ้นให้เกิดการรวมตัวของจุลินทรีย์ในรูปของตะกอนไบโอฟล็อก ทั้งนี้ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มแปรผันตามการเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบ โดยพบว่าที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงสุดเท่ากับ 15:1 มีปริมาณตะกอนไบโอฟล็อกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 795.00 ± 35.36 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. ในวันที่ 5 ของการทดลอง ในขณะที่ชุดทดลองที่มีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 5:1 และ 10:1 ตรวจพบการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งแขวนลอยสะสมได้ช้ากว่าหลังจากวันที่ 10 ของการทดลอง โดยมีค่าอยู่ในช่วง $307.50 - 352.50$ มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งแขวนลอยเป็นผลมาจากการดูดซับไนโตรเจนและคาร์บอนเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์ผ่านกระบวนการแอสซิมิลेशनเพื่อนำไปสร้างส่วนประกอบของเซลล์และเกิดการรวมตัวเป็นตะกอนไบโอฟล็อก (Abakari และคณะ, 2021) โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าแต่ละชุดการทดลองที่มีการแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 5:1, 10:1 และ 15:1 สามารถผลิตปริมาณของแข็งแขวนลอยสะสมในวันสุดท้ายเท่ากับ 470.00 ± 14.14 , 314.33 ± 17.44 และ 620.0 ± 28.28 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.1(ก) จะเห็นได้ว่าปริมาณตะกอนไบโอฟล็อกในรูปของแข็งแขวนลอยที่ถูกผลิตขึ้นในระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 15:1 พบปริมาณของแข็งแขวนลอยสะสมสูงสุด ซึ่งมีสาเหตุมาจากที่อัตราส่วนดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับค่าจากสมการสตอยชิโอเมตริกที่ระบุว่าค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ เท่ากับ 16:1 และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang และคณะ (2020) ที่กล่าวว่าอัตราส่วนดังกล่าวเหมาะสมสำหรับกระตุ้นการรวมตัวของตะกอนไบโอฟล็อก

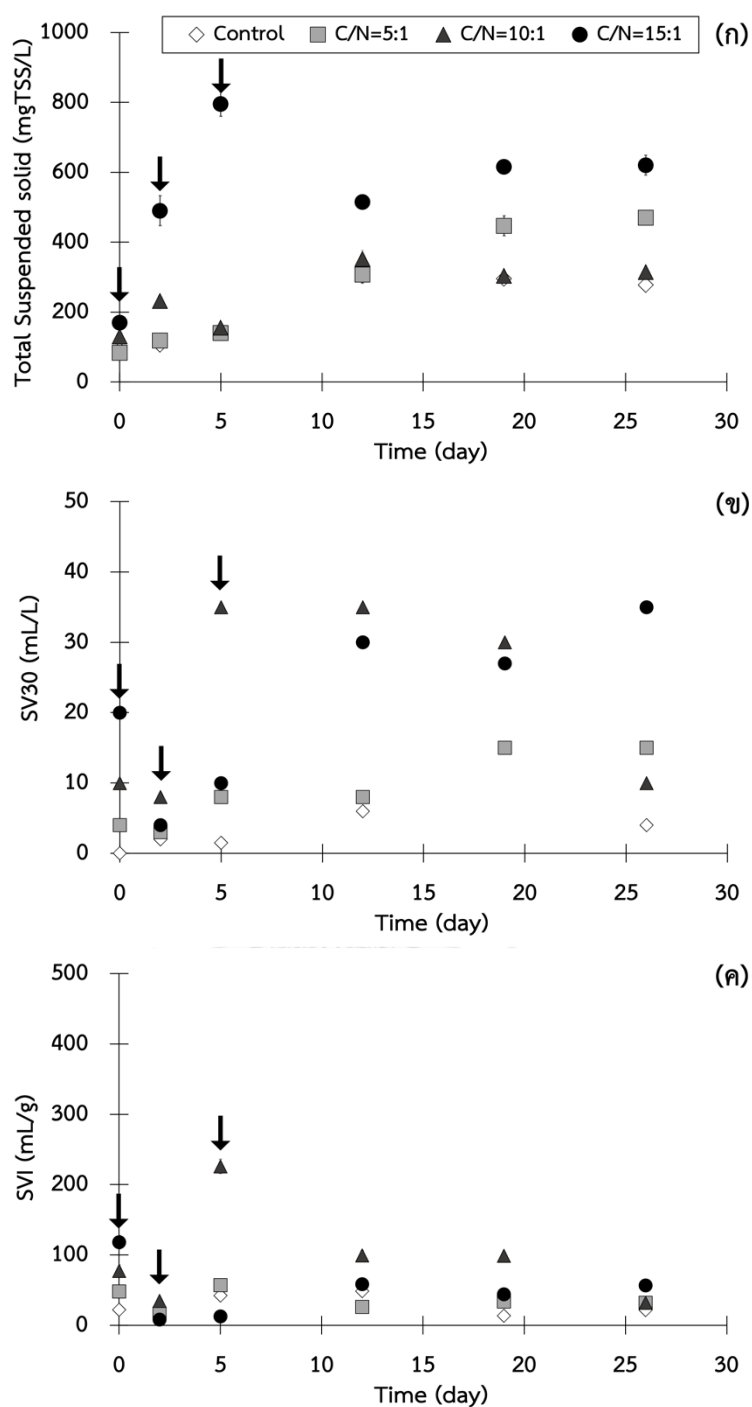
เมื่อพิจารณาค่าปริมาณตะกอนที่ตกในเวลา 30 นาที (SV_{30}) พบว่าชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 5:1, 10:1 และ 15:1 มีค่าเริ่มต้นแตกต่างกันเท่ากับ 2, 4, 10 และ 20 มล./ล. ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.1(ข) โดยปริมาณตะกอนดังกล่าวในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 มีค่าอยู่ในช่วง 2–15 และ 3–15 มล./ล. ซึ่งน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองที่มีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1 และ 15:1 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 8–35 และ 4–35 มล./ล. ตามลำดับ ซึ่งค่าปริมาณตะกอนที่จมตัวดังกล่าวเป็นค่าปกติสำหรับระบบไบโอฟล็อกที่มีค่าอยู่ในช่วง 2–40 มล./ล. (Avnimelech, 2007) (ค่า SV_{30} ของวันที่ 0 ไม่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในชุดทดลองที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 10:1 และ 15:1 ส่งผลให้เกิด

ตะกอนไบโอฟล็อกที่สามารถจมตัวในปริมาณที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 5:1

สำหรับค่าดัชนีปริมาณตะกอน (SVI) ดังแสดงในรูป 4.1(ค) พบว่ามีค่าเฉลี่ยในชุดควบคุมและชุดทดลองที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 5:1, 10:1 และ 15:1 เท่ากับ 27.07 ± 14.92 , 35.64 ± 15.68 , 94.73 ± 70.90 และ 49.56 ± 39.81 มล./ก. ตามลำดับ (ค่า SVI ของวันที่ 0 ไม่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ) โดยพบว่าค่า SVI ที่ตรวจวัดได้ในทุกชุดการทดลองมีค่าน้อยกว่า 100 มล./ก. ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยจากงานวิจัยของ De Schryver และคณะ (2008) ระบุตะกอนไบโอฟล็อกที่มีค่า SVI สูงกว่า 250 มล./ก. จะทำให้เกิดสถานะตะกอนไม่จมตัว (Bulking sludge) ซึ่งเป็นผลมาจากการผลิตสาร Extracellular polysaccharide (EPS) ในปริมาณที่มากเกินไปที่อาจเกิดขึ้นจากการบ่มตะกอนภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิสูงในช่วง 30–35 °ซ นอกจากนี้ค่าดัชนีปริมาณตะกอนดังกล่าวยังสามารถตรวจวัดในเทอมของ Floc volume index (FVI) ซึ่งคำนวณเทียบกับของแข็งแขวนลอยระเหยได้ (Volatile suspended solid; VSS) โดยระบุ ว่าค่า FVI ที่ต่ำเกินไปอาจทำให้ตะกอนไบโอฟล็อกมีความเร็วในการตกตะกอนสูงและสามารถจมตัวอย่างรวดเร็วภายใต้สภาวะที่ไม่ถูกปั่นป่วนจากการเติมอากาศอย่างทั่วถึง ทำให้เกิดการสะสมของตะกอนไบโอฟล็อกบริเวณพื้นบ่อ โดยค่า FVI ของตะกอนไบโอฟล็อกที่มีความเสถียรควรมีค่าประมาณ 200 มล./ก. สอดคล้องกับระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ (Activated sludge, AS) ที่ระบุว่าค่า SVI ที่ต่ำกว่า 80 มล./ก ทำให้ตะกอนมีความเร็วในการตกตะกอนสูงและสามารถจมตัวอย่างรวดเร็ว โดยค่า SVI ของตะกอนที่มีความเสถียรและสามารถทำงานได้ดีควรมีค่าในช่วง 100–200 มล./ก.

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์คุณภาพตะกอนระหว่างการบ่มตะกอนไปโอฟล็อกเป็นเวลา 30 วัน ในชุดควบคุมและชุดทดลองที่แปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนแตกต่าง 3 ระดับ

พารามิเตอร์	ชุดการทดลอง			
	ชุดควบคุม	C:N = 5:1	C:N = 10:1	C:N = 15:1
ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมด (มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล.)				
- ค่าต่ำสุด - สูงสุด	91.67 - 307.50	83.33 - 470.00	130.00 - 352.50	170.00 - 795.00
- ค่าเฉลี่ยเริ่มต้น	91.77±7.07	83.33±0.00	130.00±14.14	170.00±14.14
- ค่าเฉลี่ยสุดท้าย	277.50±17.68	470.00±14.14	314.33±17.44	620.00±28.28
ปริมาณตะกอนที่ตกในเวลา 30 นาที (มล./ล.)				
- ค่าต่ำสุด - สูงสุด	2 - 15	3 - 15	8 - 35	4 - 35
- ค่าเฉลี่ยเริ่มต้น	2	4	10	20
- ค่าเฉลี่ยสุดท้าย	6	15	10	35
ดัชนีปริมาณตะกอน (มล./ก.)				
- ค่าต่ำสุด - สูงสุด	13.56 - 48.78	16.93 - 57.22	31.86 - 226.04	8.19 - 118.06
- ค่าเฉลี่ยเริ่มต้น	21.88±1.69	48.00±0.00	77.38±8.42	118.06±9.82
- ค่าเฉลี่ยสุดท้าย	21.67±1.38	31.93±1.77	31.86±1.77	56.51±2.58



รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลง (ก) ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (ข) ปริมาณตะกอนที่ตกในเวลา 30 นาที และ (ค) ค่าดัชนีปริมาณตะกอน ในระหว่างการบ่มตะกอนไปโอฟล็อกเป็นเวลา 30 วัน ในชุดควบคุมและชุดทดลองที่แปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 3 ระดับ เท่ากับ 5:1, 10:1 และ 15:1 โดยลูกศร ↓ แสดงการเติมไนโตรเจนและสารอินทรีย์คาร์บอน (กากน้ำตาล) เข้าสู่ระบบ

4.1.2 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ

ผลการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ไนโตรเจนในระหว่างการบ่มตะกอนเป็นเวลา 30 วัน แสดงดังตารางที่ 4.2 โดยในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนแตกต่างกัน 3 ระดับ (5:1, 10:1 และ 15:1) มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ไนโตรเจนที่ใกล้เคียงกัน โดยในช่วงแรกที่มีการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์เข้าสู่ระบบส่งผลให้แอมโมเนียทั้งหมดเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 7.02 ± 0.74 , 5.95 ± 0.77 , 9.56 ± 1.96 และ 2.73 ± 0.70 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ และมีค่าแปรผันอยู่ในช่วง 3.30–12.00 มก.-ไนโตรเจน/ล. จากนั้นปริมาณแอมโมเนียทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดในวันที่ 12 ของการทดลอง ในชุดควบคุมและชุดทดลองที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 พบการกำจัดแอมโมเนียทั้งหมดอย่างรวดเร็ว โดยมีปริมาณแอมโมเนียทั้งหมดคงเหลือในระบบต่ำกว่า 0.30 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในขณะที่ชุดทดลองที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1 และ 15:1 มีปริมาณแอมโมเนียทั้งหมดคงเหลือเท่ากับ 1.21 ± 0.66 และ 2.82 ± 1.49 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.2 (ก) ทั้งนี้เนื่องจากในชุดควบคุมมีอัตราส่วนคาร์บอนจากอาหารกุ้งต่อไนโตรเจน เท่ากับ 4.5:1 ซึ่งใกล้เคียงกับชุดทดลองที่มีอัตราส่วนคาร์บอนจากกากน้ำตาลต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 จึงทำให้มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงแอมโมเนียที่ใกล้เคียงกัน โดยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนสามารถกระตุ้นการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ (Heterotroph) ทำให้เกิดการนำแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ผ่านกระบวนการแอสซิมิเลชัน (Assimilation) เพื่อนำไปสร้างเซลล์แบคทีเรียในรูปของตะกอนไบโอฟล็อก นอกจากนี้การลดลงของแอมโมเนียทั้งหมดยังเป็นผลมาจากการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟ (Autotroph) ที่เปลี่ยนแอมโมเนียให้อยู่ในรูปไนไตรต์และไนเตรตผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในชุดทดลองที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 พบการกำจัดแอมโมเนียทั้งหมดรวดเร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1 และ 15:1 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hu และคณะ (2009) ที่ระบุว่า การเพิ่มอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนส่งผลต่ออัตราการบำบัดแอมโมเนียผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน โดยระบบที่มีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำกว่า 4:1 จะสามารถบำบัดแอมโมเนียได้หมด ในขณะที่พบการคงค้างของแอมโมเนียทั้งหมดที่บำบัดไม่หมดในระบบที่มีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 8:1 และ 16:1 ตามลำดับ

การเติมโซเดียมไนไตรต์เข้าสู่ระบบส่งผลให้ไนไตรต์ในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 3 ระดับมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0.34 ± 0.23 , 1.59 ± 0.46 , 2.81 ± 2.92

และ 0.10 ± 0.03 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.2(ข) และมีค่าแปรผันในช่วงสัปดาห์แรกของการทดลองเท่ากับ $0.10-2.20$ มก.-ไนโตรเจน/ล. ต่อมาปริมาณไนโตรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยชุดควบคุมพบการเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนอย่างชัดเจนในวันที่ 10 ของการทดลอง เท่ากับ 5.22 ± 0.43 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในขณะที่ชุดทดลองที่แปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนทั้ง 3 ระดับตรวจพบการเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนอย่างเห็นได้ชัดในวันที่ 12 ของการทดลอง โดยมีค่าในช่วง $2.90-3.40$ มก.-ไนโตรเจน/ล. ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนในช่วงเวลาที่สอดคล้องกับการลดลงของแอมโมเนีย คาดว่าเป็นผลโดยตรงมาจากการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน ส่งผลให้แอมโมเนียถูกออกซิไดซ์จนอยู่ในรูปของไนไตรต์ โดยตรวจพบการคงค้างของไนไตรต์พบอยู่ในช่วง $2.90-8.55$ มก.-ไนโตรเจน/ล. อย่างไรก็ตามในเวลาต่อมาพบว่าไนโตรเจนมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดในวันที่ 26 ของการทดลอง โดยเฉพาะในชุดควบคุมและชุดทดลองที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ที่ตรวจพบการลดลงของไนโตรเจนอย่างรวดเร็ว โดยมีปริมาณไนไตรต์คงเหลือในวันสุดท้ายของการทดลองต่ำกว่า 0.50 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในขณะที่ชุดทดลองที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1 และ 15:1 มีปริมาณไนไตรต์คงเหลือเท่ากับ 2.40 ± 0.18 และ 4.40 ± 1.11 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

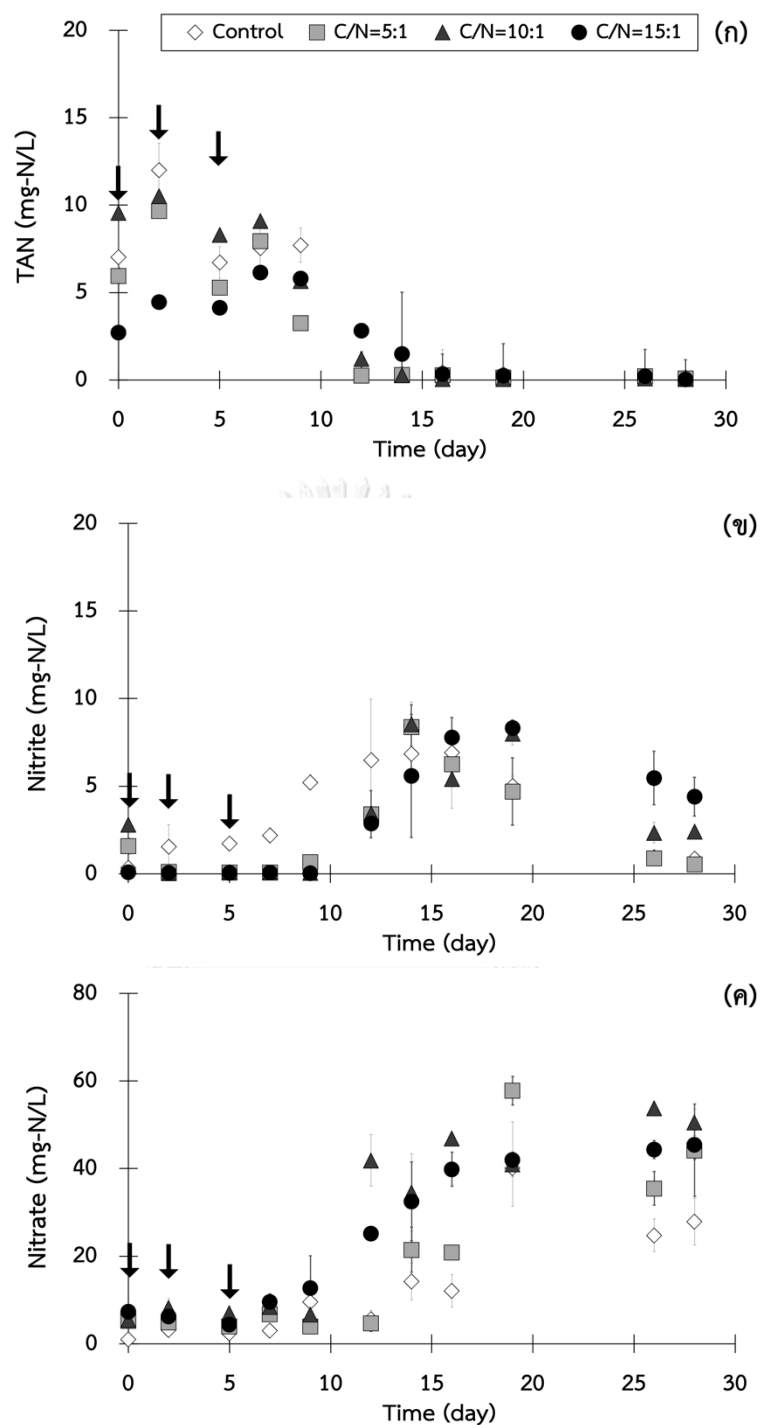
ในส่วนของปริมาณไนเตรตในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 3 ระดับ มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 1.01 ± 0.24 , 5.26 ± 1.30 , 5.47 ± 0.81 และ 7.34 ± 0.73 มก.-ไนโตรเจน/ล. ดังรูปที่ 4.2(ค) โดยปริมาณไนเตรตมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วง 10 วันแรกของการทดลอง และต่อมาตรวจพบแนวโน้มการเพิ่มของไนเตรตอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนียและไนไตรต์ในระบบโดยคาดว่าจะเป็ผลโดยตรงมาจากการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน ส่งผลให้ไนไตรต์ที่เกิดขึ้นถูกออกซิไดซ์ต่อจนอยู่ในรูปของไนเตรต โดยไนเตรตในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 3 ระดับ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนในวันสุดท้ายของการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 27.92 ± 5.37 , 44.19 ± 10.55 , 50.56 ± 2.99 และ 45.45 ± 3.41 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

จากผลการเปลี่ยนแปลงสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในระหว่างการบ่มตะกอนเป็นเวลา 30 วัน แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของตะกอนไบโอฟล็อกที่สามารถเปลี่ยนแอมโมเนียทั้งหมดให้อยู่ในรูปของไนไตรต์และไนเตรต โดยในชุดควบคุมพบว่ากระบวนการบำบัดแอมโมเนียสามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากการเติมน้ำจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อเป็นหัวเชื้อเริ่มต้นในการเดินระบบ ในขณะที่ชุดทดลองที่มีการเติมกากน้ำตาลและแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 3 ระดับ พบว่าสามารถกระตุ้นให้เกิดการเจริญเติบโตของตะกอนไบโอฟล็อกซึ่งมีบทบาทในการดูดซึมแอมโมเนียผ่านกระบวนการ

แอสซิมิเลชันร่วมกับการบำบัดแอมโมเนียผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน โดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มไนตริไฟอิง 2 กลุ่มที่ทำงานต่อเนื่องกันได้แก่ Ammonia Oxidizing Bacteria หรือ AOB ซึ่งเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรต์ และกลุ่ม Nitrite Oxidizing Bacteria หรือ NOB ที่เปลี่ยนไนไตรต์เป็นไนเตรต โดยการบำบัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนทั้งในชุดควบคุมและชุดทดลองพบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาชุดทดลองที่มีการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกด้วยการเติมกากน้ำตาลพบว่าที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 เป็นอัตราส่วนที่เพียงพอต่อการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกโดยประหยัดปริมาณการเติมกากน้ำตาลเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1 และ 15:1 อีกทั้งยังสามารถบำบัดแอมโมเนียและไนไตรต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีความเข้มข้นของสารอนินทรีย์ไนโตรเจนคงค้างต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นๆ จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมตะกอนไบโอฟล็อกที่สามารถนำไปใช้ในการเดินระบบช่วงต่อไป

ตารางที่ 4.2 สารอนินทรีย์ไนโตรเจนระหว่างการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกเป็นเวลา 30 วัน ในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนแตกต่างกัน 3 ระดับ

พารามิเตอร์	ชุดการทดลอง			
	ชุดควบคุม	C:N = 5:1	C:N = 10:1	C:N = 15:1
ปริมาณแอมโมเนียทั้งหมด (มก.-ไนโตรเจน/ล.)				
- ค่าเฉลี่ยเริ่มต้น	7.02±0.74	5.95±0.77	9.56±1.96	2.73±0.70
- ค่าเฉลี่ยสุดท้าย	0.16±0.02	0.10±0.03	0.06±0.01	0.04±0.01
ปริมาณไนไตรต์ (มก.-ไนโตรเจน/ล.)				
- ค่าเฉลี่ยเริ่มต้น	0.34±0.23	1.59±0.46	2.81±2.92	0.10±0.03
- ค่าเฉลี่ยสุดท้าย	0.86±0.10	0.55±0.05	2.40±0.18	4.40±1.11
ปริมาณไนเตรต (มก.-ไนโตรเจน/ล.)				
- ค่าเฉลี่ยเริ่มต้น	1.01±0.24	5.26±1.30	5.47±0.81	7.34±0.73
- ค่าเฉลี่ยสุดท้าย	27.92±5.37	44.19±10.55	50.56±2.99	45.45±3.41



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลง (ก) ปริมาณแอมโมเนียทั้งหมด (ข) ปริมาณไนไตรต์ และ (ค) ปริมาณไนเตรตในระหว่างการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกเป็นเวลา 30 วัน ในชุดควบคุมและชุดทดลองที่แปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 3 ระดับ เท่ากับ 5:1, 10:1 และ 15:1 โดยลูกศร ↓ แสดงการเติมไนโตรเจนและสารอินทรีย์คาร์บอน (กากน้ำตาล) เข้าสู่ระบบ

ตารางที่ 4.3 แสดงพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำในระหว่างการบ่มตะกอนเป็นเวลา 30 วัน พบว่าในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนแตกต่างกัน 3 ระดับ (5:1, 10:1 และ 15:1) มีค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟและออโตโทรฟ โดยมีค่าปริมาณออกซิเจนละลายเฉลี่ยสูงกว่า 7.40 มก./ล. อุณหภูมิอยู่ในช่วง 26.40 – 27.65 °ซ ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 8.20 – 8.51 และค่าอัลคาลินิตีอยู่ในช่วง 110 – 150 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ซึ่งค่าต่างๆ ดังกล่าวอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการบ่มตะกอนไบโอฟล๊อค (Emerenciano และคณะ, 2017)

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์คุณภาพน้ำระหว่างการบ่มตะกอนไบโอฟล๊อคเป็นเวลา 30 วัน ในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนแตกต่างกัน 3 ระดับ

พารามิเตอร์	ชุดการทดลอง			
	ชุดควบคุม	C:N = 5:1	C:N = 10:1	C:N = 15:1
ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)				
- ค่าต่ำสุด - สูงสุด	6.95 – 7.95	6.85 – 7.75	6.55 – 8.10	5.95 – 7.50
- ค่าเฉลี่ย	7.36±0.34	7.23±0.28	7.40±0.49	6.93±0.53
อุณหภูมิ (°ซ)				
- ค่าต่ำสุด - สูงสุด	26.65 – 27.50	26.40 – 27.60	26.45 – 27.65	26.30 – 27.50
- ค่าเฉลี่ย	27.14±0.25	26.97±0.35	26.95±0.35	26.91±0.39
ค่าพีเอช				
- ค่าต่ำสุด - สูงสุด	8.17 – 8.51	8.20 – 8.51	8.29 – 8.49	8.20 – 8.50
- ค่าเฉลี่ย	8.36±0.12	8.39±0.10	8.37±0.07	8.35±0.08
ค่าอัลคาลินิตี (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)				
- ค่าต่ำสุด - สูงสุด	110.00 – 150.00	120.00 – 150.00	120.00 – 150.00	120.00 – 150.00
- ค่าเฉลี่ย	138.75±18.08	140.0±13.09	141.25±13.56	145.00±10.69

4.2 การศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศของอุปกรณ์เติมอากาศเพื่อใช้ในระบบบำบัดแบบไบโอฟล็อก

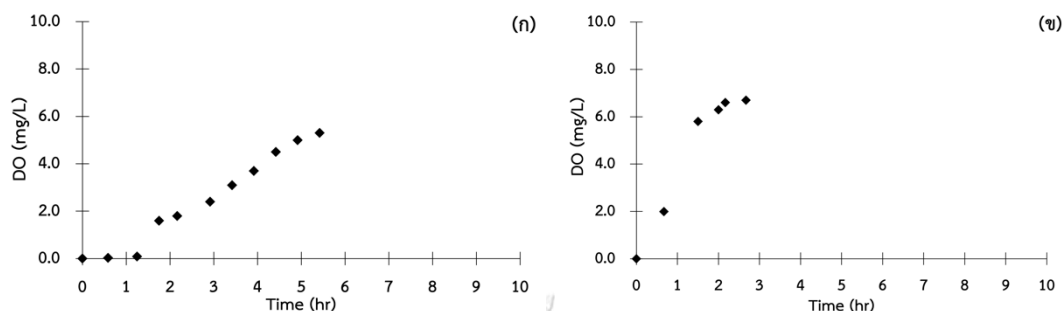
การทดลองส่วนนี้ประกอบด้วยการศึกษาค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทอากาศ และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐานของอุปกรณ์เติมอากาศแบบหัวทรายและเวนจูรีแบบดัดแปลง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเติมอากาศของอุปกรณ์เติมอากาศแต่ละรูปแบบ ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพ ลักษณะของฟองอากาศ และกลไกการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศที่แตกต่างกัน โดยผลการทดลองจะแสดงให้เห็นถึงความสามารถของอุปกรณ์เติมอากาศที่แตกต่างกันสำหรับประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เติมอากาศในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำผนวกกับส่วนบำบัดแบบไบโอฟล็อกได้อย่างเหมาะสม มีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 การศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำ (K_La)

ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนลงไปในน้ำของอุปกรณ์เติมอากาศแบบหัวทราย และแบบเวนจูรี ที่อัตราการไหลอากาศเท่ากับ 2.50 ลิ./นาที่ ในถังปริมาตร 250 ลิ. ที่บรรจุน้ำความเค็ม 5 พีพีที และมีค่าความเข้มข้นออกซิเจนละลายเริ่มต้นเท่ากับ 0.00 มก./ลิ. โดยภายหลังการเติมอากาศพร้อมตรวจวัดค่าปริมาณออกซิเจนละลายที่เพิ่มขึ้นในแต่ละช่วงเวลาจนกระทั่งเข้าใกล้จุดอิ่มตัว พบว่ารูปแบบการเติมอากาศแบบหัวทรายสามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในระบบให้มีความเท่ากับ 5.30–5.40 มก.-ออกซิเจน/ลิ. โดยใช้ระยะเวลาประมาณ 4–6 ชม. ขณะที่การเติมอากาศแบบเวนจูรีสามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในระบบให้มีความเท่ากับ 6.70–6.80 มก.-ออกซิเจน/ลิ. โดยใช้ระยะเวลาเพียง 2–3 ชม. ดังรูปที่ 4.3(ก) และ 4.3(ข) ตามลำดับ

เมื่อนำอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนละลายมาจัดรูปใหม่ในสเกลลอการิทึม (\ln) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(C_s - C_t)$ กับเวลาด้วยกราฟเส้นตรง จะได้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของแต่ละรูปแบบการเติมอากาศจากค่า R^2 ของเครื่องเติมอากาศแบบหัวทรายและแบบเวนจูรี โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ของการเติมอากาศแบบหัวทราย มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.62×10^{-5} 1/วินาที หรือ 2.02×10^{-1} 1/ชม. และการเติมอากาศแบบเวนจูรีมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.19×10^{-4} 1/วินาที หรือ 7.88×10^{-1} 1/ชม. ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 2.50 ลิ./นาที่ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศแบบหัวทรายและเวนจูรีที่ตรวจวัดได้ในงานวิจัยนี้ยังมีค่าค่อนข้างต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของนราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์ (2553) ที่ศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนต่ออัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกันในอุปกรณ์

เติมอากาศแบบท่อยืดหยุ่น ซึ่งสามารถผลิตฟองอากาศขนาดเล็กเช่นเดียวกับอุปกรณ์เติมอากาศแบบหัวทรายและเวนจูรี โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1.20×10^{-3} – 4.00×10^{-3} 1/วินาที ที่อัตราการไหลของอากาศในช่วง 1–4 ล./นาที



รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำในแต่ละช่วงเวลาจนเข้าใกล้จุดอิ่มตัว ของ(ก) การเติมอากาศแบบหัวทราย และ (ข) การเติมอากาศแบบเวนจูรี

4.2.2 อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTR)

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ได้ไปคำนวณผลกระทบจากอุณหภูมิตามสมการของ Van't Hoff Arrhenius (สมการที่ 2.11) ที่อุณหภูมิ 20 °ซ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิเดียวกันทั้ง 2 ชุดการทดลอง ($K_{La(20^{\circ}\text{C})}$) พบว่ารูปแบบการเติมอากาศแบบหัวทรายมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.99×10^{-5} 1/วินาที หรือ 1.80×10^{-1} 1/ชม. และการเติมอากาศแบบเวนจูรีมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.94×10^{-4} 1/วินาที หรือ 7.00×10^{-1} 1/ชม. และเมื่อพิจารณาถึงอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTR) โดยแทนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ได้ในสมการที่ 2.12 พบว่าความสามารถในการเติมออกซิเจนผ่านอุปกรณ์เติมอากาศเวนจูรีเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่ารูปแบบหัวทราย โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.38 ± 0.18 กก.-ออกซิเจน/ชม. และ 0.36 ± 0.01 กก.-ออกซิเจน/ชม. ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรีสามารถสร้างฟองอากาศที่มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอกว่าแบบหัวทราย ส่งผลให้การแพร่กระจายของออกซิเจนจากอุปกรณ์เติมอากาศลงสู่ น้ำเกิดขึ้นได้ดีกว่า ทำให้ระบบที่มีการเติมอากาศแบบเวนจูรีมีปริมาณออกซิเจนละลายเพิ่มขึ้นต่อเวลาได้รวดเร็วกว่าระบบที่มีการเติมอากาศแบบหัวทราย

4.2.3 ประสิทธิภาพการเติมอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (SAE) และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTE)

จากการพิจารณาประสิทธิภาพการเติมอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (SAE) โดยนำค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐานที่ได้จากข้างต้นไปคำนวณตามสมการที่ 2.13 พบว่ารูปแบบการเติมอากาศแบบหัวทรายมีประสิทธิภาพการถ่ายเทอากาศที่สภาวะมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 8.97 ± 0.15 กก.-ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม. โดยใช้กำลังงานในการเติมอากาศเท่ากับ 0.0396 กิโลวัตต์ ส่วนรูปแบบเวนจูรีมีอัตราประสิทธิภาพการถ่ายเทอากาศที่สภาวะมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 57.68 ± 0.18 กก.-ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม. โดยใช้กำลังงานในการเติมอากาศเท่ากับ 0.024 กิโลวัตต์ ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทอากาศที่สภาวะมาตรฐานของอุปกรณ์เติมอากาศทั้ง 2 รูปแบบ จากการพิจารณาความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจนต่อระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ พบว่าการเติมอากาศแบบเวนจูรีมีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนสูงกว่าการเติมอากาศแบบหัวทราย และใช้พลังงานในการเติมอากาศที่น้อยกว่า แสดงถึงการมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานและความสามารถในการประหยัดพลังงานได้มากกว่า

นอกจากนี้หากพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTE) จะพบว่าสอดคล้องกับอัตราการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพการถ่ายเทอากาศที่สภาวะมาตรฐาน โดยอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรีมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐานเฉลี่ยสูงกว่าแบบหัวทราย คือรูปแบบหัวทรายมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐานเฉลี่ยเพียงร้อยละ 1.98 ± 0.03 ขณะที่รูปแบบเวนจูรีมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 7.73 ± 0.99 แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าดังกล่าวกับงานวิจัยของ Krause (2010) ที่ระบุว่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนระดับมาตรฐานที่ต่ำที่สุดสำหรับการเติมอากาศแบบหัวกระจายอากาศฟองละเอียดที่ใช้น้ำมีค่าเท่ากับร้อยละ 2 และสำหรับการเติมอากาศแบบฉีดน้ำลงบนผิวน้ำมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 1–2 แสดงให้เห็นว่าการเติมอากาศเวนจูรีแบบดัดแปลงมีค่าประสิทธิภาพในการเติมออกซิเจนเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานสำหรับอุปกรณ์เติมอากาศแบบฉีดน้ำลงผิวน้ำ และมีประสิทธิภาพการเติมออกซิเจนต่อระยะเวลาและพลังงานที่ใช้มากกว่าการเติมอากาศแบบหัวทราย ซึ่งสามารถสรุปค่าต่างๆ จากการทดลองได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ประสิทธิภาพการเติมอากาศรูปแบบหัวทรายและเวนจูรี

พารามิเตอร์	รูปแบบการเติมอากาศ	
	แบบหัวทราย	แบบเวนจูรี
- ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิใดๆ (1/ชม.)	0.18±0.00	0.70±0.09
- อัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐาน (กก.-ออกซิเจน/ชม.)	0.36±0.01	1.38±1.18
- ประสิทธิภาพการเติมอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (กก.-ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม.)	8.97±0.15	57.68±0.18
- ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศ (ร้อยละ)	1.98±0.03	7.73±0.99



4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดผนวกกับส่วนบำบัด

ไบโอฟล็อก

การทดลองส่วนนี้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบเติมอากาศในการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดสำหรับเลี้ยงกุ้งขาวที่ระดับความหนาแน่นเริ่มต้น 0.30 กก./ลบ.ม. เป็นระยะเวลา 60 วัน โดยผนวกกับส่วนบำบัดแบบไบโอฟล็อกที่ใช้ตะกอนชีวภาพซึ่งผ่านการบ่มตะกอนล่วงหน้าด้วยกากน้ำตาลที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงที่ 1 ทำการทดลองเปรียบเทียบกันระหว่างชุดควบคุมที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบหัวทราย และชุดทดลองที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบเวนจูรี ทั้งนี้ในระหว่างการทดลองจะทำการกวนผสมเป็นระยะเพื่อลดปริมาณตะกอนจมตัวบริเวณพื้นบ่อ พร้อมปรับปริมาตรน้ำและระดับความเค็มให้คงที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยผลการทดลองมีดังนี้

4.3.1 การเตรียมตะกอนไบโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 5:1

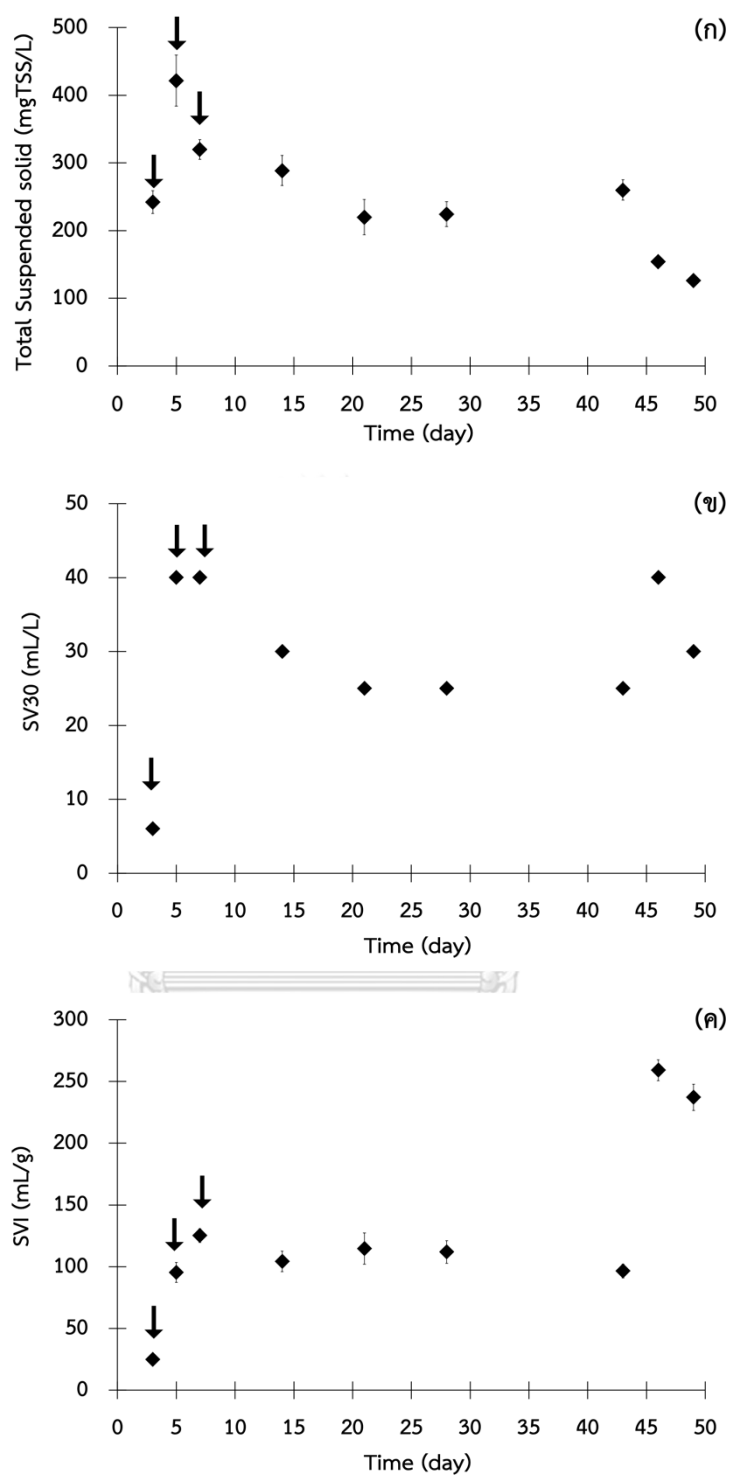
- การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพตะกอน

ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์คุณภาพตะกอนของไบโอฟล็อกในระหว่างการบ่มตะกอนที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 เป็นเวลา 45 วันแสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.4 พบว่าในช่วง 5 วันแรกของการทดลองที่มีการเติมแหล่งไนโตรเจน (ในรูปแอมโมเนียมคลอไรด์ โซเดียมไนไตรต์ และอาหารกุ้ง) และสารอินทรีย์คาร์บอน (ในรูปกากน้ำตาล) เข้าสู่ระบบด้วยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ในวันที่ 0, 3 และ 5 ของการทดลอง เพื่อกระตุ้นให้เกิดการรวมตัวของตะกอนไบโอฟล็อก ส่งผลให้ปริมาณตะกอนแขวนลอยเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจากเริ่มต้น 242.22 ± 16.78 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. จนมีค่าสูงสุดในวันที่ 2 ของการทดลองเท่ากับ 421.67 ± 37.53 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. ดังรูปที่ 4.4(ก) จากนั้นปริมาณตะกอนแขวนลอยมีแนวโน้มลดลงเมื่อหยุดเติมไนโตรเจนและอินทรีย์คาร์บอนเข้าสู่ระบบ โดยมีปริมาณของแข็งแขวนลอยลดลงตั้งแต่วันที่ 12 ของการเตรียมตะกอนและมีปริมาณของแข็งแขวนลอยในวันสุดท้ายของการทดลอง (วันที่ 49) เท่ากับ 126.67 ± 5.77 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. และมีค่าเฉลี่ยของแข็งแขวนลอยตลอดระยะเวลาการทดลองเท่ากับ 250.93 ± 87.98 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. เมื่อพิจารณาค่าปริมาณตะกอนที่ตกในเวลา 30 นาที (SV_{30}) พบว่ามีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 6.00 มล./ล. และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 40.00 มล./ล. โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยปริมาณตะกอนที่ตกในเวลา 30 นาที เท่ากับ 29.00 ± 10.85 มล./ล. ซึ่งเป็นช่วงการตกตะกอนในระดับปกติของระบบไบโอฟล็อก (โดยค่า SV_{30} ของวันที่ 0 ไม่ถูก

นำมาใช้ในการคำนวณ) ดังรูปที่ 4.4(ข) สำหรับค่าดัชนีปริมาณตะกอน (SVI) มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 24.85 ± 1.70 มล./ก. และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 259.18 ± 8.46 มล./ก. ในวันที่ 46 โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยดัชนีปริมาณตะกอนเท่ากับ 129.87 ± 65.31 มล./ก. (โดยค่า SVI ของวันที่ 0 ไม่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ) ดังรูปที่ 4.4(ค) ในช่วงแรกบ่งบอกถึงตะกอนมีการตกตะกอนในระดับที่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าดัชนีปริมาณตะกอนดังกล่าวที่มีค่าสูงเกินกว่า 250.00 มล./ก. ภายหลังจากการเตรียมตะกอนไบโอฟล็อกเป็นเวลา 40 วัน เป็นสภาวะที่บ่งบอกว่าระบบเริ่มมีปัญหาต่อการตกตะกอนของไบโอฟล็อกส่งผลให้เกิดสภาวะตะกอนไม่จมตัว (Sludge Bulking) เป็นผลมาจากปริมาณออกซิเจนหรือสารอาหารสำหรับตะกอนไบโอฟล็อกไม่เพียงพอ

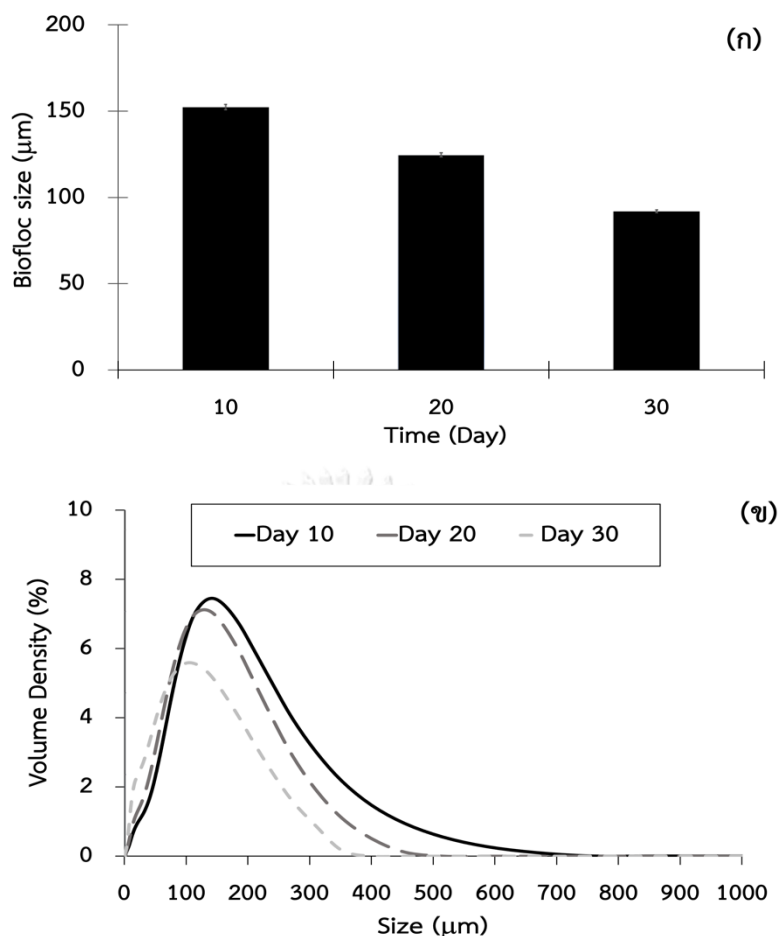
ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ทางคุณภาพตะกอนในระหว่างการเตรียมตะกอนไบโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ยเริ่มต้น	ค่าเฉลี่ยสุดท้าย	ค่าต่ำสุด – ค่าสูงสุด
- ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมด (มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล.)	242.22 ± 16.78	126.67 ± 5.77	126.67 – 421.67
- ปริมาณตะกอนที่ตกในเวลา 30 นาที (มล./ล.)	6.00 ± 0.00	30.00 ± 0.00	6.00 – 40.00
- ดัชนีปริมาณตะกอน (มล./ก.)	24.85 ± 1.70	237.16 ± 10.53	24.85 – 259.18



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลง (ก) ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (ข) ปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนในเวลา 30 นาที และ (ค) ค่าดัชนีตะกอน ระหว่างการเตรียมตะกอนไบโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 เป็นเวลา 45 วัน โดยลูกศร ↓ แสดงการเติมไนโตรเจนและสารอินทรีย์คาร์บอน (กากน้ำตาล) เข้าสู่ระบบ

เมื่อวิเคราะห์ขนาดตะกอนในระหว่างการเตรียมไบโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 เป็นเวลา 45 วัน พบว่าตะกอนไบโอฟล็อกมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 152.33 ± 1.53 , 124.67 ± 1.15 และ 91.93 ± 0.76 ไมครอน ในวันที่ 10, 20 และ 30 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.5(ก) และเมื่อพิจารณากราฟการกระจายตัวของขนาดตะกอนไบโอฟล็อกซึ่งเป็นกราฟจากการเฉลี่ยของข้อมูลตัวอย่างจากการเก็บตัวอย่างตะกอนในช่วงเวลาดังกล่าวผลการทดลองดังรูป 4.5(ข) พบว่าเมื่อเปรียบเทียบที่ร้อยละความหนาแน่นของปริมาตรตะกอนที่เท่ากันตะกอนไบโอฟล็อกในวันที่ 10 ของการบ่มตะกอนมีขนาดใหญ่กว่าวันที่ 20 และ 30 ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าในช่วงแรกที่มีการเติมไนโตรเจนและสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปกากน้ำตาลเข้าสู่ระบบ ส่งผลกระตุ้นให้เกิดการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกและทำให้ตะกอนมีขนาดใหญ่ จากนั้นตะกอนไบโอฟล็อกจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาในเดินระบบ โดยการหยุดเติมแหล่งไนโตรเจนและสารอินทรีย์คาร์บอนจะทำให้ระบบไม่มีการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกเพิ่มเติม อีกทั้งตะกอนไบโอฟล็อกคงเหลือในระบบจะเกิดการย่อยสลายภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอ โดยตะกอนไบโอฟล็อกสังเคราะห์ที่ได้จากการทดลองนี้มีขนาดอยู่ในช่วง 90-150 ไมครอน และมีขนาดเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 122.98 ± 19.20 ไมครอน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kunwong และคณะ (2022) ที่มีการวิเคราะห์ขนาดตะกอนไบโอฟล็อกที่เกิดขึ้นจากการเติมแป้งมันสำปะหลังเพื่อเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนในระหว่างการเลี้ยงปลาไน โดยพบว่าตะกอนไบโอฟล็อกจะมีขนาดใหญ่ในช่วงแรกที่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนเข้าสู่ระบบโดยมีขนาดใหญ่ที่สุดเท่ากับ 145.00 ± 4.40 ไมครอน จากนั้นตะกอนไบโอฟล็อกจะมีขนาดเล็กลงเมื่อหยุดเติมสารอินทรีย์คาร์บอน รวมไปถึงเกิดการย่อยสลายของตะกอนตามระยะเวลาในการเดินระบบที่เพิ่มขึ้น โดยมีขนาดตะกอนไบโอฟล็อกแปรผันอยู่ในช่วง 100-150 ไมครอน



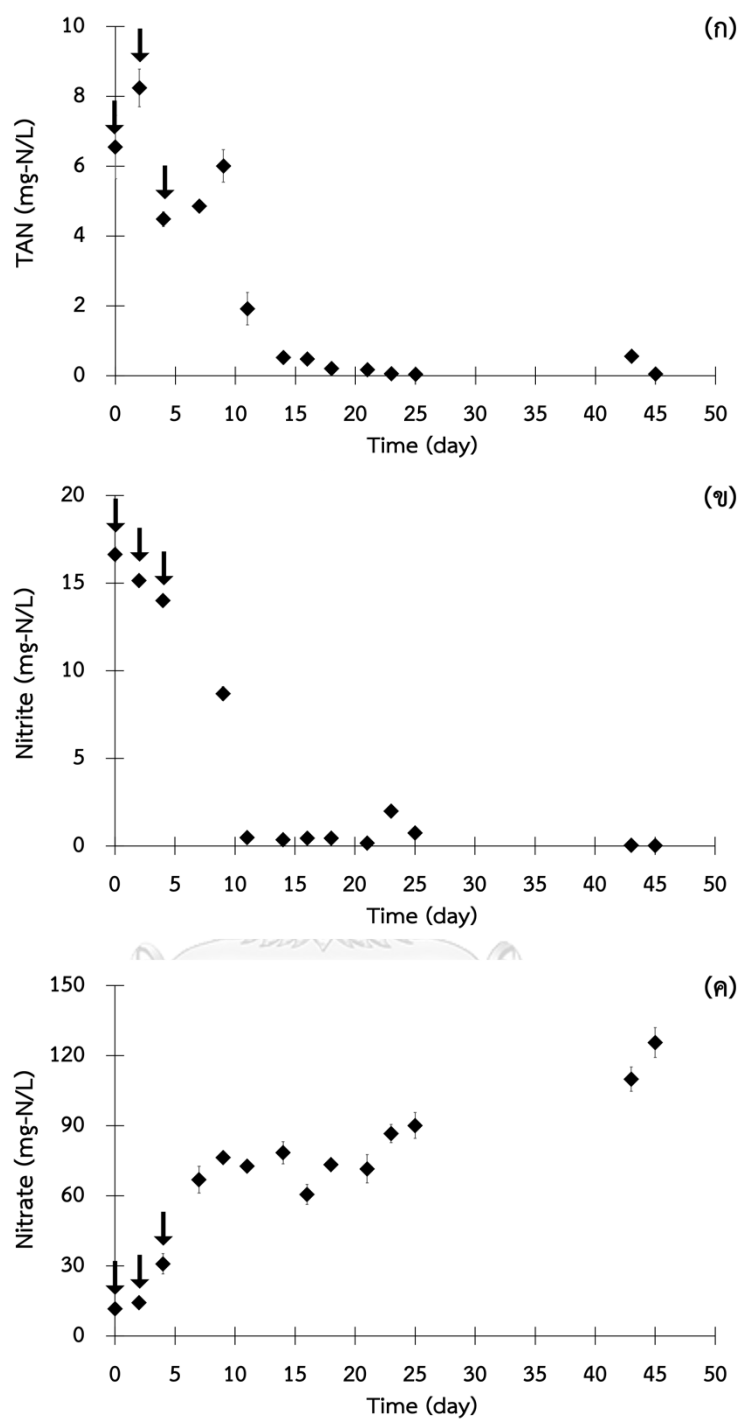
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลง (ก) ขนาดตะกอน และ (ข) การกระจายตัวของขนาดตะกอน ในระหว่างการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 เป็นเวลา 45 วัน

- การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ

การเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ไนโตรเจนในระหว่างการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 เป็นเวลา 45 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยพบว่าในช่วงแรกที่มีการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์เข้าสู่ระบบส่งผลให้แอมโมเนียเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 6.55 ± 0.91 มก.-ไนโตรเจน/ล. และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.24 ± 0.54 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 2 ของการเดินระบบ ดังรูปที่ 4.6(ก) จากนั้นแอมโมเนียในระบบมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดในวันที่ 11 ของการทดลอง โดยมีค่าเท่ากับ 1.92 ± 0.46 มก.-ไนโตรเจน/ล. และลดลงต่ำกว่า 1 มก.-ไนโตรเจน/ล. ภายหลังจากวันที่ 14 จนถึงสุดท้ายของการทดลอง (วันที่ 45) โดยมีปริมาณแอมโมเนียเท่ากับ 0.05 ± 0.01 มก.-ไนโตรเจน /ล. ทั้งนี้การลดลงของแอมโมเนียดังกล่าวเป็นผลมาจากการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน (กากน้ำตาล) เข้าสู่ระบบเพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโตแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟในการนำ

แอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ผ่านกระบวนการแอสซิมิเลชัน และเกิดร่วมกับการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟที่ทำการออกซิไดซ์แอมโมเนียให้อยู่ในรูปไนไตรต์ผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน

สำหรับการเปลี่ยนแปลงไนไตรต์ พบว่าในช่วงแรกที่มีการเติมโซเดียมไนไตรต์เข้าสู่ระบบ ส่งผลให้ไนไตรต์เริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 16.64 ± 0.43 มก.-ไนโตรเจน/ล. ดังรูปที่ 4.6(ข) ต่อมาไนไตรต์เริ่มมีแนวโน้มลดลงชัดเจนในวันที่ 9 ของการทดลอง และพบว่ามีค่าต่ำกว่า 1 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 11 ของการทดลองโดยมีค่าเท่ากับ 0.48 ± 0.13 มก.-ไนโตรเจน/ล. และมีค่าเฉลี่ยในวันสุดท้ายของการทดลอง (วันที่ 45) เท่ากับ 0.02 ± 0.01 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ทั้งนี้การลดลงของไนไตรต์เชื่อมโยงกับปริมาณไนเตรตที่เกิดขึ้น โดยปริมาณไนเตรตเฉลี่ยเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 11.64 ± 0.38 มก.-ไนโตรเจน/ล. และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบสะสมอย่างชัดเจนตั้งแต่วันที่ 5 ของการทดลอง จนมีค่าเท่ากับ 90.11 ± 5.58 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 25 ของการทดลอง และเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดในวันสุดท้ายของการทดลอง (วันที่ 45) เท่ากับ 125.59 ± 6.34 มก.-ไนโตรเจน/ล. ดังรูปที่ 4.6(ค) ซึ่งเมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของไนเตรตในช่วงวันที่ 40–45 ของการทดลองร่วมกับปริมาณของแข็งแขวนลอยที่มีค่าลดลงในช่วงเวลาดังกล่าว (รูปที่ 4.4(ก)) อาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของไนเตรตแม้ว่าในระบบจะไม่มีแอมโมเนียหลงเหลืออยู่อาจมีสาเหตุมาจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ไนโตรเจนในตะกอนภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอผ่านกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) และถูกออกซิไดซ์ต่อผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันทันทีจนอยู่ในรูปของไนเตรต ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในระหว่างการบ่มตะกอนแสดงให้เห็นว่าตะกอนไบโอฟล็อกมีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียให้อยู่ในรูปไนไตรต์ผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์โดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรียไนทริไฟอิงเมื่อเข้าสู่ช่วงสัปดาห์ที่ 2 ของการทดลอง สังเกตได้จากปริมาณไนไตรต์ที่ลดลงและถูกเปลี่ยนไปสะสมอยู่ในรูปไนเตรต อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาณไนเตรตคงเหลือในระบบในวันสุดท้ายของการเตรียมตะกอนไบโอฟล็อกพบว่ามีความเข้มข้นที่ค่อนข้างสูงกว่า 120 มก.-ไนโตรเจน/ล. ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำได้ จึงจำเป็นต้องทำการกรองเพื่อแยกส่วนสารละลายในน้ำทิ้งและลดปริมาณไนเตรตให้ต่ำกว่า 60 มก.-ไนโตรเจน/ล. ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงกุ้งขาวตามข้อแนะนำจากงานวิจัยของ Alves Neto และคณะ (2019) โดยนำเฉพาะส่วนที่เป็นตะกอนไบโอฟล็อกเพื่อไปใส่ในระบบเลี้ยงกุ้งขาวต่อไป

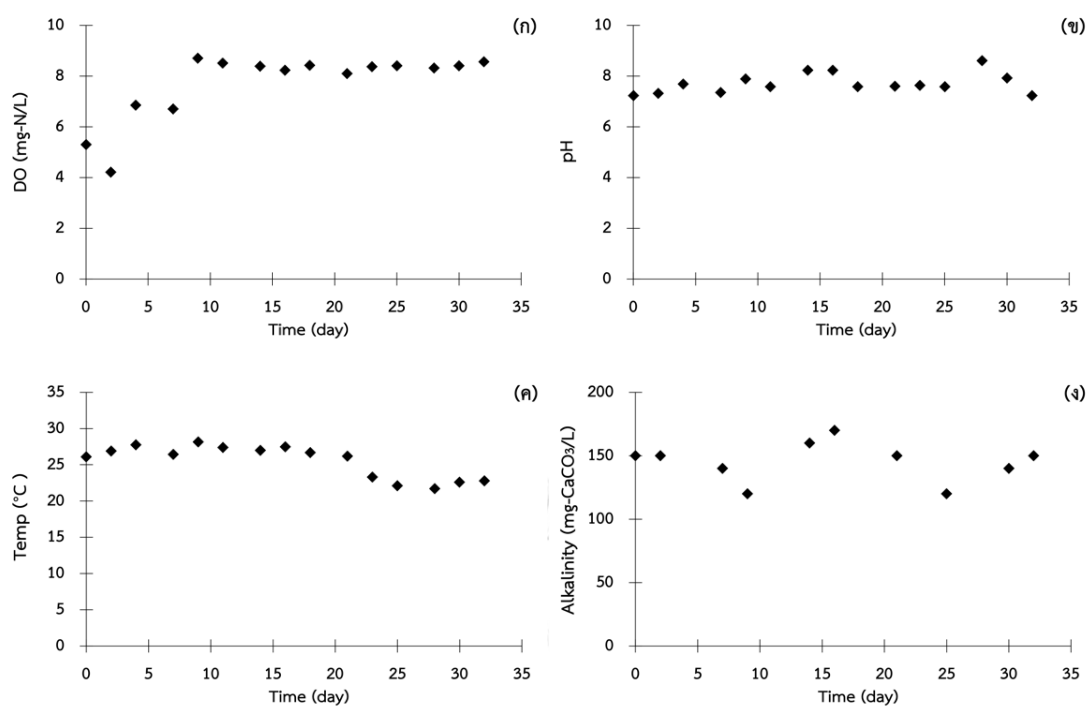


รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลง (ก) ปริมาณแอมโมเนียทั้งหมด (ข) ปริมาณไนไตรต์ และ (ค) ปริมาณไนเตรต ในระหว่างการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 เป็นเวลา 45 วัน โดยลูกศร ↓ แสดงถึงการเติมไนโตรเจนและสารอินทรีย์คาร์บอน (กากน้ำตาล) เข้าสู่ระบบ

สำหรับพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำอื่นๆ ในระหว่างการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 เป็นเวลา 45 วัน แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าแนวโน้มปริมาณออกซิเจนละลายมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่วันที่ 7 ของการทดลอง และพบว่าปริมาณออกซิเจนละลายมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 4.21-8.71 และมีค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 7.70 ± 1.35 มก.-ออกซิเจน/ล. ดังรูปที่ 4.7(ก) เนื่องจากในระหว่างการเตรียมตะกอนไบโอฟล็อกได้มีการให้อากาศผ่านหัวทรายเพียงอย่างเดียว สำหรับค่าพีเอชตลอดการทดลองค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.71 ± 0.40 อยู่ในช่วง 7.23-8.61 ดังรูปที่ 4.7(ข) ส่วนอุณหภูมิมีค่าอยู่ในช่วง 21.70-28.15 °ซ โดยมีตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดการทดลองเฉลี่ยเท่ากับ 25.51 ± 2.29 °ซ ดังรูปที่ 4.7(ค) ขณะที่ค่าอัลคาไลน์ค่อนข้างแปรปรวนมีแนวโน้มเพิ่มและลดลงสลับกัน ซึ่งการลดลงของค่าอัลคาไลน์นี้อาจเป็นผลมาจากการถูกนำไปใช้ในกระบวนการไนทริฟิเคชัน โดยในระหว่างการเตรียมตะกอนไบโอฟล็อกจะมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อควบคุมอัลคาไลน์ให้อยู่ในช่วง 100-150 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. โดยพบว่าตลอดระยะเวลาการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 145.00 ± 15.81 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ดังรูปที่ 4.7(ง)

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำในระหว่างการเตรียมตะกอนไบโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ยระหว่างการทดลอง	ค่าต่ำสุด – ค่าสูงสุด
- ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)	7.70 ± 1.35	4.21 – 8.71
- อุณหภูมิ (°ซ)	25.51 ± 2.29	21.70 – 28.10
- พีเอช	7.71 ± 0.40	7.23 – 8.61
- อัลคาไลน์ (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)	145.00 ± 15.81	120.00 – 170.00



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลง (ก) ปริมาณออกซิเจนละลาย (ข) พีเอช (ค) อุณหภูมิ และ (ง) อัลคาลินิตี้
ในระหว่างการบ่มตะกอนไปโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 เป็น
เวลา 45 วัน

4.3.2 การเลี้ยงกุ้งในระบบปิดผนวกที่กับส่วนบำบัดไบโอฟล็อกเมื่อเติมอากาศด้วยรูปแบบแตกต่างกัน

- การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพตะกอน

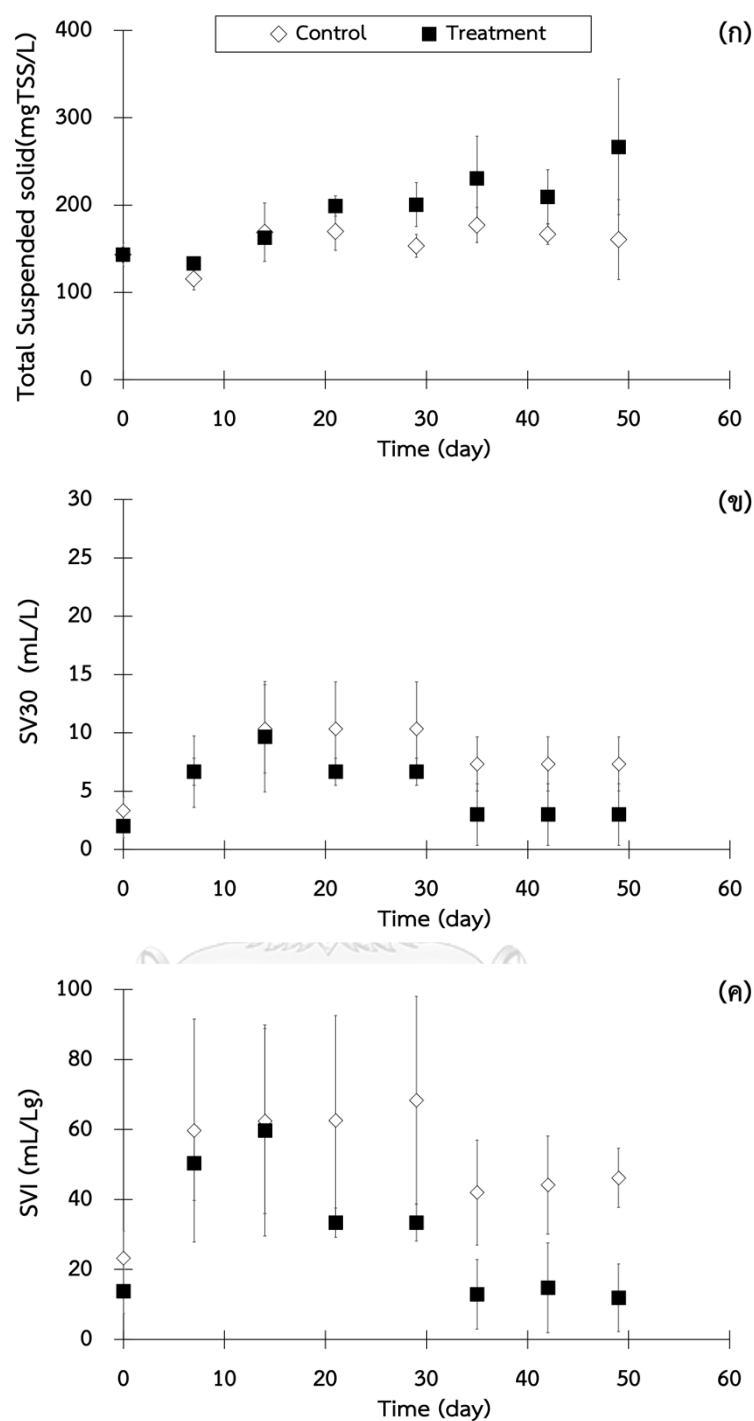
ผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอยในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน แสดงดังตารางที่ 4.7 โดยพบว่าในช่วงเริ่มต้นการทดลองปริมาณของแข็งแขวนลอยในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน เท่ากับ 143.33 ± 13.02 และ 143.33 ± 7.64 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.8(ก) สำหรับค่าเฉลี่ยของแข็งแขวนลอยในวันสุดท้ายของการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นทั้ง 2 ชุดการทดลอง โดยชุดควบคุมที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบหัวทรายมีค่าเท่ากับ 156.94 ± 19.80 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. ในขณะที่ชุดทดลองที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบเวนจูรีมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เท่ากับ 193.19 ± 25.84 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. ทั้งนี้ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากการสะสมตัวของเศษอาหารและของเสียจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำในระหว่างการเดินระบบ โดยปริมาณของแข็งแขวนลอยในทั้ง 2 ชุดการทดลองยังคงมีค่าอยู่ในระดับมาตรฐานสำหรับการเดินระบบไบโอฟล็อก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ โดยงานวิจัยของ Gaona และคณะ (2011) ระบุว่าในการเลี้ยงกุ้งควรควบคุมปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบไบโอฟล็อกให้อยู่ในช่วง 100–300 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. ในขณะที่รายงานของ พรรรถกรณ์ สิทธิพลางกูร (2556) ระบุว่าในการเลี้ยงปลานิลควรควบคุมปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบไบโอฟล็อกให้มีค่าอยู่ในช่วง 200–500 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. นอกจากนี้งานวิจัยของ Azim และคณะ (2008) ระบุว่าควรควบคุมตะกอนแขวนลอยในระบบไบโอฟล็อกไม่เกิน 500 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. เนื่องจากปริมาณตะกอนแขวนลอยที่สูงจนเกินไปจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพและผลผลิตสัตว์น้ำ รวมถึงตะกอนไบโอฟล็อกในปริมาณที่สูงจะส่งผลให้อัตราการใช้ออกซิเจนของระบบเพิ่มมากขึ้น

เมื่อพิจารณาปริมาณตะกอนที่ตกในเวลา 30 นาที (SV_{30}) ผลการทดลองดังรูปที่ 4.8(ข) พบว่าชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.88 ± 2.42 และ 5.08 ± 2.70 มล./ล. ตามลำดับ (ค่า SV_{30} ของวันที่ 0 ไม่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ) โดยค่าดังกล่าวทำให้ทราบถึงปริมาณตะกอนที่ตกลงสู่พื้นบ่อ หากปริมาณตะกอนมีค่าสูงจนเกินไปอาจทำให้เกิดการสะสมตัวของตะกอนบริเวณพื้นบ่อจนก่อให้เกิดสภาวะไร้อากาศขึ้นในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ สำหรับค่าดัชนีปริมาณตะกอน (SVI) พบว่าชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 51.07 ± 14.95 และ 28.79 ± 18.61 มล./ก. ตามลำดับ (ค่า SVI ของวันที่ 0 ไม่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ) ดังรูปที่ 4.8(ค) ทั้งนี้ค่า SVI ที่ตรวจวัดได้มีค่าค่อนข้าง

ต่ำ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่า FVI ของตะกอนไบโอฟล็อกที่มีความเสถียรควรมีค่าประมาณ 200 มล./ก. ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าตะกอนไบโอฟล็อกในชุดควบคุมและชุดทดลองมีความเร็วในการตกตะกอนที่ค่อนข้างสูงและสามารถจมตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการสะสมของตะกอนไบโอฟล็อกบริเวณพื้นบ่อ และอาจส่งผลกระทบต่อในกรณีที่มีการเลี้ยงปลาซึ่งกินอาหารชนิดลอยน้ำ โดยทำให้ปลาไม่สามารถกินตะกอนไบโอฟล็อกได้ทันก่อนจมลงสู่พื้นบ่อ (De Schryver และคณะ, 2008) อย่างไรก็ตามในการทดลองเป็นการเลี้ยงกุ้ง ซึ่งมีพฤติกรรมการหาอาหารบริเวณพื้นบ่อ อีกทั้งในระหว่างการทดลองมีการเติมอากาศแบบหัวทรายและแบบเวนจูรีอย่างทั่วถึง รวมถึงมีการกวนผสมตะกอนในบ่อเป็นระยะเพื่อลดปริมาณตะกอนจมตัว และป้องกันการเกิดสภาวะไร้อากาศและการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์บริเวณพื้นบ่อ

ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ทางคุณภาพตะกอนในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน
ในชุดควบคุมที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบหัวทราย และชุดทดลองที่ติดตั้งระบบเติม
อากาศแบบเวนจูรี

พารามิเตอร์	ชุดการทดลอง	
	ชุดควบคุม	ชุดทดสอบ
ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมด (มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล.)		
- ค่าต่ำสุด - สูงสุด	115.56 – 177.22	133.33 – 266.67
- ค่าเฉลี่ยเริ่มต้น	143.33±13.02	143.33±7.64
- ค่าเฉลี่ยสุดท้าย	160.65±45.90	266.67±77.62
ปริมาณตะกอนที่ตกในเวลา 30 นาที (มล./ล.)		
- ค่าต่ำสุด - สูงสุด	3.33 – 10.33	2.00 – 9.67
- ค่าเฉลี่ยเริ่มต้น	3.33±1.15	2.00±1.00
- ค่าเฉลี่ยสุดท้าย	7.33±2.31	3.00±2.65
ดัชนีปริมาณตะกอน (มล./ก.)		
- ค่าต่ำสุด - สูงสุด	23.31 – 68.34	11.91 – 59.72
- ค่าเฉลี่ยเริ่มต้น	23.21±7.76	13.76±6.26
- ค่าเฉลี่ยสุดท้าย	46.18±8.43	11.91±9.64

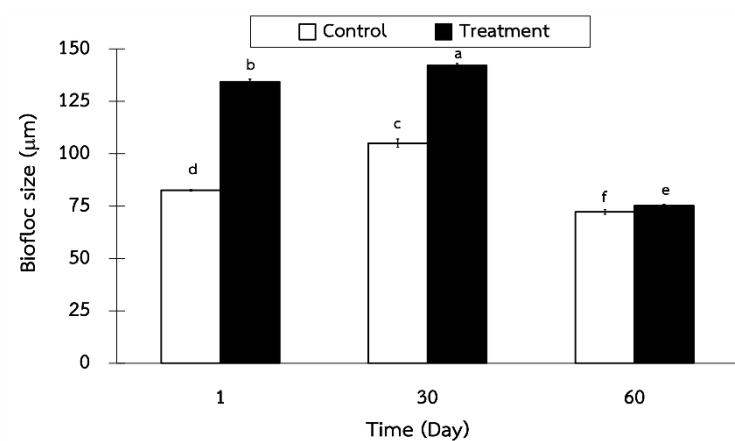


รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลง (ก) ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (ข) ปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนในเวลา 30 นาที และ (ค) ค่าดัชนีปริมาณตะกอน ในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน ในชุดควบคุมที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบหัวทราย และชุดทดลองที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบเวนจูรี

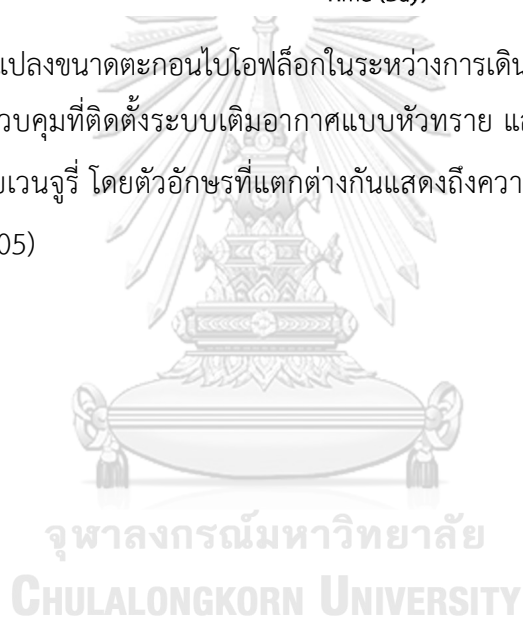
เมื่อทำการวิเคราะห์ขนาดตะกอนไบโอฟล็อกในวันที่ 1, 30 และ 60 ระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ พบว่าในชุดควบคุมที่ติดตั้งระบบเดิมอากาศแบบหัวทรายมีขนาดตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 82.53 ± 0.53 , 105 ± 2.00 และ 72.20 ± 1.11 ไมครอน ตามลำดับ ส่วนชุดทดลองที่ติดตั้งระบบเดิมอากาศแบบเวนจูร์มีขนาดตะกอนเฉลี่ยเท่ากับ 134.33 ± 1.15 , 142.00 ± 1.00 และ 75.23 ± 0.55 ไมครอน ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.9 ทั้งนี้ขนาดตะกอนไบโอฟล็อกที่แตกต่างกันในวันแรกของการเดินระบบในชุดควบคุมและชุดทดลองอาจเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างที่ทำการกวนผสมไม่ดีพอ ส่งผลให้ตะกอนบางส่วนจมตัวบริเวณพื้นบ่อและทำให้ผลการวิเคราะห์ขนาดตะกอนคลาดเคลื่อนจากขนาดจริง สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดตะกอนไบโอฟล็อกตามช่วงระยะเวลาการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ สามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มขึ้นของขนาดตะกอนในช่วงเดือนแรกของการเดินระบบ (วันที่ 1–30) อาจเป็นผลจากการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ ที่ดูดซึมของเสียจากเศษอาหารและสิ่งขับถ่ายของสัตว์น้ำในรูปสารอินทรีย์ในโตรเจน และดูดซึมสารอินทรีย์คาร์บอนที่คงเหลือในระบบเพื่อนำไปสังเคราะห์เซลล์ใหม่ ส่งผลให้เกิดการรวมตัวของตะกอนไบโอฟล็อกจนได้ตะกอนขนาดใหญ่ ในขณะที่เมื่อเดินระบบต่อเนื่องนานขึ้น (วันที่ 31–60) พบว่าตะกอนไบโอฟล็อกมีขนาดเล็กลง อาจเป็นผลจากการแตกตัวของตะกอนไบโอฟล็อกในระบบที่มีความปั่นป่วนจากการเติมอากาศ ร่วมกับย่อยสลายของตะกอนซึ่งเป็นสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะมีอากาศอย่างเพียงพอ (Aerobic digestion) จนทำให้ตะกอนมีขนาดเล็กลงกว่าช่วงเริ่มต้นการเดินระบบ

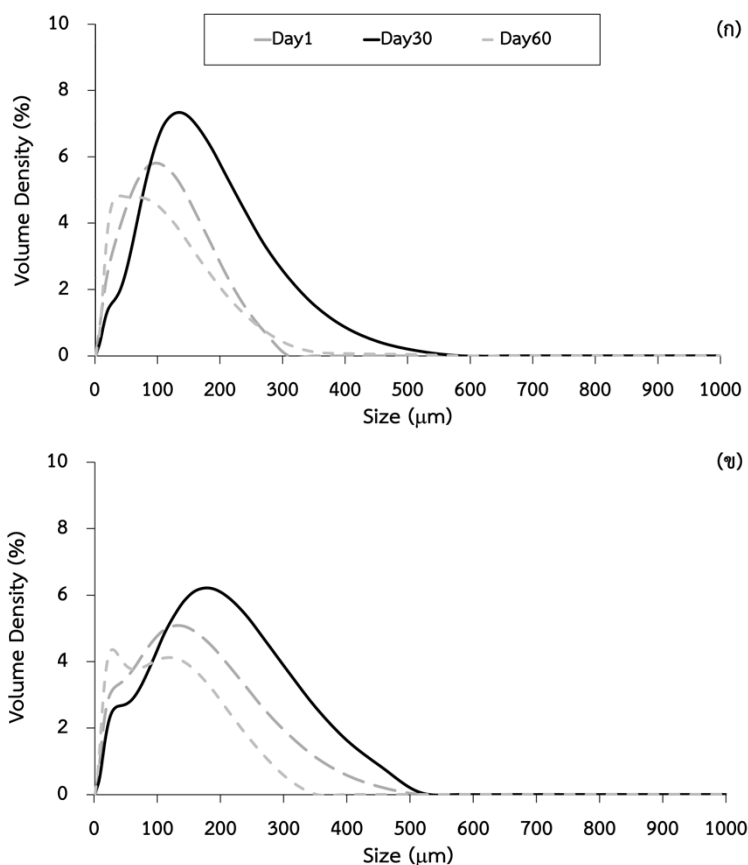
เมื่อเปรียบเทียบกราฟการกระจายตัวของขนาดตะกอนในชุดควบคุมที่ติดตั้งระบบเดิมอากาศแบบหัวทราย และชุดทดลองที่ติดตั้งระบบเดิมอากาศแบบเวนจูร์ พบว่าตะกอนไบโอฟล็อกในชุดควบคุมและชุดทดลองมีการกระจายตัวของขนาดตะกอนไบโอฟล็อกในทิศทางเดียวกัน โดยตะกอนไบโอฟล็อกกระจายตัวอยู่ในช่วง 30–150, 50–300 และ 50–200 ไมครอน ในวันที่ 1, 30 และ 60 ของการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.10(ก) และ (ข) ซึ่งเป็นกราฟจากการเฉลี่ยข้อมูลจากผลวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ซ้ำ โดยพบว่าการติดตั้งเครื่องสูบน้ำในระบบเดิมอากาศแบบเวนจูร์เพื่อเคลื่อนมวลน้ำผ่านเวนจูร์วาล์วไม่ส่งผลทำให้ตะกอนมีขนาดลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งเครื่องสูบน้ำ ทั้งนี้จากกล่าวได้ว่ารูปแบบการเติมอากาศที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อความแตกต่างของขนาดตะกอนไบโอฟล็อกในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยขนาดตะกอนไบโอฟล็อกในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 70–150 ไมครอน ซึ่งใกล้เคียงกับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำอื่นๆ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ เศรษฐศักดิ์ ดิวนันทกร (2557) ที่รายงานขนาดตะกอนแขวนลอยในช่วง 150–250 ไมครอน ในระบบเลี้ยงปลานิลแบบหมุนเวียนที่มีการติดตั้งระบบแยกตะกอน และงานวิจัยของสุตา

คุณวงศ์ (2559) ที่รายงานขนาดตะกอนไบโอฟล็อกในช่วง 100-150 ไมครอน ในระบบเลี้ยงปลานิล ด้วยระบบไบโอฟล็อกจากการเติมแอมโมเนียสำหรับเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงขนาดตะกอนไบโอฟล็อกในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน ในชุดควบคุมที่ติดตั้งระบบเดิมอากาศแบบหัวทราย และชุดทดลองที่ติดตั้งระบบเดิมอากาศแบบเวนจูรี โดยตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)





รูปที่ 4.10 การกระจายตัวของขนาดตะกอนไบโอฟล็อกในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน โดย (ก) ชุดควบคุมที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบหัวทราย และ (ข) ชุดทดลองที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบเวนจูรี

- การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ

ผลการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ไนโตรเจนระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน แสดงดังตารางที่ 4.8 โดยพบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกันในชุดควบคุมที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบหัวทราย และชุดทดลองที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบเวนจูรี โดยความเข้มข้นแอมโมเนียในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0.26 ± 0.09 และ 0.22 ± 0.04 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.11(ก) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุด โดยชุดควบคุมมีค่าสูงสุด 1.27 ± 0.09 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 21 ของการทดลอง ส่วนชุดทดลองมีค่าสูงสุด 0.83 ± 0.21 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 28 ของการทดลอง ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียในระบบเป็นผลมาจากการย่อยสลายของเสียที่เกิดขึ้นจากเศษอาหารและสิ่งขับถ่ายของสัตว์น้ำในรูปสารอินทรีย์ไนโตรเจน และถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียผ่านกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน

(Ammonification) เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นแอมโมเนียในชุดควบคุมและชุดทดลองมีแนวโน้มลดลงจนมีค่าเท่ากับ 0.63 ± 0.01 และ 0.44 ± 0.19 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 30 ของการทดลอง และพบการสะสมของแอมโมเนียเล็กน้อยเท่ากับ 0.66 ± 0.22 และ 0.34 ± 0.28 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในช่วงวันที่ 40-45 ของการทดลอง อย่างไรก็ตามในระหว่างการเดินระบบพบว่าค่าเฉลี่ยในวันที่ 31-60 ของการทดลองในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 0.23 ± 0.22 และ 0.19 ± 0.12 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตะกอนไบโอฟล็อกมีความสามารถในการควบคุมความเข้มข้นแอมโมเนียให้มีค่าต่ำกว่า 1 มก.-ไนโตรเจน/ล. ซึ่งเป็นระดับที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ (Emerenciano และคณะ, 2017)

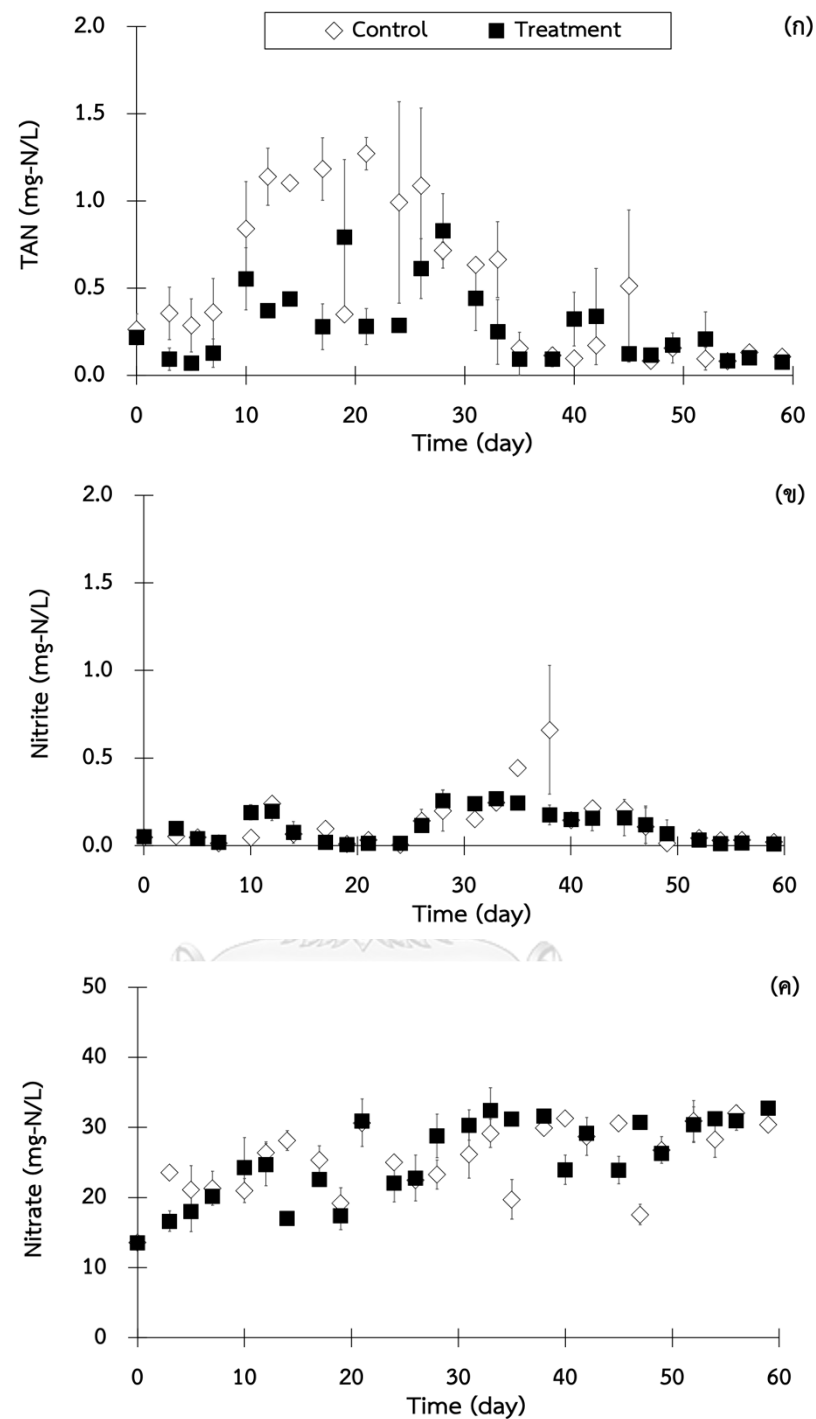
การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไตรต์ ดังรูปที่ 4.11(ข) พบว่าความเข้มข้นไนไตรต์ในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0.05 ± 0.01 มก.-ไนโตรเจน/ล. และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงวันที่ 10-12 ของการทดลอง โดยพบการคงค้างของไนไตรต์อย่างเห็นได้ชัดในช่วงวันที่ 25-50 โดยมีค่าเฉลี่ยในชุดควบคุมและชุดทดลองเท่ากับ 0.21 ± 0.18 และ 0.17 ± 0.08 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นและคงค้างของไนไตรต์สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแอมโมเนียในระบบที่ลดลงภายหลังการทดลองเป็นเวลา 30 วัน สามารถอธิบายได้ว่าเป็นผลมาจากการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มออกซิไดซ์แอมโมเนียที่เจริญเติบโตในตะกอนไบโอฟล็อกซึ่งเปลี่ยนแอมโมเนียให้อยู่ในรูปไนไตรต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอ อย่างไรก็ตามในช่วงสุดท้ายของการทดลองพบว่าไนไตรต์มีค่าลดลงจนเหลือ 0.01 มก.-ไนโตรเจน/ล. ทั้งนี้ความเข้มข้นของไนไตรต์ตลอดการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน มีค่าต่ำกว่า 1 มก.-ไนโตรเจน/ล. ซึ่งเป็นระดับที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ (Emerenciano และคณะ, 2017) เช่นกัน

การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรต ดังรูปที่ 4.11 (ค) พบว่าความเข้มข้นไนเตรตในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 13.62 ± 0.10 มก.-ไนโตรเจน/ล. โดยไนเตรตดังกล่าวเป็นค่าคงค้างมาจากการขั้นตอนการเตรียมตะกอนไบโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 เป็นเวลานาน 45 วัน ทำให้เกิดการสะสมของไนเตรตสูงถึง 125.59 ± 6.34 มก.-ไนโตรเจน/ล. (รูปที่ 4.6(ค)) จากค่าดังกล่าวเป็นความเข้มข้นในระดับที่สูงซึ่งส่งผลกระทบต่อ การเลี้ยงสัตว์น้ำ ดังนั้นจึงมีการกรองเพื่อแยกเฉพาะส่วนที่เป็นตะกอนไบโอฟล็อกมาใส่ในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ อย่างไรก็ตามอาจมีไนเตรตบางส่วนหลงเหลืออยู่ จึงทำให้ไนเตรตเริ่มต้นในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าสูงดังกล่าว โดยระหว่างการเลี้ยงสัตว์น้ำปริมาณไนเตรตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มระยะเวลาใน

การเดินระบบ โดยในวันสุดท้ายของการทดลองในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 30.40 ± 0.85 และ 32.80 ± 0.60 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของไนเตรตเป็นผลโดยตรงมาจากการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มออกซิไดซ์ไนโตรที่ที่สามารถเปลี่ยนไนโตรให้อยู่ในรูปของไนเตรตได้อย่างมีประสิทธิภาพผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันภายใต้สภาวะที่มีอากาศ โดยความเข้มข้นไนเตรตที่เกิดขึ้นในชุดควบคุมและชุดทดลองยังคงมีค่าต่ำกว่า 60 มก.-ไนโตรเจน/ล. ซึ่งเป็นระดับมาตรฐานที่ปลอดภัยสำหรับการเลี้ยงกุ้งขาวที่ความเค็มต่ำ (Alves Neto และคณะ, 2019) อย่างไรก็ตามหากทำการเดินระบบในระยะยาวอาจส่งผลให้เกิดการสะสมไนเตรตมีให้ค่าเพิ่มขึ้นและส่งกระทบต่อสุขภาพสัตว์น้ำ ดังนั้นต้องมีการพิจารณาเพิ่มเติมหน่วยบำบัดไนตริฟิเคชันเพื่อช่วยลดความเป็นพิษของไนเตรตในระบบ

