

การพัฒนาหน่วยแยกตะกอนแนวตั้งแบบใช้อากาศช่วยผสมสำหรับระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ



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

Development of Aeration Assisted Mixing Vertical Screen Solid Separating Unit  
for Recirculating Aquaculture System

Mr. Korrakot Aumnongpho



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



กรกฎ อ๋านองโพธิ์ : การพัฒนาหน่วยแยกตะกอนแนวตั้งแบบใช้อากาศช่วยผสมสำหรับระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ (Development of Aeration Assisted Mixing Vertical Screen Solid Separating Unit for Recirculating Aquaculture System) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ดร.กษิติศ หนูทอง, 150 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาหน่วยแยกตะกอนสำหรับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำโดยอาศัยหลักการกรอง ศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมของการใช้งานหน่วยแยกตะกอน และประเมินการใช้งานหน่วยแยกตะกอนร่วมกับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดภายในโรงเรือน ผลการทดลองในส่วนแรก ซึ่งทำการศึกษาถึงลักษณะทางกายภาพของตะกอนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ พบว่าตะกอนจมตัวได้ยากและน้ำมีความขุ่นมากขึ้นหลังจากหมุนวนน้ำในถังเลี้ยงสัตว์น้ำผ่านเครื่องสูบน้ำด้วยอัตราการไหล 2,800 และ 8,500 ล./ชม. เป็นเวลา 30 นาที โดยตะกอนแขวนลอยมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 170 ไมโครเมตร การทดลองในส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานหน่วยแยกตะกอน โดยใช้น้ำเสียจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยประมาณ 100 – 150 มก./ล. ผลการทดลองพบว่าการเติมอากาศร่วมกับการกรองแบบไหลขวางผ่านแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องกรอง 130 ไมโครเมตร เหมาะสมแก่การใช้งาน โดยควรควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่หน่วยแยกตะกอนที่ 750 ล./ชม. ติดตั้งหัวทรายที่ระดับความสูง 1 ซม. จากขอบล่างของแผ่นกรองสแตนเลส และใช้อัตราการไหลของอากาศที่ 2 ล./นาที ภายใต้อัตราการกรองสูงสุดมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการใช้งานเท่ากับ  $6,093 \pm 458$  ล./ตร.ม.-ชม. และมีประสิทธิภาพการกรองสูงสุดเท่ากับร้อยละ 41 ผลการทดลองส่วนนี้ถูกนำมาใช้ในการทดลองส่วนสุดท้าย ซึ่งประยุกต์ใช้หน่วยแยกตะกอนร่วมกับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่ติดตั้งระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพไนโตรฟิเคชัน โดยทำการทดสอบกับน้ำเสียจากการเลี้ยงปลาเป็นระยะเวลา 60 วัน ในสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ พบว่าหน่วยแยกตะกอนสามารถควบคุมปริมาณตะกอนแขวนลอยให้มีค่าต่ำกว่ากฎหมายกำหนด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $56.12 \pm 11.12$  มก./ล. ความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนโตรเจนมีค่าต่ำกว่า 1 มก.ไนโตรเจน./ล. ตลอดระยะเวลาการทดลอง ขณะที่ความเข้มข้นของไนเตรตในถังเลี้ยงสัตว์น้ำเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากการทำสมดุลมวลไนโตรเจนพบว่า กระบวนการไนโตรฟิเคชันมีบทบาทสำคัญต่อการควบคุมปริมาณไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 26 และการใช้งานหน่วยแยกตะกอนสามารถกำจัดไนโตรเจนออกจากระบบได้ประมาณร้อยละ 18

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5770377121 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS:

KORRAKOT AUMNONGPHO: Development of Aeration Assisted Mixing Vertical Screen Solid Separating Unit for Recirculating Aquaculture System. ADVISOR: ASSOC. PROF. WIBOONLUK PUNGRASMI, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. KASIDIT NOOTONG, Ph.D., 150 pp.

The objectives of this research aimed to develop the solid separating unit for aquaculture cultivating system, identify the optimal operating condition and evaluate the performance of the solid separating unit combined with nitrifying aquaculture system. Results from the first section, which studied the physical characteristics of solids in aquaculture system, indicated the more difficulty in solid sedimentation, increased water turbidity, and average solids size at 170  $\mu\text{m}$  after circulating water in cultured tank through pumps at the flow rates of 2,800 and 8,500 L/h for at least 30 minutes. The second part examined the optimal operating conditions of the proposed solid separating unit subjected to wastewater containing 100 – 150 mg SS/L suspended solids. The findings of the second section revealed that the aeration-assisted crossflow filtration with 130  $\mu\text{m}$  pored-size stainless steel screen was suitable given that wastewater flow rate was maintained at 750 L/h; position of stone-diffuser was located at 1 cm from the lower edge of stainless steel screen; and aeration rate was provided at 2 L/min. Under the described condition, the average filtration flux and maximum solid removal efficiency were determined at  $6,093 \pm 458 \text{ L/m}^2\text{-h}$  and 41%, respectively. The results from the second part were applied during the third section in which the solid separating unit was operated simultaneously to nitrifying aquaculture system. The results of 60-day cultivation without water exchange found that solid separating unit was able to maintain suspended solids below the safety limit with the average of  $56.12 \pm 11.12 \text{ mg/L}$ . Ammonia and nitrite concentrations were less than 1.0 mg/L for the entire experiment while nitrate concentrations in cultured tank increased as a result of nitrification. The nitrogen mass balance indicated that nitrification played the significant role in controlling nitrogen in aquaculture system, accounting for approximately 26% of nitrogen input, and the operation of solid separating unit was able to remove about 18% of nitrogen input.

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

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

Academic Year: 2016

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่เกี่ยวข้องดังรายนามต่อไปนี้

อันดับแรกขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก) รองศาสตราจารย์ ดร.กษิติศ หนูทอง และ ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม) สำหรับหลักวิชาการและองค์ความรู้ที่มีประโยชน์ในการออกแบบงานวิจัย รวมถึงความเอาใจใส่ดูแล การให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนความช่วยเหลือในแต่ละขั้นตอนระหว่างการทำงานจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเอียร (ประธานกรรมการ) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล (กรรมการ) และ ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข (ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย) ที่กรุณาสละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำชี้แนะและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่อบรมสั่งสอนและให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์สำหรับการประกอบวิชาชีพวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ขอขอบพระคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่ วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมีในการทำงานวิจัย รวมถึงขอขอบคุณ คุณปวีณา ตปนียวรวงศ์ คุณสุรเชษฐ์ บุรุษอาชาไนย และคุณเสรี ดอนเหนือ ตลอดจนบุคลากรของศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเลทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำในการทำงานวิจัยและเทคนิคการวิเคราะห์ทางด้านวิทยาศาสตร์

ขอขอบคุณทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช และทุนสนับสนุนเพิ่มเติมบางส่วนจากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (รหัสโครงการ RES560530068-FW) ขอขอบคุณการสนับสนุนเครื่องมือ Microplate Spectrophotometer จากโครงการ Thai Government Stimulus Package 2 (TKK2555) จนสามารถดำเนินงานวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา บุคคลในครอบครัว รวมถึงเพื่อนสนิททุกคนที่คอยสนับสนุนเป็นแรงผลักดัน และเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดสำหรับผู้วิจัยเสมอมา จนกระทั่งสามารถสำเร็จการศึกษาและได้รับปริญญาหมาบัณฑิตตามที่ตั้งใจ

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในการเลี้ยงสัตว์น้ำ .....	5
2.2 ปัจจัยด้านคุณภาพน้ำสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำจืด .....	5
2.3 ตะกอนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ.....	10
2.4 การแยกตะกอนด้วยหลักการเชิงกล-ฟิสิกส์.....	11
2.5 การแยกตะกอนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ .....	12
2.6 การเดินระบบของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน .....	13
2.7 การกรองแบบติดค้างที่ผิวหน้า .....	15
2.8 กระบวนการไมโครฟิเตรชัน .....	15
2.9 ความเร็วเกรเดียนท์ .....	17
2.10 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	18

บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย .....	26
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	26
3.2 แผนการทดลอง.....	28
3.3 วัสดุอุปกรณ์สำหรับการทดลอง .....	30
3.4 การดำเนินการทดลอง .....	34
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	54
4.1 ลักษณะทางกายภาพของตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด.....	54
4.2 สภาพะการใช้งานหน่วยแยกตะกอน.....	57
4.2.1 รูปแบบการกรองและขนาดช่องกรอง .....	57
4.2.2 ผลของการเติมอากาศ.....	60
4.2.3 อัตราการไหลของน้ำ .....	63
4.2.4 อัตราการไหลของอากาศและตำแหน่งของหัวจ่ายอากาศ .....	65
4.2.5 การใช้งานหน่วยแยกตะกอนในรูปแบบการกรองแบบสลับ .....	67
4.3 การประยุกต์ใช้งานหน่วยแยกตะกอนกับระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดภายในโรงเรือน .....	68
4.3.1 การใช้งานหน่วยแยกตะกอนกับบ่อเลี้ยงปลา.....	68
4.3.2 ลักษณะทางกายภาพของน้ำในถังเลี้ยงปลา.....	70
4.3.3 ฟลักซ์การกรอง.....	74
4.3.4 การเจริญเติบโตของปลา.....	76
4.3.5 สมดุลมวลไนโตรเจน .....	77
4.3.6 สมรรถนะการใช้งานหน่วยแยกตะกอน .....	81
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	89
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	89
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	91



รายการอ้างอิง.....	92
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก.....	98
ภาคผนวก ข.....	106
ภาคผนวก ค.....	108
ภาคผนวก ง.....	119
ภาคผนวก จ.....	131
ภาคผนวก ฉ.....	135
ภาคผนวก ช.....	143
ภาคผนวก ซ.....	146
ภาคผนวก ฌ.....	148
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	150

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ผลกระทบของค่าพีเอชกับการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ .....	8
ตารางที่ 2.2 ปริมาณออกซิเจนละลายกับผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ .....	9
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตะกอนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด .....	36
ตารางที่ 3.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนในการทดลองช่วงที่ 1 .....	37
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการศึกษาขนาดช่องกรองของแผ่นกรองสแตนเลส .....	40
ตารางที่ 3.4 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนในการทดลองที่ 2.1 .....	40
ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการศึกษาอัตราการไหลของน้ำ .....	42
ตารางที่ 3.6 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนในการทดลองที่ 2.2 .....	42
ตารางที่ 3.7 ตัวแปรในการศึกษาผลของการให้อากาศและตำแหน่งของหัวทรายต่อ ประสิทธิภาพ ของหน่วยแยกตะกอน .....	44
ตารางที่ 3.8 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนในการทดลองที่ 2.3 .....	44
ตารางที่ 3.9 ตัวแปรในการศึกษารูปแบบการใช้งานของหน่วยแยกตะกอน .....	46
ตารางที่ 3.10 พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนในการทดลองที่ 2.4 .....	47
ตารางที่ 3.11 ตัวแปรในการศึกษาการประยุกต์ใช้หน่วยแยกตะกอนกับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ แบบปิด .....	49
ตารางที่ 3.12 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนในการทดลองที่ 3 .....	50
ตารางที่ 3.13 พารามิเตอร์การประเมินคุณภาพสัตว์น้ำในการทดลอง .....	51
ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพของการกรองและปริมาณตะกอนสะสมในการกรองแบบตั้งฉาก และแบบไหลขวางเมื่อใช้วัสดุกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่างต่างกัน .....	60
ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพการกรองและปริมาณตะกอนสะสมในการกรองแบบไหลขวางเมื่อมี และไม่มีการเติมอากาศในแนวหน้าข้างของแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง ต่างกัน .....	63
ตารางที่ 4.3 ตารางการทำงานระบบอัตโนมัติของเครื่องสูบน้ำและโซลินอยด์วาล์วที่ควบคุม การทำงานโดยแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการกรองน้ำของหน่วยแยกตะกอน .....	69

ตารางที่ 4.4 การเจริญเติบโตของปลานิลระหว่างการประเมินประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอน ร่วมกับระบบตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน .....	77
ตารางที่ 4.5 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบเริ่มต้นในวันที่ 1 และในวันที่ 30 ก่อนระบบเกิดการรั่ว .....	79
ตารางที่ 4.6 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบเริ่มต้นในวันที่ 1 และวันที่ 60 .....	80
ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบสมรรถนะหน่วยแยกตะกอนจากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ .....	82



## สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1 รูปแบบการกรองผ่านวัสดุกรอง เมื่อ (A) การเดินระบบแบบไหลขวาง และ (B) การเดินระบบแบบอัดตัว .....	14
ภาพที่ 3.1 แผนผังสรุปภาพรวมการดำเนินงานของงานวิจัยนี้ .....	29
ภาพที่ 3.2 หน่วยแยกตะกอนทรงกระบอกสองชั้นขนาด 1.5 ล. โดย (A) ลักษณะทรงกระบอกด้านนอก (B) ลักษณะทรงกระบอกด้านใน และ (C) ภาพมุมมองของหน่วยแยกตะกอน.....	30
ภาพที่ 3.3 การทำงานของหน่วยแยกตะกอน .....	31
ภาพที่ 3.4 หน่วยแยกตะกอนทรงกระบอกสองชั้นขนาด 25 ล. โดย (A) ลักษณะทรงกระบอกด้านนอก (B) ลักษณะทรงกระบอกด้านใน และ (C) ภาพมุมมองของหน่วยแยกตะกอน .....	31
ภาพที่ 3.5 ลักษณะของแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องกรองที่แตกต่างกันโดย (A) 100 ไมโครเมตร (B) 130 ไมโครเมตร และ (C) 160 ไมโครเมตร .....	32
ภาพที่ 3.6 บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ .....	33
ภาพที่ 3.7 ตัวกรองชีวภาพชนิด BCN-012.....	33
ภาพที่ 3.8 เครื่องสูบน้ำชนิดหมุนเหวี่ยงและใบพัดที่ใช้ในการทดลอง .....	34
ภาพที่ 3.9 แผนผังการดำเนินงานช่วงที่ 1 .....	35
ภาพที่ 3.10 แผนผังการดำเนินงานในการทดลองช่วงที่ 2 .....	38
ภาพที่ 3.11 รูปแบบการกรองในหน่วยแยกตะกอนเพื่อเลือกขนาดช่องกรองที่เหมาะสมโดย (A) การกรองแบบไหลขวาง และ (B) การกรองแบบตั้งฉาก .....	39
ภาพที่ 3.12 แผนผังการเดินระบบในการทดลองที่ 2.2 .....	41
ภาพที่ 3.13 แผนผังการเดินระบบในการทดลองที่ 2.3 .....	43
ภาพที่ 3.14 การใช้งานหน่วยแยกตะกอนแบบกรองสลับโดย (A) การกรองตะกอนจากด้านใน และ (B) การกรองตะกอนจากด้านนอกในพื้นที่วงแหวน .....	46
ภาพที่ 3.15 แผนผังการดำเนินงานในการทดลองช่วงที่ 3 .....	48
ภาพที่ 3.16 การติดตั้งระบบในการทดลองช่วงที่ 3 เมื่อ (A) บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ (B) หน่วยแยกตะกอน และ (C) ถังบรรจุตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน .....	48

ภาพที่ 4.1 การจมตัวของตะกอนในน้ำเมื่อเวลา 30 นาที ( $SV_{30}$ ) เมื่อหมุนวนน้ำในถังเลี้ยงปลา ผ่านเครื่องสูบน้ำขนาดเล็ก ขนาดใหญ่ และเมื่อไม่มีการใช้เครื่องสูบน้ำ .....	56
ภาพที่ 4.2 ความขุ่นของน้ำจากส่วนบนของกรวยอิมซอพลาซหลังหมุนวนน้ำจากถังเลี้ยงปลา ผ่านเครื่องสูบน้ำขนาดเล็ก ขนาดใหญ่ และเมื่อไม่มีการใช้เครื่องสูบน้ำ .....	56
ภาพที่ 4.3 พลั๊ก์การกรองของแผ่นกรองสแตนเลสที่ขนาดช่องว่างแตกต่างกันเมื่อ (A) การกรองแบบตั้งฉาก และ (B) การกรองแบบไหลขวาง .....	59
ภาพที่ 4.4 พลั๊ก์การกรองแบบไหลขวางผ่านแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่างแตกต่างกัน เมื่อ (A) ไม่มีการเติมอากาศ และ (B) มีการเติมอากาศระหว่างการกรอง .....	62
ภาพที่ 4.5 ระดับของน้ำเสียภายในหน่วยแยกตะกอนเมื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียเข้า ระบบ ที่แตกต่างกันเมื่อ (A) 250 ล./ชม. (B) 500 ล./ชม. และ (C) 750 ล./ชม. ....	64
ภาพที่ 4.6 ผลของอัตราการไหลของอากาศหรือความเร็วเกรเดียนท์ต่อประสิทธิภาพการกรอง ของหน่วยแยกตะกอน .....	66
ภาพที่ 4.7 แผนผังของระบบเลี้ยงปลาแบบปิดซึ่งประกอบด้วยถังเลี้ยงปลา หน่วยแยก ตะกอน และถังบำบัดไนทริฟิเคชัน เมื่อ 1, 2 และ 7 แพนเครื่องสูบน้ำ ส่วน 3, 4, 5 และ 6 แพน โซลินอยด์วาล์ว .....	69
ภาพที่ 4.8 ปริมาณตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลาของชุดทดลอง และชุดควบคุม .....	72
ภาพที่ 4.9 ลักษณะทางกายภาพของน้ำในถังเลี้ยงปลาได้แก่ พีเอช ความเป็นด่าง อุณหภูมิ และปริมาณออกซิเจนละลาย ( $\uparrow$ แสดงการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตลงในชุดทดลอง และ $\downarrow$ แสดงการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตลงในชุดควบคุม) .....	73
ภาพที่ 4.10 ความเข้มข้นของสารประกอบไนทรีไนโตรเจนในชุดทดลองและชุดควบคุม โดย (A) แสดงปริมาณแอมโมเนีย (B) แสดงปริมาณไนไตรต์ และ (C) แสดงปริมาณไนเตรต .....	75

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในปัจจุบันได้ก้าวเข้าสู่รูปแบบการเลี้ยงแบบความหนาแน่นสูง เพื่อให้ได้ผลผลิตสัตว์น้ำที่เพียงพอต่อการรองรับความต้องการบริโภคที่สูงขึ้น ดังนั้นในการเพาะเลี้ยงจึงจำเป็นต้องใช้อาหารสัตว์น้ำที่มีโปรตีนสูงในปริมาณมากเพื่อเร่งอัตราการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ อย่างไรก็ตามการใช้อาหารสัตว์น้ำในปริมาณมากจะนำไปสู่การสะสมของตะกอนอินทรีย์ในระบบเลี้ยง ทำให้ระบบมีความต้องการออกซิเจนสูงขึ้น และหากตะกอนอินทรีย์เหล่านั้นตกตะกอนลงสู่ก้นถังในปริมาณมาก อาจนำไปสู่การเกิดบริเวณอับอากาศและการผลิตสารพิษ (เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์) ตามมา นอกจากนี้การสลายตัวของชีวภาพของโปรตีนในตะกอนอินทรีย์จะนำไปสู่การผลิตสารอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต โดยระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียมากกว่า 0.025 มก.ไนโตรเจน/ล. และไนไตรต์มากกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. พบว่ามีผลกระทบต่อสุขภาพของสัตว์น้ำ อาทิ ก่อให้เกิดความเครียด ลดความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจนในเลือด ลดอัตราการเจริญเติบโตหรือตาย ดังนั้นแนวทางการแก้ไขปัญหาอย่างง่ายของเกษตรกร คือ การเปลี่ยนถ่ายน้ำระหว่างระบบเลี้ยงและแหล่งน้ำธรรมชาติวันละ 3 – 5 ครั้ง การกระทำในลักษณะดังกล่าวเพิ่มความเสี่ยงของการติดโรคและก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมตามมา เช่น ความต้องการออกซิเจนในน้ำสูงขึ้นซึ่งเป็นผลจากสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ และปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน จะเห็นได้ว่าการกำจัดตะกอนอินทรีย์ส่วนเกินออกจากระบบเลี้ยงเป็นประเด็นที่สำคัญต่อความสำเร็จและความยั่งยืนของการเลี้ยงสัตว์น้ำในระดับความหนาแน่นสูง ทั้งนี้การลดปริมาณตะกอนอินทรีย์ในระบบเลี้ยงจะนำไปสู่ปริมาณสารอนินทรีย์ไนโตรเจนที่น้อยลง ส่งผลให้ระบบบำบัดและหมุนเวียนน้ำมีประสิทธิภาพสูงขึ้น หรือสามารถออกแบบระบบบำบัดและหมุนเวียนน้ำที่มีขนาดเล็กลงทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและเดินระบบ

สำหรับแนวทางในการแยกตะกอนออกจากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำนิยมใช้วิธีการตกตะกอน (Sedimentation) และการกรอง (Filtration) โดยทั้งสองวิธีมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน การตกตะกอนสามารถดำเนินงานได้ง่ายและมีต้นทุนต่ำ แต่พบว่าเหมาะกับการแยกตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตร (Timmons และคณะ, 2002) ขณะที่ขนาดของตะกอนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำมีขนาดอยู่ในช่วง

80 – 120 ไมโครเมตร ตะกอนขนาดเล็กเหล่านี้จะใช้เวลานานในการจมตัวหากแยกด้วยวิธีการตกตะกอน นอกจากนี้ชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นจากตะกอนเบาจะฟุ้งกระจายได้ง่าย สำหรับการกรองสามารถใช้เป็นตัวเลือกในการแยกตะกอนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำได้ เพราะใช้เวลาในการเดินระบบน้อยกว่าการตกตะกอน อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดสำหรับการใช้งานในการเลี้ยงสัตว์น้ำระดับความหนาแน่นปานกลางถึงสูงจากการสะสมของตะกอนอย่างรวดเร็วบนผิวหน้าของวัสดุกรอง ทำให้ต้องหยุดเดินระบบเป็นระยะเพื่อทำความสะอาดแผ่นกรอง นอกจากนี้ระบบกรองที่นำเข้ามาจากต่างประเทศมักมีความซับซ้อน มีราคาสูง และต้องการแรงงานที่มีความรู้ในการเดินระบบ ซึ่งประเด็นดังกล่าวเป็นปัญหาหลักของเกษตรกรรายย่อยที่มีต้นทุนต่ำ จะเห็นได้ว่าการออกแบบหรือปรับปรุงระบบกรองที่มีอยู่เดิมให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น งานวิจัยนี้จึงสนใจทำการศึกษาเพื่อพัฒนาหน่วยแยกตะกอนโดยอาศัยหลักการกรองสำหรับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดภายในโรงเรือน โดยตั้งสมมติฐานว่าการเดินระบบหน่วยแยกตะกอนแบบไหลต่อเนื่องร่วมกับการเป่าอากาศเพื่อสร้างความปั่นป่วนของน้ำเสียจะช่วยลดการอุดตันบนผิวหน้าของวัสดุกรองได้ ทั้งนี้หากแนวทางนี้สามารถดำเนินการได้จริงจะเป็นวิธีที่สะดวกประหยัดค่าใช้จ่าย และลดภาระของหน่วยบำบัดอื่นๆ ที่ติดตั้งร่วมกับหน่วยแยกตะกอนได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาหน่วยแยกตะกอนสำหรับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำโดยอาศัยหลักการกรองและศึกษาถึงสภาวะเหมาะสมของการใช้งาน
- 1.2.2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานหน่วยแยกตะกอนที่ออกแบบขึ้นกับการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิดที่ระดับความหนาแน่นสูง

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ตะกอนอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองเป็นตะกอนธรรมชาติที่เกิดขึ้นจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด

- 1.3.2 หน่วยแยกตะกอนมีลักษณะเป็นทรงกระบอกซ้อนกันสองชั้น โดยติดตั้งวัสดุกรองสแตนเลสไว้ที่คอลัมน์ชั้นใน ทำการทดสอบประสิทธิภาพการแยกตะกอนด้วยการแปรค่าขนาดช่องกรอง (130 – 160 ไมโครเมตร) ตำแหน่งของหัวจ่ายอากาศ (0 – 15 ซม. จากกันถึงปฏิกรณ์ และบริเวณผิววัสดุกรองทั้งสามด้าน) อัตราไหลของอากาศ (1 – 20 ล./นาที่) อัตราการไหลของน้ำเข้าหน่วยแยกตะกอน (250 – 750 ล./ชม.) และรูปแบบการเดินระบบ (การสลับด้านการกรอง) เมื่อบังคับให้น้ำไหลผ่านวัสดุกรองตามแนวขนาน โดยจะพิจารณาผลจากประสิทธิภาพในการแยกตะกอน ค่าฟลักซ์ของเหลว และความเสถียรในการดำเนินงาน
- 1.3.3 ในการทดสอบประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอนกับการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิด จะทำการเลี้ยงปลาไนล (*Oreochromis niloticus*) ที่ความหนาแน่นเริ่มต้น 3 กก./ลบ.ม. ในระบบปิดที่มีหน่วยแยกตะกอนและตัวกรองชีวภาพไนตริไฟเคชัน โดยจะติดตามผลประสิทธิภาพการแยกตะกอน ความเข้มข้นของตะกอนในถังเลี้ยง ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในถังเลี้ยง อัตรารอดของปลาไน อัตราการเจริญเติบโต และอัตราการแลกเนื้อ เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 45 วัน
- 1.3.4 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ปริมาณสารแขวนลอย ปริมาณสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ปริมาณตะกอน ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคตะกอน และฟลักซ์การกรอง เป็นต้น จะดำเนินการตามวิธีมาตรฐานที่ระบุใน Standard Method for the Examination of Water and Wastewater) (APHA, AWA, WPCF, 2005)
- 1.3.5 หน่วยแยกตะกอนที่ใช้ในการทดลองมี 2 ขนาดที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการ คือ หน่วยแยกตะกอนขนาด 1.5 ล. สำหรับการทดลองช่วงที่ 1 และ 2 (การทดลองย่อยที่ 2.1) และหน่วยแยกตะกอนขนาด 25 ล. จะใช้ในการทดลองช่วงที่ 2 (การทดลองย่อยที่ 2.2) จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง



#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้แนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพและสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของหน่วยแยกตะกอนสำหรับระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด ภายใต้รูปแบบที่ประหยัดพลังงาน สามารถเดินระบบได้อย่างต่อเนื่อง มีประสิทธิภาพ และสามารถประยุกต์ใช้ได้จริง
- 1.4.2 เป็นทางเลือกให้แก่กลุ่มเกษตรกรผู้ประกอบอาชีพเลี้ยงสัตว์น้ำ ในการเลือกใช้หน่วยแยกตะกอนสำหรับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด เพื่อลดต้นทุนการจัดการภายในฟาร์มและการนำเข้าหน่วยแยกตะกอนราคาแพงจากต่างประเทศ



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในการเลี้ยงสัตว์น้ำ

ในการพัฒนารูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อให้ได้ผลผลิตสูงเชิงพาณิชย์จำเป็นต้องใช้สารอาหารให้เพียงพอกับความต้องการของสัตว์น้ำที่มีอยู่หนาแน่น ส่งผลให้ของเสียจากการขับถ่ายและอาหารที่เหลือจากการบริโภคของสัตว์น้ำย่อมมีมากตามปริมาณสารอาหารที่เข้าสู่ระบบ ทั้งนี้ของเสียที่สัตว์น้ำขับถ่ายออกมาและสารโปรตีนในอาหารในรูปละลายน้ำ รวมทั้งตะกอนอินทรีย์แขวนลอยจะส่งผลให้ออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำมีปริมาณลดลง เนื่องจากสารอินทรีย์ดังกล่าวจะดึงออกซิเจนไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายจนเมื่อปริมาณออกซิเจนหมดลงจะส่งผลโดยตรงต่อสัตว์น้ำ ดังนั้นการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบปิดจึงได้รับความสนใจ เนื่องจากเป็นระบบที่มีการปรับปรุงคุณภาพน้ำอยู่ภายในตัว กล่าวคือเป็นการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้เป็นไปตามเกณฑ์สำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อให้สามารถหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่และยังเป็นการลดความเสี่ยงของการติดโรคที่อาจมากับน้ำ อีกทั้งเป็นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงด้วย สำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดส่วนใหญ่อาศัยกระบวนการที่สำคัญ 4 รูปแบบใหญ่ๆ คือ 1) การกรองทางชีวภาพ (Biological filtration) 2) การกรองโดยใช้เครื่องกล (Mechanical filtration) 3) การกรองทางกายภาพ (Physical filtration) และ 4) การกำจัดจุลินทรีย์ก่อโรค (Disinfection)

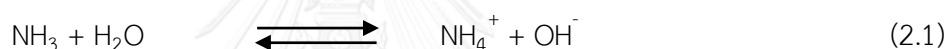
#### 2.2 ปัจจัยด้านคุณภาพน้ำสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำจืด

คุณภาพของน้ำมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ กล่าวคือน้ำเป็นปัจจัยหลักของสัตว์น้ำในการดำรงชีวิต การรักษาสสมดุลต่างๆ ในร่างกาย กิจกรรมทางชีวเคมี ตลอดจนการสืบพันธุ์ โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ ได้แก่

