

ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกแบบแยกส่วนในการควบคุมคุณภาพน้ำ
ของการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด



นายสุตา คุณวงศ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Efficiency of Separated Biofloc Reactor in Water Quality Control
of Closed Recirculating Aquaculture System

Mr. Suta Kunwong



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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกแบบแยกส่วนใน การควบคุมคุณภาพน้ำของการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำ หมุนเวียนระบบปิด
โดย	นายสุตา คุณวงศ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์)

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

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.วราห์ เทพาทูดี)

สุตา คุณวงศ์ : ประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกแบบแยกส่วนในการควบคุมคุณภาพน้ำของการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด (Efficiency of Separated Biofloc Reactor in Water Quality Control of Closed Recirculating Aquaculture System) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข, 147 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกแบบแยกส่วนในการควบคุมคุณภาพน้ำของการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง การทดลองช่วงที่ 1 เป็นการศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียและอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อก ผลการทดลองพบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียตลอด 8 สัปดาห์ ที่ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.14 ± 2.74 มก.ไนโตรเจน/ก.ของแข็งแขวนลอย/วัน และอัตราการใช้ออกซิเจนตลอด 8 สัปดาห์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 141.59 ± 18.78 มก.ออกซิเจน/ก.ของแข็งแขวนลอย/วัน การทดลองช่วงที่ 2 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่บรรจุในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกในการแยกของแข็งแขวนลอยออกจากหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำ ผลการทดลองพบว่าตะแกรงสแตนเลสขนาดช่องกรอง 43 ไมครอน เกิดการอุดตันของแผ่นกรองทั้งหมดภายในเวลา 1 ชม. ในขณะที่ขนาดช่องกรอง 76, 100, 130 และ 160 ไมครอน มีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 88.71 ± 2.75 , 86.73 ± 2.08 , 83.86 ± 1.86 และ 66.01 ± 6.41 ตามลำดับ และพบว่าค่าอัตราการไหล 6,000 ล./วัน ทำให้น้ำในถังปฏิกรณ์ไหลล้นลงสู่ถังพักน้ำโดยไม่ผ่านตะแกรงกรอง ขณะที่ค่าอัตราการไหล 1,500 3,000 และ 4,500 ล./วัน มีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนไบโอฟล็อกเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 91.25 ± 1.81 , 89.11 ± 2.89 และ 87.66 ± 2.01 ตามลำดับ การทดลองช่วงที่ 3 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ตะกอนไบโอฟล็อกในถังปฏิกรณ์แบบแยกส่วนเพื่อบำบัดและควบคุมสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยเปรียบเทียบกันระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการแยกตะกอนไบโอฟล็อกออกจากหน่วยเลี้ยงปลาชนิดแบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด กับชุดทดลองที่ติดตั้งถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกซึ่งภายในบรรจุหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองเพื่อแยกตะกอนไบโอฟล็อกออกจากหน่วยเลี้ยงปลาชนิด ผลการทดลองพบว่าโดยภาพรวมชุดทดลองมีประสิทธิภาพในการควบคุมปริมาณไบโอฟล็อกและสารอนินทรีย์ไนโตรเจนได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5770475021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: CLOSED RECIRCULATING AQUACULTURE SYSTEM / BIOFLOC TECHNOLOGY / INORGANIC NITROGEN TREATMENT / SEPARATED TREATMENT SYSTEM

SUTA KUNWONG: Efficiency of Separated Biofloc Reactor in Water Quality Control of Closed Recirculating Aquaculture System. ADVISOR: ASSOC. PROF.WIBOONLUK PUNGRASMI, Ph.D., CO-ADVISOR: SORAWIT POWTONGSOOK, Ph.D., 147 pp.

This research evaluated the efficiency of separated biofloc reactor on water quality control of the Closed Recirculating Aquaculture System (CRAS). The study consisted of 3 experiments. The first experiment was to evaluate ammonia removal and oxygen consumption rates of the biofloc. The results showed that, during 8 weeks experiment, the average ammonia removal rates at 1 mg.N/l ammonia concentration was 8.14 ± 2.74 mg.N/g.TSS/day and the oxygen consumption rates was 141.59 ± 18.78 mg.O₂/g.TSS/day. The second experiment evaluated the efficiency of biofloc separator on suspended solids removal from fish tank. The results showed that 43 micron pore size of stainless screen could not be used as it was clogged within 1 hour of operation. On the other hand, 76, 100, 130 and 160 micron pore size had the average separation efficiency of 88.71 ± 2.75 , 86.73 ± 2.08 , 83.86 ± 1.86 and 66.01 ± 6.41 percent, respectively. Later, water recirculation flow rates were also estimated. It was found that 6,000 L./day flow rate was too high and caused the water overflow while other flow rates e.g. 1,500, 3,000 and 4,500 L./day had the average separation efficiency of 91.25 ± 1.81 , 89.11 ± 2.89 and 87.66 ± 2.01 percent, respectively. The Third experiment was the comparison between separated biofloc reactor (Treatment) and non-separated biofloc reactor (Control) for inorganic nitrogen waste control in the CRAS for Tilapia. The results illustrated that the treatment with separated biofloc reactor had acceptable biofloc separation and better inorganic nitrogen waste treatment efficiency than the control.

Department: Environmental Engineering

Student's Signature

Field of Study: Environmental Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2016

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่เกี่ยวข้องดังรายนามต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ ฝั่งรัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้คำปรึกษาและแนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย พร้อมทั้งคำแนะนำในแก้ไขปัญหาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย รวมทั้งตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนมีความสมบูรณ์ และสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ กรรมการ และรองศาสตราจารย์ ดร. วรวิทย์ เทพาหุติ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้กรุณาชี้แนะให้คำแนะนำและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ขอขอบคุณคณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการประกอบวิชาชีพด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับทำวิจัย และให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ และสารเคมี ตลอดการทำงานวิจัย และขอขอบคุณการสนับสนุนลูกปลานิล แปลงเพศที่ใช้ในการวิจัยจากบริษัท ป. เจริญฟาร์ม จ. ฉะเชิงเทรา

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2560 ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายตลอดการทำวิจัยจนสามารถดำเนินงานวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัว และเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้การสนับสนุน ให้ความช่วยเหลือ และคำปรึกษา พร้อมทั้งเป็นกำลังใจตลอดมา จนทำให้ผู้วิจัยสามารถผ่านพ้นปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ได้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	5
2.1.1 ระบบเปิด (Open System).....	5
2.1.2 ระบบกึ่งปิด (Semi-Closed Systems).....	5
2.1.3 ระบบปิด (Closed System).....	6
2.2 คุณภาพน้ำสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	7
2.2.1 ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen).....	7
2.2.2 อุณหภูมิ (Temperature).....	8
2.2.3 สารอนินทรีย์ไนโตรเจน.....	8
2.2.4 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S).....	10
2.2.5 ความขุ่น (Turbidity).....	10
2.2.6 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH).....	10

2.2.7 ความกระด้าง (Hardness).....	11
2.2.8 ความเป็นด่าง (Alkalinity).....	12
2.3 การบำบัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	12
2.3.1 กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification).....	12
2.3.2 กระบวนการดูดซึมแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ (Ammonia assimilation).....	12
2.3.3 กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification).....	13
2.3.4 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification).....	14
2.4 ตะกอนอินทรีย์ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	14
2.5 การแยกตะกอนในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	14
2.6 เทคโนโลยีไบโอฟล็อกกับการเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	16
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.7.1 เทคโนโลยีไบโอฟล็อกกับการเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	20
2.7.2 การบำบัดคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อก.....	22
2.7.3 การแยกตะกอนออกจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	24
2.8 สรุปประเด็นสำคัญจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 แผนการทดลองและดำเนินงานวิจัย.....	26
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	26
3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	31
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	31
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	31
3.3 การดำเนินการทดลอง.....	32
3.4 พารามิเตอร์ที่ทำการทดลอง.....	51
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	52

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	53
4.1 อัตราการบำบัดแอมโมเนียและอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อก	53
4.1.1 ความสามารถของตะกอนไบโอฟล็อกในการบำบัดแอมโมเนีย	53
4.1.2 อัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อก	57
4.2 ประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่บรรจุในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกใน การแยกของแข็งแขวนลอยออกจากหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำ	67
4.2.1 ขนาดช่องของแผ่นกรองสแตนเลสในการแยกตะกอนไบโอฟล็อกจากระบบเลี้ยง สัตว์น้ำ	67
4.2.2 อัตราการไหลของน้ำเข้าหน่วยกรองตะกอนด้วยขนาดรูของแผ่นกรองที่เหมาะสม	71
4.2.3 ลักษณะของการอุดตันบนแผ่นตะแกรง	75
4.3 การประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกแบบแยกส่วนกับการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียน ระบบปิดขนาดเล็ก	77
4.3.1 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนไบโอฟล็อก	77
4.3.2 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อก	86
4.3.3 การเติบโตของปลาในระหว่างการทดลอง	88
4.3.4 การประเมินสมดุลมวลไนโตรเจน	90
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	93
5.1 สรุปผลการทดลอง	93
5.2 ข้อเสนอแนะ	95
รายการอ้างอิง	96
ภาคผนวก	100
ภาคผนวก ก	101
ภาคผนวก ข	108
ภาคผนวก ค	114

ญ

หน้า

ภาคผนวก ง.....	118
ภาคผนวก จ.....	132
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	147



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ข้อดีและข้อเสียของระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด แบบกึ่งปิด และแบบเปิด	6
ตารางที่ 2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนละลายกับผลกระทบต่อสัตว์น้ำ	7
ตารางที่ 2.3	ความสัมพันธ์ของค่าความเป็นกรด-ด่างกับการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ	11
ตารางที่ 2.4	เกณฑ์การแบ่งประเภทของน้ำตามระดับความกระด้าง.....	11
ตารางที่ 2.5	ข้อดีและข้อเสียของการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยเทคโนโลยีไบโอฟิล็อก.....	19
ตารางที่ 3.1	พารามิเตอร์ในการทดลองที่ 1.1.....	35
ตารางที่ 3.2	พารามิเตอร์ในการทดลองที่ 1.2.....	36
ตารางที่ 3.3	พารามิเตอร์ในการทดลองที่ 1.3.....	37
ตารางที่ 3.4	พารามิเตอร์ในการทดลองที่ 2.1	42
ตารางที่ 3.5	พารามิเตอร์ในการทดลองที่ 2.2.....	44
ตารางที่ 3.6	พารามิเตอร์ในการทดลองที่ 3.....	45
ตารางที่ 3.7	พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ตะกอน และสัตว์น้ำในการทดลอง.....	51
ตารางที่ 4.1	การเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ.....	55
ตารางที่ 4.2	ค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำในถังเลี้ยงปลานิลระหว่างการทดลองช่วงที่ 1	59
ตารางที่ 4.3	การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการศึกษาขนาดช่องกรองที่ต่างกัน.....	70
ตารางที่ 4.4	การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการศึกษาอัตราการไหลที่ต่างกัน.....	74
ตารางที่ 4.5	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกตะกอนของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ	75
ตารางที่ 4.6	ค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำในถังเลี้ยงปลานิลระหว่างการทดลองช่วงที่ 3.....	78
ตารางที่ 4.7	ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพสัตว์น้ำในช่วงการทดลองที่ 3	89
ตารางที่ 4.8	ปริมาณร้อยละของธาตุพื้นฐานในอาหารปลานิล ตะกอนไบโอฟิล็อก แข็งมันสำปะหลัง และตัวปลานิล	80
ตารางที่ 4.9	ปริมาณและสัดส่วนไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบทั้งหมดกับไนโตรเจนคงเหลือในวันสุดท้าย..	91

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 กลไกการกรองแบบเคลื่อนย้าย (Transport mechanism)	15
รูปที่ 2.2 กระบวนการกรองแบบไหลขวาง (Cross flow filtration)	16
รูปที่ 2.3 แนวคิดของการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อก	18
รูปที่ 3.1 แผนผังภาพรวมของงานวิจัย	27
รูปที่ 3.2 แผนผังการทดลองช่วงที่ 1	28
รูปที่ 3.3 แผนผังการทดลองช่วงที่ 2	29
รูปที่ 3.4 แผนผังการทดลองช่วงที่ 3	30
รูปที่ 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลองช่วงที่ 1.....	33
รูปที่ 3.6 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวิเคราะห์อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อก	35
รูปที่ 3.7 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวิเคราะห์อัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อก.....	36
รูปที่ 3.8 หน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
รูปที่ 3.9 ลักษณะของแผ่นตะแกรงสแตนเลสที่ติดอยู่บนหน่วยแยกตะกอน.....	39
รูปที่ 3.10 การติดตั้งหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อก	40
รูปที่ 3.11 ขนาดช่องกรองของตะแกรงสแตนเลสเมื่อส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ	42
รูปที่ 3.12 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบขนาดช่องกรองของแผ่นกรองสแตนเลส.....	43
รูปที่ 3.13 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบอัตราการไหลของหน่วยกรองตะกอน	44
รูปที่ 3.14 การติดตั้งอุปกรณ์แสดงการหมุนเวียนน้ำและตะกอนชีวภาพของชุดควบคุม.....	47
รูปที่ 3.15 การติดตั้งอุปกรณ์แสดงการหมุนเวียนน้ำและตะกอนชีวภาพของชุดทดลอง	48
รูปที่ 3.16 การวิเคราะห์การเจริญเติบโตของปลาไนล	51
รูปที่ 4.1 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกในแต่ละสัปดาห์ในการทดลองช่วงที่ 1... 54	54
รูปที่ 4.2 อัตราการสะสมไนเตรตของตะกอนไบโอฟล็อกในแต่ละสัปดาห์ในการทดลองช่วงที่ 1..... 54	54

รูปที่ 4.3 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกในสัปดาห์ที่ 7.....	56
รูปที่ 4.4 กราฟจำลองการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อก.....	56
รูปที่ 4.5 อัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อกในสัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 8.....	58
รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ระหว่างการเลี้ยง ปลานิลด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกในการทดลองครั้งที่ 1.....	60
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดและค่าความเป็นด่าง ระหว่าง การเลี้ยงปลานิลด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกในการทดลองส่วนที่ 1.....	62
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนได้ในเวลา 30 นาที และค่าดัชนีปริมาณ ตะกอน ระหว่างการเลี้ยงปลานิลด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกในการทดลองส่วนที่ 1.....	63
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบกับปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนได้ในเวลา 30 นาที.....	64
รูปที่ 4.10 ขนาดของตะกอนไบโอฟล็อกในแต่ละช่วงเวลาของการทดลองส่วนที่ 1.....	65
รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของขนาดตะกอนไบโอฟล็อกในแต่ละช่วงเวลาของการทดลองส่วนที่ 1 ..	66
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างลักษณะ ตะกอนไบโอฟล็อกเมื่อส่องตรวจภายใต้กล้องจุลทรรศน์.....	66
รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการแยกตะกอนแขวนลอยเมื่อแปรค่าขนาดช่องกรองแตกต่างกัน	68
รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอยระหว่างการเดินระบบเมื่อแปรค่าขนาด ช่องกรองแตกต่างกัน.....	69
รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพในการแยกตะกอนแขวนลอยเมื่อแปรค่าอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ แตกต่างกัน	72
รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอยระหว่างการเดินระบบเมื่อแปรค่าอัตราการไหล ของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน.....	73
รูปที่ 4.17 รูปถ่ายแสดงพื้นผิวด้านในของตะแกรงสแตนเลสภายหลังการใช้งาน.....	76
รูปที่ 4.18 รูปถ่ายแสดงพื้นผิวด้านนอกของตะแกรงสแตนเลสภายหลังการใช้งาน.....	76
รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ระหว่างการเลี้ยงปลานิล ด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกในการทดลองครั้งที่ 3.....	79

รูปที่ 4.20 ปริมาณการเติมแป้งมันสำปะหลังและปริมาณการให้อาหาร ระหว่างการเลี้ยงปลานิล ด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกในการทดลองช่วงที่.....	81
รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นด่างระหว่างการเลี้ยงปลานิลด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อก ในการทดลองช่วงที่ 3.....	81
รูปที่ 4.22 ปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนได้ในเวลา 30 นาที ของชุดควบคุมและชุดทดลอง และค่าดัชนีปริมาณตะกอน ของชุดควบคุมและชุดทดลอง ในการทดลองช่วงที่.....	83
รูปที่ 4.23 ความสามารถในการตกตะกอนของตะกอนไบโอฟล็อก.....	84
รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอยของชุดควบคุมและชุดทดลองระหว่าง การเดินระบบในการทดลองช่วงที่ 3.....	85
รูปที่ 4.25 การถ่ายตะกอนส่วนเกินออกจากระบบสำหรับชุดควบคุมและชุดทดลอง.....	86
รูปที่ 4.26 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกในการทดลองช่วงที่ 3.....	87
รูปที่ 4.27 อัตราการสะสมไนเตรตของตะกอนไบโอฟล็อกในการทดลองช่วงที่ 3.....	88

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากปัญหาการเพิ่มขึ้นอย่างมากของประชากรโลกในปัจจุบัน รวมถึงข้อจำกัดด้านสิ่งแวดล้อมในการเพิ่มผลผลิตสัตว์น้ำ (De Schryver และคณะ, 2008) ส่งผลให้ปริมาณสัตว์น้ำไม่เพียงพอต่อความต้องการเพื่อบริโภค ทั้งนี้เนื่องจากรูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำในปัจจุบันทั้งการเลี้ยงในกระชังและการเลี้ยงในบ่อดินไม่สามารถควบคุมสภาวะที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงได้ และยังเป็น การสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยน้ำเสียที่ปนเปื้อนจากการเลี้ยงสัตว์น้ำลงสู่แหล่งน้ำโดยตรง ดังนั้นการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด (Closed Recirculating Aquaculture System หรือ RAS) ในระดับความหนาแน่นสูงจึงได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้น โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มผลผลิตสัตว์น้ำให้เพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภค ตลอดจนเป็นการพัฒนาการเลี้ยงสัตว์น้ำที่ยั่งยืนและไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม (Naylor และคณะ, 2000) รวมถึงลดปริมาณการใช้น้ำและป้องกันการแพร่ระบาดของโรคสัตว์น้ำในพื้นที่การเลี้ยงอีกด้วย อย่างไรก็ตามการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดมีข้อเสียคือ ต้องใช้การลงทุนทั้งด้านการเงินและการจัดการสูง และต้องการบุคลากรที่มีความชำนาญในการควบคุมและดูแลระบบ ทั้งนี้การจะเลี้ยงสัตว์น้ำให้มีประสิทธิภาพนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่สำคัญคือคุณภาพน้ำที่ใช้ในการเลี้ยง เนื่องจากการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดใน ระดับความหนาแน่นสูงเป็นระบบที่ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ส่งผลให้เกิดการสะสมของของเสียในรูปของสารอนินทรีย์ไนโตรเจน เช่น แอมโมเนีย และไนไตรต์ ในปริมาณสูง ซึ่งความเข้มข้นของแอมโมเนีย และไนไตรต์เกิน 1 มก.ไนโตรเจน/ล. จะส่งผลต่อสัตว์น้ำ โดยขัดขวางกระบวนการรักษาสมดุลเกลือแร่และการขนถ่ายออกซิเจนในเลือด ทำให้สัตว์น้ำเกิดความเครียด ไม่เจริญเติบโต และอาจตายได้ ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่สามารถบำบัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนเหล่านี้เข้ากับบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจึงมีความสำคัญ ซึ่งเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจในปัจจุบันคือ เทคโนโลยีไบโอฟล็อก (Biofloc Technology) โดยหลักการคือการปรับอัตราส่วนปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจนของน้ำในบ่อเลี้ยงให้ไม่น้อยกว่า 10:1 (Avnimelech, 1999) หรือการลดองค์ประกอบของโปรตีนในอาหารสำเร็จรูปเพื่อเพิ่มอัตราส่วน

สารอินทรีย์คาร์บอนในระบบ (Hargreaves, 2006) แนวทางดังกล่าวจะกระตุ้นให้แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ (Heterotroph bacteria) เพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วและจับตัวเป็นก้อนตะกอนชีวภาพแขวนลอยในน้ำที่เรียกว่า “ไบโอฟล็อก” ก้อนฟล็อกดังกล่าวเป็นการรวมตัวกันของกลุ่มแบคทีเรีย สาหร่าย โปรโตซัว รวมทั้งสารอินทรีย์ต่างๆ (Hargreaves, 2013) ซึ่งสัตว์น้ำบางชนิดสามารถกรองกินตะกอนไบโอฟล็อกเหล่านี้เพื่อใช้เป็นแหล่งโปรตีนได้

สำหรับกลไกของตะกอนไบโอฟล็อกในการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนนั้นเกิดจากแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟดูดซึมแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ (Ammonia assimilation) เพื่อใช้สร้างส่วนประกอบของเซลล์และแบคทีเรียเซลล์ใหม่ จึงทำให้ปริมาณแอมโมเนียในน้ำลดลง แต่เนื่องจากในระบบการเลี้ยงสัตว์ด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกไม่ได้มีเพียงการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟเท่านั้น ยังมีแบคทีเรียกลุ่มไนโทรไฟอิงซึ่งจะเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรต์และไนเตรต (Nitrification) อยู่ด้วย ซึ่งผลจากการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มในระบบจะทำให้เกิดการสะสมตะกอนไบโอฟล็อกในปริมาณสูง มีรายงานว่าความเข้มข้นของปริมาณตะกอนไบโอฟล็อกที่เกินกว่า 850 มก.ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด/ล. จะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของปลานิล โดยจะสะสมที่บริเวณเหงือกทำให้ประสิทธิภาพในการขนถ่ายออกซิเจนลดลงและเกิดการตายที่เพิ่มมากขึ้น (Little และคณะ, 2008) อีกทั้งตะกอนเหล่านี้ยังส่งผลทำให้อัตราความต้องการใช้ออกซิเจนในระบบสูงขึ้น จึงสิ้นเปลืองพลังงานในการเติมอากาศ โดยหากในระบบมีการเติมอากาศและการกวนผสมที่ไม่เพียงพอจะทำให้แบคทีเรียบางส่วนตายและย่อยสลายกลายเป็นแอมโมเนียอีกครั้ง ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียลดลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจทำการศึกษากระบวนการและการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ทั้งด้านคุณภาพน้ำ คุณภาพตะกอน และคุณภาพสัตว์น้ำที่เกิดขึ้นในการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดในระดับความหนาแน่นสูง โดยใช้เทคโนโลยีไบโอฟล็อกในถังที่แยกออกจากถังเลี้ยงปลาในการช่วยบำบัดและควบคุมสารอินทรีย์ไนโตรเจน เพื่อให้ได้แนวทางการจัดการและควบคุมปริมาณความเข้มข้นของตะกอนไบโอฟล็อกให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียและอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อกในการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองในการแยกตะกอนไบโอฟล็อกออกจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ตะกอนไบโอฟล็อกในถังปฏิกรณ์แบบแยกส่วนเพื่อบำบัดและควบคุมสารอินทรีย์ไนโตรเจนในการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ และห้องปฏิบัติการวิจัยปรีญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยกำหนดขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1. ทำการเลี้ยงปลานิล *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) ที่ระดับความหนาแน่นเริ่มต้น 3 กก./ลบ.ม. ด้วยอาหารสำเร็จรูปทั่วไปที่มีโปรตีนร้อยละ 20 ในอัตราการให้อาหารเท่ากับร้อยละ 3 ของน้ำหนักตัวปลาต่อวัน
2. ตะกอนไบโอฟล็อกที่ใช้ในการทดลองเป็นตะกอนอินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองภายในถังเลี้ยงปลานิลโดยไม่มีการเติมหัวเชื้อเริ่มต้น ทั้งนี้ตะกอนไบโอฟล็อกจะถูกกระตุ้นโดยการเติมแหล่งคาร์บอนในรูปแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1 และได้รับแหล่งไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียจากของเสียที่ปลานิลขับถ่ายออกมา โดยจะหยุดเติมแป้งมันสำปะหลังเมื่อตรวจพบไนเตรตสะสมในระบบประมาณ 3 มก.ไนโตรเจน/ล.
3. ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตะกอนไบโอฟล็อก โดยเก็บตัวอย่างตะกอนชีวภาพเพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ขนาดของตะกอน อัตราการบำบัดแอมโมเนีย และอัตราการใช้ออกซิเจน

4. ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำ โดยเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ด้วยวิธีมาตรฐานตามที่ระบุใน Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWA และ WPCF, 2005)

5. ทำการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการรอดชีวิตของปลาไนล์ โดยนับจำนวนและสุ่มตัวอย่างปลาไนล์เพื่อชั่งน้ำหนักและวัดความยาว

6. หน่วยแยกตะกอนที่ใช้ในการศึกษาเป็นกรวยกรองที่ติดแผ่นกรองสแตนเลส โดยบรรจุอยู่ในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกที่แยกส่วนออกจากหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ข้อมูลปริมาณตะกอนชีวภาพที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลาไนล์ด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกเพื่อใช้ในการกำหนดความหนาแน่นของสัตว์น้ำที่ระบบสามารถรองรับอัตราการบำบัดของเสียได้

2. ได้แนวทางที่เหมาะสมในการจัดการตะกอนไบโอฟล็อกเพื่อลดผลกระทบจากการสะสมของตะกอนชีวภาพในระบบซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโตของปลาไนล์

3. เป็นแนวทางสำหรับเกษตรกรเพื่อพัฒนารูปแบบการเลี้ยงปลาไนล์แบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดที่ลดการปล่อยน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ

ในปัจจุบันการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้นเพื่อเพิ่มปริมาณผลผลิตสัตว์น้ำให้เพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภค และลดปริมาณการจับสัตว์น้ำจากธรรมชาติ โดยระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ ระบบเปิด (Open system) ระบบกึ่งปิด (Semi-Closed Systems) และระบบปิด (Closed System) ดังนี้

2.1.1 ระบบเปิด (Open System)

เป็นระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบดั้งเดิมที่พึ่งพาธรรมชาติเป็นหลัก โดยอาศัยแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น แม่น้ำลำคลอง บึง ทะเล เป็นพื้นที่ในการเลี้ยง สัตว์น้ำจะกินอาหารที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ หรือมีการให้อาหารสมทบร่วมด้วย โดยลูกสัตว์น้ำวัยอ่อนอาจรวบรวมมาจากธรรมชาติหรือเพาะเลี้ยงขึ้นมาในโรงเพาะฟัก การเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบนี้บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจะได้รับอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อมโดยตรง จึงทำให้ได้รับผลกระทบเมื่อสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง อีกทั้งยังเป็นการปล่อยของเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำลงสู่แหล่งน้ำโดยตรงอีกด้วย ตัวอย่างการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบระบบเปิด ได้แก่ การเลี้ยงปลาในบ่อน้ำธรรมชาติ การเลี้ยงปลาในกระชัง การเลี้ยงหอยแมลงภูโดยการปักหลักไม้ไผ่ การเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบน้ำไหลผ่าน (Flow-through System) เป็นต้น

2.1.2 ระบบกึ่งปิด (Semi-Closed Systems)

เป็นระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำบางส่วนเมื่อบ่อเลี้ยงมีปริมาณแอมโมเนียและไนไตรต์สูงเกินไป (สุब्ณชิต นิรมรัตน์ และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย, 2552) เพื่อการจัดการคุณภาพน้ำ และเพื่อเลี้ยงสัตว์น้ำในอัตราที่หนาแน่นสูงกว่าการเลี้ยงแบบเปิด โดยมีการให้อาหารเม็ดและให้อากาศอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการเลี้ยงแบบกึ่งปิดนี้จึงมีการจัดการมากกว่าการเลี้ยงแบบเปิด ปัญหาอีกประการคือเนื่องจากต้องมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำจากธรรมชาติ ฟาร์มควรตั้งอยู่ใกล้แหล่งน้ำธรรมชาติ

ในกรณีของการเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งจึงอาจมีการบุกกรุกป่าชายเลนเพื่อตั้งฟาร์ม ซึ่งจะทำลายแหล่งเพาะพันธุ์สัตว์น้ำตามธรรมชาติ นอกจากนี้การที่ต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำถ้าไม่มีการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ก็จะทำให้คุณภาพน้ำภายนอกเสื่อมโทรมได้ ตัวอย่างการเลี้ยงสัตว์แบบระบบกึ่งปิด ได้แก่ การเลี้ยงสัตว์น้ำในบ่อดินกลางแจ้ง เป็นต้น

2.1.3 ระบบปิด (Closed System)

เป็นระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำที่ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ มีเพียงการชดเชยน้ำในส่วนที่ระเหยไปสามารถเลี้ยงสัตว์น้ำได้อย่างหนาแน่น มีการให้อาหารที่มีคุณค่าโภชนาการสมบูรณ์ มีการให้ออกซิเจนตลอดเวลา มีการจัดการคุณภาพน้ำโดยนำหน่วยบำบัดทางกายภาพและชีวภาพต่างๆ มาใช้เพื่อกำจัดอาหารส่วนเกินและของเสียออกจากน้ำ ตัวอย่างการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบระบบปิด ได้แก่ การเลี้ยงสัตว์น้ำในโรงเรือน การเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด แบบกึ่งปิด และแบบเปิด

ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ	ข้อดี	ข้อเสีย
ระบบเปิด (Open system)	<ul style="list-style-type: none"> - มีการลงทุนทั้งด้านการเงินและการจัดการต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมในการเลี้ยงได้ - อัตราการเติบโตของสัตว์น้ำไม่แน่นอนและผลผลิตต่ำ
ระบบกึ่งปิด (Semi-Closed Systems)	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมในการเลี้ยงได้ - สามารถควบคุมการเติบโตของสัตว์น้ำได้ผลผลิตสูงขึ้น 	<ul style="list-style-type: none"> - มีการลงทุนทั้งด้านการเงินและการจัดการที่สูงขึ้น - ต้องมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำจากธรรมชาติเข้าสู่ฟาร์มบ่อยครั้ง
ระบบปิด (Closed System)	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถควบคุมจัดการคุณภาพน้ำ ตะกอน และของเสียได้ง่ายและสะดวก - ลดปัญหาเกี่ยวกับโรค ปรสิต และคุณภาพน้ำที่นำมาใช้เปลี่ยนถ่าย - ลดปริมาณการใช้น้ำและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม - ผลผลิตที่ได้สูงและมีคุณภาพ 	<ul style="list-style-type: none"> - มีการลงทุนทั้งด้านการเงินและการจัดการที่สูงมาก - ต้องการบุคลากรที่มีความชำนาญในการควบคุมและดูแลระบบในระดับสูง

ทั้งนี้ปัจจัยที่มีสำคัญต่อระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ คุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงและตะกอนอินทรีย์ที่สะสมในระบบ ซึ่งปัจจัยทั้งสองจะส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำทั้งทางตรงและทางอ้อม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมปัจจัยดังกล่าวให้มีความเหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ โดยพารามิเตอร์และกระบวนการต่างๆ ที่สำคัญในการควบคุมคุณภาพน้ำและตะกอนอินทรีย์ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำมีรายละเอียดดังนี้

2.2 คุณภาพน้ำสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ

คุณภาพน้ำเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นอย่างมาก เนื่องจากน้ำเป็นทั้งแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์น้ำ แหล่งของออกซิเจน และเป็นที่รองรับของเสียจากสัตว์น้ำด้วย ดังนั้นการควบคุมคุณภาพน้ำให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำที่สำคัญต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำได้แก่

2.2.1 ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen)

ปริมาณออกซิเจนละลายถือเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ เนื่องจากมีบทบาทในการควบคุมกระบวนการเมตาบอลิซึมของสัตว์น้ำ แหล่งที่มาของออกซิเจนในแหล่งน้ำมาจากการแพร่จากอากาศ การสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืชและพรรณไม้น้ำ โดยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนละลายกับผลกระทบต่อสัตว์น้ำแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนละลายกับผลกระทบต่อสัตว์น้ำ

(มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2544)

ปริมาณออกซิเจนละลาย	ผลกระทบต่อสัตว์น้ำ
น้อยกว่า 1 ม.ก/ล.	สัตว์น้ำอาจถึงตายถ้าเกิดขึ้นเป็นเวลานานหลายๆ ชั่วโมง
1-5 ม.ก/ล.	สัตว์น้ำมีชีวิตรอดอยู่ได้ แต่ถ้าเกิดขึ้นต่อเนื่องปลาจะเจริญเติบโตช้าและไม่สามารถสืบพันธุ์ได้ดี
มากกว่า 5 ม.ก/ล. แต่ไม่เกินระดับอิ่มตัว	เหมาะสำหรับการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ของสัตว์น้ำ

2.2.2 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญต่อสัตว์น้ำ เนื่องจากสัตว์น้ำเป็นสัตว์เลือดเย็น ซึ่งอุณหภูมิของร่างกายจะอยู่ในระดับเดียวกับอุณหภูมิน้ำ และจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำ โดยอุณหภูมิในบ่อและในแหล่งน้ำจะมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับปริมาณแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของอากาศ การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมินั้นส่งผลต่ออัตราเมตาบอลิซึมและการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ ทั้งนี้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการละลายของออกซิเจนในน้ำก็จะลดลงด้วย

2.2.3 สารอินทรีย์ในโตรเจน

2.2.3.1 แอมโมเนีย (NH_3)

แหล่งของแอมโมเนียในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำส่วนใหญ่มาจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำ และการเน่าสลายของเศษอาหารส่วนเกิน แพลงก์ตอน และแบคทีเรีย โดยกระบวนการเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นแอมโมเนีย (Ammonification) ซึ่งแอมโมเนียที่อยู่ในน้ำจะมีอยู่ด้วยกัน 2 รูปแบบได้แก่ แอมโมเนีย (NH_3) และ แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ขึ้นกับค่าพีเอชและอุณหภูมิของน้ำ โดยที่แอมโมเนียจะมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมากกว่าแอมโมเนียมไอออน (Meade, 1985) เมื่อแอมโมเนียในน้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้การขับถ่ายแอมโมเนียของปลา ลดลง เกิดการสะสมของแอมโมเนียในเลือด ส่งผลให้พีเอชในเลือดเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีผลต่อปฏิกิริยาของเอนไซม์ต่างๆ รวมถึงลดความสามารถของเลือดในการขนถ่ายออกซิเจนด้วย ถ้าในแหล่งน้ำมีแอมโมเนียสูงจะทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายลดลงซึ่งส่งผลต่อห่วงโซ่อาหาร รวมถึงทำให้เกิดการรวมตัวกับคลอรีนในระบบผลิตน้ำประปา ทำให้เกิดสารตัวกลางกลุ่มคลอรามินซึ่งทำให้น้ำประปามีกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ ในมนุษย์หากสัมผัสที่ความเข้มข้น 400 ppm นาน 30 - 60 นาที ทำให้เกิดอาการระคายเคืองของเนื้อเยื่อต่างๆ ถ้าได้รับในปริมาณสูงที่ความเข้มข้น 5,000 - 12,000 ppm จะส่งผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง ทำให้กล้ามเนื้อหัวใจหดตัว เกิดภาวะขาดออกซิเจนอย่างเฉียบพลัน และทำให้เสียชีวิตได้

2.2.3.2 ไนไตรต์ (NO_2^-)

แหล่งของไนไตรต์ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชันของแอมโมเนียไปเป็นไนไตรต์ในสภาวะที่มีออกซิเจน จากกิจกรรมของแบคทีเรียกลุ่มออกซิไดซ์แอมโมเนีย (Ammonia Oxidizing Bacteria หรือ AOB) หรือบางครั้งอาจเกิดจากกระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ และไนเตรตที่ตกชั้นในสภาวะขาดออกซิเจน ไนไตรต์เป็นสารที่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำสามารถถูกดูดซึมเข้าทางเหงือกของสัตว์น้ำได้ โดยไนไตรต์จะออกซิไดซ์กับเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ในฮีโมโกลบินให้กลายเป็นเหล็กในรูปเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ทำให้เกิดเมธิโมโกลบิน (Methemoglobin) ซึ่งไม่สามารถรับออกซิเจนได้ เลือดที่มีเมธิโมโกลบินจะมีสีน้ำตาล จึงเรียกอาการที่เกิดจากความพิษของไนไตรต์ว่า โรคเลือดน้ำตาล (Brown blood disease)

2.2.3.3 ไนเตรต (NO_3^-)

แหล่งของไนเตรตในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชันของไนไตรต์ไปเป็นไนเตรตในสภาพที่มีออกซิเจน จากกิจกรรมของแบคทีเรียกลุ่มออกซิไดซ์ไนไตรต์ (Nitrite Oxidizing Bacteria หรือ NOB) โดยไนเตรตจะสะสมอยู่ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำหรือถูกพืชน้ำหรือแพลงก์ตอนพืชนำไปใช้เป็นธาตุอาหารในการเจริญเติบโต ตามปกติแล้วไนเตรตมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำน้อยมาก แต่ไนเตรตในปริมาณสูงอาจทำให้เกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของพืชน้ำสาหร่ายและแพลงก์ตอนพืช ในแหล่งน้ำธรรมชาติเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ยูโทรฟิเคชัน” (Eutrophication) ในแหล่งน้ำธรรมชาติได้ ซึ่งส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำลงอย่างเฉียบพลัน ในมนุษย์ไนเตรตส่งผลทำให้เกิดโรค Blue baby syndrome หรือ Methemoglobinemia ทำให้ Hemoglobin ในเลือดเปลี่ยนไปเป็น methemoglobin ซึ่งไม่สามารถจับกับออกซิเจนได้ทำให้ทารกในครรภ์เกิดอาการตัวเขียวเนื่องจากการขาดออกซิเจน

2.2.4 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)

ไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นสารประกอบของกำมะถันซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำค่อนข้างสูง การสะสมไฮโดรเจนซัลไฟด์ในบ่อหรือในแหล่งน้ำอาจเกิดจากการเน่าสลายของสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ หรือการรีดิวซ์ซัลเฟตโดยแบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตในสภาวะขาดออกซิเจน โดยที่ระดับพีเอชต่ำยังส่งผลทำให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์มีความเป็นพิษมากขึ้นด้วย ในมนุษย์หากสัมผัสไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ระดับความเข้มข้นน้อยกว่า 100 ppm จะทำให้เกิดอาการระคายเคืองของเนื้อเยื่อต่างๆ หรือถ้าได้รับในปริมาณสูงที่ระดับความเข้มข้นมากกว่า 1,000 ppm จะทำให้หยุดหายใจเฉียบพลันจนเสียชีวิตได้ นอกจากนี้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำให้เกิดฝนกรดและเกิดการกัดกร่อนในท่อระบายน้ำเสีย



2.2.5 ความขุ่น (Turbidity)

ความขุ่นเป็นคุณสมบัติของน้ำในการดูดซับและการกระจายแสง สาเหตุของความขุ่นอาจเกิดจากอนุภาคดินเหนียว สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ขนาดเล็ก แพลงก์ตอน หรือจุลินทรีย์ต่างๆ ที่อาศัยอยู่ในน้ำ ในน้ำที่มีความขุ่นมากเกินไปอาจทำให้เกิดการอุดตันที่เหงือกของสัตว์น้ำ ส่งผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนออกซิเจนของสัตว์น้ำ หรืออาจทำให้แสงส่องผ่านลงไปใต้น้ำน้อยลง และยังส่งผลต่อการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำและแพลงก์ตอนพืชด้วย

2.2.6 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรดต่างหรือพีเอช เป็นค่า $-\log$ ของความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในสารละลายใช้เป็นค่าที่ชี้ถึงสภาวะความเป็นกรดหรือด่างของสารละลายนั้น น้ำธรรมชาติโดยทั่วไปจะมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 6.5 ถึง 9 ความแตกต่างของระดับพีเอชในแหล่งน้ำนั้นจะส่งผลโดยตรงถึงปริมาณและชนิดของสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยสัตว์น้ำส่วนใหญ่จะตายที่ระดับพีเอชต่ำกว่า 4 และสูงเกินกว่า 10 อีกทั้งที่ระดับพีเอชต่ำยังส่งผลให้ซัลไฟด์ (S^{2-}) เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) มากขึ้น ซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำสูง ส่วนที่ระดับพีเอชสูงแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของแอมโมเนีย (NH_3) มากขึ้น ซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำสูง โดยความสัมพันธ์ของค่าความเป็นกรด-ด่างกับการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของค่าความเป็นกรด-ต่างกับการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ

(ไมตรี ดวงสวัสดิ์ และจารุวรรณ สมศิริ, 2528)

ค่าความเป็นกรด-ต่าง	ผลกระทบต่อสัตว์น้ำ
4.0 หรือต่ำกว่า	เป็นอันตรายทำให้สัตว์น้ำตายได้
4.0 - 6.0	อาจจะไม่ตาย แต่ทำให้ผลผลิตต่ำ เนื่องจากมีการเจริญเติบโตช้าและทำให้การสืบพันธุ์หยุดชะงัก
6.5 - 9.0	เป็นระดับที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
9.0 - 11.0	ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ถ้าต้องอาศัยอยู่เป็นเวลานานจะทำให้ผลผลิตต่ำลง
11.0 หรือมากกว่า	เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ

2.2.7 ความกระด้าง (Hardness)

ความกระด้างของน้ำเกิดจากน้ำที่มีส่วนผสมของธาตุโลหะที่อยู่ในสภาพไอออนที่มีประจุ +2 ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) โดยแคลเซียมเป็นสิ่งจำเป็นในการสร้างโครงสร้างและเปลือกของสัตว์น้ำ ส่วนแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของคลอโรฟิลล์ ธาตุทั้งสองชนิดนี้ก็เป็นอาหารที่จำเป็นสำหรับพืชและแพลงก์ตอนพืชอีกด้วย ซึ่งน้ำที่มีความกระด้างสูงอาจทำให้เกิดตะกอนในระบบหม้อน้ำต่างๆ โดยเกณฑ์การแบ่งประเภทของน้ำตามระดับความกระด้างแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เกณฑ์การแบ่งประเภทของน้ำตามระดับความกระด้าง

(Sawyer, McCarty, และ Parkin, 2002)

เกณฑ์ความกระด้างของน้ำ	ระดับความกระด้าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)
น้ำอ่อน	0 - 75
น้ำกระด้างปานกลาง	75 - 150
น้ำกระด้าง	150 - 300
น้ำกระด้างมาก	มากกว่า 300

2.2.8 ความเป็นด่าง (Alkalinity)

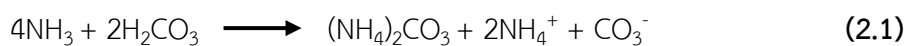
ความเป็นด่างของน้ำ หมายถึง ความสามารถในการสะเทินกรดของน้ำ ความเป็นด่างส่วนใหญ่เกิดจากไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และอาจจะมีคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) หรือไฮดรอกไซด์ (OH^-) รวมอยู่ด้วย โดยน้ำที่มีความเป็นด่างสูงจะมีความสามารถในการต้านการเปลี่ยนแปลงของพีเอชได้ดี การเพิ่มความเป็นด่างของน้ำสามารถทำได้โดยการเติมวัสดุปูน เช่น หินปูน (CaCO_3) หรือ ปูนขาว (Ca(OH)_2) เป็นต้น ในน้ำที่มีความเป็นด่างสูงจะทำให้ค่าพีเอชในน้ำสูงขึ้นด้วย ซึ่งจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ

2.3 การบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ

ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่สำคัญสำหรับสิ่งมีชีวิตในน้ำเนื่องจากเป็นองค์ประกอบของโปรตีน สารพันธุกรรม คลอโรฟิลล์ และวิตามิน ในแหล่งน้ำสามารถพบสารอินทรีย์ไนโตรเจนได้ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ เมื่อสิ่งมีชีวิตเหล่านั้นตายลงสารอินทรีย์ไนโตรเจนจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำกลายเป็นอนินทรีย์ไนโตรเจน เช่น แอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต รวมถึงก๊าซไนโตรเจน โดยกระบวนการทางชีวภาพที่สำคัญในการเปลี่ยนรูปสารประกอบไนโตรเจนคือ

2.3.1 กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification)

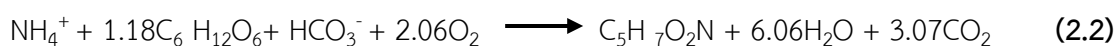
เป็นการสลายย่อยสารอินทรีย์ไนโตรเจนในซากพืชซากสัตว์ ให้เป็นแอมโมเนีย โดยการทำงานของจุลินทรีย์ (ดังสมการที่ 2.1) ซึ่งการเกิดแอมโมเนียในแหล่งน้ำนอกจากจะเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจนในซากพืชซากสัตว์แล้วยังมาจากสิ่งขับถ่ายของสัตว์น้ำด้วย



2.3.2 กระบวนการดูดซึมแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ (Ammonia assimilation)

เป็นปฏิกิริยาดูดซึมแอมโมเนียมไอออนแล้วเปลี่ยนเป็นสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนโดยจุลินทรีย์ เพื่อนำธาตุอาหารดังกล่าวมาใช้ในการเจริญเติบโตและเปลี่ยนเป็นองค์ประกอบต่างๆ ของเซลล์ (สุภัณฑิต นิมรัตน์ และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย, 2552) โดยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม

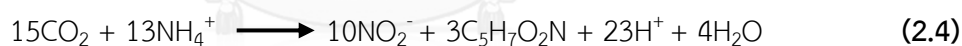
เฮทเทอโรโทรฟ ซึ่งจะใช้สารอินทรีย์เป็นตัวให้อิเล็กตรอนและแหล่งคาร์บอน และจะใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งจะได้ผลผลิตเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (ดังสมการที่ 2.2) หรือเกิดจากการทำงานของพืชน้ำและสาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae) ดังสมการที่ 2.3



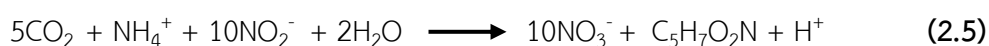
2.3.3 กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

ไนตริฟิเคชันเป็นกระบวนการเปลี่ยนแอมโมเนียและแอมโมเนียมไอออน ให้เป็นไนไตรต์และไนเตรต โดยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มไนตริไฟอิง (Nitrifying bacteria) ซึ่งเป็นแบคทีเรียในกลุ่มออโตโทรฟ (Autotroph bacteria) ผ่าน 2 ขั้นตอนที่เกิดขึ้นต่อเนื่องกันได้แก่

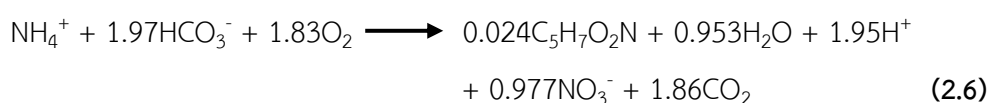
2.3.3.1 การเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรต์ โดยแบคทีเรียในกลุ่ม Ammonia Oxidizing Bacteria (AOB) ได้แก่ *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus* และ *Nitrosospira* เป็นต้น ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้จะออกซิไดซ์แอมโมเนียและได้ผลผลิตเป็นไนไตรต์ (ดังสมการที่ 2.4)



2.3.3.2 การเปลี่ยนไนไตรต์เป็นไนเตรต โดยแบคทีเรียในกลุ่ม Nitrite oxidizing bacteria (NOB) ได้แก่ *Nitrobacter* และ *Nitrospira* เป็นต้น ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้จะออกซิไดซ์ไนไตรต์และได้ผลผลิตเป็นไนเตรต (ดังสมการที่ 2.5)



โดยสมการสุทธิของกระบวนการไนตริฟิเคชันแสดงดังสมการ 2.6



2.3.4 กระบวนการดีไนทริฟิเคชัน (Denitrification)

ดีไนทริฟิเคชันเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยแบคทีเรียกลุ่มดีไนทริฟิอิง (Denitrifying bacteria) ซึ่งเป็นแบคทีเรียในกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ แบคทีเรียกลุ่มนี้จะใช้ในไนโตรเจนหรือไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ใช้สารอินทรีย์เป็นตัวให้อิเล็กตรอนและแหล่งคาร์บอน ซึ่งจะได้ผลผลิตเป็นก๊าซไนโตรเจน (N_2) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) ดังสมการที่ 2.7 ตัวอย่างของแบคทีเรียในกลุ่มนี้ได้แก่ *Pseudomonas* และ *Bacillus* เป็นต้น