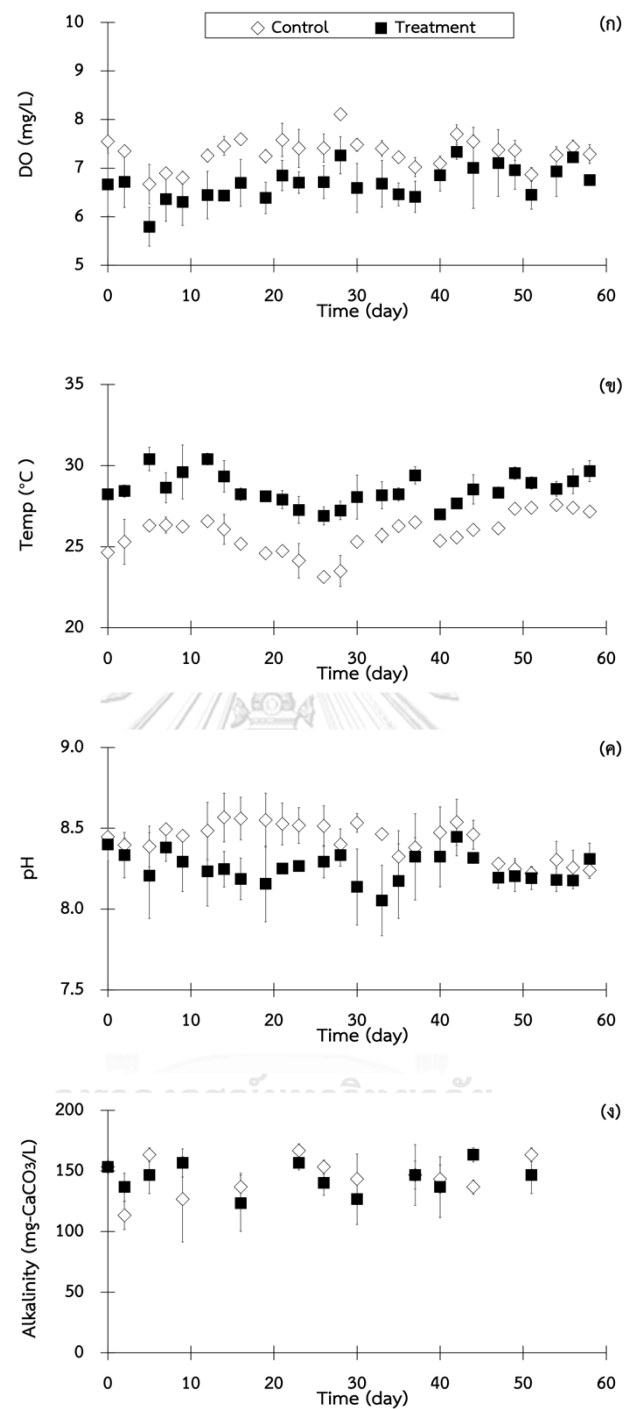
ตารางที่ 4.8 สารอนินทรีย์ไนโตรเจนระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน ในชุดควบคุมที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบหัวทราย และชุดทดลองที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบเวนจูรี

พารามิเตอร์	ชุดการทดลอง	
	ชุดควบคุม	ชุดทดสอบ
ปริมาณแอมโมเนีย (มก.-ไนโตรเจน/ล.)		
- ค่าเฉลี่ยเริ่มต้น	0.26 ± 0.09	0.22 ± 0.04
- ค่าเฉลี่ยสุดท้าย	0.11 ± 0.22	0.08 ± 0.02
ปริมาณไนไตรต์ (มก.-ไนโตรเจน/ล.)		
- ค่าเฉลี่ยเริ่มต้น	0.05 ± 0.00	0.05 ± 0.01
- ค่าเฉลี่ยสุดท้าย	0.02 ± 0.01	0.01 ± 0.00
ปริมาณไนเตรต (มก.-ไนโตรเจน/ล.)		
- ค่าเฉลี่ยเริ่มต้น	13.60 ± 0.10	13.60 ± 0.01
- ค่าเฉลี่ยสุดท้าย	30.40 ± 0.85	32.80 ± 0.60



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลง (ก) ปริมาณแอมโมเนียทั้งหมด (ข) ปริมาณไนไตรต์ และ (ค) ปริมาณไนเตรต ในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน ในชุดควบคุมที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบหัวทราย และชุดทดลองที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบเวนจูรี

การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำอื่นๆ ระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน แสดงดังตารางที่ 4.9 พบค่าเฉลี่ยปริมาณออกซิเจนละลายในชุดควบคุมเท่ากับ 7.32 ± 0.30 มก.-ออกซิเจน/ล. โดยมีค่าอยู่ในช่วง 6.67–8.11 มก.-ออกซิเจน/ล. ส่วนชุดทดลองเท่ากับ 6.70 ± 0.34 มก.-ออกซิเจน/ล. มีค่าต่ำสุดในช่วง 5.79 และสูงสุดเท่ากับ 7.33 มก.-ออกซิเจน/ล. ดังรูปที่ 4.12 (ก) สำหรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในชุดควบคุมพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 23.13–27.63 °ซ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 25.85 ± 1.21 °ซ และชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 28.57 ± 0.95 °ซ มีค่าอยู่ในช่วง 26.90–30.40 °ซ ดังรูปที่ 4.12 (ข) จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในชุดทดลองมีค่าสูงกว่าชุดควบคุม ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดจากการทำงานของเครื่องสูบน้ำในระบบเดิมอากาศแบบเวนจูรี จนทำให้อุณหภูมิของน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำสูงขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิดังกล่าวยังอยู่ในช่วง 26–31 °ซ ซึ่งเป็นระดับที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ (Araneda และคณะ, 2020) ทั้งนี้ค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นในชุดทดลองอาจส่งผลกระทบทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายในชุดทดลองต่ำกว่าชุดควบคุม ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการประยุกต์ใช้ระบบเดิมอากาศแบบเวนจูรีกับระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ (Boyd, 2018) รูปที่ 4.12 (ค) แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในระหว่างการเดินระบบพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าเฉลี่ยในชุดควบคุมเท่ากับ 8.42 ± 0.11 ค่าสูงสุด-ต่ำสุดอยู่ในช่วง 8.22–8.57 ขณะที่ชุดทดลองเท่ากับ 8.25 ± 0.09 และอยู่ในช่วง 8.05 – 8.45 เช่นเดียวกับกับค่าอัลคาลินิตี ที่ค่าเฉลี่ยในชุดควบคุมเท่ากับ 145.56 ± 15.85 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. อยู่ในช่วง 113.33 – 166.67 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. และชุดทดลองเท่ากับ 144.44 ± 12.25 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. อยู่ในช่วง 123.33 – 163.33 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ดังรูปที่ 4.12(ง) ซึ่งการควบคุมค่าอัลคาลินิตีให้อยู่ในช่วง 100–150 มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ตลอดระยะเวลาการทดลองด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตมีส่วนช่วยในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้ โดยไม่มีความจำเป็นต้องเติมสารเคมีเพื่อควบคุมค่าพีเอชโดยตรง โดยสรุปสามารถกล่าวได้ว่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากการทดลองนี้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเกิดกิจกรรมของจุลินทรีย์และการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำในระบบไบโอฟิล็อก (De Schryver และคณะ, 2008; Timmons และคณะ, 2018)



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลง (ก) ปริมาณออกซิเจนละลาย (ข) อุณหภูมิ (ค) พีเอช และ (ง) ค่าอัลคาไลน์ตี้นระหว่างการเดินทางระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน ในชุดควบคุมที่มีการติดตั้งระบบเติมอากาศแบบหัวทราย และชุดทดลองที่มีการติดตั้งระบบเติมอากาศแบบวนจวน

ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน ในชุดควบคุมที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบหัวทราย และชุดทดลองที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบเวนจูรี

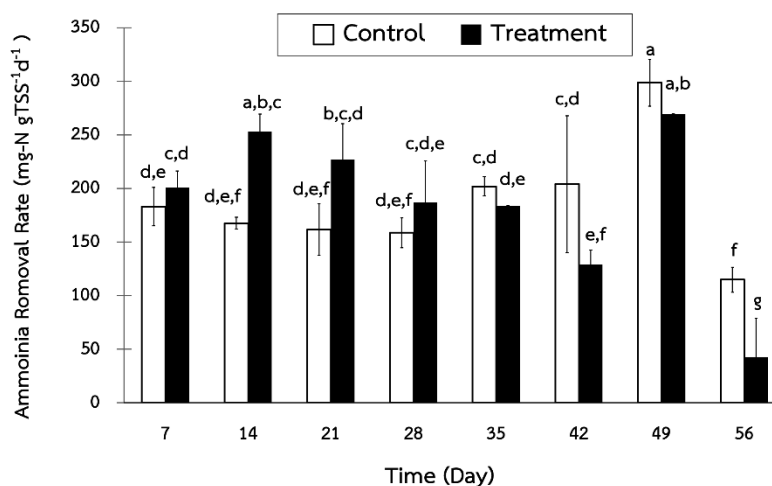
พารามิเตอร์	ชุดการทดลอง	
	ชุดควบคุม	ชุดทดสอบ
ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.-ออกซิเจน/ล.)		
- ค่าต่ำสุด - สูงสุด	6.67 – 8.11	5.79 – 7.33
- ค่าเฉลี่ย	7.32±0.30	6.70±0.34
อุณหภูมิ (°C)		
- ค่าต่ำสุด - สูงสุด	23.13 – 27.63	26.90 – 30.40
- ค่าเฉลี่ย	25.85±1.21	28.57±0.95
พีเอช		
- ค่าต่ำสุด - สูงสุด	8.22 – 8.57	8.05 – 8.45
- ค่าเฉลี่ย	8.42±0.11	8.25±0.09
อัลคาลินิตี (มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)		
- ค่าต่ำสุด - สูงสุด	113.33 – 166.67	123.33 – 163.33
- ค่าเฉลี่ย	145.56±15.86	144.44±12.25

4.3.3 อัตราการกำจัดแอมโมเนียและการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อก

- ความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อก

จากการประเมินความสามารถของตะกอนไบโอฟล็อกในการกำจัดแอมโมเนียในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน พบว่าอัตราการกำจัดแอมโมเนียในชุดควบคุมที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบหัวทราย และชุดทดลองที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบเวนจูรี มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 182.99 ± 17.88 และ 200.86 ± 15.36 มก.-ไนโตรเจน/ก.-ของแข็งแขวนลอย/วัน ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.13 โดยในระหว่างการเดินระบบพบว่าอัตราการกำจัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกในชุดควบคุมและชุดทดลองมีการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือในชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 174.8 ± 31.00 มก.-ไนโตรเจน/ก.-ของแข็งแขวนลอย/วัน มีค่าต่ำสุด-สูงสุดในช่วง 114.91–206.50 มก.-ไนโตรเจน/ก.-ของแข็งแขวนลอย/วัน และชุดทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 179.4 ± 52.4 มก.-ไนโตรเจน/ก.-ของแข็งแขวนลอย/วัน อยู่ในช่วง 83.20–253.00 มก.-ไนโตรเจน/ก.-ของแข็ง

แขวนลอย/วัน ทั้งนี้อาจกล่าวได้ว่ารูปแบบการเติมอากาศที่แตกต่างกันในชุดควบคุมและชุดทดลองไม่ส่งผลต่ออัตราการกำจัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

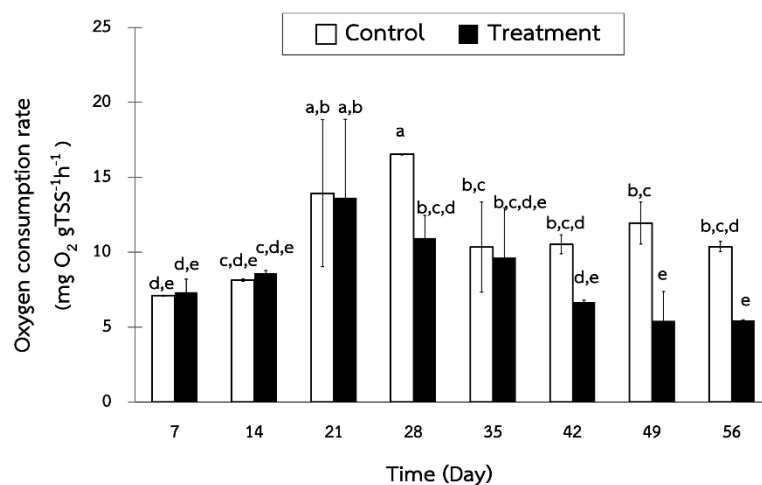


รูปที่ 4.13 อัตราการกำจัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกระหว่างเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน ในชุดควบคุมที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบหัวทราย และชุดทดลองที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบเวนจูรี โดยตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

- อัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อก

จากการประเมินอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อกในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน พบว่าในชุดควบคุมที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบหัวทราย และชุดทดลองที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบเวนจูรี มีค่าอัตราการใช้ออกซิเจนเริ่มต้นเท่ากับ 7.10 ± 0.02 และ 7.33 ± 0.86 มก.-ออกซิเจน/ก.-ของแข็งแขวนลอย/ชม. ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.14 จากนั้นอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเท่ากับ 16.52 ± 0.04 และ 10.95 ± 1.50 มก.-ออกซิเจน/ก.-ของแข็งแขวนลอย/ชม. ในวันที่ 28 ของการทดลอง และค่อยๆ ลดลงตามลำดับ โดยมีอัตราการใช้ออกซิเจนในวันสุดท้ายของการทดลองสำหรับชุดควบคุมและชุดทดลองเท่ากับ 10.36 ± 0.35 และ 5.45 ± 0.03 มก.-ออกซิเจน/ก.-ของแข็งแขวนลอย/ชม. ตามลำดับ ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อกในช่วงแรก (วันที่ 1–30) และการลดลงในช่วงหลังของการทดลอง (วันที่ 31–60) อาจเป็นผลสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นและลดลงของขนาดตะกอนแขวนลอยที่ตรวจพบในระหว่างการเดินระบบ (รูปที่ 4.8) โดยในช่วงแรกของการเดินระบบที่มีการดูดซึมของเสียไนโตรเจนและสารอินทรีย์คาร์บอนคงเหลือเพื่อสร้างตะกอนไบโอฟล็อก ส่งผลให้

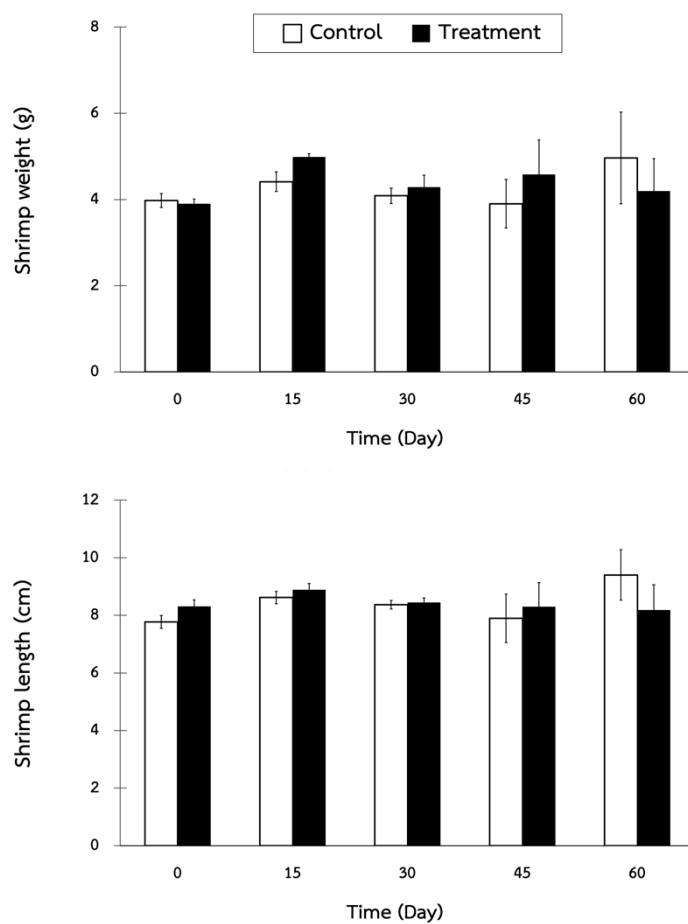
ตะกอนมีขนาดใหญ่และมีอัตราการใช้ออกซิเจนในกระบวนการหายใจระดับเซลล์เพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเดินระบบต่อเนื่องนานขึ้นจะเกิดการแตกตัวของตะกอนร่วมกับกระบวนการย่อยสลาย ทำให้ตะกอนมีขนาดเล็กลงและมีอัตราการใช้ออกซิเจนลดลง โดยอัตราการใช้ออกซิเจนเฉลี่ยตลอดการเดินระบบในชุดควบคุมมีค่าเท่ากับ 11.10 ± 3.03 มก.-ออกซิเจน/ก.-ของแข็งแขวนลอย/ชม. และชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 8.46 ± 2.86 มก.-ออกซิเจน/ก.-ของแข็งแขวนลอย/ชม. ตามลำดับ โดยในชุดควบคุมและชุดทดลองมีปริมาณตะกอนแขวนลอยเฉลี่ยตลอดการเดินระบบเท่ากับ 156.94 ± 19.80 และ 193.19 ± 25.84 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. ตามลำดับ ซึ่งเมื่อคำนวณอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อกทั้งหมดในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ (คำนวณที่ปริมาตรรวม 200 ล.) ดังสมการที่ 3.4 พบว่าอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อกในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 348.54 และ 328.10 มก.-ออกซิเจน/ชม. ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาปริมาณออกซิเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำซึ่งมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเฉลี่ยในระบบประมาณ 7 มก.-ออกซิเจน/ล. คิดเป็นปริมาณออกซิเจนละลายทั้งหมด 1,400 มก.-ออกซิเจน ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณออกซิเจนดังกล่าวทั้งในชุดควบคุมและชุดทดลองคาดว่าจะถูกตะกอนไบโอฟล็อกใช้หมดภายในเวลาประมาณ 4 ชม. หากไม่มีการเติมอากาศเพิ่มเติมเพื่อรักษาระดับปริมาณออกซิเจนละลายในระบบ ดังนั้นในระหว่างการเลี้ยงสัตว์น้ำจึงจำเป็นต้องมีการเติมอากาศตลอดเวลาให้เพียงพอเพื่อรักษาระดับออกซิเจนละลายน้ำให้เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในตะกอนไบโอฟล็อก และควบคุมปริมาณออกซิเจนให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ



รูปที่ 4.14 อัตราการกำจัดการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟลักรระหว่างเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน ในชุดควบคุมที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบหัวทราย และชุดทดลองที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบเวนจูรี โดยตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

4.3.4 การเจริญเติบโตของสัตว์น้ำในระหว่างการทดลอง

การเจริญเติบโตของกุ้งขาวในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน แสดงดังรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.10 พบว่าน้ำหนักกุ้งขาวเริ่มต้นในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 3.98 ± 0.16 และ 3.90 ± 0.11 ก. และความยาวกุ้งเริ่มต้นในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 7.77 ± 0.22 และ 8.31 ± 0.22 ซม. ตามลำดับ จากนั้นเมื่อเดินระบบครบ 30 วัน พบว่าในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักกุ้งขาวเท่ากับ 4.09 ± 0.18 และ 4.29 ± 0.28 ก. และความยาวกุ้งขาวเท่ากับ 8.37 ± 0.15 และ 8.45 ± 0.15 ซม. ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นอัตราการเจริญเติบโตเท่ากับ 0.004 ± 0.003 และ 0.013 ± 0.012 ก./วัน ในขณะที่เมื่อเดินระบบครบ 60 วัน พบว่าในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักกุ้งขาวเท่ากับ 4.96 ± 1.06 และ 4.19 ± 0.75 ก. และความยาวกุ้งขาวเท่ากับ 9.40 ± 0.88 และ 8.19 ± 0.88 ซม. ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นอัตราการเจริญเติบโตเท่ากับ 0.025 ± 0.001 และ 0.010 ± 0.009 ก./วัน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำในชุดควบคุมและชุดทดลองพบว่าให้ผลกาทดลองที่ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากทั้ง 2 ระบบมีการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ไนโตรเจน ปริมาณตะกอนไบโอฟลักร และพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำอื่นๆ ที่ใกล้เคียงกัน จึงส่งผลให้การเจริญเติบโตของกุ้งขาวในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลง (ก) น้ำหนักกุ้ง และ (ข) ความยาวกุ้งในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน ในชุดควบคุมที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบหัวทราย และชุดทดลองที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบเวนจูรี

ตารางที่ 4.10 พารามิเตอร์การเจริญเติบโตของกุ้งขาวในระหว่างการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 60 วัน ในชุดควบคุมที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบหัวทราย และชุดทดลองที่ติดตั้งระบบเติมอากาศแบบเวนจูรี

พารามิเตอร์	ชุดการทดลอง	
	ชุดควบคุม	ชุดทดสอบ
- ระยะเวลาในการเลี้ยง (วัน)	60	60
- น้ำหนักเริ่มต้น (ก.)	3.98±0.16	3.90±0.11
- น้ำหนักสุดท้าย (ก.)	4.96±1.06	4.19±0.75
- ความยาวเริ่มต้น (ซม.)	7.77±0.22	8.31±0.22
- ความยาวสุดท้ายสุดท้าย (ซม.)	9.40±0.88	8.19±0.88
- ความหนาแน่นเริ่มต้น (กก./ลบ.ม.)	0.30	0.30
- ความหนาแน่นสุดท้าย (กก./ลบ.ม.)	0.07	0.06
- อัตราการเจริญเติบโต วันที่ 1-30 (ก./วัน)	0.004±0.003	0.013±0.012
- อัตราการเจริญเติบโต วันที่ 31-60 (ก./วัน)	0.025±0.001	0.010±0.009

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของรูปแบบการเติมอากาศเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่ผนวกส่วนบำบัดแบบไบโอฟล็อก โดยในช่วงแรกของการทดลองศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจน ช่วงที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศของอุปกรณ์เติมอากาศแบบหัวทรายและแบบเวนจูรีดัดแปลง และสุดท้ายเป็นการศึกษาประสิทธิภาพของระบบเติมอากาศในการเดินระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่ผนวกกับส่วนบำบัดแบบไบโอฟล็อก ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกเพื่อกำจัด สารอินทรีย์ไนโตรเจนในชุดควบคุมและชุดทดลองที่แปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 3 ระดับ เท่ากับ 5:1, 10:1 และ 15:1 เป็นเวลา 30 วัน พบว่าการเติมกากน้ำตาลเพื่อเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนควบคู่กับการเติมแหล่งไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมคลอไรด์ โซเดียมไนไตรต์ และอาหารกุ้งบดละเอียด เข้าสู่ระบบในระหว่างการบ่มเชื้อจะกระตุ้นให้เกิดการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียในการสร้างตะกอนไบโอฟล็อก โดยปริมาณตะกอนแขวนลอยมีค่าแปรผันตามการเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบ ทั้งนี้การเติมกากน้ำตาลที่สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 เป็นสัดส่วนที่เพียงพอในการสร้างตะกอนไบโอฟล็อกที่สามารถกำจัดแอมโมเนียและไนไตรต์ผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ ภายในการบ่มตะกอนเป็นเวลา 12 วัน โดยมีค่าต่ำกว่า 0.30 และ 0.50 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ และมีปริมาณไนเตรดคงค้างอยู่ในระบบเท่ากับ 44.2 ± 10.5 มก.-ไนโตรเจน/ล. และโดยมีปริมาณตะกอนไบโอฟล็อกที่ถูกผลิตขึ้นเท่ากับ 470.00 ± 14.14 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล.

2. การศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศของอุปกรณ์เติมอากาศแบบหัวทรายและแบบเวนจูรีดัดแปลง พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิใดๆ มีค่าเท่ากับ 0.18 ± 0.00 และ 0.70 ± 0.01 /ชม. อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน มีค่าเท่ากับ 0.36 ± 0.01 และ 1.38 ± 0.18 กก.-ออกซิเจน/ชม.ประสิทธิภาพในการถ่ายเทอากาศที่สภาวะมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 8.97 ± 0.15 และ 57.68 ± 0.18 กก.-ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม. และประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนที่

สภาวะมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 1.98 ± 0.03 และ $7.73 \pm 0.99\%$ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรีดัดแปลงมีประสิทธิภาพในการเติมอากาศมากกว่าแบบหัวทราย

3. การศึกษาประสิทธิภาพการเติมอากาศในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่ผนวกกับส่วนบำบัดแบบโอฟล็อก เมื่อเริ่มต้นจากการเตรียมตะกอนไปโอฟล็อกล่วงหน้าเป็นเวลา 2 สัปดาห์ ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสม เท่ากับ 5:1 พบว่าเมื่อเดินระบบครบ 45 วัน มีปริมาณตะกอนไปโอฟล็อกเท่ากับ 250.93 ± 87.98 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. โดยมีขนาดตะกอนเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 90-150 ไมครอน ทั้งนี้ตะกอนไปโอฟล็อกสามารถกำจัดแอมโมเนียและไนไตรต์ผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ โดยมีค่าเท่ากับ 0.05 ± 0.01 และ 0.02 ± 0.01 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ และมีปริมาณไนเตรตคงค้างอยู่ในระบบเท่ากับ 125.59 ± 6.34 มก.-ไนโตรเจน/ล. จากนั้นทำการแยกส่วนที่เป็นตะกอนไปโอฟล็อกเพื่อเดินระบบรวมกับการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดสำหรับการเลี้ยงกุ้งขาวที่ความหนาแน่นเริ่มต้นเท่ากับ 0.3 กก./ลบ.ม. เดินระบบการทดลองเป็นเวลา 60 วัน โดยเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมติดตั้งอุปกรณ์เติมอากาศแบบหัวทราย และชุดทดลองที่ติดตั้งอุปกรณ์แบบเวนจูรีดัดแปลง พบว่าการติดตั้งระบบเติมอากาศที่แตกต่างกันไม่ส่งผลกระทบต่อขนาดตะกอนไปโอฟล็อก โดยมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 70-150 ไมครอน และมีปริมาณตะกอนไปโอฟล็อกอยู่ในช่วง 160-190 มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล. โดยตะกอนไปโอฟล็อกทั้งชุดควบคุมและชุดทดลองมีความสามารถในการควบคุมปริมาณแอมโมเนียและไนไตรต์ให้ต่ำกว่า 1 มก.-ไนโตรเจน/ล. ผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน โดยพบการสะสมของไนเตรต เท่ากับ 30 มก.-ไนโตรเจน/ล. ทั้งนี้เมื่อประเมินค่าเฉลี่ยอัตราการบำบัดแอมโมเนียในชุดควบคุมและชุดทดลอง พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันเท่ากับ 174.80 ± 31.00 และ 179.40 ± 52.40 มก.-ไนโตรเจน/ก.-ของแข็งแขวนลอย/วัน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามแม้ว่าผลการทดลองจะชี้ให้เห็นว่าอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรีดัดแปลงมีประสิทธิภาพในการเติมอากาศมากกว่าแบบหัวทราย เมื่อเดินระบบแบบต่อเนื่องพบว่าปริมาณออกซิเจนละลายเฉลี่ยในชุดควบคุมเท่ากับ 7.33 ± 0.33 มก.-ออกซิเจน/ล. มีค่าสูงกว่าในชุดทดลองที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.70 ± 0.34 มก.-ออกซิเจน/ล. ทั้งนี้เมื่อพิจารณาร่วมกับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในชุดควบคุมและชุดทดลอง พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยในชุดทดลองมีค่าสูงกว่าในชุดควบคุมเท่ากับ 25.85 ± 1.21 °ซ และ 28.57 ± 0.34 °ซ ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดจากการทำงานของเครื่องสูบน้ำในระบบเติมอากาศแบบเวนจูรีจนทำให้อุณหภูมิของน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำสูงขึ้น ประเด็นดังกล่าวนี้จึงเป็นข้อคำนึงที่สำคัญของการประยุกต์ใช้ระบบเติมอากาศแบบเวนจูรีกับบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลของรูปแบบการเติมอากาศสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่ผนวกกับส่วนบำบัดแบบไบโอฟล็อก สามารถเสนอแนวทางเพื่อพัฒนาระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ดังนี้

1. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสัดส่วนของอัตราการบำบัดแอมโมเนีย ซึ่งเกิดจากกระบวนการแอสซิมิเลชันโดยแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟร่วมกับกระบวนการไนตริฟิเคชันโดยแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟ รวมถึงศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับกลุ่มแบคทีเรียที่เจริญเติบโตในตะกอนไบโอฟล็อก เพื่อให้สามารถระบุบทบาทหลักของตะกอนไบโอฟล็อกในการบำบัดแอมโมเนีย รวมถึงช่วงเวลาที่ชัดเจนในการเปลี่ยนจากกระบวนการแอสซิมิเลชันเข้าสู่กระบวนการไนตริฟิเคชันในระหว่างการบ่มเชื้อเพื่อเตรียมตะกอนไบโอฟล็อก

2. เนื่องจากการเดินระบบไบโอฟล็อกสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำในระยะยาวอาจส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบจนมีค่าสูงกว่ามาตรฐานสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ อีกทั้งการเปลี่ยนแอมโมเนียและไนไตรต์ให้อยู่ในรูปของไนเตรตผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันส่งผลให้เกิดการสะสมตัวของไนเตรตในระบบอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการผนวกระบบแยกตะกอนและระบบบำบัดไนเตรตแบบดีไนตริฟิเคชันเพื่อสามารถรองรับการเดินระบบในระยะยาวและการเลี้ยงสัตว์น้ำที่ความหนาแน่นสูงได้

3. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการใช้งานอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรีในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเนื่องจากผลของความร้อนจากการทำงานของเครื่องสูบน้ำในระบบเติมอากาศแบบเวนจูรีส่งผลให้อุณหภูมิในระบบสูงขึ้น ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง ซึ่งเกิดผลกระทบต่อน้ำโดยเฉพาการเดินระบบในระยะยาว ดังนั้นการประเมินปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรีที่มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพเชิงพลังงาน อาจมีส่วนช่วยในการลดจำนวนการติดตั้งอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรีแต่สามารถคงประสิทธิภาพการเติมออกซิเจนในระบบได้

4. สำหรับการประยุกต์ใช้อุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรีจำเป็นต้องศึกษาเพื่อยืนยันผลการทดลองในระบบที่มีขนาดใหญ่ และความหนาแน่นของการเลี้ยงสัตว์น้ำที่สูงขึ้น โดยคำนึงถึงความคุ้มค่าของการประยุกต์ใช้ระบบเติมอากาศแบบเวนจูรี และผลกระทบในระยะยาวสำหรับการนำไปใช้ในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

- Abakari, G., Luo, G., & Kombat, E. O. (2021). Dynamics of nitrogenous compounds and their control in biofloc technology (BFT) systems: A review. *Aquaculture and Fisheries*, 6(5), 441-447.
- Alves Neto, I., Brandão, H., Furtado, P. S., & Wasielesky Jr., W. (2019). Acute toxicity of nitrate in *Litopenaeus vannamei* juveniles at low salinity levels. *Ciência Rural*.
- APHA, AWWA and WPCF. (2017) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23RD. Washington, DC: American Public Health Association.
- Araneda, M., Gasca-Leyva, E., Vela, M. A., & Domínguez-May, R. (2020). Effects of temperature and stocking density on intensive culture of Pacific white shrimp in freshwater. *Journal of Thermal Biology*, 94, 102756.
- Avnimelech, Y. (1999). Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. *Aquaculture*, 176(3), 227-235.
- Azhar, M., Supriyono, E., Nirmala, K., & Ekasari, J. (2016). Organic carbon source and C/N ratio affect inorganic nitrogen profile in the biofloc-based culture media of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *ILMU KELAUTAN: Indonesian Journal of Marine Sciences*, 21, 23-28.
- Azim, E., & Little, D. (2008). The biofloc technology (BFT) in indoor tanks: Water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 283, 29-35.
- Boyd, C. (2018). Aquaculture pond fertilization. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 13.
- Chen, X., Luo, G., Meng, H., & Tan, H. (2019). Effect of the particle size on the ammonia removal rate and the bacterial community composition of bioflocs. *Aquacultural Engineering*, 86, 102001.
- Crab, R., Defoirdt, T., Bossier, P., & Verstraete, W. (2012). Biofloc technology in aquaculture: Beneficial effects and future challenges. *Aquaculture*, 356-357, 351-356.
- De Moraes, A. P. M., Abreu, P. C., Wasielesky, W., & Krummenauer, D. (2020). Effect of

- aeration intensity on the biofilm nitrification process during the production of the white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) in Biofloc and clear water systems. *Aquaculture*, 514, 734-751.
- De Schryver, P., Crab, R., Defoirdt, T., Boon, N., & Verstraete, W. (2008). The basics of bioflocs technology: The added value for aquaculture. *Aquaculture*, 277(3), 125-137.
- Duan, Y., Wang, Y., Dong, H., Ding, X., Liu, Q., Li, H., . . . Xiong, D. (2018). Changes in the Intestine Microbial, Digestive, and Immune-Related Genes of *Litopenaeus vannamei* in Response to Dietary Probiotic *Clostridium butyricum* Supplementation. *Front Microbiol*, 9, 2191.
- Emerenciano, M. G. C., Martínez-Córdova, L. R., Martínez-Porchas, M., & Miranda-Baeza, A. (2017). Biofloc Technology (BFT): A Tool for Water Quality Management in Aquaculture.
- Furtado, P. S., Campos, B. R., Serra, F. P., Klosterhoff, M., Romano, L. A., & Wasielesky, W. (2015). Effects of nitrate toxicity in the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, reared with biofloc technology (BFT). *Aquaculture International*, 23(1), 315-327.
- Gaona, C. A. P., Poersch, L. H., Krummenauer, D., Fóes, G., & Wasielesky, W. (2011). The Effect of Solids Removal on Water Quality, Growth and Survival of *Litopenaeus vannamei* in a Biofloc Technology Culture System.
- Hargreaves, J. A. (2013). Biofloc production systems for aquaculture (Vol. 4503). Southern Regional Aquaculture Center Stoneville, MS.
- Harun, A. A. C., Mohammad, N. A. H., Ikhwanuddin, M., Jauhari, I., Sohaili, J., & Kasan, N. A. (2019). Effect of different aeration units, nitrogen types and inoculum on biofloc formation for improvement of Pacific Whiteleg shrimp production. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 45(3), 287-292.
- Hisano, H., Barbosa, P. T. L., de Arruda Hayd, L., & Mattioli, C. C. (2021). Comparative study of growth, feed efficiency, and hematological profile of Nile tilapia fingerlings in biofloc technology and recirculating aquaculture system. *Trop Anim Health Prod*, 53(1), 60.
- Hu, J., Li, D., Liu, Q., Tao, Y., He, X., Wang, X., Gao, P. (2009). Effect of organic carbon on nitrification efficiency and community composition of nitrifying biofilms.