## 2.2.1 สารอนินทรีย์ไนโตรเจน

### 2.2.1.1 แอมโมเนีย (Ammonia; $\text{NH}_3$ )

เป็นสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่ภายในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ สารอินทรีย์เหล่านี้ส่วนใหญ่มาจากอาหารเหลือและการขับถ่ายของสัตว์น้ำ โดยกระบวนการเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ (สารประกอบโปรตีน) ไปเป็นสารอนินทรีย์ (แอมโมเนียไนโตรเจน) จะเกิดผ่านกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) ภายใต้สภาวะที่มีอากาศและไม่มีอากาศ เกิดเป็นสารประกอบแอมโมเนียไนโตรเจนที่ตกกันอยู่ในน้ำ 2 รูป คือ แอมโมเนียที่ไม่แตกตัวหรือแอมโมเนียอิสระ (Un-ionized form;  $\text{NH}_3$ ) และแอมโมเนียที่มีการแตกตัวหรือแอมโมเนียมไอออน (Ionized-form;  $\text{NH}_4^+$ ) ซึ่งสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนทั้ง 2 รูปนี้สามารถเปลี่ยนแปลงไปมาได้โดยขึ้นกับค่าพีเอช ดังแสดงในสมการสมดุลเคมีที่ 2.1



สำหรับความเป็นพิษของแอมโมเนียพบว่า แอมโมเนียอิสระจะมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมากกว่าแอมโมเนียมไอออน โดยความเป็นพิษนั้นสามารถเกิดได้ทั้งพิษในระดับเฉียบพลัน (Acute toxicity) และพิษในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำ ซึ่งโดยทั่วไปในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำควรควบคุมระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียอิสระไม่เกิน 0.025 มก. ไนโตรเจน/ล. (มันสิน ตันตุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2538)

### 2.2.1.2 ไนไตรต์ (Nitrite; $\text{NO}_2^-$ )

ไนไตรต์เป็นอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เป็นผลลัพธ์จากการออกซิไดซ์แอมโมเนียผ่านกระบวนการไนไตรเทชัน (Nitritation) โดยจุลินทรีย์กลุ่มออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย (Ammonium-Oxidizing Bacteria; AOB) และสามารถเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดีไนทริฟิเคชัน (Denitrification) ได้อีกทางด้วย ซึ่งปริมาณไนไตรต์โดยทั่วไปในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำจะมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากไนไตรต์มีความไม่คงตัวเกิดการออกซิไดซ์ต่อได้ง่าย ทั้งนี้ในระบบที่มีการสะสมตัวของแอมโมเนียอยู่สูงอาจทำให้เกิดการสะสมตัวของไนไตรต์ได้ด้วยเช่นกัน สำหรับความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำของไนไตรต์เกิดโดยการดูดซึมผ่านเข้าทางเหงือก ซึ่งมีผลทำให้ธาตุเหล็กที่อยู่ในฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) ถูกออกซิไดซ์เป็น

เมทฮีโมโกลบิน (Methemoglobin) ส่งผลให้ความสามารถในการเข้าจับออกซิเจนลดต่ำลง ทำให้สัตว์น้ำตายในที่สุด โดยความเป็นพิษของไนไตรต์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณออกซิเจนละลายลดต่ำลงในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไปควรควบคุมระดับความเข้มข้นของไนไตรต์ไม่ให้เกิน 1 มก. ไนโตรเจน/ล. และหากมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำจะช่วยลดความเป็นพิษได้ด้วยเช่นกัน (มันสิน ตัณกุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2538)

### 2.2.1.3 ไนเตรต (Nitrate; $\text{NO}_3^-$ )

เป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการออกซิไดซ์ไนไตรต์ผ่านกระบวนการไนเตรเทชัน (Nitrification) โดยจุลินทรีย์กลุ่มไนไตรต์ออกซิไดซ์ซึ่งแบคทีเรีย (Nitrite-Oxidizing Bacteria; NOB) ไนเตรตเป็นสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนที่มีความเป็นพิษต่ำที่สุด แต่อย่างไรก็ตามถ้ามีการสะสมของไนเตรตมากถึงระดับหนึ่งจะทำให้สัตว์น้ำเกิดสภาวะเครียดได้ โดยไนเตรตสามารถถูกกำจัดโดยพืชน้ำหรือแพลงก์ตอนที่เติบโตอยู่ในน้ำเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ทั้งนี้ค่าความเข้มข้นของไนเตรตที่เหมาะสมควรควบคุมให้มีค่าต่ำกว่า 23 มก. ไนโตรเจน/ล. และไม่ควรเกินกว่า 50 มก. ไนโตรเจน/ล. (กษิติศ หนูทอง, 2551)

### 2.2.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำหรือค่าพีเอช เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนหรือค่าความต้านทานความเป็นด่าง ในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไปการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพีเอชในระดับที่ไม่เหมาะสม หรือหากมีการเปลี่ยนแปลงค่าเกินกว่า 2 หน่วยต่อวันจะส่งผลต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ กล่าวคืออาจทำให้สัตว์น้ำเกิดความเครียดและมีอัตราการเจริญเติบโตที่ลดลง โดยค่าพีเอชในช่วงระหว่าง 4 – 5 และ 9 – 11 จะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ค่าที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 7.8 – 8.5 โดยปลาชนิดจะเจริญเติบโตได้ดีที่ค่าพีเอชในช่วง 6.5 – 8.3 (มันสิน ตัณกุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2538) นอกจากนี้ค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงยังส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปของสารพิษด้วยเช่นกัน เช่น ค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นจะทำให้แอมโมเนียอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน ซึ่งมีความเป็นพิษมากกว่าแอมโมเนียอิสระ และที่ค่าพีเอชต่ำอาจมีผลทำให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้น เป็นต้น โดยผลกระทบของค่าพีเอชกับการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลกระทบของค่าพีเอชกับการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ

ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ผลกระทบต่อสัตว์น้ำ
< 5	ทำให้สัตว์น้ำตายอย่างรวดเร็ว
5 – 7	อัตราการเจริญเติบโตและการบริโภคอาหารลดลง เมื่ออยู่นานอาจทำให้สัตว์น้ำตาย
7.5 – 8.5	มีความเหมาะสมต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ
8.5 – 10.5	อัตราการเจริญเติบโตและการบริโภคอาหารลดลง เมื่ออยู่นานอาจทำให้สัตว์น้ำตาย
> 10.5	ทำให้สัตว์น้ำตายอย่างรวดเร็ว

(ที่มา : วิชัย ลาภจตุพร และอรทัย เตียววานิชย์, 2535)

### 2.2.3 สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)

เป็นความสามารถในการรองรับไฮโดรเนียมไอออนเพื่อให้น้ำอยู่ในสภาวะที่เป็นกลางหรือความสามารถในการสะท้อนความเป็นกรด สารประกอบต่างในน้ำโดยทั่วไปประกอบด้วยไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) คาร์บอเนต ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) และไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ในน้ำป้องกันการเปลี่ยนแปลงค่าของพีเอช ช่วยปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของน้ำให้คงที่ไม่ให้เปลี่ยนแปลงไปมาก สภาพความเป็นด่างโดยทั่วไปในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีค่าอยู่ที่ 100 มก. แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. และปลานิลจะเจริญได้ดีที่สภาพความเป็นด่างในช่วง 200 – 300 มก. แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. (มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2538)

### 2.2.4 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ )

ไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นสารประกอบกำมะถันที่มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ เกิดขึ้นเนื่องมาจากการสะสมตัวของตะกอนสารอินทรีย์ที่มีการทับถมอยู่บริเวณก้นบ่อของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำในสภาวะไร้อากาศ ทำให้แบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate Reducing Bacteria; SRB) สามารถเจริญเติบโตได้โดยใช้ซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนเกิดเป็นก๊าซซัลไฟด์ขึ้น ซึ่งมีความเป็นพิษโดยซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นแบ่งเป็น 3 รูปแบบ คือ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ไฮโดรซัลไฟด์ไอออน ( $\text{HS}^-$ ) และไบซัลไฟด์ไอออน ( $\text{S}^{2-}$ ) สัดส่วนซัลไฟด์แต่ละรูปแบบจะขึ้นกับค่าพีเอชของแหล่งน้ำนั้นๆ โดยค่าทั่วไปใน

ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีซิลิเฟตอยู่ในช่วง 0.01 – 0.05 มก./ล. จึงจะถือว่ามีความปลอดภัย (รัชฎาพรไชยศรี, 2556)

### 2.2.5 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen)

ออกซิเจนที่ละลายคงเหลืออยู่ในน้ำถือเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ เนื่องจากมีบทบาทสำคัญในกระบวนการเมตาบอลิซึม โดยความต้องการในการใช้ออกซิเจนจะแตกต่างกันไปตามชนิด ขนาด พฤติกรรมและสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปเมื่อปริมาณออกซิเจนละลายมีค่าต่ำลงจะส่งผลกระทบต่อกรกินอาหารและการตายของสัตว์น้ำ ซึ่งในกรณีนี้สามารถแก้ไขได้โดยการเลือกติดตั้งเครื่องเติมอากาศให้เหมาะสมและเพียงพอต่อความต้องการของสัตว์น้ำ ทำความสะอาดบ่อ ตลอดจนเปลี่ยนถ่ายน้ำเพื่อรักษาความสะอาดอย่างสม่ำเสมอ ทั้งนี้ปริมาณออกซิเจนละลายควรมีค่ามากกว่า 5 มก./ล. (วิรัช จิวแหยม, 2544) โดยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนละลายกับผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณออกซิเจนละลายกับผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ

ปริมาณออกซิเจน (มก.ออกซิเจน/ล.)	ผลกระทบต่อสัตว์น้ำ
< 1	อันตรายถ้าอาศัยอยู่เป็นเวลานาน
1 - 5	อัตราการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำลดลงและการสืบพันธุ์ผิดปกติ ถ้าสัตว์น้ำอาศัยอยู่เป็นเวลานาน
> 5	ปกติสำหรับสัตว์น้ำทั่วไป

(ที่มา : วิรัช จิวแหยม, 2544)

### 2.2.6 อุณหภูมิ (Temperature)

เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ เนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการเมตาบอลิซึม โดยในการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำจะมีการปรับอุณหภูมิของร่างกายไม่ให้ต่างเกินกว่า 0.5 – 1 °ซ ของอุณหภูมินี้ แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วจะส่งผลทำให้สัตว์น้ำอ่อนแอหรือเกิดอาการช็อคได้ นอกจากนี้ผลของอุณหภูมิเองยังมีความสัมพันธ์กันกับคุณภาพน้ำอีกด้วย เช่น เมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณ

ออกซิเจนละลายมีค่าลดลง กิจกรรมของจุลินทรีย์ในระบบมีค่าสูงขึ้น เป็นต้น โดยทั่วไปอุณหภูมิในช่วง 19 – 28 °ซ จะมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ (วิรัช จิวแหยม, 2544)

### 2.2.7 ความขุ่น (Turbidity)

เป็นผลมาจากอนุภาคแขวนลอยที่มีอยู่ในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ เกิดจากเศษอาหารที่กินเหลือ และการขับถ่ายของสัตว์น้ำ ตลอดจนปริมาณแพลงก์ตอนที่อยู่ในน้ำและการฟุ้งของตะกอนที่ก้นบ่อ ซึ่งมีผลต่อการดูดซับและการกระจายของแสง ส่งผลต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชน้ำและการแลกเปลี่ยนออกซิเจนของสัตว์น้ำ

### 2.3 ตะกอนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

ตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเกิดขึ้นเนื่องจากอาหารที่เหลือและของเสียที่สัตว์น้ำขับถ่ายออกมา โดยทั่วไปจะพบทั้งในรูปของแข็งและสารละลาย เช่น สารประกอบไนโตรเจน ฟอสฟอรัส เป็นต้น โดยตะกอนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำส่วนใหญ่จะมีขนาดอยู่ในช่วง 150 – 200 ไมโครเมตร (เศรษฐศักดิ์ ติวะนันทร, 2556) มีรายงานว่าสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไปควรควบคุมความเข้มข้นของปริมาณสารแขวนลอย (Suspended Solid) ทั้งหมดในน้ำไม่เกิน 80 มก./ล. ปริมาณไนไตรต์ 1 มก./ล. (น้ำที่มีสภาพความเป็นด่างต่ำ) และปริมาณไนเตรต 3 มก./ล. (Timmons และคณะ, 2002) โดยถ้าหากในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำมีตะกอนมากเกินไปจะมีผลต่อคุณภาพน้ำ ซึ่งจะทำให้ความต้องการใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น อีกทั้งตะกอนจะไปขัดขวางการแลกเปลี่ยนออกซิเจนบริเวณเหงือกของปลาด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการกำจัดตะกอนออกจากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อลดปัญหาที่จะเกิดขึ้นในระหว่างการเลี้ยง

## 2.4 การแยกตะกอนด้วยหลักการเซจิงกล-ฟิสิกส์

โดยทั่วไปการเลือกใช้กระบวนการแยกตะกอนจะต้องอาศัยลักษณะทางกายภาพของตะกอนเป็นเกณฑ์ ซึ่งแต่ละวิธีในการแยกตะกอนออกจากน้ำจะมีกลไกที่แตกต่างกันดังนี้

### 2.4.1 การใช้ตะแกรงร่อน (Screening)

ของแข็งที่ได้จากการร่อนด้วยตะแกรงร่อนจะแบ่งเป็นกลุ่มๆ ตามขนาดของช่องว่างตะแกรง โดยการเคลื่อนที่ของตะแกรงในแนวระนาบหรือการหมุนเพื่อกักของแข็งขนาดใหญ่เอาไว้ เป็นต้น ในส่วนของของแข็งที่มีขนาดเล็กกว่าช่องว่างตะแกรงจะรอดผ่านรูตะแกรงออกเป็นกลุ่มย่อยๆ เช่นกัน

### 2.4.2 การตกตะกอน (Sedimentation)

การตกตะกอนเป็นการแยกเอาของแข็งแขวนลอยออกจากของเหลวให้เข้าสู่สภาวะสมดุลด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity force) โดยวัตถุที่มีน้ำหนักมากจะตกลงมาก่อน

### 2.4.3 การกรอง (Filtration)

การกรองเป็นการแยกของแข็งออกจากของเหลวหรือของผสมข้น (Slurry) โดยของแข็งที่อยู่  
ในของเหลวจะถูกกักไว้ด้วยขนาดรูพรุนของวัสดุกรอง ทำให้สามารถแยกของแข็งที่ไม่ละลายออกมาได้  
ทั้งนี้ประสิทธิภาพของการแยกจะขึ้นกับปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เหลือจากการกรองเมื่อเทียบกับ  
ปริมาณของแข็งแขวนลอยก่อนกรอง

### 2.4.4 การเหวี่ยงแยก (Centrifugation)

การเหวี่ยงแยกเป็นการเร่งการตกตะกอนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติให้เกิดเร็วขึ้นโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ทำให้การเหวี่ยงแยกใช้เวลาน้อยกว่ากระบวนการตกตะกอนตามธรรมชาติ ซึ่งอาจมีการกำหนดให้แรงเหวี่ยงมีค่ามากกว่าแรงโน้มถ่วงเป็นกี่เท่าก็ได้



## 2.5 การแยกตะกอนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

จากที่กล่าวไว้ว่าตะกอนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเกิดขึ้นจากเศษอาหารที่สัตว์น้ำกินเหลือ การขับถ่าย ตลอดจนการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ภายในบ่อ โดยที่ตะกอนอินทรีย์ดังกล่าวจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้สามารถประยุกต์แนวทางต่างๆ เพื่อแยกตะกอนแขวนลอยออกจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำได้ ดังนี้

2.5.1 การกรอง (Filtration) เป็นการแยกอนุภาคที่เป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ออกจากของเหลว ซึ่งนิยมใช้มากในการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบระบบปิด เนื่องจากสามารถใช้การกรองเพียงระบบเดียวหรือมากกว่าก็ได้ในการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยทั่วไปการกรองสามารถใช้แยกอนุภาคแขวนลอยออกจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำได้ เนื่องจากอนุภาคแขวนลอยในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจะมีขนาดอยู่ในช่วง 80 - 120 ไมโครเมตร (ศิวกฤษ หนูฤทธิ์, 2554) ทั้งนี้รูปแบบการกรองสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

2.5.1.1 Microscreen filtration เป็นการแยกอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดอยู่ในช่วง 40 - 100 ไมโครเมตร โดยการไหลผ่านของของเหลวที่ต้องการแยกผ่านวัสดุกรอง ซึ่งอนุภาคแขวนลอยในน้ำจะถูกดักจับไว้บนผิวของวัสดุกรอง เหมาะสำหรับการแยกอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 ไมโครเมตร

2.5.1.2 Granular media filtration เป็นการแยกอนุภาคแขวนลอยโดยอาศัยการติดค้างที่ผิวหน้าหรือภายในชั้นกรอง วัสดุกรองประเภทนี้จะมีความหนาและมีการจัดเรียงตัวเป็นคอลัมน์ เช่น ทราย แอนทราไซด์ เป็นต้น การกรองประเภทนี้สามารถแยกอนุภาคได้ดีเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 20 ไมโครเมตร

2.5.2 การแยกโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง (Gravity separation) เป็นกระบวนการแยกของแข็งที่แขวนลอยออกจากเฟสของเหลว โดยการกักของเหลวไว้ระยะเวลาหนึ่งในถังหรือบ่อตกตะกอน (Sedimentation tank) เพื่อลดความเร็วของของเหลวจนกระทั่งอนุภาคดังกล่าวสามารถถูกแยกออกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกในลักษณะของตะกอนบริเวณด้านล่างของถัง ซึ่งอนุภาคดังกล่าวจะต้องมีความหนาแน่นมากกว่าเฟสของเหลว (พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล, 2557)

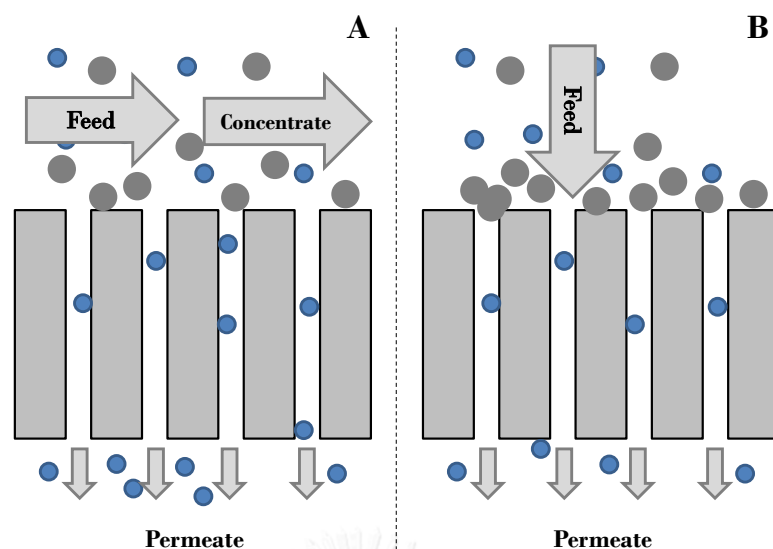
2.5.3 การลอยตัว (Floatation) เป็นกระบวนการแยกอนุภาคแขวนลอยออกจากเฟสของเหลวที่ใช้ฟองอากาศเข้าจับกับอนุภาคที่ต้องการกำจัด หรือการใช้ลักษณะทางกายภาพของอนุภาคที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าเฟสของเหลวในการแยกอนุภาคออกจากเฟสของเหลว (พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล, 2557)

## 2.6 การเดินระบบของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน

โดยทั่วไปเมื่อของเหลวถูกป้อนเข้าระบบ (Feed) ผ่านกระบวนการแยกด้วยวัสดุกรองหรือเมมเบรน (Membrane) จะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่สามารถผ่านวัสดุกรองได้เรียกว่าเพอมีเอท (Permeate) หรือส่วนที่กรองได้ (Filtrate) และส่วนที่ถูกกักกันเรียกว่ารีเทนเทท (Retentate) หรือส่วนเข้มข้น (Concentrate) ทั้งนี้ในการเดินระบบสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะของการไหลของน้ำเสียที่เข้าสู่กระบวนการได้ 2 แบบ ได้แก่

2.6.1 การเดินระบบแบบไหลขวาง (Crossflow filtration) การเดินระบบแบบนี้แตกต่างจากการเดินระบบแบบอัดตัว โดยเป็นการใช้เครื่องสูบน้ำสร้างแรงดันช่วยในการป้อนน้ำเสียเข้าให้ไหลขนานไปกับผิวหน้าของวัสดุกรอง หรือตั้งฉากกับทิศทางการไหลของส่วนเพอมีเอท (ดังภาพที่ 2.1 A) การเดินระบบแบบนี้จะมีผลต่อการลดลงของการไหลของของเหลวน้อยกว่าการเดินระบบแบบอัดตัว จึงทำให้ไม่เกิดการสะสมตัวที่ผิวหน้าของวัสดุกรองและลดการเกิดปรากฏการณ์ Concentration polarization

2.6.2 การเดินระบบแบบอัดตัว (Conventional filtration) เป็นการป้อนน้ำเสียในทิศทางการไหลแบบตั้งฉากกับผิวหน้าของวัสดุกรอง (ดังภาพที่ 2.1 B) ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนเกิดเป็นชั้นเค้ก (Cake filtration) ซึ่งจะส่งผลให้การไหลของของเหลวผ่านวัสดุกรองลดลงตามระยะเวลาเดินระบบ โดยทั่วไปการเดินระบบลักษณะนี้ใช้ในการทดสอบกระบวนการเมมเบรนหรือการทดลองในห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ 2.1 รูปแบบการกรองผ่านวัสดุกรอง เมื่อ (A) การเดินระบบแบบไหลขวาง และ (B) การเดินระบบแบบอัดตัว

โดยสมรรถนะของกระบวนการกรองผ่านเมมเบรนสามารถบ่งชี้ด้วยค่าฟลักซ์ของการกรอง (Permeate flux) ซึ่งเป็นอัตราการไหลของเพอมีเอทต่อพื้นที่เมมเบรน และค่าฟลักซ์การกักกัน (Rejection flux) ซึ่งบ่งบอกความสามารถในการแยกสารของกระบวนการ (Selectivity) ทั้งนี้ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของวัสดุกรอง ได้แก่ ขนาดช่องกรอง ประจุคุณสมบัติของสารป้อนหรือสารที่ต้องการแยก เช่น ขนาดประจุของอนุภาคหรือตัวถูกละลาย และสถานะการดำเนินงานของกระบวนการ เช่น ระดับของแรงดัน ความเร็ว และความเข้มข้น เป็นต้น ในปัจจุบันกระบวนการแยกด้วยวัสดุกรองมีความสำคัญต่อการบำบัดมลสารต่างๆในสิ่งแวดล้อม ทั้งในการบำบัดน้ำเสียและมลพิษทางอากาศ นอกจากนี้ยังมีข้อดีทางด้านการใช้งาน เช่น ต้องการพื้นที่น้อย ง่ายต่อการปรับปรุงหรือเพิ่มเติมจากระบบที่มีอยู่แล้ว การแยกเป็นไปอย่างต่อเนื่อง คุณภาพของเฟสที่ได้มีค่าสูง และไม่มีการใช้สารเคมีจึงไม่ก่อให้เกิดตะกอนทางเคมี อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายด้านอุปกรณ์และพลังงานในการเดินระบบนับเป็นตัวแปรสำคัญที่ควรพิจารณาถึงในทางปฏิบัติ

## 2.7 การกรองแบบติดค้างที่ผิวหน้า

เป็นการกรองเพื่อแยกตะกอนแขวนลอยหรือความขุ่นออกจากของไหลให้ติดค้างอยู่บนผิวของวัสดุกรอง สามารถแบ่งตามลักษณะของวัสดุกรองที่เลือกใช้ได้ 3 ประเภท ดังนี้

2.7.1 เครื่องกรองแบบใช้แผ่นกรอง ซึ่งเป็นการนำผ้า โลหะ หรือเส้นใยต่างๆ ที่ได้จากการสังเคราะห์มาใช้ทำเป็นวัสดุกรอง เช่น Cloth-media disk filter, Filter press, Belt press, และ Disc filter เป็นต้น

2.7.2 เครื่องกรองแบบใช้แท่งกรอง เป็นการนำแท่งวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Porous media) มาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกรองในการแยกตะกอนแขวนลอยต่างๆ โดยตะกอนแขวนลอยจะถูกดักจับไว้บนผิวของวัสดุกรอง เช่น Cartridge type filter

2.7.3 เครื่องกรองแบบสารกรองชั่วคราวหรือตัวกลางฟรีโคัด ก่อนการใช้งานต้องทำการฉาบผิวหน้าของวัสดุกรองก่อน โดยจะใช้ความหนาที่ 3 – 5 มม. ซึ่งจะทำให้ได้วัสดุกรองที่มีขนาดช่องกรองประมาณ 1 – 100 ไมโครเมตร และเมื่ออุดตันจะทำการชุดสารกรองทิ้งโดยที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น Diatomaceous earth filter และ Frame filter เป็นต้น

## 2.8 กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

ไมโครฟิลเตรชัน (Micro filtration) เป็นประเภทของการกรองด้วยเยื่อ (Membrane filtration) โดยใช้เยื่อสังเคราะห์ (Synthetic membrane) แยกอนุภาคออกจากสารแขวนลอยเพื่อทำให้ได้ของเหลวใส ซึ่งในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันประสิทธิภาพของการกรองจะขึ้นอยู่กับค่าฟลักซ์หรือปริมาตรการซึมผ่านต่อหน่วยพื้นที่ของวัสดุกรองต่อเวลา สามารถแสดงในรูปความต้านทานการกรองดังสมการที่ 2.2 ซึ่งปริมาตรการซึมผ่านต่อหน่วยพื้นที่ของวัสดุกรองต่อเวลาสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ประสิทธิภาพการกรองของหน่วยแยกตะกอนได้ โดยฟลักซ์ที่ลดลงจะแปรผกผันกับระยะเวลาของการกรองดังนี้

$$J = \frac{Q}{A\Delta t} \quad (2.2)$$

โดยที่  $J$  = ค่าฟลักซ์

$Q$  = ปริมาตรของไหลที่กรองได้

$A$  = พื้นที่ผิวของวัสดุกรอง

$\Delta t$  = ระยะเวลาของการกรอง

#### - กลไกการทำงานของกระบวนการไมโครฟิวเตรชัน

กระบวนการไมโครฟิวเตรชันใช้แยกสารละลายที่มีตัวถูกละลายเป็นอนุภาคขนาดเล็ก คอลลอยด์ อิมัลชัน หรือสารแขวนลอยที่มีน้ำหนักโมเลกุล วัสดุกรองที่ใช้มีช่องกรองขนาด 0.1 - 10 ไมโครเมตรแยกด้วยกลไกการคัดขนาดภายใต้ความดัน

การอุดตัน (Fouling) ที่เกิดบนวัสดุกรองส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการติดเกาะของสารแขวนลอยที่เป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ในรูปพูนของวัสดุกรอง ทำให้ค่าฟลักซ์ของของเหลวมีค่าลดลงและไม่สามารถทำให้กลับมาใช้งานได้ดังเดิม ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1) การอุดตันภายนอก (External surface fouling) เป็นการอุดตันที่เกิดจากการสะสมตัวของชั้นเค้ก (Cake) หรือเยื่อเมือกที่เกิดจากจุลินทรีย์ที่บริเวณผิวหน้าของวัสดุกรอง เรียกการอุดตันนี้ว่าการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration polarization) โดยชั้นเค้กที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของวัสดุกรองจะทำให้ของเหลวไม่สามารถถูกกรองผ่านวัสดุกรองได้ และเกิดผลต่างของความดันขึ้นระหว่างวัสดุกรองทั้ง 2 ด้าน มีผลทำให้วัสดุกรองมีประสิทธิภาพลดลงหรือฟลักซ์มีค่าลดลง

2) การอุดตันภายในช่องของวัสดุกรอง (Pore blocking fouling) เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าไปสะสมภายในช่องวัสดุกรอง อาจเกิดได้ 3 รูปแบบ คือ

- การอุดตันอย่างสมบูรณ์ (Complete pore blocking) เป็นการอุดตันเนื่องมาจากอนุภาคที่มีขนาดเท่ากับขนาดของช่องวัสดุกรอง เมื่อเข้าไปสะสมอยู่ภายในจึงไม่สามารถหลุดออกมาได้อีก มีผลทำให้ของเหลวผ่านได้น้อยมาก

- การอุดตันแบบไม่สมบูรณ์ (Intermediate pore blocking) เกิดจากอนุภาคที่มีขนาดใกล้เคียงกันกับขนาดของช่องวัสดุกรอง เมื่อเข้าไปสะสมอยู่ภายในบางส่วนจะหลุดออกมาได้ มีผลทำให้ของเหลวผ่านได้พอสมควร
- การอุดตันแบบธรรมดา (Standard pore blocking) เกิดจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าช่องของวัสดุกรอง เมื่อผ่านเข้าไปสะสมตัวอยู่ภายในจะสามารถหลุดออกได้โดยใช้แรงดันน้ำหรืออากาศ

## 2.9 ความเร็วเกรเดียนท์

ความเร็วเกรเดียนท์ ( $G$ ) คือค่าที่แสดงถึงความปั่นป่วนของน้ำซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยเฉพาะกลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุ ความปั่นป่วนของน้ำในถังกวนเร็วจะต้องมีระดับสูง (ไม่น้อยกว่า  $300 \text{ วินาที}^{-1}$ ) เพื่อให้การผสมของสารเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ ในส่วนของถังกวนช้าจะมีความปั่นป่วนต่ำ (ในช่วง  $60 - 100 \text{ วินาที}^{-1}$ ) เพื่อให้อนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วมาสัมผัสและรวมตัวกันได้ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2539) ทั้งนี้ความปั่นป่วนของน้ำที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของวัสดุกรองในงานวิจัยนี้ สามารถประยุกต์ใช้สมการของ Camp และ Stein (1943) เพื่อคำนวณหาค่าความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นได้ โดยพลังงานที่ใช้ในการสร้างความปั่นป่วนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$G = \left[ \frac{P}{\mu V} \right]^{0.5} \quad (2.3)$$

โดยที่  $G$  = ความเร็วเกรเดียนท์ ( $\text{วินาที}^{-1}$ )

$P$  = พลังงานที่ใช้ ( $\text{นิวตัน-ม./วินาที}$ )

$\mu$  = ความหนืดของน้ำ ( $\text{นิวตัน-วินาที/ตร.ม.}$ )

$V$  = ปริมาตรของน้ำในถังกวน (ลบ.ม.)