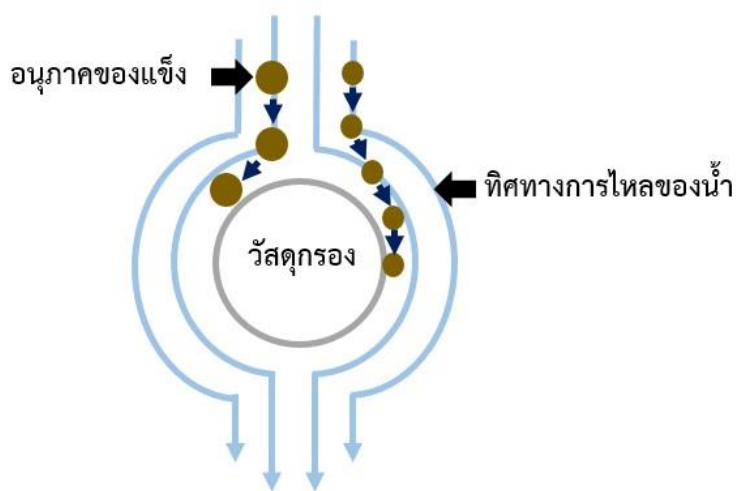
2.4 ตะกอนอินทรีย์ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ

ตะกอนอินทรีย์ที่พบในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเกิดจากการสะสมตัวของสารต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ ได้แก่ อาหารที่เหลืออยู่ ของเสียที่สัตว์น้ำขับถ่ายออกมา เซลล์ของจุลสาหร่าย เซลล์ของแบคทีเรีย (กชพร กฤตยานันต์, 2554) กลายเป็นอนุภาคของแข็งแขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยมีรายงานว่าอนุภาคของแข็งแขวนลอยในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำส่วนใหญ่มีขนาดอยู่ในช่วง 150 - 250 ไมโครเมตร (เศรษฐศักดิ์ ติวะนนทกร, 2556) และสำหรับระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไปความเข้มข้นของปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมดในน้ำไม่ควรเกิน 80 มก./ล. (Timmons และคณะ, 2002) ซึ่งตะกอนอินทรีย์เหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อความเสียหายของสัตว์น้ำ คุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยง และส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อปล่อยน้ำทิ้งโดยปราศจากการบำบัด อีกทั้งยังส่งผลทำให้ตัวกรองชีวภาพอุดตัน ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของจุลชีพในกระบวนการไนทริฟิเคชันลดลง และทำให้เกิดการสะสมของสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียและไนไตรต์ ซึ่งถ้าพบการสะสมในปริมาณมากก็จะมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำได้ ดังนั้นกระบวนการแยกตะกอนออกจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจึงมีความสำคัญ เพื่อลดปริมาณตะกอนอินทรีย์ที่สะสมอยู่ในระบบ และลดปัญหาที่จะเกิดขึ้นในระหว่างการเลี้ยง

2.5 การแยกตะกอนในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ

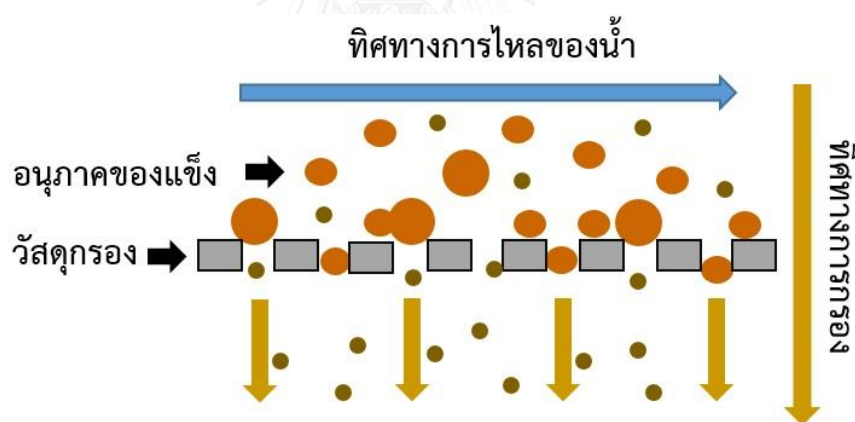
การแยกตะกอนในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถดำเนินการได้หลายวิธี โดยอาศัยหลักการทางกายภาพที่แตกต่างกัน เช่น การแยกด้วยการกรอง (Filtration) การแยกด้วยการตกตะกอน (Sedimentation) การแยกด้วยการปั่นเหวี่ยง (Swirl separator หรือ Hydrocyclone) และการ

แยกด้วยการลอยตัว (Dissolved air flotation หรือ Foam fractionation) สำหรับงานวิจัยนี้ เลือกลงใช้กระบวนการกรองที่ใช้วัสดุกรองแบบตะแกรง (Screen filtration) ในการแยกตะกอนไบโอฟล็อกออกจากหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยหลักการของการกรองจะเป็นการแยกอนุภาคของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำซึ่งถูกกรองผ่านตะแกรงกรองซึ่งมีช่องกรองขนาดเล็ก อนุภาคของแข็งดังกล่าวจะถูกดักจับไว้ที่ผิวหน้าของแผ่นกรองและถูกแยกออกจากน้ำ ทั้งนี้กลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการกรองสามารถจำแนกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ กลไกการเคลื่อนย้าย (Transport mechanism) ซึ่งเกิดจากอนุภาคของแข็งแขวนลอยที่อยู่ในน้ำมีการเคลื่อนที่ตามทิศทางการไหลของน้ำเข้าหาวัสดุกรอง โดยวัสดุกรองจะทำหน้าที่ดักจับอนุภาคของแข็งแขวนลอยเหล่านั้นไว้ (ดังรูปที่ 2.1) และกลไกการเกาะติด (Attachment mechanism) ซึ่งทำให้อนุภาคของแข็งแขวนลอยติดค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างวัสดุกรองและเกิดการแยกออกจากน้ำได้อย่างสมบูรณ์ โดยในกรณีของกระบวนการกรองที่ใช้วัสดุกรองแบบตะแกรงของงานวิจัยนี้ อนุภาคของแข็งแขวนลอยจะเคลื่อนที่ตามทิศทางการไหลของน้ำเข้าหาแผ่นตะแกรง ซึ่งจะติดค้างอยู่บริเวณผิวหน้าผิวหน้า (Surface filtration) และช่องว่างระหว่างช่องกรองของตะแกรงกรอง อนุภาคเหล่านี้จะเกาะติดกับตะแกรงด้วยกลไกดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical adsorption) ซึ่งเป็นการดูดติดผิวที่อาศัยรูพรุนของวัสดุกรองในการยึดเหนี่ยวอนุภาคของแข็งแขวนลอยไว้เพื่อไม่ให้หลุดออกจากวัสดุกรอง รวมถึงกลไกทางชีวเคมี (Biological mechanism) ซึ่งเป็นกลไกการกรองที่เกิดจากจุลินทรีย์ต่างๆ ที่เจริญเติบโตอยู่ภายในชั้นกรอง โดยจะลดขนาดช่องว่างที่อยู่ภายในชั้นกรองทำให้การกรองมีประสิทธิภาพสูงขึ้น



รูปที่ 2.1 กลไกการกรองแบบเคลื่อนย้าย (Transport mechanism)

เมื่อวัสดุกรองถูกใช้งานอย่างต่อเนื่องจะทำให้เกิดการอุดตัน (Fouling) โดยการอุดตันที่เกิดบนวัสดุกรองส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการเกาะติดของอนุภาคแขวนลอยในรูพรุนของวัสดุกรองซึ่งจะทำให้ค่าประสิทธิภาพการกรองมีค่าลดลง (พิสุทธิ์ เพียรมนกุล, 2557) โดยการอุดตันของวัสดุกรองสามารถจำแนกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การอุดตันภายนอก (External surface fouling) เป็นการอุดตันที่เกิดจากการสะสมตัวของชั้นเค้ก (Cake) หรือสารเมือกที่สร้างขึ้นโดยจุลินทรีย์ การอุดตันในลักษณะนี้จะเกิดที่บริเวณผิวหน้าของวัสดุกรอง ส่วนการอุดตันภายในรูพรุนของวัสดุกรอง (Pore blocking fouling) เป็นการอุดตันที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าไปสะสมอยู่ภายในรูพรุนของวัสดุกรอง ซึ่งวัสดุกรองแบบตะแกรงจะเกิดการอุดตันได้อย่างรวดเร็วจากการทับถมของอนุภาคของแข็งแขวนลอยที่ถูกกักอยู่ที่ด้านนอกของตะแกรงกรอง สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้กระบวนการกรองแบบไหลขวาง (Cross flow filtration) ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นรูปแบบการกรองที่การไหลของน้ำมีทิศทางขนาดกับวัสดุกรอง การกรองลักษณะนี้จะช่วยลดปัญหาการทับถมของอนุภาคบนวัสดุกรอง เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของวัสดุกรองจะช่วยทำให้เกิดการอุดตันช้าลง



รูปที่ 2.2 กระบวนการกรองแบบไหลขวาง (Cross flow filtration)

2.6 เทคโนโลยีไบโอฟล็อกกับการเลี้ยงสัตว์น้ำ

ในปัจจุบันรูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำตามแหล่งน้ำธรรมชาติทั้งการเลี้ยงในกระชังและบ่อดินกลางแจ้งได้รับผลกระทบจากความผันแปรของสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาด้านคุณภาพน้ำที่ปนเปื้อนและไม่เหมาะสม ปัญหาการแพร่ระบาดของโรคและปรสิตของสัตว์น้ำ ดังนั้นรูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดจึงได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้นเพื่อลดผลกระทบ

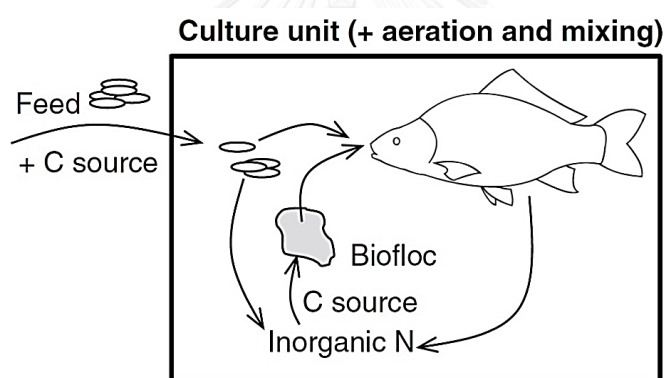
จากปัญหาดังกล่าว แต่เนื่องจากการเลี้ยงสัตว์น้ำรูปแบบนี้จะไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ทำให้เกิดการสะสมของเสียในรูปสารอินทรีย์ไนโตรเจนในปริมาณสูง ดังนั้นการประยุกต์ใช้แนวทางและเทคโนโลยีต่างๆ ที่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนเหล่านี้เข้ากับบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจึงมีความสำคัญ ซึ่งเทคโนโลยีที่ได้รับการความสนใจอยู่ในปัจจุบัน คือ เทคโนโลยีไบโอฟล็อก

เทคโนโลยีไบโอฟล็อก (Biofloc Technology) คือเทคนิคการจัดการของเสียที่เกิดจากการเลี้ยงสัตว์น้ำโดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์และการควบคุมอัตราส่วนของคาร์บอนและไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ ทำให้สามารถเลี้ยงสัตว์น้ำได้ในระดับความหนาแน่นที่สูงขึ้นโดยไม่ต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดการเลี้ยง ดังนั้นเทคโนโลยีนี้จึงเหมาะสมกับพื้นที่ที่มีปัญหาเรื่องการถ่ายเทน้ำ ปัญหาคุณภาพน้ำไม่เหมาะสม และมีพื้นที่น้อยแต่ต้องการผลผลิตจำนวนมาก สำหรับประเทศไทยการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกยังไม่เป็นที่นิยมนัก เนื่องจากมีระบบการจัดการที่ยุ่ยากและผู้ดำเนินการต้องมีความเชี่ยวชาญในการควบคุมระบบเป็นอย่างดี

การบำบัดของเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกเป็นกระบวนการบำบัดทางชีวภาพรูปแบบหนึ่งที่ยิยมในการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบหมุนเวียนแบบปิด โดยการกระตุ้นให้เกิดตะกอนของจุลินทรีย์ซึ่งจะแขวนลอยอยู่ในน้ำและใช้ตะกอนจุลินทรีย์เหล่านั้นมาช่วยในการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายเศษอาหารเหลือและสิ่งขับถ่ายของสัตว์น้ำให้มาอยู่ในรูปมวลชีวภาพของจุลินทรีย์ และเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ เรียกว่า “ไบโอฟล็อก” ซึ่งจะมีขนาดประมาณ 0.1 - 2.0 มม. (กษิตติศ หนูทอง, 2551) โดยในตะกอนไบโอฟล็อกจะประกอบไปด้วยกลุ่มจุลชีพหลายชนิด ได้แก่ แบคทีเรีย สาหร่าย โปรโตซัว รวมทั้งสารอินทรีย์ต่างๆ (Hargreaves, 2013) ซึ่งสัตว์น้ำบางชนิด เช่น ปลานิล *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) หรือกุ้งขาว *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) สามารถรองกินตะกอนไบโอฟล็อกเหล่านี้เพื่อใช้เป็นแหล่งโปรตีนได้อีกทางหนึ่ง

โดยการเดินระบบเลี้ยงสัตว์ด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกนั้นจะเน้นการกระตุ้นการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟด้วยการลดส่วนประกอบโปรตีนในอาหารสำเร็จรูปเพื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารอินทรีย์คาร์บอน (Hargreaves, 2006) หรือเกิดจากการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อเพิ่มอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนโดยตรงในระบบได้ ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มนี้ต้องการอัตราส่วนปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจนไม่น้อยกว่า 10:1 (Avnimelech, 1999) สำหรับสารอินทรีย์คาร์บอนที่นิยมกัน

โดยทั่วไป ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง (Tapioca starch) กากน้ำตาล (Molasses) และรำข้าว (Rice bran) โดยแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟจะดูดซึมแอมโมเนียผ่านกระบวนการดูดซึมแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ (Ammonia assimilation) เพื่อนำไปสร้างเป็นส่วนประกอบของเซลล์ จึงทำให้ปริมาณแอมโมเนียในน้ำลดลง และเกิดการเพิ่มขึ้นของตะกอนไบโอฟล็อกอย่างรวดเร็ว โดยวรรรัตน์ วานิชชานัย และคณะ (2552) รายงานว่าการเติมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 16:1 สามารถช่วยควบคุมปริมาณแอมโมเนียและไนไตรต์ได้ดีกว่าการเติมอาหารปลาชนิดใดเพียงอย่างเดียว รูปที่ 2.3 แสดงกรอบความคิดที่สรุปภาพรวมของการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อก ซึ่งเป็นการเลี้ยงสัตว์น้ำร่วมกับตะกอนไบโอฟล็อกที่ได้รับการกระตุ้นจากการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำ เมื่อสัตว์น้ำขับถ่ายของเสียออกมาในรูปสารอนินทรีย์ไนโตรเจน ตะกอนไบโอฟล็อกจะใช้น้ำสารอนินทรีย์เหล่านั้นเพื่อสร้างส่วนประกอบของเซลล์และแบคทีเรียเซลล์ใหม่



รูปที่ 2.3 แนวคิดของการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อก

(ที่มา : Crab และคณะ, 2012)

แต่เนื่องจากในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกไม่ได้มีเพียงการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟเพียงอย่างเดียว แต่ยังพบการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มไนทริไฟอิงซึ่งจะใช้แอมโมเนียเป็นตัวให้อิเล็กตรอนด้วย ผลของกระบวนการนี้แอมโมเนียจะถูกเปลี่ยนเป็นไนไตรต์และไนเตรต ทำให้เกิดการสะสมของไนเตรตในระบบ โดย Nootong และคณะ (2011) รายงานว่าแบคทีเรียทั้ง 2 กลุ่มนี้มีความสำคัญต่อการบำบัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในช่วงระยะเวลาการเลี้ยงสัตว์น้ำที่ต่างกัน โดยในช่วงต้นของการเลี้ยงซึ่งยังไม่เกิดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มไนทริไฟอิงแอมโมเนียจะถูกบำบัดด้วยกระบวนการดูดซึมแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ (Ammonia assimilation) จาก

กิจกรรมของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟที่ถูกระตุ้นให้เกิดการเจริญอย่างรวดเร็วด้วยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน และหลังจากนั้นประมาณ 6 ถึง 7 สัปดาห์ เมื่อเกิดการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มไนทรีไฟอิงโดยสมบูรณ์แล้ว แอมโมเนียจะถูกบำบัดโดยกระบวนการไนทรีฟิเคชัน (Nitrification) เพื่อเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตรต์และไนเตรต และเนื่องจากการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียในระบบจะทำให้เกิดการสะสมของตะกอนไปโอฟล็อกในปริมาณที่สูง ทำให้ต้องสูญเสียพลังงานในการเติมออกซิเจนในปริมาณมากและต้องทำให้เกิดการกวนผสมของตะกอนตลอดเวลา มิฉะนั้นตะกอนไปโอฟล็อกจะเกิดการตกตะกอนและทับถมกันที่พื้นบ่อจนเกิดการย่อยสลายเป็นของเสียอีกครั้ง ทั้งนี้มีรายงานว่าหากความเข้มข้นของปริมาณตะกอนไปโอฟล็อกสูงเกินกว่า 850 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล จะส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตของปลาไนล์ ซึ่งตะกอนจะสะสมที่บริเวณเหนือกทำให้ประสิทธิภาพในการขนถ่ายออกซิเจนลดลงและเกิดการตายที่เพิ่มมากขึ้น (Little และคณะ, 2008) โดยมีข้อเสนอแนะว่าความเข้มข้นของไปโอฟล็อกในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรเกิน 500 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. (Avnimelech, 2006) สำหรับข้อดีและข้อเสียของการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยเทคโนโลยีไปโอฟล็อกได้รวบรวมและแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ข้อดีและข้อเสียของการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยเทคโนโลยีไปโอฟล็อก

ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> มีศักยภาพในการเลี้ยงสัตว์น้ำได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำ สามารถเลี้ยงสัตว์น้ำที่ความหนาแน่นสูงได้ ลดการแพร่กระจายของโรคระบาดเข้าสู่พื้นที่ในการเลี้ยง ตะกอนไปโอฟล็อกสามารถใช้เป็นอาหารให้กับสัตว์น้ำที่สามารถรองรับตะกอนได้ ลดการปล่อยของเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ 	<ol style="list-style-type: none"> ต้องควบคุมปัจจัยต่างๆ เช่น สารอินทรีย์คาร์บอน ค่าพีเอช ค่าความเป็นด่างให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ต้องการการจัดการดูแลระบบในระดับสูง ต้องการออกซิเจนและการกวนผสมตลอดเวลา ทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน และมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ไปโอฟล็อกที่ระดับความเข้มข้นสูงมากเกินไป อาจส่งผลเสียต่อสัตว์น้ำ หรือทำให้ระบบล้มเหลวได้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 เทคโนโลยีไบโอฟล็อกกับการเลี้ยงสัตว์น้ำ

Avnimelech และคณะ. (1992) ศึกษาผลของการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนต่อคุณภาพน้ำ การเจริญเติบโตของปลา และประสิทธิภาพในการให้อาหาร โดยทำการเลี้ยงปลาหมอเทศ *Oreochromis aureus* (Steindachner, 1864) ซึ่งมีน้ำหนักเริ่มต้นรวม 656 กก. ในบ่อขนาด 50 ตร.ม. เป็นเวลา 30 วัน ทำการเปรียบเทียบระหว่างชุดทดลองที่ให้อาหารสำเร็จรูปที่มีโปรตีนร้อยละ 30 ร่วมกับการเติมแอมโมเนีย และชุดทดลองที่ให้อาหารสำเร็จรูปที่มีโปรตีนร้อยละ 20 กับชุดควบคุมที่ให้อาหารสำเร็จรูปที่มีโปรตีนร้อยละ 30 ผลการศึกษาพบว่า การเจริญเติบโตของปลานิลต่อวันในชุดทดลองที่ให้อาหารสำเร็จรูปที่มีโปรตีนร้อยละ 30 ร่วมกับการเติมแอมโมเนีย และชุดทดลองที่ให้อาหารสำเร็จรูปที่มีโปรตีนร้อยละ 20 มีค่าไม่แตกต่างกันที่ 1.96 และ 2.22 ก./วัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าชุดควบคุมที่ให้อาหารสำเร็จรูปที่มีโปรตีนร้อยละ 30 มีค่าอยู่ที่ 1.63 ก./วัน และในชุดทดลองที่ให้อาหารสำเร็จรูปที่มีโปรตีนร้อยละ 20 ยังพบว่าให้ค่าอัตราแลกเนื้อสูงที่สุดเท่ากับ 2.02 และใช้ต้นทุนเพียงแค่ 0.543 ดอลลาร์/กก. ซึ่งมีค่าต่ำกว่าชุดทดลองอื่นๆ

Azim และ Little (2008) ศึกษาคุณภาพน้ำ องค์ประกอบของไบโอฟล็อก และการเจริญเติบโตของปลานิลที่เลี้ยงด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อก เมื่อทำการเลี้ยงปลานิลขนาด 80 ถึง 120 ก. ที่ความหนาแน่นเริ่มต้น 12 กก./ลบ.ม. ในถังไฟเบอร์กลาสขนาด 250 ล. โดยเปรียบเทียบระหว่างชุดทดลองที่เลี้ยงด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกที่ให้อาหารสำเร็จรูปที่มีโปรตีนร้อยละ 35 (C:N = 8.4) และชุดทดลองที่เลี้ยงด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกที่ให้อาหารสำเร็จรูปที่มีโปรตีนร้อยละ 24 (C:N = 11.2) กับชุดควบคุมที่เป็นระบบหมุนเวียนน้ำแบบดั้งเดิมที่ให้อาหารสำเร็จรูปที่มีโปรตีนร้อยละ 35 ผลการศึกษาพบว่า ชุดทดลองที่ให้อาหารสำเร็จรูปที่มีโปรตีนร้อยละ 35 มีการสะสมของสารอินทรีย์ไนโตรเจนในระดับที่สูงกว่าชุดทดลองอื่นๆ เมื่อวิเคราะห์ขององค์ประกอบของไบโอฟล็อกพบว่าประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 28 ไขมันร้อยละ 3 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 6 เถ้าร้อยละ 12 และให้พลังงาน 19 กิโลจูล/ก. (คิดจากน้ำหนักแห้ง) โดยพบว่าในช่วงสัปดาห์ที่ 12 ปลานิลในชุดทดลองที่เลี้ยงด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 44 ถึง 46 ซึ่งมีค่าสูงกว่าในชุดควบคุมที่มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 27 ถึง 28

Avnimelech และ Kochba (2009) ประเมินสัดส่วนไนโตรเจนที่หมุนเวียนอยู่ในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกที่ใช้เลี้ยงปลาไนล์ โดยติดตามการนำเข้าและการขับถ่ายไนโตรเจนของปลาไนล์ด้วย ^{15}N เมื่อการเลี้ยงปลาไนล์ในถังพลาสติกขนาด 1 ลบ.ม. จำนวน 4 ถัง ที่มีไบโอฟล็อกอยู่ในปริมาตร 450 ล. โดยมีการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ ($^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$) 2 ก. ร่วมกับแป้งข้าวโพดปริมาณ 20 ก. เพื่อกระตุ้นให้แบคทีเรียคูดซีมแอมโมเนียไปใช้ในการสร้างเซลล์ ทั้งนี้ตลอดช่วงการทดลองจะควบคุมปริมาณของไบโอฟล็อกที่ 200 มก./ล. และไม่มีการให้อาหารสำเร็จรูปจากภายนอก โดยปลาไนล์จะได้รับอาหารจากการกรองกินแบคทีเรียเท่านั้น ผลการศึกษาพบว่าปลาไนล์มีการนำไนโตรเจนเข้าสู่ตัวปลาในรูปโปรตีนที่ได้จากการกรองกินแบคทีเรียสุทธิต่อวันเท่ากับ 242 มก.ไนโตรเจน/กก. ซึ่งเทียบเท่า 1.56 ก.โปรตีน และเท่ากับร้อยละ 25 ของโปรตีนที่ปลาไนล์ได้รับจากการเลี้ยงโดยทั่วไป ส่วนของการขับถ่ายไนโตรเจนพบว่าการเปลี่ยนแปลงสูง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 1.1 ± 4.25 ของ ^{15}N

Pérez-Fuentes และคณะ (2016) ศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ส่งผลต่อการบำบัดไนโตรเจนและผลผลิตของปลาไนล์ ในการเลี้ยงปลาไนล์ที่ระดับความหนาแน่นสูงด้วยระบบไบโอฟล็อก โดยทำการเลี้ยงปลาไนล์ในถังปริมาตร 3.14 ลบ.ม. ที่ระดับความหนาแน่นเริ่มต้น 75 ตัว/ลบ.ม. เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ทำการการเปลี่ยนถ่ายน้ำร้อยละ 80 ทุกสัปดาห์ กับชุดทดลองที่ไม่มีการถ่ายน้ำและเติมกากน้ำตาลทุกๆ 4 วัน ในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่แตกต่างกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10:1, 12.5:1, 15:1, 17.5:1 และ 20:1 ผลการศึกษาพบว่าอัตราการรอดของปลาไนล์ในทุกชุดทดลองมีค่าไม่แตกต่างกัน (ร้อยละ 94.60 ± 2.03) และมีค่าสูงกว่าชุดควบคุม (ร้อยละ 84.96 ± 1.53) โดยในชุดทดลองที่ได้รับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1 พบว่ามีระดับความหนาแน่นสุดท้ายมากที่สุด (18.03 ± 0.25 กก./ลบ.ม.) สำหรับผลการบำบัดไนโตรเจนพบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันในชุดทดลองที่ได้รับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 12.5:1, 15:1, 17.5:1 และ 20:1 แต่มีค่าต่ำกว่าในชุดทดลองที่ได้รับอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการเติมกากน้ำตาลในระบบไบโอฟล็อกที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1 ทำให้ปลาไนล์มีอัตราการรอดและการเจริญเติบโตสูงสุด รวมถึงสามารถบำบัดของเสียไนโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.7.2 การบำบัดคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล๊อค

De Schryver และ Verstraete (2009) ศึกษาการบำบัดไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจากกระบวนการดูดซึมแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท โดยกระตุ้นการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟในถังปฏิกรณ์ที่บรรจุน้ำปริมาตร 3 ล. ด้วยการเติมแหล่งคาร์บอนแตกต่างกัน ได้แก่ กลีเซอรอล และอะซิเตท ในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 2.5:1, 5:1, 10:1 และ 15:1 และมีการเติมแอมโมเนียมซัลเฟตเพื่อเป็นแหล่งไนโตรเจน ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำคือ 10:1 และ 15:1 ซึ่งสามารถบำบัดไนโตรเจนได้ถึงร้อยละ 98 โดยอัตราการผลิตชีวมวลจากการเติมกลีเซอรอลมีค่า 0.62 ถึง 0.94 ก.คาร์บอน/ล./วัน และจากการเติมอะซิเตทมีค่า 0.54 ถึง 0.84 ก.คาร์บอน/ล./วัน ส่วนองค์ประกอบของโปรตีนในชีวมวลจากการเติมกลีเซอรอลและอะซิเตทมีค่าสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 57 และ 61 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอาหารสัตว์น้ำสำเร็จรูป จึงสามารถใช้ตะกอนไบโอฟล๊อคทดแทนอาหารสัตว์น้ำสำเร็จรูปได้ นอกจากนี้ในชีวมวลที่เกิดจากการเติมอะซิเตทยังพบปริมาณ PHB (Poly- β -hydroxybutyrate) สูงถึงร้อยละ 16

Nootong และคณะ (2011) ศึกษาผลของการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในการควบคุมความเข้มข้นของสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบไบโอฟล๊อค โดยเลี้ยงปลาไนเป็นเวลา 50 วัน ที่ความแน่นเริ่มต้น 3 กก./ลบ.ม. ในถังพลาสติกขนาด 500 ล. ด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีองค์ประกอบของโปรตีนร้อยละ 35 ซึ่งปริมาณอาหารที่ให้คิดเป็นร้อยละ 3 ของน้ำหนักปลาต่อวัน และมีการเติมแป้งมันสำปะหลังเพื่อรักษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 16:1 โดยไม่มีการควบคุมปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ตลอดการทดลอง ผลการศึกษาพบว่า การควบคุมความเข้มข้นสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบไบโอฟล๊อคแบ่งออกเป็นสองระยะ โดยในช่วง 6 ถึง 7 สัปดาห์แรก แอมโมเนียจะถูกควบคุมด้วยกระบวนการดูดซึมแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์โดยแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟที่ถูกกระตุ้นให้เจริญเติบโตด้วยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน และหลังจากนั้นสารอนินทรีย์ไนโตรเจนจะถูกควบคุมด้วยกระบวนการเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตรต์และไนเตรตโดยแบคทีเรียกลุ่มไนทริไฟอิง

พรรณทราณ สิริพิลาญกุล และคณะ (2555) ศึกษาการควบคุมความเข้มข้นของสารอินทรีย์ไนโตรเจนและอัตราการบำบัดแอมโมเนียด้วยตะกอนชีวภาพจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด โดยเลี้ยงปลานิลเป็นเวลา 60 วัน ที่ความแน่นเริ่มต้น 3 กก./ลบ.ม. ในถังพลาสติกขนาด 500 ล. ด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีองค์ประกอบของโปรตีนร้อยละ 15 ซึ่งปริมาณอาหารที่ให้คิดเป็นร้อยละ 1 ถึง 3 ของน้ำหนักปลาต่อวัน ในสภาวะที่ไม่มีการถ่ายน้ำและแยกตะกอนออกจากบ่อเลี้ยง ผลการศึกษาพบว่าตะกอนในระบบเลี้ยงปลานิลสามารถควบคุมความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรต์ให้ต่ำกว่า 1.0 มก.ไนโตรเจน/ล.ได้ โดยการควบคุมปริมาณตะกอนแขวนลอยให้อยู่ในช่วง 200 ถึง 800 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. เทียบเท่ากับปริมาณของเสียไนโตรเจนในช่วง 2.9 ถึง 9.6 มก.ไนโตรเจน/ล./วัน นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนชีวภาพยังเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยมีค่าเท่ากับ 0.023 ± 0.001 มก.ไนโตรเจน/ล./มก.ของแข็งแขวนลอย/วัน ในวันที่ 30 ซึ่งมากกว่าค่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียในช่วงก่อนวันที่ 20 และหลังจากวันที่ 50 อย่างมีนัยสำคัญ

Ray และ Lotz (2014) ศึกษากระบวนการไบโอฟล็อกแบบอโตโทรฟ (ไม่มีการเติมแหล่งอินทรีย์คาร์บอนจากภายนอก) เปรียบเทียบกับแบบเฮเทอโรโทรฟที่ได้รับแหล่งคาร์บอนที่แตกต่างกัน ได้แก่ กากน้ำตาล ซูโครส และกลีเซอรอล (อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 22:1 คำนวณจากปริมาณคาร์บอนในอาหารรวมกับแหล่งคาร์บอนจากภายนอก) โดยเลี้ยงกุ้งขาวน้ำหนักเฉลี่ย 6.8 ± 0.2 ก.ที่ความหนาแน่น 300 ตัว/ลบ.ม. ในถังไฟเบอร์กลาสขนาด 500 ล. เป็นเวลา 8 สัปดาห์ ผลการศึกษาพบว่าชุดทดลองไบโอฟล็อกแบบเฮเทอโรโทรฟที่เติมกากน้ำตาลมีความเข้มข้นของแอมโมเนียตลอดการทดลองสูง ($p < 0.03$) กว่าระบบอื่น โดยพบการเพิ่มขึ้นของไนไตรต์ในช่วงสองสัปดาห์แรกของทุกชุดทดลอง ส่วนในชุดการทดลองแบบอโตโทรฟพบการสะสมของไนเตรตในปริมาณสูง รวมทั้งพบปริมาณของแข็งแขวนลอยน้อยกว่าระบบไบโอฟล็อกแบบเฮเทอโรโทรฟ ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ระบบไบโอฟล็อกแบบอโตโทรฟมีความต้องการใช้ออกซิเจนน้อยกว่าระบบไบโอฟล็อกเฮเทอโรโทรฟ ดังนั้นจึงมีต้นทุนในการเดินระบบต่ำกว่า แต่ทั้งนี้อาจต้องคำนึงถึงการสะสมของปริมาณไนเตรตที่อาจจำเป็นต้องมีระบบมาช่วยในการบำบัดเพื่อไม่ให้มีความมากเกินไปกว่าระดับที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาการเจริญเติบโตของกุ้งพบว่าไม่มีความแตกต่างกันระหว่างระบบไบโอฟล็อกแบบอโตโทรฟและแบบเฮเทอโรโทรฟที่ได้รับแหล่งคาร์บอนจากซูโครสและกลีเซอรอล แต่ระบบที่ได้รับแหล่งคาร์บอน

จากกากน้ำตาลพบการตายของกุ้งขาวในช่วงสัปดาห์แรก โดยอาจเป็นผลจากการลดลงอย่างเฉียบพลันของปริมาณออกซิเจนละลายหลังจากเติมกากน้ำตาลลงไป

2.7.3 การแยกตะกอนออกจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

Ali (2013) ศึกษาการออกแบบหน่วยแยกตะกอนด้วยการกรองแบบหมุน (Drum screen filter) ที่เชื่อมต่อกับบ่อเลี้ยงปลานิลขนาด 20, 50 และ 75 ลบ.ม. ที่มีความหนาแน่นสัตว์น้ำเท่ากับ 35, 120 และ 250 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ โดยมีอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบเท่ากับ 2,050 ล./นาที่ เมื่อแปรค่าพื้นที่ผิวของวัสดุกรองที่ทำจากโลหะถักมีขนาดช่องกรอง 100 ไมครอน และความเร็วต่อรอบของการหมุนเท่ากับ 1.58 – 27.87 ตร.ม. และ 1.05 – 8.40 รอบต่อนาที ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าพื้นที่ผิววัสดุกรองและความเร็วต่อรอบในการหมุนของหน่วยแยกตะกอนมีผลต่ออัตราการกรองที่สูงขึ้น โดยมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง นอกจากนี้ยังพบว่าหลังจากเดินระบบต่อเนื่องเป็นเวลา 4 เดือน ประสิทธิภาพของการกรองในช่วง 2 เดือนแรกเท่ากับร้อยละ 34.22 ± 8.85 และประสิทธิภาพมีค่าสูงขึ้นในช่วง 2 เดือนหลัง ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 52.41 ± 16.77

เศรษฐศักดิ์ ติวะนันทร (2557) ศึกษาการกรองตะกอนแขวนลอยในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยแผ่นกรองไนลอนชนิดวางเอียงที่ทำมุม 60 องศากับแนวระดับ มีขนาดช่องกรอง 100 ไมครอน และใช้อัตราการไหล 280 ล./ชม. โดยทดลองกับบ่อเลี้ยงปลานิลขนาดเล็ก 200 ล. เป็นเวลา 92 วันและบ่อขนาดใหญ่ 3,900 ล. เป็นเวลา 30 วัน เมื่อเลี้ยงปลานิลด้วยความหนาแน่น 1 กก./ลบ.ม. และ 7 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าชุดทดลองที่ติดตั้งหน่วยกรองเข้ากับบ่อเลี้ยงปลานิลขนาดเล็กมีปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำเท่ากับ 12.22 ± 0.96 มก./ล. และปริมาณไนเตรดในน้ำเพียง 3.54 ± 0.35 มก.ไนโตรเจน/ล. ในขณะที่ชุดควบคุมที่มีเฉพาะบ่อเลี้ยงปลานิลมีปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำสูง 988.33 ± 35.47 มก./ล. และปริมาณไนเตรดในน้ำเพิ่มขึ้นถึง 69.10 ± 4.36 มก./ล. โดยเมื่อทำการทดลองกับบ่อเลี้ยงปลานิลขนาดใหญ่ พบว่าหน่วยกรองตะกอนสามารถควบคุมปริมาณตะกอนได้เป็นอย่างดี โดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 73.82 และมีปริมาณตะกอนเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 60.35 ± 14.08 มก./ล.

2.8 สรุปประเด็นสำคัญจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. เทคโนโลยีไบโอฟล็อกเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการบำบัดแอมโมเนีย สำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบหมุนเวียนแบบปิดในระดับความหนาแน่นสูง โดยการบำบัดแอมโมเนียจะเกิดจากการดูดซึมสารประกอบไนโตรเจนเข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ ร่วมกับการเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตรต์และไนเตรตของแบคทีเรียกลุ่มไนโทรไฟอิง

2. การกระตุ้นให้เกิดการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟทำได้โดยการลดสัดส่วนของโปรตีนในอาหารสำเร็จรูปเพื่อเพิ่มอัตราส่วนสารอินทรีย์คาร์บอน (Hargreaves, 2006) หรือการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อเพิ่มอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนโดยตรง ทั้งนี้จุลินทรีย์กลุ่มนี้ต้องการอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนไม่น้อยกว่า 10:1 (Avnimelech, 1999)

3. แบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟและไนโทรไฟอิงมีความสำคัญต่อการควบคุมสารอินทรีย์ไนโตรเจนในช่วงเวลาของการเลี้ยงสัตว์น้ำที่ต่างกัน โดยในช่วงต้นสารอินทรีย์ไนโตรเจนจะถูกควบคุมผ่านกระบวนการนำสารประกอบไนโตรเจนเข้าสู่เซลล์จากกิจกรรมของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟที่ถูกกระตุ้นให้เกิดการเจริญด้วยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน จากนั้นประมาณ 6 ถึง 7 สัปดาห์ เมื่อเกิดการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มไนโทรไฟอิงโดยสมบูรณ์แล้ว สารอินทรีย์ไนโตรเจนจะถูกควบคุมโดยผ่านกระบวนการเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตรต์และไนเตรต (Nootong, 2011)

4. ปริมาณตะกอนชีวภาพในระบบไบโอฟล็อกที่สูงกว่า 850 มก.ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด/ล. จะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ โดยทำให้ประสิทธิภาพในการขนถ่ายออกซิเจนลดลง และเกิดการตายที่เพิ่มมากขึ้น (Little และคณะ, 2008) นอกจากนี้ตะกอนชีวภาพในปริมาณสูงนั้นยังส่งผลทำให้อัตราการใช้ออกซิเจนในระบบเพิ่มมากขึ้นจึงสิ้นเปลืองพลังงานในการเติมอากาศ โดยมีข้อเสนอแนะว่าความเข้มข้นของไบโอฟล็อกในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรเกิน 500 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. (Avnimelech, 2006)

5. งานวิจัยนี้เลือกใช้กระบวนการกรองผ่านวัสดุกรองแบบตะแกรง (Screen filtration) ในการแยกตะกอนไบโอฟล็อกออกจากหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำ และเลือกใช้รูปแบบการกรองแบบไหลขวาง (Cross flow filtration) เพื่อลดปัญหาการทับถมของอนุภาคบนวัสดุกรองจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้น บริเวณผิวหน้าของวัสดุกรองซึ่งช่วยทำให้เกิดการอุดตันช้าลง

บทที่ 3

แผนการทดลองและดำเนินงานวิจัย

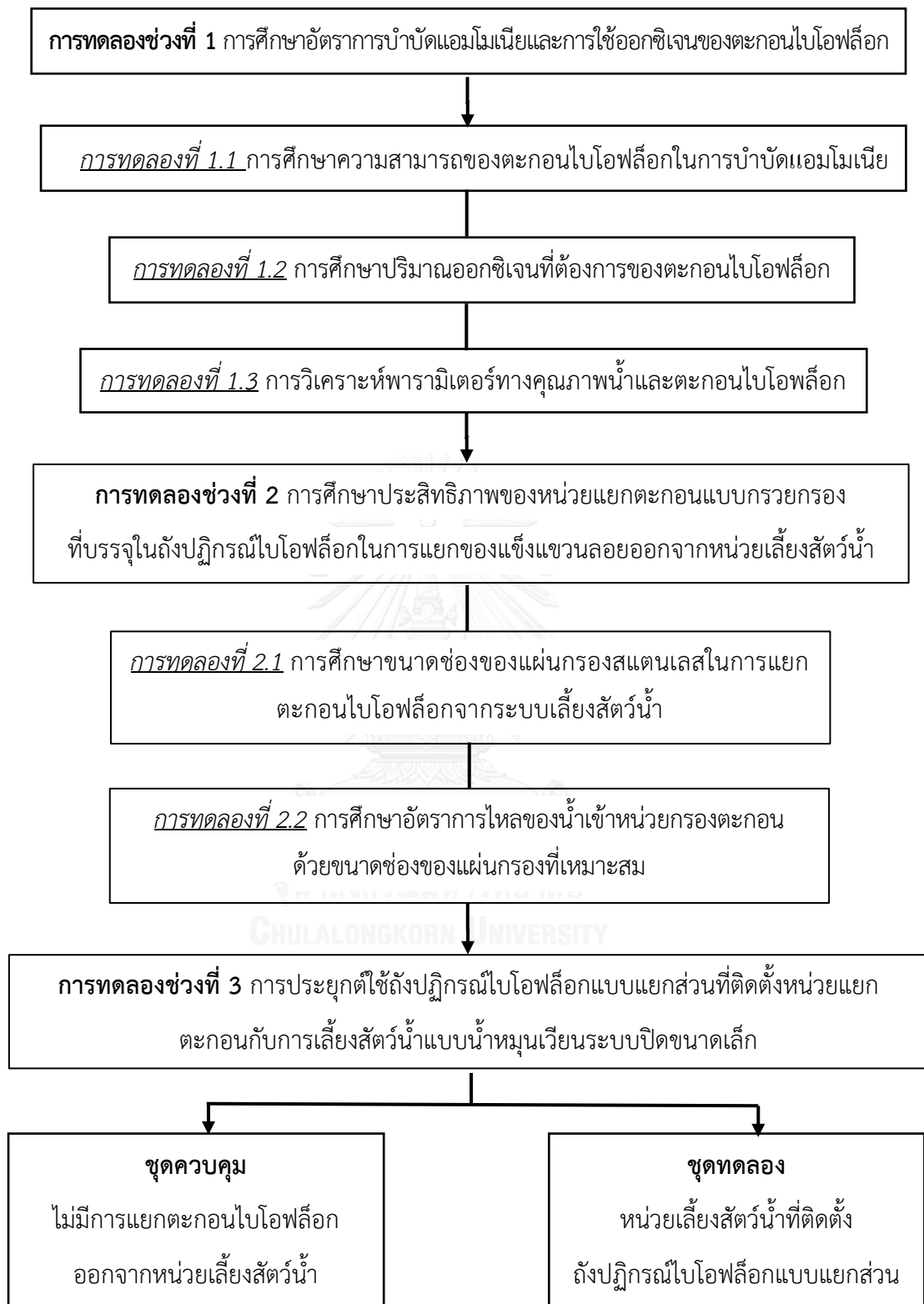
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ และห้องปฏิบัติการวิจัยปรีณญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง ดังรูปที่ 3.1

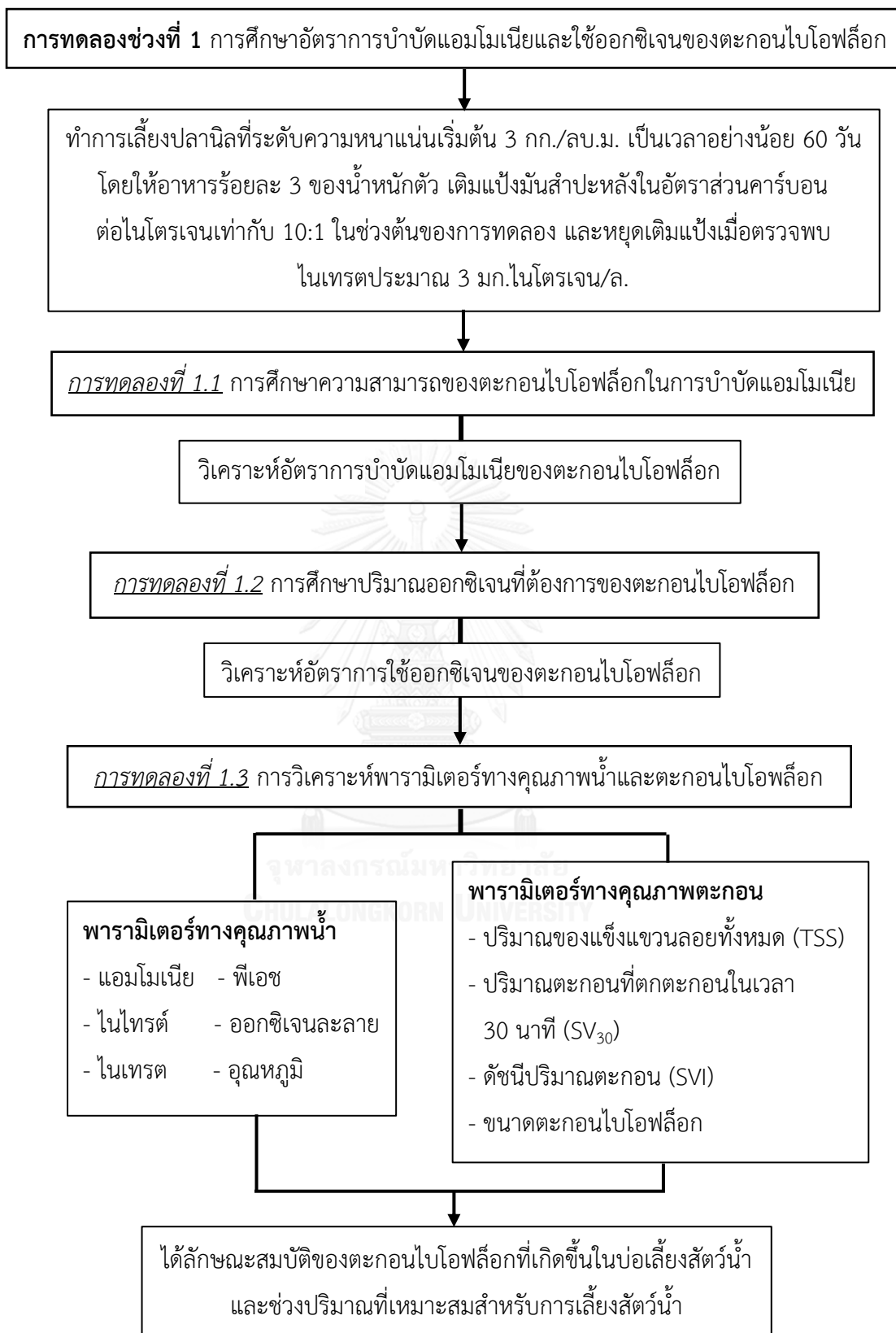
การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียและอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟลอค เมื่อกระตุ้นด้วยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน (แป้งมันสำปะหลัง) ลงไปในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1 โดยผลการทดลองที่ได้จะนำมาใช้ในการคำนวณปริมาณตะกอนชีวภาพที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลานิลด้วยเทคโนโลยีไบโอฟลอค มีแผนภาพแสดงรายละเอียดการทดลองดังรูปที่ 3.2

การทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่บรรจุในถังปฏิกรณ์ไบโอฟลอคในการแยกของแข็งแขวนลอยออกจากหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกอนุภาคแขวนลอยของหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่แปรค่าขนาดรูของแผ่นกรองต่างกันและทดสอบค่าอัตราการไหลของหน่วยแยกตะกอนเมื่อทำการทดลองด้วยขนาดรูของแผ่นกรองที่เหมาะสม มีแผนภาพแสดงรายละเอียดการทดลองดังรูปที่ 3.3