- Journal of Environmental Sciences, 21(3), 387-394.
- Huang, M., Xie, J., Yu, Q., Xu, C., Zhou, L., Qin, J., Li, E.-C. (2020). Toxic effect of chronic nitrite exposure on growth and health in Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture*, 529, 735664.
- Jaffer, Y. D., Saraswathy, R., Ishfaq, M., Antony, J., Bundela, D. S., & Sharma, P. C. (2020). Effect of low salinity on the growth and survival of juvenile pacific white shrimp, *Penaeus vannamei*: A revival. *Aquaculture*, 515, 734561.
- Jamnongwong, M., Charoenpittaya, T., Hongprasith, N., Imai, T., & Painmanakul, P. (2016). Study of liquid film forming apparatus (LFFA) mechanisms in terms of oxygen transfer and bubble hydrodynamic parameters. *Engineering Journal*, 20(3), 77-90.
- Krause, T. L. (2010). DESIGN OF MUNICIPAL WASTEWATERTREATMENT PLANTS: WEF Manual of Practice No. 8.
- Kunwong, S., Satanwat, P., Powtongsook, S., Pungrasmi, W., & Nootong, K. (2022). Evaluation of modified biofloc system with filtration unit in controlling suspended solids and inorganic nitrogen concentrations in a recirculating aquaculture system. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 97(4), 924-932.
- Lara, G., Krummenauer, D., Abreu, P. C., Poersch, L. H., & Wasielesky, W. (2017). The use of different aerators on *Litopenaeus vannamei* biofloc culture system: effects on water quality, shrimp growth and biofloc composition. *Aquaculture International*, 25(1), 147-162.
- Lim, Y. S., Ganesan, P., Varman, M., Hamad, F. A., & Krishnasamy, S. (2021). Effects of microbubble aeration on water quality and growth performance of *Litopenaeus vannamei* in biofloc system. *Aquacultural Engineering*, 93, 102159.
- Lin, Y.-C., & Chen, J.-C. (2001). Acute toxicity of ammonia on *Litopenaeus vannamei* Boone juveniles at different salinity levels. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 259(1), 109-119.
- Luo, G., Chen, X., Tan, J., Abakari, G., & Tan, H. (2020). Effects of carbohydrate addition strategy and biofloc levels on the establishment of nitrification in biofloc technology aquaculture systems. *Aquaculture*, 514, 734441.

- Maicá, P., Borba, M., & Wasielesky, W. (2011). Effect of low salinity on microbial floc composition and performance of *Litopenaeus vannamei* (Boone) juveniles reared in a zero-water-exchange super-intensive system. *Aquaculture Research*, 43, 361-370.
- Nootong, K., Pavasant, P., & Powtongsook, S. (2011). Effects of Organic Carbon Addition in Controlling Inorganic Nitrogen Concentrations in a Biofloc System. *Journal of the World Aquaculture Society*, 42(3), 339-346.
- Ozkan, F., Ozturk, M., & Baylar, A. (2006). Experimental investigations of air and liquid injection by venturi tubes *Water and Environment Journal*, 20(3), 114-122.
- Panigrahi, A., Saranya, C., Sundaram, M., Vinoth Kannan, S. R., Das, R. R., Satish kumar, R., . . . Otta, S. K. (2018). Carbon: Nitrogen (C:N) ratio level variation influences microbial community of the system and growth as well as immunity of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in biofloc based culture system. *Fish & Shellfish Immunology*, 81, 329-337.
- Rajkumar, M., Pandey, P. K., Aravind, R., Vennila, A., Bharti, V., & Purushothaman, C. S. (2016). Effect of different biofloc system on water quality, biofloc composition and growth performance in *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931). *Aquaculture Research*, 47(11), 3432-3444.
- Samocha, T. M., Prangnell, D. I., & Castro, L. F. (2019). Chapter 3 - Biofloc. In T. M. Samocha (Ed.), *Sustainable Biofloc Systems for Marine Shrimp* (pp. 29-36). Academic Press.
- Schveitzer, R., Arantes, R., Costódio, P. F. S., do Espírito Santo, C. M., Arana, L. V., Seiffert, W. Q., & Andreatta, E. R. (2013). Effect of different biofloc levels on microbial activity, water quality and performance of *Litopenaeus vannamei* in a tank system operated with no water exchange. *Aquacultural Engineering*, 56, 59-70.
- Souza, J., Cardozo, A., Wasielesky, W., & Abreu, P. C. (2019). Does the biofloc size matter to the nitrification process in Biofloc Technology (BFT) systems? *Aquaculture*, 500, 443-450.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H. D., & Eddy, M. (2003). *Wastewater engineering: Treatment and reuse*. Boston: McGraw-Hill.

- Timmons, M., Guerdat, T., & Vinci, B. (2018). *Recirculating Aquaculture*, 4th edition.
- Tinh, T. H., Koppenol, T., Hai, T. N., Verreth, J. A. J., & Verdegem, M. C. J. (2021). Effects of carbohydrate sources on a biofloc nursery system for whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture*, 531, 735795.
- Vilani, G., Felipe, Santo, C. M. d. E. r., Vieira, F. d. N., Arantes, R. d. F., Schweitzer, R., & Seiffert, W. Q. (2016). Strategies for water preparation in a biofloc system: Effects of carbon source and fertilization dose on water quality and shrimp performance. v. 74.
- Wang, Z., Qu, Y., Zhuo, X., Li, J., Zou, J., & Fan, L. (2019). Investigating the physiological responses of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* to acute cold-stress. *PeerJ*, 7, e7381.
- Xu, Z., Guan, W., Xie, D., Lu, W., Ren, X., Yuan, J., & Mao, L. (2019). Evaluation of immunological response in shrimp *Penaeus vannamei* submitted to low temperature and air exposure. *Dev Comp Immunol*, 100, 103413.
- กรมประมง. (2556). คู่มือการเลี้ยงกุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*) แบบพัฒนา <https://www.fisheries.go.th/ems/images/ems/Manualvannamei.pdf>.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, & กระทรวงพลังงาน. ระบบเติมอากาศแบบเวนจูรี. [http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/Industrial\(PDF\)/Bay%2037%20Venturi%20Aeration.pdf](http://www2.dede.go.th/bhrd/old/web_display/websemple/Industrial(PDF)/Bay%2037%20Venturi%20Aeration.pdf)
- นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์. (2553). การวิเคราะห์อุปกรณ์ชนิดท่อหยดของเสียประเภทยางในกระบวนการเติมอากาศ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย].
- นิวุฒิ หวังชัย. (2562). หนังสือคู่มือนวัตกรรม การเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิดเพื่อการผลิตสัตว์น้ำแบบปลอดภัยและคุณภาพสูง.
- พรหมทรรณ สิริพิลากร. (2556). ประสิทธิภาพ การบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนของตะกอนชีวภาพจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบไบโอฟล็อก จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย].
- มันสิน ตันกุลเวศม์, & ไพพรรณ พรประภา. (2544). การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ.
- รัชกาล พันธิวิชญ์. (2559). ประสิทธิภาพและเกณฑ์การออกแบบอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจูรีและการทำงานร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย].
- เศรษฐศักดิ์ ติวะนันทร. (2557). การกรองตะกอนแขวนลอยในระบบหมุนเวียนเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยแผ่นกรองชนิดวางเอียง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย].
- สุตา คุณวงศ์. (2559). ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกแบบแยกส่วนในการควบคุมคุณภาพน้ำของการเลี้ยง

สัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย].



ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำดัดแปลงมาจากวิธีของ Bower และ Holm-Hansen (1980) โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารเคมีและการวิเคราะห์ดังนี้

- การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายซาลิไซเลตคัตอะลิสต์ (Salicylate-catalyst solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายโซเดียมซาลิไซเลต (Sodium salicylate; $C_6H_4(OH)COONa$) ปริมาณ 440 ก. และโซเดียม ไนโตรพรัสไซด์ (Sodium nitroprusside dehydrate; $Na_2Fe(CN)_5NO \cdot 2H_2O$) ปริมาณ 0.28 ก. ลงในน้ำปราศจากไอออน (De-ionized water) และปรับปริมาตรสารละลายซาลิไซเลตคัตอะลิสต์ให้ มีปริมาตรเท่ากับ 1 ล. โดยการเก็บสารละลายควรเก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า $5^{\circ}C$ และควรเตรียมสารละลายใหม่ทุก 3 เดือน

2. สารละลายอัลคาไลน์ซิเตรต (Alkaline-citrate solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; $NaOH$) ปริมาณ 18.5 ก. และโซเดียมซิเตรต (Sodium citrate dehydrate; $Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$) ปริมาณ 100 ก. ลงในน้ำปราศจากไอออน และปรับปริมาตรสารละลายอัลคาไลน์ซิเตรตให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ล. โดยการเก็บสารละลายควรเก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า $5^{\circ}C$

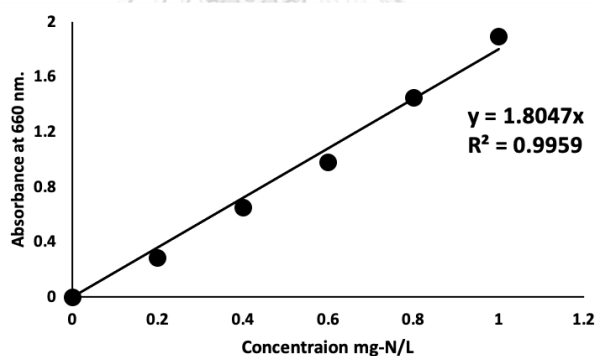
3. สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodium hypochlorite solution) สามารถใช้สารละลายไฮโปคลอไรต์ทางการค้าความเข้มข้น 1.5 นอร์มอล

4. สารละลายอัลคาไลน์ไฮโปคลอไรต์ (Alkaline-hypochlorite solution) สามารถเตรียมได้ โดยการผสมสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์และสารละลายอัลคาไลน์ซิเตรตในอัตราส่วน 1:9 ซึ่งเมื่อผสมสารละลายทั้งสองเข้าด้วยกันควรใช้สารละลายอัลคาไลน์ไฮโปคลอไรต์ในกระบวนการวิเคราะห์ภายในเวลา 1 ชม.

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

สำหรับการเก็บน้ำตัวอย่างควรเก็บใส่ขวดพลาสติกปริมาตร 30 มล. ทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C จากนั้นควรทำการวิเคราะห์ทันที หากไม่สามารถทำได้ควรเก็บน้ำตัวอย่างแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า $15^{\circ}C$

กระบวนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการปิเปตนำตัวอย่างปริมาตร 5 มล. ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลายซาลิไซเลตอะซิเตตปริมาตร 0.6 มล. และสารละลายอัลคาไลน์ไฮโปคลอไรต์ ปริมาตร 1.0 มล. ตามลำดับ (ทั้งนี้สามารถปรับเพิ่มลดปริมาตรน้ำตัวอย่างและสารละลายที่ใช้ใน ขั้นตอนการวิเคราะห์ได้โดยคงอัตราส่วนให้มีค่าเท่าเดิม) เขย่าสารให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 1 ชม. แต่ไม่ควรเกิน 3 ชม. สำหรับการวิเคราะห์แบลงค์ (Blank) สามารถทำได้โดยใช้น้ำปราศจากไอออน ที่มีการเติมสารละลาย เช่นเดียวกับน้ำตัวอย่างและใช้กระบวนการวิเคราะห์เช่นเดิม จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าการ ดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 660 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายแอมโมเนียมาตรฐาน (Standard ammonia solution) ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งเตรียมจาก สารละลายสต็อกแอมโมเนีย (Stock ammonia solution) ความเข้มข้น 100 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ดังกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์แอมโมเนียในรูปที่ ก-1



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน

ก.2 วิธีวิเคราะห์ปริมาณไนไตรต์

การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไนไตรต์ไนโตรเจนในน้ำดัดแปลงมาจากวิธีมาตรฐานที่ อ้างอิงจาก Strickland และ Parsons (1972) โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารเคมีและการวิเคราะห์ดังนี้

- การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายซัลฟานิลาไมด์ (Sulfanilamide solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลาย ซัลฟานิลาไมด์ (Sulphanilamide; $C_6H_5NO_2$) ปริมาณ 5 ก. ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น

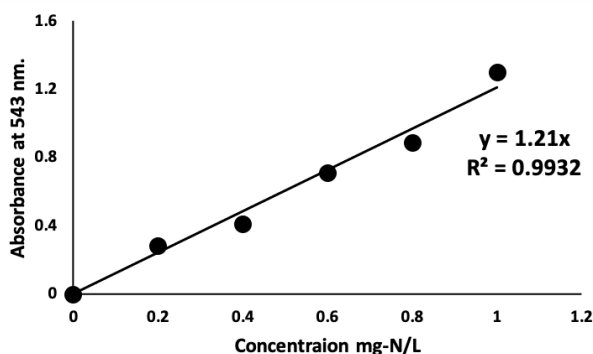
(Hydrochloric acid; HCl) ปริมาตร 50 มล. และปรับปริมาตรสารละลายซัลฟานิลาไมด์ให้มีปริมาตร เท่ากับ 1 ล. โดยการเก็บสารละลายควรเก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50°ซ

2. สารละลายเอ็นเอ็นอีดี (Naphthylethylenediamine solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายเอ็นเอ็นอีดี (NNED; N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride) ปริมาณ 0.5 ก. ในน้ำปราศจากไอออน และปรับปริมาตรสารละลายเอ็นเอ็นอีดีให้มีปริมาตรเท่ากับ 500 มล. โดยการเก็บสารละลายควรเก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50°ซ และควรเตรียมสารละลายใหม่ทุกเดือน

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

สำหรับการเก็บน้ำตัวอย่างควรเก็บใส่ขวดพลาสติกปริมาตร 30 มล. ทำการกรองด้วยกระดาษกรองWhatman GF/C จากนั้นควรทำการวิเคราะห์ทันที หากไม่สามารถทำได้ควรเก็บน้ำตัวอย่างแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า -15°ซ

ขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการปิบน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มล. ใส่ในหลอดทดลองเติมสารละลายซัลฟานิลาไมด์ปริมาตร 0.1 มล. เขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาประมาณ 2 นาที แต่ไม่ควรเกิน 10 นาที จากนั้นเติมสารละลายเอ็นเอ็นอีดีปริมาตร 0.1 มล. เขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 30 นาที แต่ไม่ควรเกิน 2 ชม. (ทั้งนี้สามารถปรับเพิ่มลดปริมาตรน้ำตัวอย่างและสารละลายที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ได้โดยคงอัตราส่วนให้มีค่าเท่าเดิม) สำหรับการวิเคราะห์แบบคลัสสามารถทำได้โดยใช้น้ำปราศจากไอออน ที่มีการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่างและใช้กระบวนการวิเคราะห์เช่นเดิม จากนั้นนำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 543 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไนไตรต์มาตรฐาน(Standard nitrite solution) ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 มก.ไนไตรต์-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งเตรียมจากสารละลายสต็อก ไนไตรต์ (Stock nitrite solution) ความเข้มข้น 100 มก.ไนไตรต์-ไนโตรเจน/ล. ดังกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ไนไตรต์ในรูปที่ ก-2



รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณไนไตรต์ไนโตรเจน

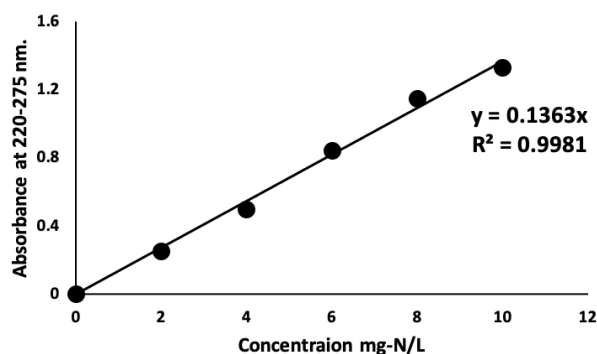
ก.3 วิธีวิเคราะห์ปริมาณไนเตรต

การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไนเตรตไนโตรเจนในน้ำดัดแปลงมาจากวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Standard Method (2017) โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

สำหรับการเก็บน้ำตัวอย่างควรเก็บใส่ขวดพลาสติกปริมาตร 30 มล. ทำการกรองด้วยกระดาษกรองWhatman GF/C จากนั้นควรทำการวิเคราะห์ทันที หากไม่สามารถทำได้ควรเก็บน้ำตัวอย่างแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า -15°C

ขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการปิบน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มล. ใส่ในหลอดทดลองโดยไม่มีการเติมสารเคมีลงไป สำหรับการวิเคราะห์แบบคลอรีนสามารถทำได้โดยใช้น้ำปราศจากไอออน ที่มีการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่างและใช้กระบวนการวิเคราะห์เช่นเดิม จากนั้นนำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 220 และ 275 นาโนเมตร นำผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นทั้งสองมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณไนเตรตไนโตรเจนในน้ำโดยค่าที่คำนวณได้ต้องหักลบกับปริมาณไนไตรต์ที่วิเคราะห์ได้จากตัวอย่างเดียวกัน เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ไนเตรตตาม Standard Method (2017) จะมีปริมาณไนไตรต์รวมอยู่ เปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไนเตรตมาตรฐาน(Standard nitrite solution) ที่ความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 และ 10 มก.ไนไตรต์-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งเตรียมจากสารละลายสต็อกไนไตรต์ (Stock nitrate solution) ความเข้มข้น 100 มก.ไนไตรต์-ไนโตรเจน/ล. ดังกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ไนไตรต์ไนโตรเจนในรูปที่ ก-3



รูปที่ ก-3 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรตไนโตรเจน

ก.4 วิธีวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณของตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำอาศัยวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Standard Method (2017) โดยขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการอบกระดาษกรอง (Whatman GF/C) ขนาด 47 มม. ที่อุณหภูมิ 103 – 105 °ซ เป็นเวลา 24 ชม. และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่งเพื่อเก็บข้อมูลน้ำหนักแห้งของกระดาษกรอง จากนั้นกรองน้ำตัวอย่างด้วยปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ทำการอบและชั่งน้ำหนักกระดาษกรองที่ผ่านการกรองน้ำตัวอย่างเช่นเดิมเพื่อนำผลต่างของน้ำหนักกระดาษกรองที่เพิ่มขึ้นมาคำนวณหาปริมาณของตะกอนแขวนลอยทั้งหมด (ดังสมการที่ ก-1)

$$\text{ตะกอนแขวนลอยทั้งหมด (มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล.)} = \frac{[(\text{นน.กระดาษหลังกรอง (ก.)} - \text{นน.กระดาษก่อน (ก.)}) \times 10^6]}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มล.)}} \quad (\text{ก-1})$$

ก. 5 วิธีวิเคราะห์ค่าการตกตะกอนในเวลา 30 นาที (SV30)

การวิเคราะห์ปริมาณของตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำอาศัยวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Standard Method (2017) โดยขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากเติมน้ำที่มีตะกอนแขวนลอยในกรวยอิมฮอฟ (Imhoff cone) จนได้ปริมาตร 1 ล. จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 30 นาที และอ่านค่าปริมาตรของตะกอนที่ตกตะกอนอยู่บริเวณส่วนล่างของกรวยอิมฮอฟ โดยค่าที่ได้จะนำไปใช้ในการคำนวณค่าดัชนีปริมาณตะกอน

ก.6 วิธีวิเคราะห์ค่าดัชนีปริมาณตะกอน (SVI)

การวิเคราะห์ปริมาณของตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำอาศัยวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Standard Method (2017) โดยขั้นตอนปราศจากไอออน การวิเคราะห์ค่าดัชนีปริมาณตะกอนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ ก-2

$$\text{ค่าดัชนีปริมาณตะกอน (มล./ก.)} = \frac{\text{ค่าการตกตะกอนในเวลา 30 นาที (มล./ล.)} \times 10^3}{\text{ปริมาตรน้ำตะกอนแขวนลอยทั้งหมด (มก./ล.)}} \quad (\text{ก-2})$$



ภาคผนวก ข

คำนวณการเตรียมสารสำหรับการทดลองช่วงที่ 1

กำหนดปริมาณตะกอนไบโอฟล็อกที่ต้องการผลิตตั้งต้นประมาณ 1,000 มก./ล. โดยจากสูตรเซลล์แบคทีเรีย $C_5H_7O_2N$ มีมวลโมเลกุล 113 ก./โมล ดังนั้นความเข้มข้นไนโตรเจนที่ต้องเติมเข้าสู่ระบบเพื่อสังเคราะห์เซลล์แบคทีเรีย เท่ากับ 123.9 มก.-ไนโตรเจน/ล. และความเข้มข้นคาร์บอนที่ต้องเติมเข้าสู่ระบบในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 5:1, 10:1 และ 15:1 มีค่าเท่ากับ 619.5, 1238.9 และ 1858.4 มก.-คาร์บอน/ล. ตามลำดับ

$$\text{ปริมาตรกากน้ำตาลที่เติมเข้าสู่ระบบ (มล.)} = \frac{[C] \times V}{\%C \times D}$$

เมื่อ $[C]$ = ความเข้มข้นคาร์บอนที่ต้องการ (มก.-คาร์บอน/ล.)

V = ปริมาตรน้ำในระบบ (ล.)

$\%C$ = สัดส่วนคาร์บอนในกากน้ำตาล (เท่ากับร้อยละ 46.9)

D = ความหนาแน่นของกากน้ำตาล (เท่ากับ 1,600 มก./มล.)

อย่างไรก็ตามกากน้ำตาลที่เติมเข้าสู่ระบบส่งผลเพิ่มไนโตรเจนในระบบเช่นกัน เนื่องจากในกากน้ำตาลมีสัดส่วนไนโตรเจนร้อยละ 1.3 โดยการเติมกากน้ำตาลในชุดทดลองที่มีการแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 5:1, 10:1 และ 15:1 ส่งผลให้มีไนโตรเจนเข้าสู่ระบบ เท่ากับ 17.2, 34.3 และ 51.5 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ดังนั้นปริมาณความเข้มข้นไนโตรเจนที่ต้องเติมเข้าสู่ระบบในชุดทดลองจึงต้องหักลบจากความเข้มข้นของไนโตรเจนจากกากน้ำตาล

ทั้งนี้ปริมาณความเข้มข้นไนโตรเจนที่ต้องเติมเข้าสู่ระบบในชุดควบคุม เท่ากับ 123.9 มก.-ไนโตรเจน/ล. ในขณะที่ในชุดทดลองที่มีการแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 5:1, 10:1 และ 15:1 ต้องการปริมาณความเข้มข้นไนโตรเจนเข้าสู่ระบบ (เมื่อหักลบจากไนโตรเจนในกากน้ำตาล) เท่ากับ 106.7, 89.6 และ 72.4 มก.-ไนโตรเจน/ล. โดยในการทดลองนี้กำหนดสัดส่วนการเติมแหล่งไนโตรเจนจากอาหารกุ้งบดละเอียด แอมโมเนียมคลอไรด์ และโซเดียมไนไตรต์ ร้อยละ 50, 20 และ 30 ตามลำดับ

$$\text{ปริมาณอาหารกึ่งบดละเอียด (มก.)} = \frac{[N] \times V}{\% \text{Protein} \times \%N}$$

เมื่อ [N] = ความเข้มข้นไนโตรเจนที่ต้องการ (มก.-ไนโตรเจน/ล.)

V = ปริมาตรน้ำในระบบ (ล.)

%Protein = สัดส่วนโปรตีนในอาหารกึ่ง (เท่ากับร้อยละ 38)

%N = สัดส่วนไนโตรเจนในโปรตีน (เท่ากับร้อยละ 16)

$$\text{ปริมาณแอมโมเนียมคลอไรด์ (มก.)} = [N] \times V \times \frac{MW.NH_4Cl}{MW.N}$$

เมื่อ [N] = ความเข้มข้นไนโตรเจนที่ต้องการ (มก.-ไนโตรเจน/ล.)

V = ปริมาตรน้ำในระบบ (ล.)

MW. NH_4Cl = มวลโมเลกุลของแอมโมเนียมคลอไรด์ (53.5 ก./โมล)

MW. N = มวลโมเลกุลของไนโตรเจน (14 ก./โมล)

$$\text{ปริมาณโซเดียมไนไตรต์ (มก.)} = [N] \times V \times \frac{MW.NaNO_2}{MW.N}$$

เมื่อ [N] = ความเข้มข้นไนโตรเจนที่ต้องการ (มก.-ไนโตรเจน/ล.)

V = ปริมาตรน้ำในระบบ (ล.)