จะเห็นได้ว่าการทำให้เกิดความปั่นป่วนหรือการกวนผสม (Mixing) มีความจำเป็นต่อกระบวนการสร้างและรวมตะกอนในกระบวนการกรองตรงที่มีการเติมสารเคมีลงไป ทั้งนี้การกวนผสมเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคแขวนลอยจะทำให้กลไกทางปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น โดยในงานวิจัยนี้

ต้องการทราบความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากการเป่าอากาศ เพื่อลดต้นทุนการดำเนินงานจากการใช้พลังงานในการสร้างความปั่นป่วนในระบบ

## 2.10 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.10.1 การแยกตะกอนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

Ali (2013) ศึกษาการออกแบบหน่วยแยกตะกอนด้วยการกรองแบบหมุน (Drum screen filter) ทำการทดลองในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำที่ความหนาแน่นสูง 135 กก./ลบ.ม. อัตราการไหลของน้ำเสียเข้า 2,050 ล./นาที่ ให้อาหารสำเร็จรูปในอัตราเฉลี่ยร้อยละ 5 – 18 ของน้ำหนักปลาทั้งหมดต่อวัน และทำการทดลองที่ระยะเวลา 4 เดือน โดยกำหนดความเร็วต่อรอบของการหมุนและขนาดของวัสดุกรอง คือ 1.05 – 8.40 รอบต่อนาที และ 1.85 – 27.87 ตร.ม. ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าพื้นที่ผิววัสดุกรองและความเร็วต่อรอบในการหมุนของหน่วยแยกตะกอนมีผลต่ออัตราการกรองที่สูงขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง นอกจากนี้ยังพบว่าหลังจากเดินระบบไปเป็นระยะเวลา 60 วัน ประสิทธิภาพของการกรองจะดีขึ้นคิดเป็นร้อยละ  $52.41 \pm 16.77$

Buetehorn และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าฟลักซ์ในการกรองแบบไหลตามขวาง (Cross-flow microfiltration) โดยในการทดลองใช้ซิลิกาเป็นตัวแทนของอนุภาคแขวนลอยในน้ำเสียที่ความเข้มข้น 10,000 – 16,000 มก./ล. ผลการศึกษาพบว่าค่าฟลักซ์ในการกรองลดลงอย่างมากในช่วงต้นของการเดินระบบ อาจกล่าวได้ว่ามีการสะสมตัวของอนุภาคแขวนลอยจำนวนมากบริเวณผิวของวัสดุกรองจึงทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง และเมื่อมีการเพิ่มความเร็วการไหลของน้ำเสียเข้าหรือการลดความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอย พบว่าสามารถยืดระยะเวลาในการเดินระบบได้โดยใช้ค่าความดันที่คงที่

Couturier และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาการแยกอนุภาคแขวนลอยออกจากระบบการเลี้ยงปลาแซลมอนแบบปิดที่มีอัตราการให้อาหาร 0.16 – 0.84 กก./ลบ.ม. โดยเดินระบบที่มีระยะเวลากักน้ำ 2.8 ชม. แยกอนุภาคโดยใช้ถังตกตะกอนแบบสูงและวัสดุกรองด้วยการกรองแบบหมุน (Drum screen filter) ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคแขวนลอยด้วยถัง

ตกตะกอนแบบสูงและการใช้วัสดุกรองด้วยการกรองแบบหมุนคิดเป็นร้อยละ 63 และ 22 ตามลำดับ และมีอัตราการหมุนเวียนน้ำภายในระบบคิดเป็นร้อยละ 96

Ebeling และคณะ (2005) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคแขวนลอยขนาดเล็กของกระบวนการล้างย้อนเครื่องกรอง (Backwash) ด้วยการใช้โคแอกกูแลนต์เอ็ด (Coagulant aids) เพื่อช่วยในการรวมตะกอนร่วมกับวัสดุกรองแบบสายพานวางเอียง (Inclined belt filter) ผลการศึกษาพบว่าการตกตะกอนเพียงอย่างเดียวสามารถลดอนุภาคแขวนลอยในระบบลงได้ถึงร้อยละ 82 ซึ่งเมื่อทำการเติมโคแอกกูแลนต์เอ็ดร่วมกับการใช้วัสดุกรองแบบสายพานวางเอียงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคแขวนลอยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 95 โดยในการทดลองนี้มีการเติมโคแอกกูแลนต์เอ็ดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงอาจกล่าวได้ว่าการใช้วัสดุกรองแบบสายพานวางเอียงเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดอนุภาคแขวนลอยขนาดเล็กของกระบวนการล้างย้อนเครื่องกรอง

Patterson และ Watts (2003) ได้ทำการศึกษารูปร่างและโครงสร้างของอนุภาคแขวนลอยขนาดเล็กในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดเพื่อใช้เลือกขนาดรูของวัสดุกรองที่เหมาะสม โดยเลือกใช้วัสดุกรองที่ทำจากไนลอนที่ขนาดช่องกรองต่างๆ (ได้แก่ 70, 41, 30, 20, 10 และ 5 ไมโครเมตร) ผลการศึกษาพบว่าวัสดุกรองที่มีขนาดช่องกรองต่ำกว่า 40 ไมโครเมตรจะพบการอุดตันของอนุภาคในช่องของวัสดุกรอง ส่วนวัสดุกรองที่ขนาดช่องกรอง 70 และ 41 จะพบลักษณะคล้ายฟิล์มเคลือบอยู่บนผิวหน้าของวัสดุกรอง แต่ไม่ทำให้วัสดุกรองเกิดการอุดตันอย่างสมบูรณ์

Viadero และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาการกำจัดอนุภาคตะกอนแขวนลอยออกจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด โดยสนใจศึกษาตะกอนแขวนลอยขนาดเล็กที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 20 – 25 ไมโครเมตร เพื่อรักษาคุณภาพน้ำในระบบให้เหมาะสมต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ ในการทดลองครั้งนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เป็นตัวแทนของน้ำเสีย และในการดำเนินงานมีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อใช้เป็นตัวแทนอนุภาคในน้ำ ทำการกรองแบบไหลตามขวางโดยใช้วัสดุกรองแบบเส้นใยกลวง (Hallow fiber membrane) ที่มีขนาด 0.05 ไมโครเมตร ผลการศึกษาพบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดตะกอนแขวนลอยมากกว่าร้อยละ 94 ของตะกอนทั้งหมด ทั้งยังสามารถลดปริมาณความต้องการออกซิเจนในระบบลงได้ถึงร้อยละ 76 โดยค่าพลาซิกซ์ของการกรองจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิและความดัน



Wang และคณะ (2016) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกรองด้วยเมมเบรน และการปลูกพืชน้ำร่วมในบ่อเลี้ยงปลานิลด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด ในขั้นตอนการทดลองเลือกใช้บ่อพลาสติกแบบไร้ดินขนาด 500 ล. เลี้ยงปลานิลที่ความหนาแน่น 5.5 กก./ลบ.ม. ในน้ำปริมาตร 300 ล. ให้อาหารอัตราร้อยละ 2 ของน้ำหนักตัว ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ ผลการศึกษาพบว่าน้ำหนักของปลา อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และปริมาณผลผลิตที่ได้หลังจากสิ้นสุดการทดลองในบ่อที่มีการใช้เมมเบรนเพิ่มขึ้นในอัตราร้อยละ 69, 54 และ 34 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าตะกอนอินทรีย์ที่อยู่ภายในชุดควบคุมส่งผลให้ความต้องการปริมาณออกซิเจนในชุดควบคุมเพิ่มขึ้นมากกว่าชุดการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ

ปกฉัตร ชูติวิศุทธิ์ (2552) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการกรองแบบแบ่งส่วนในการแยกสาหร่ายและอนุภาคแขวนลอยในบ่อเลี้ยงกุ้งขาวและกุ้งกุลาดำ ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้ทดลองใช้สาหร่ายเป็นตัวบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำร่วมกับการกรองแบบแบ่งส่วน ในการทดลองนี้ใช้วัสดุกรองที่มีขนาดช่องกรอง 30 ไมโครเมตร ผลการศึกษาพบว่าวัสดุกรองที่ใช้สามารถแยกสาหร่ายออกได้ ถึงแม้ว่าขนาดช่องกรองที่ใช้จะมีขนาดใหญ่กว่า และยังสามารถแยกอนุภาคแขวนลอยออกจากระบบได้ โดยประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคแขวนลอยในบ่อเลี้ยงกุ้งขาวและกุ้งกุลาดำมีค่าสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 61.6 และ 76.6 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการแปรค่าความเร็วที่ใช้ในการกรองเท่ากับ 0.0007 และ 0.0016 ม./วินาที พบว่าบ่อเลี้ยงกุ้งขาวสามารถให้สัดส่วนน้ำกรองต่อน้ำเวียนสูงสุดเท่ากับ 45:55 และ 25:75 ตามลำดับ ส่วนบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำสามารถให้สัดส่วนน้ำกรองต่อน้ำเวียนสูงสุดเท่ากับ 40:60 และ 30:70 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามน้ำที่ผ่านการกรองยังคงมีปริมาณสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนที่สูงอยู่จึงจำเป็นต้องมีการบำบัดด้วยวิธีอื่นๆ ต่อไป

ศิวฤกษ์ หนูฤทธิ (2554) ได้ทำการศึกษาการพัฒนาหน่วยแยกตะกอนและผลของตะกอนต่อคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด โดยทดลองเลี้ยงปลานิลในระบบปิดที่ความหนาแน่น 3 กก./ลบ.ม. ให้อาหารในอัตราร้อยละ 3 ของน้ำหนักปลาทั้งหมดต่อวัน ผลการศึกษาพบว่าตะกอนแขวนลอยที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียและไนไตรต์ในระบบเพิ่มสูงขึ้นไปด้วย ซึ่งมีผลต่ออัตราการรอดของปลานิล ทั้งนี้อัตราการรอดของปลาเมื่อสิ้นสุดการทดลองอยู่ที่ร้อยละ 85.9 ที่ปริมาณตะกอนแขวนลอย  $956 \pm 1.2$  มก./ล. และเมื่อทำการทดลองออกแบบหน่วยแยกตะกอนเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำในระบบ โดยใช้หน่วยแยกตะกอน 5 รูปแบบ คือ หน่วยแยกตะกอนแบบ

ถึงไม่มีวัสดุบรรจุภายใน หน่วยแยกตะกอนแบบบรรจุตัวกรองพลาสติก BCN-009 หน่วยแยกตะกอนแบบแผ่นพีวีซีกั้นแผ่นกลม หน่วยแยกตะกอนแบบแผ่นพีวีซีกั้นรูปกรวยคว่ำ และหน่วยแยกตะกอนแบบแผ่นพีวีซีกั้นรูปกรวยหงาย ผลการศึกษาพบว่าหน่วยแยกตะกอนแบบแผ่นพีวีซีกั้นแผ่นกลมมีประสิทธิภาพดีที่สุด ซึ่งมีประสิทธิภาพร้อยละ  $71.3 \pm 2.4$  ที่อัตราการไหลน้ำขาเข้า 180 ล./ชม.

เศรษฐศักดิ์ ติวะนันทร (2557) ศึกษาการกรองตะกอนแขวนลอยในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยแผ่นกรองไนลอนชนิดวางเอียงที่ทำมุม 60 องศา กับแนวระดับ มีขนาดช่องกรอง 100 ไมโครเมตร โดยใช้อัตราการไหล 280 ล./ชม. ทดลองกับบ่อเลี้ยงปลานิลขนาดเล็ก 200 ล. เป็นเวลา 92 วัน และบ่อขนาดใหญ่ 3,900 ล. เป็นเวลา 30 วัน เมื่อเลี้ยงปลานิลด้วยความหนาแน่น 1 กก./ลบ.ม. และ 7 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าชุดทดลองที่ติดตั้งหน่วยกรองเข้ากับบ่อเลี้ยงปลานิลขนาดเล็กมีปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำเท่ากับ  $12.22 \pm 0.96$  มก./ล. และปริมาณไนเตรตในน้ำ  $3.54 \pm 0.35$  มก.ไนโตรเจน/ล. ในขณะที่ชุดควบคุมที่มีเฉพาะบ่อเลี้ยงปลานิลมีปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำสูง  $988.33 \pm 35.47$  มก./ล. และมีปริมาณไนเตรตในน้ำเพิ่มขึ้นถึง  $69.10 \pm 4.36$  มก./ล. และเมื่อทำการทดลองกับบ่อเลี้ยงปลานิลขนาดใหญ่ พบว่าหน่วยกรองตะกอนสามารถควบคุมปริมาณตะกอนได้เป็นอย่างดี โดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 73.82 และมีปริมาณตะกอนเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ  $60.35 \pm 14.08$  มก./ล.

#### 2.10.2 อิทธิพลของตะกอนแขวนลอยต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ

Azim และ Little (2008) ได้ทำการศึกษาผลของอนุภาคแขวนลอยต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบปิด เมื่อทำการทดลองภายใต้สภาวะการจำกัดแสง โดยเลี้ยงปลานิลที่ความหนาแน่น 3 กก./ลบ.ม. ในบ่อขนาด 250 ล. ทำการแปรค่าสภาวะการทดลอง 3 รูปแบบ คือ ถังทดลองที่ให้อาหารโปรตีนร้อยละ 24 ถังทดลองที่ให้อาหารโปรตีนร้อยละ 35 และถังควบคุมที่ไม่มีตะกอนที่ให้อาหารโปรตีนร้อยละ 35 ผลการศึกษาพบว่า ถังทดลองที่ไม่มีการควบคุมตะกอนให้ผลผลิตปลานิลดีกว่าถังควบคุมร้อยละ 45 ซึ่งอาจเนื่องมาจากปลานิลกินอนุภาคแขวนลอยในบ่อเลี้ยงเป็นอาหาร และพบว่าปริมาณโปรตีนในอาหารให้ผลต่อการเจริญเติบโตของปลานิลไม่แตกต่างกัน

Holan และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษาผลของตะกอนแขวนลอยและ ตะกอนขนาดเล็กในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด ในการทดลองทำการเลี้ยงปลาชนิด *Gadus morhua* ซึ่งเป็นลูกปลาขนาดเล็กที่ความหนาแน่นสูง แบ่งการทดลองออกเป็นชุดการทดลองและชุดควบคุม โดยชุดการทดลองมีการติดตั้งระบบการกรองชีวภาพเพื่อกำจัดอนุภาคแขวนลอยและลดธาตุอาหารในระบบ ในระหว่างการทดลองทุกๆ วันมีการหมุนเวียนน้ำภายในระบบร้อยละ 8.5 ของน้ำในบ่อ ผลการทดลองพบว่าในชุดการทดลองที่ติดตั้งระบบการกรองชีวภาพมีค่าความขุ่นและจำนวนตะกอนแขวนลอยลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณแบคทีเรียที่ลดลง และอัตราการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 13

Ray และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาการกำจัดอนุภาคแขวนลอยในบ่อเลี้ยงกุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*) โดยใช้คอลัมน์ตกตะกอนทรงกระบอกสูง มีขนาดความกว้าง 55 ซม. สูง 107 ซม. ทำจากโพลีเอทิลีน (Polyethylene) ติดตั้งเข้ากับบ่อพลาสติกขนาด 6.27 ลบ.ม. มีทิศทางไหลเข้าของน้ำเสียจากบนลงล่างด้วยอัตราการไหล 6 ล./นาที ทำการเลี้ยงกุ้งขาวในบ่อพลาสติกกลางแจ้งเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ การศึกษาผลการกำจัดอนุภาคแขวนลอยในบ่อเลี้ยงกุ้งขาว พบว่าการตกตะกอนโดยใช้คอลัมน์สามารถลดปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและปริมาณความต้องการการใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (BOD) ได้ร้อยละ  $45 \pm 23$  ( $P < 0.001$ ) และร้อยละ 12 ( $P < 0.005$ ) ตามลำดับ

### 2.10.3 การบำบัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด

Liu และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษากระบวนการกรองชีวภาพในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยการปรับปรุงสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบของตัวกรองชีวภาพเพื่อทำการเลี้ยงปลาเก๋ายก (*Barcoo perch*) ในถังพลาสติกปริมาตร 1,600 ล. หน่วยการกรองชีวภาพมีลักษณะเป็นทรงกระบอกสูง ปริมาตร 10 ล. ภายในบรรจุวัสดุกรองซึ่งเป็นตัวกรองชีวภาพขนาด 2 – 3 มม. ที่ผ่านการบ่มตัวกรองเป็นระยะเวลา 10 – 20 วัน ซึ่งในสภาวะการทดลองควบคุมอุณหภูมิที่  $29 \pm 1$  °ซ พีเอช 6.8 – 7.2 และมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ  $6.2 \pm 0.6$  มก./ล. โดยปริมาณแอมโมเนียและไนไตรต์ระหว่างการทดลองเป็นเวลา 52 วันมีความเข้มข้น 1.6 มก./ล. และ 0.9 มก./ล. ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมากกว่าร้อยละ 60 และพบว่าที่ระยะเวลาในการกักเก็บน้ำ 3 - 5 นาทีระบบการกรองชีวภาพมีประสิทธิภาพดีที่สุด

ศิริวรรณ ศิลาภากุล (2545) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบเลี้ยง สัตว์น้ำแบบปิด ในการทดลองได้ทำการเลี้ยงกุ้ง ซึ่งภายในบ่อเลี้ยงใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยก ที่มีการไหลเวียนน้ำภายนอกบ่อ โดยภายในตัวถังปฏิกรณ์ประกอบด้วย 2 สภาวะ คือ สภาวะที่มี อากาศและสภาวะที่ไม่มีอากาศ มีการใช้ตัวกลางพลาสติกชนิดไบโอบอล (Bioball) เพื่อให้จุลินทรีย์ ยึดเกาะ โดยผลการศึกษาพบว่าสามารถบำบัดสารประกอบไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์ เกิดปฏิกิริยา ไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชันพร้อมกัน โดยไนทริฟิเคชันจะอยู่ในช่วง 0.06 – 0.87 มก./ตร.ม./วัน และดีไนทริฟิเคชันอยู่ในช่วง 0.01 – 0.08 มก./ตร.ม./วัน

เพ็ญพิชญา พินิจธนภักย์ (2556) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียและ ไนเตรตจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในการเลี้ยงสัตว์น้ำระดับความหนาแน่นสูงภายในโรงเรือน ด้วยถังปฏิกรณ์รวมไนทริฟิเคชัน-ดีไนทริฟิเคชันโดยใช้ตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดในกระบวนการ ไนทริฟิเคชัน และหินพัมมิสในกระบวนการบำบัดรวมดีไนทริฟิเคชัน พบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนีย ในตัวกรองชีวภาพไบโอคอร์ดเท่ากับ 42.4 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน และหินพัมมิสเท่ากับ 640 มก.แอมโมเนีย-ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน ส่วนอัตราการบำบัดไนเตรตของหินพัมมิสมีค่าเท่ากับ 169.1 มก.ไนเตรต-ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน โดยในสภาวะการทดลองเลี้ยงสัตว์น้ำจริงได้เลือกใช้หินพัมมิส เพียงอย่างเดียวเนื่องจากสามารถบำบัดแอมโมเนียและไนเตรตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำการแยก ตะกอนออกจากน้ำเสียก่อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ทั้งนี้กระบวนการไนทริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้ ในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายอย่างเพียงพอและมีคาร์บอนปิดฝาถังปฏิกรณ์ด้วยพลาสติก จากนั้น กระบวนการดีไนทริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นต่อเนื่องในสภาวะที่ทำการควบคุมปริมาณออกซิเจนละลาย ให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการเปิดปั๊มเวียนน้ำและมีการเติมเมทานอลเพื่อเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนใน สัดส่วนซีโอดีต่อไนเตรตไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถควบคุมปริมาณ แอมโมเนียและไนเตรตให้มีค่าต่ำกว่า 1 และ 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ในขณะที่ไนเตรตของ ชุดควบคุมมีค่าสูงถึง 352.47 มก.ไนเตรต-ไนโตรเจน/ล.

- สรุปประเด็นสำคัญจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอนแบบใช้แผ่นกรอง ได้แก่ ขนาดช่องกรองของวัสดุกรอง ขนาดของตะกอน การกระจายตัวของตะกอน ปริมาณความเข้มข้นของตะกอนในระบบ และอัตราการไหลของน้ำเข้าหน่วยแยกตะกอน ในการออกแบบหน่วยแยกตะกอนของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำจะต้องศึกษาลักษณะทางกายภาพและขนาดอนุภาคของตะกอนในระบบก่อน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเลือกวัสดุกรอง และสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบ

2. การกรอง (Filtration) และ การตกตะกอน (Sedimentation) เป็นหลักการที่ได้รับความนิยมในการแยกอนุภาคแขวนลอยออกจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ ทั้งนี้ความสามารถของแต่ละกระบวนการจะถูกจำกัดด้วยลักษณะกายภาพของตะกอน เช่น ขนาดของตะกอน ความหนาแน่นของตะกอน เป็นต้น โดยการตกตะกอนจะเหมาะสมกับระบบที่มีอัตราการไหลต่ำ ในขณะที่การกรองจะต้องมีขั้นตอนสำหรับการล้างย้อนหรือขัดล้างวัสดุกรองในระหว่างการเดินระบบ

3. การติดตั้งหน่วยแยกตะกอนรูปแบบต่างๆ สามารถควบคุมปริมาณตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำให้ต่ำกว่า 200 มก./ล. ได้ นอกจากนี้เมื่อติดตั้งควบคู่กับระบบตัวกรองชีวภาพ (ไนตริฟิเคชัน-ดีไนตริฟิเคชัน) จะสามารถควบคุมการเพิ่มขึ้นของสารอนินทรีย์ในโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำได้อีกด้วย โดยในระบบที่มีการแยกตะกอนออกก่อนเข้าสู่หน่วยบำบัดถัดไปจะช่วยระบบบำบัดสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพและสามารถลดค่าใช้จ่ายในการดูแลระบบได้

4. การพัฒนาระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดด้วยการติดตั้งหน่วยแยกตะกอนร่วมกับระบบบำบัดทางชีวภาพในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจะช่วยเพิ่มอัตราการรอดของสัตว์น้ำในระบบได้ ซึ่งหน่วยแยกตะกอนจะช่วยลดภาระของหน่วยบำบัดทางชีวภาพ ทั้งนี้การบำบัดทางชีวภาพประกอบด้วย 2 กระบวนการหลักคือ กระบวนการไนตริฟิเคชันและกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยเริ่มจากการออกซิไดซ์แอมโมเนียที่เกิดจากเศษอาหารและสิ่งขับถ่ายของสัตว์น้ำซึ่งมีความเป็นพิษสูง โดยการสะสมของปริมาณแอมโมเนียในระดับ 0.025 มก.-ไนโตรเจน/ล. อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของสัตว์น้ำ การลดความเป็นพิษของแอมโมเนียสามารถทำได้โดยเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของไนไตรต์และไนเตรตซึ่งมีความเป็นพิษต่ำกว่าผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน ซึ่งต้องอาศัยแบคทีเรียกลุ่มออกโตโทรฟภายใต้สภาวะที่มีอากาศอย่างเพียงพอ อย่างไรก็ตามการสะสมของไนเตรตในถังเลี้ยงสัตว์น้ำใน

ระดับสูงกว่า 50 มก.-ไนโตรเจน/ล. อาจส่งผลให้สัตว์น้ำเกิดความเครียดและมีอัตราการบริโภคอาหารลดลง (กษิติศ หนูทอง, 2551) อาจจะต้องมีกระบวนการดีไนทริฟิเคชันเข้ามาช่วยในการลดปริมาณไนเตรตที่เกิดขึ้นให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจนคืนสู่บรรยากาศ



### บทที่ 3

#### แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการทดลอง

- ถังพลาสติกขนาด 250 ล. และขนาด 2,000 ล.
- ท่อพีวีซีและข้อต่อ
- ท่อและแผ่นอะคริลิก
- นาฬิกาจับเวลา
- ปรุ
- อาหารปลา ยี่ห้อ CP 9932 (โปรตีนร้อยละ 18)
- แผ่นกรองสแตนเลส ขนาด 100, 130 และ 160 ไมโครเมตร
- สายยางเติมอากาศ
- สายไฟและปลั๊กสามตา
- หัวทรายเติมอากาศ ชนิดหยาบและชนิดละเอียด
- อุปกรณ์วัดความยาวปลา
- กาวซิลิโคน
- วัสดุตัวกลางพลาสติก BCN-012
- เครื่องสูบน้ำ ยี่ห้อ RESUN รุ่น KING-4 และ AP-2500
- กล้องจุลทรรศน์ ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX50
- เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น PT1200
- เครื่องเติมอากาศ ยี่ห้อ RESUN รุ่น LP100
- Laser particle size distribution analyzer ยี่ห้อ Malvern รุ่น Mastersizer3000

- Total Organic Carbon Analyzer with Solid Analyzer ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น TOC Tcvh

### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

- กระดาษกรอง Whatman GF/C ขนาด 25 และ 47 มม.
- กระจกฉีดยา ขนาด 20 มล.
- กระจกตวง ขนาด 50 และ 100 มล.
- ขวดพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำ ขนาด 50 มล.
- ขวดน้ำกลั่น
- เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและอุณหภูมิ ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 9147
- เครื่องชั่งสารเคมี 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ E-Scale รุ่น ES-A320
- Microplate reader spectrophotometer ยี่ห้อ BioTek รุ่น PowerWaveXS2
- เครื่องวัดพีเอช ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI 9125
- ปุ่มดูดอากาศ ยี่ห้อ Chemvk รุ่น V300
- เครื่องตั้งเวลาเปิด-ปิดอัตโนมัติ ยี่ห้อ OMRON รุ่น DH48S-S
- ชุดทดสอบแอมโมเนีย ไนไตรต์ และค่าสภาพต่าง ยี่ห้อ AQUA-VBC
- ตู้อบ ยี่ห้อ Memmert
- โถกรอง
- โถดูดความชื้น (Desicators)
- บีกเกอร์ ขนาด 100 250 และ 500 มล.
- บิวเรต ขนาด 50 มล.
- ปิเปตและไมโครปิเปต
- หลอดหยด
- ชุดกรองสำหรับกระจกฉีดยา (Syringe filter holder)

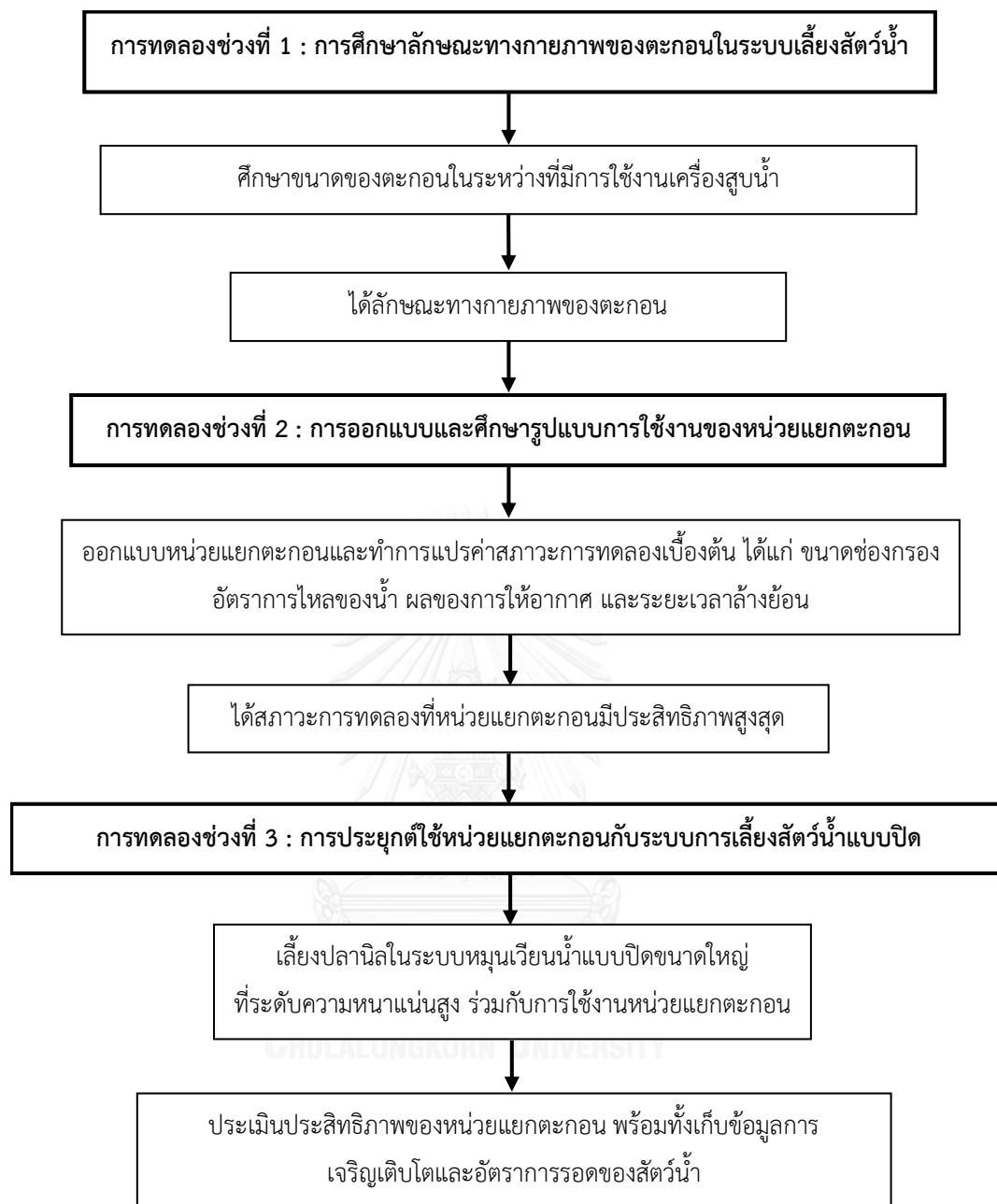


### 3.1.3 สารเคมี (Analytical grade)

- Amyl alcohol ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{CH}_2\text{OH}$ )
- Ethylenediamine dihydrochloride ( $\text{C}_2\text{H}_{10}\text{Cl}_2\text{N}_2$ )
- NNED solution (N-(1-Naphthy)
- Sodium bicarbonate ( $\text{NaHCO}_3$ )
- Sodium citrate ( $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ )
- Sodium salicyrate ( $\text{C}_7\text{H}_5\text{NaO}_3$ )
- Sodium hexametaphosphate ( $(\text{NaPO}_3)_6$ )
- Sodium hydroxide ( $\text{NaOH}$ )
- Sodium hypochlorite ( $\text{NaOCl}$ )
- Sulphanilamide ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2\text{S}$ )