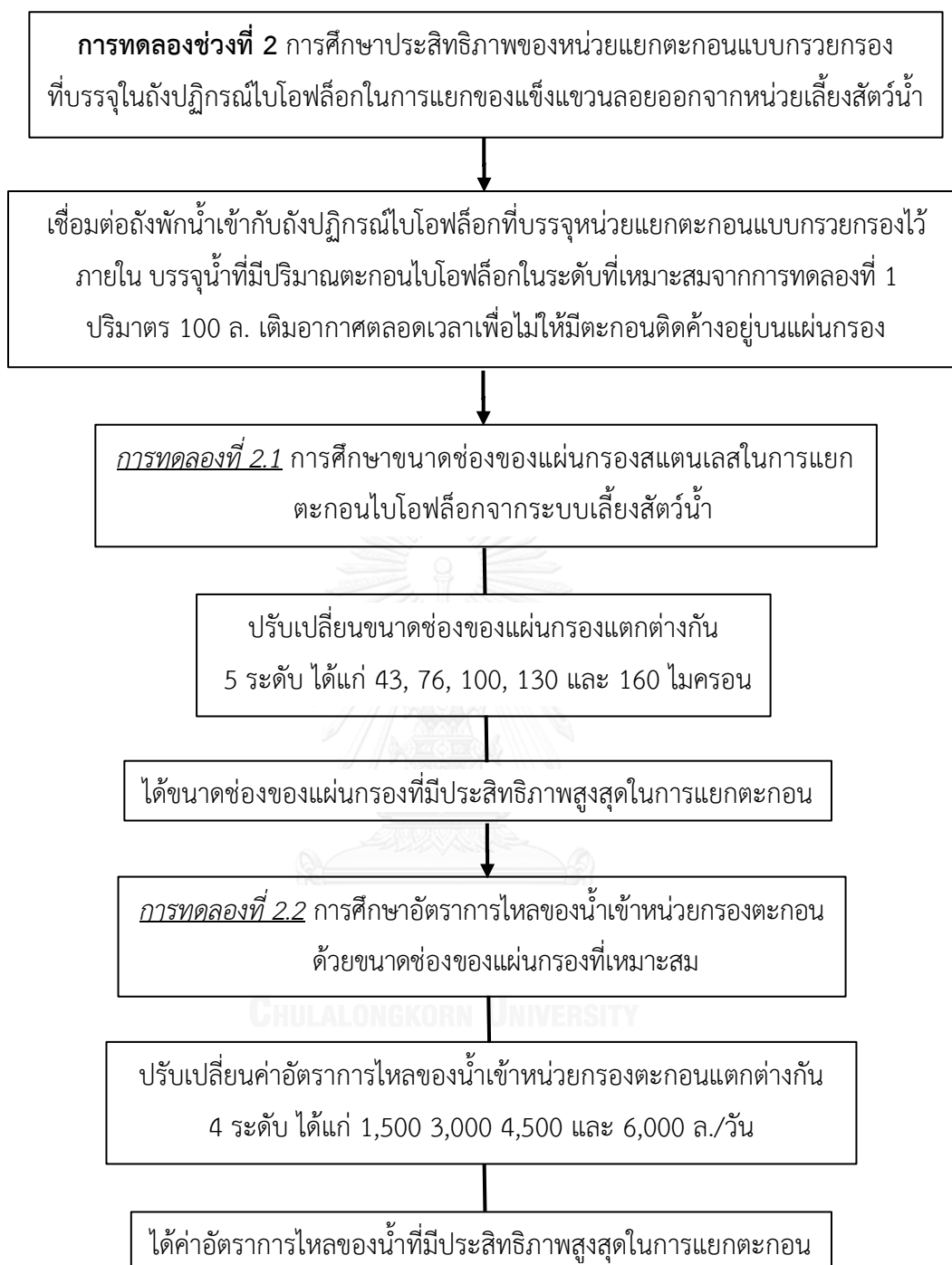
การทดลองช่วงที่ 3 การประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์ไบโอฟลอคแบบแยกส่วนที่ติดตั้งหน่วยแยกตะกอนกับการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดขนาดเล็ก โดยทำการทดลองเปรียบเทียบกันระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการแยกตะกอนไบโอฟลอคออกจากหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำ กับชุดทดลองที่ติดตั้งถังปฏิกรณ์ไบโอฟลอคแบบแยกส่วนเพื่อแยกตะกอนไบโอฟลอคออกจากหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำ มีแผนภาพแสดงรายละเอียดการทดลองดังรูปที่ 3.4



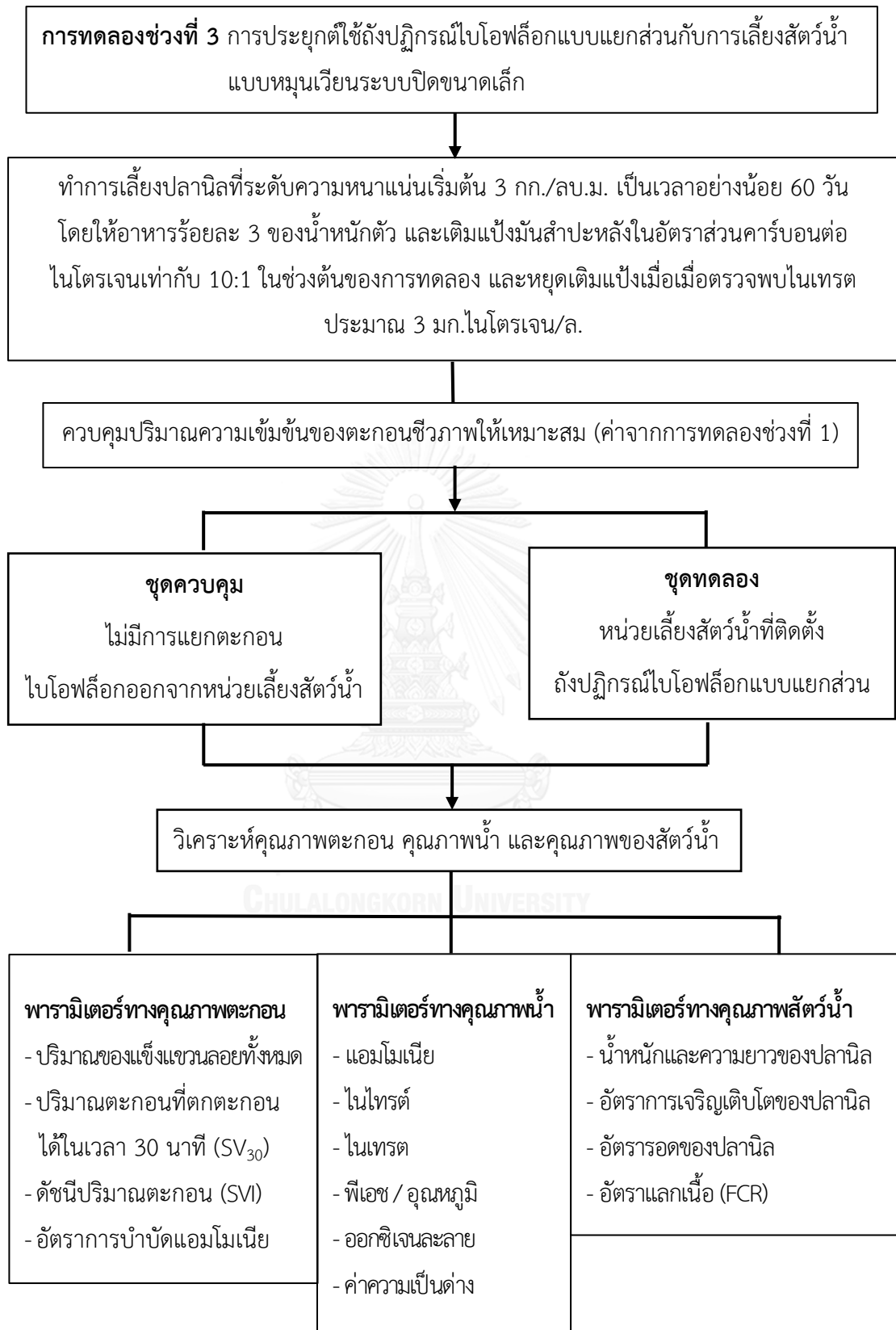
รูปที่ 3.1 แผนผังภาพรวมของงานวิจัย



รูปที่ 3.2 แผนผังการทดลองช่วงที่ 1



รูปที่ 3.3 แผนผังการทดลองช่วงที่ 2



รูปที่ 3.4 แผนผังการทดลองช่วงที่ 3

3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. ถังพลาสติกทรงกลมปริมาตร 550 ล. และ 120 ล.
2. ถังพลาสติกทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าปริมาตร 250 ล.
3. ตะแกรงสแตนเลส
4. เครื่องสูบน้ำขนาดเล็ก (1,100 ล./ชม.)
5. เครื่องเติมอากาศ และหัวทราย
6. ท่อ PVC และข้อต่อ PVC
7. ตู้อบอุณหภูมิสูง (Hot air oven) ควบคุมอุณหภูมิที่ 103-105 °ซ
- 8 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)
9. เครื่องวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH meter)
10. เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนละลาย (DO meter)
11. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer)
12. เครื่องชั่งสารเคมี
13. เครื่องกวนผสม (Magnetic stirrer)
14. เครื่องชั่งน้ำหนักและวัดความยาวปลา
15. กรวยอิมฮอฟ (Imhoff cone)
16. กรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner funnel)
17. กระดาษกรอง Whatman GF/C
18. ขวดโหลพลาสติกขนาด 1.5 ลิตร
19. เครื่องแก้วต่างๆ เช่น ปีกเกอร์ ขวดรูปชมพู่ หลอดทดลอง ขวดบีโอดี
20. ชุดทดสอบค่าความเป็นต่าง (ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
21. อาหารปลากินพืชสำเร็จรูปที่มีโปรตีนร้อยละ 20

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. Ammonium chloride (NH_4Cl)
2. Sodium salicylate ($\text{C}_7\text{H}_5\text{NaO}_3$)
3. Sodium nitroprusside $\text{Na}_2(\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO})$
4. Sodium hydroxide (NaOH)

5. Sodium citrate ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$)
6. Sodium Hypochlorite (NaOCl)
7. Sodium nitrite (NaNO_2)
8. Sulfanilamide ($\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2\text{S}$)
9. N-NED (N-(1-Naphthyl) Ethylenediamine Dihydrochloride)
10. Sodium nitrate (NaNO_3)
11. Sodium bicarbonate (NaHCO_3)

3.3 การดำเนินการทดลอง

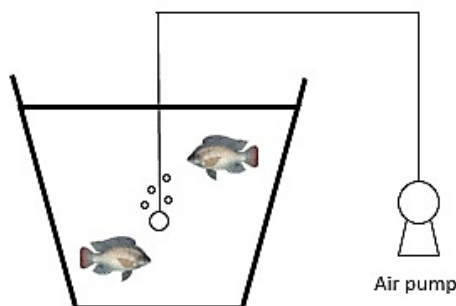
การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียและอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไปโอฟล็อก

การทดลองนี้เป็นการศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียและอัตราการใช้ปริมาณออกซิเจนของตะกอนไปโอฟล็อกที่เกิดขึ้นเองจากการเลี้ยงปลาในบ่อ เมื่อกระตุ้นด้วยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน (แป้งมันสำปะหลัง) ลงไปในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1 โดยผลการทดลองที่ได้จะนำมาใช้ในการคำนวณปริมาณตะกอนชีวภาพที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลาด้วยเทคโนโลยีไปโอฟล็อก

วิธีทำการทดลอง

ทำการเลี้ยงปลา *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) น้ำหนักเริ่มต้นประมาณ 10 - 20 ก./ตัว ที่ระดับความหนาแน่นเริ่มต้น 3 กก./ลบ.ม. ในถังพลาสติกทรงกลมปริมาตร 550 ล. มีขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากถัง 105 ซม. ก้นถัง 86 ซม. และสูง 78 ซม. ที่บรรจุน้ำประปา ปริมาตร 300 ล. (ดังรูปที่ 3.5) โดยมีการควบคุมคุณภาพน้ำเพื่อรักษาระดับของพีเอชให้อยู่ในช่วง 7.5- 8.5 ค่าความเป็นด่างอยู่ในช่วง 120 -180 มก.หินปูน/ล. ด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) และเติมอากาศตลอดเวลาด้วยเครื่องเติมอากาศและหัวทรายเพื่อรักษาปริมาณออกซิเจนละลายให้มากกว่า 4 มก./ล. ในแต่ละวันจะให้อาหารปลาสำเร็จรูปในปริมาณร้อยละ 3 ของน้ำหนักตัวปลา โดยแบ่งให้วันละ 2 ครั้ง คือ เวลา 10.00 น. และ 16.00 น. และเติมแป้งมันสำปะหลังลงในระบบทุกวันด้วยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1 โดยหยุดเติมแป้งมันสำปะหลังเมื่อตรวจพบปริมาณไนเตรตในน้ำเท่ากับ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. ทำการเลี้ยงปลาต่อเนื่องเป็นเวลาอย่างน้อย 60 วัน และไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำในระบบ โดยขณะทดลองจะทำการวิเคราะห์อัตราการบำบัด

แอมโมเนียและอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟลોકทุกๆ 7 วัน รวมถึงวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนไบโอฟลોકทุกๆ 3 วัน



รูปที่ 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลองช่วงที่ 1

การคำนวณปริมาณแอมโมเนียสำหรับปลา

การเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยเทคโนโลยีไบโอฟลอคสามารถดำเนินการได้จากการกระตุ้นแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟให้เติบโตมากขึ้นจากการเพิ่มอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนของน้ำในบ่อเลี้ยงให้ไม่น้อยกว่า 10:1 (Avnimelech, 1999) ซึ่งในการทดลองนี้เลือกใช้วิธีการเติมแอมโมเนียสำหรับปลาเป็นแหล่งของสารอินทรีย์คาร์บอน และควบคุมอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1 ทั้งนี้แหล่งของไนโตรเจนจะมาจากสิ่งขับถ่ายของปลาและอาหารที่เหลือจากการบริโภคของสัตว์น้ำ สำหรับการคำนวณปริมาณแอมโมเนียสำหรับปลาที่ต้องเติมเข้าสู่ระบบได้จากสูตรต่อไปนี้

ปริมาณไนโตรเจนที่ปลาได้รับ (ก.ไนโตรเจน/วัน) = (A) × (B)

โดยที่ A คือ ปริมาณอาหารทั้งหมดที่ปลาได้รับต่อวัน (ก.)

B คือ ร้อยละของไนโตรเจนในอาหารสัตว์น้ำ สำหรับการทดลองนี้มีค่าเท่ากับร้อยละ

3.27 (ภาคผนวก จ.4)

ปริมาณไนโตรเจนที่ถูกขับถ่ายออกมาจากสัตว์น้ำ (ก.ไนโตรเจน/วัน) = (C) × (D)

โดยที่ C คือ ปริมาณไนโตรเจนที่ปลาได้รับ (ก.ไนโตรเจน/วัน)

D คือ ร้อยละของไนโตรเจนที่ถูกขับถ่ายออกมาจากสัตว์น้ำ เท่ากับร้อยละ 75

(Piedrahita, 2003)

ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่ต้องการ (ก.คาร์บอน/วัน) = (E) x (F)

โดยที่ E คือ ปริมาณไนโตรเจนที่ถูกขับถ่ายออกมาจากสัตว์น้ำ (ก.ไนโตรเจน/วัน)

F คือ อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน ในที่นี้คือ 10:1 (Avnimelech, 1999)

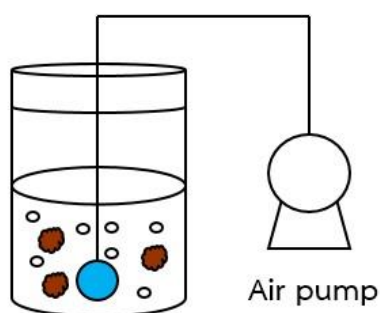
ปริมาณแอมโมเนียสำหรับเลี้ยงปลา (ก./วัน) = (H) x (I)

โดยที่ H คือ ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่ต้องการ (ก.คาร์บอน/วัน)

I คือ ร้อยละของคาร์บอนในแอมโมเนียสำหรับเลี้ยงปลา สำหรับการทดลองนี้มีค่าเท่ากับร้อยละ 36.43 (ภาคผนวก จ.5)

การทดลองที่ 1.1 การศึกษาความสามารถของตะกอนไบโอฟล็อกในการบำบัดแอมโมเนีย

การทดลองนี้เป็นการศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อก ซึ่งเกิดจากการดูดซึมแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟและการเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรต์และไนเตรตของแบคทีเรียกลุ่มไนโตรไฟอิง โดยทำการศึกษาทุกๆ 7 วัน ในขวดโพลีลอสติก ขนาด 1 ล. (ดังรูปที่ 3.6) ที่บรรจุตะกอนไบโอฟล็อกปริมาณ 1 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 มก.ไนโตรเจน/ล. และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 0.5 ล. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ควบคุมคุณภาพน้ำในขวดโพลีลอสติกโดยรักษาระดับของพีเอชให้อยู่ในช่วง 7.5 - 8.5 ค่าความเป็นด่างอยู่ในช่วง 120 -180 มก.หินปูน/ล. ด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) และเติมอากาศตลอดเวลาด้วยเครื่องเติมอากาศและหัวทรายเพื่อรักษาปริมาณออกซิเจนละลายให้มากกว่า 4 มก./ล. เก็บน้ำตัวอย่างทุกๆ ชั่วโมงเพื่อวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต จนกระทั่งปริมาณแอมโมเนียเหลือน้อยกว่า 0.1 มก.ไนโตรเจน/ล. และเมื่อสิ้นสุดการทดลองนำข้อมูลการลดลงของปริมาณแอมโมเนียที่ได้มาเขียนกราฟเทียบกับเวลา เพื่อคำนวณอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อก โดยผลจากการทดลองจะทำให้ได้ค่าความเข้มข้นของตะกอนไบโอฟล็อกที่เหมาะสมต่อการควบคุมพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำสำหรับการทดลองต่อไป



รูปที่ 3.6 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวิเคราะห์อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อก

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ในการทดลองที่ 1.1

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดลอง	1 ล.
ปริมาณตะกอนไบโอฟล็อก	1 มก.ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด/ล.
ค่าพีเอช	อยู่ในช่วง 7.5 – 8.5
ค่าความเป็นด่าง	อยู่ในช่วง 120 - 180 มก.หินปูน/ล.
ปริมาณออกซิเจนละลาย	มากกว่า 4 มก./ล.
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง
ปริมาณของแอมโมเนียเริ่มต้น	1 มก.ไนโตรเจน/ล.
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อก	แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต

การทดลองที่ 1.2 การศึกษาปริมาณออกซิเจนที่ต้องการของตะกอนไบโอฟล็อก

การทดลองนี้เป็นการศึกษาอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อก ซึ่งเกิดจากจุลินทรีย์นำออกซิเจนไปใช้ในการหายใจเพียงอย่างเดียว โดยทำการศึกษาทุกๆ 7 วัน ในขวดปิโอติที่บรรจุน้ำตัวอย่างที่มีตะกอนไบโอฟล็อกจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำปริมาตร 300 มล. วางขวดปิโอติบนเครื่องกวนผสม (Magnetic stirrer) เพื่อให้เกิดการกวนผสมตลอดเวลา เชื่อมต่อเครื่องวัดปริมาณออกซิเจนละลาย (HANNA HI 98186) เข้ากับขวดปิโอติ โดยหล่อน้ำที่ส่วนบนของขวดปิโอติตลอดเวลาเพื่อป้องกันการแพร่ของออกซิเจนจากภายนอก (ดังรูปที่ 3.7) วิเคราะห์ค่าออกซิเจนละลายเป็นระยะๆ และเมื่อ

สิ้นสุดการทดลองนำข้อมูลการลดลงของปริมาณออกซิเจนที่ได้มาเขียนกราฟเทียบกับเวลาเพื่อคำนวณอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไปโอฟล็อก



รูปที่ 3.7 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวิเคราะห์อัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไปโอฟล็อก

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ในการทดลองที่ 1.2

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ปริมาตรน้ำที่ใช้ในการทดลอง	300 มล.
ค่าพีเอช	อยู่ในช่วง 7.5 – 8.5
ค่าความเป็นด่าง	อยู่ในช่วง 120 - 180 มก.หินปูน/ล.
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
ปริมาณออกซิเจนที่ตะกอนไปโอฟล็อกต้องการ	ปริมาณออกซิเจนละลาย

การทดลองที่ 1.3 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนไบโอฟล็อก

การทดลองนี้เป็นการติดตามการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำและตะกอนไบโอฟล็อกในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจำลองตลอดช่วงเวลาของการทดลอง โดยเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต เพื่อศึกษาบทบาทของตะกอนไบโอฟล็อกในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในระหว่างการเลี้ยงสัตว์น้ำ และทำการเก็บตัวอย่างตะกอนไบโอฟล็อกเพื่อวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนได้ในเวลา 30 นาที (SV_{30}) ขนาดอนุภาคตะกอน ดัชนีปริมาณตะกอน (SVI) และลักษณะทางกายภาพใต้กล้องจุลทรรศน์

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ในการทดลองที่ 1.3

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ปริมาตรน้ำที่ใช้ในการทดลอง	300 ลิตร
ชนิดของสัตว์น้ำ	ปลานิล
ความหนาแน่นเริ่มต้นของสัตว์น้ำ	3 กก./ลบ.ม.
ปริมาณการให้อาหาร	ร้อยละ 3 ของน้ำหนักปลา
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	C:N = 10:1
ค่าพีเอช	อยู่ในช่วง 7.5 – 8.5
ค่าความเป็นด่าง	อยู่ในช่วง 120 - 180 มก.หินปูน/ล
ปริมาณออกซิเจนละลาย	มากกว่า 4 มก./ล.
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
ปริมาณสารอนินทรีย์ไนโตรเจน	แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต
ปริมาณตะกอนไบโอฟล็อก	ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนในเวลา 30 นาที (SV_{30})
ขนาดตะกอนไบโอฟล็อก	ขนาดอนุภาคตะกอน
ลักษณะของตะกอนไบโอฟล็อก	ลักษณะทางกายภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์
ความสามารถในการตกตะกอน	ดัชนีปริมาณตะกอน (SVI)

การทดลองครั้งที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่บรรจุในถัง ปฏิกรณ์ไบโอฟลอคในการแยกของแข็งแขวนลอยออกจากหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำ

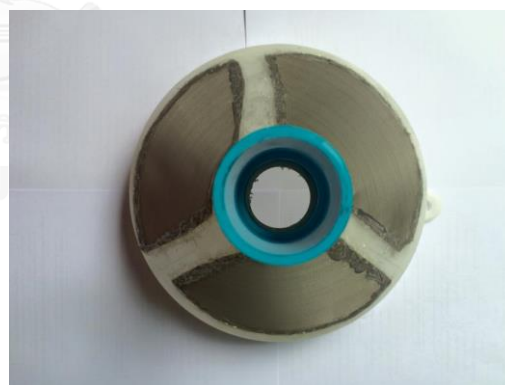
การทดลองนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกอนุภาคแขวนลอยของหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่บรรจุอยู่ในถังปฏิกรณ์ไบโอฟลอค โดยทำการแปรค่าขนาดช่องกรองของแผ่นกรองสแตนเลส และอัตราการไหลที่เหมาะสมในการเดินระบบ

หน่วยแยกตะกอน

หน่วยแยกตะกอนที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นรูปทรงกรวย โดยประยุกต์ใช้กรวยกรองน้ำพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 ซม. ทำการเจาะบริเวณด้านข้างของกรวยกรองน้ำเป็น 3 ช่อง และติดแผ่นตะแกรงสแตนเลสขนาด 120 ตร.ซม. จำนวน 3 แผ่น โดยรอบกรวยกรอง จากนั้นติดตั้งข้อต่อตรงพีวีซีที่บริเวณส่วนปลายของกรวยกรอง (ดังรูปที่ 3.8) ทั้งนี้กรวยกรองที่ได้จะมีพื้นที่ใน ส่วนการกรองทั้งหมดประมาณ 360 ตร.ซม. ซึ่งคำนวณได้ตามรายละเอียดของขนาดแผ่นตะแกรงสแตนเลส (ดังรูปที่ 3.9)

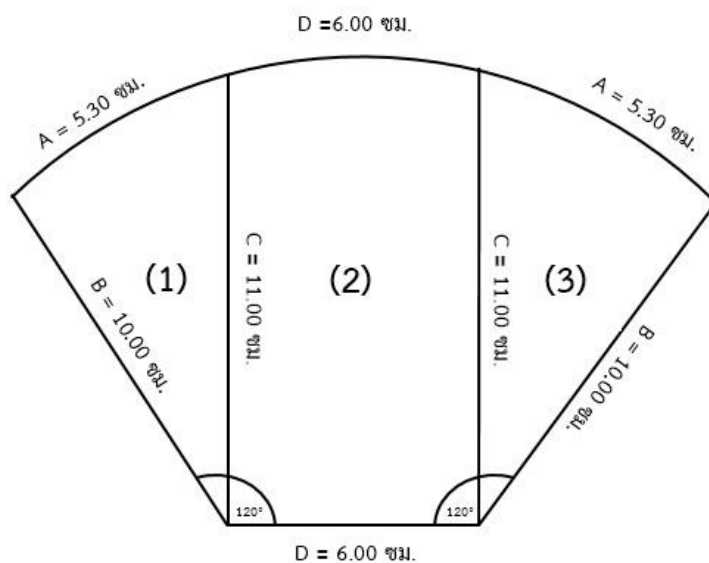


ภาพถ่ายจากด้านข้าง



ภาพถ่ายจากด้านล่าง

รูปที่ 3.8 หน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.9 ลักษณะของแผ่นตะแกรงสแตนเลสที่ติดอยู่บนหน่วยแยกตะกอน

การคำนวณพื้นที่การกรองของหน่วยแยกตะกอน

แผ่นตะแกรงสแตนเลสมีความยาว ด้าน A = 5.30 ซม. ด้าน B = 10.0 ซม.

ด้าน C = 11.0 ซม. ด้าน D = 6.00 ซม.

หาพื้นที่ตะแกรงส่วนที่ (2) จากสูตรพื้นที่สี่เหลี่ยมพื้นผ้า = กว้าง x ยาว = C x D

$$= 11.0 \times 6.00 = 66 \text{ ตร.ซม.}$$

หาพื้นที่ตะแกรงส่วนที่ (1) กับ (3) จากสูตรรูปสามเหลี่ยมใดๆ = $\sqrt{S(S-A)(S-B)(S-C)}$

$$\text{โดยที่ } S = (A + B + C) \div 2$$

$$= (5.30 + 10.0 + 11.0) \div 2$$

$$= 13.15$$

$$\text{ดังนั้น พื้นที่} = \sqrt{13.15(13.15 - 5.30)(13.15 - 10.0)(13.15 - 11.0)}$$

$$= 26.5 \text{ ตร.ซม.}$$

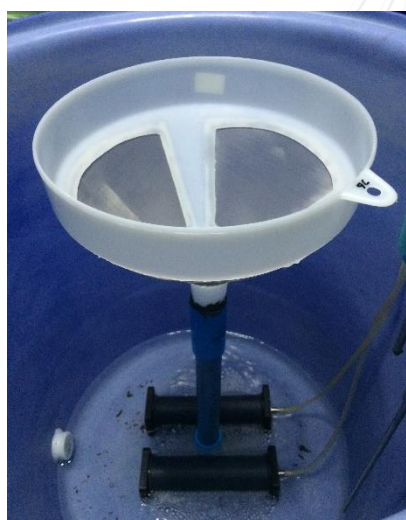
นั่นคือพื้นที่รวมของตะแกรงสแตนเลส (1) (2) และ (3) = 26.5 + 66 + 26.25 = 119 ตร.ซม.

แต่เนื่องจากใช้แผ่นตะแกรงสแตนเลสจำนวน 3 แผ่น จึงมีพื้นที่รวมทั้งหมดที่ใช้ในการกรองตะกอน

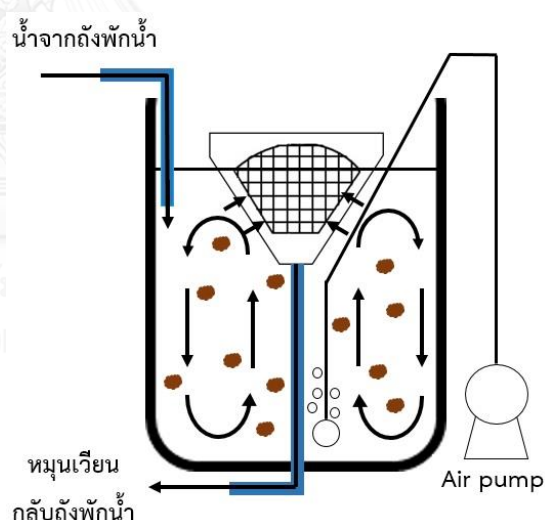
$$= 119 \times 3 = 357 \text{ ตร.ซม. (ประมาณ 360 ตร.ซม.)}$$

กลไกการกรองของหน่วยแยกตะกอน

เริ่มต้นการเดินระบบโดยสูบน้ำจากถังพักน้ำเข้ามายังถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกที่ภายในติดตั้งหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรอง โดยแผ่นกรองสแตนเลสที่ติดตั้งอยู่บนหน่วยแยกตะกอนจะมีลักษณะเอียงทำมุม 50 องศา กับแนวระนาบตามรูปทรงของหน่วยแยกตะกอน ติดตั้งหัวทรายบริเวณใต้หน่วยแยกตะกอนเพื่อเติมออกซิเจนให้กับตะกอนไบโอฟล็อกและเพิ่มการไหลเวียนของน้ำในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อก (ดังรูปที่ 3.10 ก.) ทั้งนี้เมื่อน้ำที่มีตะกอนไบโอฟล็อกถูกกรองผ่านหน่วยแยกตะกอนจากภายนอก อนุภาคของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถผ่านเยื่อกรองได้ จะถูกกักไว้ภายในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อก โดยลักษณะการไหลเวียนของน้ำดังกล่าวมีรูปแบบการไหลขนานไปกับแผ่นกรอง (ดังรูปที่ 3.10 ข.) เรียกลักษณะการกรองแบบนี้ว่าการกรองแบบไหลขวาง (Cross flow filtration) ซึ่งจะช่วยลดการอุดตันของตะกอนไบโอฟล็อกบนแผ่นกรองได้ระดับหนึ่ง



(ก)

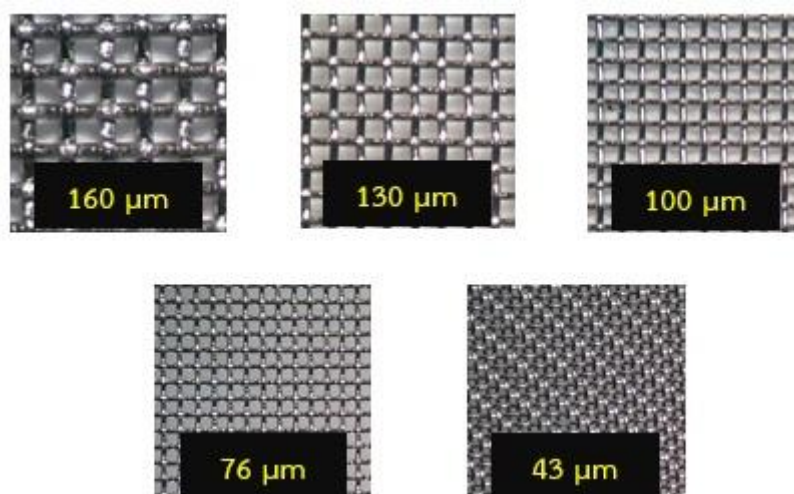


(ข)

รูปที่ 3.10 การติดตั้งหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อก โดย (ก) แสดงการติดตั้งกรวยกรองพลาสติกและ (ข) แสดงรูปแบบการไหลเวียนของน้ำในถังปฏิกรณ์

การทดลองที่ 2.1 การศึกษาขนาดรูของแผ่นกรองสแตนเลสในการแยกตะกอนไบโอฟล็อกจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

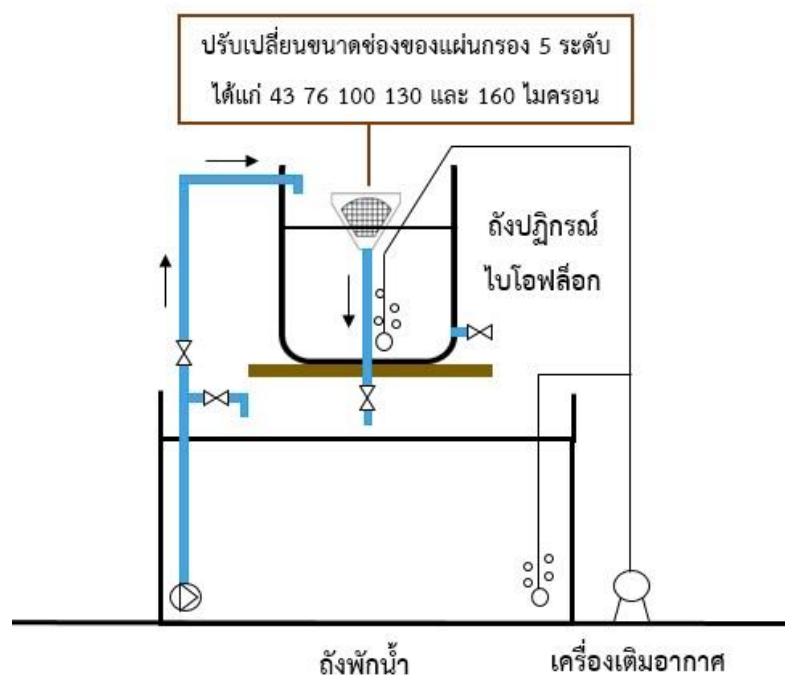
การทดลองนี้เป็นการทดสอบขนาดรูของแผ่นกรองสแตนเลสที่เหมาะสมในการแยกตะกอนไบโอฟล็อก โดยแปรค่าขนาดรูของแผ่นกรอง 5 ระดับได้แก่ 43, 76, 100, 130 และ 160 ไมครอน แสดงดังรูปที่ 3.11 เริ่มการทดลองโดยทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.12 จากนั้นสูบน้ำที่มีตะกอนไบโอฟล็อกจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำในการทดลองที่ 1 ปริมาตร 100 ล. เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกขนาด 120 ลิตร ที่บรรจุหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองไว้ภายใน โดยใช้ความเข้มข้นของตะกอนไบโอฟล็อกเริ่มต้นประมาณ 500 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นสูงสุดของตะกอนไบโอฟล็อกที่ควรคงไว้ในระบบ (Avnimelech, 2006) เต็มอากาศตลอดเวลาด้วยเครื่องเติมอากาศและหัวทราย เพื่อให้ฟองอากาศเป็นตัวพาตะกอนไม่ให้ติดค้างอยู่บนแผ่นกรอง ทำการเชื่อมต่อถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกกับถังพักน้ำซึ่งเป็นถังทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าปริมาตร 250 ล. ที่บรรจุน้ำประปาปริมาตร 200 ล. เริ่มเดินระบบโดยสูบน้ำจากถังพักน้ำเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกในสภาวะควบคุมอัตราการไหลคงที่ 3,000 ล./วัน (ร้อยละ 1,000 ของปริมาตรถังต่อวัน) ด้วยบอลวาล์ว น้ำที่มีตะกอนไบโอฟล็อกจะถูกกรองผ่านกรวยกรองจากภายนอกทำให้ตะกอนคงค้างอยู่ในถังปฏิกรณ์ จะมีเฉพาะส่วนน้ำใสที่ไหลเวียนกลับสู่ถังพักน้ำ ทำการทดลองต่อเนื่องเป็นเวลา 5 วัน โดยวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำในถังปฏิกรณ์ น้ำหลังจากผ่านการกรอง และน้ำในถังพักน้ำทุกๆ วัน เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการแยกตะกอนไบโอฟล็อกออกจากน้ำ จากนั้นเปลี่ยนแผ่นกรองและทำการทดลองซ้ำกับแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องกรอง 76, 100, 130 และ 160 ไมครอนตามลำดับ



รูปที่ 3.11 ขนาดช่องกรองของตะแกรงสแตนเลสเมื่อส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอด้วยกำลังขยาย 32 เท่า

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ในการทดลองที่ 2.1

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ความเข้มข้นตะกอนไบโอฟล็อก	500 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล.
พื้นที่ในการกรอง	360 ตร.ซม. (น้ำไหลไม่เต็มพื้นที่ของตะแกรง)
อัตราการไหล	3,000 ล./วัน (ร้อยละ 1000 ของปริมาตรถังต่อวัน)
ชนิดแผ่นกรอง	แผ่นกรองสแตนเลส
ปริมาตรถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อก	120 ล. ปริมาตรทำงาน 100 ล.
ปริมาตรถังพักน้ำ	250 ล. ปริมาตรทำงาน 200 ล.
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ขนาดช่องกรองของตะแกรงสแตนเลส	43, 76, 100, 130 และ 160 ไมครอน
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
ประสิทธิภาพในการกรอง	ปริมาณของแข็งแขวนลอยในถังปฏิกรณ์และน้ำขาออก



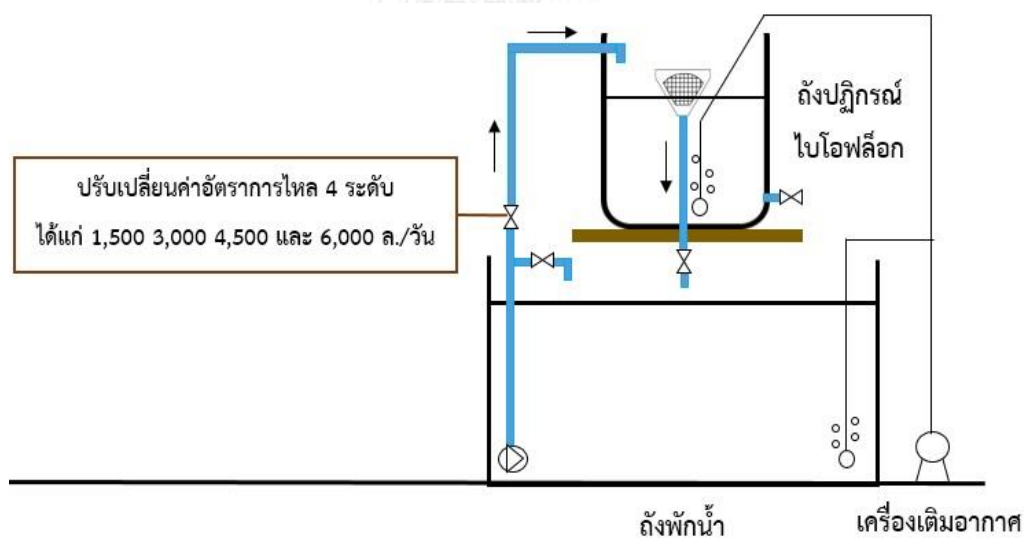
รูปที่ 3.12 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบขนาดช่องกรองของแผ่นกรองสแตนเลส

การทดลองที่ 2.2 การศึกษาอัตราการไหลของน้ำเข้าหน่วยกรองตะกอนด้วยขนาดรูของแผ่นกรองที่เหมาะสม

การทดลองนี้เป็นการทดสอบอัตราการไหลของน้ำเข้าหน่วยกรองตะกอนแบบกรวยกรอง ดังรูปที่ 3.13 โดยแปรค่าอัตราการไหล 4 ระดับ ได้แก่ 1,500 3,000 4,500 และ 6,000 ล./วัน ซึ่งเท่ากับร้อยละ 500 1,000 1,500 และ 2,000 ของปริมาณถังต่อวัน ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2.1 โดยใช้แผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องกรองที่เหมาะสม (ค่าจากการทดลองที่ช่วงที่ 2.1) เริ่มต้นการเดินระบบโดยสูบน้ำจากถังพักน้ำเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกในสภาวะที่ควบคุมอัตราการไหลคงที่ 1,500 ล./วัน ด้วยบอลวาล์ว ทำการทดลองต่อเนื่องเป็นเวลา 5 วัน โดยวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำในถังปฏิกรณ์ น้ำหลังจากผ่านการกรอง และน้ำในถังพักน้ำ ทุกๆ วัน เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการแยกตะกอนไบโอฟล็อกออกจากน้ำ จากนั้นทำการทดลองซ้ำกับค่าอัตราการไหลร้อยละ 3,000 4,500 และ 6,000 ล./วัน ตามลำดับ โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับวิธีที่กล่าวมาข้างต้น

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ในการทดลองช่วงที่ 2.2

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ความเข้มข้นตะกอนไบโอฟล็อก	500 มก. ของแข็งแขวนลอย/ล.
พื้นที่ในการกรอง	360 ตร.ซม. (น้ำไหลไม่เต็มพื้นที่ของตะแกรง)
ขนาดช่องกรอง	ค่าจากการทดลองช่วงที่ 2.1
ชนิดแผ่นกรอง	แผ่นกรองสแตนเลส
ปริมาตรถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อก	120 ล. ปริมาตรทำงาน 100 ล.
ปริมาตรถังพักน้ำ	250 ล. ปริมาตรทำงาน 200 ล.
ประสิทธิภาพในการกรอง	ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำขาออก
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
อัตราการไหล	1,500 3,000 4,500 และ 6,000 ล./วัน
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
ประสิทธิภาพในการกรอง	ปริมาณของแข็งแขวนลอยในถังปฏิกรณ์และน้ำขาออก



รูปที่ 3.13 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบอัตราการไหลของหน่วยกรองตะกอน

การทดลองช่วงที่ 3 การประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกแบบแยกส่วนกับการเลี้ยงสัตว์น้ำ แบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดขนาดเล็ก

การทดลองนี้เป็นการศึกษาบทบาทของตะกอนชีวภาพในการช่วยควบคุมคุณภาพน้ำและสารอินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจำลองขนาดเล็ก เมื่อทำการเลี้ยงปลานิลเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 60 วัน ด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกในสถานะที่ควบคุมความเข้มข้นของตะกอนไบโอฟล็อกภายในบ่อให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม (คำนวณจากอัตราการบำบัดแอมโมเนียของการทดลองช่วงที่ 1) โดยทำการทดลองเปรียบเทียบกับระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการแยกตะกอนไบโอฟล็อกออกจากหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำกับชุดทดลองที่มีติดตั้งถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกที่ภายในบรรจุหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองเพื่อแยกตะกอนไบโอฟล็อกออกจากหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำ

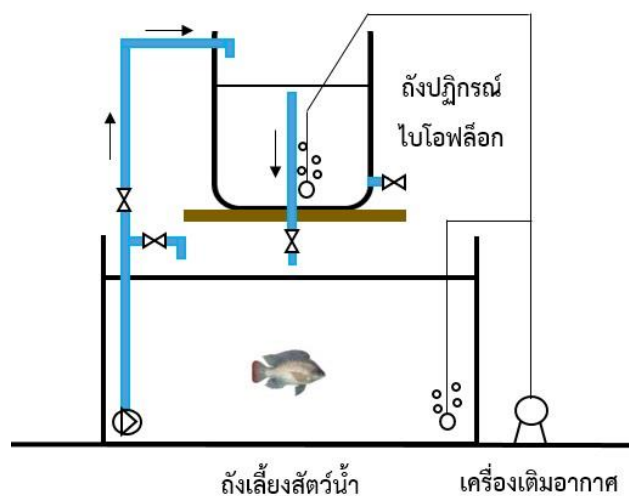
ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์ในการทดลองช่วงที่ 3

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ปริมาณถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อก	120 ล. ปริมาตรทำงาน 100 ล.
ปริมาณถังเลี้ยงปลานิล	250 ล. ปริมาตรทำงาน 200 ล.
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	C:N = 10:1
ค่าพีเอช	อยู่ในช่วง 7.5 – 8.5
ค่าความเป็นด่าง	อยู่ในช่วง 120 - 180 มก.หินปูน/ล.
ปริมาณออกซิเจนละลาย	มากกว่า 4 มก./ล.
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง
ความเข้มข้นตะกอนไบโอฟล็อก	คำนวณจากอัตราการบำบัดแอมโมเนียของการทดลองช่วงที่ 1
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
รูปแบบของถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อก	ถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกที่ไม่ติดตั้งหน่วยแยกตะกอน
	ถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกที่ติดตั้งหน่วยแยกตะกอนไว้ภายใน
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
ปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจน	แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต
การเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ	น้ำหนัก ความยาว และอัตราการเจริญเติบโตของปลานิล
อัตราการรอดชีวิต	จำนวนปลานิล
ประสิทธิภาพในการกรอง	ปริมาณของแข็งแขวนลอยในถังปฏิกรณ์และน้ำขาออก
ความสามารถในการตกตะกอน	ดัชนีปริมาณตะกอน (SVI)
ปริมาณตะกอนไบโอฟล็อก	ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนได้ในเวลา 30 นาที (SV ₃₀)

การเดินระบบ

แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดโดยเดินระบบควบคู่กัน ได้แก่

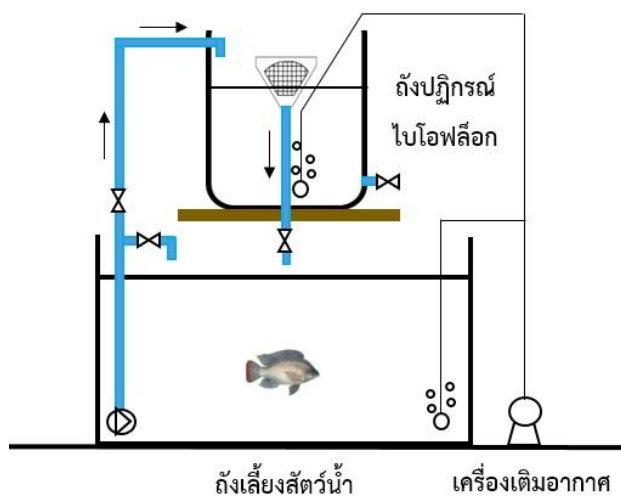
(1) **ชุดควบคุม** : เป็นการเลี้ยงปลานิลด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล๊อคในสภาวะที่ไม่มีการแยกตะกอนไบโอฟล๊อคออกจากหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำ ในชุดการทดลองนี้และตะกอนชีวภาพจะสามารถหมุนเวียนได้ทั้งระบบ (ดังรูปที่ 3.14) เริ่มต้นการทดลองโดยการเลี้ยงปลานิลน้ำหนักประมาณ 10 - 20 ก./ตัว ที่ระดับความหนาแน่นเริ่มต้น 3 กก./ลบ.ม. ในถังพลาสติกทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าปริมาตร 250 ล. ที่บรรจุน้ำประปา 200 ล. ซึ่งเชื่อมต่อกับถังพลาสติกทรงกลมปริมาตร 120 ล. ที่บรรจุน้ำประปา 100 ล. คิดเป็นปริมาตรน้ำรวมเท่ากับ 300 ล. (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) มีการควบคุมคุณภาพน้ำเพื่อรักษาระดับพีเอชให้อยู่ในช่วง 7.5 - 8.5 ค่าความเป็นด่างอยู่ในช่วง 120 -180 มก.หินปูน/ล. ด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) และเติมอากาศตลอดเวลาด้วยเครื่องเติมอากาศและหัวทรายเพื่อรักษาปริมาณของออกซิเจนละลายให้มากกว่า 4 มก./ล. ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยในแต่ละวันจะให้อาหารปลานิลสำเร็จรูปในปริมาณร้อยละ 1- 4 ของน้ำหนักตัวปลา โดยแบ่งให้อาหารวันละ 2 ครั้ง คือ เวลา 10.00 น. และ 16.00 น. และเติมแอมโมเนียสำหรับหลังลงในระบบทุกวันด้วยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1 โดยหยุดเติมแอมโมเนียสำหรับหลังเมื่อตรวจพบปริมาณไนเตรตในน้ำเท่ากับ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. ทำการควบคุมปริมาณตะกอนไบโอฟล๊อคให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมตลอดช่วงการทดลอง โดยในระหว่างการทดลองจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์ปริมาณของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ทุกๆ 3 วัน และเก็บตัวอย่างตะกอนชีวภาพเพื่อวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนได้ในเวลา 30 นาที (SV_{30}) ดัชนีปริมาณตะกอน (SVI) ทุกๆ 7 วัน คำนวณอัตราการบำบัดแอมโมเนียทุกๆ 30 วัน นอกจากนี้จะติดตามการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำทุกๆ 12 วัน โดยสุ่มตัวอย่างปลานิลเพื่อชั่งน้ำหนัก วัดความยาว และทำการปรับปริมาณอาหารที่ให้ เมื่อสิ้นสุดการทดลองจะนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์สมมูลไนโตรเจน อัตราการเจริญเติบโต และอัตราการรอดชีวิตของสัตว์น้ำ



รูปที่ 3.14 การติดตั้งอุปกรณ์แสดงการหมุนเวียนน้ำและตะกอนชีวภาพของชุดควบคุมในการทดลองครั้งที่ 3

(2) ชุดทดลอง: เป็นการติดตั้งถังปฏิกรณ์ไบโอฟลอคแบบแยกส่วนเข้ากับหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำ เริ่มต้นการทดลองโดยการเลี้ยงปลาในน้ำหนักประมาณ 10 - 20 ก./ตัว ที่ระดับความหนาแน่นเริ่มต้น 3 กก./ลบ.ม. ในถังพลาสติกทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าปริมาตร 250 ล. ที่บรรจุน้ำประปา 200 ลิตร โดยมีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ไบโอฟลอค ซึ่งเป็นถังพลาสติกทรงกลมปริมาตร 120 ล. ที่บรรจุน้ำประปา 100 ล. คิดเป็นปริมาตรน้ำรวมเท่ากับ 300 ลิตร (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) ในแต่ละวันจะให้อาหารปลานิลสำเร็จรูปในปริมาณร้อยละ 3 ของน้ำหนักตัวปลา โดยแบ่งให้วันละ 2 ครั้ง คือ เวลา 10.00 น. และ 16.00 น. และเติมแป้งมันสำปะหลังลงในระบบทุกวันด้วยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1 โดยหยุดเติมแป้ง

มันสำปะหลังเมื่อตรวจพบปริมาณไนเตรดในน้ำเท่ากับ 3 มก.ไนโตรเจน/ล. ในชุดการทดลองนี้ภายในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกจะบรรจุหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรอง (ดังรูปที่ 3.15) เพื่อแยกส่วนตะกอนไบโอฟล็อกออกจากหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยน้ำจะถูกกรองผ่านกรวยกรองจากภายนอก ทำให้ตะกอนคงค้างอยู่ในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกจะมีเฉพาะส่วนน้ำใสที่ไหลเวียนกลับสู่ถังเลี้ยงสัตว์น้ำ ทำการควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงและสถานะต่างๆ ในการทดลองเช่นเดียวกับชุดควบคุม โดยในระหว่างการทดลองทำการเก็บตัวอย่างน้ำและตะกอนไบโอฟล็อกเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่นเดียวกับชุดควบคุม



รูปที่ 3.15 การติดตั้งอุปกรณ์แสดงการหมุนเวียนน้ำและตะกอนชีวภาพของชุดทดลองในการทดลองครั้งที่ 3

การวิเคราะห์สมดุลไนโตรเจน

เป็นการติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เข้าและออกจากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกระจายตัวของปริมาณไนโตรเจนที่หมุนเวียนอยู่ในระบบ โดยทั่วไปในการเลี้ยงสัตว์น้ำปริมาณไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบส่วนใหญ่จะมาจากอาหารสัตว์น้ำซึ่งจะถูกเปลี่ยนรูปและหมุนเวียนในรูปของอนินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำ บางส่วนจะถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ของสัตว์น้ำ และในตะกอนแขวนลอยในรูปของเซลล์แบคทีเรีย ส่วนปริมาณไนโตรเจนที่ออกจากระบบอาจเกิดการสูญเสียบางส่วนจากการเปลี่ยนถ่ายน้ำ การทิ้งตะกอนชีวภาพ และการระเหยสู่บรรยากาศของแอมโมเนียและก๊าซไนโตรเจน ทั้งนี้ปริมาณไนโตรเจนที่สะสมอยู่ในระบบแต่ละส่วนสามารถคำนวณได้ดังนี้

ปริมาณไนโตรเจนในรูปอาหารสัตว์น้ำ = (A) × (B)

โดยที่ A คือ ปริมาณอาหารที่ให้แก่สัตว์น้ำ (ก.)