MW. $NaNO_2$ = มวลโมเลกุลของโซเดียมไนไตรต์ (69 ก./โมล)

MW. N = มวลโมเลกุลของไนโตรเจน (14 ก./โมล)

ข้อมูลการทดลองช่วงที่ 1

ตาราง ข-1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ไนโตรเจนในระหว่างการบ่มตะกอน
ไบโอฟล็อกด้วยกากน้ำตาลเป็นเวลา 30 วันที่ ในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่า
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 3 ระดับ เท่ากับ 5:1, 10:1 และ 15:1

ชุดการทดลอง	วันที่	แอมโมเนียทั้งหมด (มก.-ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.-ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
ชุดควบคุม	0.0	7.02	0.74	0.34	0.23	1.01	0.24
	2.0	12.02	1.54	1.55	1.24	3.18	1.29
	5.0	6.72	0.92	1.73	0.15	2.36	0.93
	7.0	7.54	1.12	2.20	0.42	3.07	0.85
	9.0	7.71	0.99	5.22	0.43	9.61	3.32
	12.0	0.27	0.09	6.48	3.49	5.61	2.02
	14.0	0.33	0.03	6.85	1.42	14.23	4.16
	16.0	0.24	0.07	6.92	0.91	12.08	3.69
	19.0	0.23	0.07	5.02	0.56	40.12	1.96
	26.0	0.17	0.03	0.96	0.18	24.78	3.77
	28.0	0.16	0.02	0.86	0.10	27.92	5.37
C/N 5:1	0.0	5.95	0.77	1.59	0.46	5.26	1.30
	2.0	9.68	1.67	0.11	0.04	4.94	0.72
	5.0	5.29	0.94	0.08	0.05	3.94	0.66
	7.0	7.95	0.89	0.08	0.04	6.77	1.21
	9.0	3.26	0.96	0.66	0.22	4.00	1.00
	12.0	0.25	0.18	3.40	1.35	4.71	1.91
	14.0	0.29	0.13	8.37	1.27	21.47	5.14
	16.0	0.27	0.06	6.26	0.54	20.86	1.21
	19.0	0.14	0.02	4.70	1.93	57.80	3.27
	26.0	0.23	0.04	0.88	0.13	35.49	3.85
	28.0	0.10	0.03	0.55	0.05	44.19	10.55

ตาราง ข-1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ไนโตรเจนในระหว่างการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกด้วยกากน้ำตาลเป็นเวลา 30 วันที่ ในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 3 ระดับ เท่ากับ 5:1, 10:1 และ 15:1 (ต่อ)

ชุดการทดลอง	วันที่	แอมโมเนีย (มก.-ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.-ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
C/N 10:1	0.0	9.56	1.96	2.81	2.92	5.47	0.81
	2.0	10.53	1.68	0.03	0.02	8.19	2.18
	5.0	8.31	3.21	0.08	0.03	6.98	1.60
	7.0	9.10	2.41	0.08	0.06	8.44	1.79
	9.0	5.66	1.64	0.05	0.01	6.73	2.80
	12.0	1.21	0.66	3.43	0.23	41.89	5.93
	14.0	0.27	0.03	8.55	1.26	34.50	8.80
	16.0	0.07	0.04	5.41	1.67	46.88	1.28
	19.0	0.07	0.04	8.00	0.66	41.01	9.64
	26.0	0.09	0.07	2.34	0.59	53.82	0.52
	28.0	0.06	0.01	2.40	0.18	50.56	2.99
	30.0	0.06	0.01	2.40	0.18	50.56	2.99
C/N 15:1	0.0	2.73	0.70	0.10	0.03	7.34	0.73
	2.0	4.46	0.99	0.06	0.03	6.26	1.77
	5.0	4.14	0.66	0.06	0.02	4.41	2.34
	7.0	6.14	0.17	0.07	0.02	9.61	1.74
	9.0	5.81	0.69	0.04	0.02	12.73	7.37
	12.0	2.82	1.49	2.89	0.18	25.16	1.60
	14.0	1.50	1.19	5.59	3.51	32.52	8.99
	16.0	0.34	0.23	7.78	1.15	39.84	3.89
	19.0	0.25	0.02	8.33	0.44	42.03	1.69
	26.0	0.21	0.08	5.47	1.53	44.34	2.04
	28.0	0.04	0.01	4.40	1.11	45.45	3.41
	30.0	0.04	0.01	4.40	1.11	45.45	3.41

ตาราง ข-2 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ในระหว่างการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกด้วยกากน้ำตาลเป็นเวลา 30 วันที่ ในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 3 ระดับ เท่ากับ 5:1, 10:1 และ 15:1

ชุดการทดลอง	วันที่	ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.-ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
ชุดควบคุม	0	7.00	0.00	8.46	0.01	27.3	0.28
	2	7.80	0.00	8.42	0.06	26.7	0.07
	5	6.95	0.07	8.51	0.05	27.5	0.42
	7	6.95	0.21	8.47	0.05	27.2	0.07
	9	7.55	0.07	8.17	0.09	27.2	0.07
	12	7.95	0.07	8.25	0.06	27.4	0.21
	14	7.55	0.07	8.29	0.02	27.3	0.07
	16	7.55	0.07	8.46	0.10	26.9	0.07
	19	7.50	0.00	8.46	0.10	26.9	0.07
	26	7.00	0.28	8.30	0.06	27.0	0.28
	28	7.24	0.06	8.41	0.27	27.4	0.28
C/N 5:1	0	7.05	0.07	8.47	0.07	26.9	0.07
	2	7.70	0.28	8.46	0.02	26.4	0.00
	5	6.85	0.07	8.51	0.01	27.1	0.00
	7	7.05	0.21	8.49	0.01	27.1	0.07
	9	7.75	0.07	8.39	0.02	26.9	0.14
	12	7.30	0.57	8.24	0.06	27.1	0.14
	14	7.05	0.35	8.20	0.01	27.0	0.07
	16	7.05	0.35	8.39	0.06	26.7	0.00
	19	7.35	0.07	8.39	0.06	26.7	0.00
	26	6.95	0.35	8.27	0.06	26.8	0.07
	28	7.34	0.03	8.46	0.02	27.6	0.07

ตาราง ข-2 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ในระหว่างการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกด้วยกากน้ำตาลเป็นเวลา 30 วันที่ ในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 3 ระดับ เท่ากับ 5:1, 10:1 และ 15:1 (ต่อ)

ชุดการทดลอง	วันที่	ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.-ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
C/N 10:1	0	6.55	0.35	8.30	0.23	26.7	0.00
	2	7.35	0.07	8.36	0.06	26.5	0.07
	5	6.95	0.07	8.29	0.06	27.1	0.07
	7	6.85	0.35	8.44	0.03	27.0	0.07
	9	7.35	0.78	8.46	0.01	26.8	0.14
	12	7.95	0.07	8.30	0.00	27.1	0.14
	14	8.10	0.14	8.31	0.01	27.1	0.07
	16	8.10	0.14	8.35	0.01	26.7	0.00
	19	7.25	0.07	8.35	0.01	26.7	0.00
	26	7.25	0.21	8.38	0.06	26.8	0.00
	28	7.60	0.01	8.49	0.02	27.5	0.00
C/N 15:1	0	6.70	0.28	8.20	0.13	26.8	0.00
	2	6.40	0.57	8.21	0.00	26.4	0.00
	5	6.40	0.14	8.36	0.06	27.0	0.00
	7	5.95	0.21	8.36	0.02	27.1	0.04
	9	7.05	0.78	8.50	0.00	26.8	0.00
	12	7.45	0.07	8.39	0.03	27.0	0.00
	14	7.50	0.14	8.36	0.01	27.3	0.07
	16	7.50	0.14	8.36	0.08	26.3	0.21
	19	7.35	0.07	8.36	0.08	26.6	0.00
	26	6.45	0.21	8.33	0.06	26.7	0.07
	28	7.18	0.04	8.44	0.06	27.5	0.00

ตาราง ข-3 การเปลี่ยนแปลงค่าอัลคาไลน์ในระหว่างการบ่มตะกอนไบโอฟล็อกด้วยกากน้ำตาลเป็นเวลา 30 วันที่ ในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 3 ระดับ เท่ากับ 5:1, 10:1 และ 15:1

วันที่	ชุดควบคุม	C/N 5:1	C/N 10:1	C/N 15:1
0	150	140	150	150
2	110	150	150	150
5	150	150	150	150
7	-	-	-	-
9	150	150	150	150
12	110	120	140	150
14	-	-	-	-
16	150	150	120	140
19	140	140	150	150
26	150	120	120	110
28	-	-	-	-

ตาราง ข-4 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพตะกอน ในระหว่างการบ่มตะกอนไปโอฟล็อกด้วยกากน้ำตาล
เป็นเวลา 30 วัน ในชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการแปรค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อ
ไนโตรเจน 3 ระดับ เท่ากับ 5:1, 10:1 และ 15:1

ชุดการทดลอง	วันที่	ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มก.-ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด/ล.)		ปริมาณตะกอนที่ตกใน 30 นาที (มล./ล.)	ดัชนีตะกอน (มล./ก.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย	SD
ชุดควบคุม	0	91.7	7.07	2.00	21.88	1.69
	2	106.7	9.43	1.50	14.12	1.25
	5	141.7	7.07	6.00	42.41	2.12
	12	307.5	3.54	15.00	48.78	0.56
	19	295.4	13.64	4.00	13.56	0.63
	26	277.5	17.68	6.00	21.67	1.38
C/N 5:1	0	83.3	0.00	4.00	48.00	0.00
	2	118.3	7.07	3.00	16.93	1.01
	5	140.0	7.07	8.00	57.22	2.89
	12	307.5	24.75	8.00	26.10	2.10
	19	446.7	28.28	15.00	33.65	2.13
	26	470.0	14.14	15.00	31.93	0.96
C/N 10:1	0	130.0	14.14	10.00	77.38	8.42
	2	231.7	2.36	8.00	34.53	0.35
	5	155.0	7.07	35.00	226.04	10.31
	12	352.5	24.75	35.00	99.54	6.99
	19	303.3	14.14	30.00	99.01	4.62
	26	314.3	17.44	10.00	31.86	1.77
C/N 15:1	0	130.0	14.14	20.00	118.06	9.82
	2	130.0	14.14	4.00	8.19	0.71
	5	130.0	14.14	10.00	12.59	0.56
	12	130.0	14.14	30.00	58.26	0.80
	19	130.0	14.14	27.00	43.91	0.50
	26	130.0	14.14	35.00	56.51	2.58

ภาคผนวก ค

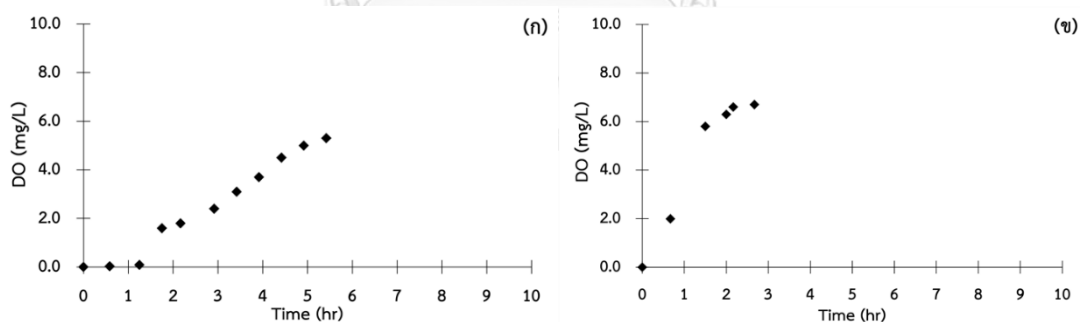
ข้อมูลการทดลองช่วงที่ 2

ตาราง ค-1 สภาวะการเดินระบบในการทดสอบประสิทธิภาพการเติมอากาศแต่รูปแบบ

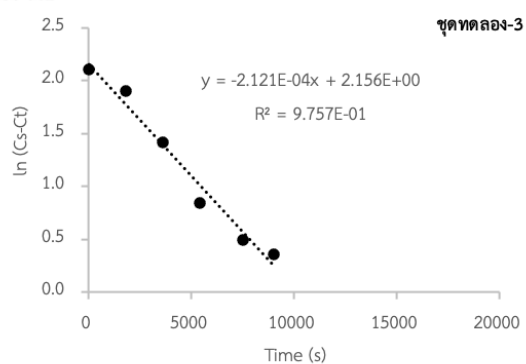
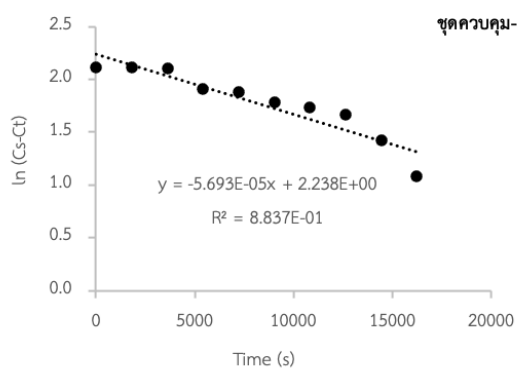
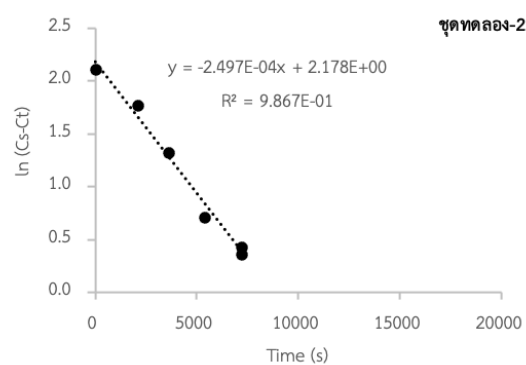
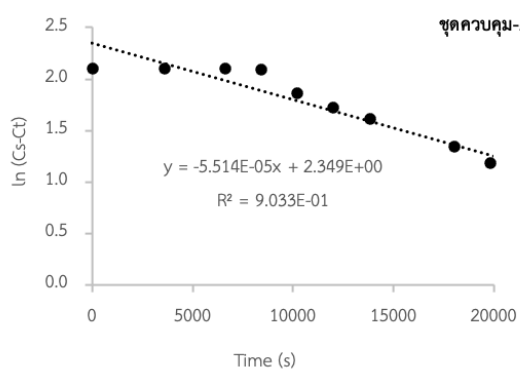
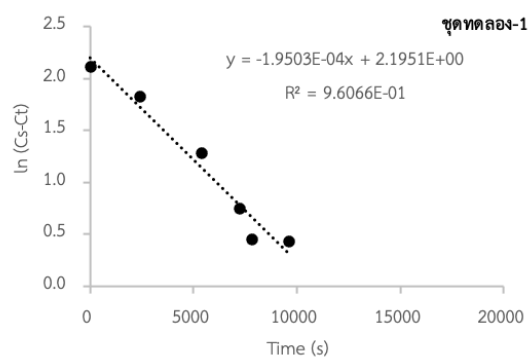
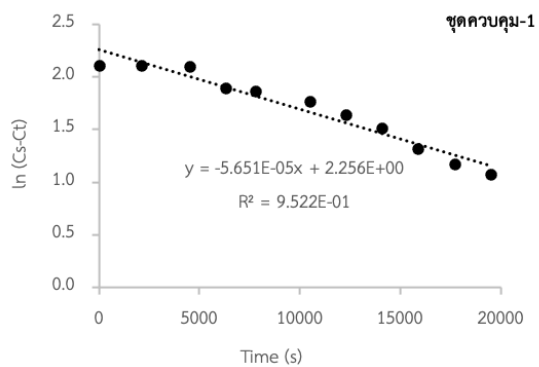
พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการทดลอง (หน่วย)	
	การเติมอากาศแบบหัวทราย	การเติมอากาศแบบเวนจูรี
อัตราการไหลของน้ำ	2.5 ล./นาที	2.5 ล./นาที
อัตราการไหลของอากาศ	2.5 ล./นาที	2.5 ล./นาที
ปริมาตรน้ำ	240 ล.	240 ล.
ค่าความเค็มน้ำ	5 พีเอชยู	5 พีเอชยู
อุณหภูมิน้ำ	27.5°C	28.1°C
ค่าพลังงาน	0.040 กิโลวัตต์	0.024 กิโลวัตต์

ค่าอัตราการไหลของน้ำปรับแก้ค่าตามอัตราการไหลของอากาศให้เท่ากันทั้ง 2 ชุดการทดลอง

จากผลการทดลองได้กราฟตรง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นกับเวลา (ชม.) จนเข้าใกล้จุดอิ่มตัวในระหว่างการเติมอากาศรูปแบบต่างกัน โดย (ก) แบบหัวทราย และ (ข) แบบเวนจูรี



จากผลการทดลองได้กราฟตรง แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_s - C_t)$ กับเวลา (วินาที) โดย Slope เท่ากับค่า $K_L a$ โดย แบบหัวทราย เป็นชุดควบคุม และ แบบเวนจูรี เป็นชุดทดลอง



ตาราง ค-2 ค่าจากการคำนวณประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศแต่ละรูปแบบ

ชุดควบคุม: รูปแบบการเติมอากาศแบบหัวทราย

พารามิเตอร์	ค่าจากการทดลอง		
	ชุดการทดลองซ้ำที่ 1	ชุดการทดลองซ้ำที่ 2	ชุดการทดลองซ้ำที่ 3
$K_L a_{20}$ (1/ชม.)	0.18	0.18	0.18
SOTR (กก.-ออกซิเจน/ชม.)	0.36	0.35	0.36
SAE (กก.-ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม.)	9.02	8.80	9.09
OTE (ร้อยละ)	2.00	1.95	2.01

ชุดทดลอง: รูปแบบการเติมอากาศแบบเวนจูรี

พารามิเตอร์	ค่าจากการทดลอง		
	ชุดการทดลองซ้ำที่ 1	ชุดการทดลองซ้ำที่ 2	ชุดการทดลองซ้ำที่ 3
$K_L a_{20}$ (1/ชม.)	0.62	0.80	0.68
SOTR (กก.-ออกซิเจน/ชม.)	1.23	1.58	1.34
SAE (กก.-ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม.)	51.38	65.79	55.88
OTE (ร้อยละ)	6.89	8.82	7.49

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการทดลองช่วงที่ 3

ตาราง ง-1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ไนโตรเจนในระหว่างการเตรียมตะกอน
ไบโอฟล็อกด้วยอัตราส่วนคาร์บอนต่อ ไนโตรเจนเท่ากับ 5:1

วันที่	แอมโมเนีย (มก.-ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.-ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
0	6.55	0.91	16.64	0.43	11.6	0.38
2	8.24	0.54	15.16	0.04	14.2	0.23
4	4.48	0.21	14.01	0.03	30.8	4.36
7	4.85	0.15	22.99	0.28	66.9	5.75
9	6.01	0.46	8.69	0.39	76.3	2.15
11	1.9	0.46	0.48	0.13	72.7	0.24
14	0.52	0.07	0.34	0.02	78.4	4.69
16	0.48	0.07	0.44	0.05	60.6	4.29
18	0.20	0.03	0.44	0.02	73.3	2.40
21	0.17	0.04	0.16	0.02	71.5	6.06
23	0.05	0.01	1.99	0.02	86.6	3.85
25	0.03	0.01	0.74	0.15	90.1	5.58
28	-	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-
32	-	-	-	-	-	-
43	0.56	0.01	0.03	0.00	110.0	5.21
45	0.05	0.01	0.02	0.01	125.6	6.34

ตาราง ง-2 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ในระหว่างการเตรียมตะกอนไปโอฟล็อกด้วยอัตราส่วน
คาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1

วันที่	ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.-ออกซิเจน/ล.)	พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ค่าอัลคาไลน์ (มก.-แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)
0	5.30	7.23	26.10	150.00
2	4.2	7.3	26.9	150
5	6.9	7.7	27.8	-
7	6.7	7.4	26.5	140
9	8.7	7.9	28.2	120
12	8.5	7.6	27.4	-
14	8.39	8.23	27.0	160.00
16	8.23	8.23	27.5	170
19	8.42	7.58	26.7	-
26	8.10	7.60	26.20	150.00
28	8.37	7.63	23.30	-
30	8.41	7.58	22.10	120.00
32	8.32	8.61	21.70	-

ตาราง ง-3 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพตะกอน ในระหว่างการเตรียมตะกอนไปโอฟล็อกด้วยอัตราส่วน
คาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1

วันที่	ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มก.-ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด/ล.)		ปริมาณตะกอนที่ตกใน 30 นาที (มล./ล.)	ดัชนีตะกอน (มล./ก.)	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย	SD
0	242.2	16.78	6.0	24.8	1.70
2	421.7	37.53	40.0	95.3	8.07
5	320.0	14.53	40.0	125.2	5.55
12	288.9	22.19	30.0	104.3	8.37
19	220.0	26.03	25.0	114.6	12.72
26	224.4	18.36	25.0	111.9	9.11
33	-	-	-	-	-
41	260.0	15.00	25.0	96.4	5.57
44	154.4	5.09	40.0	259.2	8.46
47	126.7	5.77	30.0	237.2	10.53

ตาราง ง-4 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพตะกอน ในระหว่างเดินระบบเลี้ยงกุ้งขาวแบบปิดผนวกกับระบบ
บำบัดแบบไบโอฟล็อก

ชุดการทดลอง	วันที่	ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มก.-ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด/ล.)		ปริมาณตะกอนที่ตกใน 30 นาที (มล./ล.)		ดัชนีตะกอน (มล./ก.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
ชุดควบคุม	0	143.33	13.02	3.33	1.15	23.21	7.76
	7	115.56	12.62	6.67	3.06	59.72	31.85
	14	168.89	33.39	10.33	3.79	62.40	26.48
	21	170.00	21.79	10.33	4.04	62.61	29.93
	29	153.33	13.02	10.33	4.04	68.34	29.68
	35	177.22	20.16	7.33	2.31	42.00	15.02
	42	166.67	11.67	7.33	2.31	44.13	13.97
	49	160.56	45.90	7.33	2.31	46.18	8.43
ชุดทดสอบ	0	143.33	7.64	2.00	1.00	13.76	6.26
	7	133.33	6.01	6.67	1.15	50.40	10.65
	14	162.78	2.55	9.67	4.73	59.72	30.18
	21	198.89	11.71	6.67	1.15	33.42	4.19
	29	200.56	25.24	6.67	1.15	33.42	5.32
	35	230.56	48.23	3.00	2.65	12.93	9.94
	42	209.44	30.93	3.00	2.65	14.78	12.86
	49	266.67	77.62	3.00	2.65	11.91	9.64

ตาราง ง-5 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพในระหว่างเดินระบบเลี้ยงกุ้งขาวแบบปิดผนวกกับระบบ
บำบัดแบบไบโอฟล็อก

ชุดการ ทดลอง	วันที่	ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.-ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)		ค่าอัลคาไลน์	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
ชุดควบคุม	0	7.55	0.01	8.45	0.01	24.63	0.49	153.33	5.77
	2	7.35	0.05	8.40	0.04	25.30	1.39	113.33	11.55
	5	6.67	0.41	8.39	0.13	26.30	0.10	163.33	5.77
	7	6.90	0.06	8.49	0.02	26.33	0.49	-	-
	9	6.80	0.13	8.45	0.03	26.23	0.32	126.67	35.12
	12	7.26	0.13	8.48	0.18	26.57	0.12	-	-
	14	7.46	0.19	8.57	0.15	26.07	0.92	-	-
	16	7.60	0.06	8.56	0.13	25.17	0.15	136.67	11.55
	19	7.25	0.13	8.55	0.17	24.60	0.10	-	-
	21	7.58	0.34	8.53	0.13	24.73	0.32	-	-
	23	7.41	0.39	8.52	0.11	24.13	1.07	166.67	5.77
	26	7.41	0.29	8.51	0.13	23.13	0.23	153.33	5.77
	28	8.11	0.04	8.40	0.10	23.50	0.95	-	-
	30	7.48	0.13	8.53	0.06	25.30	0.17	143.33	20.82
	33	7.40	0.16	8.46	0.03	25.70	0.44	-	-
	35	7.22	0.11	8.32	0.16	26.27	0.25	-	-
	37	7.02	0.20	8.38	0.06	26.50	0.20	146.67	25.17
	40	7.10	0.15	8.47	0.16	25.37	0.21	143.33	11.55
	42	7.70	0.19	8.54	0.14	25.57	0.06	-	-
	44	7.55	0.12	8.46	0.09	26.03	0.06	136.67	5.77
	47	7.38	0.06	8.28	0.03	26.13	0.15	-	-
	49	7.37	0.21	8.25	0.07	27.33	0.21	-	-
	51	6.87	0.15	8.22	0.04	27.40	0.26	163.33	5.77
	54	7.27	0.07	8.30	0.12	27.57	0.25	153.33	5.77
	56	7.44	0.14	8.26	0.11	27.40	0.26	113.33	11.55
	58	7.29	0.19	8.24	0.05	27.17	0.06	163.33	5.77
	61	7.25	0.09	8.23	0.01	27.63	0.15	-	-

ตาราง ง-5 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพในระหว่างเดินระบบเลี้ยงกุ้งขาวแบบปิดผนวกกับระบบ
บำบัดแบบไบโอฟล็อก (ต่อ)

ชุดการทดลอง	วันที่	ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.-ออกซิเจน/ล.)		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)		ค่าอัลคาไลน์	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
ชุดทดสอบ	0	6.66	0.64	8.40	0.10	28.23	0.25	153.33	5.77
	2	6.72	0.52	8.33	0.14	28.43	0.38	136.67	11.55
	5	5.79	0.40	8.21	0.27	30.40	0.72	146.67	15.28
	7	6.36	0.46	8.38	0.09	28.63	0.93	-	-
	9	6.30	0.48	8.29	0.19	29.60	1.66	156.67	11.55
	12	6.45	0.49	8.23	0.21	30.40	0.36	-	-
	14	6.44	0.10	8.25	0.11	29.33	0.97	-	-
	16	6.70	0.48	8.19	0.13	28.23	0.38	123.33	23.09
	19	6.39	0.32	8.16	0.23	28.10	0.10	-	-
	21	6.85	0.31	8.25	0.03	27.90	0.56	-	-
	23	6.70	0.22	8.27	0.02	27.27	0.83	156.67	5.77
	26	6.71	0.34	8.29	0.10	26.90	0.56	140.00	10.00
	28	7.26	0.38	8.33	0.07	27.23	0.57	-	-
	30	6.59	0.50	8.14	0.24	28.07	1.36	126.67	20.82
	33	6.68	0.48	8.05	0.22	28.17	0.84	-	-
	35	6.46	0.23	8.17	0.23	28.23	0.40	-	-
	37	6.41	0.32	8.32	0.27	29.40	0.53	146.67	11.55
	40	6.85	0.33	8.32	0.19	27.00	0.10	136.67	25.17
	42	7.33	0.15	8.45	0.12	27.67	0.32	-	-
	44	7.01	0.83	8.32	0.01	28.53	0.90	163.33	5.77
	47	7.10	0.69	8.19	0.06	28.33	0.35	-	-
	49	6.96	0.39	8.20	0.10	29.53	0.38	-	-
	51	6.45	0.30	8.19	0.07	28.93	0.38	146.67	15.28
	54	6.93	0.51	8.18	0.07	28.57	0.45	-	-
	56	7.23	0.06	8.18	0.05	29.03	0.76	-	-
	58	6.75	0.03	8.31	0.10	29.67	0.65	153.33	5.77
	61	6.70	0.05	8.25	0.07	29.63	0.38	136.67	11.55

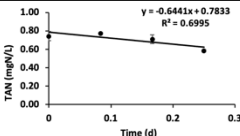
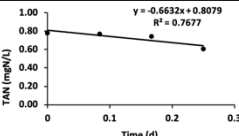
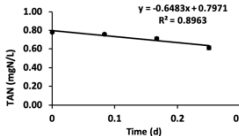
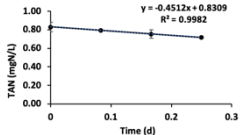
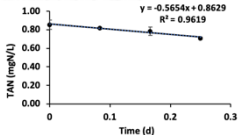
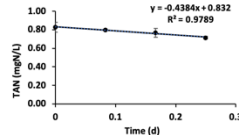
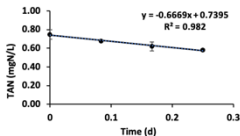
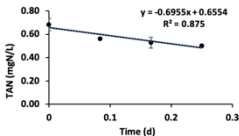
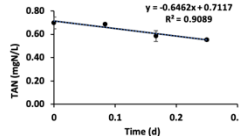
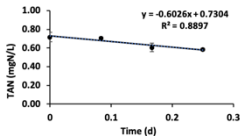
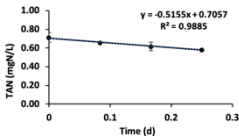
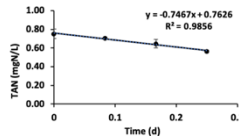
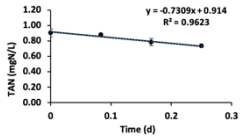
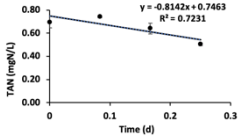
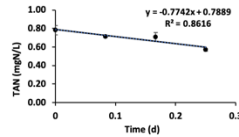
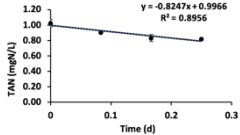
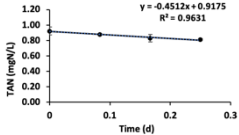
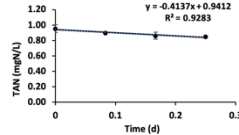
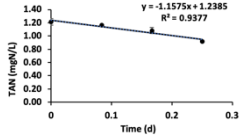
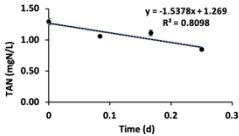
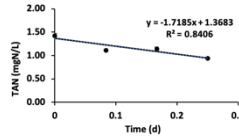
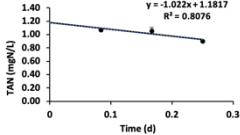
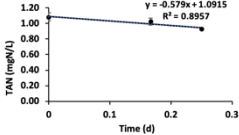
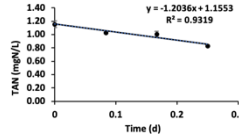
ตาราง ง-6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ไนโตรเจนในระหว่างเดินระบบเลี้ยงกุ้งขาว
แบบปิดผนวกกับระบบบำบัดแบบไบโอฟล็อก

ชุดการทดลอง	วันที่	แอมโมเนีย (มก.-ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.-ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
ชุดควบคุม	0	0.26	0.09	0.05	0.00	13.6	0.10
	3	0.36	0.15	0.05	0.01	23.6	0.92
	5	0.29	0.15	0.05	0.01	21.1	3.43
	7	0.36	0.19	0.01	0.00	21.3	2.43
	10	0.84	0.27	0.05	0.01	21.0	1.71
	12	1.14	0.16	0.24	0.01	26.4	1.55
	14	1.10	0.00	0.07	0.00	28.1	1.41
	17	1.18	0.18	0.10	0.01	25.4	2.02
	19	0.35	0.04	0.01	0.01	19.2	2.20
	21	1.27	0.09	0.03	0.01	30.7	3.39
	24	0.99	0.58	0.01	0.01	25.0	0.86
	26	1.09	0.45	0.14	0.07	22.5	0.91
	28	0.71	0.05	0.20	0.12	23.3	2.08
	31	0.63	0.01	0.15	0.00	26.2	3.40
	33	0.66	0.22	0.25	0.04	29.2	2.03
	35	0.15	0.09	0.44	0.03	19.7	2.83
	38	0.11	0.04	0.66	0.37	30.0	0.57
	40	0.10	0.04	0.15	0.01	31.3	0.42
	42	0.17	0.03	0.21	0.02	28.7	2.73
	45	0.51	0.44	0.21	0.01	30.6	0.89
	47	0.08	0.03	0.11	0.11	17.6	1.45
	49	0.16	0.09	0.01	0.00	26.8	1.90
	52	0.10	0.07	0.04	0.01	30.9	2.91
	54	0.08	0.03	0.03	0.01	28.3	2.55
	56	0.13	0.03	0.03	0.01	32.1	1.05
	59	0.11	0.02	0.02	0.01	30.4	0.85