## 3.2 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการประเมินประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอนที่พัฒนาขึ้น ในการกำจัดตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดภายในโรงเรือน โดยใช้วัสดุกรองสแตนเลสที่มีรูปแบบการกรองแบบต่อเนื่อง ทั้งนี้รายละเอียดของงานวิจัยทั้งหมดแสดงในแผนภาพที่ 3.1 ดำเนินการทดลองในระดับปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิตั้งที่ห้อง ฅ ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ช่วง มีรายละเอียดดังนี้

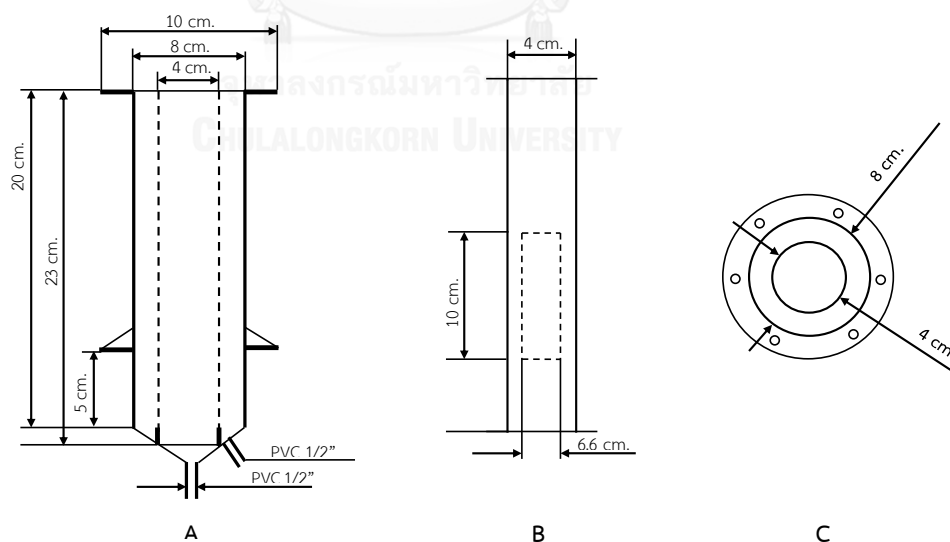


ภาพที่ 3.1 แผนผังสรุปภาพรวมการดำเนินงานของงานวิจัยนี้

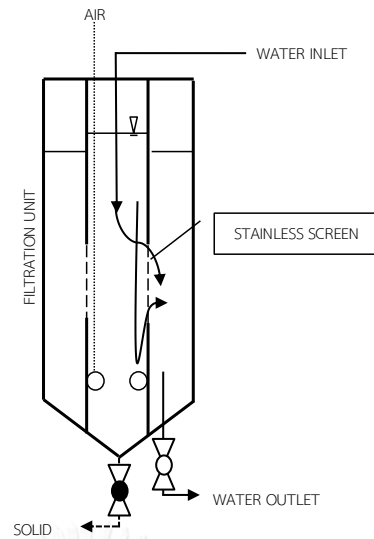
### 3.3 วัสดุอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

#### 3.3.1 หน่วยแยกตะกอนขนาด 1.5 ลิตร

หน่วยแยกตะกอนทำจากอะคริลิกใสทรงกระบอกสูง 30 ซม. ซ้อนกัน 2 ชั้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 80 มม. และด้านใน 40 มม. (ภาพที่ 3.2) ที่บริเวณด้านข้างของทรงกระบอกด้านในเจาะช่องสำหรับปิดทับด้วยวัสดุกรองขนาดพื้นที่ 0.0066 ตร.ม. ( $0.022 \times 0.1$  ม.) จำนวน 3 ช่อง ในส่วนกันล้นออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงกรวยเพื่อรวมตะกอนและระบายตะกอนออกได้ง่ายเมื่อเปิดวาล์วทางด้านล่าง การทำงานของหน่วยแยกตะกอนอาศัยหลักการกรอง (ภาพที่ 3.3) โดยน้ำที่มีตะกอนจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจะถูกเครื่องสูบน้ำสูบเข้าสู่หน่วยแยกตะกอนทางด้านบนของทรงกระบอกชั้นใน น้ำที่มีตะกอนจะไหลขนานกับวัสดุกรองโดยเป็นผลจากการไหลของน้ำและจากการเป่าอากาศจากหัวจ่ายที่อยู่ด้านล่าง น้ำที่ผ่านการกรองจะไหลเข้าสู่ทรงกระบอกชั้นนอกในทิศทางตั้งฉากกับวัสดุกรองและไหลออกทางวาล์วน้ำด้านล่างของทรงกระบอกชั้นนอกเพื่อวนน้ำกลับสู่บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำภายในทรงกระบอกชั้นในจะกักเก็บตะกอนไว้ทำให้มีความเข้มข้นของตะกอนมากขึ้น และเมื่อค่าฟลักซ์การกรองน้ำลดลงจะถ่ายตะกอนออกทางวาล์วด้านล่างของทรงกระบอกชั้นใน



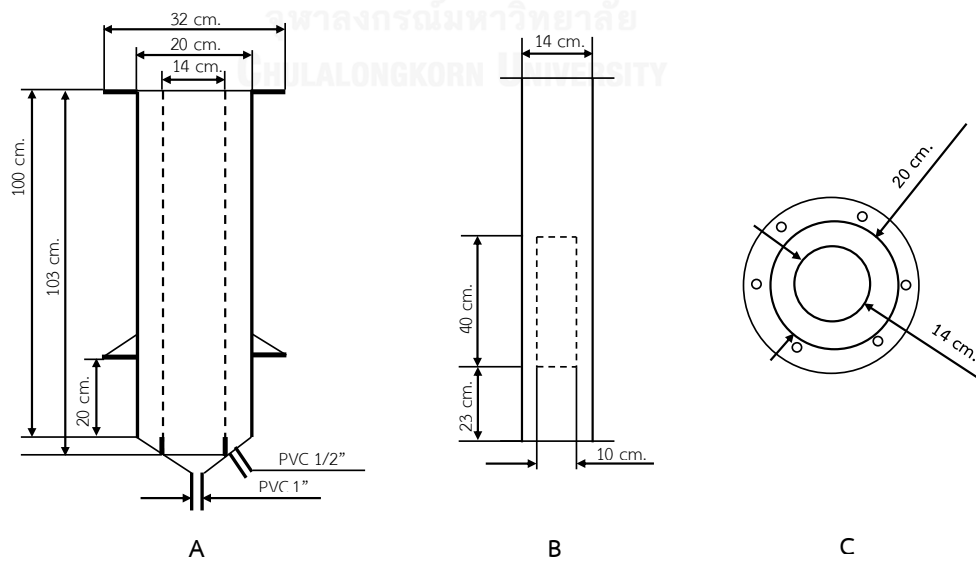
ภาพที่ 3.2 หน่วยแยกตะกอนทรงกระบอกสองชั้นขนาด 1.5 ล. โดย (A) ลักษณะทรงกระบอกด้านนอก (B) ลักษณะทรงกระบอกด้านใน และ (C) ภาพมุมมองของหน่วยแยกตะกอน



ภาพที่ 3.3 การทำงานของหน่วยแยกตะกอน

### 3.3.2 หน่วยแยกตะกอนขนาด 25 ลิตร

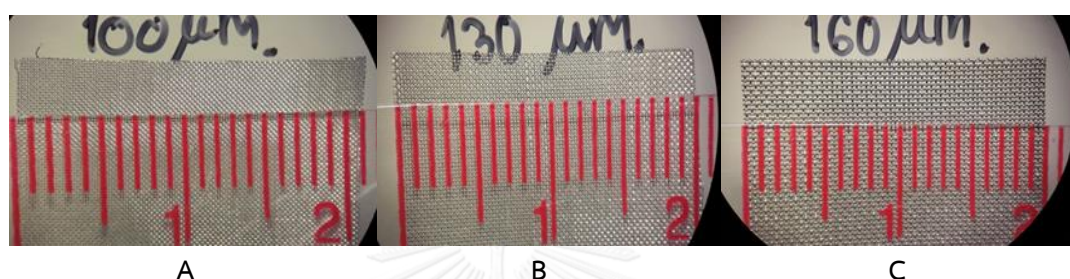
มีรูปร่างลักษณะเหมือนกับหน่วยแยกตะกอนขนาด 1.5 ล. ทุกประการ (ภาพที่ 3.2) แต่ทำการปรับขนาดให้ใหญ่ขึ้นเพื่อรองรับน้ำเสียปริมาณมาก โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 200 มม. และด้านใน 140 มม. (ภาพที่ 3.4) มีขนาดพื้นที่ผิวการกรองรวม 0.04 ตร.ม.



ภาพที่ 3.4 หน่วยแยกตะกอนทรงกระบอกสองชั้นขนาด 25 ล. โดย (A) ลักษณะทรงกระบอกด้านนอก (B) ลักษณะทรงกระบอกด้านใน และ (C) ภาพมุมมองของหน่วยแยกตะกอน

### 3.3.3 วัสดุกรอง

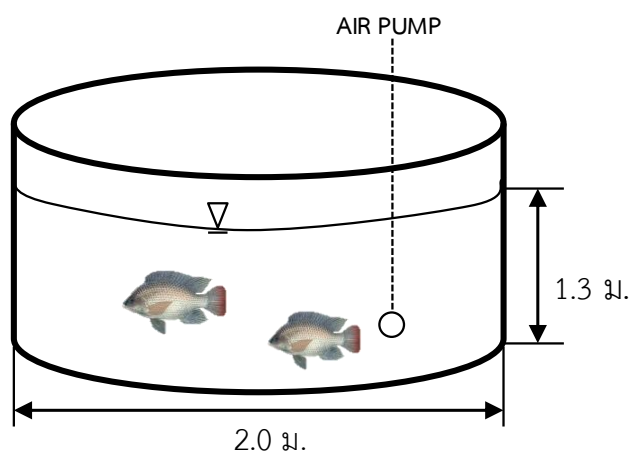
วัสดุกรองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ แผ่นกรองสแตนเลส (Stainless steel screen) เนื่องจากแผ่นกรองสแตนเลสมีความยืดหยุ่นน้อยแต่ทนต่อแรงเสียดสีและแรงดึงได้ดี จึงสามารถทนต่อแรงพลักของน้ำได้ โดยขนาดช่องของแผ่นกรองที่เลือกใช้ในการทดลองมี 3 ขนาด คือ 100, 130 และ 160 ไมโครเมตร (ภาพที่ 3.5)



ภาพที่ 3.5 ลักษณะของแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องกรองที่แตกต่างกัน โดย (A) 100 ไมโครเมตร (B) 130 ไมโครเมตร และ (C) 160 ไมโครเมตร

### 3.3.4 บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำสำหรับการทดลองเป็นบ่อพลาสติกชนิด HDPE ทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 ม. มีปริมาตร 4,000 ล. (ภาพที่ 3.6) โดยจำลองการเลี้ยงปลานิลในระบบปิดภายในโรงเรือนที่ความหนาแน่นเริ่มต้นประมาณ 3 กก./ลบ.ม. ในน้ำปริมาตร 2,000 ล. เติมอากาศในน้ำด้วยหัวเติมอากาศชนิดละเอียดให้มีปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen, DO) มากกว่า 4 มก./ล. ตลอดเวลา ในระหว่างการทดลองจะไม่มี การเปลี่ยนถ่ายน้ำออกจากบ่อ แต่มีการเติมน้ำซดเชยในส่วนที่ระเหยและส่วนที่อยู่ในตะกอนที่นำออกจากระบบเท่านั้น



ภาพที่ 3.6 บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

### 3.3.5 ตัวกรองชีวภาพ

การทดลองนี้ใช้ตัวกลางพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) รุ่น BCN-012 สำหรับเป็นวัสดุตั้งจุลินทรีย์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 มม. สูง 11 มม. และมีพื้นที่ผิว 859 ตร.ม./ลบ.ม. (ภาพที่ 3.7)



ภาพที่ 3.7 ตัวกรองชีวภาพชนิด BCN-012

### 3.3.6 เครื่องสูบน้ำ

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องสูบน้ำยี่ห้อ RESUN ซึ่งเป็นเครื่องสูบน้ำที่ใช้กันทั่วไปในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยเป็นเครื่องสูบน้ำชนิดหมุนเหวี่ยง (Centrifugal pump) ลักษณะของเครื่องสูบน้ำและใบพัดที่ใช้ในการปั่นเหวี่ยงแสดงในภาพที่ 3.8 ในการทดลองเลือกใช้เครื่องสูบน้ำ 2 ขนาด คือ 90 วัตต์ (2,800 ล./ชม.) และ 130 วัตต์ (8,500 ล./ชม.) ซึ่งสร้างแรงดันน้ำได้สูงสุด 2.5 และ 4.5 ม. ตามลำดับ



เครื่องสูบน้ำขนาด 90 วัตต์



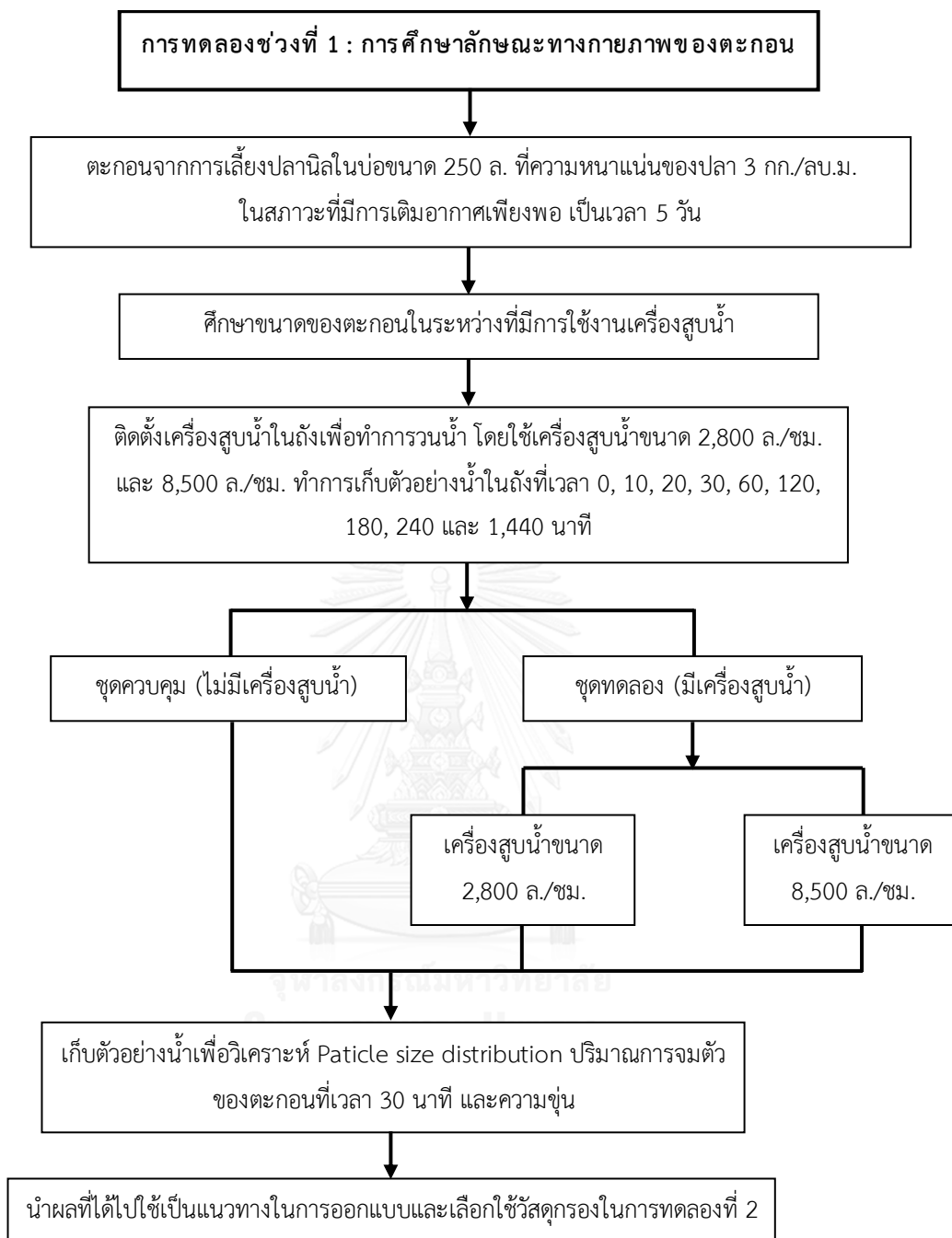
เครื่องสูบน้ำขนาด 130 วัตต์

ภาพที่ 3.8 เครื่องสูบน้ำชนิดหมุนเหวี่ยงและใบพัดที่ใช้ในการทดลอง

## 3.4 การดำเนินการทดลอง

### 3.4.1 การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตะกอน

การทดลองในส่วนนี้ศึกษาถึงข้อมูลพื้นฐานและลักษณะทางกายภาพของตะกอนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยข้อมูลที่ได้รับจะนำไปใช้ในการเลือกวัสดุกรองและการออกแบบหน่วยแยกตะกอน ภาพที่ 3.8 แสดงแผนภาพสรุปขั้นตอนการดำเนินงานในการทดลองช่วงที่ 1



ภาพที่ 3.9 แผนผังการดำเนินงานช่วงที่ 1



การทดลองนี้ติดตามการเปลี่ยนแปลงขนาดและการกระจายตัวของตะกอนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ เริ่มต้นด้วยการเลี้ยงปลาในกระชังปิดที่ความหนาแน่นประมาณ 3 กก./ลบ.ม. ในถังพลาสติกขนาด 250 ล. เติมอากาศด้วยหัวทรายชนิดละเอียดให้มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO) มากกว่า 4 มก./ล. ตลอดเวลา ให้อาหารปลาที่มีโปรตีนร้อยละ 18 วันละ 2 ครั้ง ในอัตราร้อยละ 3 – 5 ของน้ำหนักปลาต่อวัน ใช้ระยะเวลาเลี้ยงปลาประมาณ 5 วัน เพื่อให้ได้ตะกอนเพียงพอสำหรับการทดลอง แบ่งการทดลองออกเป็นชุดควบคุมและชุดทดลอง โดยชุดควบคุมไม่มีการวนน้ำในถังเลี้ยงปลาผ่านเครื่องสูบน้ำ ขณะที่ในชุดทดลองทำการวนน้ำในถังเลี้ยงปลาผ่านเครื่องสูบน้ำขนาดเล็กที่อัตรา 2,800 ล./ชม. และผ่านเครื่องสูบน้ำขนาดใหญ่ที่อัตรา 8,500 ล./ชม. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำในบ่อเลี้ยงปลาที่เวลา 0 10 20 30 60 120 180 240 และ 1,440 นาที หลังจากเริ่มเปิดเครื่องสูบน้ำ เพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณการตกตะกอนที่เวลา 30 นาที ( $SV_{30}$ ) ด้วยกรวยอิมฮอฟ และตรวจวัดค่าความขุ่นของน้ำใสส่วนบนในกรวยอิมฮอฟด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร รวมทั้งเก็บตัวอย่างน้ำปริมาตร 1 ลิตรจากถังเลี้ยงปลาเพื่อวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตะกอนด้วยเครื่อง Particle Size Distribution Analyzer ตารางที่ 3.1 แสดงค่าตัวแปรที่ศึกษาในการทดลองช่วงที่ 1 ส่วนตารางที่ 3.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำและตะกอนในการทดลองช่วงที่ 1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตะกอนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด

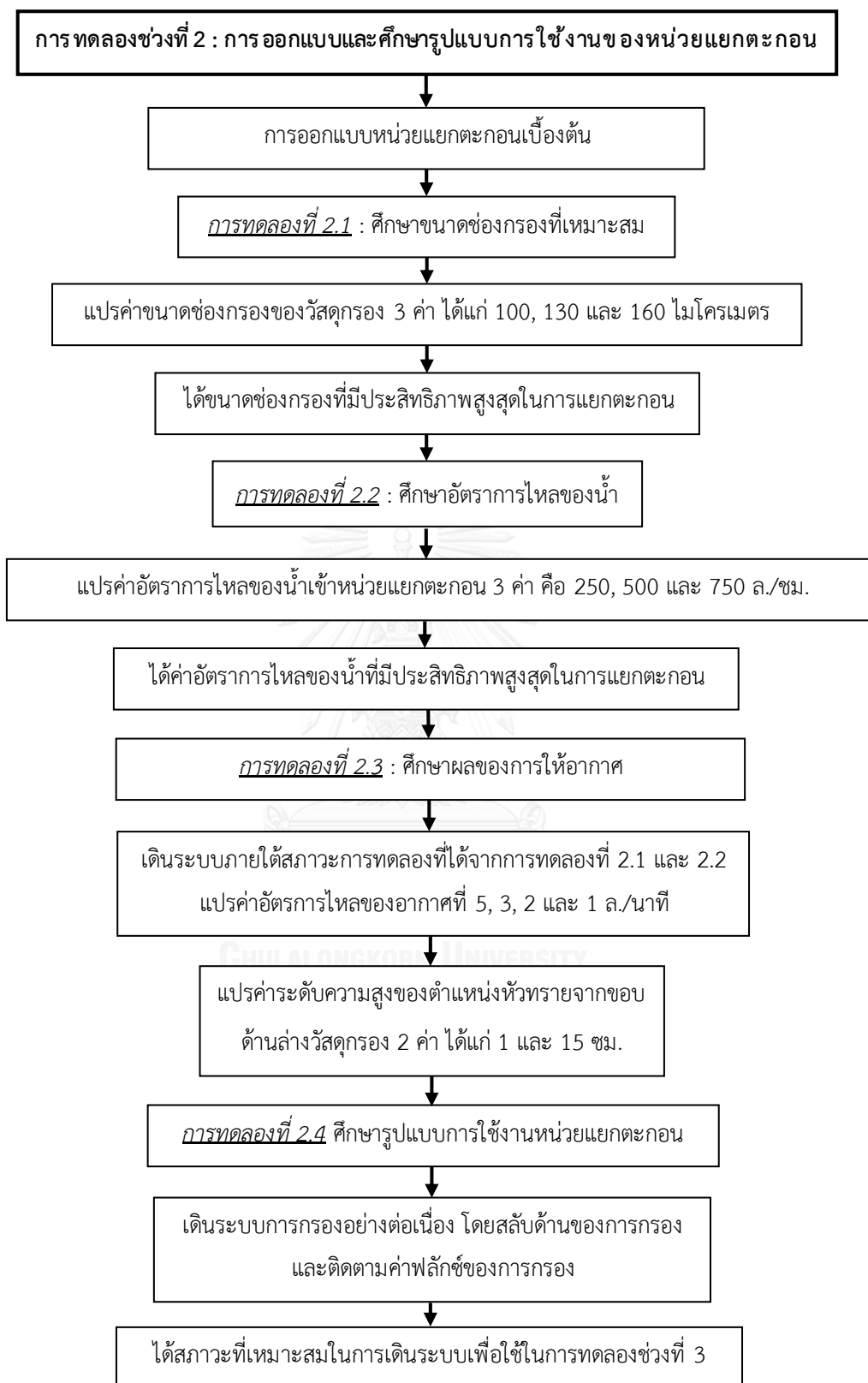
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ลักษณะตะกอน	- ตะกอนที่ไม่ผ่านเครื่องสูบน้ำ ตะกอนที่ผ่านเครื่องสูบน้ำขนาดเล็ก และตะกอนที่ผ่านเครื่องสูบน้ำขนาดใหญ่
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ชนิดของสัตว์ทดลอง	- ปลานิล
ความหนาแน่นของสัตว์น้ำในบ่อ	- 3 กก./ลบ.ม.
อาหารเลี้ยงสัตว์น้ำ	- โปรตีนร้อยละ 18 ในอัตราร้อยละ 3 – 5 ของน้ำหนักปลาต่อวัน
ระยะเวลาการทดลอง	- ต่อเนื่อง 24 ชม.
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ต้องการวิเคราะห์
ลักษณะทางกายภาพของตะกอน	- ขนาดของตะกอน ปริมาณการตกตะกอนที่เวลา 30 นาที และความขุ่นของน้ำ

ตารางที่ 3.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนในการทดลองช่วงที่ 1

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/ เครื่องมือวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่าง	ความถี่ในการ วิเคราะห์
ปริมาณตะกอน	ตักตะกอนในกรวยอิมฮอฟ 30 นาที	บ่อทดลอง	0, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240 และ 1,440 นาที
ค่าความขุ่น	สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (760 นาโนเมตร)	บ่อทดลอง	0, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240 และ 1,440 นาที
ขนาดและการ กระจายตัวของ อนุภาค	Laser Particle Size Distribution Analyzer	บ่อทดลอง	0, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240 และ 1,440 นาที

### 3.4.2 การทดลองช่วงที่ 2 การใช้งานของหน่วยแยกตะกอน

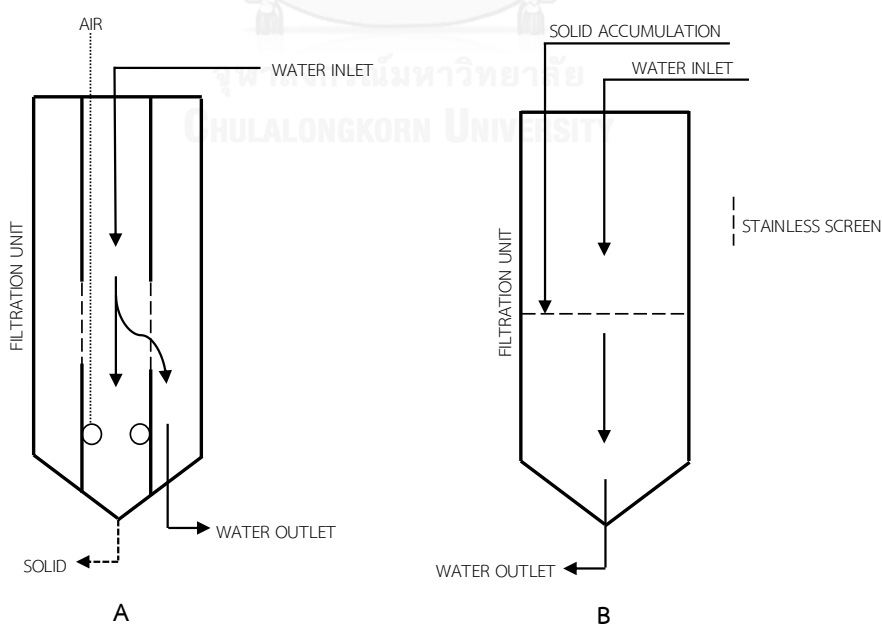
การทดลองนี้ศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมของการใช้งานหน่วยแยกตะกอนในการแยกตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด ผลการทดลองจากส่วนที่ 3.4.1 ได้นำมาใช้เลือกขนาดของช่องกรองของวัสดุกรองสแตนเลส โดยได้ทำการแปรค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดลอง ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำ อัตราการไหลของอากาศ ตำแหน่งการวางหัวทราย และรูปแบบการเดินระบบ แบ่งการทดลองเป็น 4 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.10 แผนผังการดำเนินงานในการทดลองช่วงที่ 2