B คือ ร้อยละของไนโตรเจนในอาหารสัตว์น้ำ สำหรับการทดลองนี้เท่ากับร้อยละ 3.27

(ภาคผนวก จ.4)

ปริมาณไนโตรเจนในรูปของตะกอนแขวนลอย = (C) × (D) × (E)

โดยที่ C คือ ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (มก.ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด/ล.)

D คือ ปริมาตรน้ำในถังเลี้ยงสัตว์น้ำ (ล.)

E คือ ร้อยละของไนโตรเจนในตะกอนแขวนลอยมีค่าเท่ากับร้อยละ 3.66

(พรรณทภรณ์ สิทธิพิลากร, 2556)

ปริมาณไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย = (F) × (G)

โดยที่ F คือ ความเข้มข้นแอมโมเนียในถังเลี้ยงสัตว์น้ำ (มก.ไนโตรเจน/ล.)

G คือ ปริมาตรน้ำในถังเลี้ยงสัตว์น้ำ (ล.)

ปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนไตรต์ = (H) × (I)

โดยที่ H คือ ความเข้มข้นไนไตรต์ในถังเลี้ยงสัตว์น้ำ (มก.ไนโตรเจน/ล.)

I คือ ปริมาตรน้ำในถังเลี้ยงสัตว์น้ำ (ล.)

ปริมาณไนโตรเจนในรูปของไนเตรต = (J) × (K)

โดยที่ J คือ ความเข้มข้นไนเตรตในถังเลี้ยงสัตว์น้ำ (มก.ไนโตรเจน/ล.)

K คือ ปริมาตรน้ำในถังเลี้ยงสัตว์น้ำ (ล.)

ปริมาณไนโตรเจนในรูปของมวลปลาชนิด = (L) × (M)

โดยที่ L คือ น้ำหนักแห้งของปลาชนิด (ก.) โดยน้ำหนักเปียกของปลาชนิด 86.55 ก. มีค่าเท่ากับ

น้ำหนักแห้งของปลาชนิด 19.17 (เพ็ญพิชญา พินิจธนภาคย์ ,2556)

M คือ ร้อยละของไนโตรเจนในน้ำหนักแห้งของปลาชนิดมีค่าเท่ากับร้อยละ 6.35

(เพ็ญพิชญา พินิจธนภาคย์ ,2556)

การวิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตของปลา

ติดตามการเจริญเติบโตของปลาชนิดตลอดระยะเวลาการทดลองอย่างน้อย 60 วัน โดยตรวจวัดทุกๆ 12 วันของการทดลอง ได้แก่การชั่งน้ำหนักและวัดความยาวของปลาชนิดจากปลายปากถึงปลายหางเพื่อคำนวณน้ำหนักและความยาวเฉลี่ย คำนวณอัตราการเจริญเติบโตของปลาชนิดต่อวัน ร้อยละอัตราการรอดของปลาชนิดในระบบและอัตราการแลกเนื้อจากสูตรต่อไปนี้

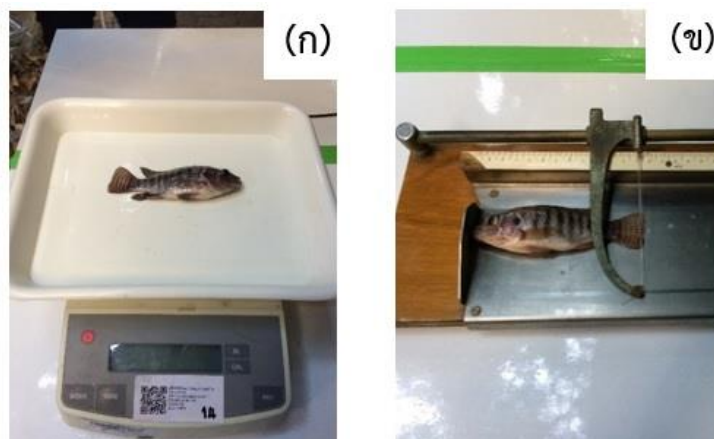
$$\text{ความยาวปลาเฉลี่ยต่อตัว (ซม./ตัว)} = \frac{\text{ผลรวมของความยาวทั้งหมด (ซม.)}}{\text{จำนวนทั้งหมด (ตัว)}}$$

$$\text{น้ำหนักปลาเฉลี่ยต่อตัว (ก./ตัว)} = \frac{\text{ผลรวมของน้ำหนักทั้งหมด (ก.)}}{\text{จำนวนทั้งหมด (ตัว)}}$$

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

$$\text{อัตราการรอด (\%)} = \frac{\text{จำนวนเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (ตัว)} \times 100}{\text{จำนวนเริ่มต้นทางการทดลอง (ตัว)}}$$

$$\text{อัตราแลกเนื้อ} = \frac{\text{ผลรวมปริมาณอาหารที่ให้ทั้งหมด}}{\text{ผลรวมน้ำหนักสุดท้าย (ก.)} - \text{ผลรวมน้ำหนักเริ่มต้น (ก.)}}$$



รูปที่ 3.16 การวิเคราะห์การเจริญเติบโตของปลานิล โดย (ก) การชั่งน้ำหนักสัตว์น้ำ และ (ข) การวัดความยาวสัตว์น้ำ

3.4 พารามิเตอร์ที่ทำการทดลอง

ตารางที่ 3.7 แสดงรายละเอียดการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดลองซึ่งจำแนกออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ คุณภาพน้ำ ตะกอน และสัตว์น้ำ โดยระบุวิธีการวิเคราะห์ เครื่องมือวิเคราะห์ และความถี่ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ตะกอน และสัตว์น้ำในการทดลอง

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/ เครื่องมือวิเคราะห์	การทดลองที่		
		1	2	3
พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ		ความถี่ในการวิเคราะห์		
แอมโมเนีย	Colorimetric and Spectrophotometric method	ทุก 3 วัน	-	ทุก 3 วัน
ไนไตรต์	Colorimetric and Spectrophotometric method	ทุก 3 วัน	-	ทุก 3 วัน
ไนเตรต	Colorimetric and Spectrophotometric method	ทุก 3 วัน	-	ทุก 3 วัน
อุณหภูมิ	Thermometer	ทุก 3 วัน	-	ทุก 3 วัน
ออกซิเจนละลาย	DO meter	ทุก 3 วัน	-	ทุก 3 วัน
พีเอช	pH meter	ทุก 3 วัน	-	ทุก 3 วัน

พารามิเตอร์ทางคุณภาพตะกอน				
ปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนได้ในเวลา 30 นาที	Imhoff cone ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที	ทุก 3 วัน	-	ทุก 7 วัน
ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)	อบแห้ง ที่ 103 - 105 °ซ	ทุก 3 วัน	ทุกวัน	ทุก 7 วัน
ขนาดของตะกอน	Laser particle size distribution analyzer	ทุก 15 วัน	-	-
ดัชนีปริมาณตะกอน (SVI)	ปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนได้ในเวลา 30 นาที ต่อปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	ทุก 15 วัน	-	ทุก 7 วัน
อัตราการบำบัดแอมโมเนีย	เปรียบเทียบปริมาณแอมโมเนียที่ลดลงต่อเวลา	ทุก 7 วัน	-	ทุก 15 วัน
อัตราการใช้ออกซิเจน	เปรียบเทียบปริมาณออกซิเจนที่ลดลงต่อเวลา	ทุก 7 วัน	-	ทุก 15 วัน
ลักษณะทางกายภาพของตะกอน	ตรวจภายใต้กล้องจุลทรรศน์	ทุก 7 วัน	-	-
พารามิเตอร์ทางคุณภาพสัตว์น้ำ				
น้ำหนักรปลา	เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง	ก่อนและสิ้นสุดการทดลอง	-	ทุก 12 วัน
ความยาวปลา	เครื่องวัดความยาวปลา	ก่อนและสิ้นสุดการทดลอง	-	ทุก 12 วัน
อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน	เปรียบเทียบน้ำหนักต่อระยะเวลาการเลี้ยง	สิ้นสุดการทดลอง	-	ทุก 12 วัน
อัตราการรอดตาย	เปรียบเทียบจำนวนปลาตอนเริ่มต้นกับสุดท้าย	สิ้นสุดการทดลอง	-	สิ้นสุดการทดลอง

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

ตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ต่างๆ โดยใช้ One-way analysis of variance (ANOVA) และ Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

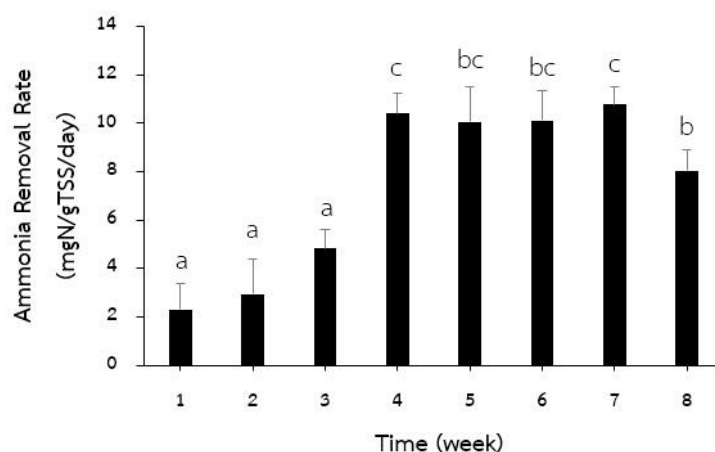
4.1 อัตราการบำบัดแอมโมเนียและอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อก

ผลการศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียและอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อก ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำและตะกอนไบโอฟล็อกที่เกิดขึ้นเองจากการเลี้ยงปลาเป็นระยะเวลา 60 วัน เมื่อทำการกระตุ้นด้วยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน (แบ่งมันสำปะหลัง) ในช่วงเริ่มต้นการทดลองเป็นเวลา 12 วัน ด้วยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1 ได้ผลดังนี้

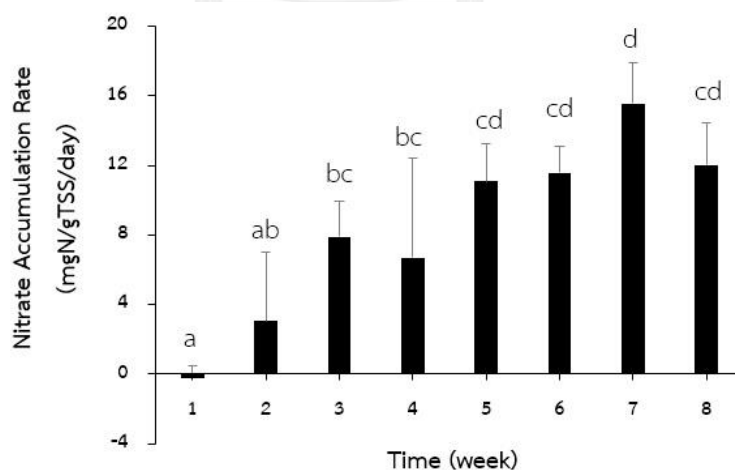
4.1.1 ความสามารถของตะกอนไบโอฟล็อกในการบำบัดแอมโมเนีย

จากการประเมินความสามารถของตะกอนไบโอฟล็อกในการบำบัดแอมโมเนียจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำทุกๆ สัปดาห์ พบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียที่ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ระหว่างสัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 8 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.49 ± 0.36 มก.ไนโตรเจน/ก.ของแข็งแขวนลอย/วัน (ดังรูปที่ 4.1) โดยงานวิจัยของพรรณทภรณ์ สิทธิพลางกูร (2556) รายงานว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยตลอดการทดลองมีค่าเท่ากับ 14.43 ± 3.45 มก.ไนโตรเจน/ก.ของแข็งแขวนลอย/วัน ซึ่งมีค่าสูงกว่างานวิจัยนี้ เนื่องจากการทดลองดังกล่าวใช้ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นสูงกว่าคือ เท่ากับ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. (ดังตารางที่ 4.1) ซึ่งโดยทั่วไปอัตราการบำบัดแอมโมเนียจะสูงขึ้นตามความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำ เมื่อพิจารณาอัตราการสะสมของไนเตรตดังรูปที่ 4.2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.85 ± 5.14 มก.ไนโตรเจน/ก.ของแข็งแขวนลอย/วัน โดยเมื่อนำข้อมูลอัตราการบำบัดแอมโมเนียและอัตราการสะสมไนเตรตระหว่างสัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 8 มาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี One-way analysis of variance (ANOVA) และ Duncan's new multiple range test พบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียสัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 3 มีค่าเท่ากับ 2.73 ± 1.63 , 2.93 ± 1.47 และ 4.82 ± 0.77 มก.ไนโตรเจน/ก.ของแข็งแขวนลอย/วัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียระหว่างสัปดาห์ที่ 4 ถึงสัปดาห์ที่ 8 โดยมีค่าเท่ากับ 10.41 ± 0.84 , 10.06 ± 1.46 , 10.12 ± 1.22 , 10.78 ± 0.72 และ 8.03 ± 0.87 ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าตะกอนไบโอฟล็อกใน

ระยะแรกระหว่างสัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 3 กระบวนการไนทริฟิเคชันยังเกิดได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งสังเกตได้จากอัตราการสะสมของไนเตรตที่มีต่ำช่วงแรกและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยอัตราการสะสมไนเตรตตั้งแต่สัปดาห์ที่ 1 จนถึงสัปดาห์ที่ 8 มีค่าเท่ากับ -0.20 ± 0.65 , 3.05 ± 3.97 , 7.90 ± 2.06 , 6.70 ± 5.72 , 11.08 ± 2.19 , 11.58 ± 1.51 , 15.56 ± 2.35 และ 12.01 ± 2.45 มก.ไนโตรเจน/ก.ของแข็งแขวนลอย/วัน ตามลำดับ คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.46 ± 1.56 มก.ไนโตรเจน/ก.ของแข็งแขวนลอย/วัน



รูปที่ 4.1 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกในแต่ละสัปดาห์ ที่ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ในการทดลองช่วงที่ 1 โดย a, b, c และ d แสดงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อ $p < 0.05$



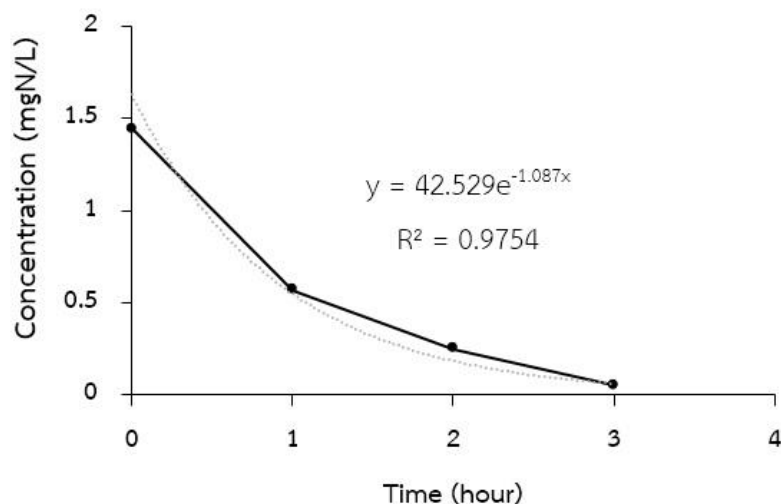
รูปที่ 4.2 อัตราการสะสมไนเตรตของตะกอนไบโอฟล็อกในแต่ละสัปดาห์ ที่ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ในการทดลองช่วงที่ 1 โดย a, b, c และ d แสดงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อ $p < 0.05$

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ

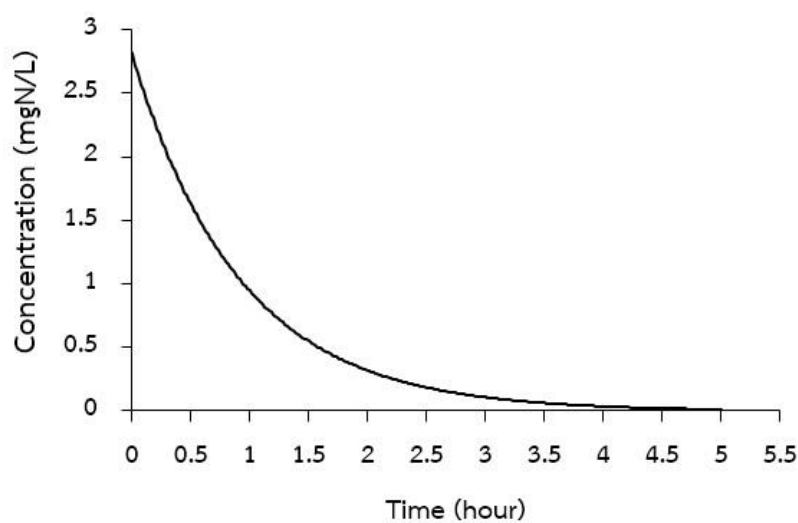
อัตราการลดลงของแอมโมเนียจากการบำบัดด้วยตะกอนชีวภาพจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ			
งานวิจัยอ้างอิง	วิธีวิเคราะห์	ความเข้มข้น แอมโมเนียเริ่มต้น (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มก.ไนโตรเจน/ก.ของแข็งแขวนลอย/วัน)
พรรณทรรณ์ สิทธิ์พลางกูร (2556)	Ammonia removal rate	2	14.43±3.45
งานวิจัยนี้	Ammonia removal rate	1	7.49±0.36
อัตราการเพิ่มขึ้นของไนเตรดจากการบำบัดด้วยตะกอนชีวภาพจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ			
งานวิจัย	วิธีวิเคราะห์	ความเข้มข้น แอมโมเนียเริ่มต้น (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มก.ไนโตรเจน/ก.ของแข็งแขวนลอย/วัน)
Liang และคณะ (2014)	Nitrification rate	10	11.04±0.72
งานวิจัยนี้	Nitrate accumulation rate	1	8.46±1.56

- การคำนวณปริมาณตะกอนไบโอฟล็อกที่เหมาะสมที่ต้องคงไว้ในระบบ

เมื่อพิจารณานำข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อก ภายหลังจากเกิดกระบวนการบำบัดไนทริฟิเคชันสมบูรณ์แล้ว (ในที่นี่เลือกใช้ข้อมูลจากสัปดาห์ที่ 7) มาประเมินเส้นแนวโน้มด้วยสมการแบบเอกซ์โพเนนเชียล (ดังรูปที่ 4.3) และนำสมการที่ได้มาคำนวณเพื่อจำลองกราฟอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกในระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียที่สูงขึ้น เพื่อใช้เป็นแนวทางในการควบคุมปริมาณของตะกอนไบโอฟล็อกในระบบให้เหมาะสมได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกในสัปดาห์ที่ 7



รูปที่ 4.4 กราฟจำลองการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกเพื่อใช้ในการควบคุม ปริมาณตะกอนในระบบ

- การคำนวณอัตราการบำบัดแอมโมเนีย

เนื่องจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำในการทดลองนี้มีปริมาตรรวม 300 ล. เลี้ยงปลาที่ระดับความหนาแน่น 3 กก./ลบ.ม. และให้อาหารในอัตราส่วนร้อยละ 3 ของน้ำหนักปลา ดังนั้นปลาในระบบจะได้รับอาหารรวม 27 ก./วัน โดยอาหารประกอบด้วยไนโตรเจนร้อยละ 3.27 (อาหารมีโปรตีนร้อยละ 18) และไนโตรเจนที่ถูกขับถ่ายออกมาจากสัตว์น้ำเท่ากับร้อยละ 75 (Piedrahita, 2003)

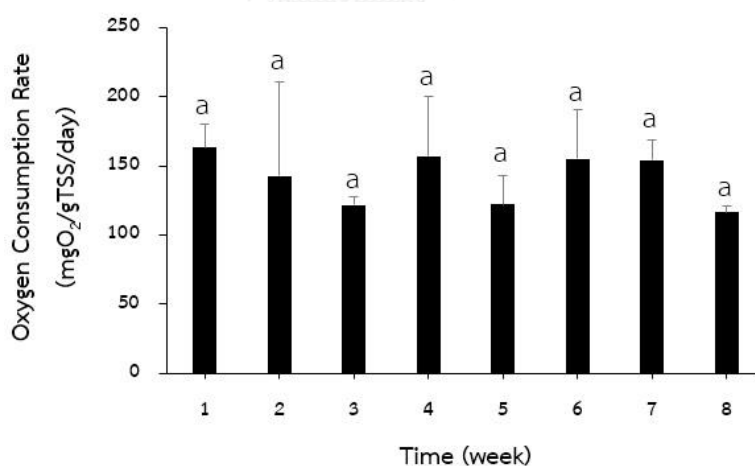
$$\begin{aligned}
 \text{ปลาไนได้รับปริมาณไนโตรเจนจากอาหาร} &= (27 \times 3.27) \div 100 = 0.88 \text{ ก./วัน} \\
 \text{ไนโตรเจนที่ปลาไนขับถ่ายออกมา} &= 0.88 \times 0.75 = 0.66 \text{ ก./วัน} \\
 \text{ดังนั้นความเข้มข้นของไนโตรเจนที่จะเกิดขึ้นในระบบ} &= 0.66 \div 300 \text{ ล.} = 0.0022 \text{ ก./ล.} \\
 &= 2.2 \text{ มก.ไนโตรเจน/ล.}
 \end{aligned}$$

เมื่อนำข้อมูลผลการคำนวณความเข้มข้นสูงสุดของไนโตรเจนที่จะเกิดขึ้นในระบบไปเปรียบเทียบกับกราฟรูปที่ 4.4 ซึ่งสร้างจากข้อมูลอัตราการบำบัดที่ได้จากการทดลองในรูปที่ 4.3 จะสามารถกำหนดความเข้มข้นของตะกอนไปโอฟล็อก และระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดของเสียไนโตรเจนที่ความเข้มข้น 2.2 มก.ไนโตรเจน/ล. ได้ โดยพบว่าตะกอนไปโอฟล็อกปริมาณ 1,000 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. จะสามารถบำบัดของเสียไนโตรเจนที่ความเข้มข้น 2.2 มก.ไนโตรเจน/ล. หมดภายในเวลาประมาณ 4 ชม. แต่ความเข้มข้นของตะกอนไปโอฟล็อกที่สูงถึง 1,000 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. นั้นอาจส่งผลเสียต่อสัตว์น้ำ โดย Avnimelech (2006) แนะนำว่าความเข้มข้นสูงสุดของตะกอนในระบบไม่ควรเกิน 500 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. ในกรณีนี้หากคงตะกอนไปโอฟล็อกที่ระดับความเข้มข้น 500, 250, 200 และ 100 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. จะใช้เวลาในการบำบัดของเสียไนโตรเจนจนหมดเท่ากับ 8, 16, 20, และ 40 ชม. ตามลำดับ แต่การคงตะกอนไปโอฟล็อกในระดับที่ต่ำเกินไปเท่ากับ 100 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. จะทำให้ระบบไม่สามารถบำบัดของเสียไนโตรเจนได้หมดภายในหนึ่งวัน ดังนั้นการควบคุมตะกอนในระบบให้อยู่ในระดับ 200 - 500 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. จึงมีความเหมาะสม เนื่องจากสามารถบำบัดของเสียไนโตรเจนที่ความเข้มข้น 2.2 มก.ไนโตรเจน/ล. (คิดเป็นปริมาณโปรตีนที่สัตว์น้ำทั้งหมดได้รับเท่ากับ 5.5 ก./วัน) ได้หมดภายในวันเดียวและไม่ส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำ ทั้งนี้ในระหว่างการเลี้ยงสัตว์น้ำหากมีการปรับปริมาณการให้อาหารที่มากขึ้นก็อาจจะต้องมีการปรับปริมาณตะกอนในระบบให้มีความเหมาะสมต่อของเสียไนโตรเจนที่จะเกิดขึ้นด้วย

4.1.2 อัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไปโอฟล็อก

จากการประเมินอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไปโอฟล็อกที่เก็บตัวอย่างจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำต่างๆ สัปดาห์ (ค่าที่ได้เกิดจากจุลินทรีย์นำออกซิเจนไปใช้ในการหายใจเพียงอย่างเดียว) พบว่าระหว่างสัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 8 มีค่าเท่ากับ 163.44 ± 17.02 , 142.75 ± 68.22 , 121.68 ± 5.80 , 156.91 ± 43.02 , 122.16 ± 21.16 , 155.23 ± 35.37 , 154.18 ± 14.81 และ 116.35 ± 4.77

มก.ออกซิเจน/ก.ของแข็งแขวนลอย/วัน ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.5) ซึ่งเมื่อนำข้อมูลอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อกมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี One-way Analysis of Variance (ANOVA) พบว่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) ระหว่างอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อกระหว่างสัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 8 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าปริมาณการใช้ออกซิเจนในการหายใจของตะกอนไบโอฟล็อกขึ้นอยู่กับปริมาณตะกอนในระบบ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 141.59 ± 18.78 มก.ออกซิเจน/ก.ของแข็งแขวนลอย/วัน สำหรับการทดลองนี้กำหนดปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบไว้ที่ 300 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. ทำให้ทั้งระบบ (300 ล.) มีอัตราการใช้ออกซิเจนเท่ากับ 530.96 มก.ออกซิเจน/ชม. โดยถ้าปริมาณออกซิเจนละลายในระบบมีค่าประมาณ 7 มก.ออกซิเจน/ล. จะทำให้ทั้งระบบ (300 ล.) มีปริมาณออกซิเจนละลายอยู่ทั้งหมด 2,100 มก.ออกซิเจน ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้าไม่มีการเติมอากาศปริมาณออกซิเจนละลายในระบบจะถูกใช้หมดภายในเวลาประมาณ 4 ชม. ดังนั้นการคงระดับปริมาณตะกอนไบโอฟล็อกในระบบที่มากเกินไปจะทำให้ต้องสูญเสียพลังงานในการเติมอากาศที่มากขึ้น และเพื่อรักษาระดับปริมาณออกซิเจนละลายในระบบให้เหมาะสมต่อสัตว์น้ำและตะกอนไบโอฟล็อกจึงต้องทำการเติมอากาศในระบบตลอดเวลา



รูปที่ 4.5 อัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อกในสัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 8 โดย a แสดงถึงความไม่แตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$)

4.1.3 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนไบโอฟล็อก

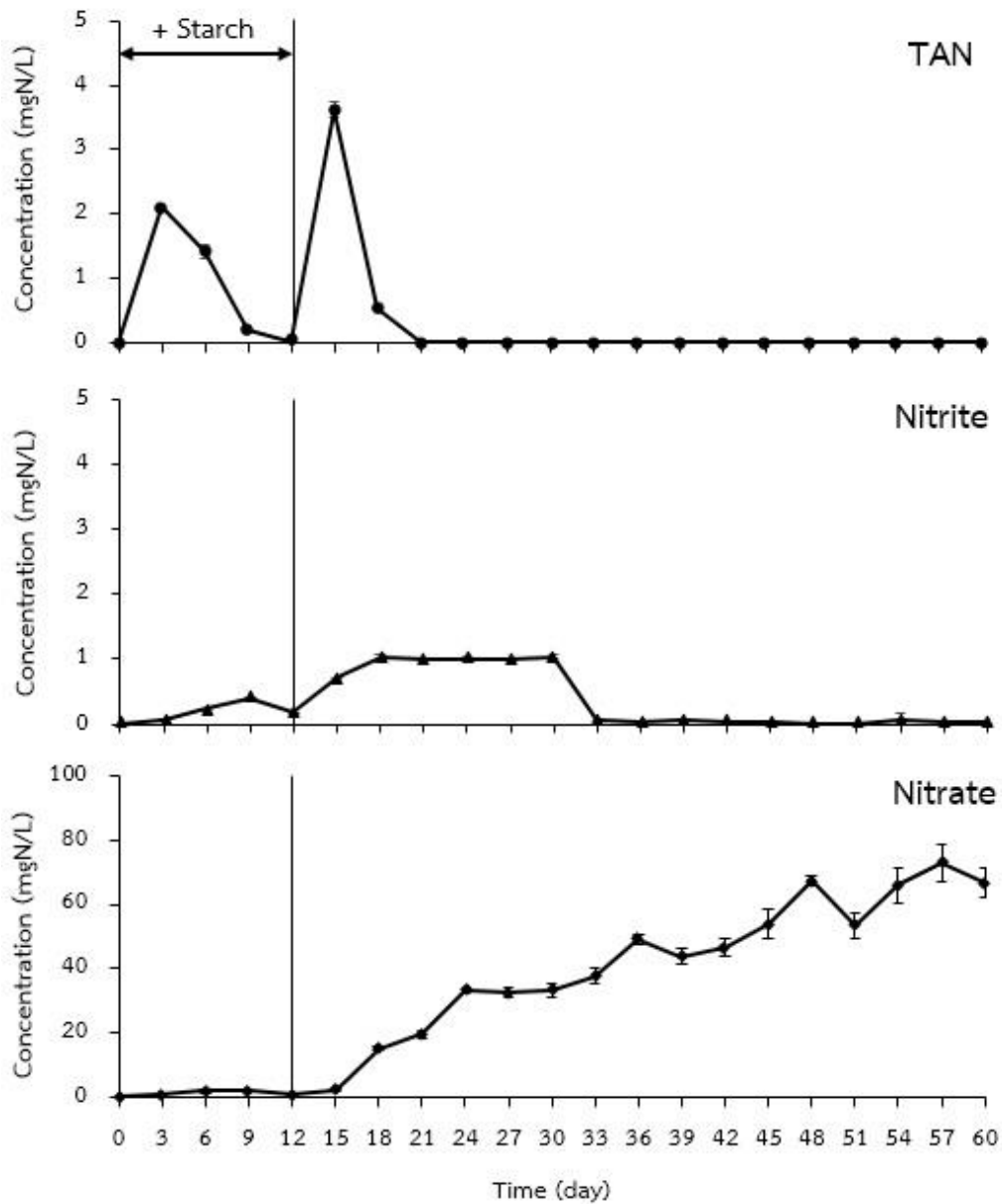
- พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ

จากผลการตรวจวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำในถังเลี้ยงปลานิลตลอดช่วงการทดลอง พบว่าพีเอชมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.27 ± 0.13 (พิสัย 8.13 - 8.74) ปริมาณออกซิเจนละลายมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.34 ± 0.44 มก.-ออกซิเจน/ล. (พิสัย 7.56 - 9.25) และอุณหภูมิมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 26.83 ± 1.99 °ซ (พิสัย 21.4 - 28.8) แสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่าช่วงค่าส่วนใหญ่อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำและการทำงานของตะกอนไบโอฟล็อก (Lawson, 1995)

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำในถังเลี้ยงปลานิลระหว่างการทดลองช่วงที่ 1

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	ค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าต่ำสุด - ค่าสูงสุด
ค่าพีเอช	8.27 ± 0.13	8.13 - 8.74
ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)	8.34 ± 0.44	7.56 - 9.25
อุณหภูมิ (°ซ)	26.83 ± 1.99	21.4 - 28.8

จากการติดตามการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนตลอดเวลาของการทดลองในช่วงที่ 1 ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ระยะ ได้แก่ ช่วงเวลาการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน (ระหว่างวันที่ 1 ถึงวันที่ 12 ของการทดลอง) โดยการเติมแป้งมันสำปะหลังวันละ 1 ครั้ง ด้วยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1 หรือคิดเป็นปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เติมลงในน้ำเท่ากับ 0.06 ก./ล. และช่วงเวลาที่หยุดการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน (ระหว่างวันที่ 13 ถึงวันที่ 60) ผลการทดลองแสดงดังรูปดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ระหว่างการเลี้ยงปลานิลด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกในการทดลองช่วงที่ 1

- ผลการทดลองช่วงที่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน (วันที่ 1 ถึงวันที่ 12)

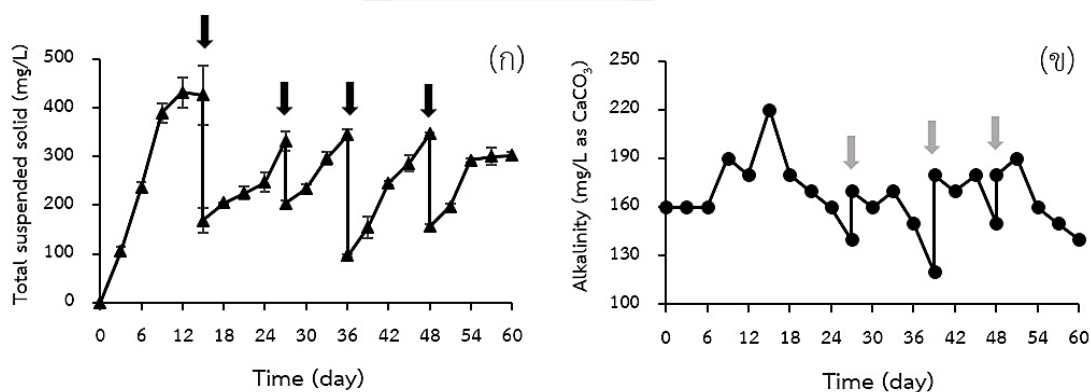
ผลการทดลองในรูปที่ 4.6 พบว่าความเข้มข้นแอมโมเนียมีค่าสูงสุดในวันที่ 3 (2.10 มล.ไนโตรเจน/ล.) และค่อยๆ ลดลงจนมีค่าน้อยกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 9 ซึ่งอยู่ในระดับที่เหมาะสมและไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ ($TAN < 1$ มก./ล. ; Lawson, 1995) และในเวลาเดียวกันนี้ ยังไม่พบการสะสมของไนเตรต ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การเติมสารอินทรีย์คาร์บอน (แป้งมัน

สำปะหลัง) ในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1 จะไปกระตุ้นให้เกิดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟซึ่งจะใช้แอมโมเนียผ่านกระบวนการนำแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ เพื่อนำไปสร้างเป็นเซลล์ของแบคทีเรีย จึงทำให้ปริมาณแอมโมเนียในน้ำลดลง และไม่พบการสะสมของไนเตรตในระบบ (ดังสมการที่ 2.2) อีกทั้งยังพบการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของปริมาณของแข็งแขวนลอย ดังรูปที่ 4.7 (ก) เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟสามารถสร้างเซลล์ได้มากกว่าแบคทีเรียกลุ่มไนโตรไฟอิงถึง 40 เท่า โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้มีค่าผลผลิตเซลล์มากถึง 8.07 ก.ของแข็งแขวนลอยระเหย/ก.ไนโตรเจน ในขณะที่แบคทีเรียกลุ่มไนโตรไฟอิงมีผลผลิตเซลล์เพียง 0.20 ก.ของแข็งแขวนลอยระเหย/ก.ไนโตรเจน (Ebeling และคณะ, 2006) โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งแขวนลอยทำให้ในระบบมีการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งกระบวนการนำแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์จะผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากถึง 9.65 ก.คาร์บอนไดออกไซด์/ก.ไนโตรเจน ในขณะที่กระบวนการไนโตรฟิกชันผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพียง 5.85 ก.คาร์บอนไดออกไซด์/ก.ไนโตรเจน (Ebeling และคณะ, 2006) เมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำจะทำให้ปริมาณไบคาร์บอเนตในน้ำเพิ่มขึ้น รวมถึงกระบวนการนำแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรียเฮเทอโรโทรฟจะใช้แหล่งคาร์บอนจากสารอินทรีย์ ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้เกิดการสะสมของไบคาร์บอเนตและทำให้ค่าสภาพความเป็นด่างในระบบเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.7 (ข) ดังนั้นจึงได้มีการนำของแข็งแขวนลอยส่วนเกินออกจากระบบด้วยการสูบน้ำที่มีตะกอนไปโอฟล็อกเข้าสู่ถังตกตะกอน และหมุนเวียนเฉพาะส่วนน้ำใสกลับเข้าสู่ถังเลี้ยงปลาเพื่อรักษาระดับของแข็งแขวนลอยให้อยู่ในระดับ 300 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. รวมถึงหยุดการเติมแอมโมเนียสำปะหลังในวันที่ 12 เพื่อลดการเพิ่มขึ้นของค่าสภาพความเป็นด่างในระบบ

- ผลการทดลองช่วงที่หยุดการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน (วันที่ 13 ถึงวันที่ 60)

เมื่อหยุดการเติมแอมโมเนียสำปะหลังจะพบว่าการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียในระบบอย่างรวดเร็ว โดยมีค่าสูงสุดในวันที่ 15 (3.60 มล.ไนโตรเจน/ล.) และลดลงจนมีค่าน้อยกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 18 และยังพบการเพิ่มขึ้นของไนไตรต์ในระบบประมาณ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ตั้งแต่วันที่ 15 ถึงวันที่ 30 ของการทดลอง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อหยุดการเติมแอมโมเนียสำปะหลังจะทำให้ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในระบบไม่เพียงพอต่อกระบวนการนำแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ จึงทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียในระบบอย่างรวดเร็ว รวมถึงในช่วงเวลาดังกล่าวกระบวนการไนโตรฟิกชันยังเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดการสะสมของไนไตรต์

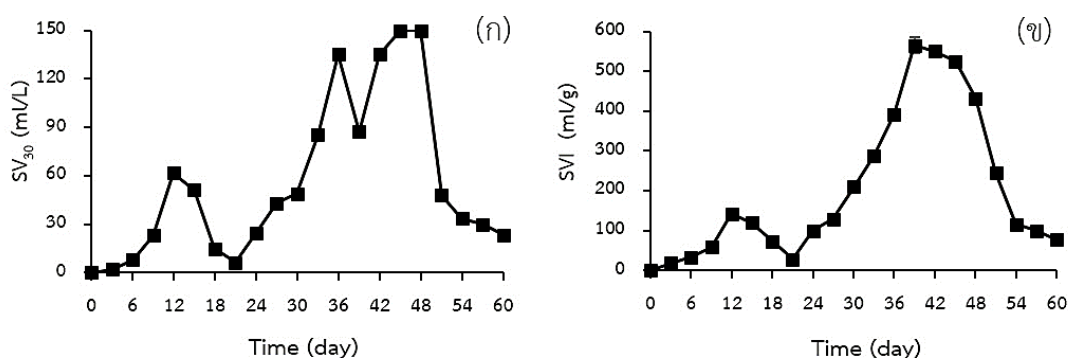
ในระบบ โดย Nootong และคณะ (2011) รายงานว่ากระบวนการไนทริฟิเคชันที่สมบูรณ์จะเกิดขึ้นภายหลังจากสัปดาห์ที่ 6 - 7 ของการเลี้ยงปลา สำหรับการทดลองนี้พบว่าหลังจากวันที่ 33 ไม่พบการสะสมของแอมโมเนียและไนไตรต์ แต่กลับมีการเพิ่มขึ้นของไนเตรตในระบบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าตั้งแต่วันที่ 33 หรือตั้งแต่สัปดาห์ที่ 5 ของการทดลอง สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบถูกบำบัดได้ด้วยกระบวนการไนทริฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ (ดังสมการที่ 2.6) โดยแบคทีเรียกลุ่มไนทริไฟอิงซึ่งเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรต์ (Ammonia Oxidizing Bacteria หรือ AOB) และไนไตรต์เป็นไนเตรต (Nitrite oxidizing bacteria หรือ NOB) อีกทั้งยังพบการลดลงของค่าสภาพความเป็นด่างซึ่งถูกใช้ในรูปแบบของไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) เพื่อเป็นแหล่งของคาร์บอนในกระบวนการไนทริฟิเคชัน โดย Ebeling และคณะ (2006) รายงานว่าแบคทีเรียกลุ่มไนทริไฟอิงมีการใช้ไบคาร์บอเนตถึง 7.05 ก. แคลเซียมคาร์บอเนต/ก.ไนโตรเจน ส่วนแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟใช้เพียง 3.57 ก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ก.ไนโตรเจน ด้วยเหตุผลดังกล่าวภายหลังการหยุดเติมแอมโมเนียจำเป็นต้องทำการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เป็นระยะๆ เพื่อรักษาระดับของสภาพความเป็นด่างให้เหมาะสมต่อการทำงานของไบโอฟลอค (แสดงด้วยลูกศรในรูป 4.7 ข) และทำการแยกของแข็งแขวนลอยส่วนเกินออกจากระบบเป็นระยะๆ เพื่อรักษาระดับของแข็งแขวนลอยให้ต่ำกว่า 300 มก. ของแข็งแขวนลอย/ล. เช่นเดียวกับการทดลองในช่วงแรก



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมด (ก) และค่าความเป็นด่าง (ข) ระหว่างการเลี้ยงปลานิลด้วยเทคโนโลยีไบโอฟลอคในการทดลองส่วนที่ 1 โดย ↓ แสดงการนำตะกอนส่วนเกินออกและจากระบบ และ ↓ แสดงการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต

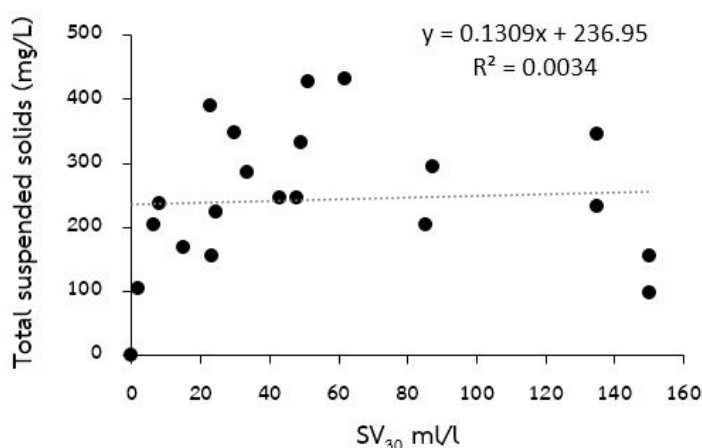
- คุณภาพตะกอนไปโอฟล็อก

จากการตรวจวิเคราะห์ตะกอนไปโอฟล็อกตลอดช่วงการทดลอง พบว่าปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนได้ในเวลา 30 นาที (SV_{30}) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 58.08 ± 49.17 มล./ล (ค่า SV_{30} ของวันที่ 0 ไม่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ) และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 150 มล./ล ในวันที่ 45 และ 48 ของการทดลอง ดังรูปที่ 4.8 (ก) ส่วนค่าดัชนีปริมาณตะกอน (SVI) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 210.28 ± 184.01 มล./ล (ค่า SVI ของวันที่ 0 ไม่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ) และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 565.47 มล./ล. ในวันที่ 39 ของการทดลอง ดังรูปที่ 4.8 (ข) โดย Ebeling และคณะ (2006) รายงานว่าตะกอนไปโอฟล็อกที่มีความเสถียรจะมีค่าดัชนีปริมาณตะกอนประมาณ 200 มล./ล. ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานของปริมาณตะกอนในระบบตะกอนเร่ง หรือแอกติเวตเต็ดสลัดจ์ (Activated sludge) ที่มีค่าเพียง 50 มล./ล. (ธงชัย พรธนะสวัสดิ์ และอุษา วิเศษสุนน, 2535) เนื่องจากการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบไปโอฟล็อกต้องทำให้ตะกอนเกิดการแขวนลอยอยู่ในระบบตลอดเวลา ซึ่ง Ebeling และคณะ (2006) แนะนำเพิ่มเติมว่าในระบบไปโอฟล็อกควรมีค่าดัชนีปริมาณตะกอนที่มากกว่า 200 มล./ล. เพื่อป้องกันการตกตะกอนในระบบ นอกจากนี้จากรายงานของ Krishna และ Van Loosdrecht (1999) พบว่าสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง (30 - 35 °C) จะส่งผลให้เกิดการลอยตัวของตะกอนหรือ bulking sludge ($SVI \geq 500$ มล./ล) โดยการทดลองนี้พบปัญหาการลอยตัวของตะกอนไปโอฟล็อกเล็กน้อยระหว่างวันที่ 39 - 45 ของการทดลอง



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนได้ในเวลา 30 นาที (ก.) และค่าดัชนีปริมาณตะกอน (ข.) ระหว่างการเลี้ยงปลาชนิดด้วยเทคโนโลยีไปโอฟล็อกในการทดลองส่วนที่ 1

เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบกับปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนได้ในเวลา 30 นาที พบว่าในการทดลองนี้พารามิเตอร์ทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์กัน (ดังรูปที่ 4.9) ดังนั้นการใช้ค่าปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนได้ในเวลา 30 นาที ในการประเมินปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบไบโอฟล็อกจะทำให้ได้ผลที่ไม่แน่นอน เนื่องจากค่าปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนได้ในเวลา 30 นาที ดังกล่าวนอกจากจะขึ้นอยู่กับปริมาณตะกอนแล้ว ยังขึ้นอยู่กับลักษณะและความสามารถในการตกตะกอนของตะกอนไบโอฟล็อกในช่วงเวลานั้นๆ ด้วย

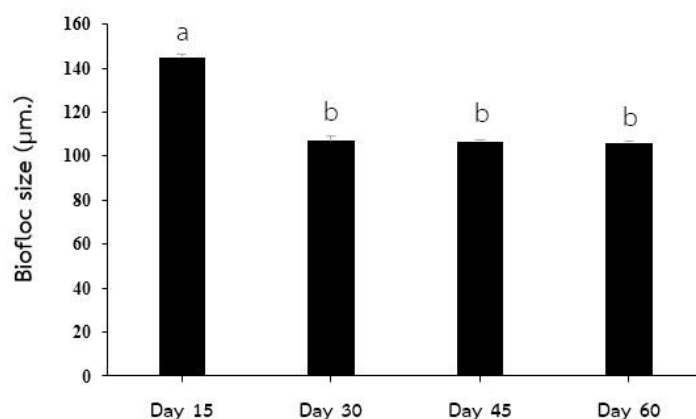


รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบกับปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนได้ในเวลา 30 นาที

เมื่อทำการวิเคราะห์ตะกอนไบโอฟล็อกที่ได้จากการเลี้ยงสัตว์น้ำในการทดลองนี้ด้วยเครื่อง Laser particle size distribution ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าตะกอนไบโอฟล็อกในวันที่ 15, 30, 45 และ 60 มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 145.00 ± 4.36 , 107.00 ± 4.58 , 106.67 ± 4.51 และ 106.00 ± 2.00 ไมครอน ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.10) นั่นคือตะกอนไบโอฟล็อกจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำของการทดลองนี้มีขนาดอยู่ในช่วง 100 - 150 ไมครอน ซึ่งต่ำกว่าขนาดที่รายงานไว้ในงานวิจัยของเศรษฐศักดิ์ ติวะนันท์กร (2556) ที่พบว่าอนุภาคแขวนลอยในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำส่วนใหญ่มีขนาดอยู่ในช่วง 150 - 250 ไมครอน