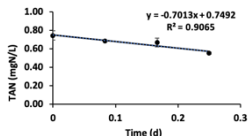
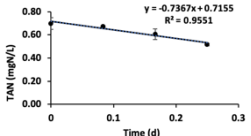
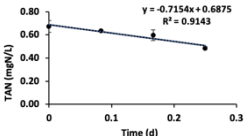
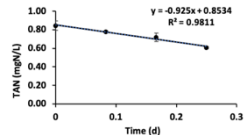
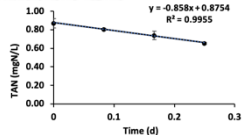
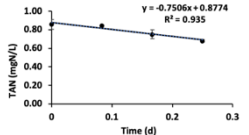
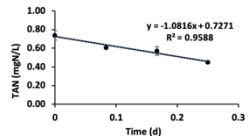
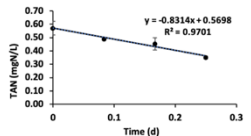
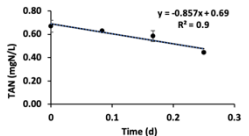
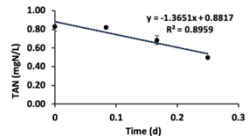
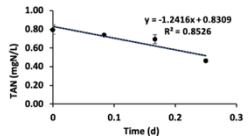
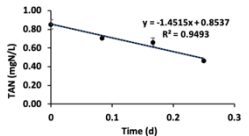
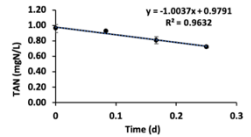
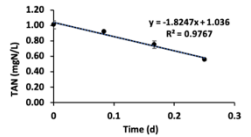
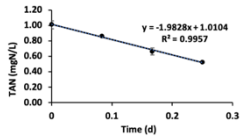
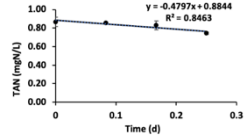
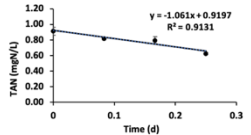
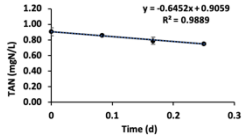
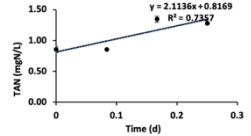
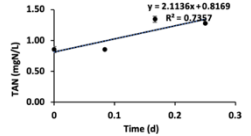
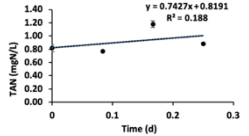
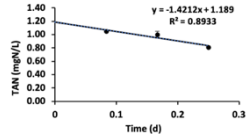
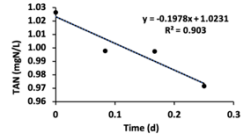
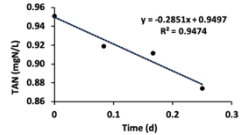
ตาราง ง-6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ไนโตรเจนในระหว่างเดินระบบเลี้ยงกุ้งขาว
แบบปิดผนวกกับระบบบำบัดแบบไบโอฟล็อก (ต่อ)

ชุดการทดลอง	วันที่	แอมโมเนีย (มก.-ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.-ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.-ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
ชุดทดสอบ	0	0.22	0.04	0.05	0.01	13.6	0.01
	3	0.09	0.06	0.10	0.02	16.6	1.45
	5	0.07	0.04	0.04	0.01	18.0	2.90
	7	0.13	0.08	0.02	0.02	20.2	0.56
	10	0.55	0.18	0.19	0.04	24.3	4.26
	12	0.37	0.03	0.20	0.05	24.7	3.02
	14	0.44	0.02	0.08	0.06	17.1	0.05
	17	0.28	0.13	0.02	0.01	22.6	0.74
	19	0.79	0.44	0.01	0.00	17.4	1.99
	21	0.28	0.10	0.01	0.00	31.0	0.87
	24	0.29	0.03	0.01	0.00	22.1	2.69
	26	0.61	0.17	0.12	0.02	22.8	3.26
	28	0.83	0.21	0.26	0.06	28.8	3.11
	31	0.44	0.19	0.24	0.02	30.3	2.16
	33	0.25	0.19	0.27	0.03	32.4	3.24
	35	0.09	0.09	0.25	0.00	31.2	0.86
	38	0.09	0.04	0.18	0.06	31.6	0.04
	40	0.32	0.15	0.15	0.03	23.9	2.09
	42	0.34	0.28	0.16	0.07	29.2	0.92
	45	0.12	0.03	0.16	0.10	23.9	1.94
	47	0.12	0.02	0.12	0.11	30.7	0.73
	49	0.17	0.02	0.07	0.08	26.3	0.62
	52	0.21	0.16	0.03	0.02	30.4	2.53
	54	0.08	0.03	0.01	0.01	31.3	0.40
	56	0.10	0.02	0.02	0.01	31.0	1.39
	59	0.08	0.02	0.01	0.00	32.8	0.60

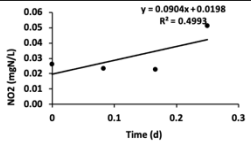
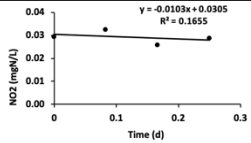
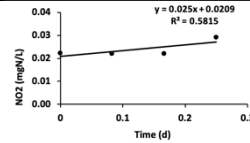
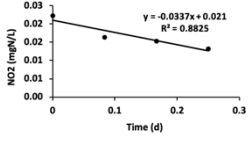
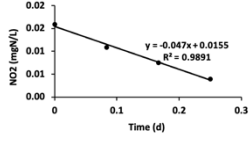
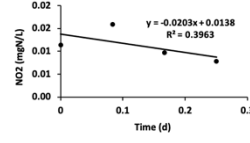
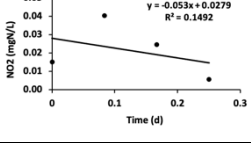
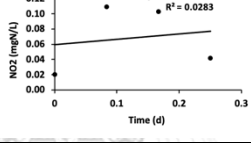
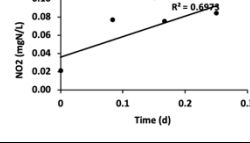
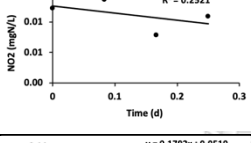
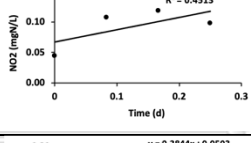
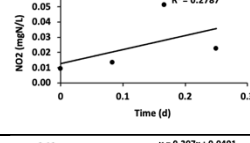
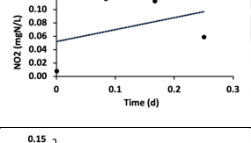
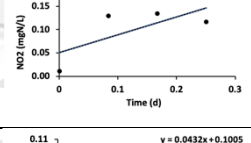
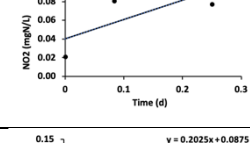
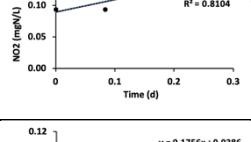
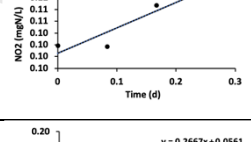
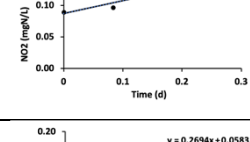
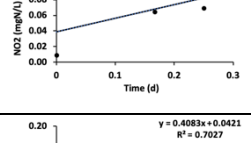
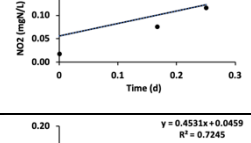
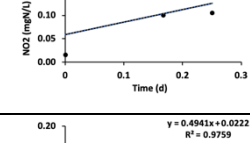
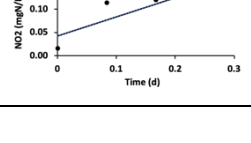
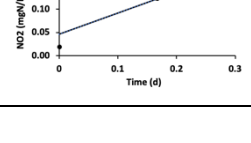
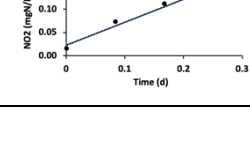
ตาราง ง-7 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย เมื่อทำการทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกระหว่างการทดลองช่วงที่ 1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.-ไนโตรเจน/ล. โดยแกน X คือ เวลา (ชม.) และแกน Y คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.-ไนโตรเจน/ล.)

วันที่	ชุดควบคุม		
	การทดลองซ้ำที่ 1	การทดลองซ้ำที่ 2	การทดลองซ้ำที่ 3
7			
14			
21			
28			
35			
42			
49			
56			

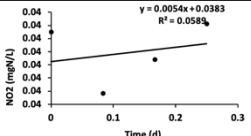
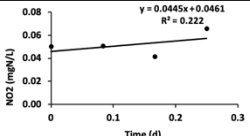
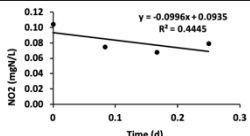
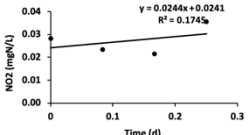
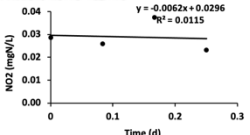
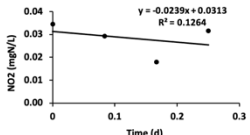
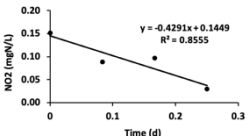
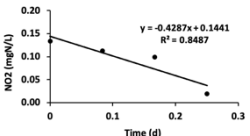
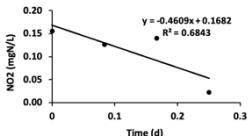
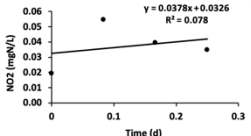
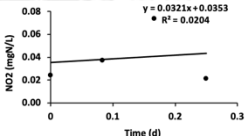
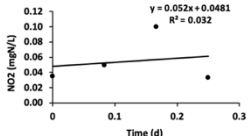
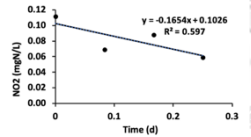
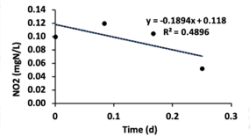
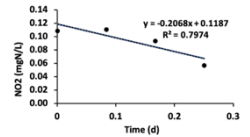
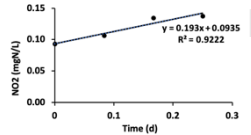
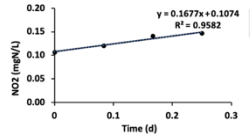
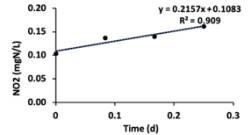
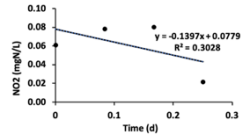
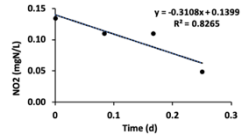
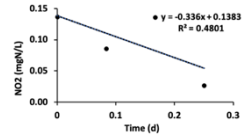
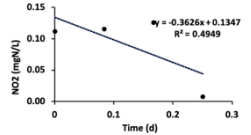
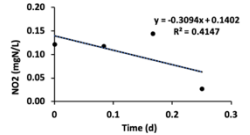
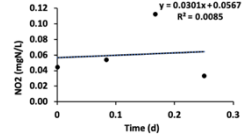
ตาราง ง-7 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย เมื่อทำการทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกระหว่างการทดลองช่วงที่ 1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.-ไนโตรเจน/ล. โดยแกน X คือ เวลา (ชม.) และแกน Y คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.-ไนโตรเจน/ล.) (ต่อ)

วันที่	ชุดทดลอง		
	การทดลองซ้ำที่ 1	การทดลองซ้ำที่ 2	การทดลองซ้ำที่ 3
7			
14			
21			
28			
35			
42			
49			
56			

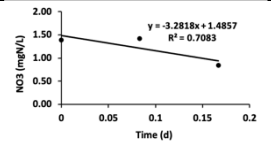
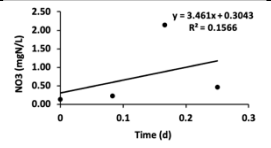
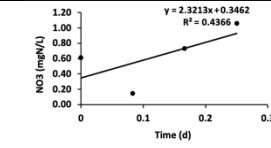
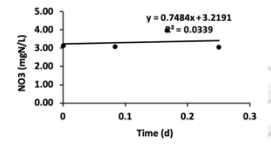
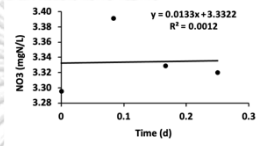
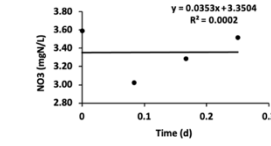
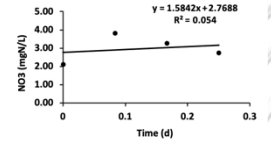
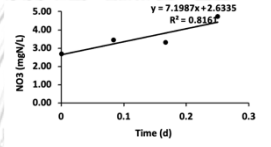
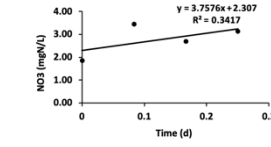
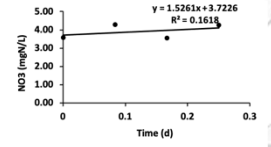
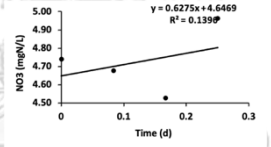
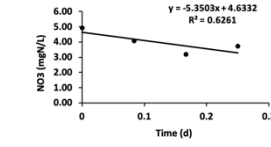
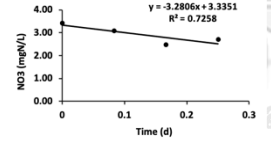
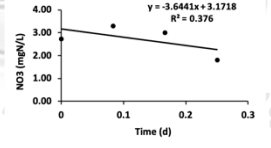
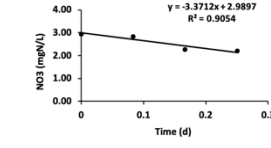
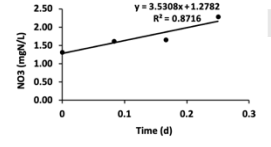
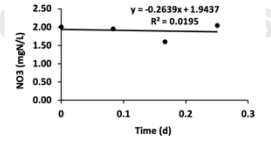
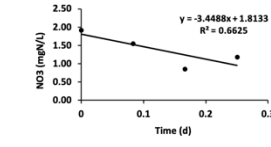
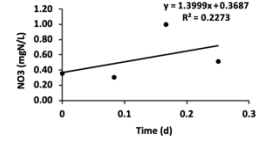
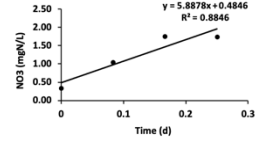
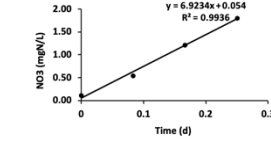
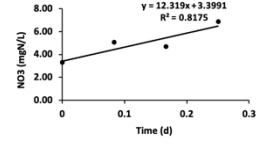
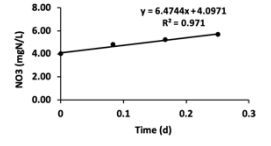
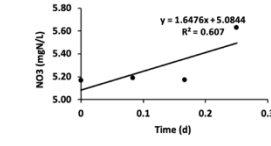
ตาราง ง-8 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนไตรต์ เมื่อทำการทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกกระหว่างการทดลองครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.-ไนโตรเจน/ล. โดยแกน X คือ เวลา (ชม.) และแกน Y คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.-ไนโตรเจน/ล.)

วันที่	ชุดควบคุม		
	การทดลองซ้ำที่ 1	การทดลองซ้ำที่ 2	การทดลองซ้ำที่ 3
7			
14			
21			
28			
35			
42			
49			
56			

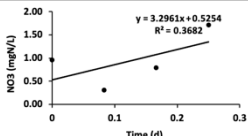
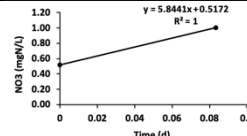
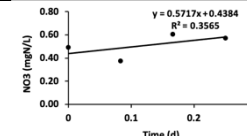
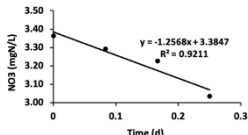
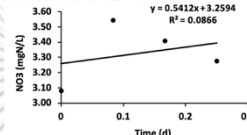
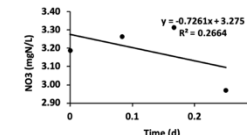
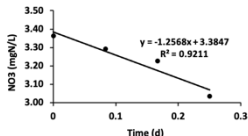
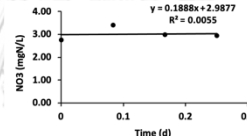
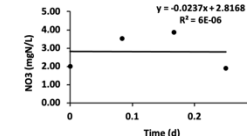
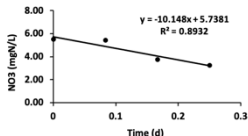
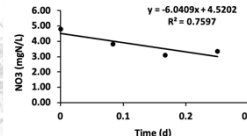
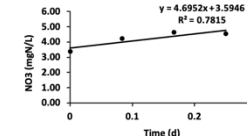
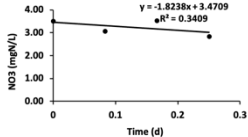
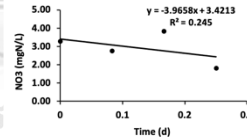
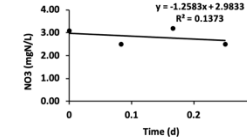
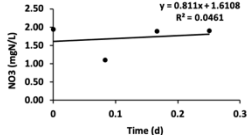
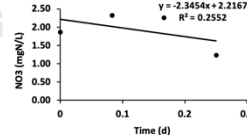
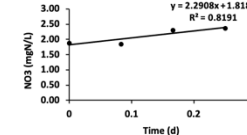
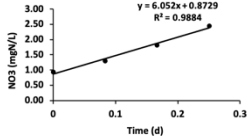
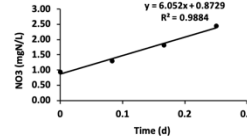
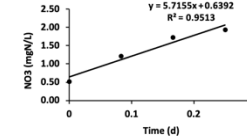
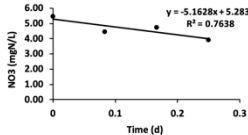
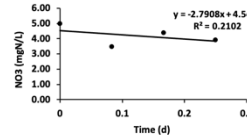
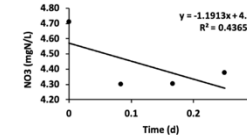
ตาราง ง-8 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนไตรต์ เมื่อทำการทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกระหว่างการทดลองช่วงที่ 1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.-ไนโตรเจน/ล. โดยแกน X คือ เวลา (ชม.) และแกน Y คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.-ไนโตรเจน/ล.) (ต่อ)

วันที่	ชุดทดลอง		
	การทดลองซ้ำที่ 1	การทดลองซ้ำที่ 2	การทดลองซ้ำที่ 3
7			
14			
21			
28			
35			
42			
49			
56			

ตาราง ง-9 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรด เมื่อทำการทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกระหว่างการทดลองครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.-ไนโตรเจน/ล. โดยแกน X คือ เวลา (ชม.) และแกน Y คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.-ไนโตรเจน/ล.)

วันที่	ชุดควบคุม		
	การทดลองซ้ำที่ 1	การทดลองซ้ำที่ 2	การทดลองซ้ำที่ 3
7			
14			
21			
28			
35			
42			
49			
56			

ตาราง ง-9 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรด เมื่อทำการทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกระหว่างการทดลองช่วงที่ 1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.-ไนโตรเจน/ล. โดยแกน X คือ เวลา (ชม.) และแกน Y คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก.-ไนโตรเจน/ล.) (ต่อ)

วันที่	ชุดทดลอง		
	การทดลองซ้ำที่ 1	การทดลองซ้ำที่ 2	การทดลองซ้ำที่ 3
7			
14			
21			
28			
35			
42			
49			
56			

ตาราง ง-9 น้ำหนักเฉลี่ยของกึ่งขาวของชุดควบคุมและชุดทดลองระหว่างการทดลองที่ 3

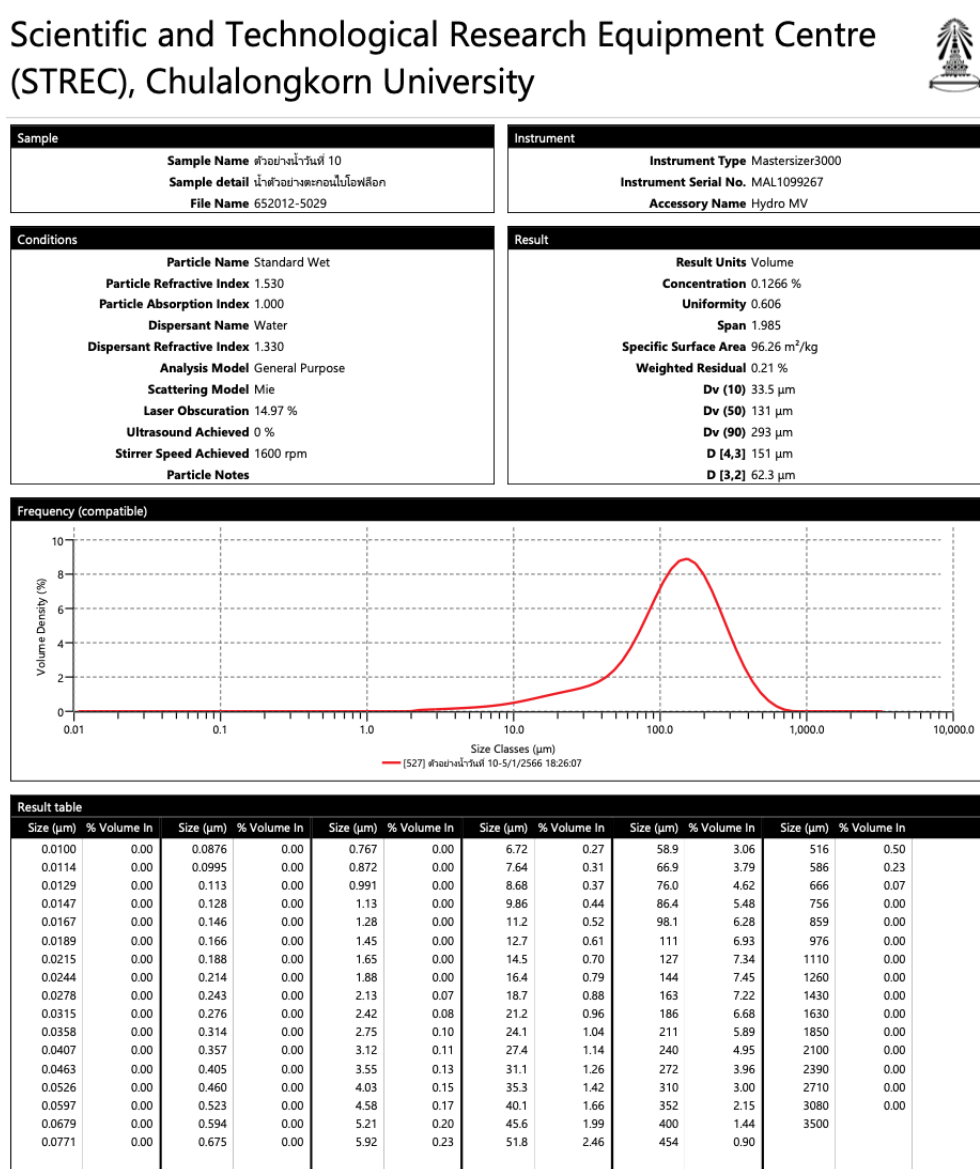
ชุดการทดลอง	วันที่	น้ำหนักกึ่งขาวเฉลี่ย (ก.)					
		การทดลองซ้ำที่ 1		การทดลองซ้ำที่ 2		การทดลองซ้ำที่ 3	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
ชุดควบคุม	0	4.11	1.20	3.80	1.08	4.02	0.87
	15	4.18	1.19	4.42	1.32	4.64	1.01
	30	4.13	0.98	3.89	0.82	4.24	0.91
	45	4.54	1.09	3.48	0.90	3.68	1.11
	60	5.58	1.58	3.73	0.76	5.57	2.19
ชุดทดลอง	0	4.01	0.91	3.80	0.93	3.90	1.04
	15	5.04	0.86	4.90	1.26	5.02	0.90
	30	4.27	1.19	4.58	1.37	3.82	0.85
	45	5.51	1.02	4.12	1.58	4.11	1.45
	60	4.75	1.54	4.60	1.65	3.77	1.42

ตาราง ง-10 ความยาวของกึ่งขาวของชุดควบคุมและชุดทดลองระหว่างการทดลองที่ 3

ชุดการทดลอง	วันที่	ความยาวกึ่งขาวเฉลี่ย(ซม.)					
		การทดลองซ้ำที่ 1		การทดลองซ้ำที่ 2		การทดลองซ้ำที่ 3	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
ชุดควบคุม	0	7.52	2.08	7.85	1.17	7.94	0.88
	15	8.39	0.72	8.65	1.07	8.81	0.61
	30	8.43	0.69	8.20	0.77	8.48	0.59
	45	8.83	0.72	7.67	0.87	7.20	0.78
	60	9.45	0.83	8.50	0.62	10.25	1.31
ชุดทดลอง	0	8.03	0.99	8.30	0.88	8.61	0.97
	15	8.73	0.69	8.92	0.95	9.02	0.58
	30	8.41	0.72	8.67	0.97	8.28	0.56
	45	8.97	1.00	8.02	1.35	7.91	1.07
	60	7.50	2.54	9.07	1.21	8.90	0.92

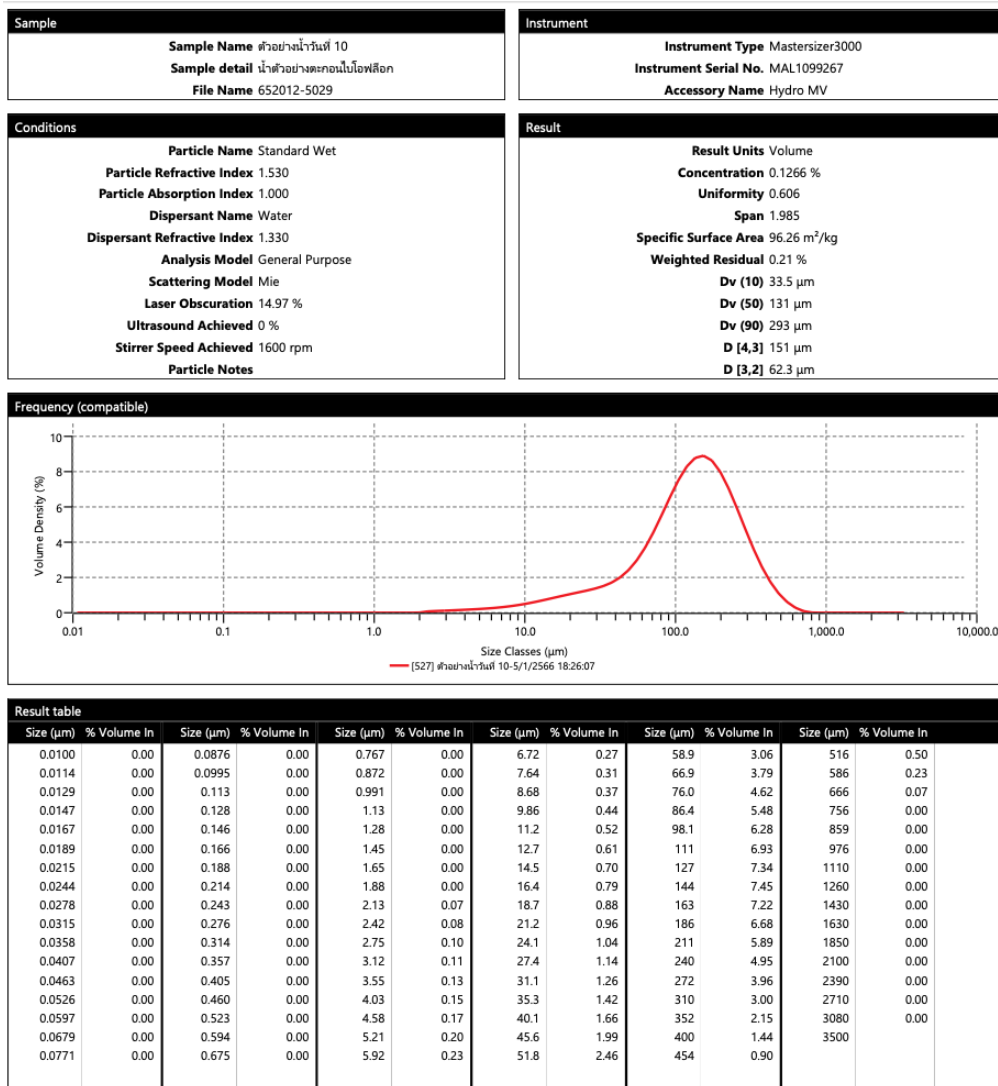
ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของขนาดตะกอนไบโอฟล็อกระหว่างการเตรียมตะกอน
ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1