### 3.4.2.1 การทดลองที่ 2.1 รูปแบบการกรองและขนาดช่องกรอง

เริ่มต้นการทดลองโดยการเลี้ยงปลาในถังที่มีความหนาแน่นประมาณ 3 กก./ลบ.ม. ในถังพลาสติก ปริมาตร 250 ล. เป็นระยะเวลา 5 วัน เพื่อให้มีปริมาณตะกอนเพียงพอต่อการทดลอง ระหว่างการเลี้ยงให้อาหารที่มีโปรตีนร้อยละ 18 ในอัตราร้อยละ 3 – 5 ของน้ำหนักปลาทั้งหมดต่อวัน ในการทดลองนี้เลือกใช้แผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องกรองแตกต่างกัน ได้แก่ 100, 130 และ 160 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นช่วงค่าจากการทดลองในส่วนที่ 3.4.1 จากนั้นเดินระบบการกรองด้วยหน่วยแยกตะกอนโดยควบคุมอัตราการไหลของน้ำและอากาศที่ 2,400 ล./ชม. และ 70 ล./นาที่ ตามลำดับ ควบคุมปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำเสียเข้าสู่หน่วยแยกตะกอนที่ประมาณ 150 มก./ล. ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกตะกอนของแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องกรองต่างกัน 3 ขนาด โดยแปรเปลี่ยนรูปแบบการกรอง 2 ลักษณะ ได้แก่ แบบไหลขวาง (Crossflow filtration) และแบบตั้งฉาก (Conventional filtration) ทั้งนี้ในการพิจารณาขนาดของช่องกรองที่เหมาะสมจะประเมินจากค่าฟลักซ์ของการกรองและปริมาณของแข็งแขวนลอยก่อนและหลังการกรอง ภาพที่ 3.10 แสดงการกรองแบบไหลขวางและแบบตั้งฉาก ขณะที่ตารางที่ 3.3 แสดงค่าตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.4.2.1 และตารางที่ 3.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำและตะกอน



ภาพที่ 3.11 รูปแบบการกรองในหน่วยแยกตะกอนเพื่อเลือกขนาดช่องกรองที่เหมาะสม โดย (A) การกรองแบบไหลขวาง และ (B) การกรองแบบตั้งฉาก

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการศึกษาขนาดช่องกรองของแผ่นกรองสแตนเลส

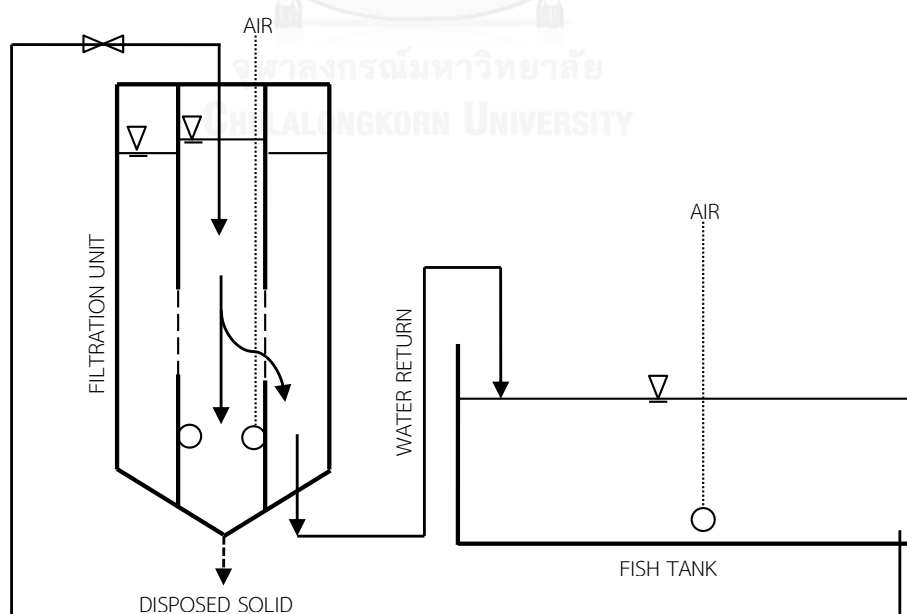
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ขนาดช่องของวัสดุกรอง	- 100, 130 และ 160 ไมโครเมตร
รูปแบบการกรอง	- ไหลขวาง และ ตั้งฉาก
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ขนาดของหน่วยแยกตะกอน	- 1.5 ล.
พื้นที่วัสดุกรอง	- 0.0066 ตร.ม.
อัตราการไหลของน้ำเข้าสู่หน่วยแยกตะกอน	- 2,400 ล./ชม.
อัตราการไหลของอากาศ	- 70 ล./นาที่
ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ	- 150 มก./ล.
ชนิดของวัสดุกรอง	- แผ่นกรองสแตนเลส
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ต้องการวิเคราะห์
ค่าฟลักซ์การกรอง	- ค่าฟลักซ์การกรองในหน่วย ล./ตร.ม./ชม.
ปริมาณสารแขวนลอย	- ปริมาณสารแขวนลอยในน้ำขาออก

ตารางที่ 3.4 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนในการทดลองที่ 2.1

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/ เครื่องมือวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่าง		ความถี่ในการ วิเคราะห์
		บ่อทดลอง	ออกจากหน่วย แยกตะกอน	
ค่าฟลักซ์	ปริมาตรการกรอง		✓	
ปริมาณ สารแขวนลอย	ปริมาณของแข็ง แขวนลอยทั้งหมดในน้ำ	✓	✓	เมื่อเริ่มการทดลองและ ตามช่วงเวลาที่กำหนด

### 3.4.2.2 การทดลองที่ 2.2 อัตราการไหลของน้ำเสีย

เริ่มต้นการทดลองโดยการเลี้ยงปลาในถังที่มีความหนาแน่นประมาณ 3 กก./ลบ.ม. ในถังพลาสติก ปริมาตร 2,000 ล. เป็นระยะเวลา 5 วัน เพื่อให้มีปริมาณตะกอนเพียงพอต่อการทดลอง ระหว่างการเลี้ยงให้อาหารที่มีโปรตีนร้อยละ 18 ในอัตราร้อยละ 3 – 5 ของน้ำหนักปลาทั้งหมดต่อวัน ในส่วนของแผ่นกรองสแตนเลสที่ได้ใช้ขนาดช่องกรองตามผลการทดลองในส่วนที่ 3.4.2.1 แต่เพิ่มขนาดพื้นที่การกรองเป็น 0.12 ตร.ม. เพื่อให้รองรับปริมาณน้ำเสียได้มากขึ้น ทำการเชื่อมต่อถังเลี้ยงสัตว์น้ำและหน่วยแยกตะกอนขนาด 25 ล. ดังภาพที่ 3.11 จากนั้นปรับค่าอัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าสู่หน่วยแยกตะกอน 3 ค่า คือ 250, 500 และ 750 ล./ชม. ตามลำดับ โดยควบคุมปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำเสียเข้าประมาณ 200 มก./ล. ในแต่ละค่าอัตราการไหลของน้ำเสียได้เก็บตัวอย่างน้ำเข้าและน้ำที่ออกจากหน่วยแยกตะกอนเป็นระยะเพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแขวนลอย ทำการทดลอง 3 ซ้ำสำหรับแต่ละค่าอัตราการไหลของน้ำเสีย และพิจารณาสถานะที่เหมาะสมของอัตราการไหลของน้ำเสียจากการประเมินค่าฟลักซ์การกรองและปริมาณของแข็งแขวนลอยก่อนและหลังการกรอง โดยตารางที่ 3.5 แสดงค่าตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.4.2.2 และตารางที่ 3.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำและตะกอน



ภาพที่ 3.12 แผนผังการเดินระบบในการทดลองที่ 2.2

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการศึกษาอัตราการไหลของน้ำ

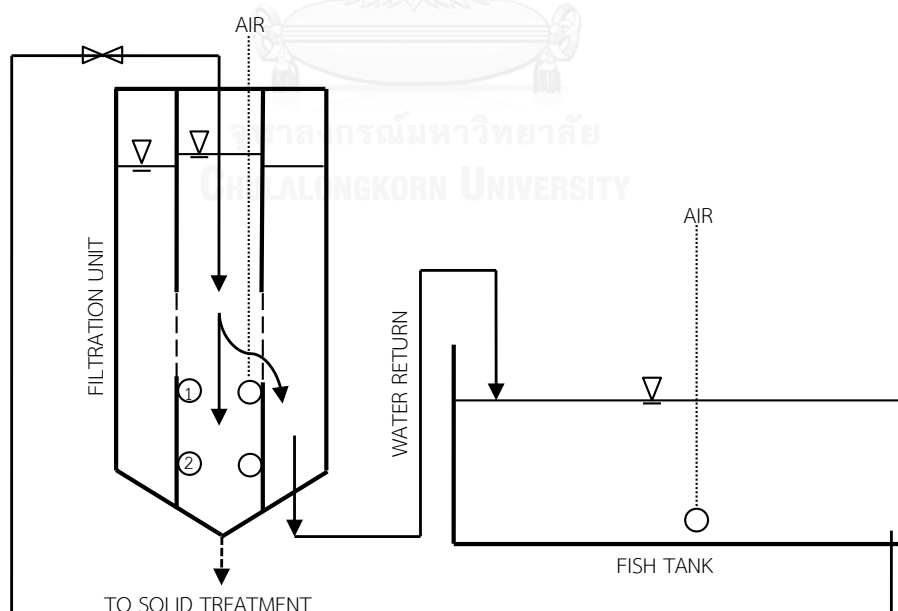
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
อัตราไหลของน้ำเข้าหน่วยแยกตะกอน	- 250, 500 และ 750 ล./ชม.
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ขนาดของหน่วยแยกตะกอน	- 25 ล.
พื้นที่วัสดุกรอง	- 0.12 ตร.ม.
ขนาดช่องของวัสดุกรอง	- ผลจากการทดลองที่ 3.4.2.1
รูปแบบการกรอง	- ผลจากการทดลองที่ 3.4.2.1
ค่าอัตราการไหลของอากาศ	- 70 ล./นาที่
ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ	- 150 มก./ล.
ชนิดของวัสดุกรอง	- แผ่นกรองสแตนเลส
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ต้องการวิเคราะห์
ฟลักซ์การกรอง	- ค่าฟลักซ์การกรองในหน่วย ล./ตร.ม./ชม.
ปริมาณสารแขวนลอย	- ปริมาณสารแขวนลอยในน้ำขาเข้าและขาออก

ตารางที่ 3.6 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนในการทดลองที่ 2.2

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/ เครื่องมือวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่าง		ความถี่ในการ วิเคราะห์
		บ่อทดลอง	ออกจากหน่วย แยกตะกอน	
ค่าฟลักซ์การกรอง	ปริมาตรการกรอง		✓	เมื่อเริ่มการทดลองและ ตามช่วงเวลาที่กำหนด
ปริมาณตะกอน แขวนลอย	ปริมาณตะกอน แขวนลอยทั้งหมดในน้ำ	✓	✓	

### 3.4.2.3 การทดลองที่ 2.3 อัตราการให้อากาศและตำแหน่งของหัวจ่ายอากาศ

เริ่มต้นการทดลองโดยการเลี้ยงปลานิลที่ความหนาแน่นประมาณ 3 กก./ลบ.ม. ในถังพลาสติก ปริมาตร 2,000 ล. เป็นระยะเวลา 5 วัน เพื่อให้มีปริมาณตะกอนเพียงพอต่อการทดลอง ระหว่างการเลี้ยงให้อาหารที่มีโปรตีนร้อยละ 18 ในอัตราร้อยละ 3 – 5 ของน้ำหนักปลาทั้งหมดต่อวัน เลือกใช้ค่าที่เหมาะสมของขนาดช่องกรองและอัตราการไหลของน้ำเสียจากการทดลองที่ 3.4.2.1 และ 3.4.2.2 มาใช้ในการเดินระบบหน่วยแยกตะกอน ทำการเชื่อมต่อหน่วยแยกตะกอนขนาด 25 ล. กับถังเลี้ยงสัตว์น้ำ ดังภาพที่ 3.12 แปรค่าอัตราการไหลของอากาศภายในหน่วยแยกตะกอนระหว่าง 1 – 5 ล./นาที และเปลี่ยนตำแหน่งความสูงของหัวทรายจากขอบล่างของวัสดุกรองลงไปที่ระดับ 1 และ 15 ซม. เก็บตัวอย่างน้ำขาเข้าและน้ำที่ออกจากหน่วยแยกตะกอนเป็นระยะ และทำการทดลอง 3 ครั้งในแต่ละค่าอัตราการไหลของอากาศและตำแหน่งของหัวทราย จากนั้นพิจารณาสถานะเหมาะสมของอัตราการไหลของอากาศและตำแหน่งของหัวทราย จากการประเมินค่าฟลักซ์ของการกรองและปริมาณของแข็งแขวนลอยก่อนและหลังการกรอง โดยตารางที่ 4.7 แสดงค่าตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.4.2.3 และตารางที่ 3.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำและตะกอน



ภาพที่ 3.13 แผนผังการเดินระบบในการทดลองที่ 2.3



ตารางที่ 3.7 ตัวแปรในการศึกษาผลของการให้อากาศและตำแหน่งของหัวทรายต่อประสิทธิภาพ  
ของหน่วยแยกตะกอน

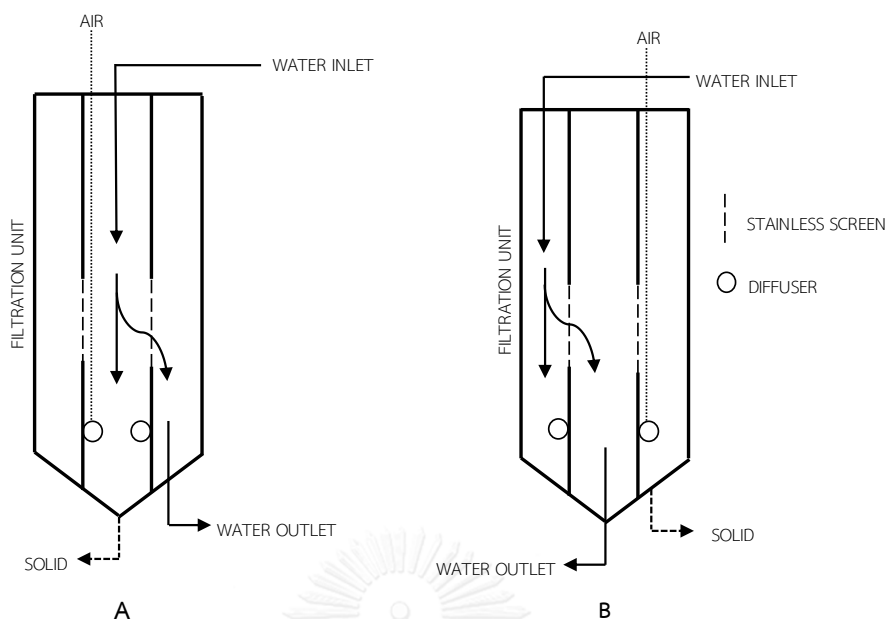
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
อัตราการใช้ของอากาศ	- 1, 2, 3 และ 5 ล./นาที่
ตำแหน่งหัวทรายในแนวตั้ง	- 1 และ 15 ซม. จากขอบล่างของวัสดุกรองลงไป
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ขนาดของหน่วยแยกตะกอน	- 25 ล.
พื้นที่วัสดุกรอง	- 0.12 ตร.ม.
ขนาดช่องของวัสดุกรอง	- ผลจากการทดลองที่ 3.4.2.1
รูปแบบการกรอง	- ผลจากการทดลองที่ 3.4.2.1
ค่าอัตราการใช้ของน้ำเข้าหน่วยแยกตะกอน	- ผลจากการทดลองที่ 3.4.2.2
ปริมาณของแข็งแขวนลอย	- 100 – 200 มก./ล.
ชนิดของวัสดุกรอง	- แผ่นกรองสแตนเลส
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ต้องการวิเคราะห์
ฟลักซ์การกรอง	- ค่าฟลักซ์การกรองในหน่วย ล./ตร.ม./ชม.
ปริมาณสารแขวนลอย	- ปริมาณสารแขวนลอยในน้ำขาออก

ตารางที่ 3.8 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนในการทดลองที่ 2.3

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/ เครื่องมือวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่าง		ความถี่ในการ วิเคราะห์
		บ่อทดลอง	ออกจากหน่วย แยกตะกอน	
ค่าฟลักซ์	ปริมาตรการกรอง		✓	เมื่อเริ่มการทดลองและ ตามช่วงเวลาที่กำหนด
ปริมาณสาร แขวนลอย	ปริมาณของแข็ง แขวนลอยทั้งหมดในน้ำ	✓	✓	

#### 3.4.2.4 การทดลองที่ 2.4 รูปแบบการใช้งานของหน่วยแยกตะกอน

เริ่มต้นการทดลองโดยการเลี้ยงปลาไนที่มีความหนาแน่นประมาณ 3 กก./ลบ.ม. ในถังพลาสติก ปริมาตร 2,000 ล. เป็นระยะเวลา 5 วัน เพื่อให้มีปริมาณตะกอนเพียงพอต่อการทดลอง ระหว่างการเลี้ยงได้ให้อาหารที่มีโปรตีนร้อยละ 18 ในอัตราร้อยละ 3 – 5 ของน้ำหนักปลาทั้งหมดต่อวัน เลือกใช้ค่าที่เหมาะสมของขนาดช่องกรอง อัตราการไหลของน้ำเสีย อัตราการไหลของอากาศและตำแหน่งหัวทราย จากผลการทดลองที่ 3.4.2.1 และ 3.4.2.2 และ 3.4.2.3 ตามลำดับ กับการเดินระบบหน่วยแยกตะกอน ทำการเชื่อมต่อหน่วยแยกตะกอนขนาด 25 ล.กับถังเลี้ยงสัตว์น้ำ จากนั้นจึงเริ่มเดินระบบ โดยให้น้ำเสียเข้าสู่หน่วยแยกตะกอนบริเวณพื้นที่ของทรงกระบอกด้านใน (ภาพที่ 3.13 A) ทำการกรองกระทั่งค่าฟลักซ์การกรองลดลงเหลือประมาณร้อยละ 95 ของค่าเริ่มต้น จึงทำการสลับการกรองมายังพื้นที่วงแหวนระหว่างทรงกระบอกด้านในและด้านนอก (ภาพที่ 3.13 B) ทำการกรองต่อเนื่องจนกระทั่งค่าฟลักซ์การกรองลดลงเหลือเพียงร้อยละ 95 จึงสลับด้านการกรองมายังด้านในอีกครั้ง ทั้งนี้ในระหว่างการทดลองจะทำการวิเคราะห์ค่าฟลักซ์การกรองเริ่มต้นของการกรองทั้งสองด้าน ปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำขาออก และเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้เดินระบบหน่วยแยกตะกอนแบบสลับ โดยตารางที่ 3.9 แสดงค่าตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.4.2.4 และตารางที่ 3.10 แสดงพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำและตะกอน



ภาพที่ 3.14 การใช้งานหน่วยแยกตะกอนแบบกรองสลับ โดย (A) การกรองตะกอนจากด้านใน และ (B) การกรองตะกอนจากด้านนอกในพื้นที่วงแหวน

ตารางที่ 3.9 ตัวแปรในการศึกษารูปแบบการใช้งานของหน่วยแยกตะกอน

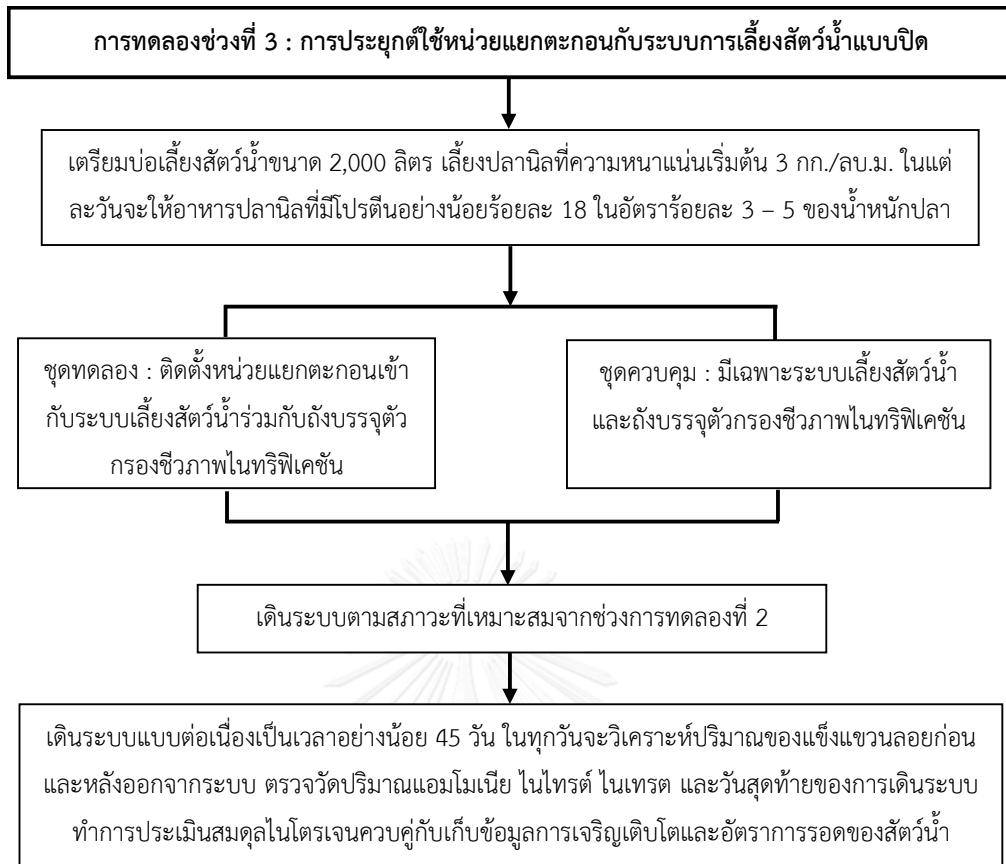
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ค่าฟลักซ์การกรอง	- ลดลงร้อยละ 5 จากค่าเริ่มต้นการเดินระบบ
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ขนาดของหน่วยแยกตะกอน	- 25 ล.
พื้นที่วัสดุกรอง	- 0.12 ตร.ม.
ขนาดช่องของวัสดุกรอง	- ผลจากการทดลองที่ 3.4.2.1
รูปแบบการกรอง	- ผลจากการทดลองที่ 3.4.2.1
ค่าอัตราการไหลของน้ำเข้าหน่วยแยกตะกอน	- ผลจากการทดลองที่ 3.4.2.2
ค่าอัตราการไหลของอากาศ	- ผลจากการทดลองที่ 3.4.2.3
ระดับความสูงของหัวทราย	- ผลจากการทดลองที่ 3.4.2.3
ปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำเสีย	- 100 – 200 มก./ล.
ชนิดของวัสดุกรอง	- แผ่นกรองสแตนเลส
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ต้องการวิเคราะห์
เวลาที่ใช้	- นาที
ปริมาณสารแขวนลอยในน้ำขาออก	- ปริมาณสารแขวนลอยในน้ำขาออก

ตารางที่ 3.10 พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนในการทดลองที่ 2.4

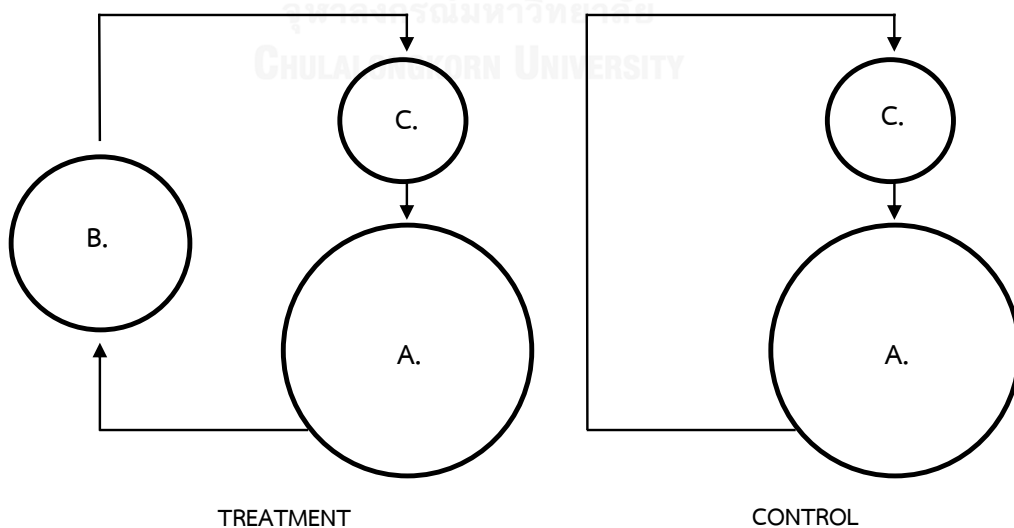
พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/ เครื่องมือวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่าง		ความถี่ในการ วิเคราะห์
		บ่อดทดลอง	ออกจากหน่วย แยกตะกอน	
เวลาที่ใช้	นาฬิกาจับเวลา		✓	
ปริมาณสาร แขวนลอย	ปริมาณของแข็ง แขวนลอยทั้งหมดในน้ำ	✓	✓	เมื่อเริ่มการทดลองและ ตามช่วงเวลาที่กำหนด

### 3.4.3 การทดลองช่วงที่ 3 การประยุกต์ใช้หน่วยแยกตะกอนกับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการใช้งานหน่วยแยกตะกอนร่วมกับการเลี้ยงปลาในในระบบปิด ซึ่งมีการใช้งานตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันร่วมด้วย ทำการเดินระบบหน่วยแยกตะกอนโดยใช้ข้อมูลจากการทดลองที่ผ่านมา ดังแผนภาพสรุปขั้นตอนการดำเนินงานใน 3.14 เริ่มต้นการทดลองโดยเลี้ยงปลาในถังที่ความหนาแน่นเริ่มต้น 3 กก./ล.ม. ในถังพลาสติกปริมาตร 2,000 ล. ให้อาหารที่มีโปรตีนร้อยละ 18 ในอัตราร้อยละ 3 – 5 ของน้ำหนักปลาทั้งหมดต่อวัน ในชุดทดลองได้ติดตั้งหน่วยแยกตะกอนเข้ากับถังเลี้ยงปลาและเดินระบบแบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 45 วัน ในสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำในระบบแต่จะหมุนเวียนน้ำผ่านหน่วยแยกตะกอนแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ โดยน้ำที่ออกจากหน่วยแยกตะกอนจะไหลผ่านเข้าถังบรรจุตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันก่อนเวียนกลับเข้าถังเลี้ยงปลาอีกครั้ง ขณะที่ในชุดควบคุมจะไม่มีติดตั้งหน่วยแยกตะกอนเข้ากับถังเลี้ยงปลา มีเพียงถังบรรจุตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันที่ติดตั้งเข้ากับถังเลี้ยงปลาเท่านั้น (ภาพที่ 3.15) ในระหว่างการทดลองทำการเก็บตัวอย่างน้ำในถังเลี้ยงปลาและน้ำที่ผ่านการกรองจากหน่วยแยกตะกอน จากนั้นวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและปัจจัยทางกายภาพทุกวัน ได้แก่ ค่าฟลักซ์การกรองของน้ำ ปริมาณตะกอนแขวนลอย แอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต ออกซิเจนละลายน้ำ อุณหภูมิ พีเอช สภาพความเป็นด่าง และปริมาณตะกอนแขวนลอยที่แยกออกจากถังเลี้ยงปลา ตลอดจนตรวจวัดอัตราการเจริญเติบโต และอัตราการรอดตายในช่วงเริ่มต้นการทดลองและสิ้นสุดการทดลอง โดยตารางที่ 3.11 แสดงค่าตัวแปรที่ทำการศึกษา และตารางที่ 3.12 แสดงพารามิเตอร์ต่างในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำและตะกอน



ภาพที่ 3.15 แผนผังการดำเนินงานในการทดลองช่วงที่ 3



ภาพที่ 3.16 การติดตั้งระบบในการทดลองช่วงที่ 3 เมื่อ (A) บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

(B) หน่วยแยกตะกอน และ (C) ถังบรรจุตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน

ตารางที่ 3.11 ตัวแปรในการศึกษาการประยุกต์ใช้หน่วยแยกตะกอนกับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด	- บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่ติดตั้งหน่วยแยกตะกอนและ ไม่ติดตั้งหน่วยแยกตะกอน
คุณภาพน้ำจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด	- น้ำเสียจากบ่อเลี้ยงปลา
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
พื้นที่วัสดุกรอง	- 0.12 ตร.ม.
ขนาดของถังเลี้ยงปลา	- 2,000 ล.
ขนาดช่องของวัสดุกรอง	- ผลจากการทดลองช่วงที่ 3.4.2.1
รูปแบบการกรอง	- ผลจากการทดลองช่วงที่ 3.4.2.1
ค่าอัตราการไหลของน้ำเข้าหน่วยแยกตะกอน	- ผลจากการทดลองช่วงที่ 3.4.2.2
อัตราการไหลของอากาศ	- ผลจากการทดลองช่วงที่ 3.4.2.3
ระดับความสูงของหัวทราย	- ผลจากการทดลองช่วงที่ 3.4.2.3
ระยะเวลาในการเดินระบบ	- อย่างน้อย 45 วัน
อาหารสัตว์น้ำ	- อาหารเม็ดที่มีโปรตีนร้อยละ 18
ปริมาณการให้อาหาร	- ร้อยละ 3 – 5 ต่อวันของน้ำหนักปลาทั้งหมด
ความหนาแน่นเริ่มต้นของปลานิล	- 3 กก./ลบ.ม.
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ต้องการวิเคราะห์
1. ประสิทธิภาพในการแยกตะกอน	- ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นต่อวัน ปริมาณตะกอน แขวนลอยในน้ำขาออกและปริมาณน้ำปนตะกอน
2. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ	- ปริมาณสารแขวนลอย แอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต ออกซิเจนละลายน้ำ อุณหภูมิ พีเอช และสภาพความ เป็นต่าง
3. อัตราการเจริญเติบโตและการรอดตายของสัตว์น้ำ	- ชั่งน้ำหนัก วัดความยาว และนับจำนวนปลา

ตารางที่ 3.12 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและตะกอนในการทดลองที่ 3

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/ เครื่องมือวิเคราะห์	จุดเก็บตัวอย่าง		ความถี่ใน การ วิเคราะห์
		บ่อดทดลอง	ออกจากหน่วยแยก ตะกอน	
<u>พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ</u>				
แอมโมเนีย	Salicylate-Hypochlorite method (ดัดแปลงจาก Bower และ Holm- Hansen, 1980)	✓	✓	ทุกวัน
ไนไตรต์	Colorimetric and Spectrophotometric method (ดัดแปลงจาก Strickland และ Parsons, 1972)	✓	✓	ทุกวัน
ไนเตรต	Ultraviolet Spectrophotometric method (APHA และคณะ, 2005)	✓	✓	ทุกวัน
ออกซิเจน ละลาย	DO meter (HANNA, HI9147)	✓		ทุกวัน
อุณหภูมิ	Thermometer (HANNA, HI9147)	✓		ทุกวัน
พีเอช	pH meter (HANNA, HI9125)	✓		ทุกวัน
สภาพความเป็น ต่าง	Test kit (AQUA-VBC ศูนย์วิจัยโรคสัตว์ น้ำจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)	✓		ทุกวัน
<u>พารามิเตอร์คุณภาพตะกอน</u>				
ปริมาตร ตะกอน	กรวยอิมฮอฟ ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที	✓		ทุก 7 วัน
ปริมาณสาร แขวนลอย	Total Suspended Solid (APHA และ คณะ, 2005)	✓	✓	ทุกวัน

- การประเมินการเติบโตของสัตว์น้ำ

ประเมินการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำด้วยการนับจำนวน การชั่งน้ำหนัก และการวัดความยาว เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาน้ำหนักและความยาวเฉลี่ยของสัตว์น้ำ อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยของสัตว์น้ำต่อวัน อัตราการแลกเนื้อของสัตว์น้ำ และอัตราการรอดตาย ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการดังแสดงในตารางที่ 3.13

ตารางที่ 3.13 พารามิเตอร์การประเมินคุณภาพสัตว์น้ำในการทดลอง

พารามิเตอร์	สูตรที่ใช้ในการคำนวณ
น้ำหนักสัตว์น้ำเฉลี่ย (ก./ตัว)	$\frac{\text{น้ำหนักสัตว์น้ำทั้งหมด (ก./บ่อ)}}{\text{จำนวนสัตว์น้ำ (ตัว/บ่อ)}}$
ความยาวสัตว์น้ำเฉลี่ย (ซม./ตัว)	$\frac{\text{ความยาวสัตว์น้ำทั้งหมด (ซม./บ่อ)}}{\text{จำนวนสัตว์น้ำ (ตัว/บ่อ)}}$
อัตราการเจริญเติบโต ของสัตว์น้ำต่อวัน (ก./ตัว/วัน)	$\frac{\text{น้ำหนักสัตว์น้ำเฉลี่ยหลัง (ก./ตัว)} - \text{น้ำหนักสัตว์น้ำเฉลี่ยเริ่มต้น (ก./ตัว)}}{\text{จำนวนวันที่ทำการทดลอง (วัน)}}$
อัตราการรอดตายของ สัตว์น้ำ (ร้อยละ)	$\frac{\text{จำนวนสัตว์น้ำที่เหลือจากสิ้นสุดการทดลอง (ตัว/บ่อ)}}{\text{จำนวนสัตว์น้ำเมื่อเริ่มต้นการทดลอง (ตัว/บ่อ)}} \times 100$
อัตราการแลกเนื้อ	$\frac{\text{น้ำหนักรวมของอาหารที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด (ก.)}}{\text{น้ำหนักรวมของสัตว์น้ำที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด (ก.)}}$

- การประเมินสมดุลไนโตรเจนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดภายในโรงเรือน

การประเมินสมดุลไนโตรเจนเป็นการประเมินปริมาณและสัดส่วนของสารประกอบไนโตรเจนทั้งหมดที่นำเข้าสู่ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยทำการเปรียบเทียบปริมาณและสัดส่วนของสารประกอบไนโตรเจนในวันแรกของการทดลองจากอาหารสัตว์น้ำ สัตว์น้ำ (ปลาชนิด) และน้ำภายในบ่อเลี้ยงปลาชนิด เปรียบเทียบกับปริมาณสารประกอบไนโตรเจนภายในตัวสัตว์น้ำ น้ำในบ่อเลี้ยงปลาชนิด และตะกอนภายในบ่อเลี้ยงปลาชนิดในวันสุดท้ายของการทดลอง เพื่อประเมินประสิทธิภาพระหว่างชุด



ทดลองที่มีการติดตั้งหน่วยแยกตะกอนเข้ากับบ่อเลี้ยงปลาชนิด และชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งหน่วยแยกตะกอน โดยปริมาณไนโตรเจนในรูปแบบต่างๆ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ไนโตรเจนในรูปอาหารสัตว์} = (A) \times (B) \times (C)$$

- เมื่อ A คือ ปริมาณอาหารที่ให้ปลาชนิด  
 B คือ ร้อยละของโปรตีนในอาหารปลาชนิด  
 C คือ ร้อยละของไนโตรเจนในโปรตีน (ร้อยละ 18)

$$\text{ไนโตรเจนในรูปตะกอนแขวนลอยในน้ำ} = (D) \times (E) \times (F)$$

- เมื่อ D คือ ความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย (มก. ตะกอน/ล.)  
 E คือ ปริมาณน้ำในบ่อเลี้ยงปลาชนิด (ล.)  
 F คือ ร้อยละไนโตรเจนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHNS/O Analyzer

$$\text{ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย} = (G) \times (H)$$

- เมื่อ G คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องไมโครเพลท (มก.ไนโตรเจน/ล.)  
 H คือ ปริมาณน้ำในถังเลี้ยงปลาชนิด (ล.)

$$\text{ไนโตรเจนในรูปไนไตรต์} = (I) \times (J)$$

- เมื่อ I คือ ความเข้มข้นของไนไตรต์จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องไมโครเพลท (มก.ไนโตรเจน/ล.)  
 J คือ ปริมาณน้ำในถังเลี้ยงปลาชนิด (ล.)

$$\text{ไนโตรเจนในรูปไนเตรต} = (K) \times (L)$$

- เมื่อ K คือ ความเข้มข้นของไนเตรตจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องไมโครเพลท (มก.ไนโตรเจน/ล.)  
 L คือ ปริมาณน้ำในถังเลี้ยงปลาชนิด (ล.)

$$\text{ไนโตรเจนในเนื้อปลาชนิด} = (M) \times (N)$$

- เมื่อ M คือ น้ำหนักปลาชนิด (ก.)  
 N คือ ร้อยละของไนโตรเจนในเนื้อปลาชนิด (ร้อยละ 6.35)  
 (เพ็ญพิชญ์ พินิจธนาภักย์, 2556)

- การคำนวณความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของวัสดุกรอง

การคำนวณความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นขณะเติมอากาศร่วมกับการกรองในแนวไหลขวางสามารถคำนวณได้ในรูปตัวแปร  $G$  (Velocity gradient) ซึ่งเป็นตัวแปรที่แสดงถึงการเปลี่ยนรูปพลังงานที่ใช้กวนผสมให้อยู่ในรูปแรงเฉือน (Davis และ Cornwell, 2003) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$G_{bubble} = \left[ \frac{3}{4} C_d \frac{U_b^3 \rho_f V_{air}}{d_b \mu_f V_{total}} \right]^{0.5} \quad (3.1)$$

เมื่อ	$G$	= ความเร็วเกรเดียนท์ (วินาที <sup>-1</sup> )
	$C_d$	= สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของรูปทรง
	$U_b$	= อัตราเร็วของฟองอากาศ (ม./วินาที)
	$d_b$	= เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (ม.)
	$\rho$	= ความหนาแน่นของน้ำ (กก./ลบ.ม.)
	$\mu$	= ความหนืดของน้ำ (นิวตัน-วินาที/ตร.ม.)
	$V_{air}$	= ปริมาตรของอากาศที่เติม (ลบ.ม.)
	$V_{total}$	= ปริมาตรของน้ำในหน่วยแยกตะกอน (ลบ.ม.)

## บทที่ 4

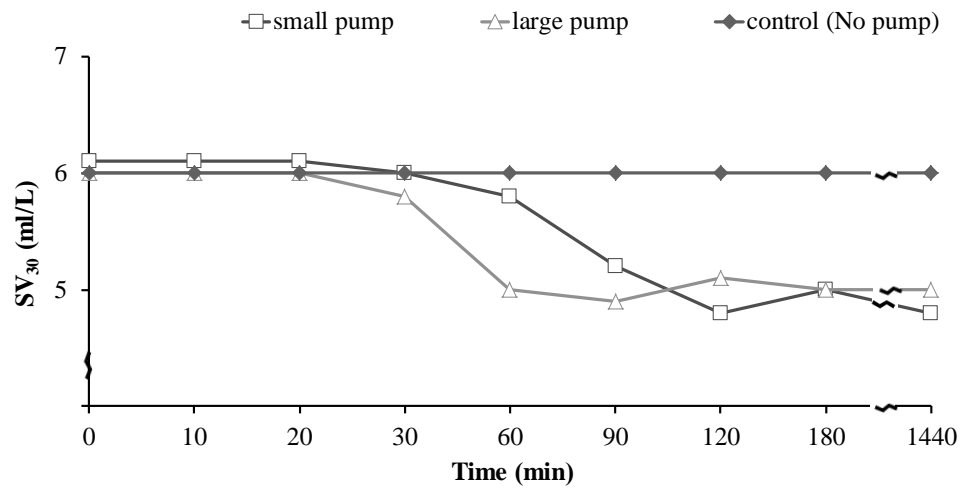
### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ลักษณะทางกายภาพของตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด

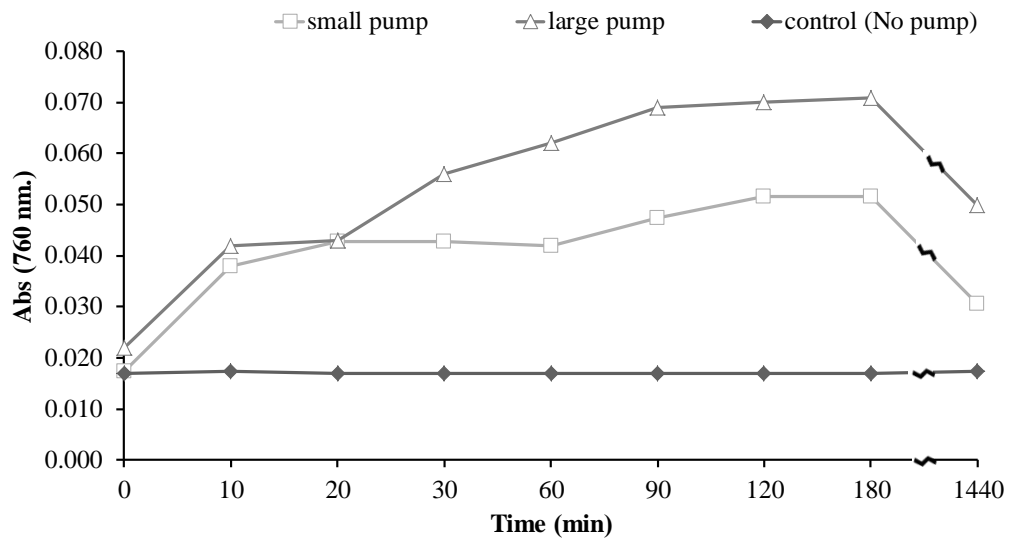
การทดลองนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นถึงลักษณะทางกายภาพของตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดภายในโรงเรือน เริ่มต้นการทดลองโดยเลี้ยงปลาไนที่ความหนาแน่นประมาณ 3 กก./ลบ.ม. ในถังพลาสติกขนาด 250 ล. เต็มอากาศด้วยหัวทรายชนิดละเอียดให้มีปริมาณออกซิเจนละลาย (DO) มากกว่า 4 มก./ล. ให้อาหารสำเร็จรูปที่มีโปรตีนร้อยละ 18 วันละ 2 ครั้ง ในอัตราร้อยละ 3 – 5 ของน้ำหนักปลาต่อวัน และควบคุมปริมาณตะกอนแขวนลอยในช่วง 150 – 200 มก./ล. ทั้งนี้ในชุดควบคุมจะไม่มีการหมุนวนน้ำในถังเลี้ยงปลาไนผ่านเครื่องสูบน้ำ ขณะที่ชุดทดลองที่ 1 และ 2 ได้หมุนวนน้ำในถังเลี้ยงปลาไนผ่านเครื่องสูบน้ำชนิดหมุนเหวี่ยง (Centrifugal pump) ขนาดเล็กที่อัตรา 2,800 ล./ชม. (90 วัตต์) และเครื่องสูบน้ำขนาดใหญ่ที่อัตรา 8,500 ล./ชม. (130 วัตต์) ตามลำดับ ดำเนินการทดลองโดยเก็บตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงปลาไนของชุดควบคุมและชุดทดลองเป็นระยะ เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพตะกอน ได้แก่ การจมตัวของตะกอนเมื่อเวลา 30 นาที ( $SV_{30}$ ) ความขุ่น และเปรียบเทียบขนาดของตะกอนแขวนลอย

ภาพที่ 4.1 แสดงค่า  $SV_{30}$  จากชุดควบคุมและชุดทดลอง ซึ่งพบว่าตะกอนจากชุดการทดลองที่ 1 และ 2 ที่มีการวนน้ำผ่านเครื่องสูบน้ำสามารถจมตัวได้อย่างชัดเจน โดยมีค่า  $SV_{30}$  ประมาณ 4.8 และ 5.0 มล./ล. ที่เวลา 1,440 นาที ตามลำดับ ขณะที่ตะกอนจากชุดควบคุมซึ่งไม่มี การวนน้ำผ่านเครื่องสูบน้ำพบว่าจมตัวได้ดีกว่า โดยมีค่า  $SV_{30}$  ประมาณ 6.0 มล./ล. เมื่อเวลาผ่านไป 1,440 นาที นอกจากนี้ค่า  $SV_{30}$  จากชุดทดลองที่ 1 และ 2 เริ่มมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 100 และ 60 นาที ตามลำดับ โดยมีปริมาณน้ำไหลผ่านเครื่องสูบน้ำคิดเป็น 8 และ 15 เท่าของน้ำในถังเลี้ยงปลาไน ในส่วนผลการวิเคราะห์ความขุ่นของน้ำที่ส่วนบนของโคนอิมฮอฟ ซึ่งตรวจวัดโดยใช้ค่าการดูดกลืนแสงที่ 760 นาโนเมตร (ภาพที่ 4.2) พบว่าความขุ่นของน้ำส่วนบนของโคนอิมฮอฟมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเริ่มดำเนินการทดลอง โดยมีค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 0.017 – 0.022 และเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาทีที่ค่าความขุ่นของน้ำในชุดการทดลองที่ 1 และ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 – 3 เท่า ซึ่งตรวจวัดในรูปของค่าการดูดกลืนแสงได้เท่ากับ 0.052 และ 0.071 ตามลำดับ ขณะที่ค่าความขุ่นของชุดควบคุมมีค่าคงที่ ทั้งนี้การที่ผล

การตรวจวัดความขุ่นของน้ำที่บริเวณส่วนบนของโคนอิมฮอฟผกผันกับค่า  $SV_{30}$  ที่มีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป คาดว่าเป็นผลสืบเนื่องจากตะกอนแขวนลอยในน้ำเสียจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำถูกใบพัดของเครื่องสูบน้ำและแรงเฉือนจากการไหลวนของน้ำผ่านเครื่องสูบน้ำทำให้มีขนาดเล็กลง จมตัวได้ยากขึ้น และน้ำมีความขุ่นมากขึ้น โดยเมื่อเวลาผ่านไป 1,440 นาที พบว่าความขุ่นของน้ำซึ่งตรวจวัดในรูปของค่าการดูดกลืนแสงในชุดการทดลองที่ 1 และ 2 มีค่าลดลงเหลือ 0.031 และ 0.050 ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้รับคาดว่าเป็นผลจากการย่อยสลายของตะกอนที่มีขนาดเล็กลงในถังเลี้ยงปลาและการตกตะกอน หรืออาจกล่าวได้ว่าตะกอนอินทรีย์ขนาดเล็กจะมีโอกาสถูกย่อยสลายโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์หรือกระบวนการทางชีวภาพได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ขนาดของตะกอนในชุดการทดลองพบว่าเมื่อเริ่มต้นการทดลองมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 207 ไมโครเมตร และเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาทีตะกอนแขวนลอยในชุดการทดลองที่ 1 และ 2 มีขนาดเฉลี่ยลดลงและใกล้เคียงกันที่ 172 และ 170 ไมโครเมตร ตามลำดับ การลดลงของขนาดตะกอนแขวนลอยเป็นผลจากแรงเฉือนและจากการไหลของน้ำผ่านเครื่องสูบน้ำดังกล่าวข้างต้น การลดลงของขนาดของตะกอนมีความสอดคล้องกับแนวโน้มของค่า  $SV_{30}$  ซึ่งลดลงและอยู่ในระดับค่อนข้างคงที่ตั้งแต่ระยะเวลา 100 และ 60 นาที ในชุดทดลองที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ขนาดเฉลี่ยของตะกอนที่ได้รับจากผลการทดลองนี้ถูกนำไปประกอบการพิจารณาเพื่อเลือกขนาดช่องว่างของวัสดุกรองในการทดลองช่วงที่ 2 ต่อไป โดยผลการทดลองส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าลักษณะทางกายภาพของตะกอนที่ทำการศึกษา ได้แก่  $SV_{30}$  ความขุ่น และขนาด มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วงเริ่มต้นและหลังจากหมุนเวียนน้ำไปได้ระยะหนึ่ง นั่นคือข้อมูลที่ได้รับยืนยันถึงความจำเป็นในการเลือกใช้กระบวนการหรือเครื่องมือสำหรับแยกตะกอนให้เหมาะสมกับลักษณะทางกายภาพของตะกอนที่มีเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เพื่อให้การจัดการตะกอนในระบบเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด



ภาพที่ 4.1 การจมตัวของตะกอนในน้ำเมื่อเวลา 30 นาที ( $SV_{30}$ ) เมื่อหมุนวนน้ำในถังเลี้ยงปลาชนิดผ่านเครื่องสูบน้ำขนาดเล็ก ขนาดใหญ่ และเมื่อไม่มีการใช้เครื่องสูบน้ำ



ภาพที่ 4.2 ความขุ่นของน้ำจากส่วนบนของกรวยอิมซอพภายหลังหมุนวนน้ำจากถังเลี้ยงปลาชนิดผ่านเครื่องสูบน้ำขนาดเล็ก ขนาดใหญ่ และเมื่อไม่มีการใช้เครื่องสูบน้ำ

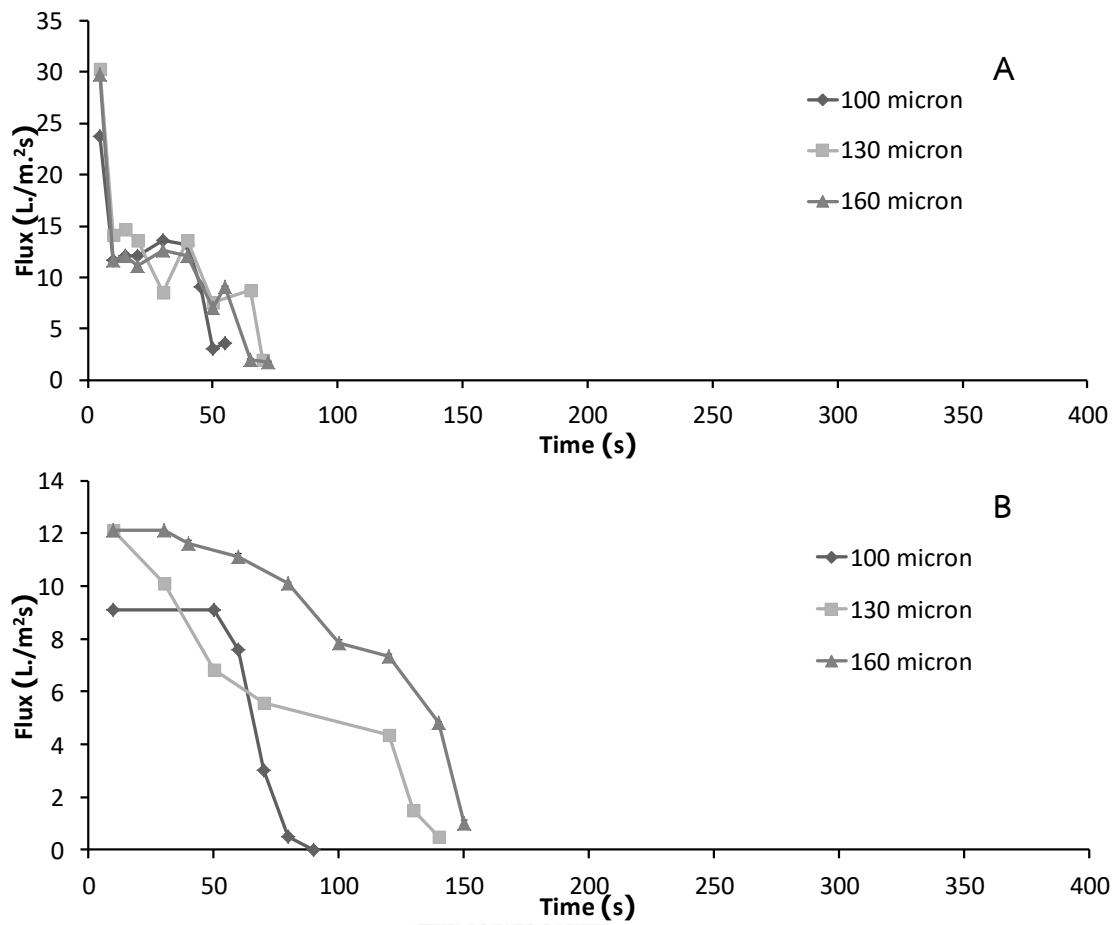
## 4.2 สภาวะการใช้งานหน่วยแยกตะกอน

การทดลองในส่วนนี้ศึกษาถึงสภาวะเหมาะสมของการใช้งานหน่วยแยกตะกอน ซึ่งประกอบด้วย ขนาดช่องว่างของวัสดุกรอง รูปแบบการกรอง อัตราการไหลของน้ำเข้าหน่วยแยกตะกอน ผลของการให้อากาศต่อประสิทธิภาพการกรอง ตำแหน่งของหัวทรายให้อากาศ และรูปแบบการใช้งานหน่วยแยกตะกอน โดยนำผลการทดลองที่ได้จากหัวข้อ 4.1 มาพิจารณาโดยเลือกใช้ขนาดช่องว่างของแผ่นกรองสแตนเลสเท่ากับ 100, 130 และ 160 ไมโครเมตร ซึ่งน้อยกว่าขนาดเฉลี่ยของตะกอนแขวนลอยที่ตรวจวัดได้คือประมาณ 170 ไมโครเมตร ทั้งนี้ที่มาของตะกอนที่ใช้ในการทดลองนี้เกิดขึ้นเองจากการเลี้ยงปลาในในระบบปิดในโรงเรือนที่ความหนาแน่นประมาณ 3 กก./ลบ.ม. ในถังพลาสติกขนาด 250 ล. โดยระหว่างการทดลองได้ควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียที่ประมาณ 250 ล./ชม. และน้ำเสียมีปริมาณตะกอนแขวนลอยประมาณ 150 – 200 มก./ล.

### 4.2.1 รูปแบบการกรองและขนาดช่องกรอง

การทดลองนี้เปรียบเทียบการใช้งานวัสดุกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 3 ขนาด คือ 100, 130 และ 160 ไมโครเมตร ที่เลือกใช้วัสดุกรองสแตนเลสในการทดลองเนื่องจากสามารถหาซื้อได้ง่าย และมีความทนทานต่อการใช้งาน ทำการศึกษาการกรอง 2 รูปแบบ คือ การกรองในแนวตั้งฉากและการกรองแบบไหลขวาง ผลการกรองแบบตั้งฉากแสดงในภาพที่ 4.3 (A) พบว่าฟลักซ์การกรองผ่านแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 130 และ 160 ไมโครเมตรมีค่าเริ่มต้นใกล้เคียงกัน คือ 30.30 และ 29.79 ล./ตร.ม.-วินาที ตามลำดับ ส่วนการใช้งานแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 100 ไมโครเมตรให้ฟลักซ์การกรองเริ่มต้นที่ 23.73 ล./ตร.ม.-วินาที โดยระยะเวลาที่สามารถกรองได้จนกระทั่งเกิดการอุดตัน (ฟลักซ์การกรอง = 0) คือ 55, 70 และ 72 วินาที เมื่อใช้งานแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 100, 130 และ 160 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนผลการกรองแบบไหลขวางซึ่งแสดงในภาพที่ 4.3 (B) พบว่าฟลักซ์การกรองเริ่มต้นซึ่งมีค่าระหว่าง 9 – 12 ล./ตร.ม.-วินาที มีค่าน้อยกว่าการกรองแบบตั้งฉากอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณาฟลักซ์การกรองเมื่อใช้งานแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่างต่างกัน พบว่าฟลักซ์การกรองของแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 130 และ 160 ไมโครเมตรให้ค่าเริ่มต้นใกล้เคียงกันที่ประมาณ 12 ล./ตร.ม.-วินาที ส่วนแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 100 ไมโครเมตรให้ฟลักซ์การกรองเริ่มต้นที่ 9.10 ล./ตร.ม.-วินาที โดยมีระยะเวลาที่กรองน้ำได้

จนกระทั่งเกิดการอุดตันที่ประมาณ 90, 140 และ 150 วินาที เมื่อใช้งานแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 100, 130 และ 160 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการกรองแบบไหลขวางสามารถใช้งานได้ยาวนานกว่าการกรองแบบตั้งฉากอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) ถึงแม้ว่ามีฟลักซ์การกรองเริ่มต้นต่ำกว่าถึงประมาณร้อยละ 50 และสามารถใช้งานได้ยาวนานกว่าการกรองแบบตั้งฉากประมาณ 1.5 – 2 เท่า นอกจากนี้ข้อมูลจากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการกรองแบบตั้งฉากมีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนออกจากน้ำได้สูงกว่าการกรองแบบไหลขวาง โดยเฉพาะเมื่อใช้งานกับแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 100 และ 130 ไมโครเมตร โดยให้ประสิทธิภาพการแยกตะกอนในช่วงร้อยละ 31 – 48 ขณะที่การกรองแบบไหลขวางให้ประสิทธิภาพการกรองในช่วงร้อยละ 29 – 30 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงปริมาณตะกอนที่สามารถแยกได้ซึ่งขึ้นกับขนาดช่องว่างของวัสดุกรองและเวลาที่ใช้กรอง จะพบว่าการกรองแบบตั้งฉากภายใต้สภาวะที่มีประสิทธิภาพการกรองสูงสุดสามารถแยกตะกอนได้เพียง  $271 \pm 0.12$  มก. ซึ่งน้อยกว่าการกรองแบบไหลขวางผ่านแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 130 ไมโครเมตร ภายใต้สภาวะดังกล่าวพบว่าปริมาณตะกอนที่แยกได้มีค่าเท่ากับ  $319 \pm 0.06$  มก. และมีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนอยู่ที่ร้อยละ 29 จากผลการทดลองที่ได้รับจึงสามารถสรุปได้ว่า ควรเลือกใช้รูปแบบการกรองแบบไหลขวางผ่านวัสดุกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 130 ไมโครเมตร ในการทำการทดลองช่วงต่อไป



ภาพที่ 4.3 พลั๊กซ์การกรองของแผ่นกรองสแตนเลสที่ขนาดช่องว่างแตกต่างกัน เมื่อ

(A) การกรองแบบตั้งฉาก และ (B) การกรองแบบไหลขวาง



ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพของการกรองและปริมาณตะกอนสะสมในการกรองแบบตั้งฉากและแบบไหลขวางเมื่อใช้วัสดุกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่างต่างกัน