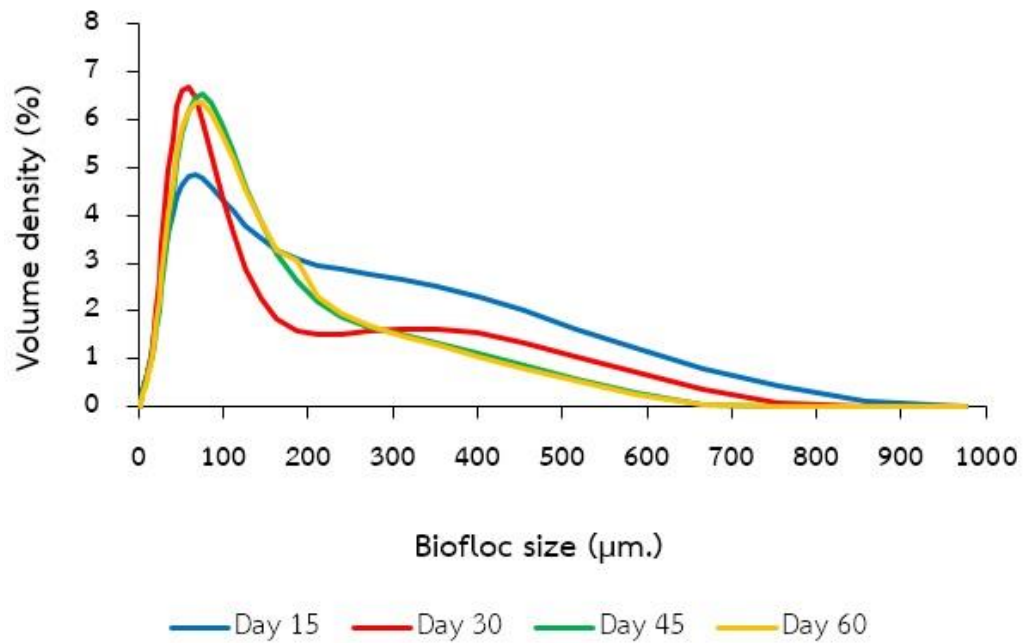
เมื่อนำข้อมูลขนาดตะกอนไบโอฟล็อกมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี One-way analysis of variance (ANOVA) และ Duncan's new multiple range test พบว่าขนาดของตะกอนไบโอฟล็อกในวันที่ 15 (145.00 ± 4.36 ไมครอน) มีขนาดเฉลี่ยใหญ่กว่าขนาดของตะกอนไบโอฟล็อกในวันที่

30, 45 และ 60 (106.56 ± 0.51 ไมครอน) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) และเมื่อพิจารณาจากกราฟการกระจายตัวของขนาดตะกอนไบโอฟล็อก (ดังรูปที่ 4.11) พบว่าในวันที่ 15 ตะกอนไบโอฟล็อกที่มีขนาดเล็กจะมีปริมาณน้อยกว่าในวันที่ 30, 45 และ 60 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าวันที่ 15 ของการทดลองตะกอนส่วนใหญ่ในระบบเป็นตะกอนที่เกิดจากการเติมแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งจะมีการจับและรวมตัวกันเป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่าตะกอนที่พบในช่วงที่ไม่มีการเติมแป้งมันสำปะหลัง โดยตะกอนไบโอฟล็อกมีขนาดเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 116.17 ± 19.20 ไมครอน ทั้งนี้ค่านี้จะถูกนำไปใช้ในการกำหนดขนาดของช่องตะแกรงสำหรับการทดลองช่วงต่อไป และเมื่อนำตะกอนไบโอฟล็อกมาส่องตรวจภายใต้กล้องจุลทรรศน์ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า พบว่าตะกอนดังกล่าวมีลักษณะเป็นตะกอนอินทรีย์ที่เกาะกันอยู่อย่างหลวมๆ รวมถึงตรวจพบสิ่งมีชีวิตจำพวกโปรโตซัวอาศัยอยู่ในตะกอนเหล่านั้นด้วย ดังรูปที่ 4.12

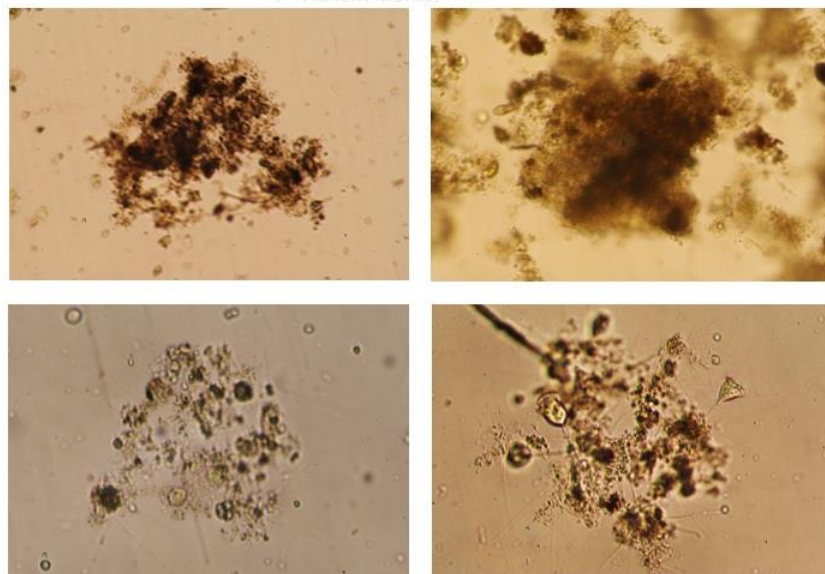


รูปที่ 4.10 ขนาดของตะกอนไบโอฟล็อกในแต่ละช่วงเวลาของการทดลองส่วนที่ 1 (ภาคผนวก จ.6)

โดย a และ b แสดงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อ $p < 0.05$



รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของขนาดตะกอนไบโอฟล็อกในแต่ละช่วงเวลาของการทดลองส่วนที่ 1



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างลักษณะตะกอนไบโอฟล็อกเมื่อส่องตรวจภายใต้กล้องจุลทรรศน์
ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า

4.2 ประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่บรรจุในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกในการแยกของแข็งแขวนลอยออกจากหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำ

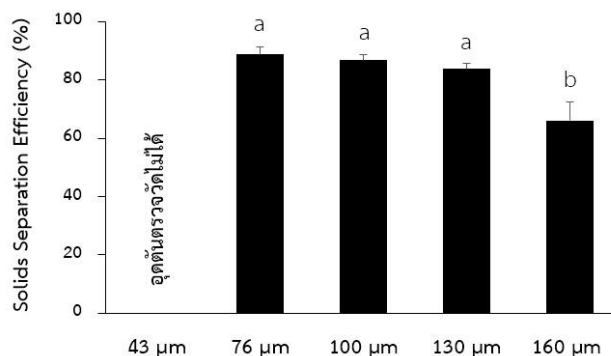
การทดลองนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกอนุภาคแขวนลอยของหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่บรรจุอยู่ในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อก โดยทำการทดสอบขนาดช่องกรองของแผ่นกรองสแตนเลส และอัตราการไหลที่เหมาะสมในการเดินระบบ โดยผลการทดลองมีดังนี้

4.2.1 ขนาดช่องของแผ่นกรองสแตนเลสในการแยกตะกอนไบโอฟล็อกจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

จากการประเมินประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่บรรจุอยู่ในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อก โดยติดตั้งแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องกรองต่างกัน 5 ระดับ ได้แก่ 43, 76, 100, 130 และ 160 ไมครอน ในการทดลองนี้กำหนดขนาดของช่องตะแกรงจากขนาดเฉลี่ยของตะกอนไบโอฟล็อกจากการทดลองช่วงที่ 1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 116.17 ± 19.20 ไมครอน โดยเลือกขนาดของช่องตะแกรงที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยดังกล่าว คือช่องตะแกรงขนาด 100 ไมครอน จากนั้นทดลองแปรค่าขนาดของตะแกรงเพื่อให้ได้ขนาดของช่องตะแกรงที่เหมาะสมในการแยกตะกอนไบโอฟล็อกต่อไป

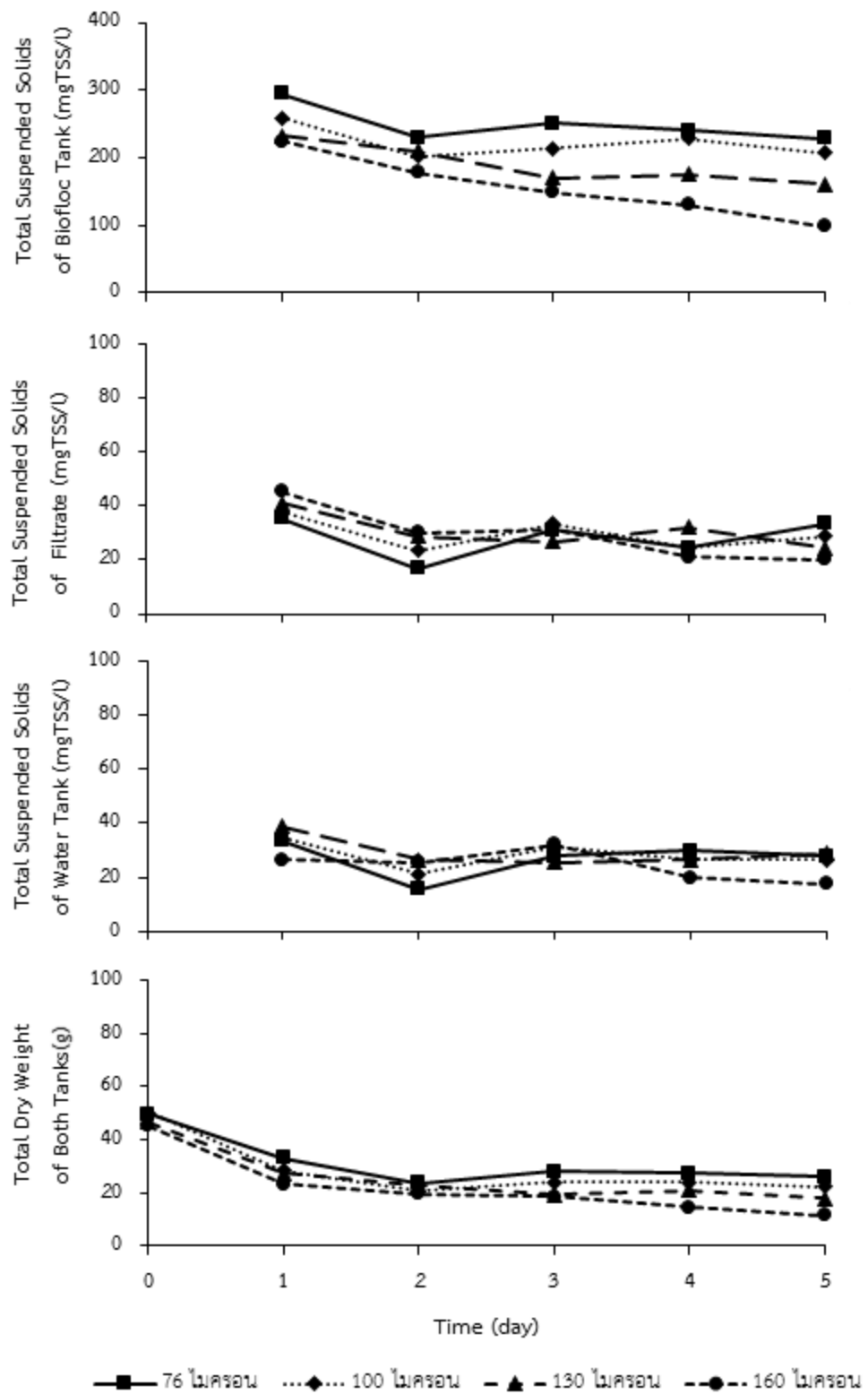
เริ่มเดินระบบโดยการสูบน้ำจากถังพักน้ำที่บรรจุน้ำประปาที่มีปริมาตรเริ่มต้น 200 ล. ด้วยอัตราการไหลคงที่ 3,000 ล./วัน (ร้อยละ 1,000 ของปริมาตรถัง/วัน) เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกที่บรรจุน้ำที่มีตะกอนไบโอฟล็อกปริมาตรเริ่มต้น 100 ล. และมีความเข้มข้นของตะกอนไบโอฟล็อกประมาณ 500 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. โดยทำการทดลองเป็นเวลา 5 วัน พบว่าเมื่อเดินระบบครบหนึ่งวันหน่วยแยกตะกอนที่ติดตั้งแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องกรอง 43 ไมครอน ไม่สามารถเดินระบบต่อไปได้ เนื่องจากเกิดการอุดตันบนพื้นที่ทั้งหมดของแผ่นกรองสแตนเลสภายในเวลา 1 ชม. จึงทำให้น้ำที่มีตะกอนไบโอฟล็อกไหลล้นออกจากทางด้านบนของหน่วยแยกตะกอนและไหลลงสู่ถังพักน้ำโดยไม่ผ่านการกรอง ดังนั้นหน่วยแยกตะกอนที่ติดตั้งแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องกรอง 43 ไมครอนจึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้งานในการทดลองนี้ สำหรับหน่วยแยกตะกอนที่ติดตั้งแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องกรองใหญ่ขึ้นเท่ากับ 76, 100, 130 และ 160 ไมครอน พบว่ามีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนแขวนลอยเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 5 วัน เท่ากับร้อยละ 88.71 ± 2.75 , 86.73 ± 2.08 , 83.86 ± 1.86 และ 66.01 ± 6.41 ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.13) เมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพในการแยกตะกอนแขวนลอยของหน่วยแยกตะกอนมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี One-way analysis of variance (ANOVA) และ Duncan's new multiple range test พบว่าหน่วยแยกตะกอนที่ติดตั้ง

กรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องกรอง 160 ไมครอน มีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนแขวนลอยต่ำกว่าหน่วยแยกตะกอนที่ติดตั้งกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องกรองอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการแยกตะกอนแขวนลอยเมื่อแปรค่าขนาดช่องกรองแตกต่างกัน โดย a และ b แสดงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อ $p < 0.05$

ทั้งนี้ตลอดระยะเวลา 5 วันของการทดลองยังพบว่า ปริมาณน้ำหนักแห้งของตะกอนไบโอฟล็อกทั้งระบบระหว่างการทดลอง (วันที่ 1 - 5) มีแนวโน้มลดลงจากปริมาณน้ำหนักแห้งของตะกอนไบโอฟล็อกเริ่มต้น (วันที่ 0) ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งอาจเกิดจากการย่อยสลายของตะกอนในระบบ และพบว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อก โดยน้ำในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกเริ่มต้นจะมีปริมาตร 100 ล. แต่เมื่อเดินระบบต่อเนื่องปริมาณน้ำในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกที่ภายในบรรจุหน่วยแยกตะกอนที่ติดตั้งกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องกรอง 76, 100, 130 และ 160 จะลดลงจาก 100 มล. คงเหลือเท่ากับ 88, 80, 79 และ 78 ล. ตามลำดับ เนื่องจากว่าในระบบการทดลองส่วนนี้ไม่มีการติดตั้งลูกลอยที่จะช่วยในการควบคุมระดับน้ำ จึงทำให้น้ำบางส่วนที่ถูกกรองผ่านตะแกรงไหลลงไปรวมอยู่กับน้ำในถังพักน้ำ และเมื่อระบบเข้าสู่จุดสมดุลจะทำให้น้ำในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกมีปริมาตรน้ำคงที่ค่าหนึ่งดังที่กล่าวข้างต้น โดยค่าอัตราการไหลคงที่เท่ากับ 3,000 ล./วัน จะทำให้ช่องกรองขนาดเล็ก (76 ไมครอน) ต้องการพื้นที่ในการไหลของน้ำลงสู่ถังพักน้ำที่มากกว่าเมื่อเทียบกับช่องกรองขนาดใหญ่กว่า (160 ไมครอน) จึงทำให้น้ำในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกมีระดับที่ต่างกัน ดังนั้นขนาดช่องกรองของแผ่นกรองสแตนเลสที่นำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในการทดลองนี้คือ 76, 100 และ 130 ไมครอน แต่สำหรับการทดลองช่วงต่อไปจะเลือกใช้ช่องกรองขนาด 100 ไมครอน เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของขนาดตะกอนไบโอฟล็อกในระบบ และมีแนวโน้มที่จะเกิดการอุดตันช้ากว่าช่องกรองขนาด 76 ไมครอน โดยตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากการศึกษาในส่วนนี้



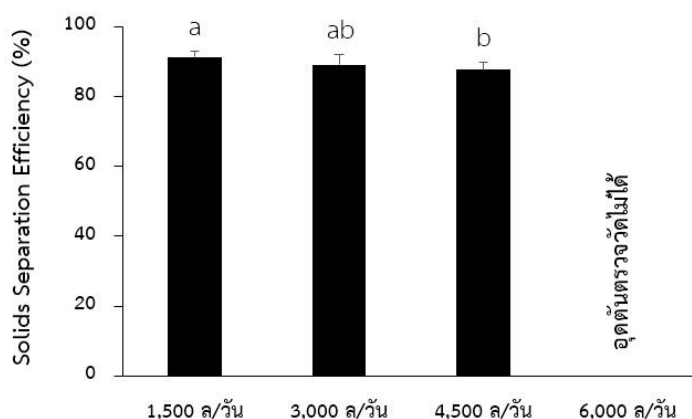
รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอยระหว่างการเดินระบบเมื่อแปรค่าขนาดช่องกรองแตกต่างกัน (อัตราการไหลคงที่ 3,000 ล./วัน)

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการศึกษาขนาดช่องกรองที่แตกต่างกัน
(โดยขนาดช่องกรอง 43 ไมครอน ไม่สามารถเก็บข้อมูลระหว่างการทดลองได้)

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด - ค่าสูงสุด)			
	ขนาดรูของแผ่นตะแกรงสแตนเลส			
	76 ไมครอน	100 ไมครอน	130 ไมครอน	160 ไมครอน
ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มก.ของแข็งแขวนลอย/ล.)				
- ถังปฏิกรณ์ไบโอฟล๊อค	248.97 \pm 27.09 (228.56 - 294.67)	222.13 \pm 22.73 (202.11 - 258.78)	189.64 \pm 30.21 (160.56 - 232.33)	156.02 \pm 48.06 (98.22 - 224.78)
- น้ำที่ผ่านการกรอง	28.2 \pm 7.68 (16.67 - 35.56)	29.56 \pm 6.07 (23.33 - 37.78)	30.67 \pm 6.51 (24.44 - 41.11)	29.56 \pm 10.26 (20.00 - 45.56)
- ถังพักน้ำ	26.89 \pm 6.73 (15.56 - 33.33)	28.00 \pm 5.06 (21.11 - 34.44)	29.33 \pm 5.48 (25.56 - 38.89)	24.44 \pm 5.72 (17.77 - 32.22)
ปริมาตรน้ำ (ล.)				
- ถังพักน้ำ	212	220	221	222
- ถังปฏิกรณ์ไบโอฟล๊อค	88	80	79	78
ประสิทธิภาพการแยก ตะกอน (%)	88.71 \pm 2.75 (85.42 - 92.77)	86.73 \pm 2.08 (84.38 - 89.31)	83.86 \pm 1.86 (82.31 - 86.22)	66.01 \pm 6.41 (56.38 - 71.28)
ปริมาณน้ำหนักแห้งของ ตะกอนทั้งระบบ (ก.)				
- วันที่ 0	49.68	50.43	46.47	45.33
- วันที่ 1	33.00	28.28	27.44	23.45
- วันที่ 2	23.58	20.81	22.95	19.52
- วันที่ 3	28.00	23.92	19.32	18.79
- วันที่ 4	27.47	24.15	21.00	14.61
- วันที่ 5	26.00	22.49	18.09	11.61

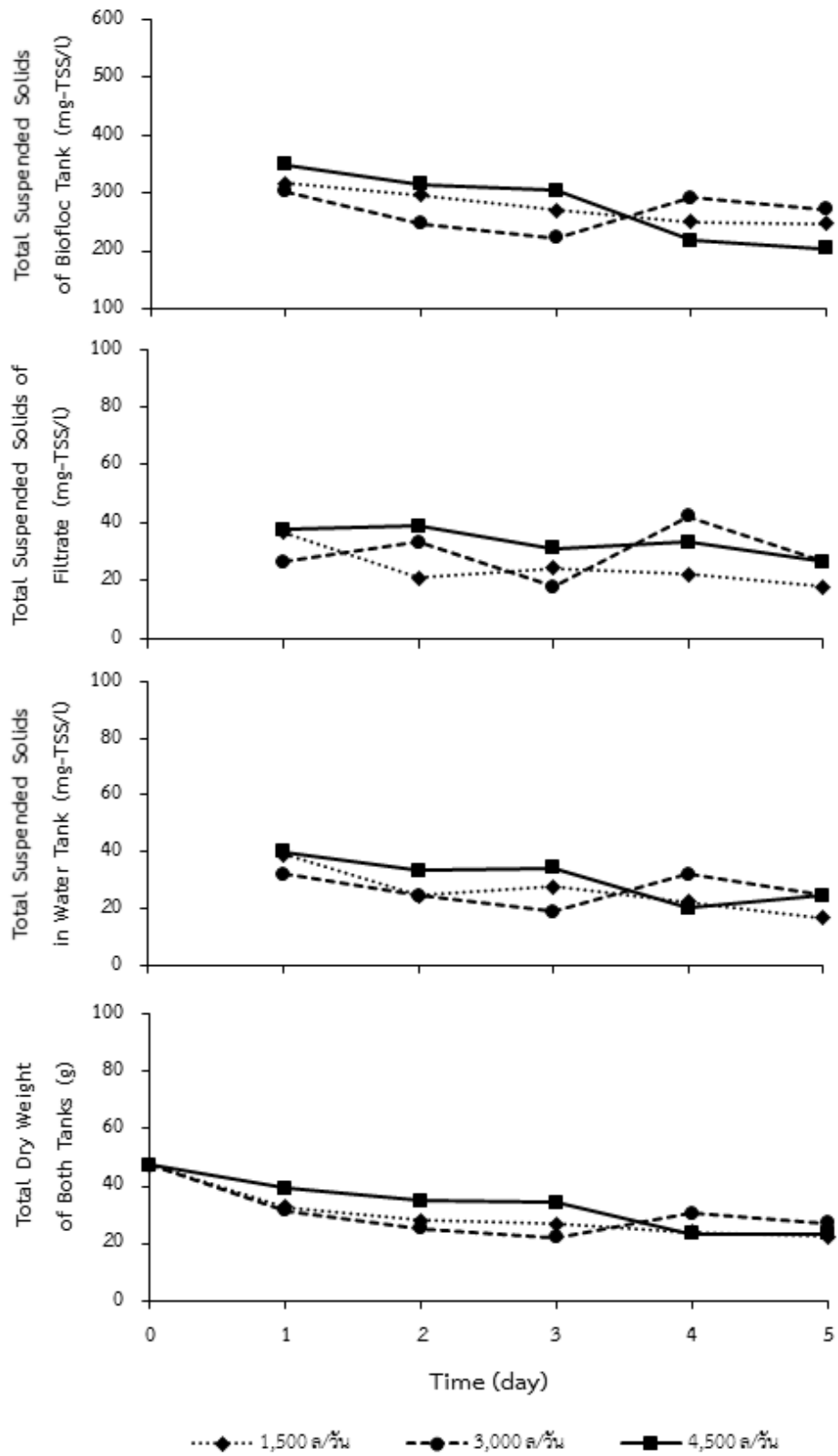
4.2.2 อัตราการไหลของน้ำเข้าหน่วยกรองตะกอนด้วยขนาดรูของแผ่นกรองที่เหมาะสม

จากการประเมินประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่บรรจุอยู่ในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อก โดยติดตั้งแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องกรอง 100 ไมครอน และแปรค่าอัตราการไหลเข้าระบบแตกต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ 1,500 3,000 4,500 และ 6,000 ล./วัน ซึ่งเทียบเท่ากับร้อยละ 500 1,000 1,500 และ 2,000 ของปริมาณถังต่อวัน เริ่มเดินระบบโดยการสูบน้ำจากถังพักน้ำที่บรรจุน้ำประปาปริมาณเริ่มต้น 200 ล. เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อก ที่บรรจุน้ำที่มีตะกอนไบโอฟล็อกปริมาณเริ่มต้น 100 ล. และมีความเข้มข้นของตะกอนไบโอฟล็อกประมาณ 500 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. โดยทำการทดลองต่อเนื่องเป็นเวลา 5 วัน พบว่าภายในเวลา 1 ชม. ที่ค่าอัตราการไหล 6,000 ล./วัน น้ำในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกเกิดการไหลล้นออกจากทางด้านบนของหน่วยแยกตะกอนลงสู่ถังพักน้ำโดยไม่ผ่านการกรอง ซึ่งเกิดจากตะกอนสแตนเลสมีพื้นที่ไม่เพียงพอที่จะระบายน้ำที่อัตราการไหล 6,000 ล./วัน ที่เข้ามายังถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกได้ทัน ดังนั้นการเดินระบบด้วยอัตราการไหลดังกล่าวจึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้งานในการทดลองนี้ เมื่อทำการเดินระบบด้วยอัตราการไหลที่ต่ำลงเท่ากับ 1,500 3,000 และ 4,500 ล./วัน พบว่ามีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนแขวนลอยเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 5 วัน เท่ากับร้อยละ 91.25 ± 1.81 , 89.11 ± 2.89 และ 87.66 ± 2.01 ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.15) เมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพในการแยกตะกอนแขวนลอยของหน่วยแยกตะกอนมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี One-way analysis of variance (ANOVA) และ Duncan's new multiple range test พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างอัตราการไหล 1,500 กับ 3,000 ล./วัน และอัตราการไหล 3,000 กับ 4,500 ล./วัน ทั้งสองกรณีมีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนแขวนลอยที่ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอัตราการไหล 1,500 กับ 4,500 ล./วัน พบว่าอัตราการไหล 1,500 ล./วัน มีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนแขวนลอยสูงกว่าอัตราการไหล 4,500 ล./วัน อย่างมีนัยสำคัญ โดยอัตราการไหลต่อพื้นที่การกรองที่ระบบนี้สามารถรองรับได้มีค่าประมาณ 14 - 15 ล./ตร.ซม./วัน (เมื่อคำนวณจากอัตราการไหลที่ 5,000 - 5,400 ล./วัน และน้ำไหลเต็มพื้นที่กรองเท่ากับ 360 ตร.ซม.)



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพในการแยกตะกอนแขวนลอยเมื่อแปรค่าอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน โดย a และ b แสดงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อ $p < 0.05$ (ขนาดช่องกรองคองที่ 100 ไมครอน)

ทั้งนี้ตลอดระยะเวลา 5 วันของการทดลองยังพบว่าปริมาณน้ำหนักแห้งของตะกอนไบโอฟล็อกทั้งระบบระหว่างการทดลอง (วันที่ 1 - 5) มีแนวโน้มลดลงจากปริมาณน้ำหนักแห้งของตะกอนไบโอฟล็อกเริ่มต้น (วันที่ 0) ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งอาจเกิดจากการย่อยสลายของตะกอนในระบบ นอกจากนี้พบว่าปริมาณน้ำในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกมีการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2.1 โดยน้ำในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกหลังจากเดินระบบด้วยอัตราการไหล 1,500 3,000 และ 4,500 ล./วัน จะมีปริมาณลดลงจาก 100 มล. คงเหลือเท่ากับ 76, 80 และ 88 ล. ตามลำดับ ดังนั้นค่าอัตราการไหลของระบบที่สามารถนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการทดลองนี้คือ 1,500 และ 3,000 ล./วัน แต่เนื่องจากในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียนที่มีการแยกหน่วยบำบัดทางชีวภาพออกจากหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำจำเป็นต้องควบคุมให้มีอัตราการหมุนเวียนของน้ำในระบบที่สูง เนื่องจากสัตว์น้ำไม่ได้ปล่อยของเสียออกมาภายในครั้งเดียว รวมถึงตามปกติการเลี้ยงสัตว์น้ำจะแบ่งการให้อาหารออกเป็นวันละ 2 - 3 ครั้ง จึงทำให้ของเสียในระบบเกิดขึ้นตลอดเวลา ดังนั้นอัตราการหมุนเวียนของน้ำในระบบที่มีค่าสูงจะทำให้ของเสียถูกนำไปบำบัดในหน่วยบำบัดทางชีวภาพได้อย่างต่อเนื่อง ในการทดลองนี้จึงเลือกใช้อัตราการไหลที่ 3,000 ล./วัน (เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในงานวิจัยนี้เท่านั้น) โดยอัตราการไหลนี้จะทำให้น้ำไหลเวียนในระบบคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 1,000 ของปริมาณถังต่อวัน ซึ่งมีค่ามากกว่าเป็น 2 เท่า เมื่อเทียบกับอัตราการไหล 1,500 ล./วัน ที่คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 500 ของปริมาณถังต่อวัน โดยตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการศึกษาอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอยระหว่างการเดินระบบเมื่อแปรค่าอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการศึกษาอัตราการไหลที่ต่างกัน
(โดยอัตราการไหล 6,000 ล./วัน ไม่สามารถเก็บข้อมูลระหว่างการทดลองได้)

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด - ค่าสูงสุด)		
	อัตราการไหลของระบบ		
	1,500 ล./วัน	3,000 ล./วัน	4,500 ล./วัน
ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มก.ของแข็งแขวนลอย/ล.)			
- ถังปฏิกรณ์ไบโอฟลอค	276.44 \pm 29.93 (246.67 – 316.67)	267.78 \pm 32.62 (223.33 – 303.33)	278.44 \pm 63.89 (204.44 – 350.00)
- น้ำที่ผ่านการกรอง	24.44 \pm 7.24 (17.78 – 36.67)	29.33 \pm 9.08 (17.78 – 42.22)	33.56 \pm 4.99 (26.67 – 38.89)
- ถังพักน้ำ	26.00 \pm 8.26 (16.67 – 38.89)	26.44 \pm 5.74 (18.89 – 32.22)	30.44 \pm 8.07 (20.00 – 34.44)
ปริมาตรน้ำ (ล.)			
- ถังพักน้ำ	224	220	212
- ถังปฏิกรณ์ไบโอฟลอค	76	80	88
ประสิทธิภาพการแยกตะกอน (%)	91.25 \pm 1.81 (88.42 – 92.88)	89.11 \pm 2.89 (85.55 – 91.21)	87.66 \pm 2.01 (84.69 – 89.78)
ปริมาณน้ำหนักแห้งของตะกอน ทั้งระบบ (ก.)			
- วันที่ 0	47.22	47.22	47.22
- วันที่ 1	32.78	31.36	39.28
- วันที่ 2	28.02	25.20	34.84
- วันที่ 3	26.83	22.02	34.09
- วันที่ 4	24.06	30.47	23.40
- วันที่ 5	22.48	27.16	23.17

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกตะกอนของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ ดังตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าหน่วยแยกตะกอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับงานวิจัยของเศรษฐศักดิ์ ติวะนนทกร (2556) ซึ่งเป็นหน่วยแยกตะกอนที่ใช้หลักการกรองและวัสดุกรองที่มีขนาดช่องกรอง 100 ไมครอน เช่นเดียวกัน แต่มีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนสูงกว่างานวิจัยของ

Ali (2013) อย่งเห็นได้ชัด เนื่องจากการอุดตันบนวัสดุกรองแบบ Microscreen จะทำให้ช่องกรองมีขนาดเล็กลงและมีประสิทธิภาพการแยกตะกอนสูงขึ้น โดยงานวิจัยของ Ali (2013) เป็นระบบแบบ Drum filter ซึ่งมีการใช้ระบบน้ำแรงดันสูงฉีดล้างวัสดุกรองอยู่ตลอดเวลา ทำให้วัสดุกรองไม่เกิดการอุดตัน จึงมีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนต่ำกว่างานวิจัยนี้ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของธนากร อ้อมุกดากุล (2555) พบว่างานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนต่ำกว่าเล็กน้อย เนื่องจากการกรองโดยใช้ระบบถังกรองทรายแบบ Depth filtration ซึ่งทำให้เกิดการสะสมของชั้นตะกอนที่ผิวหน้าของถังตกตะกอน โดยชั้นของตะกอนดังกล่าวจะมีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกตะกอนได้อีกทางหนึ่ง

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกตะกอนแขวนลอยของหน่วยแยกตะกอนของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ

งานวิจัย	กระบวนการในการแยกตะกอน	รูปแบบการกรองและวัสดุกรองที่ใช้	ประสิทธิภาพการแยกตะกอน (ร้อยละ)
Ali (2013)	Microscreen filtration	Drum filter ที่ติดตั้งโลหะถักขนาดช่องกรอง 100 ไมครอน	52.41±16.77
ธนากร อ้อมุกดากุล (2555)	Depth filtration	ถังกรองแบบชั้นกรอง 2 ชั้น ที่บรรจุถ่านแอนทราไซด์ขนาด 2 มม. หนา 15 ซม. และทรายกรองขนาด 0.5 มม. หนา 55 ซม.	93
เศรษฐศักดิ์ ติวะนันทกร (2556)	Microscreen Filtration	หน่วยแยกตะกอนแบบวางเอียงที่ติดตั้งแผ่นกรองไนลอน ขนาดช่องกรอง 100 ไมครอน	72.82
งานวิจัยนี้	Microscreen filtration	หน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่ติดตั้งแผ่นกรองสแตนเลส ขนาดช่องกรอง 100 ไมครอน	86.73±2.08

4.2.3 ลักษณะของการอุดตันบนแผ่นตะแกรง

จากการประเมินประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่บรรจุอยู่ในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกภายหลังการเดินระบบ พบว่าตะแกรงสแตนเลสเกิดการอุดตันโดยจะเกิดขึ้นใน

2 ลักษณะคือ การอุดตันภายในช่องกรองของตะแกรงจากอนุภาคที่มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดช่องกรอง ทำให้อนุภาคนั้นไม่สามารถผ่านทะลุช่องกรองได้และติดค้างอยู่ระหว่างช่องตะแกรง โดยพบการอุดตันที่บริเวณผิวหน้าด้านในของตะแกรง มีลักษณะเป็นเมือกปนกับตะกอนและเกาะติดที่ผิวหน้าของตะแกรงเป็นบริเวณกว้าง ซึ่งเกิดจากสารเมือกที่จุลินทรีย์ในตะกอนสร้างขึ้นและปล่อยออกมาออกเซลล์เพื่อยึดเกาะที่ผิวของวัตถุ (ดังรูปที่ 4.17) โดยลักษณะดังกล่าวไม่พบที่บริเวณผิวหน้าด้านนอกของตะแกรง (ดังรูปที่ 4.18) เนื่องจากภายในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกจะมีการเติมอากาศตลอดเวลา ซึ่งทำให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำภายในถัง และทำให้เกิดแรงเฉือน (Shear force) ของน้ำ ซึ่งจะคอยชะตะกอนไม่ให้เกิดการอุดตันบนผิวของตะแกรงด้านนอก ดังนั้นข้อเสนอแนะการนำหน่วยแยกตะกอนไปประยุกต์ใช้จริงจึงควรมีการทำความสะอาดแผ่นตะแกรงสแตนเลสทุกวัน เพื่อช่วยลดการอุดตันและยืดอายุทำให้ตะแกรงใช้งานได้ยาวนานขึ้น



รูปที่ 4.17 รูปถ่ายแสดงพื้นผิวด้านในของตะแกรงสแตนเลสภายหลังจากการใช้งาน



รูปที่ 4.18 รูปถ่ายแสดงพื้นผิวด้านนอกของตะแกรงสแตนเลสภายหลังจากการใช้งาน

4.3 การประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกแบบแยกส่วนกับการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดขนาดเล็ก

การทดลองนี้เป็นการศึกษาบทบาทของตะกอนชีวภาพในการช่วยควบคุมคุณภาพน้ำและสารอินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจำลองขนาดเล็ก เมื่อทำการเลี้ยงปลานิลที่ระดับความหนาแน่นเริ่มต้น 3 กก./ลบ.ม. เป็นระยะเวลา 70 วัน ด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกในสถานะที่ควบคุมความเข้มข้นของตะกอนไบโอฟล็อก ซึ่งผลจากการคำนวณพบว่าปริมาณตะกอนไบโอฟล็อกที่มีประสิทธิภาพสำหรับการบำบัดของเสียที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นของการเลี้ยงปลานิลในการทดลองนี้คือ 200 - 500 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. ดังนั้นจึงเลือกคงปริมาณตะกอนไบโอฟล็อกภายในบ่อให้อยู่ในระดับดังกล่าว เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบกับปลานิล และเพียงพอที่จะรองรับของเสียที่จะมีปริมาณมากขึ้นเนื่องจากการปรับปริมาณอาหารที่ให้เมื่อปลานิลโตขึ้น โดยทำการทดลองเปรียบเทียบกันระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการแยกตะกอนไบโอฟล็อกออกจากหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำ กับชุดทดลองที่มีการติดตั้งถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกที่ภายในบรรจุหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองเพื่อแยกออกจากหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยจะเลือกใช้หน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่ติดแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องกรอง 100 ไมครอน และทำการเดินระบบด้วยอัตราการไหล 3,000 ล./วัน ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 1,000 ของปริมาตรถังต่อวัน (เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในงานวิจัยนี้เท่านั้น) ทั้งนี้ระหว่างการทดลองจะใช้แปรงขัดทำความสะอาดแผ่นตะแกรงสแตนเลสทุกวันเพื่อลดการอุดตัน โดยผลการทดลองมีดังนี้

4.3.1 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนไบโอฟล็อก

- พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ

จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำตลอดช่วงการทดลองพบว่า ในชุดควบคุมพีเอชมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.78 ± 0.19 (พิสัย 7.41 - 8.22) ปริมาณออกซิเจนละลายมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.98 ± 0.64 มก.-ออกซิเจน/ล. (พิสัย 6.05 - 8.08) และอุณหภูมิมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 26.47 ± 0.61 °ซ (พิสัย 26.5 - 28.7) ส่วนในชุดทดลองพีเอชมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.76 ± 0.18 (พิสัย 7.46 - 8.22) ปริมาณออกซิเจนละลายมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.02 ± 0.54 มก.-ออกซิเจน/ล. (พิสัย 6.20 - 7.90) และอุณหภูมิมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 27.46 ± 0.64 °ซ (พิสัย 26.5 - 28.6) แสดงดังตารางที่ 4.6 ซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆ

ดังกล่าวอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำและการทำงานของตะกอนไบโอฟล็อก (Lawson, 1995)

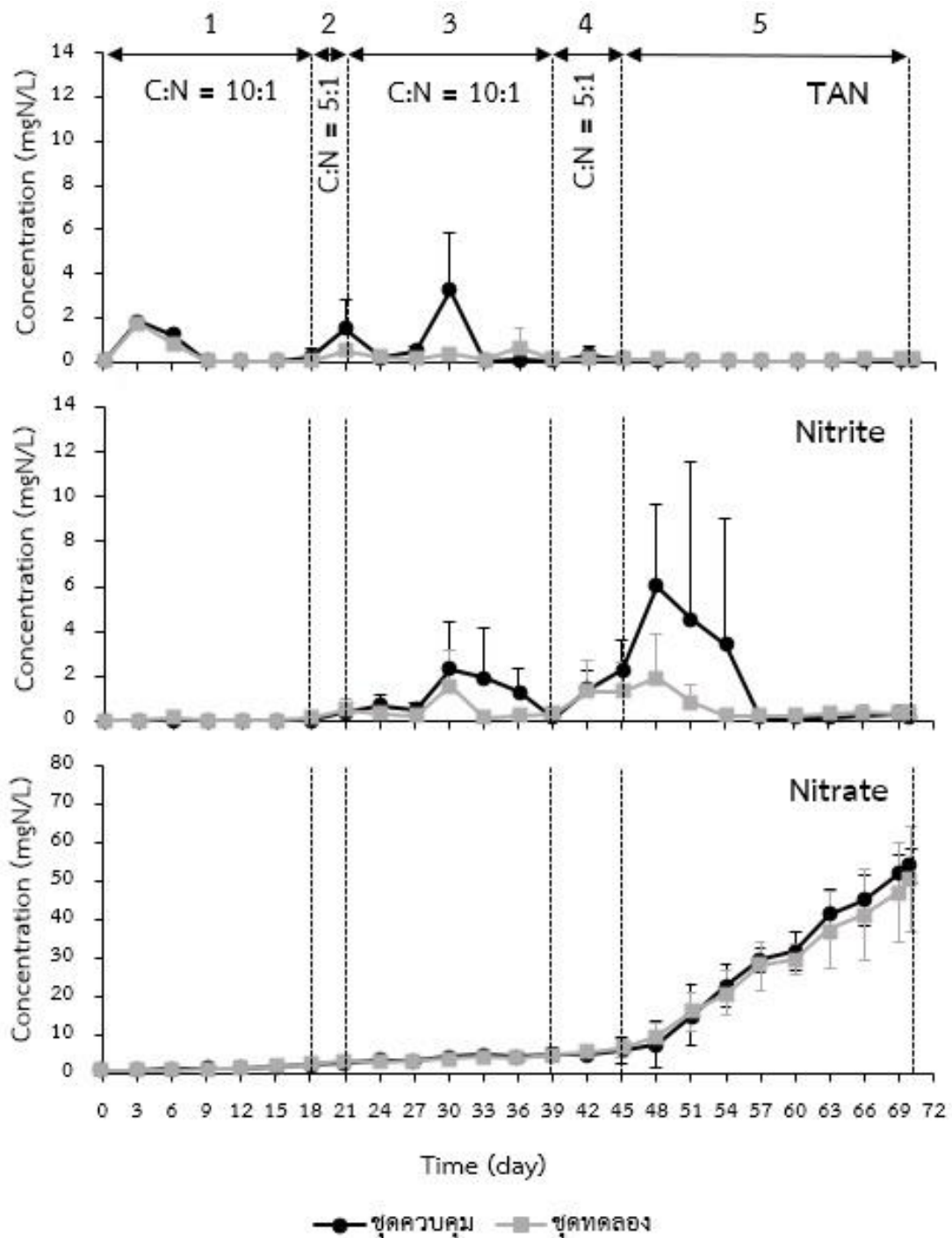
ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพของน้ำในถังเลี้ยงปลาในระหว่างการทดลองครั้งที่ 3

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	ค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด - ค่าสูงสุด)	
	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
ค่าพีเอช	7.78 \pm 0.19 (7.41 - 8.22)	7.76 \pm 0.18 (7.46 - 8.22)
ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)	6.98 \pm 0.64 (6.05 - 8.08)	7.02 \pm 0.54 (6.20 - 7.90)
อุณหภูมิ ($^{\circ}$ ซ)	27.45 \pm 0.61 (26.5 - 28.7)	27.46 \pm 0.64 (26.5 - 28.6)

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนระหว่างการเลี้ยงปลานิลด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกในการทดลองครั้งที่ 3 (ดังรูปที่ 4.19) สามารถแบ่งออกเป็น 5 ระยะ ตามปริมาณการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน (แป้งมันสำปะหลัง) ในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่แตกต่างกัน (ดังรูปที่ 4.20) ซึ่งสามารถอธิบายผลการทดลองที่เกิดขึ้นในแต่ละระยะได้ดังนี้

ช่วงที่ 1 เติมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน C:N = 10:1 (วันที่ 0 ถึงวันที่ 17)

ความเข้มข้นของแอมโมเนียมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของทั้งชุดควบคุมและชุดทดลอง โดยมีค่าสูงสุดในวันที่ 3 ของการทดลอง จากนั้นความเข้มข้นของแอมโมเนียจะลดลงจนมีค่าน้อยกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. และภายหลังวันที่ 9 จะไม่พบการสะสมของไนไตรต์และไนเตรต ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเติมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1 ในช่วงนี้จะไปกระตุ้นให้เกิดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ ซึ่งจะใช้อมโมเนียผ่านกระบวนการนำแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์เป็นหลัก จึงทำให้ปริมาณแอมโมเนียในน้ำลดลง และไม่พบการสะสมของไนเตรตในระบบ (ดังสมการที่ 2.6)



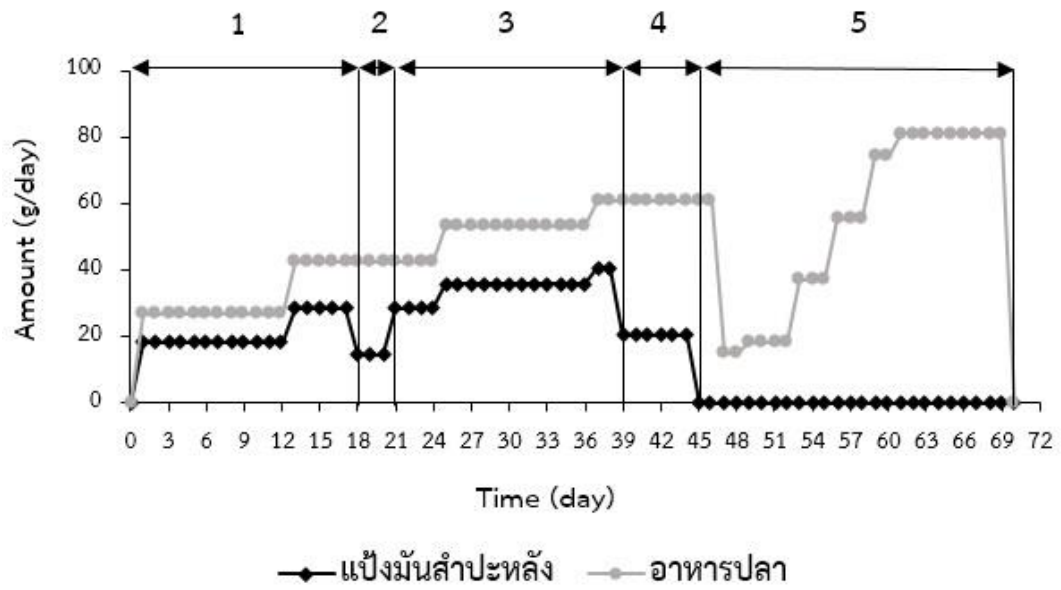
รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรด ระหว่างการเลี้ยงปลาชนิดเดียวกับเทคโนโลยีไบโอฟล็อกในการทดลองช่วงที่ 3 โดยช่วงที่ 1 และช่วงที่ 3 เติบโตเต็มที่สำหรับ C:N = 10:1 ช่วงที่ 2 และช่วงที่ 4 เติบโตเต็มที่สำหรับ C:N = 5:1 ส่วนช่วงที่ 5 หยุดการเติบโตเต็มที่สำหรับ

ช่วงที่ 2 ลดปริมาณการเติมแบริ่งมันสำปะหลังเหลืออัตราส่วน C:N = 5:1 (วันที่ 18 ถึงวันที่ 20)

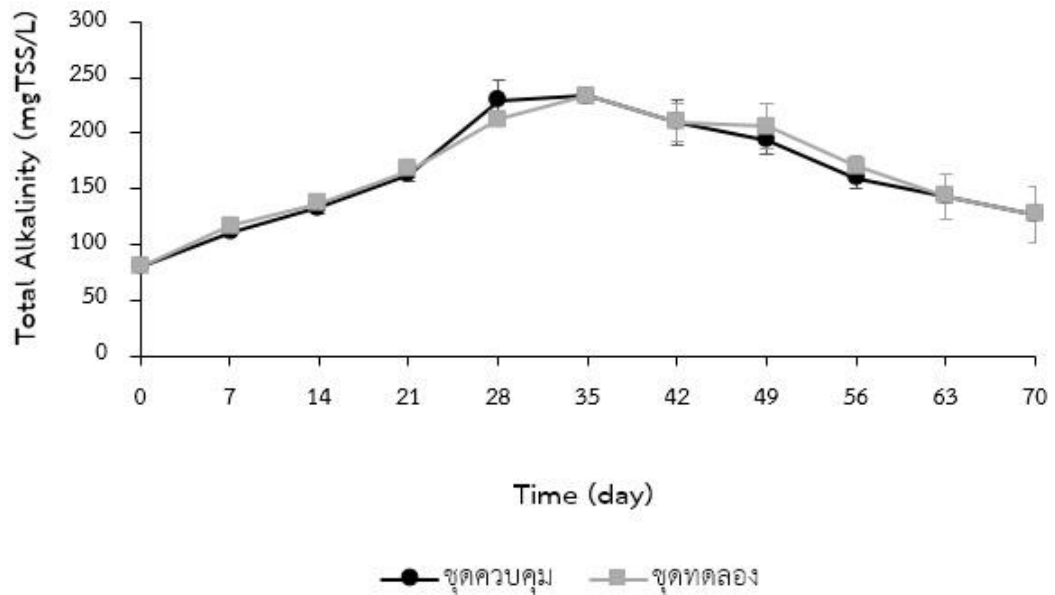
ในช่วงนี้ได้ทำการลดปริมาณการเติมแบริ่งมันสำปะหลังลงครึ่งหนึ่ง (C:N = 5:1) เพื่อตรวจสอบการทำงานของกระบวนการไนตริฟิเคชัน ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งในชุดควบคุมและชุดทดลอง โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.51 และ 0.51 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ อีกทั้งยังพบการเพิ่มขึ้นของไนไตรต์ด้วยเล็กน้อย ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่ากระบวนการไนตริฟิเคชัน ในช่วงนี้ยังเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ โดยการลดปริมาณการเติมแบริ่งมันสำปะหลังทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ คาร์บอนไม่เพียงพอต่อการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ จึงทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียและสะสมในระบบ

ช่วงที่ 3 เติมน้ำมันสำปะหลังในอัตราส่วน C:N = 10:1 (วันที่ 21 ถึงวันที่ 38)

เนื่องจากในช่วงเวลาที่ผ่านมากกระบวนการไนตริฟิเคชันยังเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ จึงได้ทำการปรับปริมาณการเติมแบริ่งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นเท่าเดิม (C:N = 10:1) เพื่อให้ปริมาณสารอินทรีย์ คาร์บอนเพียงพอต่อการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ ส่งผลให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียในระบบเริ่มลดลงทั้งในชุดควบคุมและชุดทดลอง แต่ในวันที่ 27 กลับพบการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของแอมโมเนียในชุดควบคุมและมีค่าสูงสุดในวันที่ 30 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.28 มก.ไนโตรเจน/ล. (ค่าเฉลี่ยของแอมโมเนียในชุดควบคุมที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 4.08, 5.39 และ 0.36 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากในช่วงเวลาดังกล่าวเกิดการย่อยสลายของตะกอนไบโอฟิล์มมากกว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของระบบ เนื่องจากตะกอนในชุดควบคุมจะถูกหมุนเวียนผ่านเครื่องสูบน้ำตลอดเวลา ระหว่างที่ตะกอนผ่านเครื่องสูบน้ำจะถูกแรงดันของน้ำทำให้ตะกอนแตกเกิดเป็นตะกอนขนาดเล็กซึ่งมีแนวโน้มในการถูกย่อยและสลายตัวได้ง่ายขึ้น ทั้งนี้ตั้งแต่วันที่ 27 ยังพบว่าความเข้มข้นของไนไตรต์มีค่าเพิ่มขึ้น และเริ่มมีการสะสมของไนเตรตเพิ่มขึ้นเล็กน้อยทั้งในชุดควบคุมและชุดทดลอง โดยเมื่อพิจารณาควบคู่กับค่าความเป็นด่าง (ดังรูปที่ 4.21) ที่เริ่มลดลงตั้งแต่วันที่ 35 ซึ่งยืนยันว่ากระบวนการไนตริฟิเคชันในระบบเริ่มมีการทำงานที่สมบูรณ์มากขึ้น แต่เนื่องจากในช่วงนี้ยังมีการเติมน้ำมันสำปะหลังอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้แอมโมเนียส่วนใหญ่ยังคงถูกบำบัดโดยแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟ สังเกตได้จากปริมาณไนเตรตที่มีแนวโน้มคงที่ตลอดการทดลองในช่วงนี้



รูปที่ 4.20 ปริมาณการเติมแป้งมันสำปะหลังและปริมาณการให้อาหาร ระหว่างการเลี้ยงปลานิลด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกในการทดลองช่วงที่ 3 โดยช่วงที่ 1 และช่วงที่ 3 เติมแป้งมันสำปะหลัง C:N = 10:1 ช่วงที่ 2 และช่วงที่ 4 เติมแป้ง C:N = 5:1 ส่วนช่วงที่ 5 หยุดการเติมแป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นด่างระหว่างการเลี้ยงปลานิลด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อกในการทดลองช่วงที่ 3

ช่วงที่ 4 ลดปริมาณการเติมแป้งมันสำปะหลังเหลืออัตราส่วน C:N = 5:1 (วันที่ 39 ถึงวันที่ 45)

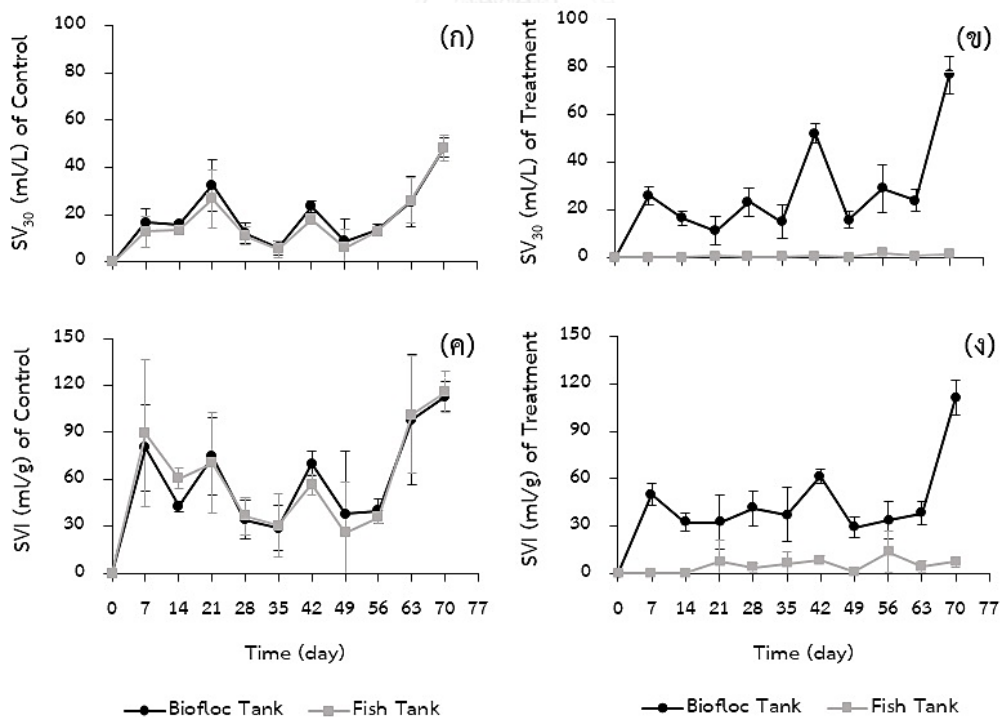
ในช่วงนี้ได้ทำการลดปริมาณการเติมแป้งมันสำปะหลังลงครึ่งหนึ่งอีกครั้ง (C:N = 5:1) เพื่อตรวจสอบการทำงานของกระบวนการไนตริฟิเคชัน โดยทั้งในชุดควบคุมและชุดทดลองไม่พบการสะสมของแอมโมเนียในระบบ ซึ่งแสดงถึงทำงานอย่างสมบูรณ์ของแบคทีเรียกลุ่ม AOB ในขณะที่ยังคงพบการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นไนไตรต์ แสดงว่าการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม NOB ยังเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์

ช่วงที่ 5 หยุดการเติมแป้งมันสำปะหลัง (วันที่ 45 ถึงวันที่ 70)

ในช่วงนี้ได้หยุดการเติมแป้งมันสำปะหลัง โดยยังคงพบการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นไนไตรต์อย่างต่อเนื่องทั้งในชุดควบคุมและชุดทดลอง ซึ่งมีค่าสูงสุดในวันที่ 48 โดยในชุดควบคุมมีค่าเท่ากับ 6.04 มก.ไนโตรเจน/ล. (ค่าเฉลี่ยของไนไตรต์ในชุดควบคุมที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 2.73, 5.47 และ 9.92 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ) และในชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 1.93 มก.ไนโตรเจน/ล. (ค่าเฉลี่ยของไนไตรต์ในชุดควบคุมที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 2.79, 2.45 และ 0.56 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ) ซึ่งความเข้มข้นของไนไตรต์ที่ระดับดังกล่าวโดยเฉพาะอย่างยิ่งในชุดควบคุมมีค่าเกินกว่าระดับที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำคือ มากกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. (Timmons และคณะ 2002) ดังนั้นตั้งแต่วันที่ 47 ของการทดลองจึงทำการปรับลดปริมาณการให้อาหารสัตว์น้ำลงเหลือร้อยละ 1 ของน้ำหนักปลา (จากเดิมร้อยละ 3 - 4 ของน้ำหนักปลา) ทั้งในชุดควบคุมและชุดทดลอง โดยภายหลังการปรับลดปริมาณการให้อาหารพบว่าในวันที่ 48 เป็นต้นไป ความเข้มข้นของไนไตรต์เริ่มมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนอยู่ในระดับที่เหมาะสมในวันที่ 57 จากนั้นจึงทำการปรับเพิ่มปริมาณการให้อาหารอีกครั้งจนเท่าเดิม (ร้อยละ 3 - 4 ของน้ำหนักปลา) และยังคงพบว่าตั้งแต่วันที่ 48 จนถึงวันสุดท้ายของการทดลองความเข้มข้นของไนไตรต์เริ่มมีการสะสมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการสะสมของแอมโมเนียและไนเตรต รวมถึงค่าความเป็นด่างที่มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการบำบัดของเสียไนโตรเจนในระบบเกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์แล้ว (ดังสมการที่ 2.6) โดยแบคทีเรียกลุ่ม AOB จะเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรต์ และ NOB จะเปลี่ยนไนไตรต์ต่อเป็นไนเตรต

- คุณภาพตะกอนไบโอฟล็อก

จากการวิเคราะห์ค่าปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนได้ในเวลา 30 นาที (SV_{30}) พบว่าถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกและถังเลี้ยงปลาของชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 20.17 ± 12.72 และ 18.01 ± 12.87 มล./ล ตามลำดับ ส่วนถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกและถังเลี้ยงปลาของชุดทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 29.03 ± 20.31 และ 0.62 ± 0.63 มล./ล ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.22 ก และ ข (ค่า SV_{30} ของวันที่ 0 ไม่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ) จากการวิเคราะห์ค่าดัชนีปริมาณตะกอน (SVI) พบว่าถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกและถังเลี้ยงปลาของชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 61.83 ± 29.41 และ 62.23 ± 31.48 มล./ก ตามลำดับ ส่วนถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกและถังเลี้ยงปลาของชุดทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 46.64 ± 24.64 และ 5.34 ± 4.38 มล./ก ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.22 ค และ ง (ค่า SVI ของวันที่ 0 ไม่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ) โดยค่าดัชนีปริมาณตะกอนระหว่างการทดลองของทั้งชุดควบคุมและชุดทดลองส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานสำหรับระบบไบโอฟล็อกซึ่งเท่ากับ 200 มล./ก. (Ebeling และคณะ, 2006) และต่ำกว่าค่าสำหรับระบบตะกอนเร่งซึ่งเท่ากับ 50 มล./ก. รัชชัย พรณสวัสดิ์ และอุษา วิเศษสุนน, 2535)



รูปที่ 4.22 ปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนได้ในเวลา 30 นาที ของชุดควบคุม (ก) และชุดทดลอง (ข) และค่าดัชนีปริมาณตะกอนของชุดควบคุม (ค) และชุดทดลอง (ง) ในการทดลองช่วงที่ 3

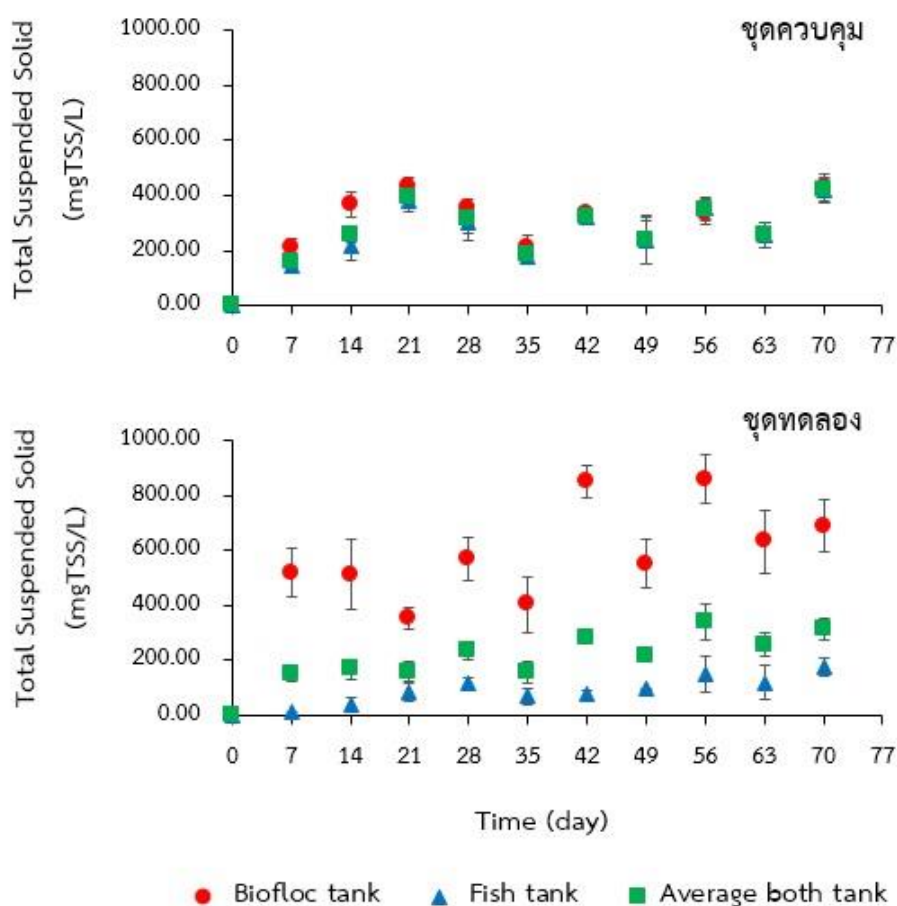
จากการตรวจความสามารถในการตกตะกอนของตะกอนไบโอฟล็อกโดยใช้กรวยอิมฮอฟ (ดังรูปที่ 4.23) พบว่าภายหลังตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ตะกอนไบโอฟล็อกสามารถตกตะกอนได้ค่อนข้างดี น้ำส่วนบนที่มีลักษณะค่อนข้างโปร่งแสง และยังพบว่าน้ำจะมีลักษณะเป็นสีเหลืองเข้ม เนื่องจากเกิดการสะสมของสารฮิวมิก (Humic matter) ในระบบการทดลอง (Schuster, 1994)



รูปที่ 4.23 ความสามารถในการตกตะกอนของตะกอนไบโอฟล็อก (วันที่ 69) จากถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อก (ก) และถังเลี้ยงปลา (ข) ของชุดควบคุม กับถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อก (ค) และถังเลี้ยงปลา (ง) ของชุดทดลอง

ผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลอง (ค่าวันที่ 0 ไม่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณค่าเฉลี่ย) ของชุดควบคุม พบว่าถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกและถังเลี้ยงปลามีค่าเฉลี่ยปริมาณตะกอนใกล้เคียงเท่ากับ 315.67 ± 87.97 และ 280.00 ± 89.63 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. ตามลำดับ เนื่องจากภายในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกของชุดควบคุมไม่มีการติดตั้งหน่วยแยกตะกอนจึงทำให้ตะกอนไบโอฟล็อกสามารถหมุนเวียนกลับไปยังถังเลี้ยงปลาได้ ส่วนในชุดทดลองที่มีการติดตั้งหน่วยแยกตะกอนไว้ภายในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อก พบว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกตลอดการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 594.00 ± 169.35 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. ซึ่งมีความเข้มข้นสูงกว่าในถังเลี้ยงปลาที่มีค่าเฉลี่ยเพียง 93.67 ± 49.07 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. อย่างเห็นได้ชัด

(ดังรูปที่ 4.24) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่ติดแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องกรอง 100 ไมครอน สามารถแยกตะกอนไบโอฟล็อกที่เกิดขึ้นออกจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำได้



รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอยของชุดควบคุมและชุดทดลองระหว่างการเดินระบบในการทดลองครั้งที่ 3

สำหรับการทดลองนี้ได้กำหนดปริมาณของแข็งแขวนลอยที่จะคงไว้ในระบบให้อยู่ในช่วง 200 - 500 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. โดยปริมาณของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยทั้งระบบตลอดการทดลอง (ค่าวันที่ 0 ไม่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณค่าเฉลี่ย) ในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 289.51 ± 85.83 และ 227.09 ± 69.69 มก.ของแข็งแขวนลอย/ล. ซึ่งทั้งชุดควบคุมและชุดทดลองสามารถควบคุมปริมาณของแข็งแขวนลอยตลอดการทดลองให้อยู่ในระดับที่กำหนดไว้ได้ ทั้งนี้แนวทางเลือกที่ใช้ในการแยกตะกอนส่วนเกินออกจากระบบในการทดลองส่วนนี้แบ่งออกเป็น 2 วิธี โดยในช่วงเริ่มต้นการทดลองจะใช้วิธีการกรองน้ำในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกผ่านกระชอนที่มีช่องกรอง

ขนาดเล็ก เพื่อแยกตะกอนส่วนเกินออกจากระบบ (ดังรูปที่ 4.25 ก) ซึ่งพบว่าวิธีนี้สามารถกรองตะกอนส่วนเกินออกจากระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพเฉพาะในชุดทดลองเท่านั้น เนื่องจากตะกอนส่วนใหญ่จะรวมกันอยู่ในถังปฏิกรณ์ไบโอฟลอคและตะกอนมีลักษณะที่สามารถแยกตัวออกจากราน้ำได้ดี แต่ในชุดควบคุมตะกอนส่วนเกินจะถูกกรองออกจากระบบด้วยวิธีดังกล่าวได้ในปริมาณที่น้อย เนื่องจากตะกอนมีการกระจายตัวอยู่ทั้งระบบและมีลักษณะที่แยกตัวออกจากราน้ำได้ไม่ดัดนัก ดังนั้นการแยกตะกอนส่วนเกินออกจากระบบการทดลองในชุดควบคุมจึงเลือกใช้วิธีการตะกอนในถังตกตะกอนแทน (ดังรูปที่ 4.25 ข) โดยการสูบน้ำในถังปฏิกรณ์ไบโอฟลอคและถังเลี้ยงปลาเข้าถังตกตะกอนซึ่งเป็นถังพลาสติกขนาด 250 ล. และตั้งทิ้งไว้จนตกตะกอน จากนั้นจึงหมุนเวียนเฉพาะส่วนน้ำใสกลับสู่ระบบการเลี้ยง ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถแยกตะกอนส่วนเกินในชุดควบคุมออกจากระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

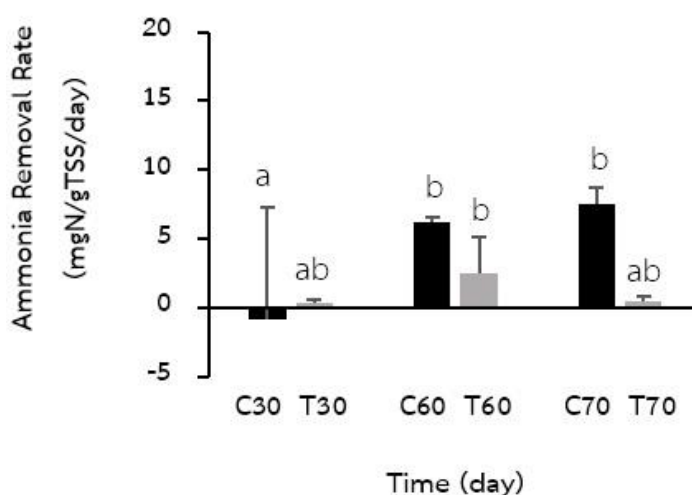


รูปที่ 4.25 การถ่ายตะกอนส่วนเกินออกจากระบบด้วยวิธีการกรองผ่านกระชอนที่มีช่องกรองขนาดเล็กสำหรับชุดทดลอง (ก) และวิธีการตกตะกอนสำหรับชุดควบคุม (ข)

4.3.2 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟลอค

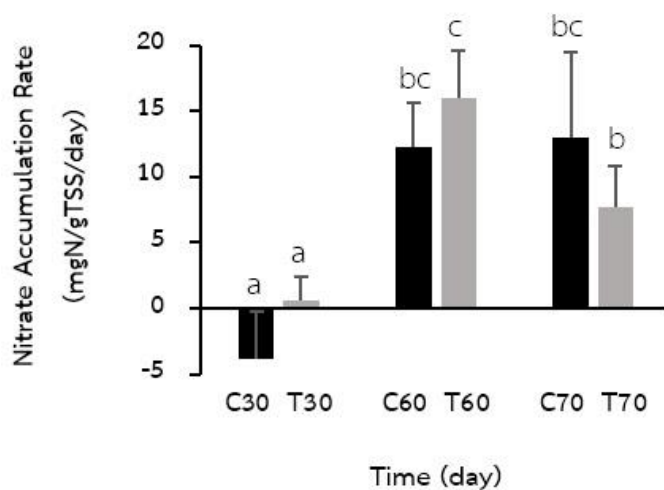
จากการประเมินความสามารถของตะกอนไบโอฟลอคในการบำบัดแอมโมเนียจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำในวันที่ 30, 60 และ 70 พบว่าชุดควบคุมมีค่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับ -0.88 ± 8.18 , 3.91 ± 0.39 และ 4.67 ± 1.15 มก.ไนโตรเจน/ก.ของแข็งแขวนลอย/วัน ตามลำดับ ส่วนชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 4.31 ± 0.28 , 6.05 ± 0.54 และ 4.44 ± 0.40 มก.ไนโตรเจน/ก.ของแข็งแขวนลอย/วัน ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.26) โดยพบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียในวันที่ 30 ของชุดควบคุมมีค่าติดลบ ซึ่งเกิดจาก

ในช่วงเวลาดังกล่าวอัตราการย่อยสลายของตะกอนมีค่ามากกว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของระบบ (พบในชุดควบคุมที่ 1 และ 2) โดยสามารถสังเกตได้จากปริมาณแอมโมเนียของระบบซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในวันที่ 30 ของการทดลอง



รูปที่ 4.26 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไปโอฟล็อกในวันที่ 30, 60 และ 70 ที่ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ในการทดลองช่วงที่ 3 โดย a และ b แสดงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อ $p < 0.05$

ทั้งนี้จากการประเมินอัตราการสะสมของไนเตรตในวันที่ 30, 60 และ 70 พบว่าชุดควบคุมมีค่าอัตราการสะสมไนเตรตเท่ากับ -3.82 ± 3.62 , 7.85 ± 2.22 และ 6.71 ± 2.67 มก.ไนโตรเจน/ก.ของแข็งแขวนลอย/วัน ตามลำดับ ในขณะที่ชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 0.61 ± 1.78 , 16.04 ± 3.54 และ 7.66 ± 3.21 มก.ไนโตรเจน/ก.ของแข็งแขวนลอย/วัน ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.27) โดยอัตราการสะสมไนเตรตของทั้งชุดควบคุมและชุดทดลองในวันที่ 30 มีค่าต่ำกว่าวันที่ 60 และ 70 ซึ่งอธิบายได้ว่าในวันดังกล่าวตรงกับช่วงเวลาที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังเพื่อกระตุ้นการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทโรโทรฟ ซึ่งจะใช้อมโมเนียในการสร้างเซลล์โดยไม่มีการสะสมของไนเตรต ซึ่งนอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงที่มีการเติมแป้งมันสำปะหลังจะพบการเพิ่มขึ้นของไนเตรตน้อยมากเมื่อเทียบกับช่วงที่ไม่มีการเติมแป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ 4.27 อัตราการสะสมไนเตรตของตะกอนไบโอฟล็อกในวันที่ 30, 60 และ 70 ที่ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ในการทดลองช่วงที่ 3 โดย a, b และ c แสดงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อ $p < 0.05$

4.3.3 การเติบโตของปลานิลในระหว่างการทดลอง

เมื่อทำการเลี้ยงปลานิลที่ความหนาแน่นเริ่มต้น 3 กก./ลบ.ม. เป็นระยะเวลา 70 วัน พบว่าเมื่อสิ้นสุดการทดลองความหนาแน่นสุดท้ายของปลานิลในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.59 ± 0.24 และ 7.05 ± 0.23 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพสัตว์น้ำทุกๆ 12 วัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 6 ช่วง (ดังตารางที่ 4.7) พบว่าอัตราการเจริญเติบโต น้ำหนักเฉลี่ยและความยาวเฉลี่ยของปลานิลทั้งในชุดควบคุมและชุดทดลองมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยปลานิลในชุดควบคุมและชุดทดลองมีอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยเท่ากับ 0.68 ± 0.01 และ 0.64 ± 0.01 ก./วัน ตามลำดับ มีน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 47.75 ± 0.79 และ 44.71 ± 0.67 ก./วัน ตามลำดับ มีอัตราการรอดเท่ากับร้อยละ 86.67 ± 2.78 และ 86.06 ± 3.79 ตามลำดับ และมีอัตราแลกเนื้อเท่ากับ 2.43 ± 0.13 และ 2.75 ± 0.16 ตามลำดับ โดยพบว่าค่าดังกล่าวค่อนข้างสูงกว่าอัตราการแลกเนื้อในระบบการเลี้ยงปลานิลทั่วไปในกระชังที่มีค่าประมาณ 1.35 - 1.4 เมื่อเลี้ยงปลานิลในกระชังจนถึงน้ำหนัก 1000 ก. (ศิริ กอนันตกุล และจุฬ สิ้นชัยพานิช, 2557) เนื่องจากปลานิลที่ใช้ในการทดลองนี้มีขนาดเล็ก โดยมีน้ำหนักเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดการทดลองประมาณ 50 ก. และเมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี One-way analysis of variance (ANOVA) และ Duncan's new multiple range test พบว่าอัตราการรอด อัตราแลกเนื้อ และความหนาแน่นสุดท้ายของปลานิลในชุดควบคุมกับชุดทดลองมีค่า

ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่อัตราการเจริญเติบโตและน้ำหนักเฉลี่ยของปลานิลในชุดควบคุมมีค่าสูงกว่าในชุดทดลองอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เนื่องจากในชุดควบคุมไม่มีการติดตั้งหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อก จึงทำให้มีตะกอนไบโอฟล็อกบางส่วนยังคงอยู่ในถังเลี้ยงปลานิล ซึ่งปลานิลสามารถรองกินตะกอนเหล่านั้นเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตได้

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพสัตว์น้ำในการทดลองช่วงที่ 3

วันที่	ค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน						ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	
	อัตราการเจริญเติบโต (ก./วัน)	น้ำหนัก (ก./ตัว)	ความยาว (ซม./ตัว)	อัตราการรอด (ร้อยละ)	อัตราแลกเนื้อ (FCR)			
						เริ่มต้น	สุดท้าย	
ชุดควบคุม								
0 - 12	0.24 \pm 0.09	19.23 \pm 1.09	10.35 \pm 0.13	86.67 \pm 2.78 ^a	2.43 \pm 0.13 ^a	3.00	7.59 \pm 0.24 ^a	
13 - 24	0.42 \pm 0.15	24.22 \pm 1.92	11.22 \pm 0.18					
25 - 36	0.30 \pm 0.14	27.82 \pm 1.76	11.67 \pm 0.24					
37 - 48	0.50 \pm 0.19	33.82 \pm 1.90	12.31 \pm 0.27					
49 - 60	0.80 \pm 0.19	42.80 \pm 1.76	13.40 \pm 0.12					
61 - 70	1.48 \pm 0.33	58.28 \pm 3.16	14.13 \pm 0.34					
สิ้นสุดการทดลอง	0.68 \pm 0.01 ^a	47.75 \pm 0.79 ^a	-					
ชุดทดลอง								
0 - 12	0.26 \pm 0.04	19.46 \pm 0.47	10.65 \pm 0.12	86.06 \pm 3.79 ^a	2.75 \pm 0.16 ^a	3.00	7.05 \pm 0.23 ^a	
13 - 24	0.39 \pm 0.07	24.14 \pm 0.70	11.33 \pm 0.19					
25 - 36	0.26 \pm 0.04	27.30 \pm 0.59	11.82 \pm 0.07					
37 - 48	0.52 \pm 0.12	33.51 \pm 1.87	12.37 \pm 0.18					
49 - 60	0.66 \pm 0.17	41.37 \pm 0.98	13.39 \pm 0.24					
61 - 70	1.32 \pm 0.29	54.54 \pm 2.85	13.77 \pm 0.32					
สิ้นสุดการทดลอง	0.64 \pm 0.01 ^b	44.71 \pm 0.67 ^b	-					

โดย a และ b แสดงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อ $p < 0.05$

4.3.4 การประเมินสมมูลมวลไนโตรเจน

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในอาหารเม็ดสำเร็จรูปด้วยเครื่อง CHN Analyzer (LECO Coporation, 628 Series : CHN) และการวิเคราะห์แป้งมันสำปะหลังด้วยเครื่อง CHN Analyzer (Thermo Scientific™ FLASH 2000) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าปริมาณไนโตรเจนในอาหารเม็ดสำเร็จรูปและแป้งมันสำปะหลังมีค่าเท่ากับร้อยละ 3.27 และ 0.00 ตามลำดับ ทั้งนี้ปริมาณไนโตรเจนในตะกอนไปโอฟล็อกจะใช้ค่าที่อ้างอิงจากงานวิจัยของพรรณทภรณ์ สิทธิพลางกูร (2556) ซึ่งเท่ากับร้อยละ 3.66 ส่วนปริมาณไนโตรเจนในตัวปลานิลจะใช้ค่าที่อ้างอิงจากงานวิจัยของเพ็ญพิชญา พิณจรรย์ภาคย์ (2556) ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 6.35 (ดังตารางที่ 4.8)

ตารางที่ 4.8 ปริมาณร้อยละของธาตุพื้นฐานในอาหารปลานิล ตะกอนไปโอฟล็อก แป้งมันสำปะหลัง และตัวปลานิลเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHN Analyzer

ตัวอย่าง	ร้อยละ (โดยน้ำหนักแห้ง)			อ้างอิง
	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	
อาหารปลานิลที่มีโปรตีนร้อยละ 18	42.69	7.48	3.27	ภาคผนวก จ.4
แป้งมันสำปะหลัง	36.43	5.56	0.00	ภาคผนวก จ.5
ตะกอนไปโอฟล็อก	32.01	4.89	3.66	พรรณทภรณ์ สิทธิพลางกูร (2556)
ปลานิล (นน.เปียก 86.55 ก. และ นน.แห้ง 19.17 ก.)	53.48	9.55	6.35	เพ็ญพิชญา พิณจรรย์ภาคย์ (2556)

เมื่อนำข้อมูลต่างๆ มาประเมินสมมูลมวลไนโตรเจน (ดังตารางที่ 4.9) พบว่าปริมาณไนโตรเจนเริ่มต้นที่เข้าสู่ระบบส่วนใหญ่มาจากอาหารปลานิลคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 89.45 (109.17 ก.ไนโตรเจน) ส่วนปริมาณไนโตรเจนที่เหลือจะอยู่ในรูปของปลานิลและไนเตรตจากน้ำประปาที่เตรียมไว้ใช้สำหรับการเลี้ยง ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 10.37 (12.66 ก.ไนโตรเจน) และ 0.18 (0.22 ก.ไนโตรเจน) ตามลำดับ โดยระหว่างการทดลองไนโตรเจนในอาหารปลาจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในตัวปลานิล เซลล์สิ่งมีชีวิตในตะกอน และสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำ เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าปริมาณไนโตรเจนส่วนใหญ่เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของตะกอนไปโอฟล็อก เนื่องจากของเสียไนโตรเจนที่สัตว์น้ำ

ขับถ่ายออกมาส่วนใหญ่อยู่นิรูปของแอมโมเนียซึ่งมีปริมาณมากถึงร้อยละ 75 ของปริมาณไนโตรเจนที่กินเข้าไป (Piedrahita, 2003) ส่วนแบคทีเรียกลุ่มเฮเทโรโทรฟที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยการเติมแป้งมันสำปะหลัง (วันที่ 1 ถึงวันที่ 44) จะใช้ของเสียเหล่านั้นในการสร้างเซลล์ ทำให้มีตะกอนเกิดขึ้นในระบบเป็นจำนวนมาก โดยในชุดควบคุมและชุดทดลองมีปริมาณตะกอนในระบบรวมกับตะกอนที่นำออกจากระบบเท่ากับร้อยละ 35.54 (42.76 ก.ไนโตรเจน) และ 34.75 (42.41 ก.ไนโตรเจน) ตามลำดับ และภายหลังหยุดการเติมแป้งมันสำปะหลัง (วันที่ 45 ถึงวันที่ 70) ของเสียส่วนใหญ่จะถูกบำบัดโดยแบคทีเรียกลุ่มไนโทรไฟอิงผ่านกระบวนการไนโทรฟิเคชัน ซึ่งจะเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนเตรตและสะสมอยู่ในระบบ ทั้งนี้ในชุดควบคุมและชุดทดลองมีปริมาณไนเตรตสะสมอยู่ในระบบเท่ากับร้อยละ 13.30 (16.24 ก.ไนโตรเจน) และ 12.37 (15.10 ก.ไนโตรเจน) ตามลำดับ โดยปริมาณไนโตรเจนที่เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของปลาไนในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเท่ากับร้อยละ 26.23 (32.01 ก.ไนโตรเจน เพิ่มขึ้น 19.35 ก.ไนโตรเจนจากค่าเริ่มต้น) และ 24.38 (29.75 ก.ไนโตรเจน เพิ่มขึ้น 17.09 ก.ไนโตรเจนจากค่าเริ่มต้น) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 ปริมาณและสัดส่วนไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบทั้งหมดกับไนโตรเจนคงเหลือในวันสุดท้ายของการทดลองในการทดลองครั้งที่ 3

องค์ประกอบ ไนโตรเจน	ปริมาณไนโตรเจน (ก.)			ปริมาณไนโตรเจน (%)		
	เริ่มต้น	สุดท้าย		เริ่มต้น	สุดท้าย	
		ชุดควบคุม	ชุดทดลอง		ชุดควบคุม	ชุดทดลอง
ปลาไน	12.66	32.01	29.75	10.37	26.23	24.38
แอมโมเนีย	0.00	0.01	0.04	0.00	0.01	0.03
ไนไตรต์	0.00	0.03	0.10	0.00	0.03	0.08
ไนเตรต	0.22	16.24	15.10	0.18	13.30	12.37
อาหาร	109.17	0.00	0.00	89.45	0.00	0.00
ตะกอนในระบบ	0.00	4.62	3.44	0.00	3.79	2.82
ตะกอนที่นำออก	0.00	38.50	38.97	0.00	31.55	31.93
รวม	122.04	91.41	87.40	100.00	74.91	71.61
สูญเสีย	0.00	30.63	34.64	0.00	25.09	28.39

อย่างไรก็ตามผลรวมของปริมาณไนโตรเจนสุดท้ายในชุดควบคุมมีค่าร้อยละ 74.91 (91.41 ก.ไนโตรเจน) และชุดทดลองมีค่าร้อยละ 71.61 (87.40 ก.ไนโตรเจน) ซึ่งคิดเป็นปริมาณไนโตรเจนที่สูญเสียจากระบบเท่ากับร้อยละ 25.09 (30.63 ก.ไนโตรเจน) และ 28.39 (34.64 ก.ไนโตรเจน) ตามลำดับ โดยสาเหตุหลักของการสูญเสียปริมาณไนโตรเจนเหล่านี้่ออกจากระบบการทดลองนี้อาจเกิดขึ้นจากหลายปัจจัยซึ่งไม่ได้นำมาใช้ในการคำนวณปริมาณไนโตรเจน ได้แก่ การแยกปลาไนลที่ตายระหว่างการเลี้ยงออกจากระบบ การระเหยของก๊าซไนโตรเจนจากระบบวนตีไนโตรฟิเคชันของแบคทีเรียกลุ่มตีไนโตรไฟอิง โดยกระบวนการดังกล่าวสามารถพบได้ภายในก้อนตะกอนไบโอฟลิมและจุดอับต่างๆ ภายในถัง ซึ่งยืนยันได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นด่างในช่วงที่มีการเติมแอมซึ่งเป็นตัวชี้ถึงเกิดการเกิดระบบวนตีไนโตรฟิเคชันในระบบ



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการใช้ตะกอนไบโอฟล็อกในถังปฏิกรณ์แบบแยกส่วน เพื่อบำบัดและควบคุมสารอินทรีย์ไนโตรเจนในการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด เป็นการลดผลกระทบของตะกอนไบโอฟล็อกต่อสัตว์น้ำ และจัดการตะกอนภายในระบบ โดยในช่วงแรกของการทดลองเป็นการประเมินอัตราการบำบัดแอมโมเนียและอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อก เพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณของตะกอนไบโอฟล็อกที่เหมาะสมที่จะคงไว้ในระบบ จากนั้นศึกษาหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่แปรค่าขนาดรูกรองของแผ่นกรองสแตนเลส และอัตราการไหลของระบบที่แตกต่างกัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบและประเมินประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอนในการแยกตะกอนไบโอฟล็อกออกจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ และสุดท้ายเป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ตะกอนไบโอฟล็อกในถังปฏิกรณ์แบบแยกส่วนเพื่อบำบัดและควบคุมสารอินทรีย์ไนโตรเจนในการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

การศึกษาอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำระหว่างสัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 8 โดยประเมินอัตราการบำบัดแอมโมเนียในถังปฏิกรณ์ที่ระดับความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. จากการทดลองพบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.14 ± 2.74 มก.ไนโตรเจน/ก.ของแข็งแขวนลอย/วัน โดยอัตราการบำบัดแอมโมเนียระหว่างสัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 3 มีค่าต่ำกว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียระหว่างสัปดาห์ที่ 4 ถึงสัปดาห์ที่ 8 เนื่องจากกระบวนการไนทริฟิเคชันยังเกิดไม่สมบูรณ์ โดยกระบวนการไนทริฟิเคชันตะกอนไบโอฟล็อกจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 5 ของการทดลอง

การศึกษาอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อกจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำระหว่างสัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 8 โดยประเมินอัตราการใช้ออกซิเจนในขวดบีโอดีที่บรรจุน้ำตัวอย่างที่มีตะกอนไบโอฟล็อกจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ จากการทดลองพบว่าอัตราการใช้ออกซิเจนของตะกอนไบโอฟล็อกในบ่อ

เลี้ยงสัตว์น้ำตลอด 8 สัปดาห์มีค่าไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 141.59 ± 18.78 มก.ออกซิเจน/ก.ของแข็งแขวนลอย/วัน

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบและประเมินประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอนในการแยกตะกอนไปโอฟล็อกออกจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยใช้หน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่แปรค่าขนาดรูกรองของแผ่นกรองสแตนเลส และอัตราการไหลของน้ำเข้าระบบที่แตกต่างกันจากการทดลองพบว่ารูกรองขนาด 100 ไมครอน และอัตราการไหลที่ 3,000 ล./วัน (ร้อยละ 1,000 ของปริมาตรถังต่อวัน) มีความเหมาะสมสำหรับการใช้ในการเดินระบบ โดยมีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนไปโอฟล็อกออกจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเท่ากับร้อยละ 89.11 ± 2.89

การศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ตะกอนไปโอฟล็อกในถังปฏิกรณ์แบบแยกส่วนเพื่อบำบัดและควบคุมสารอินทรีย์ในโตรเจนในการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด โดยเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการแยกตะกอนไปโอฟล็อกออกจากหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำ กับชุดทดลองที่ติดตั้งถังปฏิกรณ์ไปโอฟล็อกที่ภายในบรรจุหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองเพื่อแยกตะกอนไปโอฟล็อกออกจากหน่วยเลี้ยงสัตว์น้ำ จากการทดลองพบว่าโดยภาพรวมชุดทดลองสามารถควบคุมสารอินทรีย์ในโตรเจนได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งเมื่อลดหรือการหยุดเติมสารอินทรีย์คาร์บอนชุดควบคุมจะพบการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นแอมโมเนียและไนโตรตในในระดับที่สูงกว่าชุดทดลองในช่วงเวลาเดียวกัน ซึ่งอาจเกิดจากช่วงเวลาดังกล่าวมีอัตราการย่อยสลายของตะกอนมากกว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของระบบ เนื่องจากตะกอนในชุดควบคุมจะถูกหมุนเวียนผ่านเครื่องสูบน้ำตลอดเวลา เมื่อตะกอนผ่านเครื่องสูบน้ำจะถูกแรงดันของน้ำทำให้ตะกอนแตกและเกิดเป็นตะกอนขนาดเล็กซึ่งมีแนวโน้มในการย่อยสลายตัวได้ง่ายขึ้น

การศึกษาการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำพบว่าปลาในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยเท่ากับ 0.68 ± 0.01 และ 0.64 ± 0.01 ก./วัน ตามลำดับ มีน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 47.75 ± 0.79 และ 44.71 ± 0.67 ก./วัน ตามลำดับ โดยอัตราการเจริญเติบโตและน้ำหนักเฉลี่ยของปลาในชุดควบคุมมีค่าสูงกว่าในชุดทดลอง เนื่องจากในชุดควบคุมไม่มีการติดตั้งหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองในถังปฏิกรณ์ไปโอฟล็อก จึงทำให้มีตะกอนไปโอฟล็อกบางส่วนคงอยู่ภายในถังเลี้ยงปลาด้วย ซึ่งปลาสามารถกรองกินตะกอนเหล่านั้นเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตได้

การประเมินสมมูลมวลไนโตรเจนพบว่าปริมาณไนโตรเจนเริ่มต้นที่เข้าสู่ระบบส่วนใหญ่มาจากอาหารปลาคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 89.45 ระหว่างการทดลองไนโตรเจนในอาหารปลาจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในตัวปลานิล เซลล์สิ่งมีชีวิตในตะกอน และสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำ เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าปริมาณไนโตรเจนส่วนใหญ่เปลี่ยนไปอยู่ในรูปตะกอนไบโอฟล็อก โดยในชุดควบคุมและชุดทดลองมีปริมาณตะกอนในระบบรวมกับตะกอนที่นำออกจากระบบเท่ากับร้อยละ 35.54 และ 34.75 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ตะกอนไบโอฟล็อกในถังปฏิกรณ์แบบแยกส่วนเพื่อบำบัดและควบคุมสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด สามารถนำเสนอแนวทางในการพัฒนาระบบให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นได้ดังนี้

1. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสัดส่วนของกระบวนการบำบัดแอมโมเนียในระบบ โดยแบ่งเป็นการบำบัดแอมโมเนียที่เกิดจากกระบวนการนำแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟกับกระบวนการไนตริฟิเคชันของแบคทีเรียกลุ่มไนตริไฟอิง รวมทั้งศึกษาการเปลี่ยนแปลงประชากรแบคทีเรียทั้งกลุ่มเฮเทอโรโทรฟและไนตริไฟอิงภายในระบบ

2. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับแนวทางการนำตะกอนส่วนเกินออกจากระบบ โดยวิธีดังกล่าวจะต้องสามารถนำตะกอนส่วนเกินออกจากระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ และควบคุมปริมาณตะกอนที่จะคงไว้ในระบบให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมได้

3. เมื่อหยุดเติมสารอินทรีย์คาร์บอนให้กับระบบ ควรระวังการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นไนไตรต์เนื่องการเปลี่ยนกระบวนการบำบัดอย่างกระทันหันจากการนำแอมโมเนียเข้าสู่เซลล์เป็นกระบวนการไนตริฟิเคชัน ดังนั้นจึงควรทำการบ่มตะกอนเพื่อให้กระบวนการไนตริฟิเคชันเกิดได้อย่างสมบูรณ์ก่อนนำปลานิลลงเลี้ยง

4. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับนำระบบนี้ไปใช้ในการเลี้ยงปลานิลแบบระยะยาว โดยเริ่มเลี้ยงปลานิลตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงปลานิลขนาดตลาด โดยคำนึงความคุ้มค่าในด้านต่างๆ เช่น ต้นทุน กำไร และระยะเวลาที่ใช้ในการเลี้ยง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กชพร กฤตยานันต์. (2554). การพัฒนาระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กสำหรับการเลี้ยงปลา
น้ำจืด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กษิติศ หนูทอง. (2551). การบำบัดไนโตรเจนในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด. *วารสารพระจอม
เกล้าลาดกระบัง*, 16(1), 11-22.
- คีรี กอนันตกุล และจุฬ สิ้นชัยพานิช. (2557). การเลี้ยงปลานิลในกระชัง. กรุงเทพมหานคร: สำนัก
พัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยีการประมง กรมประมง.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. (2554). การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. กรุงเทพมหานคร:
สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และอุษา วิเศษสมุน (2535). คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร:
สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- ธนากร อ้อมมุกดากุล (2555). การประยุกต์ใช้การกรองทรายแบบเร็วและแบบช้าในการบำบัดน้ำจาก
ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรรณทภรณ์ สิทธิพลางกูร (2556). ประสิทธิภาพการบำบัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนของตะกอน
ชีวภาพจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบไบโอฟลอค. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต.
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรรณทภรณ์ สิทธิพลางกูร, วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี และกษิติศ หนูทอง. (2555). การควบคุมความ
เข้มข้นของสารอนินทรีย์ไนโตรเจนและอัตราการบำบัดแอมโมเนียโดยตะกอนชีวภาพจาก
ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด. การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
กำแพงแสน ครั้งที่ 9, 317-323.
- พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล. (2557). หน่วยกระบวนการสำหรับวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร:
สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เพ็ญพิชญา พินิจธนาภาคย์ (2556). การพัฒนาถึงปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันเพื่อบำบัด
ไนโตรเจนจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- มันสิน ตันกุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา. (2544). การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ : เล่ม 1 การจัดการคุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไมตรี ดวงสวัสดิ์ และจารุวรรณ สมศิริ. (2528). คุณสมบัติของน้ำและวิธีวิเคราะห์สำหรับการวิจัยทางการประมง. กรุงเทพมหานคร: กรมประมง.
- วรรรัตน์ วาณิชชานัย. (2552). ผลจากการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนต่อการเกิดตะกอนจุลินทรีย์และคุณภาพน้ำในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ศิวฤกษ์ หนูฤทธิ. (2554). การพัฒนาหน่วยแยกตะกอนและผลของตะกอนต่อคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เศรษฐศักดิ์ ติวะนันทกร. (2557). การกรองตะกอนแขวนลอยในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยแผ่นกรองชนิดวางเอียง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุบัณฑิต นิมรัตน์ และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย. (2552). การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างยั่งยืนบนบทบาทของจุลินทรีย์และการประยุกต์ใช้. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

- Ali, S. A. (2013). Design and evaluate a drum screen filter driven by undershot waterwheel for aquaculture recirculating systems. Aquacultural engineering, 54: 38-44.
- APHA, AWWA and WEF. (2005). Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. 21sted. Washington DC: American Public Health Association.
- Avnimelech, Y. (1999). Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. Aquaculture. 176(3): 227-235.
- Avnimelech, Y., Diab, S., Kochva, M. and Mokady, S. (1992). Control and utilization of inorganic nitrogen in intensive fish culture ponds. Aquaculture Research. 23(4): 421-430.
- Avnimelech, Y. and Kochba, M. (2009). Evaluation of nitrogen uptake and excretion by tilapia in bio floc tanks, using ¹⁵N tracing. Aquaculture. 287(1): 163-168.

- Azim, M. E. and Little, D. C. (2008). The biofloc technology (BFT) in indoor tanks: water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Aquaculture. 283(1): 29-35.
- Boyd, C.E. (1998). Water Quality for Pond Aquaculture. Research and Development Series No. 43. International Center for Aquaculture and Aquatic Environments, Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University, Alabama.
- Crab, R., Defoirdt, T., Bossier, P. and Verstraete, W. (2012). Biofloc technology in aquaculture: beneficial effects and future challenges. Aquaculture. 356: 351-356.
- De Schryver, P., Crab, R., Defoirdt, T., Boon, N. and Verstraete, W. (2008). The basics of bio-flocs technology: The added value for aquaculture. Aquaculture, 277(3-4): 125-137.
- De Schryver, P. and Verstraete, W. (2009). Nitrogen removal from aquaculture pond water by heterotrophic nitrogen assimilation in lab-scale sequencing batch reactors. Bioresource Technology. 100(3): 1162-1167.
- Ebeling, J. M., Timmons, M. B. and Bisogni, J. J. (2006). Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems. Aquaculture. 257(1): 346-358.
- Hargreaves, J. A. (2006). Photosynthetic suspended-growth systems in aquaculture. Aquacultural Engineering. 34(3): 344-363.
- Hargreaves, J. A. (2013). *Biofloc production systems for aquaculture*: Southern Regional Aquaculture Center.
- Krishna, C. and Van Loosdrecht, M. C. (1999). Effect of temperature on storage polymers and settleability of activated sludge. Water Research. 33(10): 2374-2382.
- Lawson T. B. (1995). Fundamentals of Aquaculture Engineering. New York: Chapman & Hall.
- Liang, W., Luo, G., Tan, H., Ma, N., Zhang, N. and Li, L. (2014). Efficiency of biofloc technology in suspended growth reactors treating aquacultural solid under intermittent aeration. Aquacultural Engineering. 59: 41-47.