- ขนาดและการกระจายตัวของตะกอนไบโอฟล็อก ในวันที่ 10



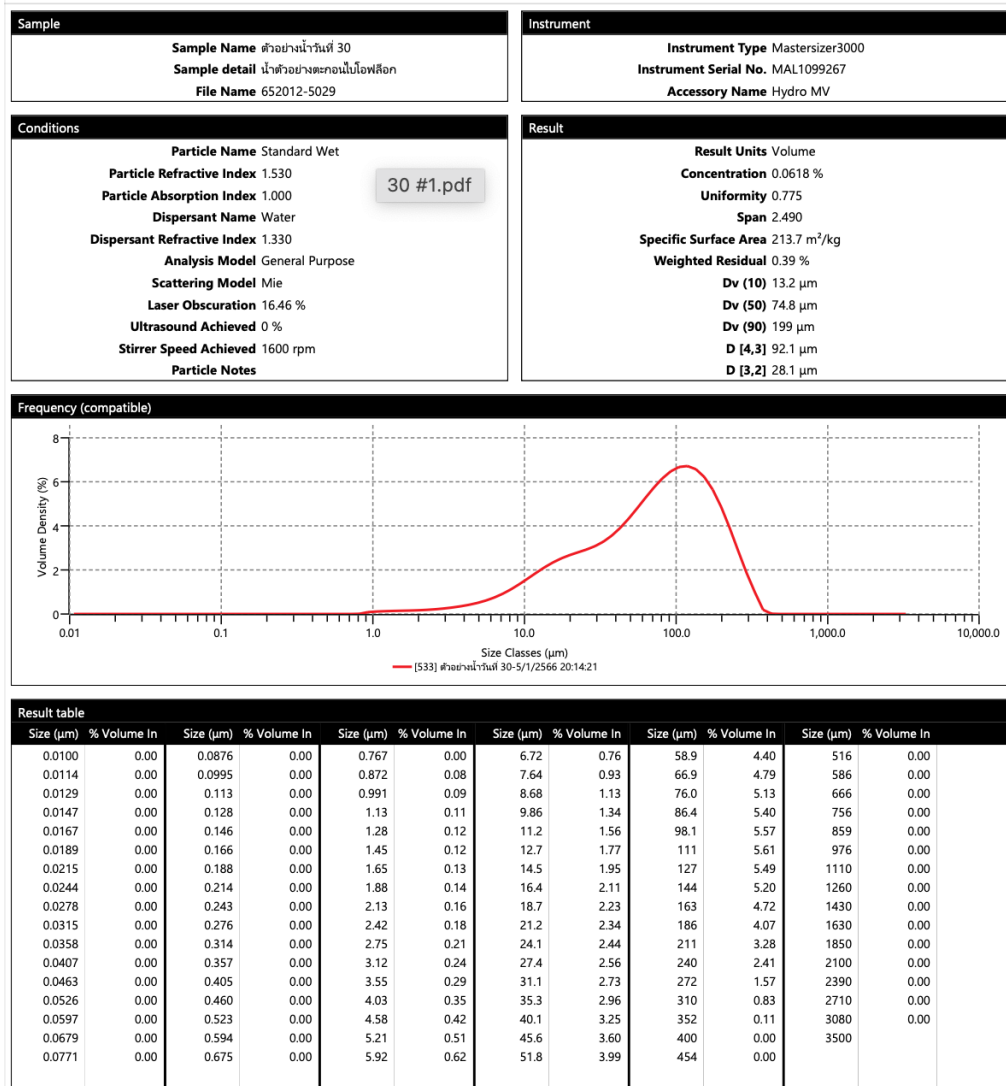
- ขนาดและการกระจายตัวของตะกอนไบโอฟล็อก ในวันที่ 20

Scientific and Technological Research Equipment Centre (STREC), Chulalongkorn University



- ขนาดและการกระจายตัวของตะกอนไบโอฟล็อก ในวันที่ 30

Scientific and Technological Research Equipment Centre (STREC), Chulalongkorn University



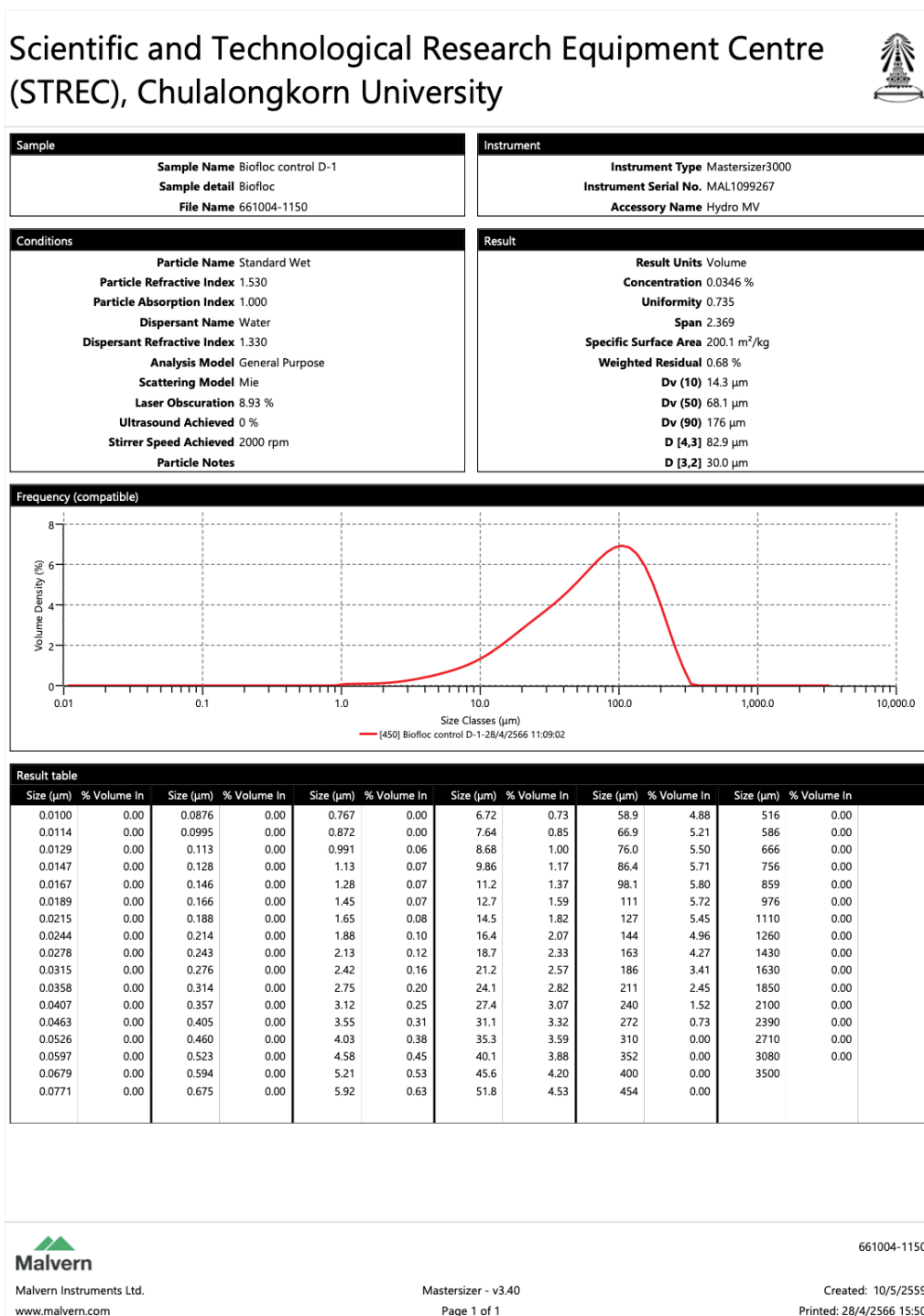
Malvern Instruments Ltd.
www.malvern.com

Mastersizer - v3.40
Page 1 of 1

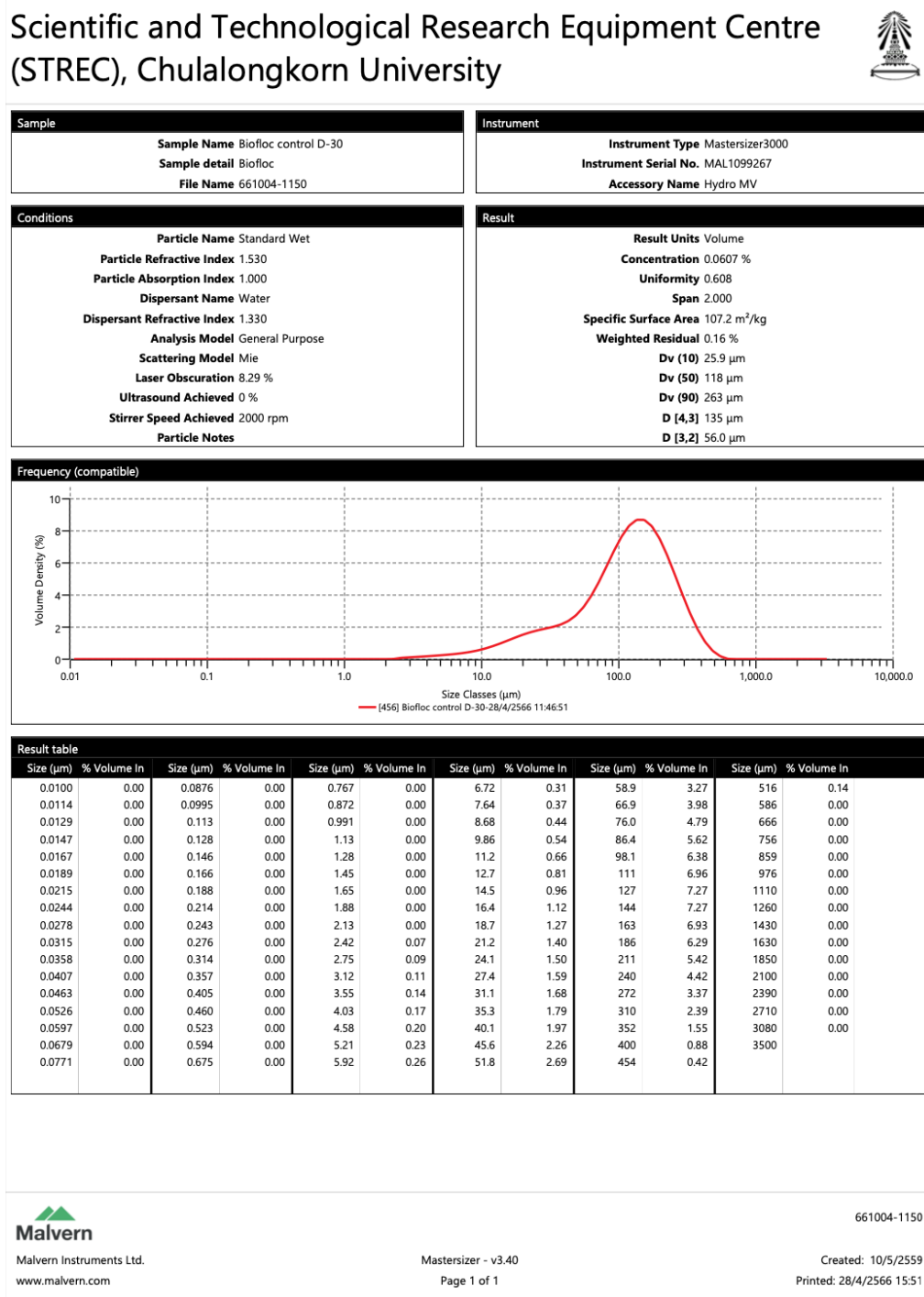
652012-5029
Created: 10/5/2559
Printed: 6/1/2566 11:50

ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของขนาดตะกอนไบโอฟล็อกในการทดลองครั้งที่ 3

- ขนาดและการกระจายตัวของตะกอนไบโอฟล็อกของชุดควบคุม ในวันที่ 1

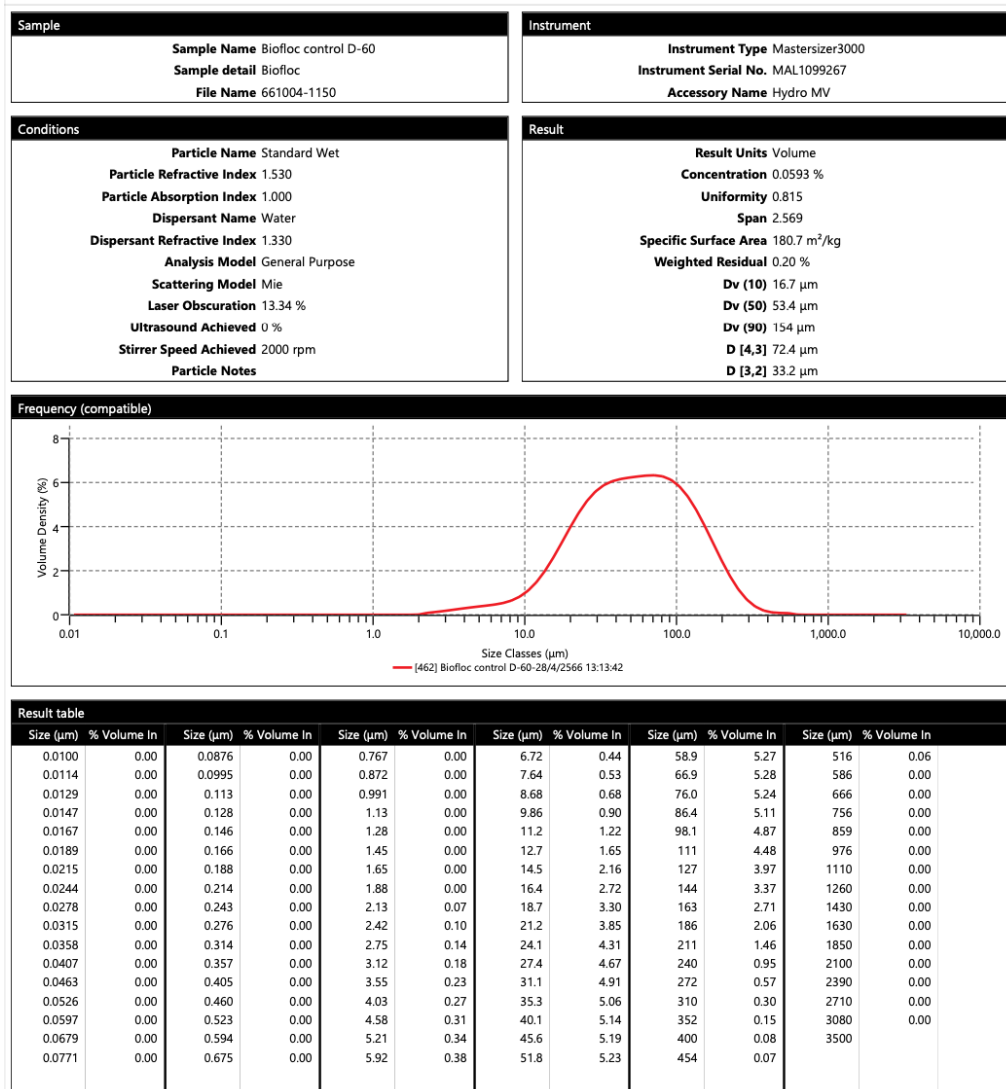


- ขนาดและการกระจายตัวของตะกอนไบโอฟล็อกของชุดควบคุม ในวันที่ 30



- ขนาดและการกระจายตัวของตะกอนไบโอฟล็อกของชุดควบคุม ในวันที่ 60

Scientific and Technological Research Equipment Centre (STREC), Chulalongkorn University



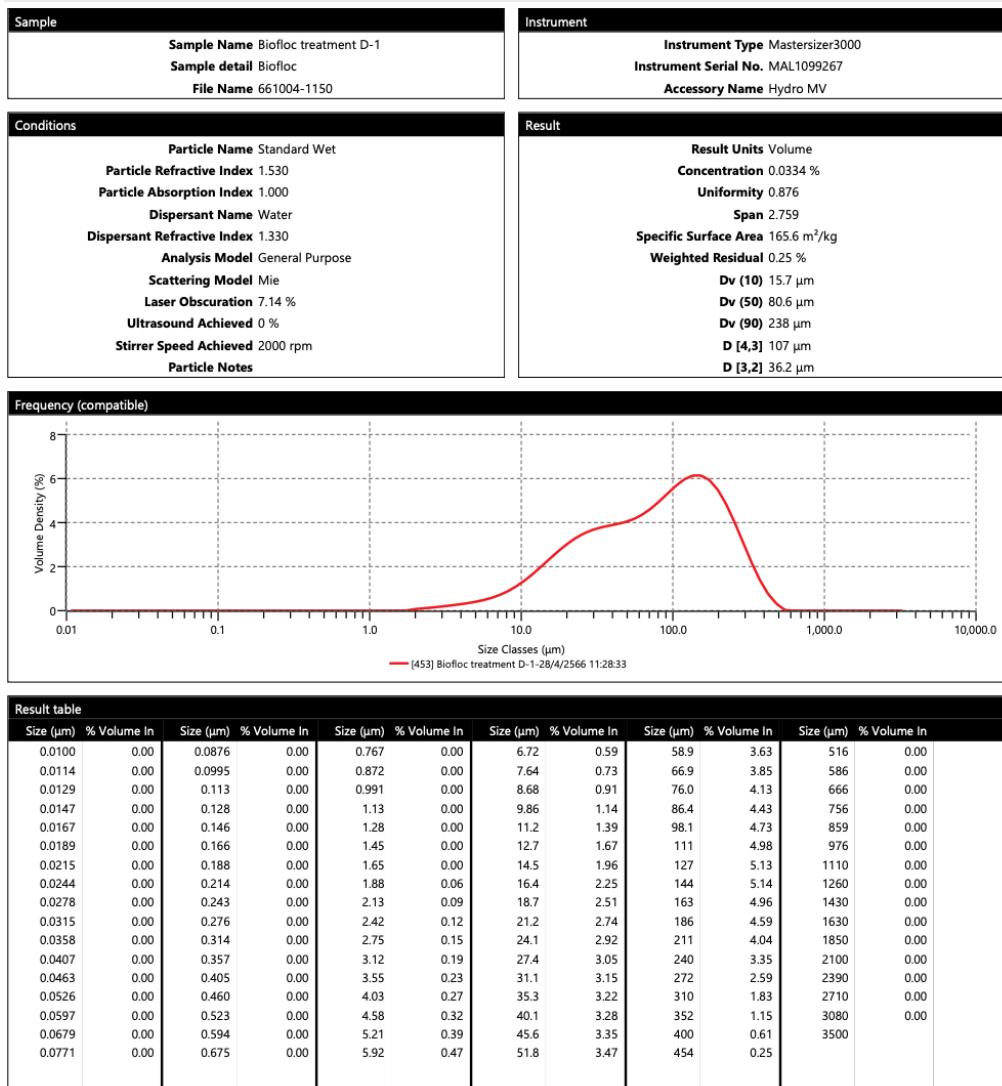
Malvern Instruments Ltd.
www.malvern.com

Mastersizer - v3.40
Page 1 of 1

661004-1150
Created: 10/5/2559
Printed: 28/4/2566 15:54

- ขนาดและการกระจายตัวของตะกอนไบโอฟล็อกของชุดทดลอง ในวันที่ 1

Scientific and Technological Research Equipment Centre (STREC), Chulalongkorn University

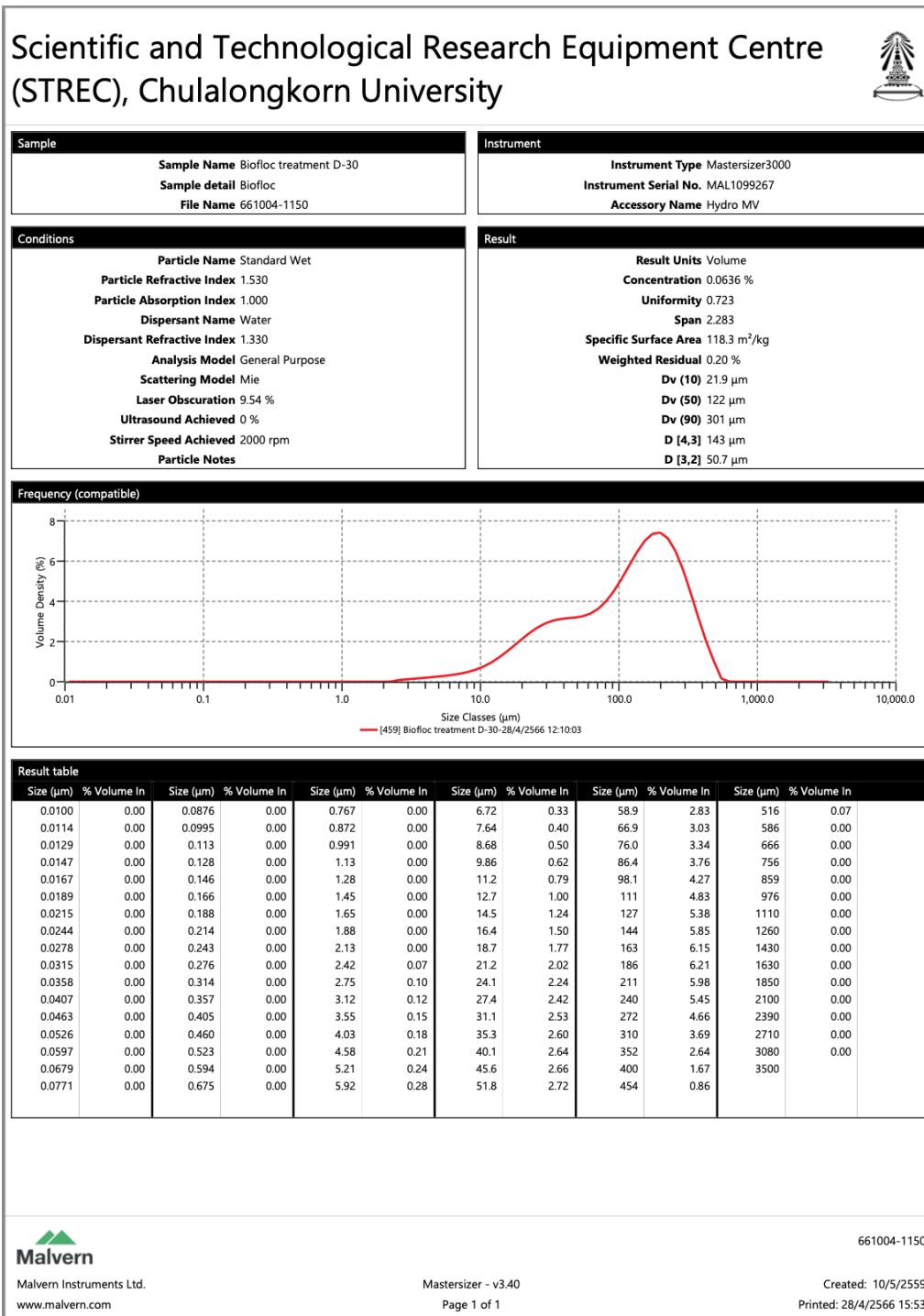


Malvern Instruments Ltd.
www.malvern.com

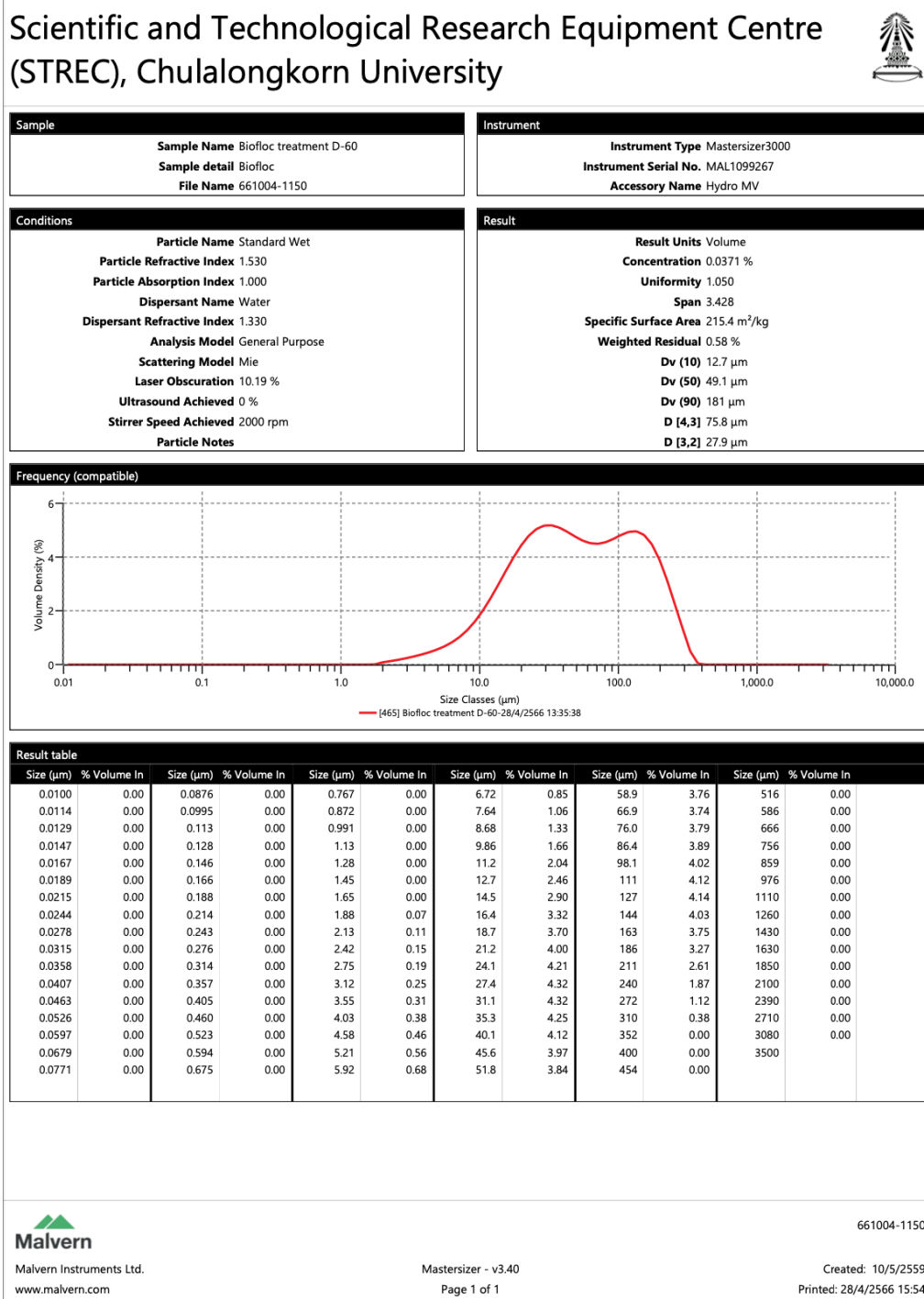
Mastersizer - v3.40
Page 1 of 1

661004-1150
Created: 10/5/2559
Printed: 28/4/2566 15:51

- ขนาดและการกระจายตัวของตะกอนไบโอฟล็อกของชุดควบคุม ในวันที่ 30



- ขนาดและการกระจายตัวของตะกอนไบโอฟล็อกของชุดควบคุม ในวันที่ 60



ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับการทดลองช่วงที่ 3

- ขนาดตะกอนไบโอฟล็อกขณะเลี้ยงสัตว์

ANOVA

BioflocSize

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	13913.425	5	2782.685	2087.014	<.001
Within Groups	16.000	12	1.333		
Total	13929.425	17			

ANOVA Effect Sizes

		Point Estimate	95% Confidence Interval	
			Lower	Upper
BioflocSize a.	Eta-squared	.999	.995	.999
	Epsilon-squared	.998	.993	.999
	Omega-squared Fixed-effect	.998	.993	.999
	Omega-squared Random-effect	.991	.986	.993

a. Eta-squared and Epsilon-squared are estimated based on the fixed-effect model.

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

|

BioflocSize

Duncan^a

Condition2	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
3.00	3	72.2000					
6.00	3		75.2333				
1.00	3			82.5333			
2.00	3				105.0000		
4.00	3					134.3333	
5.00	3						142.0000
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

- อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟิลล์

ANOVA

AmmoniaRemovalRate

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	171483.964	15	11432.266	8.982	<.001
Within Groups	40731.527	32	1272.860		
Total	212215.511	47			

ANOVA Effect Sizes:

		Point Estimate	95% Confidence Interval	
			Lower	Upper
e	Eta-squared	.808	.525	.815
	Epsilon-squared	.718	.302	.728
	Omega-squared Fixed-effect	.714	.298	.724
	Omega-squared Random-effect	.143	.027	.149

a. Eta-squared and Epsilon-squared are estimated based on the fixed-effect model.

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets



AmmoniaRemovalRate

Duncan

Conditio

n	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
16.00	3	42.7667						
8.00	3		114.9133					
14.00	3		129.0787	129.0787				
4.00	3		156.7200	156.7200	156.7200			
3.00	3		161.7387	161.7387	161.7387			
2.00	3		167.4800	167.4800	167.4800			
1.00	3			182.9900	182.9900			
13.00	3			183.8800	183.8800			
12.00	3			187.0987	187.0987	187.0987		
9.00	3				200.8600	200.8600		
5.00	3				202.0633	202.0633		
6.00	3				204.0500	204.0500		
11.00	3				226.8933	226.8933	226.8933	
10.00	3					252.9687	252.9687	252.9687
15.00	3						269.6633	269.6633
7.00	3							296.7100
Sig.		1.000	.116	.092	.054	.053	.175	.147

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

อัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟิลล์

ANOVA

OxygenConsumptionRate

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	509.398	15	33.960	5.971	<.001
Within Groups	210.434	37	5.687		
Total	719.833	52			

ANOVA Effect Sizes^a

		Point Estimate	95% Confidence Interval	
			Lower	Upper
OxygenConsumptionRate	Eta-squared	.708	.360	.722
	Epsilon-squared	.589	.100	.609
	Omega-squared Fixed-effect	.585	.099	.604
	Omega-squared Random-effect	.086	.007	.092

a. Eta-squared and Epsilon-squared are estimated based on the fixed-effect model.

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

OxygenConsumptionRate

Duncan^{a,b}

Condition2	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
15.00	3	5.4167				
16.00	4	5.4500				
14.00	3	6.6700	6.6700			
1.00	3	7.1000	7.1000			
9.00	3	7.3367	7.3367			
2.00	3	8.1300	8.1300	8.1300		
10.00	4	8.6100	8.6100	8.6100		
13.00	3	9.6267	9.6267	9.6267	9.6267	
8.00	3		10.3600	10.3600	10.3600	
6.00	4		10.5200	10.5200	10.5200	
12.00	3		10.9500	10.9500	10.9500	
7.00	4			11.9450	11.9450	
5.00	3			12.3900	12.3900	
11.00	3				13.6433	13.6433
3.00	4				13.9250	13.9250
4.00	3					16.5200
Sig.		.059	.057	.056	.054	.154

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.254.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ศาสตราจารย์ ญาณกาย
วัน เดือน ปี เกิด	24 กรกฎาคม 2540
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2563 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2563
ผลงานตีพิมพ์	ศาสตราจารย์ ญาณกาย, วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์, สรวิศ เผ่าทองสุข, เพ็ญพิชา สำนวนวัตร, 2565. ผลของสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในการ สร้างตะกอนไบโอฟล็อกเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในโตรเจน. การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 61 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 1-3 มีนาคม 2565, รูปแบบออนไลน์. (นำเสนอแบบบรรยาย มีเรื่องเต็ม)