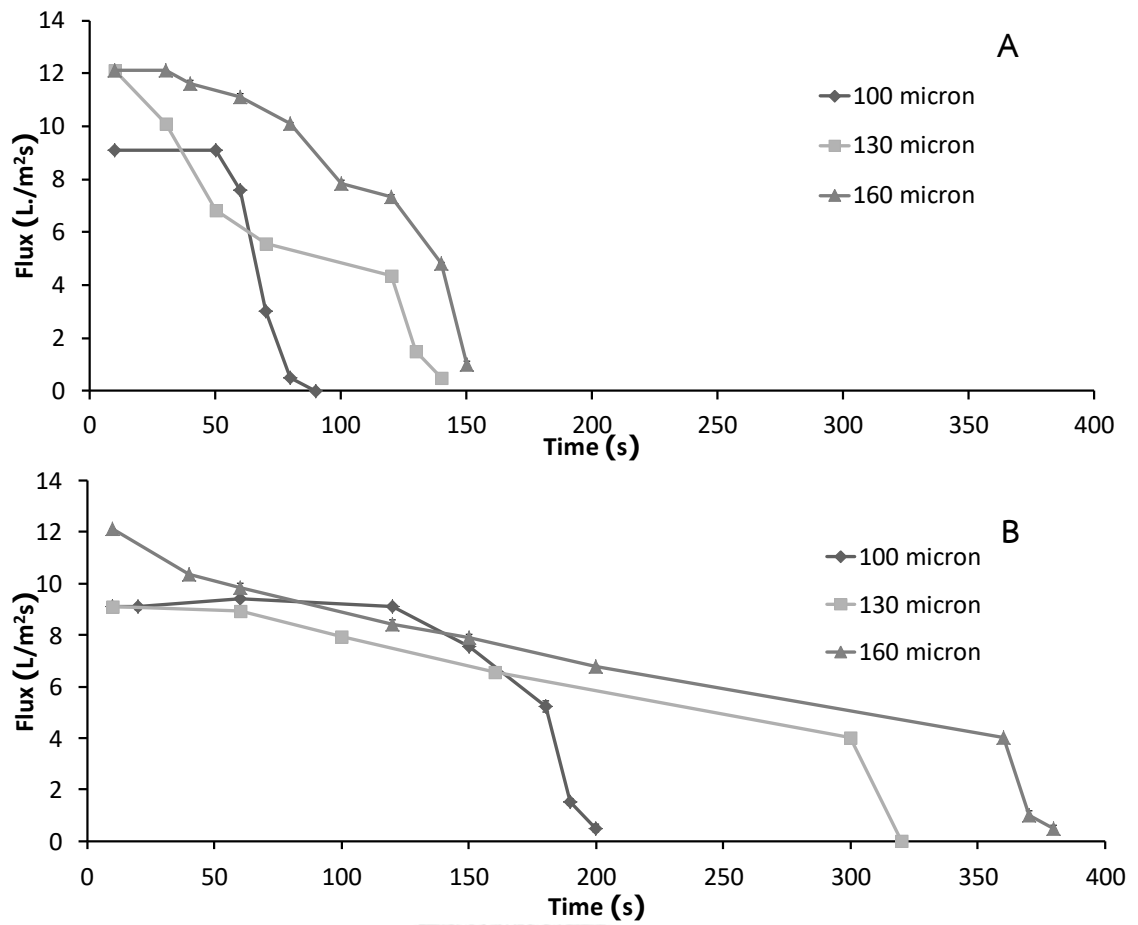
ขนาดช่องว่าง ( $\mu\text{m}$ )	น้ำเสียขาเข้า (mg SS/L)	น้ำเสียขาออก (mg SS/L)	การกำจัด (%)	ตะกอนสะสม (mg SS)
100	160	ตั้งฉาก $82.70 \pm 2.31^a$	48	$271.00 \pm 0.12$
	200	ไหลขวาง $140.00 \pm 0.00$	30	$240.00 \pm 0.12$
130	160	ตั้งฉาก $110.70 \pm 2.31^b$	31	$262.00 \pm 0.15$
	200	ไหลขวาง $142.00 \pm 2.31$	29	$319.00 \pm 0.06$
160	160	ตั้งฉาก $146.70 \pm 2.31^c$	8	$62.00 \pm 0.10$
	200	ไหลขวาง $168.00 \pm 8.00$	16	$249.00 \pm 0.12$

a, b และ c ให้ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

#### 4.2.2 ผลของการเติมอากาศ

การทดลองนี้ศึกษาผลของการเติมอากาศในระหว่างการใช้งานหน่วยแยกตะกอนซึ่งติดตั้งแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 100, 130 และ 160 ไมโครเมตร ทำการกรองแบบไหลขวาง โดยควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียระหว่างการทดลองคงที่ประมาณ 250 ล./ชม. โดยน้ำเสียมีปริมาณตะกอนแขวนลอยประมาณ 150 – 200 มก./ล. ทำการเติมอากาศในแนวหน้าข้างแผ่นกรองสแตนเลสที่อัตราการไหลของอากาศประมาณ 70 ล./นาที่ ผลการทดลองซึ่งแสดงในภาพที่ 4.4 พบว่าฟลักซ์การกรองเริ่มต้นเมื่อไม่เติมอากาศมีค่าประมาณ 12 ล./ตร.ม.-วินาที เมื่อใช้แผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 160 ไมโครเมตร และมีค่าลดลงเหลือประมาณ 9.1 ล./ตร.ม.-วินาที เมื่อใช้แผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 100 และ 130 ไมโครเมตร เมื่อทำการกรองแบบไหลขวางร่วมกับการเติมอากาศพบว่าฟลักซ์การกรองเริ่มต้นมีค่าไม่แตกต่างจากการกรองโดยไม่เติมอากาศ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาระยะเวลาที่สามารถกรองน้ำได้ จะพบว่าการเติมอากาศในแนวหน้าข้างวัสดุกรองสแตนเลสสามารถ กรองน้ำได้นานถึง 200, 320 และ 380 วินาที ในวัสดุกรองที่มีขนาดช่องว่าง 100, 130 และ 160 ไมโครเมตร ตามลำดับ ก่อนเกิดการอุดตัน (ฟลักซ์การกรอง = 0) ซึ่งระยะเวลาดังกล่าวมากกว่าการกรองโดยไม่เติมอากาศอย่างมีนัยสำคัญซึ่งสามารถกรองน้ำได้นาน

90 – 150 วินาที จากตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงประสิทธิภาพการกรองและปริมาณตะกอนที่แยกได้ พบว่าประสิทธิภาพในการแยกตะกอนเมื่อมีการเติมอากาศมีค่าเท่ากับร้อยละ 29, 25 และ 17 เมื่อใช้แผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 100, 130 และ 160 ไมโครเมตร ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการแยกตะกอนเมื่อไม่เติมอากาศพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับกรณีของการเติมอากาศเช่นกัน โดยมีประสิทธิภาพคิดเป็นร้อยละ 30, 29 และ 16 เมื่อใช้งานแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 100, 130 และ 160 ไมโครเมตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการเติมอากาศในแนบขนานข้างแผ่นกรองสแตนเลสช่วยให้แยกตะกอนออกจากรูน้ำได้มากขึ้น การกรองโดยไม่เติมอากาศสามารถแยกตะกอนออกจากรูน้ำได้  $240 \pm 0.12$ ,  $319 \pm 0.06$  และ  $249 \pm 0.12$  มก. เมื่อใช้แผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 100, 130 และ 160 ไมโครเมตร ตามลำดับ ขณะที่การกรองร่วมกับการเติมอากาศสามารถเพิ่มปริมาณตะกอนที่แยกให้สูงขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ  $590 \pm 0.18$ ,  $804 \pm 0.15$  และ  $703 \pm 0.06$  มก. เมื่อใช้งานแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 100, 130 และ 160 ไมโครเมตร ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกอนที่แยกได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติมอากาศนี้คาดว่าเป็นผลของการเป่าอากาศที่ช่วยเพิ่มความปั่นป่วนของการไหลของของเหลวในบริเวณเหนือแผ่นกรองสแตนเลส ทำให้เกิดการอุดตันได้ช้าลง และสามารถทำการกรองได้นานขึ้น



ภาพที่ 4.4 พลิกซ์การกรองแบบไหลขวางผ่านแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่างแตกต่างกัน  
เมื่อ (A) ไม่มีการเติมอากาศ และ (B) มีการเติมอากาศระหว่างการกรอง

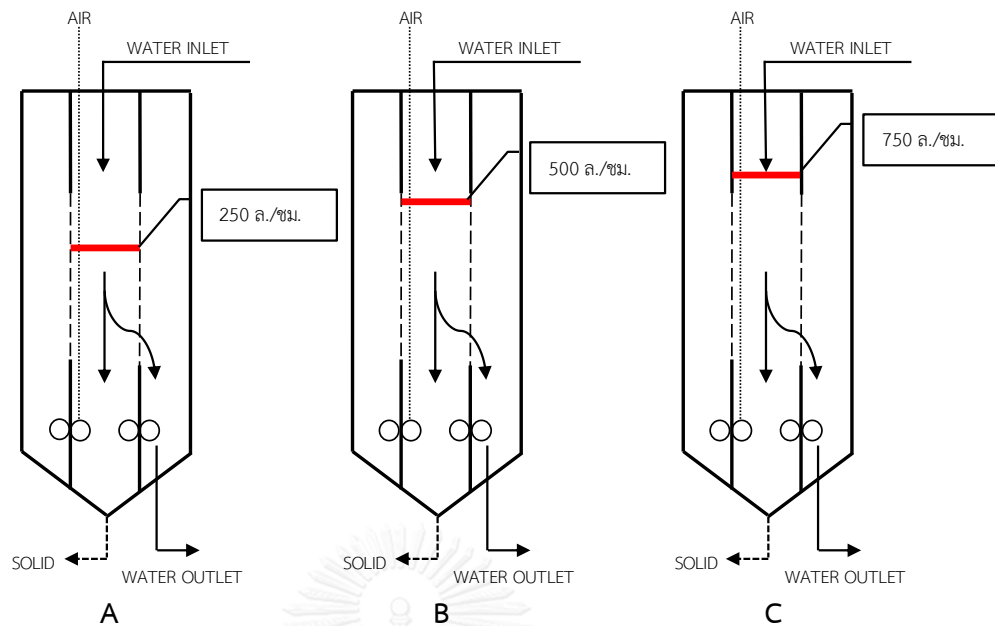
ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพการกรองและปริมาณตะกอนสะสมในการกรองแบบไหลขวางเมื่อมีและไม่มี การเติมอากาศในแนวหน้าข้างของแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่างต่างกัน

ขนาดช่องว่าง ( $\mu\text{m}$ )	น้ำเสียเข้า (mg SS/L)	น้ำเสียออก (mg SS/L)	การกำจัด (%)	ตะกอนสะสม (mg SS)	
100	200	ไม่เติมอากาศ	$140.00 \pm 0.00^a$	30	$240.00 \pm 0.12$
		เติมอากาศ	$142.70 \pm 6.11^a$	29	$590.00 \pm 0.18$
130	200	ไม่เติมอากาศ	$142.00 \pm 2.31^a$	29	$319.00 \pm 0.06$
		เติมอากาศ	$150.70 \pm 2.31^a$	25	$804.00 \pm 0.15$
160	200	ไม่เติมอากาศ	$168.00 \pm 8.00^b$	16	$249.00 \pm 0.12$
		เติมอากาศ	$165.30 \pm 6.11^b$	17	$703.00 \pm 0.06$

a และ b ให้ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

#### 4.2.3 อัตราการไหลของน้ำ

การทดลองนี้เปลี่ยนขนาดของหน่วยแยกตะกอนจาก 1.5 ล. เป็น 25 ล. ทำให้เมื่อใช้อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าเดิม (250 ล./ชม.) น้ำถูกกรองได้ไม่เต็มพื้นที่ผิวของแผ่นกรอง จึงต้องทำการทดลองใหม่ โดยแปรค่าอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่หน่วยแยกตะกอน 3 ค่า คือ 250, 500 และ 750 ล./ชม. เพื่อให้ได้ค่าอัตราการไหลของน้ำที่หน่วยแยกตะกอนสามารถกรองน้ำเสียได้เต็มพื้นที่ผิวของแผ่นกรอง เมื่อน้ำเสียมีปริมาณตะกอนแขวนลอยประมาณ 150 มก./ล. ทำการกรองแบบไหลขวางผ่านแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 130 ไมโครเมตร และเติมอากาศในแนวหน้าข้างแผ่นกรองสแตนเลสที่อัตราการไหลของอากาศ 70 ล./นาที่ ผลการทดลองซึ่งแสดงในภาพที่ 4.5 พบว่าอัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าสู่หน่วยแยกตะกอนที่ 750 ล./ชม. ทำให้หน่วยแยกตะกอนทำงานได้ดีที่สุด เนื่องจากสามารถกรองน้ำเสียได้เต็มพื้นที่ของแผ่นกรองสแตนเลส ซึ่งแตกต่างจากการใช้อัตราการไหลต่ำกว่า 750 ล./ชม. ซึ่งพบว่ามีการใช้พื้นที่กรองเพียงร้อยละ 75 - 98 ของพื้นที่การกรองทั้งหมด



A



B

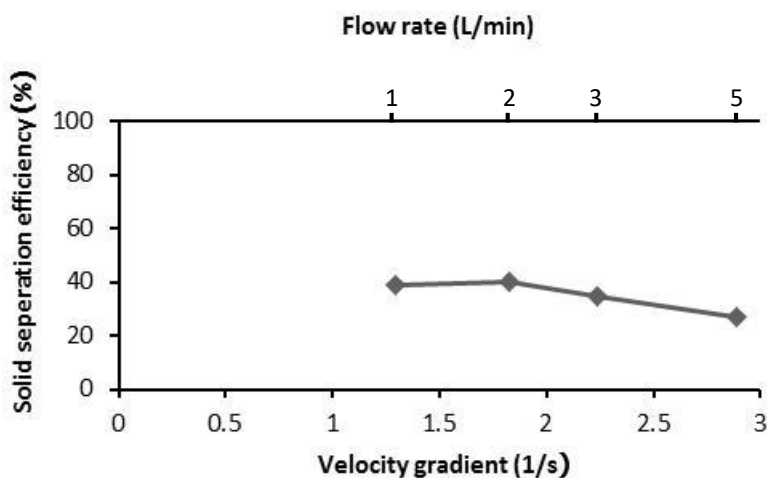


C

ภาพที่ 4.5 ระดับของน้ำเสียภายในหน่วยแยกตะกอนเมื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ ที่แตกต่างกัน เมื่อ (A) 250 ล./ชม. (B) 500 ล./ชม. และ (C) 750 ล./ชม.

#### 4.2.4 อัตราการไหลของอากาศและตำแหน่งของหัวจ่ายอากาศ

การทดลองนี้ศึกษาการใช้งานหน่วยแยกตะกอนเมื่อปรับอัตราการไหลของอากาศในช่วง 1 – 5 ล./นาทิต โดยทำการกรองแบบไหลขวางด้วยแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 130 ไมโครเมตร และควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าหน่วยแยกตะกอนที่ 750 ล./ชม. ในการทดลองได้ทำการเชื่อมต่อหน่วยแยกตะกอนกับถังเลี้ยงปลาชนิดขนาด 2,000 ล. ซึ่งควบคุมความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยไว้ที่ประมาณ 200 มก./ล. ผลการทดลองพบว่าหน่วยแยกตะกอนสามารถกรองน้ำจากถังเลี้ยงปลาชนิดขนาด 2,000 ล. ได้ทั้งหมดในเวลา 150 นาทีโดยไม่เกิดการอุดตันขึ้น เมื่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศในช่วงตั้งแต่ 2 – 5 ล./นาทิต ขณะที่การควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 1 ล./นาทิต จะสามารถใช้งานหน่วยแยกตะกอนได้เพียง 90 นาทีก่อนเกิดการอุดตันขึ้นที่ผิวของแผ่นกรองสแตนเลส โดยหน่วยแยกตะกอนสามารถกรองน้ำเสียได้ประมาณ 974 ล. นอกจากนี้ข้อมูลจากภาพที่ 4.6 แสดงประสิทธิภาพการแยกตะกอนซึ่งอยู่ในช่วงร้อยละ 26 – 41 เมื่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศตั้งแต่ 2 – 5 ล./นาทิต โดยประสิทธิภาพการแยกตะกอนสูงสุดที่ร้อยละ 41 เกิดขึ้นเมื่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 2 ล./นาทิต นอกจากนี้ภาพที่ 4.6 ยังแสดงถึงประสิทธิภาพการแยกตะกอนต่อค่าความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity gradient:  $G$ ) ซึ่งเป็นตัวแปรที่แสดงการเปลี่ยนรูปพลังงานที่ใช้กวนผสมให้อยู่ในรูปแรงเฉือน (Davis และ Cornwell, 2003) โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศจะทำให้ค่าความเร็วเกรเดียนท์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ของเหลวในบริเวณพื้นผิวของแผ่นกรองสแตนเลสได้รับแรงเฉือนจากฟองอากาศและของเหลวเพิ่มขึ้นจนเกิดความปั่นป่วน ทำให้การสะสมของตะกอนแขวนลอยบนพื้นผิวของแผ่นกรองสแตนเลสลดลงและสามารถกรองน้ำเสียได้นานขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราการเติมอากาศมากกว่า 2 ล./นาทิต ( $G > 2.24$  วินาที<sup>-1</sup>) พบว่าประสิทธิภาพการแยกตะกอนลงจากร้อยละ 41 เหลือร้อยละ 26 ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากแรงเฉือนและแรงผลักรกน้ำที่มากเกินไปจนทำให้ตะกอนที่ติดอยู่บนพื้นผิวของแผ่นกรองสแตนเลสหลุดออกไปปนกับน้ำที่ผ่านการกรอง ผลการทดลองที่ได้รับความนิยมสอดคล้องกับงานวิจัยของปกฉัตร ชูติวิศุทธิ์ (2552) ที่ทดลองเพิ่มความเร็วของน้ำเข้าสู่หน่วยแยกตะกอนเพื่อแยกจุลสาหร่าย ซึ่งพบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ในน้ำที่ผ่านการกรองมีค่าสูงขึ้น นั่นคือจุลสาหร่ายถูกผลักรกหลุดออกมาจากวัสดุกรองเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 4.6 ผลของอัตราการไหลของอากาศหรือความเร็วเกรเดียนต์ต่อประสิทธิภาพการกรองของหน่วยแยกตะกอน

ในการทดลองต่อมาศึกษาการใช้งานหน่วยแยกตะกอนโดยปรับระดับการติดตั้งหัวทรายจ่ายอากาศ ทำการทดลองโดยควบคุมอัตราการไหลของอากาศคงที่ 2 ล./นาที และปรับระดับของหัวทรายที่ความสูง 1 และ 15 ซม. จากขอบล่างของวัสดุกรองสแตนเลส ผลการทดลองพบว่า การติดตั้งหัวทรายที่ระดับความสูง 1 ซม. ให้ฟลักซ์การกรองค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลองที่ประมาณ 6,250 ล./ตร.ม.-ซม. ในการกรองน้ำเสียทั้งหมดในถังเลี้ยงปลาปริมาตร 2,000 ล. และสามารถกรองตะกอนแขวนลอยได้ทั้งหมด 782 มก. ส่วนการติดตั้งหัวทรายจ่ายอากาศที่ระดับความสูง 15 ซม. พบว่าให้ฟลักซ์การกรองเริ่มต้นเท่ากับ 6,250 ล./ตร.ม.- ซม. เช่นเดียวกับกับการติดตั้งหัวทรายที่ระดับความสูง 1 ซม. แต่เมื่อทำการกรองผ่านไป 45 นาที พบว่าฟลักซ์การกรองลดลงเหลือ 5,938 ล./ตร.ม.- ซม. (ลดลงร้อยละ 5) จึงได้หยุดการใช้งานหน่วยแยกตะกอน และพบว่ามีการอุดตันเกิดขึ้นบางส่วนบนพื้นผิวของแผ่นกรองสแตนเลส โดยสามารถกรองตะกอนได้ทั้งหมด 238 มก. (ที่เวลา 45 นาที) ทั้งนี้ในระหว่างการทดลองได้สังเกตเห็นว่าเมื่อระยะห่างของหัวทรายจ่ายอากาศกับขอบแผ่นกรองสแตนเลสมากขึ้น จะทำให้มีจำนวนฟองอากาศลดลง จึงลดความปั่นป่วนที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุกรองสแตนเลส ซึ่งนำไปสู่การสะสมของตะกอนบนแผ่นกรองสแตนเลสได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การติดตั้งหัวทรายจ่ายอากาศที่ระดับความสูง 15 ซม. จะทำให้เกิดการรบกวนตะกอนที่กักเก็บสะสมอยู่จนเกิดการฟุ้งกระจาย ทำให้มีปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำเสียมากขึ้น โดยเมื่อพิจารณาประกอบกันทุกปัจจัยทำให้สามารถสรุป

ในเบื้องต้นได้ว่า ควรควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 2 ล./นาที่ และติดตั้งหัวทรายจ่ายอากาศที่ ความสูง 1 ซม. จากขอบด้านล่างสุดของวัสดุกรองสแตนเลส

#### 4.2.5 การใช้งานหน่วยแยกตะกอนในรูปแบบการกรองแบบสลับ

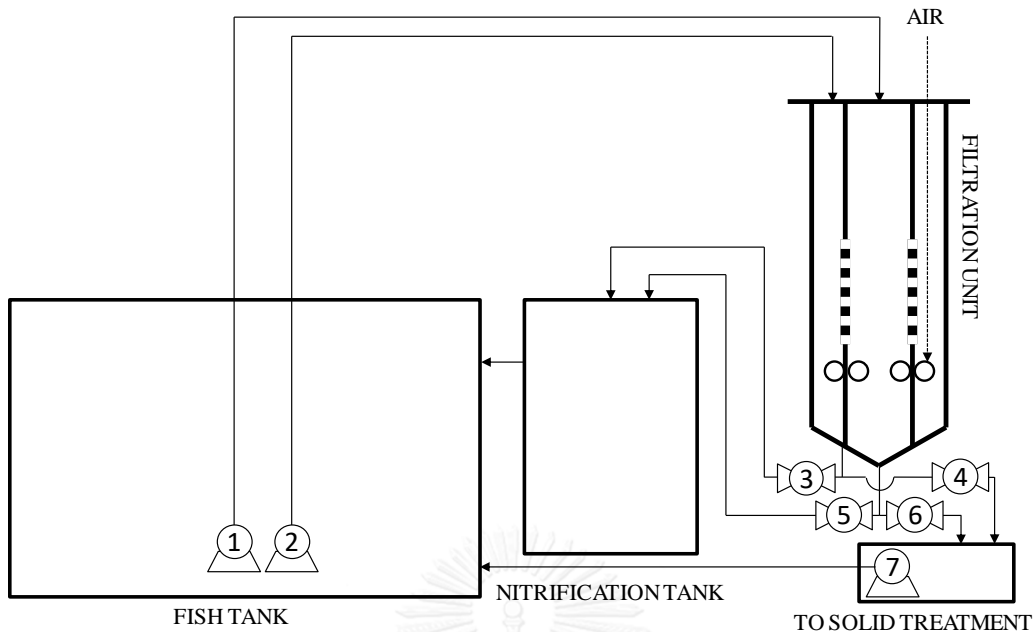
การทดลองนี้ทดสอบการใช้งานหน่วยแยกตะกอนในรูปแบบการกรองแบบสลับ โดยให้น้ำเสียเข้าสู่หน่วยแยกตะกอนบริเวณพื้นที่ของทรงกระบอกด้านใน ซึ่งจะถูกรองแล้วไหลออกทางด้านล่างของทรงกระบอกด้านนอก ทำการกรองจนกระทั่งฟลักซ์การกรองลดลงเหลือประมาณร้อยละ 95 ของค่าเริ่มต้น จึงทำการสลับการกรองมายังพื้นที่วงแหวนระหว่างทรงกระบอกด้านในและด้านนอก เพื่อสลับด้านการกรองของแผ่นกรองสแตนเลส ซึ่งน้ำที่ผ่านการกรองจะไหลออกทางด้านล่างของทรงกระบอกด้านใน ทำการกรองต่อเนื่องจนกระทั่งฟลักซ์การกรองลดลงเหลือร้อยละ 95 ของค่าเริ่มต้น จึงสลับด้านการกรองมายังด้านในอีกครั้ง การทดลองนี้ได้ตั้งสมมติฐานว่าการกรองแบบสลับ จะช่วยให้ตะกอนแขวนลอยที่สะสมอยู่บนแผ่นกรองสแตนเลสหลุดออกมาเมื่อมีการสลับฝั่งการกรอง และสามารถทำการล้างย้อน (Backwash) แผ่นกรองสแตนเลสโดยไม่ต้องหยุดการทำงานและเป็นการลดการใช้น้ำสะอาดจากภายนอกในระหว่างการทดลองได้ควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียที่ 750 ล./ชม. อัตราการการเติมอากาศที่ 2 ล./นาที่ ควบคุมตำแหน่งของหัวจ่ายอากาศที่ 1 ซม. จากขอบล่างของแผ่นกรองสแตนเลส และปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำเสียประมาณ 200 มก./ล. ผลการทดลองพบว่าฟลักซ์การกรองเริ่มต้นมีค่าประมาณ  $6,093 \pm 458$  ล./ตร.ม.-ชม. ของการกรองทั้งสองด้าน ฟลักซ์การกรองลดลงเหลือร้อยละ 95 ของค่าเริ่มต้นหลังจากใช้งานหน่วยแยกตะกอนไป 155 – 156 ซม. อย่างไรก็ตามทางผู้วิจัยได้เลือกเวลาในการสลับด้านการกรองที่ 24 ชม. เนื่องจากฟลักซ์การกรองมีค่าใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้น อีกทั้งสะดวกต่อการระบายตะกอนสะสมที่บริเวณฐานของหน่วยแยกตะกอนออกไปกำจัดต่อไป นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ว่าการใช้เวลากรองสลับที่นานเกินไปจะทำให้ตะกอนเกิดการสะสมในปริมาณมาก ซึ่งมีความเสี่ยงต่อการเกิดสภาวะไร้อากาศที่อาจผลิตสารพิษ เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งเป็นอันตรายมากต่อสัตว์น้ำ



### 4.3 การประยุกต์ใช้งานหน่วยแยกตะกอนกับระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดภายในโรงเรือน

#### 4.3.1 การใช้งานหน่วยแยกตะกอนกับบ่อเลี้ยงปลาบิล

ผลจากการทดลองในส่วนที่ 4.2 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานหน่วยแยกตะกอน คือ การกรองแบบไหลขวาง โดยใช้แผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 130 ไมโครเมตร ควบคุมอัตราไหลของน้ำเสียขาเข้าและอัตราการไหลของอากาศที่ 12.5 ล./นาที่ และ 2 ล./นาที่ ตามลำดับ ติดตั้งหัวทรายจ่ายอากาศที่ระดับ 1 ซม. จากขอบล่างของแผ่นกรองสแตนเลส และทำการกรองแบบสลับทุก 24 ชม. ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้ประยุกต์ใช้งานหน่วยแยกตะกอนภายใต้สภาวะที่เหมาะสมเพื่อแยกตะกอนแขวนลอยจากน้ำในถังเลี้ยงปลาบิลขนาด 2,000 ล. ซึ่งมีความหนาแน่นของปลาบิลเริ่มต้นที่ประมาณ 3 กก./ลบ.ม. ทำการทดลองเป็นเวลา 60 วัน โดยไม่เปลี่ยนถ่ายน้ำ ทั้งนี้ในชุดทดลองได้หมุนเวียนน้ำจากถังเลี้ยงปลาบิลเข้าสู่หน่วยแยกตะกอนและถังตัวกรองชีวภาพไนทริไฟเคชันตามลำดับ ก่อนผันน้ำกลับเข้าสู่ถังเลี้ยงปลาบิลอีกครั้ง ในการทดลองนี้ได้ประยุกต์ใช้ Arduino micro controller (ภาคผนวก ฉ) ในการควบคุมการทำงานของโซลินอยด์วาล์ว เครื่องสูบน้ำ และเครื่องเป่าอากาศ (ภาพที่ 4.7 และตารางที่ 4.3) ของหน่วยแยกตะกอนแบบอัตโนมัติในการเดินระบบ เริ่มต้นจากการสูบน้ำเสียเข้าสู่หน่วยแยกตะกอนบริเวณพื้นที่ทรงกระบอกด้านใน (เปิดเครื่องสูบน้ำหมายเลข 1 และวาล์วหมายเลข 3) ทำการใช้งานหน่วยแยกตะกอนจนกระทั่งครบระยะเวลาที่กำหนดไว้ 24 ชม. จึงทำการสลับการกรองมายังพื้นที่วงแหวนระหว่างทรงกระบอกด้านในและด้านนอก (เปิดเครื่องสูบน้ำหมายเลข 2 และวาล์วหมายเลข 5) และเดินระบบกรองจนกระทั่งครบระยะเวลาที่กำหนดไว้ 24 ชม. จึงสลับด้านการกรองมายังด้านในอีกครั้ง ในระหว่างการสลับด้านการกรองจะมีการทิ้งตะกอนที่กรองได้ออกจากหน่วยแยกตะกอนด้วยวาล์วหมายเลข 4 และ 6 ซึ่งจะเปิดสลับกัน ขณะที่ในชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งหน่วยแยกตะกอน แต่ทำการหมุนเวียนน้ำระหว่างถังเลี้ยงปลาบิลและถังตัวกรองไนทริไฟเคชันเท่านั้น



ภาพที่ 4.7 แผนผังของระบบเลี้ยงปลานิลแบบปิดซึ่งประกอบด้วยถังเลี้ยงปลานิล หน่วยแยกตะกอน และถังบำบัดไนทริฟิเคชัน เมื่อ 1, 2 และ 7 แทนเครื่องสูบน้ำ ส่วน 3, 4, 5 และ 6 แทนโซลินอยด์วาล์ว

ตารางที่ 4.3 ตารางการทำงานระบบอัตโนมัติของเครื่องสูบน้ำและโซลินอยด์วาล์วที่ควบคุมการทำงานโดยแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการกรองน้ำของหน่วยแยกตะกอน

NO.	เวลาที่ใช้กรองจากด้านใน (ชม.)							เวลาที่ใช้กรองจากด้านนอก (ชม.)							
	0	4	8	12	16	20	24	0	4	8	12	16	20	24	
1*															
2*															
3**															
4***															
5**															
6***															
7*	ทำงานเมื่อระดับน้ำสะสมแตะถึงเซ็นเซอร์ (20 ล.)														