- Little, D. C., Murray, F. J., Azim, E., Leschen, W., Boyd, K., Watterson, A. and Young, J. A. (2008). Options for producing a warm-water fish in the UK: limits to “Green Growth”?. Trends in Food Science & Technology. 19(5): 255-264.
- Meade, J. W. (1985). Allowable ammonia for fish culture. The Progressive Fish-Culturist. 47(3): 135-145.
- Naylor, R. L., Goldburg, R. J., Primavera, J. H., Kautsky, N., Beveridge, M. C., Clay, J., Folke, C., Lubchenco, J., Mooney, H. and Troell, M. (2000). Effect of aquaculture on world fish supplies. Nature. 405(6790): 1017-1024.
- Nootong, K., Pavasant, P. and 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.
- Pérez-Fuentes, J. A., Hernández-Vergara, M. P., Pérez-Rostro, C. I. and Fogel, I. (2016). C: N ratios affect nitrogen removal and production of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* raised in a biofloc system under high density cultivation. Aquaculture. 452: 247-251.
- Piedrahita, R. H. (2003). Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. Aquaculture. 226(1): 35-44.
- Ray, A. J. and Lotz, J. M. (2014). Comparing a chemoautotrophic-based biofloc system and three heterotrophic-based systems receiving different carbohydrate sources. Aquacultural Engineering. 63: 54-61.
- Sawyer, P. L., McCarty, P. L. and Parkin, G. F. (2002). Chemistry for Environmental Engineering and Science. 5th ed. New York: McGraw-Hill Companies, Inc.
- Schuster, C. (1994). The effect of fish meal content in trout food on water colour in a closed recirculating aquaculture system. Aquaculture International. 2(4): 266-269.
- Timmons, M. B., Ebeling, J. M., Wheaton, F. W., Summerfelt, S. T. and Vinci, B. J. (2002). Recirculating aquaculture system. 2nd ed. New York: Cayuga Aqua Ventures Ithaca.





ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ก.1 วิธีวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนีย

การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำดัดแปลงมาจากวิธีของ Bower และ Holm-Hansen (1980) โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารเคมีและการวิเคราะห์ดังนี้

- การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายซาลิไซเลตคะตะลิสต์ (Salicylate-catalyst solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายโซเดียมซาลิไซเลต (Sodium salicylate; $C_6H_4(OH)COONa$) ปริมาณ 440 ก. และโซเดียมไนโตรพรัสไซด์ (Sodium nitroprusside dehydrate; $Na_2Fe(CN)_5NO \cdot 2H_2O$) ปริมาณ 0.28 ก. ลงในน้ำปราศจากไอออน (De-ionized water) และปรับปริมาตรสารละลายซาลิไซเลตคะตะลิสต์ให้มีปริมาตรเท่ากับ 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 $5^{\circ}C$

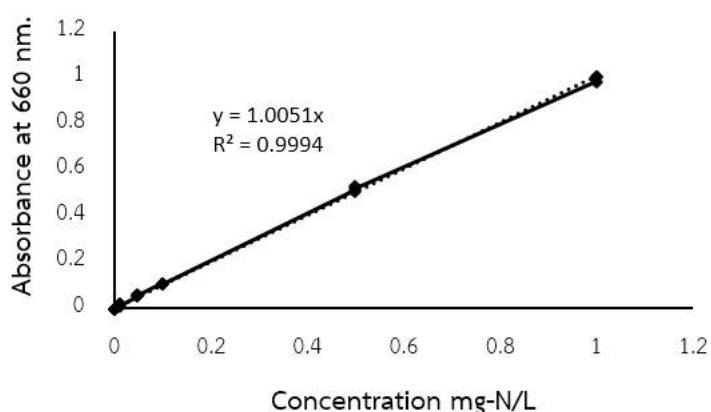
3. สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodium hypochlorite solution) สามารถใช้สารละลายไฮโปคลอไรต์ทางการค้าความเข้มข้น 1.5 นอร์มอล

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

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

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

กระบวนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มล. ใส่ในหลอดทดลองเติมสารละลายซาลิไซเลตคະຕະລີສต์ปริมาตร 0.6 มล. และสารละลายอัลคาไลน์ไฮโปคลอไรด์ปริมาตร 1.0 มล. ตามลำดับ (ทั้งนี้สามารถปรับเพิ่มลดปริมาตรน้ำตัวอย่างและสารละลายที่ใช้ในขั้นตอนการวิเคราะห์ได้โดยคงอัตราส่วนให้มีค่าเท่าเดิม) เขย่าสารให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาในที่มีที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 1 ชม. แต่ไม่ควรเกิน 3 ชม. สำหรับการวิเคราะห์แบลนค์ (Blank) สามารถทำได้โดยใช้น้ำปราศจากไอออน ที่มีการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่างและใช้กระบวนการวิเคราะห์เช่นเดิม จากนั้นน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 660 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายแอมโมเนียมาตรฐาน (Standard ammonia solution) ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งเตรียมจากสารละลายสต็อกแอมโมเนีย (Stock ammonia solution) ความเข้มข้น 100 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ล. ดังกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์แอมโมเนียในรูปที่ ก-1



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน

ก.2 วิธีวิเคราะห์ปริมาณไนไตรต์

การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไนไตรต์ในโตรเจนในน้ำดัดแปลงมาจากวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Strickland และ Parsons (1972) [53] โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารเคมีและการวิเคราะห์ดังนี้

- การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายซัลฟานิลาไมด์ (Sulfanilamide solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายซัลฟานิลาไมด์ (Sulphanilamide; $C_6H_8N_2O_2S$) ปริมาณ 5 ก. ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Hydrochloric acid; HCl) ปริมาตร 50 มล. และปรับปริมาตรสารละลายซัลฟานิลาไมด์ให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ล. โดยการเก็บสารละลายควรเก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า $5^{\circ}C$

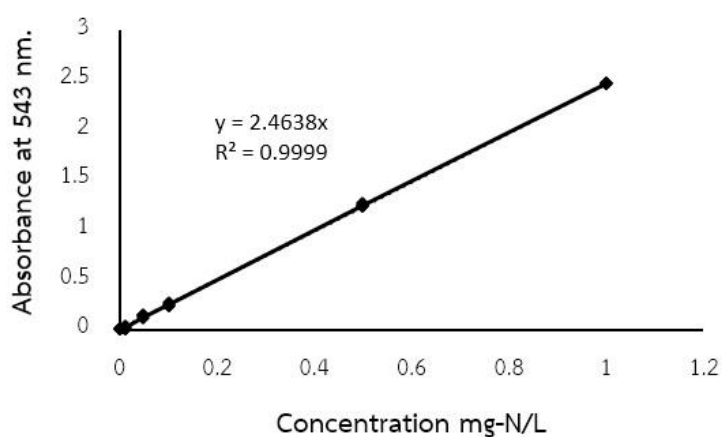
2. สารละลายเอ็นเอ็นอีดี (Naphthylethylenediamine solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายเอ็นเอ็นอีดี (NNED; N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride) ปริมาณ 0.5 ก. ในน้ำปราศจากไอออน และปรับปริมาตรสารละลายเอ็นเอ็นอีดีให้มีปริมาตรเท่ากับ 500 มล. โดยการเก็บสารละลายควรเก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า $5^{\circ}C$ และควรเตรียมสารละลายใหม่ทุกเดือน

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

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

ขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มล. ใส่ในหลอดทดลองเติมสารละลายซัลฟานิลาไมด์ปริมาตร 0.1 มล. เขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาประมาณ 2 นาที แต่ไม่ควรเกิน 10 นาที จากนั้นเติมสารละลายเอ็นเอ็นอีดีปริมาตร 0.1 มล. เขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 30 นาที แต่ไม่ควรเกิน 2 ชม. (ทั้งนี้สามารถปรับเพิ่มลดปริมาตรน้ำตัวอย่างและสารละลายที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ได้โดยคงอัตราส่วนให้มีค่าเท่าเดิม) สำหรับการวิเคราะห์แบบลงค์สามารถทำได้โดยใช้น้ำปราศจากไอออน ที่มีการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่างและใช้กระบวนการวิเคราะห์เช่นเดิม จากนั้นนำน้ำตัวอย่าง

ไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 543 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไนไตรต์มาตรฐาน (Standard nitrite solution) ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 มก.ไนไตรต์-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งเตรียมจากสารละลายสต็อกไนไตรต์ (Stock nitrite solution) ความเข้มข้น 100 มก.ไนไตรต์-ไนโตรเจน/ล. ดังกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ไนไตรต์ในรูปที่ ก-2



รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณไนไตรต์ไนโตรเจน

ก.3 วิธีวิเคราะห์ปริมาณไนเตรต

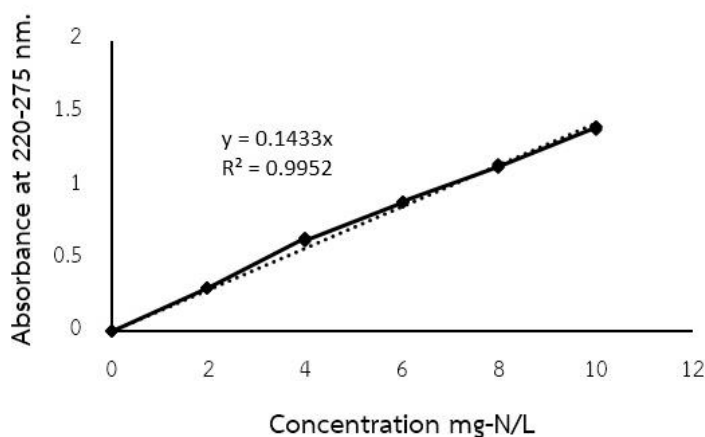
การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไนเตรตไนโตรเจนในน้ำดัดแปลงมาจากวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Standard Method (2005) [7] โดยมีการวิเคราะห์ดังนี้

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

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

ขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการปิบน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มล. ใส่ในหลอดทดลองโดยไม่มีการเติมสารเคมีลงไป สำหรับการวิเคราะห์แบบลดค่าสามารถทำได้โดยใช้น้ำปราศจากไอออน. ที่ไม่มีการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่าง จากนั้นนำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 220 และ 275 นาโนเมตร นำผลต่างของค่าการ

ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นทั้งสองมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณไนเตรตไนโตรเจนในน้ำโดยค่าที่คำนวณได้จะต้องทำการหักลบกับปริมาณไนเตรตที่วิเคราะห์ได้จากตัวอย่างเดียวกันเนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ไนเตรตตาม Standard Method (2005) จะมีปริมาณไนเตรตรวมอยู่ด้วย เปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไนเตรตมาตรฐาน (Standard nitrate solution) ที่ความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 และ 10 มก.ไนเตรต-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งเตรียมจากสารละลายสต็อกไนเตรต (Stock nitrate solution) ความเข้มข้น 100 มก.ไนเตรต-ไนโตรเจน/ล. ดังกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ไนเตรตในรูปที่ ก-3



รูปที่ ก-3 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรตไนโตรเจน

ก.4 วิธีวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณของตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำอาศัยวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Standard Method (2005) โดยขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการอบกระดาษกรอง (Whatman GF/C) ขนาด 47 มม. ที่อุณหภูมิ 103 – 105 °ซ เป็นเวลา 24 ชม. และซังน้ำหนักด้วยเครื่องซังตนิยม 4 ตำแหน่ง เพื่อเก็บข้อมูลน้ำหนักแห้งของกระดาษกรอง จากนั้นกรองน้ำตัวอย่างด้วยปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ทำการอบและซังน้ำหนักกระดาษกรองที่ผ่านการกรองน้ำตัวอย่างเช่นเดิมเพื่อนำผลต่างของน้ำหนักกระดาษกรองที่เพิ่มขึ้นมาคำนวณหาปริมาณของตะกอนแขวนลอยทั้งหมด (ดังสมการที่ ก-1)

$$\text{ตะกอนแขวนลอยทั้งหมด} = \frac{[\text{นน.กระตาศหลังกรอง (ก.)} - \text{นน.กระตาศก่อน (ก.)}] \times 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มล.)}} \quad (\text{ก-1})$$

(มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล.)

ก.5 วิธีวิเคราะห์ค่าการตกตะกอนในเวลา 30 นาที (SV₃₀)

การวิเคราะห์ปริมาณของตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำอาศัยวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Standard Method (2005) โดยขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากเติมน้ำที่มีตะกอนแขวนลอยในกรวยอิมฮอฟ (Imhoff cone) จนได้ปริมาตร 1 ล. จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 30 นาที และอ่านค่าปริมาตรของตะกอนที่ตกตะกอนอยู่บริเวณส่วนล่างของกรวยอิมฮอฟ โดยค่าที่ได้จะนำไปใช้ในการคำนวณค่าดัชนีปริมาณตะกอน

ก.6 วิธีวิเคราะห์ค่าดัชนีปริมาณตะกอน (SVI)

การวิเคราะห์ปริมาณของตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำอาศัยวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Standard Method (2005) โดยขั้นตอนปราศจากไอออน การวิเคราะห์ค่าดัชนีปริมาณตะกอนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ ก-2

$$\text{ค่าดัชนีปริมาณตะกอน (มล./ก.)} = \frac{\text{ค่าการตกตะกอนในเวลา 30 นาที (มล./ล.)} \times 1000}{\text{ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมด (มก./ล.)}} \quad (\text{ก-2})$$

ก.7 การคำนวณประสิทธิภาพการกรอง

การประเมินประสิทธิภาพการกรองของหน่วยกรองตะกอนสามารถคำนวณได้จากค่าร้อยละของผลต่างระหว่างความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในน้ำก่อนเข้าหน่วยกรองตะกอนกับน้ำหลังผ่านหน่วยแยกตะกอน (ดังสมการที่ ก-3)

$$\text{ประสิทธิภาพการกรอง} = [(C_0 - C_1) / C_0] \times 100 \quad (\text{ก-3})$$

โดยที่ C_0 = ความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในน้ำก่อนเข้าหน่วยกรองตะกอน

C_1 = ความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในน้ำหลังผ่านหน่วยแยกตะกอน

ก.8 เกณฑ์คุณภาพน้ำที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ

ธาตุ	รูปแบบไอออนในน้ำ	ความเข้มข้นที่เหมาะสม		
		(Lawson, 1995)	(Boyd, 1998)	(Timmons และคณะ 2002)
Dissolved Oxygen	Molecular Oxygen (O ₂) (mg/l)	5 - saturation	5 - 15	> 5
Hydrogen	H ⁺ [-log (H ⁺) = pH]	pH 6.5 - 8	pH 7 - 9	pH 6.5 - 8.5
Nitrogen	Molecular Nitrogen (N ₂) (% as nitrogen gas)	< 103%	Saturation or less	< 103%
	Total Ammonia Nitrogen (mg/l)	< 1		< 1 cool water < 3 warm water
	Ammonium (NH ₄ ⁺) (mg/l)	-	0.2 - 2 mg/l	-
	Ammonia (NH ₃) (mg/l)	< 0.02	< 0.1	< 0.0125 (Salmonids)
	Nitrate (NO ₃ ⁻) (mg/l)	0 - 3	0.2 - 10	0 - 400
	Nitrite (NO ₂ ⁻) (mg/l)	0.1 in soft water	< 0.3	< 1
Sulfur	Hydrogen Sulfide (H ₂ S) (mg/l)	< 1	Not detectable	< 0.02
	Sulfate (SO ₄ ⁻) (mg/l)	< 50	5 - 100	< 50
Carbon	Carbon Dioxide (CO ₂) (mg/l)	0 - 10	1 - 10	< 60
Calcium	Calcium ion (Ca ²⁺) (mg/l)	4 - 160	5 - 100	4 - 160
Magnesium	Magnesium ion (Mg ²⁺) (mg/l)	< 15	5 - 100	< 15
Alkalinity	(mg/l) as CaCO ₃	10 - 400	-	50 - 300
Bicarbonate	Bicarbonate ion (HCO ₃ ⁻) (mg/l)	-	50 - 300	-
Carbonate	Carbonate ion (CO ₃ ⁻) (mg/l)	-	0 - 20	-
Phosphorus	Phosphorus ion (HPO ₄ ²⁻ , H ₂ PO ₄ ⁻) (mg/l)	-	0.005 - 0.2	0.01 - 3
Chlorine	(Cl) (mg/l)	<0.003	-	<0.003

ภาคผนวก ข

ตาราง ข-1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ไนโตรเจนของการเลี้ยงปลาชนิดด้วยเทคโนโลยีไบโอฟล็อก เมื่อเติมแอมโมเนียสำหรับปลาในในวันที่ 1 ถึงวันที่ 12 ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:1

วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	0.33
3	2.10	0.04	0.06	0.00	1.06	0.39
6	1.41	0.10	0.23	0.00	1.87	0.46
9	0.19	0.02	0.40	0.01	2.01	0.02
12	0.02	0.03	0.18	0.00	0.82	0.08
15	3.62	0.13	0.71	0.00	2.06	0.10
18	0.54	0.02	1.02	0.06	15.18	0.78
21	0.00	0.00	1.00	0.01	19.68	1.24
24	0.00	0.00	1.01	0.03	32.97	0.49
27	0.00	0.00	1.00	0.02	32.36	1.54
30	0.00	0.00	1.03	0.03	33.22	2.27
33	0.00	0.00	0.06	0.00	37.70	2.32
36	0.00	0.00	0.02	0.00	49.17	1.43
39	0.00	0.00	0.06	0.00	43.75	2.40
42	0.00	0.00	0.05	0.00	46.39	2.83
45	0.02	0.01	0.03	0.00	53.85	4.42
48	0.00	0.00	0.02	0.00	67.19	1.46
51	0.00	0.00	0.02	0.00	53.55	4.03
54	0.00	0.00	0.07	0.09	65.84	5.76
57	0.00	0.00	0.02	0.00	72.59	5.78
60	0.00	0.00	0.02	0.00	66.70	14.66

ตาราง ข-2 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางกายภาพ ของการเลี้ยงปลานิลด้วยเทคโนโลยี
ไบโอฟล็อก เมื่อเติมแป้งมันสำปะหลังในวันที่ 1 ถึงวันที่ 12 ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อ
ไนโตรเจนเท่ากับ 10:1

วันที่	ปริมาณออกซิเจนละลาย (มก.ออกซิเจน/ล.)	พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ค่าความเป็นต่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)
0	8.71	8.74	27.8	160
3	8.96	8.37	25.2	160
6	9.25	8.44	21.4	160
9	8.78	8.25	22.3	190
12	7.76	8.16	26.9	180
15	7.96	8.39	27.8	220
18	8.16	8.26	27.5	180
21	7.93	8.30	27.1	170
24	8.45	8.20	26.2	160
27	8.94	8.14	25.1	140 / 170*
30	8.23	8.27	25.1	160
33	7.94	8.20	27.7	170
36	7.56	8.16	28.0	150
39	7.91	8.13	28.3	120 / 180*
42	8.12	8.26	27.8	170
45	7.95	8.16	28.5	180
48	8.7	8.19	28.8	150 / 180*
51	8.3	8.29	28.4	190
54	8.48	8.25	27.3	160
57	8.4	8.21	27.8	150
60	8.62	8.21	28.4	140

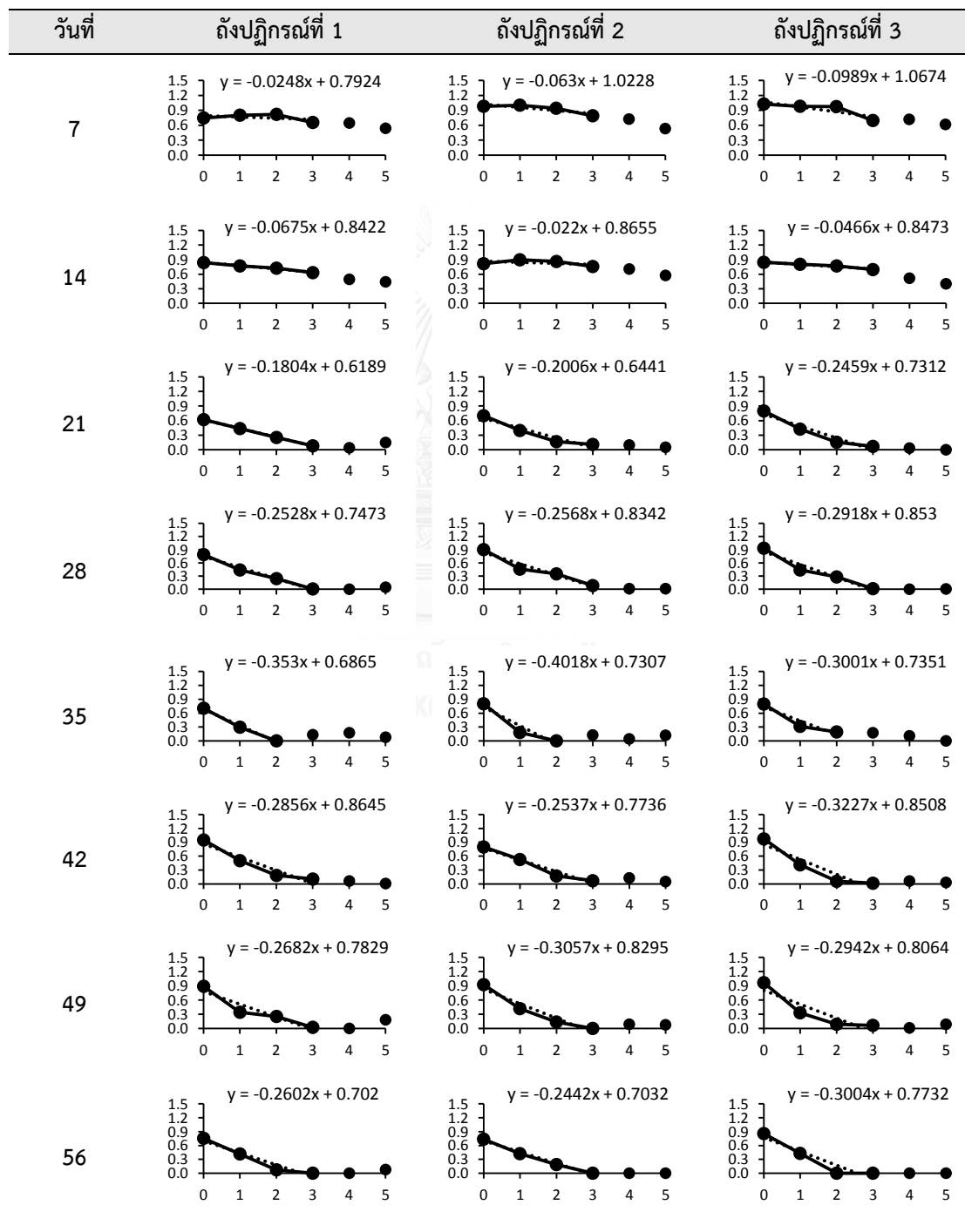
* แสดงค่าความเป็นต่างหลังการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO₃) ในระบบ

ตาราง ข-3 พารามิเตอร์ทางคุณภาพตกตะกอนของการเลี้ยงปลาชนิดด้วยเทคโนโลยีไบโอฟลอค
เมื่อเติมแอมโมเนียสำหรับปลาในในวันที่ 1 ถึงวันที่ 12 ที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
เท่ากับ 10:1

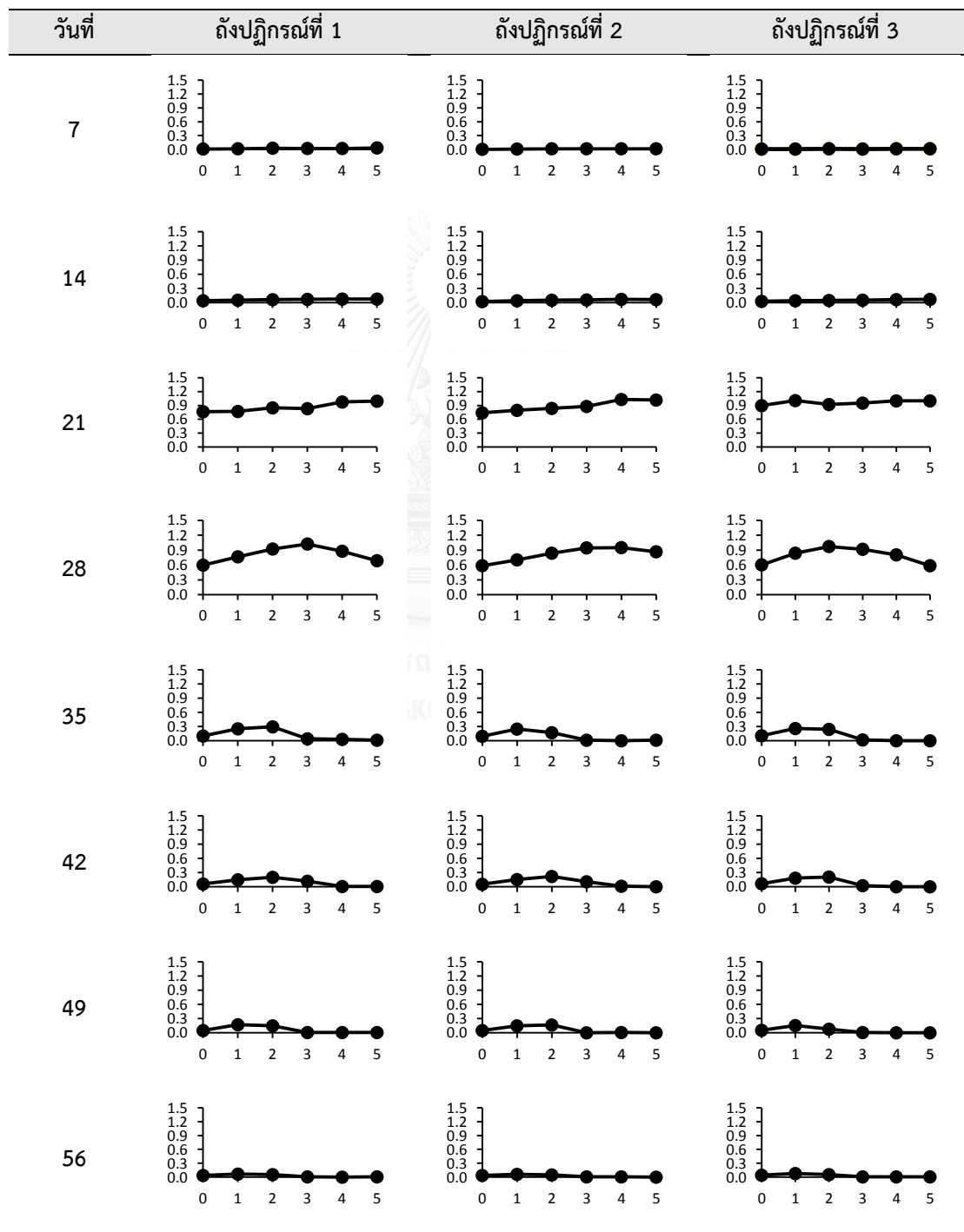
วันที่	ปริมาณตะกอนแขวนลอย (มก.ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด/ล.)		ปริมาณตะกอนที่ตกตะกอน ในเวลา 30 นาที (มล./ล.)		ดัชนีปริมาณตะกอน (มล./ก.)	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	105.00	10.14	2.00	0.00	19.05	0.00
6	237.50	9.01	8.00	0.00	33.68	0.00
9	390.00	20.28	23.00	0.50	58.97	1.28
12	431.67	30.14	61.67	0.58	142.86	1.34
15	426.67 / 168.33*	61.10 / 25.17*	51.33	3.06	120.31	7.16
18	204.44	1.93	15.00	1.00	73.37	4.89
21	224.44	13.47	6.33	0.58	28.22	2.57
24	2246.67	20.00	24.50	0.50	99.32	2.03
27	33.022 / 203.33*	20.37 / 5.77*	43.00	1.73	129.43	5.21
30	233.33	8.82	49.00	0.00	210.00	0.00
33	295.56	13.47	85.33	3.06	288.72	10.34
36	344.44 / 96.67*	10.72 / 3.33*	135.00	0.00	391.94	0.00
39	154.44	21.17	87.33	3.06	565.47	19.78
42	245.56	5.09	135.00	0.00	549.77	0.00
45	285.56	16.78	150.00	0.00	525.29	0.00
48	346.67 / 155.56*	3.33 / 5.09*	150.00	0.00	432.69	0.00
51	196.67	5.77	48.00	0.00	244.07	0.00
54	292.22	3.85	33.67	0.58	115.21	1.98
57	300.00	17.64	30.00	0.00	100.00	0.00
60	302.22	6.94	23.33	0.58	77.21	1.91

* แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณตะกอนแขวนลอยหลังการนำตะกอนไบโอฟลอคส่วนเกินออกจากระบบ

ตาราง ข-4 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย เมื่อทำการทดสอบอัตราการบำบัด
 แอมโมเนียของตะกอนไบโอฟลોકกระหว่างการทดลองช่วงที่ 1 ที่ความเข้มข้น
 แอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยแกน x คือ เวลา (ชม.) และ
 แกน y คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก. ไนโตรเจน/ล.)



ตาราง ข-5 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนไตรต์ เมื่อทำการทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟลั๊กระหว่างการทดลองครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยแกน x คือ เวลา (ชม.) และแกน y คือ ความเข้มข้นของไนไตรต์ (มก. ไนโตรเจน/ล.)



ตาราง ข-6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรต เมื่อทำการทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟล็อกระหว่างการทดลองครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยแกน x คือ เวลา (ชม.) และแกน y คือ ความเข้มข้นของไนเตรต (มก. ไนโตรเจน/ล.)

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

ภาคผนวก ค

ตาราง ค-1 ปริมาณตะกอนแขวนลอย เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่ติดตั้งแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดรูกรอง 76, 100, 130 และ 160 ไมครอน ด้วยอัตราการไหลคงที่ 3,000 ล./วัน

ขนาดรูกรอง (ไมครอน)	วันที่	ปริมาณตะกอนแขวนลอย (มก.ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด/ล.)					
		ถึงปฏิกรณ์ไบโอฟลอค		น้ำที่ผ่านการกรอง		ถึงเลี้ยงปลา	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
76	0	496.78	15.75	0.00	0.00	0.00	0.00
	1	294.67	3.33	35.56	3.85	33.33	3.33
	2	230.44	1.92	16.67	3.33	15.56	15.56
	3	251.22	5.09	31.11	1.92	27.78	5.09
	4	239.89	6.94	24.44	1.92	30.00	6.67
100	0	504.33	12.02	0.00	0.00	0.00	0.00
	1	258.78	16.78	37.78	5.09	34.44	5.09
	2	202.11	6.94	23.33	3.33	21.11	3.85
	3	213.44	20.09	33.33	5.77	31.11	5.09
	4	228.56	5.09	24.44	3.85	26.67	3.33
130	0	464.67	15.28	0.00	0.00	0.00	0.00
	1	232.33	10.00	41.11	1.92	38.89	1.92
	2	209.67	116.67	28.89	1.92	26.67	25.56
	3	170.00	3.33	26.67	5.77	25.56	5.09
	4	175.67	8.82	32.22	5.09	26.67	6.67
160	0	453.33	3.33	0.00	0.00	0.00	0.00
	1	224.78	7.70	45.56	5.09	26.67	8.82
	2	177.56	5.09	30.00	3.33	25.56	5.09
	3	149.22	8.39	31.11	5.09	32.22	5.09
	4	130.33	21.86	21.11	1.92	20.00	8.82
	5	98.22	6.94	20.00	3.33	17.78	5.09

ตาราง ค-2 ปริมาณน้ำในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกและถังเลี้ยงปลา ประสิทธิภาพการแยกตะกอน และน้ำหนักแห้งของตะกอนทั้งหมด เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่ติดตั้งแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดรูกรอง 76, 100, 130 และ 160 ไมครอน โดยใช้อัตราการไหลคงที่ 3,000 ล./วัน

ขนาดรูกรอง (ไมครอน)	วันที่	ปริมาณน้ำ (ล.)		ประสิทธิภาพการ แยกตะกอน (%)	น้ำหนักแห้งของ ตะกอนทั้งหมด (ก.)
		ถังปฏิกรณ์ ไบโอฟล็อก	ถังเลี้ยง ปลา		
76	0	100	200	-	49.68
	1	88	212	87.93	33.00
	2	88	212	92.77	23.58
	3	88	212	87.62	28.00
	4	88	212	89.81	27.47
	5	88	212	85.42	26.00
100	0	100	200	-	50.43
	1	80	220	85.40	28.28
	2	80	220	88.46	20.81
	3	80	220	84.38	23.92
	4	80	220	89.31	24.15
	5	80	220	86.10	22.49
130	0	100	200	-	46.47
	1	79	221	82.31	27.44
	2	79	221	86.22	22.95
	3	79	221	84.31	19.32
	4	79	221	81.66	21.00
	5	79	221	84.78	18.09
160	0	100	222	-	45.33
	1	78	222	56.38	23.45
	2	78	222	71.28	19.52
	3	78	222	64.56	18.79
	4	78	222	72.46	14.61
	5	78	222	65.38	11.61

ตาราง ค-3 ปริมาณตะกอนแขวนลอย เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอนแบบ
กรวยกรองที่อัตราการไหล 1,500 3,000 4,500 และ 6,000 ล./วัน โดยติดตั้งแผ่น
กรองสแตนเลสที่มีขนาดรูกรองคงที่ 100 ไมครอน

อัตราการไหล (ล./วัน)	วันที่	ปริมาณตะกอนแขวนลอย (มก.ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด/ล.)					
		ถึงปฏิกรณ์ไบโอฟล็อก		น้ำที่ผ่านการกรอง		ถึงถังปลานิล	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1,500	0	472.22	17.11	0.00	0.00	0.00	0.00
	1	316.67	25.17	36.67	12.02	38.89	6.94
	2	296.67	20.00	21.11	6.94	24.44	6.94
	3	271.11	1.92	24.44	8.39	27.78	6.94
	4	251.11	10.18	22.22	1.92	22.22	6.94
	5	246.67	12.02	17.78	3.85	16.67	3.33
3,000	0	472.22	17.11	0.00	0.00	0.00	0.00
	1	303.33	3.33	26.67	5.77	32.22	8.39
	2	247.78	5.09	33.33	5.77	24.44	6.94
	3	223.33	5.77	17.78	3.85	18.89	3.85
	4	292.22	17.11	42.22	6.94	32.22	1.92
	5	272.22	11.71	26.67	3.33	24.44	1.92
4,500	0	472.22	17.11	0.00	0.00	0.00	0.00
	1	350.00	14.53	37.78	8.39	40.00	8.82
	2	315.56	10.18	38.89	8.39	33.33	8.82
	3	304.44	12.62	31.11	3.85	34.44	1.92
	4	217.78	10.72	33.33	8.82	20.00	3.33
	5	204.44	15.03	26.67	3.33	24.44	1.92

ตาราง ค-4 ปริมาณน้ำในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อกและถังเลี้ยงปลา ประสิทธิภาพการแยกตะกอน และน้ำหนักแห้งของตะกอนทั้งหมด เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอนแบบกรวยกรองที่อัตราการไหล 1,500 3,000 4,500 และ 6,000 ล./วัน โดยติดตั้งแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดรูกรองคงที่ 100 ไมครอน

อัตราการไหล (ล./วัน)	วันที่	ปริมาณน้ำ (ล.)		ประสิทธิภาพการ แยกตะกอน (%)	น้ำหนักแห้งของ ตะกอนทั้งหมด (ก.)
		ถังปฏิกรณ์ ไบโอฟล็อก	ถังเลี้ยง ปลานิล		
1,500	0	100	200	-	47.22
	1	76	224	88.42	32.78
	2	76	224	92.88	28.02
	3	76	224	90.98	26.83
	4	76	224	91.15	24.06
	5	76	224	92.79	22.48
3,000	0	100	200	-	47.22
	1	80	220	91.21	31.36
	2	80	220	86.55	25.20
	3	80	220	92.04	22.02
	4	80	220	85.55	30.47
	5	80	220	90.20	27.16
4,500	0	100	200	-	47.22
	1	88	212	89.21	39.28
	2	88	212	87.68	34.84
	3	88	212	89.78	34.09
	4	88	212	84.69	23.40
	5	88	212	86.96	23.17

ภาคผนวก ง

ตาราง ง-1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ไนโตรเจน เมื่อทำการประเมินประสิทธิภาพของตะกอนไบโอฟล็อกในการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนจากถังเลี้ยงปลานิล สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งหน่วยแยกตะกอนจำนวน 3 บ่อ

วันที่	แอมโมเนีย		ไนไตรต์		ไนเตรต	
	(มก.ไนโตรเจน/ล.)		(มก.ไนโตรเจน/ล.)		(มก.ไนโตรเจน/ล.)	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.72	0.00
3	1.84	0.10	0.01	0.00	1.04	0.10
6	1.24	0.07	0.03	0.00	1.25	0.18
9	0.00	0.00	0.03	0.01	1.31	0.13
12	0.00	0.00	0.03	0.01	1.39	0.12
15	0.00	0.00	0.04	0.02	1.82	0.12
18	0.23	0.40	0.08	0.09	2.21	0.38
21	1.51	1.30	0.38	0.26	2.93	0.31
24	0.18	0.16	0.70	0.51	3.60	0.67
27	0.52	0.17	0.52	0.25	3.51	0.91
30	3.28	2.61	2.34	2.11	4.28	0.57
33	0.04	0.02	1.96	2.19	5.07	0.57
36	0.08	0.09	1.26	1.12	4.41	1.13
39	0.01	0.01	0.14	0.12	5.01	1.76
42	0.33	0.38	1.41	0.87	4.82	1.10
45	0.12	0.09	2.28	1.30	6.32	3.41
48	0.02	0.03	6.04	3.63	7.68	6.03
51	0.00	0.01	4.54	7.00	15.12	7.97
54	0.00	0.00	3.41	5.64	22.79	5.66
57	0.00	0.00	0.14	0.04	29.54	3.30
60	0.01	0.01	0.12	0.03	31.90	4.86
63	0.02	0.03	0.14	0.05	41.56	6.22
66	0.01	0.01	0.26	0.11	45.13	6.66
69	0.03	0.04	0.29	0.15	52.02	4.98
70	0.03	0.03	0.11	0.01	54.12	4.54

ตาราง ง-2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ไนโตรเจน เมื่อทำการประเมินประสิทธิภาพของตะกอนไบโอฟล็อกในการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนจากถังเลี้ยงปลานิล สำหรับชุดทดลองที่มีการติดตั้งหน่วยแยกตะกอนจำนวน 3 บ่อ

วันที่	แอมโมเนีย		ไนไตรต์		ไนเตรต	
	(มก.ไนโตรเจน/ล.)		(มก.ไนโตรเจน/ล.)		(มก.ไนโตรเจน/ล.)	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.72	0.00
3	1.76	0.05	0.03	0.03	0.83	0.03
6	0.85	0.11	0.09	0.04	1.04	0.01
9	0.00	0.00	0.06	0.01	1.19	0.10
12	0.02	0.02	0.07	0.03	1.54	0.27
15	0.05	0.09	0.06	0.04	1.98	0.57
18	0.04	0.02	0.10	0.08	2.53	0.55
21	0.51	0.09	0.49	0.22	3.23	0.32
24	0.22	0.05	0.33	0.21	3.05	0.31
27	0.12	0.03	0.19	0.17	3.43	0.38
30	0.39	0.26	1.56	0.99	3.99	0.81
33	0.08	0.04	0.16	0.09	4.46	0.30
36	0.68	0.84	0.19	0.08	4.22	0.62
39	0.16	0.03	0.30	0.03	5.14	0.65
42	0.16	0.03	1.34	0.85	5.43	1.66
45	0.15	0.09	1.29	1.09	6.70	2.28
48	0.14	0.04	1.93	1.20	9.93	3.01
51	0.07	0.03	0.81	0.52	15.88	5.04
54	0.01	0.01	0.21	0.08	21.04	5.87
57	0.00	0.00	0.20	0.06	28.12	6.30
60	0.01	0.01	0.25	0.12	29.83	3.86
63	0.02	0.02	0.28	0.09	37.42	10.14
66	0.16	0.07	0.36	0.08	41.23	11.82
69	0.12	0.05	0.34	0.15	47.08	12.77
70	0.13	0.01	0.33	0.14	50.33	13.73

ตาราง ง-3 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางกายภาพ เมื่อทำการประเมินประสิทธิภาพของ ตะกอนไปโอฟล็อกในการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนจากถังเลี้ยงปลานิล สำหรับชุด ความคุมที่ไม่มีการติดตั้งหน่วยแยกตะกอนจำนวน 3 บ่อ

วันที่	ปริมาณออกซิเจนละลาย		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
0	8.05	0.07	8.22	0.01	26.83	0.06
3	7.84	0.13	8.05	0.02	27.00	0.10
6	7.92	0.12	7.90	0.08	28.70	0.10
9	8.08	0.07	7.67	0.06	26.47	0.06
12	7.68	0.11	7.55	0.06	27.57	0.06
15	7.41	0.07	7.41	0.07	27.93	0.15
18	6.85	0.11	7.68	0.03	27.53	0.06
21	6.71	0.16	7.87	0.04	27.43	0.06
24	7.00	0.12	7.80	0.05	28.40	0.00
27	7.04	0.20	7.74	0.02	27.60	0.10
30	6.07	0.05	7.82	0.03	28.70	0.10
33	6.77	0.06	7.84	0.09	27.27	0.06
36	7.27	0.22	7.95	0.01	26.90	0.00
39	6.89	0.12	7.87	0.04	27.10	0.10
42	6.80	0.26	7.80	0.03	27.57	0.12
45	7.22	0.07	7.81	0.02	27.23	0.06
48	7.35	0.09	7.73	0.05	26.83	0.06
51	7.02	0.17	7.86	0.02	27.53	0.06
54	6.91	0.24	7.68	0.16	27.80	0.10
57	6.85	0.32	7.62	0.03	28.47	0.06
60	6.55	0.29	7.85	0.01	27.67	0.06
63	5.96	0.18	8.02	0.01	27.13	0.06
66	6.08	0.05	7.85	0.04	26.83	0.06
69	6.07	0.13	7.50	0.06	27.00	0.26
70	6.05	0.09	7.41	0.05	26.87	0.06

ตาราง ง-4 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางกายภาพ เมื่อทำการประเมินประสิทธิภาพของ ตะกอนไปโอฟล็อกในการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนจากถังเลี้ยงปลานิล สำหรับชุด ทดลองที่มีการติดตั้งหน่วยแยกตะกอนจำนวน 3 บ่อ

วันที่	ปริมาณออกซิเจนละลาย		พีเอช		อุณหภูมิ (°ซ)	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
0	7.90	0.16	8.22	0.01	26.83	0.06
3	7.74	0.08	8.04	0.03	26.90	0.10
6	7.79	0.07	7.68	0.09	28.73	0.12
9	7.86	0.04	7.55	0.02	26.47	0.06
12	7.70	0.07	7.46	0.03	27.57	0.06
15	7.15	0.04	7.60	0.04	28.17	0.06
18	6.94	0.02	7.66	0.05	27.50	0.10
21	7.11	0.15	7.77	0.03	27.57	0.12
24	7.04	0.19	7.72	0.06	28.47	0.06
27	6.61	0.09	7.66	0.04	27.70	0.10
30	6.49	0.03	7.72	0.03	28.63	0.06
33	7.07	0.09	7.83	0.07	27.20	0.00
36	7.25	0.14	7.91	0.07	26.83	0.06
39	7.10	0.10	7.85	0.04	27.17	0.06
42	7.09	0.10	7.81	0.01	27.57	0.06
45	7.20	0.11	7.77	0.07	27.17	0.12
48	7.22	0.08	7.78	0.03	26.73	0.06
51	7.23	0.06	7.82	0.03	27.57	0.06
54	7.06	0.03	7.70	0.01	27.80	0.10
57	6.68	0.12	7.70	0.06	28.47	0.06
60	6.37	0.05	7.81	0.03	27.53	0.06
63	6.23	0.16	8.04	0.02	27.23	0.06
66	6.22	0.11	7.80	0.05	26.83	0.12
69	6.20	0.06	7.53	0.05	26.97	0.12
70	6.20	0.03	7.48	0.04	26.8	0.1

ตาราง ง-5 ปริมาณตะกอนแขวนลอยในถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อก ถังเลี้ยงปลาชนิด และรวมทั้งระบบ
ของชุดควบคุมและชุดทดลอง เมื่อทำการประเมินประสิทธิภาพของตะกอนไบโอฟล็อก
ในการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนจากถังเลี้ยงปลาชนิด

	วันที่	ปริมาณตะกอนแขวนลอย (มก.ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด/ล.)					
		ถังปฏิกรณ์ไบโอฟล็อก		ถังเลี้ยงปลาชนิด		รวมทั้งระบบ	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
ชุดควบคุม	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	7	208.33	37.53	141.67	24.66	159.44	21.86
	14	366.67	44.81	220.00	52.68	259.11	27.92
	21	433.33	29.30	378.33	37.53	393.00	35.24
	28	353.33	34.03	301.67	67.52	315.44	52.45
	35	208.33	48.05	175.00	25.00	183.89	28.17
	42	333.33	10.41	318.33	7.64	322.33	7.55
	49	230.00	75.66	236.67	88.36	234.89	84.81
	56	336.67	42.52	353.33	40.41	348.89	37.48
	63	258.33	45.37	256.67	47.52	257.11	46.47
ชุดทดลอง	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	7	520.00	86.75	11.67	2.89	147.22	21.59
	14	513.33	127.51	40.00	25.98	166.22	38.79
	21	350.00	39.05	86.67	38.19	156.89	36.84
	28	568.33	79.43	115.00	21.79	235.89	30.88
	35	403.33	101.16	68.33	29.30	157.67	39.18
	42	851.67	61.10	75.00	18.03	282.11	7.01
	49	551.67	88.36	95.00	5.00	216.78	23.54
	56	860.00	86.75	148.33	64.29	338.11	64.39
	63	631.67	115.79	120.00	62.45	256.44	41.72
70	690.00	96.57	176.67	30.55	313.56	36.62	

ตาราง ง-6 ปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนในเวลา 30 นาที และดัชนีปริมาณตะกอนในถังถังปฏิกรณ์
ไบโอฟล็อกและถังเลี้ยงปลาชนิดของชุดควบคุมและชุดทดลอง เมื่อทำการประเมิน
ประสิทธิภาพของตะกอนไบโอฟล็อกในการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนจากถังเลี้ยง
ปลาชนิด

วันที่	ปริมาณตะกอนที่ตกตะกอนในเวลา 30 นาที (มล./ล.)				ดัชนีปริมาณตะกอน (มล./ก.)				
	ถังปฏิกรณ์ ไบโอฟล็อก		ถังเลี้ยงปลาชนิด		ถังปฏิกรณ์ ไบโอฟล็อก		ถังเลี้ยงปลาชนิด		
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	
ชุดควบคุม	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	7	16.67	5.77	12.67	6.66	80.00	27.71	89.41	47.00
	14	15.67	1.15	13.33	1.53	42.73	3.15	60.61	6.94
	21	32.33	10.69	26.67	12.22	74.62	24.68	70.48	32.30
	28	12.00	4.33	11.00	3.61	33.96	12.26	36.46	11.95
	35	6.00	3.00	5.33	3.51	28.80	14.40	30.48	20.07
	42	23.33	2.52	18.00	2.00	70.00	7.55	56.54	6.28
	49	8.67	9.29	6.07	7.75	37.68	40.40	25.63	32.73
	56	13.33	2.52	12.67	1.53	39.60	7.48	35.85	4.32
	63	25.33	10.69	26.00	9.64	98.06	41.39	101.30	37.57
	70	48.33	4.16	48.33	5.51	112.84	9.72	115.54	13.17
ชุดทดลอง	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	7	26.00	3.61	0.00	0.00	50.00	6.93	0.00	0.00
	14	16.67	3.06	0.00	0.00	32.47	5.95	0.00	0.00
	21	11.33	5.97	0.67	1.15	32.38	17.04	7.69	13.32
	28	23.33	6.11	0.43	0.31	41.06	10.75	3.77	2.66
	35	15.00	6.93	0.43	0.49	37.19	17.18	6.34	7.22
	42	52.33	4.04	0.67	0.15	61.45	4.75	8.89	2.04
	49	16.00	3.61	0.10	0.00	29.00	6.54	1.05	0.00
	56	29.00	10.15	2.03	1.95	33.72	11.80	13.71	13.15
	63	24.00	4.58	0.53	0.45	37.99	7.25	4.44	3.76
70	76.67	7.64	1.33	0.58	111.11	11.07	7.55	3.27	

ตาราง ง-7 ค่าความเป็นต่างของชุดควบคุมและชุดทดลอง เมื่อทำการประเมินประสิทธิภาพของ ตะกอนไบโอฟล็อกในการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนจากถังเลี้ยงปลา

วันที่	ค่าความเป็นต่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)			
	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
0	80.00	0.00	80.00	0.00
7	110.00	0.00	116.67	5.77
14	133.33	5.77	136.67	5.77
21	163.33	5.77	166.67	5.77
28	230.00	17.32	213.33	5.77
35	233.33	5.77	233.33	5.77
42	210.00	20.00	210.00	17.32
49	193.33	11.55	206.67	20.82
56	160.00	10.00	170.00	10.00
63	143.33	5.77	143.33	20.82
70	126.67	5.77	126.67	25.17

ตาราง ง-9 ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดที่นำออกจากระบบของชุดควบคุมและชุดทดลอง

ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดที่นำออกจากระบบ (ก.ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด)		
ชุดควบคุม	1	1000.87
	2	1092.70
	3	1064.57
ชุดทดลอง	1	1045.37
	2	1063.31
	3	1087.70

ตาราง ง-9 อัตราการให้อาหาร ปริมาณอาหาร อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และปริมาณ
 แป้งมันสำปะหลังที่ได้รับในแต่ละวันของชุดควบคุมและชุดทดลองระหว่างการทดลอง
 ช่วงที่ 3

วันที่	อัตราการให้อาหาร (ร้อยละของน้ำหนักปลา)	ปริมาณอาหาร (ก.)	อัตราส่วนคาร์บอน ต่อไนโตรเจน (C:N)	ปริมาณแป้ง มันสำปะหลัง (ก.)
0	0.00	0.00	10.00	0.00
1	3.00	27.00	10.00	18.16
2	3.00	27.00	10.00	18.16
3	3.00	27.00	10.00	18.16
4	3.00	27.00	10.00	18.16
5	3.00	27.00	10.00	18.16
6	3.00	27.00	10.00	18.16
7	3.00	27.00	10.00	18.16
8	3.00	27.00	10.00	18.16
9	3.00	27.00	10.00	18.16
10	3.00	27.00	10.00	18.16
11	3.00	27.00	10.00	18.16
12	3.00	27.00	10.00	18.16
13	4.00	42.55	10.00	28.62
14	4.00	42.55	10.00	28.62
15	4.00	42.55	10.00	28.62
16	4.00	42.55	10.00	28.62
17	4.00	42.55	10.00	28.62
18	4.00	42.55	5.00	14.31
19	4.00	42.55	5.00	14.31
20	4.00	42.55	5.00	14.31
21	4.00	42.55	10.00	28.62
22	4.00	42.55	10.00	28.62
23	4.00	42.55	10.00	28.62
24	4.00	42.55	10.00	28.62
25	4.00	53.20	10.00	35.77
26	4.00	53.20	10.00	35.77
27	4.00	53.20	10.00	35.77
28	4.00	53.20	10.00	35.77

วันที่	อัตราการให้อาหาร (ร้อยละของน้ำหนักปลา)	ปริมาณอาหาร (ก.)	อัตราส่วนคาร์บอน ต่อไนโตรเจน (C:N)	ปริมาณแป้ง มันสำปะหลัง (ก.)
29	4.00	53.20	10.00	35.77
30	4.00	53.20	10.00	35.77
31	4.00	53.20	10.00	35.77
32	4.00	53.20	10.00	35.77
33	4.00	53.20	10.00	35.77
34	4.00	53.20	10.00	35.77
35	4.00	53.20	10.00	35.77
36	4.00	53.20	10.00	35.77
37	4.00	60.63	10.00	40.76
38	4.00	60.63	10.00	40.76
39	4.00	60.63	5.00	20.40
40	4.00	60.63	5.00	20.40
41	4.00	60.63	5.00	20.40
42	4.00	60.63	5.00	20.40
43	4.00	60.63	5.00	20.40
44	4.00	60.63	5.00	20.40
45	4.00	60.63	0.00	0.00
46	4.00	60.63	0.00	0.00
47	1.00	15.16	0.00	0.00
48	1.00	15.16	0.00	0.00
49	1.00	18.51	0.00	0.00
50	1.00	18.51	0.00	0.00
51	1.00	18.51	0.00	0.00
52	1.00	18.51	0.00	0.00
53	2.00	37.02	0.00	0.00
54	2.00	37.02	0.00	0.00
55	2.00	37.02	0.00	0.00
56	3.00	55.54	0.00	0.00
57	3.00	55.54	0.00	0.00
58	3.00	55.54	0.00	0.00
59	4.00	74.05	0.00	0.00
60	4.00	74.05	0.00	0.00
61	3.50	81.00	0.00	0.00

วันที่	อัตราการให้อาหาร (ร้อยละของน้ำหนักปลา)	ปริมาณอาหาร (ก.)	อัตราส่วนคาร์บอน ต่อไนโตรเจน (C:N)	ปริมาณแบ่ง มันสำปะหลัง (ก.)
62	3.50	81.00	0.00	0.00
63	3.50	81.00	0.00	0.00
64	3.50	81.00	0.00	0.00
65	3.50	81.00	0.00	0.00
66	3.50	81.00	0.00	0.00
67	3.50	81.00	0.00	0.00
68	3.50	81.00	0.00	0.00
69	3.50	81.00	0.00	0.00
70	0.00	0.00	0.00	0.00
รวม		3338.44		1151.59

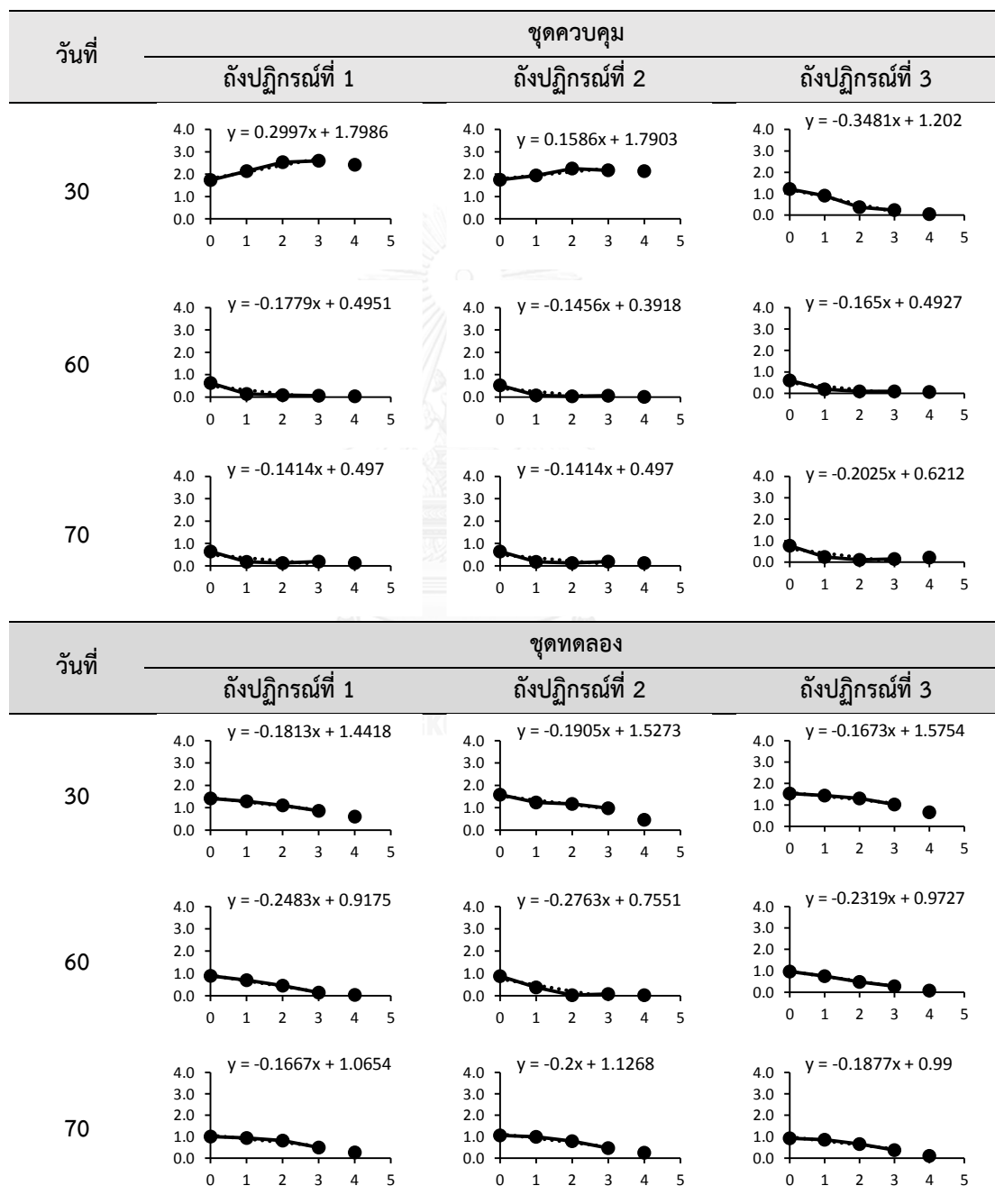
ตาราง ง-10 น้ำหนักเฉลี่ยของปลานิลของชุดควบคุมและชุดทดลองระหว่างการทดลองช่วงที่ 3

	วันที่	น้ำหนักปลานิล (ก.)					
		ชุดที่ 1		ชุดที่ 2		ชุดที่ 3	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
ชุดควบคุม	0	16.36	1.91	16.36	1.91	16.36	1.91
	12	19.42	4.73	18.05	3.42	20.21	3.61
	24	22.34	2.56	24.14	3.83	26.18	4.19
	36	25.93	3.45	29.40	3.60	28.13	6.84
	48	34.20	5.48	35.49	5.73	31.76	4.67
	60	43.97	3.62	40.77	3.68	43.66	4.96
	70	55.41	3.41	57.77	9.47	61.65	4.86
ชุดทดลอง	0	16.36	1.91	16.36	1.91	16.36	1.91
	12	18.93	2.72	19.82	2.81	19.62	1.83
	24	23.96	2.30	23.55	3.11	24.92	5.28
	36	26.71	3.81	27.32	4.34	27.89	5.89
	48	31.35	6.33	34.60	5.30	34.56	1.77
	60	41.27	3.31	40.44	2.24	42.40	4.74
	70	57.73	4.43	52.24	4.14	53.65	7.30

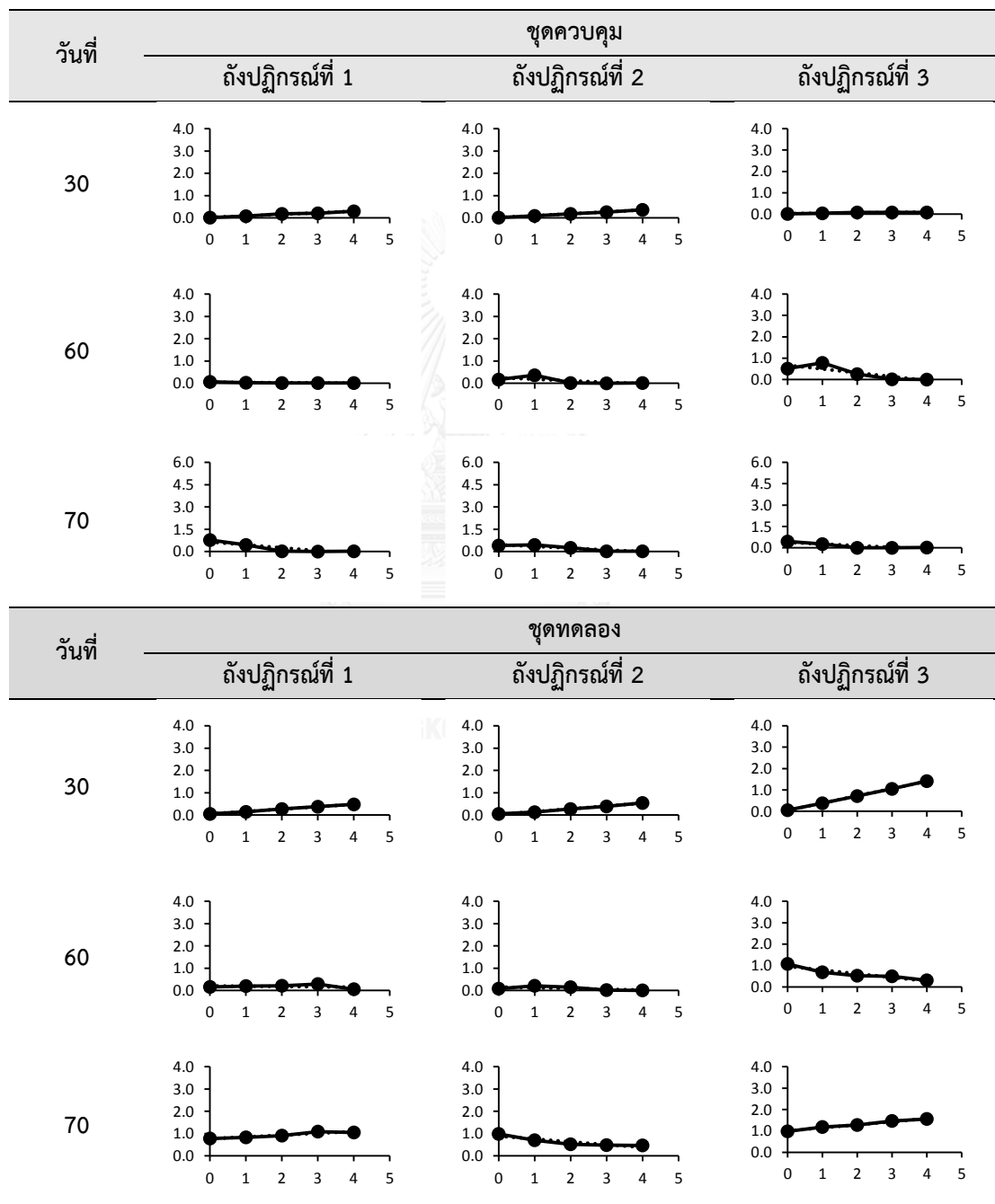
ตาราง ง-11 ความยาวเฉลี่ยของปลานิลของชุดควบคุมและชุดทดลองระหว่างการทดลองช่วงที่ 3

	วันที่	ความยาวปลานิล (ซม.)					
		ชุดที่ 1		ชุดที่ 2		ชุดที่ 3	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
ชุดควบคุม	0	9.97	0.48	9.97	0.48	9.97	0.48
	12	10.42	0.77	10.20	0.60	10.42	0.60
	24	11.08	0.24	11.16	0.50	11.42	0.49
	36	11.40	0.37	11.86	0.44	11.76	0.60
	48	12.54	0.21	12.38	0.76	12.02	0.51
	60	13.40	0.45	13.28	0.19	13.52	0.48
	70	13.80	0.57	14.12	0.83	14.48	0.68
ชุดทดลอง	0	9.97	0.48	9.97	0.48	9.97	0.48
	12	10.58	0.33	10.78	0.36	10.58	0.27
	24	11.12	0.29	11.44	0.39	11.44	0.34
	36	11.74	0.29	11.88	0.40	11.84	0.57
	48	12.16	0.60	12.44	0.62	12.50	0.20
	60	13.42	0.35	13.14	0.25	13.62	0.31
	70	14.14	0.33	13.60	0.42	13.56	0.43

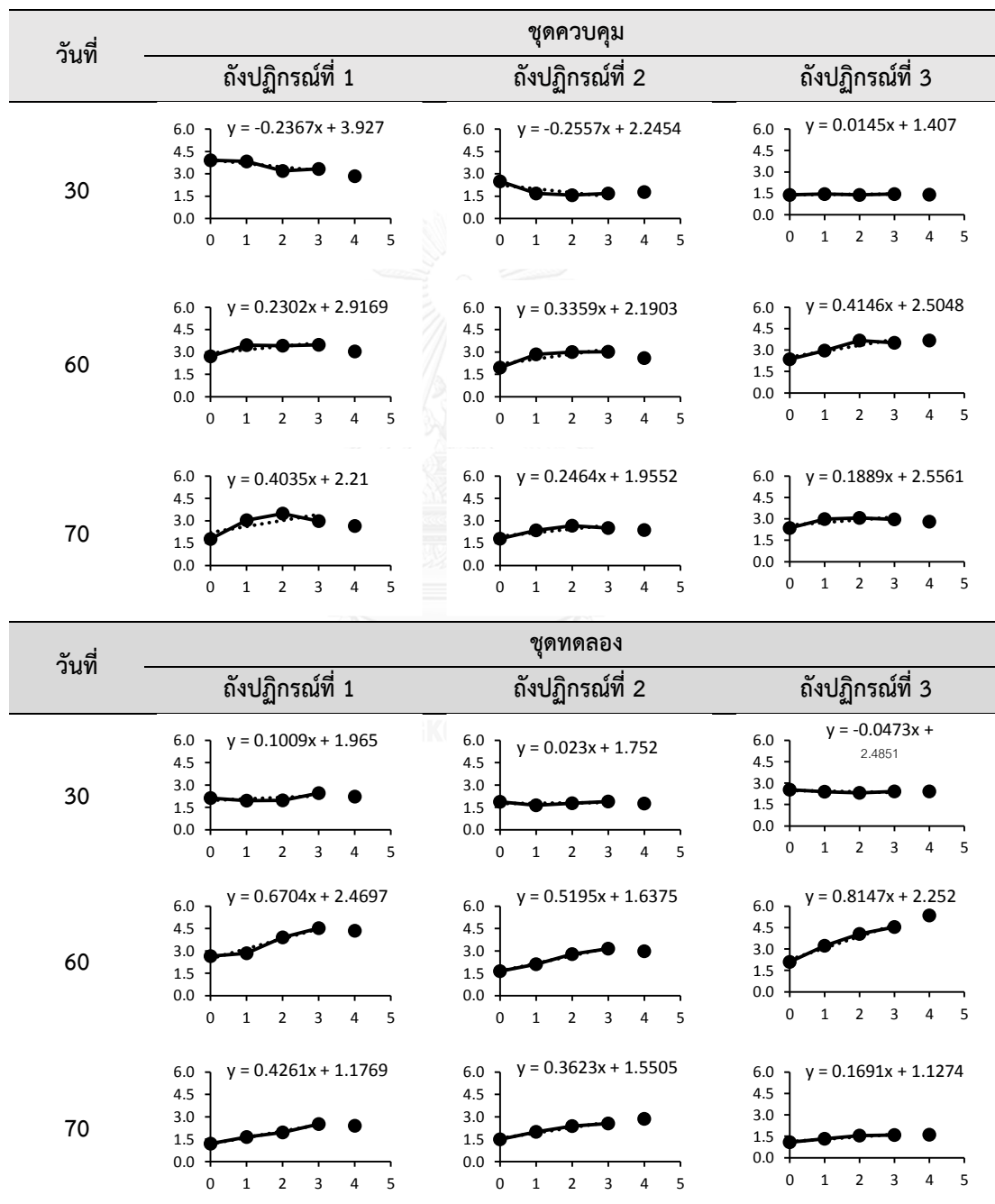
ตาราง ง-12 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย เมื่อทำการทดสอบอัตราการบำบัด
 แอมโมเนียของตะกอนไบโอฟลોકระหว่างการทดลองช่วงที่ 3 ที่ความเข้มข้น
 แอมโมเนียเริ่มต้น เท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยแกน x คือ เวลา (ชม.) และแกน y
 คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก. ไนโตรเจน/ล.)



ตาราง ง-13 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนไตรต์ เมื่อทำการทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไบโอฟลั๊กระหว่างการทดลองช่วงที่ 3 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยแกน x คือ เวลา (ชม.) และแกน y คือ ความเข้มข้นของไนไตรต์ (มก. ไนโตรเจน/ล.)



ตาราง ง-14 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรต เมื่อทำการทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตะกอนไปโอพลีอกระหว่างการทดลองช่วงที่ 3 ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยแกน x คือ เวลา (ชม.) และแกน y คือ ความเข้มข้นของไนเตรต (มก. ไนโตรเจน/ล.)



ภาคผนวก จ

จ.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับการทดลองครั้งที่ 1

- อัตราการบำบัดแอมโมเนีย

Descriptives

TANrate

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	Minimum	Maximum
1.00	3	2.7300	1.62521	.93831	1.09	4.34
2.00	3	2.9267	1.47137	.84950	1.42	4.36
3.00	3	4.8200	.77272	.44613	4.16	5.67
4.00	3	10.4100	.83522	.48222	9.85	11.37
5.00	3	10.0633	1.45535	.84024	8.59	11.50
6.00	3	10.1233	1.21624	.70219	8.94	11.37
7.00	3	10.7800	.71715	.41405	9.99	11.39
8.00	3	8.0333	.87088	.50280	7.31	9.00
Total	24	7.4858	3.44762	.70374	1.09	11.50

Test of Homogeneity of Variances

TANrate

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
.382	7	16	.900

ANOVA

TANrate

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	251.438	7	35.920	26.193	.000
Within Groups	21.942	16	1.371		
Total	273.380	23			

TANrate

Duncan^a

Week	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
1.00	3	2.7300		
2.00	3	2.9267		
3.00	3	4.8200		
8.00	3		8.0333	
5.00	3		10.0633	10.0633
6.00	3		10.1233	10.1233
4.00	3			10.4100
7.00	3			10.7800
Sig.		.054	.054	.501

- อัตราการสะสมไนเตรด

Descriptives

NO3rate

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	Minimum	Maximum
1.00	3	-.2033	2.48009	1.43188	-2.77	2.18
2.00	3	3.0467	3.97107	2.29270	-1.47	5.99
3.00	3	7.9033	2.06132	1.19010	5.54	9.33
4.00	3	6.7067	5.71434	3.29917	.45	11.65
5.00	3	11.0833	2.18546	1.26178	9.18	13.47
6.00	3	11.5767	1.50500	.86891	10.07	13.08
7.00	3	15.5600	2.34719	1.35515	13.87	18.24
8.00	3	12.0133	2.45358	1.41657	9.21	13.77
Total	24	8.4608	5.58300	1.13962	-2.77	18.24

Test of Homogeneity of Variances

NO3rate

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.723	7	16	.174

ANOVA

NO3rate

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	562.120	7	80.303	8.301	.000
Within Groups	154.787	16	9.674		
Total	716.907	23			

NO3rate

Duncan^a

Week	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
1.00	3	-.2033			
2.00	3	3.0467	3.0467		
4.00	3		6.7067	6.7067	
3.00	3		7.9033	7.9033	
5.00	3			11.0833	11.0833
6.00	3			11.5767	11.5767
8.00	3			12.0133	12.0133
7.00	3				15.5600
Sig.		.219	.088	.076	.123

- อัตราการใช้ออกซิเจน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Descriptives

O2rate

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	Minimum	Maximum
1.00	3	163.4400	17.01944	9.82618	144.72	177.98
2.00	3	142.7533	68.22206	39.38803	76.90	213.12
3.00	3	121.6800	5.80795	3.35322	115.49	127.01
4.00	3	156.9133	43.01719	24.83599	129.60	206.50
5.00	3	122.1600	21.15696	12.21498	103.25	145.01
6.00	3	155.2300	35.36582	20.41846	121.97	192.38
7.00	3	154.1767	14.80568	8.54806	142.85	170.93
8.00	3	116.3500	4.77570	2.75725	112.46	121.68
Total	24	141.5879	32.93216	6.72225	76.90	213.12

Test of Homogeneity of Variances

O2rate

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.598	7	16	.054

ANOVA

O2rate

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	7407.134	7	1058.162	.965	.488
Within Groups	17536.991	16	1096.062		
Total	24944.125	23			

O2rate

Duncan^a

Week	N	Subset for alpha = 0.05
		1
8.00	3	116.3500
3.00	3	121.6800
5.00	3	122.1600
2.00	3	142.7533
7.00	3	154.1767
6.00	3	155.2300
4.00	3	156.9133
1.00	3	163.4400
Sig.		.144

- ขนาดตะกอนไปโอฟลือก

Descriptives

Size

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	Minimum	Maximum
15	3	145.00	4.359	2.517	140	148
30	3	107.00	4.583	2.646	103	112
45	3	106.67	4.509	2.603	102	111
60	3	106.00	2.000	1.155	104	108
Total	12	116.17	17.724	5.117	102	148

Test of Homogeneity of Variances

Size

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
.815	3	8	.521

ANOVA

Size

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3327.000	3	1109.000	68.953	.000
Within Groups	128.667	8	16.083		
Total	3455.667	11			

Size

Duncan^a

Day	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
60	3	106.00	
45	3	106.67	
30	3	107.00	
15	3		145.00
Sig.		.777	1.000

จ.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับการทดลองช่วงที่ 2

- ประสิทธิภาพในการแยกตะกอนแขวนลอยที่ขนาดช่องกรองแต่ละขนาด

Descriptives

Efficiency

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	Minimum	Maximum
76	5	88.7100	2.75292	1.23114	85.42	92.77
100	5	86.7280	2.07883	.92968	84.38	89.30
130	5	83.8560	1.86151	.83249	81.66	86.22
160	5	66.0120	6.41505	2.86890	56.38	72.46
Total	20	81.3265	9.86540	2.20597	56.38	92.77

Test of Homogeneity of Variances

Efficiency

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.546	3	16	.093

ANOVA

Efficiency

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1623.123	3	541.041	38.291	.000
Within Groups	226.073	16	14.130		
Total	1849.196	19			

Efficiency

Duncan^a

Micron	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
160	5	66.0120	
130	5		83.8560
100	5		86.7280
76	5		88.7100
Sig.		1.000	.070

- ประสิทธิภาพในการแยกตะกอนแขวนลอยที่อัตราการไหลแต่ละระดับ

Descriptives

Efficiency

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	Minimum	Maximum
500	5	91.2440	1.81109	.80994	88.42	92.88
1000	5	89.1100	2.89008	1.29248	85.55	92.04
1500	5	87.6640	2.01297	.90023	84.69	89.78
Total	15	89.3393	2.60732	.67321	84.69	92.88

Test of Homogeneity of Variances

Efficiency

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.714	2	12	.221

ANOVA

Efficiency

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	32.435	2	16.218	3.102	.082
Within Groups	62.738	12	5.228		
Total	95.174	14			

Efficiency

Duncan^a

Flow	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
1500	5	87.6640	
1000	5	89.1100	89.1100
500	5		91.2440
Sig.		.337	.166

จ.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับการทดลองช่วงที่ 3

- อัตราการบำบัดแอมโมเนีย

Descriptives

TANrate

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	Minimum	Maximum
C1	3	-.8816	8.17586	4.72034	-7.19	8.35
C2	3	3.9080	.39021	.22529	3.49	4.27
C3	3	4.6744	1.15193	.66506	3.39	5.63
T1	3	4.3128	.28038	.16188	4.02	4.57
T2	3	6.0520	.53883	.31109	5.57	6.63
T3	3	4.4352	.40412	.23332	4.00	4.80
Total	18	3.7501	3.62152	.85360	-7.19	8.35

Test of Homogeneity of Variances

TANrate

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
9.681	5	12	.001

ANOVA

TANrate

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	85.250	5	17.050	1.486	.265
Within Groups	137.712	12	11.476		
Total	222.962	17			

TANrate

Duncan^a

Experiment	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
C1	3	-.8816	
C2	3	3.9080	3.9080
T1	3	4.3128	4.3128
T3	3	4.4352	4.4352
C3	3	4.6744	4.6744
T2	3		6.0520
Sig.		.091	.491

- อัตราการสะสมไนเตรต

Descriptives

NO3rate

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	Minimum	Maximum
C1	3	-3.8232	3.61955	2.08975	-6.14	.35
C2	3	7.8456	2.22069	1.28212	5.52	9.95
C3	3	6.7104	2.66605	1.53924	4.53	9.68
T1	3	.6128	1.77918	1.02721	-1.14	2.42
T2	3	16.0368	3.54270	2.04538	12.47	19.55
T3	3	7.6624	3.21283	1.85493	4.06	10.23
Total	18	5.8408	6.86290	1.61760	-6.14	19.55

Test of Homogeneity of Variances

NO3rate

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
.581	5	12	.714

ANOVA

NO3rate

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	698.331	5	139.666	16.374	.000
Within Groups	102.358	12	8.530		
Total	800.689	17			

NO3rate

Duncan^a

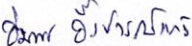
Experiment	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
C1	3	-3.8232		
T1	3	.6128		
C3	3		6.7104	
T3	3		7.6624	
C2	3		7.8456	
T2	3			16.0368
Sig.		.088	.659	1.000

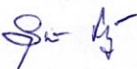
จ.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของธาตุพื้นฐานในอาหารปลา

ผลการวิเคราะห์ CHN

ตัวอย่าง อาหารปลา
 ใบส่งตัวอย่าง S590184
 เจ้าของตัวอย่าง สุตา คุณวงศ์
 วัตถุประสงค์ วิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน
 เครื่องมือวิเคราะห์ CHN Analyzer (LECO Corporation, 628 Series: CHN)
 วิธีวิเคราะห์ Dual-stage furnace system operates at high temperatures with pure oxygen to ensure the complete combustion of all organic samples, without requiring additional metal oxidizing reagents. Non-Dispersive infrared cells are utilized for the detection of C, H and N detected by thermal conductivity detector.
 วันที่วิเคราะห์ 23 กุมภาพันธ์ 2559
 ผลการวิเคราะห์

ตัวอย่างที่	ชื่อตัวอย่าง		Carbon %	Hydrogen %	Nitrogen %
590184	อาหารปลา	(1)	42.56	7.34	3.30
		(2)	42.81	7.62	3.23
		เฉลี่ย	42.69	7.48	3.27


 (นางสาวอัมพร อังปกรณแก้ว)
 ผู้วิเคราะห์


 (นางสุนันท์ รังษีกาญจน์ต่อง)
 หัวหน้าฝ่ายวิเคราะห์

หมายเหตุ ผลการทดสอบที่ได้รับนี้เป็นผลการทดสอบเฉพาะตัวอย่างที่ทำการทดสอบจากศูนย์เครื่องมือวิจัย
 วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเท่านั้น

จ.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของธาตุพื้นฐานในแป้งมันสำปะหลัง



ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อาคารสถาบัน 3 ชั้น 3 จุฬาลงกรณ์ 62 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร. (662) 218-8032, 218-8101 โทรสาร (662) 218-8032, 254-0211

SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL RESEARCH EQUIPMENT CENTRE CHULALONGKORN UNIVERSITY

CHULALONGKORN SOI 62 PHAYA-THAI ROAD PHATUMWAN BANGKOK 10330 THAILAND TEL. (662) 218-8032, 218-8101 FAX : (662) 218-8032, 254-0211

รายงานเลขที่ 11/2559

หน้า 1/1

รายงานผลการวิเคราะห์

ตัวอย่าง อาหาร
 ใบส่งตัวอย่าง S584632
 เจ้าของตัวอย่าง สุตา คุณวงศ์
 วัดอุปประสงค์ วิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน
 เครื่องมือวิเคราะห์ CHNS/O Analyzer (Thermo Scientific™ FLASH 2000)
 วิธีวิเคราะห์ Gaseous products freed by pyrolysis in high-purity oxygen and were chromatographically separated by elution development with quantitatively detected by thermal conductivity detector.
 วันที่วิเคราะห์ 13 มกราคม 2559
 ผลการวิเคราะห์

ตัวอย่างที่	ชื่อตัวอย่าง		%Carbon	%Hydrogen	%Nitrogen
S584632_2	แป้งมันสำปะหลัง	(1)	36.34	6.66	0.00
		(2)	36.52	6.46	0.00
		average	36.43	6.56	0.00

(นางสาวอัมพร อั้งปกรณ์แก้ว)
 ผู้วิเคราะห์

(นางสุนันท์ รังษิกัญจน์ส่อง)
 หัวหน้าฝ่ายวิเคราะห์

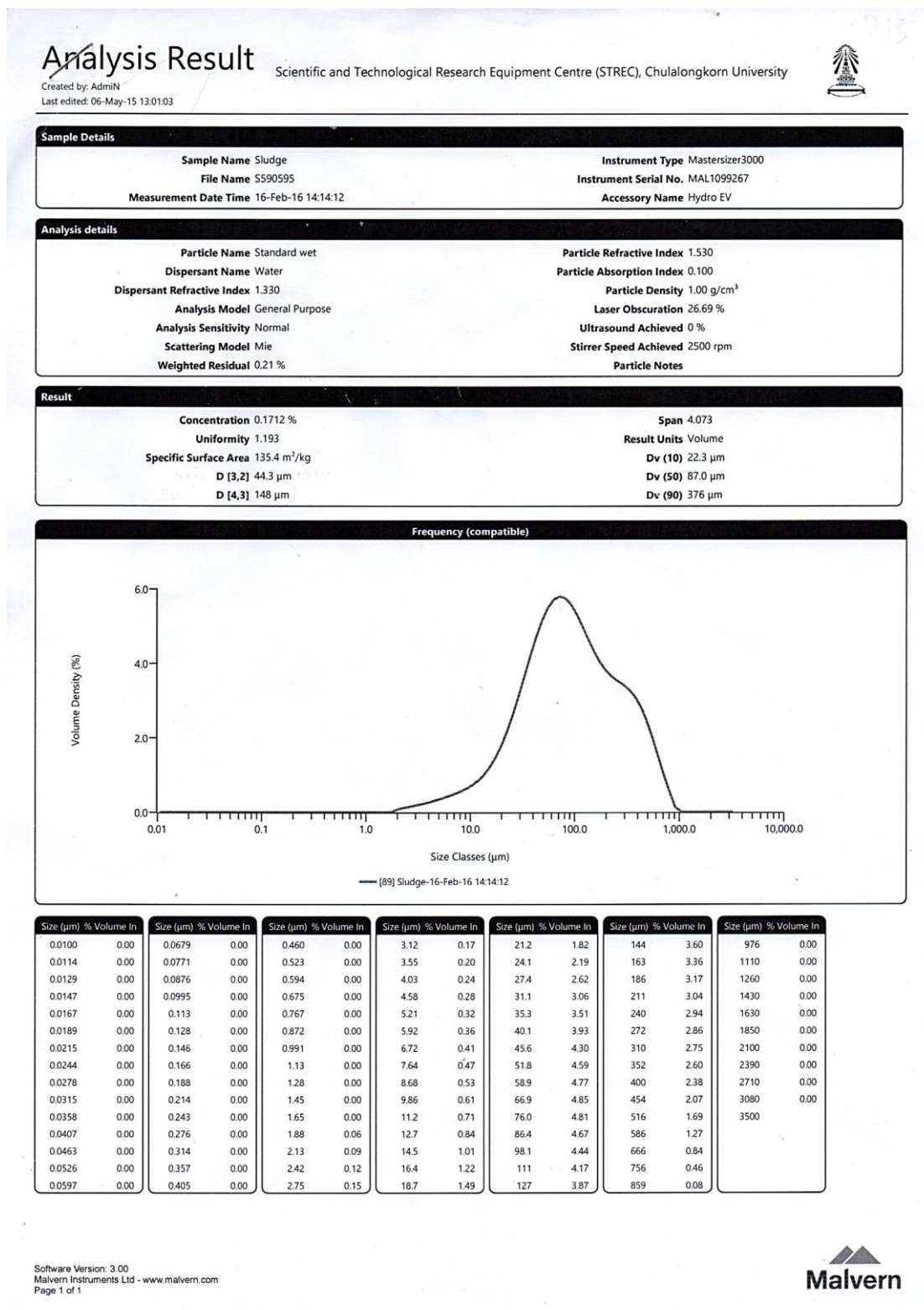
(รศ.ดร. อมร เพชรสม)
 ผู้อำนวยการ

หมายเหตุ ผลการทดสอบที่ได้รับนี้เป็นผลการทดสอบเฉพาะตัวอย่างที่ทำการทดสอบจากศูนย์เครื่องมือวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเท่านั้น

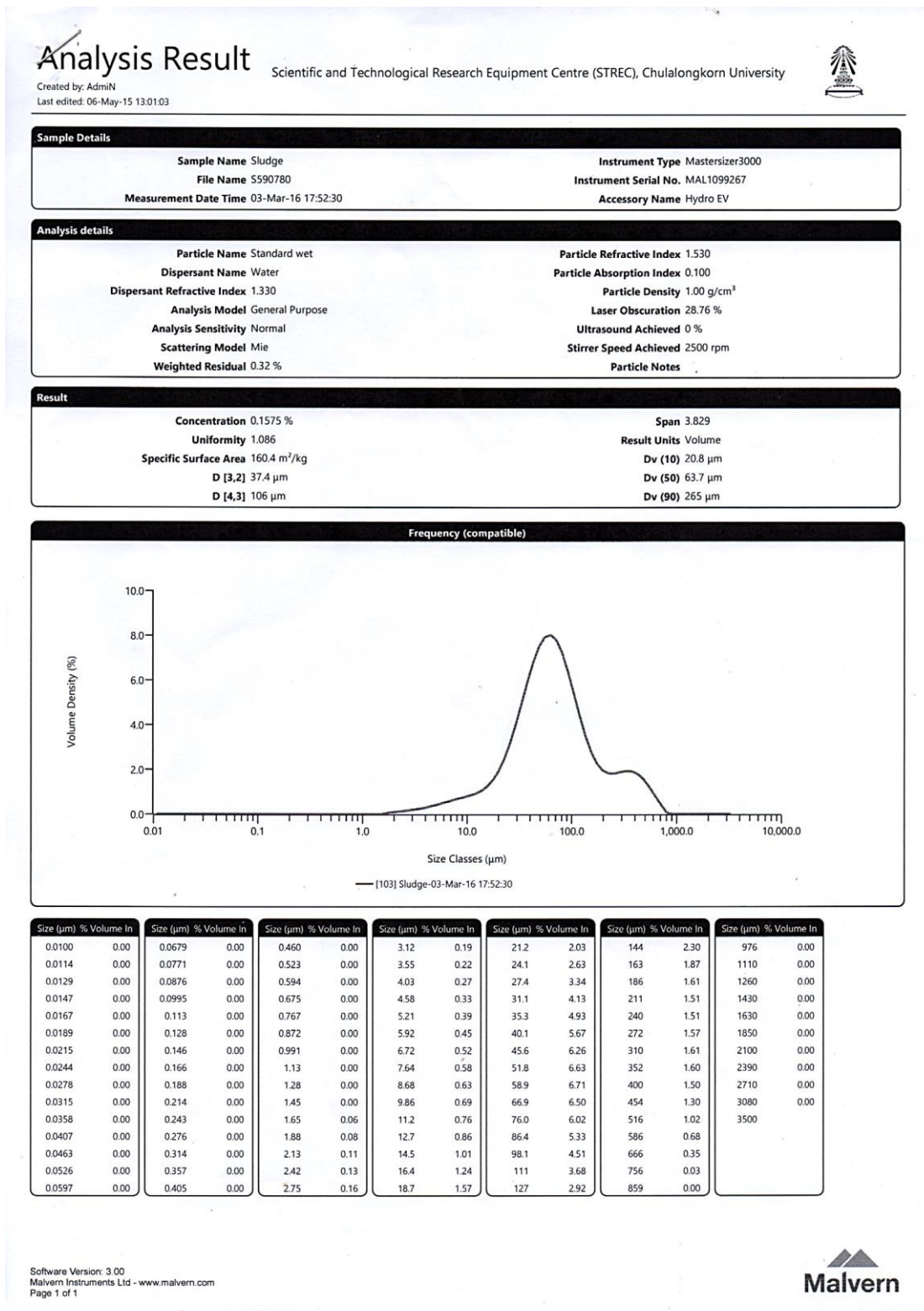
อป/อพ

จ.6 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของขนาดตะกอนไปโอฟล็อก

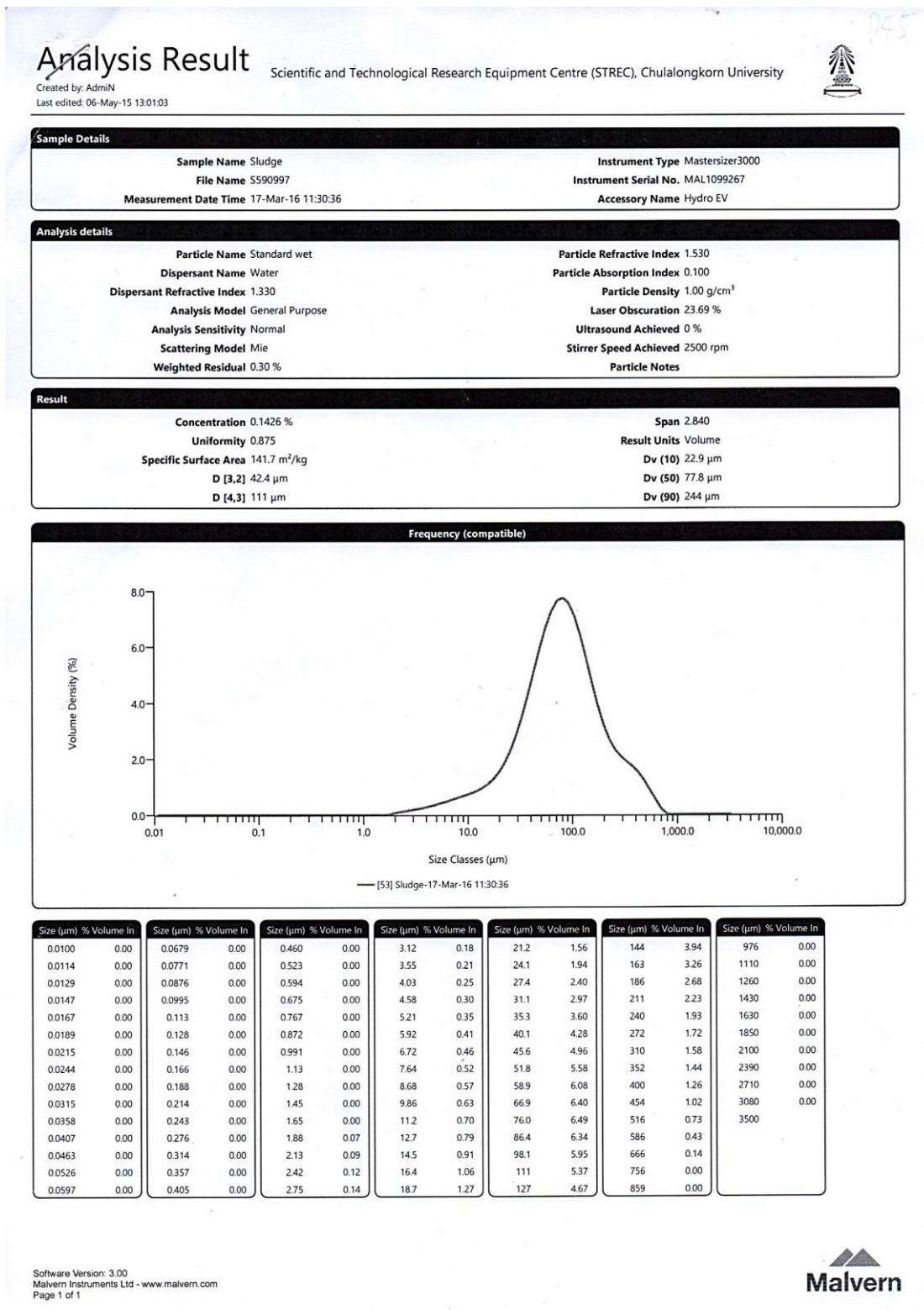
- ขนาดและการกระจายตัวของขนาดตะกอนไปโอฟล็อกของวันที่ 15



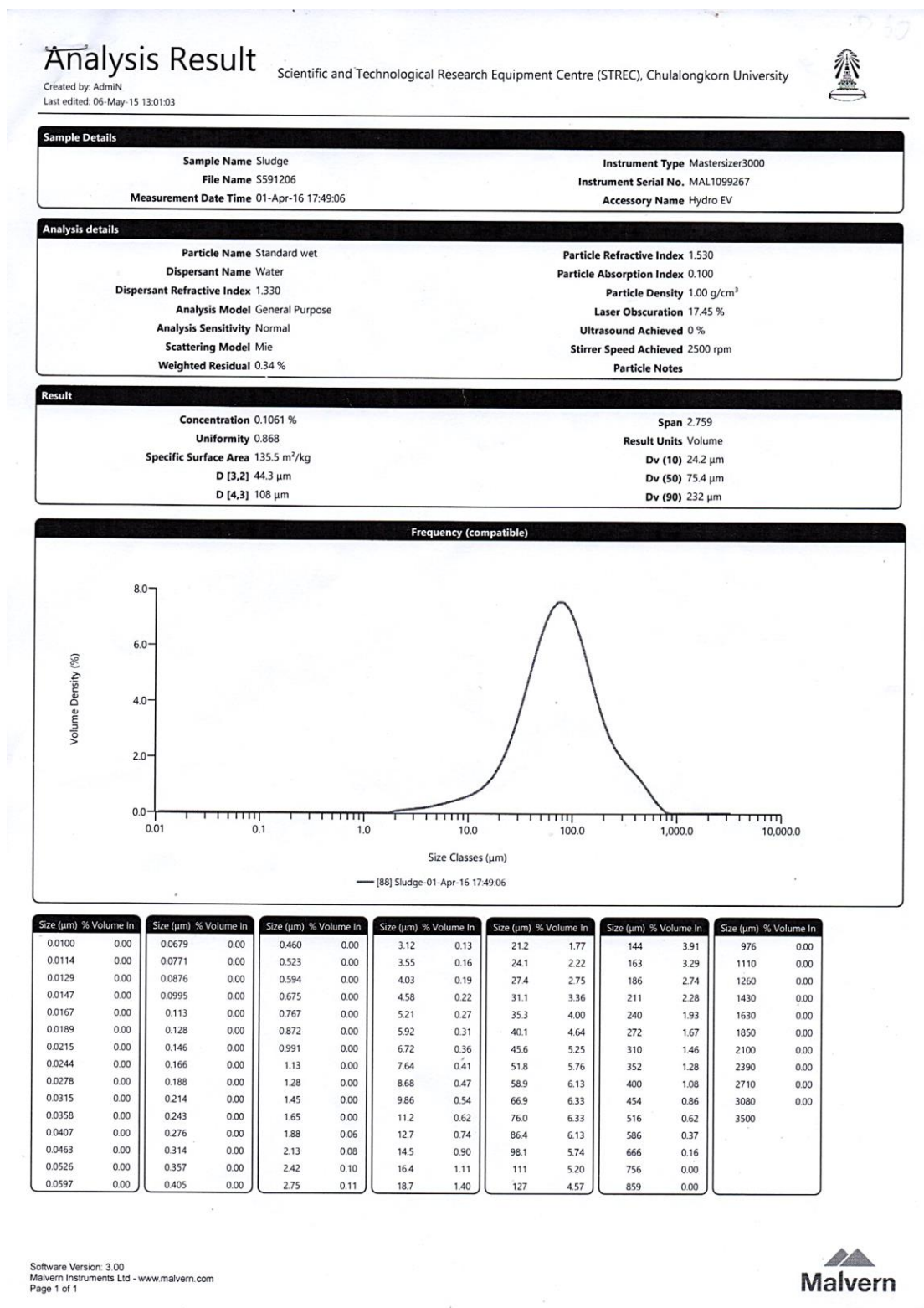
- ขนาดและการกระจายตัวของขนาดตะกอนไปโพลีลิกของวันที่ 30



- ขนาดและการกระจายตัวของขนาดตะกอนไบโอฟล็อกของวันที่ 45



- ขนาดและการกระจายตัวของขนาดตะกอนไปโพลีลอกของวันที่ 60



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุตา คุณวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร ปัจจุบันอายุ 25 ปี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2556 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557

ผลงานที่ได้รับการเผยแพร่

(1) Suta Kunwong, Paveena Tapaneeyaworawong, Wiboonluk Pungrasmi and Sorawit Powtongsook 2016. Ammonia removal, nitrate accumulation and oxygen consumption rates of biofloc from recirculating aquaculture system with two stages acclimation. *The 42nd Congress on Science and Technology of Thailand (STT 42)*. 31th November - 2nd December, 2016 at Centara Grand at Central Plaza Ladprao, Bangkok, Thailand. (Oral presentation)

(2) สุตา คุณวงศ์, วิบูลย์ลักษณ์ ฟิงรัศมี และสรวิศ เผ่าทองสุข. 2560. ขนาดช่อง ตะแกรงสแตนเลสที่เหมาะสมในการแยกตะกอนแขวนลอยออกจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบ ไบโอฟลอค. *การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 16*, 15 - 17 มิถุนายน 2560 ณ โรงแรมเดอะทวินทาวเวอร์ กรุงเทพมหานคร. (นำเสนอผลงานแบบบรรยาย มีเรื่องเต็ม)