หมายเหตุ \* แทนเครื่องสูบน้ำ \*\* แทนวาล์วน้ำสำหรับวนกลับระบบ \*\*\* แทนวาล์วน้ำสำหรับทิ้งตะกอน

#### 4.3.2 ลักษณะทางกายภาพของน้ำในถังเลี้ยงปลาชนิด

##### - คุณภาพน้ำทั่วไป

ลักษณะทางกายภาพของน้ำในถังเลี้ยงปลาชนิดแสดงในภาพที่ 4.9 มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทั้งในชุดควบคุมที่ไม่มีการใช้งานหน่วยแยกตะกอน และในชุดทดลองที่ใช้งานหน่วยแยกตะกอน ร่วมกับตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน ค่าเฉลี่ยของพีเอช อุณหภูมิ ความเป็นด่าง และปริมาณออกซิเจนละลายในชุดควบคุมมีค่าเท่ากับ  $7.5 \pm 0.0$ ,  $26.1 \pm 0.7$  °ซ.,  $148.8 \pm 40.0$  มก./ล. ของโซเดียมไบคาร์บอเนต และ  $7.2 \pm 0.2$  มก./ล. ตามลำดับ ส่วนในชุดทดลองพบว่ามีค่าเฉลี่ยของพีเอช อุณหภูมิ ความเป็นด่าง และปริมาณออกซิเจนละลายเท่ากับ  $7.5 \pm 0.0$ ,  $26.6 \pm 0.7$  °ซ.,  $145.7 \pm 57.9$  มก./ล. ของโซเดียมไบคาร์บอเนต และ  $7.3 \pm 0.2$  มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งพบว่าพารามิเตอร์ทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงปลาชนิด (Timmons และคณะ, 2002) นอกจากนี้ค่าความเป็นด่างของชุดทดลองมีแนวโน้มลดลงมากกว่าในชุดควบคุม จึงมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตลงไปเป็นระยะเพื่อปรับสภาพน้ำให้มีความเหมาะสม การลดลงของค่าความเป็นด่างในชุดทดลองคาดว่าเป็นผลของกระบวนการไนทริฟิเคชันซึ่งมีการใช้ไบคาร์บอเนตเป็นแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ ส่งผลให้ค่าความเป็นด่างในน้ำลดลงอย่างต่อเนื่อง ในส่วนของชุดควบคุมที่ไม่มีการใช้งานหน่วยแยกตะกอน อาจเกิดการสะสมของตะกอนในปริมาณมากจนขาดออกซิเจนซึ่งเป็นสภาวะเหมาะสมของการเกิดกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน ทำให้เกิดไฮดรอกซิลไอออน (OH<sup>-</sup>) เป็นผลิตภัณฑ์ (Lawson, 1995) ส่งผลให้ค่าความเป็นด่างในน้ำของชุดควบคุมไม่ลดลงอย่างชัดเจน จึงมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อควบคุมค่าความเป็นด่างในปริมาณน้อยกว่าในชุดควบคุม

##### - ตะกอนแขวนลอย

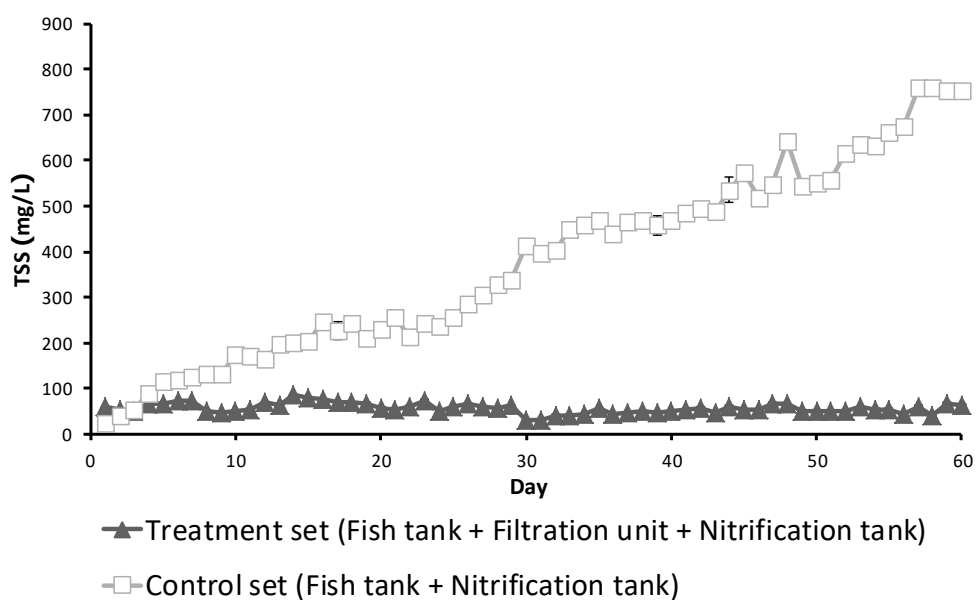
ผลการวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลาชนิดของชุดควบคุมและชุดทดลองซึ่งแสดงในภาพที่ 4.8 พบว่าปริมาณตะกอนในชุดทดลองที่มีการติดตั้งหน่วยแยกตะกอนมีค่าน้อยกว่าในชุดควบคุมที่ไม่ติดตั้งหน่วยแยกตะกอนอย่างชัดเจน โดยชุดทดลองมีปริมาณตะกอนแขวนลอยในวันสุดท้ายของการทดลอง (วันที่ 60) เท่ากับ  $64.17 \pm 1.4$  มก./ล. ขณะที่ในชุดควบคุมมีปริมาณตะกอนแขวนลอยในวันสุดท้ายเท่ากับ  $754.17 \pm 1.5$  มก./ล. ตะกอนแขวนลอยในชุดควบคุมมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก  $23.33 - 754.17$  มก./ล. โดยตะกอนดังกล่าวมีที่มาจากกระบวนการสะสมของเศษอาหาร

ของเสียที่ปลานิลขับถ่าย และจากการเติบโตของจุลินทรีย์ในถังเลี้ยง ขณะที่ในชุดทดลองมีการเพิ่มขึ้นของตะกอนแขวนลอยเพียงระดับหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากตะกอนบางส่วนถูกกำจัดออกไปอย่างต่อเนื่องโดยหน่วยแยกตะกอน อย่างไรก็ตามในวันที่ 30 ของการทดลองได้เกิดน้ำรั่วขึ้นในชุดทดลองจนทำให้ต้องมีการซ่อมแซมระบบและเติมน้ำซดเซลงในถังเลี้ยงปลานิล จึงทำให้ความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยลดลงจาก  $61.67 \pm 3.82$  มก./ล. เป็น  $29.16 \pm 2.89$  มก./ล. ก่อนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับระดับก่อนเกิดน้ำรั่วอีกครั้งในวันที่ 35 ซึ่งมีความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยเท่ากับ  $55.0 \pm 6.61$  มก./ล. ในขณะที่ปริมาณตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิลของชุดทดลองมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหน่วยแยกตะกอนสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยควบคุมความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยให้ต่ำกว่า 80 มก./ล. ซึ่งเหมาะสมต่อการเลี้ยงปลานิล (Timmons และคณะ, 2002) ในการทดลองนี้เมื่อใช้งานหน่วยแยกตะกอนจนครบระยะเวลา 24 ชม. วาล์วควบคุมอัตโนมัติจะเปิดออกเพื่อทิ้งตะกอนแขวนลอยที่สามารถกรองได้ น้ำที่ปนมากับตะกอนจะถูกแยกออกโดยไหลผ่านถุงเก็บตะกอนไปยังถังพักขนาด 150 ล. เพื่อรอสูบล้างถังเลี้ยงปลานิลต่อไป ปริมาณตะกอนแขวนลอยเฉลี่ยในถังเลี้ยงปลานิลในชุดทดลองตลอดระยะเวลา 60 วันมีค่าเท่ากับ  $56.12 \pm 11.12$  มก./ล. และตะกอนแขวนลอยที่แยกได้ต่อรอบ 24 ชม. มีค่าประมาณ  $47.55 \pm 16.21$  ก. ขณะที่ในชุดทดลองซึ่งไม่ได้ติดตั้งหน่วยแยกตะกอนพบการสะสมของตะกอนบริเวณก้นถังในปริมาณมาก และมีความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในน้ำเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 60 วันเท่ากับ  $377.18 \pm 205.75$  มก./ล. ซึ่งมากกว่าในชุดควบคุมอย่างชัดเจน

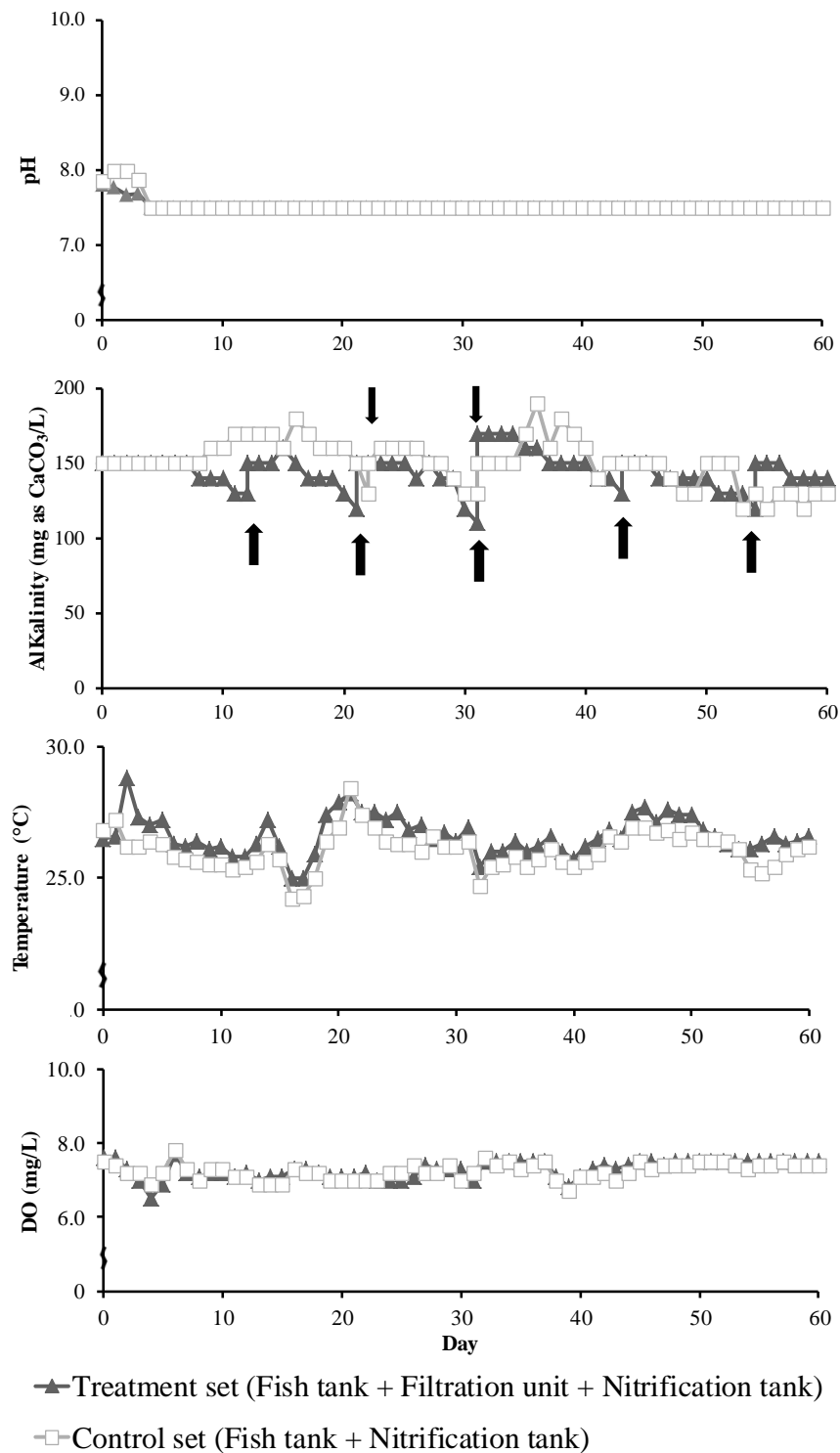
#### - สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน

ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนซึ่งแสดงในภาพที่ 4.10 พบว่าความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียและไนไตรต์อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันทั้งในชุดควบคุมและชุดทดลอง โดยในช่วงเริ่มต้นการเดินระบบ (วันที่ 1 - 4) พบการสะสมของแอมโมเนียโดยเฉลี่ยในชุดควบคุมที่ไม่ใช้งานหน่วยแยกตะกอนเท่ากับ  $0.20 \pm 0.02$  มก. ไนโตรเจน/ล. และเท่ากับ  $0.33 \pm 0.31$  มก. ไนโตรเจน/ล. ในชุดทดลองที่มีการใช้งานหน่วยแยกตะกอนร่วมกับตัวกรองชีวภาพไนทริไฟเคชัน แต่เมื่อเวลาผ่านไปพบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียลดลงอย่างชัดเจนทั้งในชุดควบคุมและชุดการทดลอง โดยมีค่าเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 60 เท่ากับ  $0.02 \pm 0.05$  มก. ไนโตรเจน/ล. ในชุดควบคุม และ  $0.06 \pm 0.10$  มก. ไนโตรเจน/ล. ในชุดทดลอง ในส่วนของไนไตรต์พบการสะสมในช่วงแรกของการทดลอง (วันที่ 1 - 4) เช่นเดียวกับแอมโมเนีย และมีความเข้มข้นสูงสุดเกิดขึ้นในวันที่ 8

จากนั้นมีเริ่มค่าลดลงและอยู่ในระดับค่อนข้างคงที่ระหว่าง 0.02 – 0.06 มก. ไนโตรเจน./ล. จนสิ้นสุดการทดลอง ทั้งนี้การสะสมของแอมโมเนียและไนไตรต์คาดว่าเป็นผลจากแบคทีเรียกลุ่มไนทริฟายอิงยังอยู่ในช่วงปรับตัวเพื่อให้มีความพร้อมต่อกระบวนการไนทริฟิเคชัน ลักษณะดังกล่าวพบได้ทั่วไประหว่างการเริ่มต้นระบบไนทริฟิเคชันทั้งในรูปแบบเซลล์แขวนลอยและตรึงเซลล์ (Nootong และคณะ, 2011) สำหรับของไนเตรตพบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นจนสิ้นสุดการทดลอง โดยมีความเข้มข้นในวันที่ 60 เท่ากับ  $93.46 \pm 0.71$  และ  $31.22 \pm 0.33$  มก. ไนโตรเจน./ล. ในชุดควบคุมและชุดทดลอง ตามลำดับ อาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มขึ้นของไนเตรตและการลดลงของแอมโมเนียและไนไตรต์เป็นผลจากปฏิกิริยาไนทริฟิเคชัน อย่างไรก็ตามในวันที่ 30 ซึ่งเกิดปัญหาน้ำรั่วขึ้นในชุดการทดลอง จึงเป็นสาเหตุให้มีการสะสมของไนเตรตต่ำกว่าในชุดควบคุม เมื่อพิจารณาจากปริมาณของไนเตรตก่อนเกิดปัญหาน้ำรั่วจะพบว่าความเข้มข้นของไนเตรตในวันที่ 29 มีค่าใกล้เคียงกันที่  $35.37 \pm 1.49$  มก. ไนโตรเจน./ล. ในชุดทดลอง และ  $37.22 \pm 0.17$  มก. ไนโตรเจน./ล. ในชุดควบคุม โดยหลังจากเกิดปัญหาดังกล่าวได้มีการชดเชยน้ำที่สูญเสียไปกลับเข้าถังเลี้ยงปลาชนิด และพบว่าไนเตรตมีการสะสมเพิ่มขึ้นอีกครั้งอย่างต่อเนื่อง และมีอัตราการเพิ่มขึ้นของไนเตรตที่คล้ายกับการสะสมในช่วงวันที่ 1 – 29



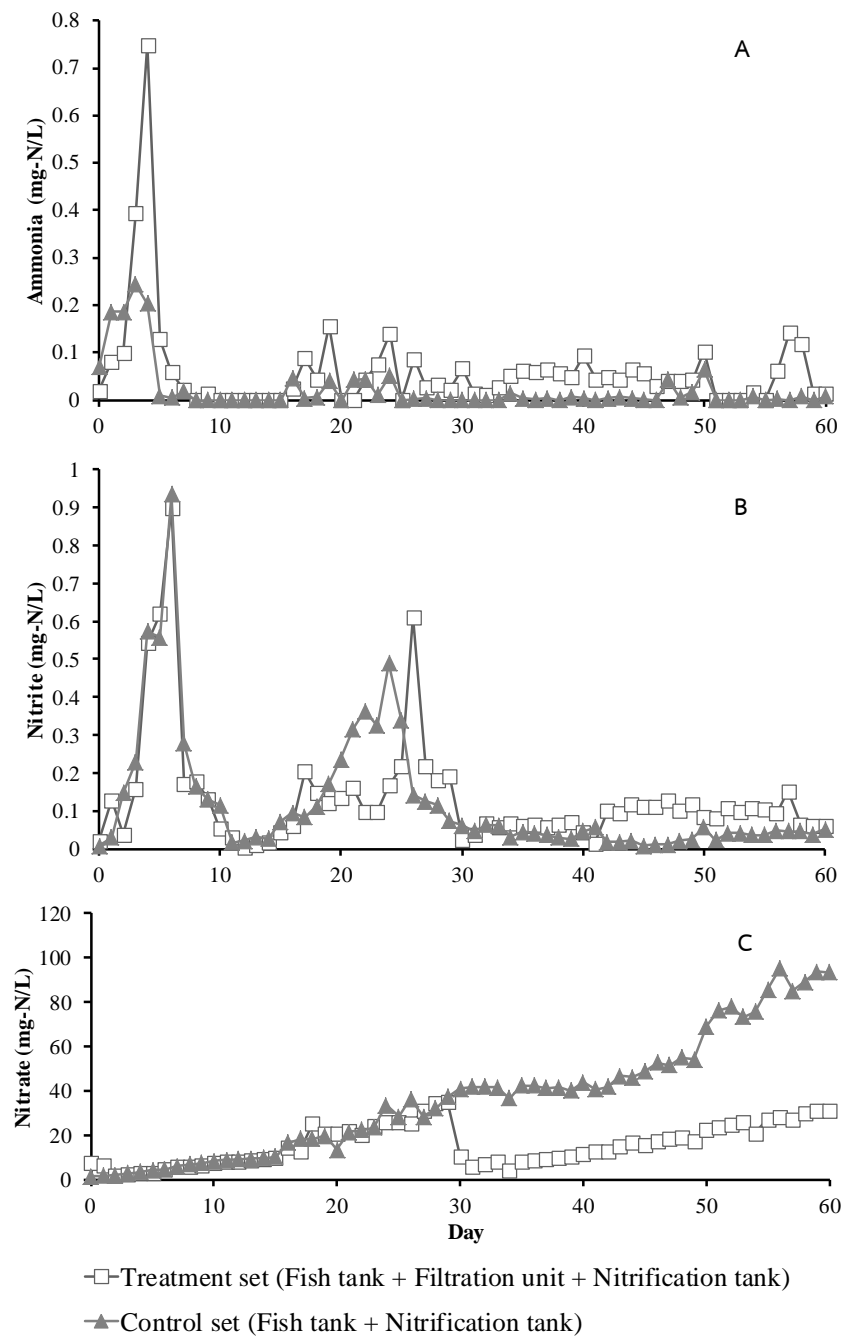
ภาพที่ 4.8 ปริมาณตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลาชนิดของชุดทดลอง และชุดควบคุม



ภาพที่ 4.9 ลักษณะทางกายภาพของน้ำในถังเลี้ยงปลานิลได้แก่ พีเอช ความเป็นด่าง อุณหภูมิ และ ปริมาณออกซิเจนละลาย (↑ แสดงการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตลงในชุดทดลอง และ ↓ แสดงการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตลงในชุดควบคุม)

### 4.3.3 ฟลักซ์การกรอง

ในการทดลองนี้ได้นำผลการทดลองจากส่วนที่ 4.2.5 ซึ่งเสนอแนะการใช้ระยะเวลาการกรองแบบสลับที่ 24 ชม. มาควบคุมการสลับฝั่งกรองและถ่ายตะกอนจากหน่วยแยกตะกอนที่ทั้งแบบอัตโนมัติ โดยแม้ว่าการใช้งานหน่วยแยกตะกอนแบบกรองสลับด้านจะสามารถใช้งานได้ แต่พบว่าต้องหยุดการเดินระบบในวันที่ 21 ซึ่งฟลักซ์การกรองลดลงอย่างรวดเร็วเหลือประมาณร้อยละ 95 ของค่าเริ่มต้น (5,780 ล./ตร.ม.-ชม.) และสังเกตพบการอุดตันบนช่องว่างของแผ่นกรองสแตนเลสจากฟิล์มชีวภาพซึ่งเกิดจากการเติบโตของจุลินทรีย์ในน้ำ (มนวิกันต์ ขจรบุญ 2551) จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ต้องหยุดใช้งานหน่วยแยกตะกอนวันละประมาณ 30 นาที เพื่อทำความสะอาดแผ่นกรองสแตนเลสเป็นระยะตลอดการทดลอง และปรับลดเวลาของการกรองสลับให้เหลือเพียง 6 ชม. เพื่อความสะดวกในการทำความสะอาดแผ่นกรองระหว่างวัน อย่างไรก็ตามการปรับลดเวลาการกรองสลับไม่ได้ส่งผลต่อปริมาณตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิล โดยปริมาณตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงปลานิลในช่วงระยะเวลาการกรองสลับที่ 24 ชม. มีค่าประมาณ 62.85 มก./ล. และหลังจากปรับระยะเวลาการกรองสลับให้เหลือ 6 ชม. มีค่าลดลงเล็กน้อยเหลือประมาณ 52.50 มก./ล. และมีค่าฟลักซ์การกรองเริ่มต้นอยู่ที่  $6,093 \pm 458$  ล./ตร.ม.-ชม.



ภาพที่ 4.10 ความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในชุดทดลองและชุดควบคุม โดย (A) แสดงปริมาณแอมโมเนีย (B) แสดงปริมาณไนไตรต์ และ (C) แสดงปริมาณไนเตรต



#### 4.3.4 การเจริญเติบโตของปลานิล

ข้อมูลการเจริญเติบโตของปลานิลแสดงในตารางที่ 4.4 ความหนาแน่นเริ่มต้นของปลานิลในถังของชุดทดลองที่มีการใช้งานหน่วยแยกตะกอนร่วมกับตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันและในชุดควบคุมที่ไม่มีหน่วยแยกตะกอนมีค่าใกล้เคียงกันที่ประมาณ 2.96 และ 3.00 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ เช่นเดียวกับน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ยซึ่งมีค่าเท่ากับ  $63.44 \pm 5.40$  และ  $62.45 \pm 3.83$  ก. ในชุดทดลองและชุดควบคุม ตามลำดับ หลังจากสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 60 พบว่าปลานิลในชุดทดลองมีอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยเท่ากับ 1.64 ก./วัน ขณะที่ชุดควบคุมมีอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยเท่ากับ 1.49 ก./วัน ซึ่งเมื่อคำนวณเป็นค่าอัตราการแลกเปลี่ยนพบว่าไม่แตกต่างกันมากนัก น้ำหนักสุดท้ายเฉลี่ยของปลานิลในชุดทดลองและชุดควบคุมมีค่าเท่ากับ  $161.57 \pm 22.17$  และ  $152.03 \pm 25.38$  ก./ตัว ตามลำดับ และมีความหนาแน่นสุดท้ายที่ประมาณ 6.05 กก./ลบ.ม. ในชุดทดลอง และ 5.51 กก./ลบ.ม. ในชุดควบคุม ซึ่งอยู่ในระดับความหนาแน่นสูงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยในบ่อดินของเกษตรกรในประเทศไทยซึ่งจับสัตว์น้ำที่ระดับความหนาแน่นสุดท้ายประมาณ 1 – 1.5 กก./ลบ.ม. (วรรัตน์ วณิชขานัย, 2551) ทั้งนี้ข้อมูลการเจริญเติบโตที่ใกล้เคียงกันทั้งในชุดทดลองและชุดควบคุมคาดว่าเป็นผลของคุณภาพน้ำซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงปลานิล ทำให้ปลานิลในทั้ง 2 ชุดการทดลองมีอัตราการแลกเปลี่ยนไม่ต่างกันมาก อย่างไรก็ตามอัตราการเจริญเติบโตในงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าการเพาะเลี้ยงจากงานวิจัยในอดีตที่ใช้ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด ซึ่งคาดว่าเป็นความแตกต่างของปริมาณโปรตีนในอาหารสัตว์น้ำ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้อาหารสัตว์น้ำที่มีโปรตีนเพียงร้อยละ 18 ซึ่งน้อยกว่างานดังกล่าวซึ่งรายงานการใช้อาหารที่มีโปรตีนสูงถึงร้อยละ 35 (Sesuk และคณะ, 2011) นอกจากนี้ยังคาดว่าเป็นผลมาจากปัจจัยร่วมอื่นๆด้วย เช่น เทคนิคการเลี้ยง ความหนาแน่นของสัตว์น้ำ เป็นต้น

ตารางที่ 4.4 การเจริญเติบโตของปลานิลระหว่างการประเมินประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอน ร่วมกับระบบตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน

พารามิเตอร์	ชุดทดลอง		ชุดควบคุม	
	วันที่ 0	วันที่ 60	วันที่ 0	วันที่ 60
อัตราการเจริญเติบโต (ก./วัน)	-	1.64	-	1.49
น้ำหนักเฉลี่ย (ก./ตัว)	63.44 ± 5.40	161.57 ± 22.17	62.45 ± 3.83	152.03 ± 25.38
ความยาวเฉลี่ย (ซม./ตัว)	14.63 ± 0.51	19.88 ± 1.00	14.55 ± 0.45	19.18 ± 1.07
อัตราการแลกเนื้อ	-	1.94	-	2.39
อัตราการรอด (%)	-	93	-	100
ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	2.96	6.05	3.00	5.51
ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.)	59.16 ± 1.44	64.16 ± 1.44	23.33 ± 10.10	754.16 ± 1.44
แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	0.02 ± 0.02	0.01 ± 0.00	0.06 ± 0.05	0.00 ± 0.01
ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	0.02 ± 0.00	0.06 ± 0.02	0.00 ± 0.00	0.05 ± 0.00
ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	7.35 ± 0.68	31.22 ± 0.33	1.44 ± 0.04	93.46 ± 0.71

#### 4.3.5 สมดุลมวลไนโตรเจน

เมื่อสิ้นสุดการทดลองได้ทำการประเมินสมดุลมวลไนโตรเจน โดยเปรียบเทียบระหว่างปริมาณไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบทั้งหมดกับปริมาณไนโตรเจนคงเหลือในระบบ ในการทดลองนี้ได้วิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในอาหารปลาด้วยเครื่อง CHN Analyzer ซึ่งพบว่าปริมาณไนโตรเจนในอาหารปลาคิดเป็นร้อยละ 3.27 (น้ำหนักแห้ง) สำหรับปริมาณไนโตรเจนในตะกอนและปลานิลมีค่าเท่ากับร้อยละ 3.2 และ 6.35 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งอ้างอิงข้อมูลจากงานวิจัยของพรรณทรากรณ์ สิทธิพิกลางกูร (2556) และเพ็ญพิชญา พินิจธนภาคย์ (2556) ในส่วนของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนสามารถตรวจวิเคราะห์ได้โดยตรงจากความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตในน้ำ ผลการทำสมดุลมวลไนโตรเจนในช่วงระหว่างวันที่ 1 – 30 (ก่อนระบบบ่ัว) แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบทั้งในชุดควบคุมและชุดทดลองมีลักษณะการกระจายตัวที่คล้ายคลึงกัน โดยส่วนใหญ่มาจากอาหารปลาคิดเป็นร้อยละ 65 – 68 ซึ่งมีน้ำหนักเท่ากับ 186.39 ก. ทั้งในชุดควบคุมและชุดทดลอง รองลงมาประมาณร้อยละ 30 คือปริมาณไนโตรเจนในปลานิลซึ่งมีน้ำหนัก

เท่ากับ 83.05 ก. ในชุดควบคุม และ 83.28 ก. ในชุดทดลอง และส่วนที่เหลือคือสารประกอบอินทรีย์ ไนโตรเจนที่ละลายน้ำ ทั้งนี้ผลการทำสมดุลมวลไนโตรเจนในวันที่ 30 พบว่าไนโตรเจนส่วนใหญ่ยังอยู่ในมวลของปลาชนิดเป็นร้อยละ 42 – 43 ซึ่งมีน้ำหนักเท่ากับ 119.15 ก. ในชุดควบคุม และ 123.1 ก. ในชุดทดลอง นั่นคือข้อมูลจากตารางที่ 4.6 ได้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการไนตริฟิเคชันมีบทบาทที่สำคัญต่อการควบคุมคุณภาพน้ำทั้งในชุดควบคุมและชุดทดลอง ซึ่งยืนยันได้จากปริมาณไนเตรตที่มีสัดส่วนถึงร้อยละ 24 – 26 ของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ซึ่งคิดเป็นน้ำหนัก 74.46 ก. ในชุดควบคุม และ 70.75 ก. ในชุดทดลอง และเมื่อพิจารณาสัดส่วนของตะกอนแขวนลอยพบว่าการใช้งานหน่วยแยกตะกอนสามารถนำไนโตรเจนออกจากระบบได้ประมาณร้อยละ 13 ซึ่งคิดเป็นน้ำหนัก 37.07 ก. และเหลืออยู่ในน้ำน้อยกว่าร้อยละ 1 นอกจากนี้ปริมาณของไนโตรเจนที่หายไปในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีค่าประมาณร้อยละ 18 (51.56 ก.) ในชุดควบคุม และร้อยละ 21 (48.57 ก.) ในชุดทดลอง ซึ่งคาดว่าเป็นผลของความหนาแน่นสัตว์น้ำที่ยังคงอยู่ในระดับต่ำ ทำให้การสะสมของตะกอนที่บริเวณก้นถังในชุดควบคุมยังมีปริมาณไม่มากนักเพียงพอที่จะเกิดสภาวะไร้อากาศซึ่งเหมาะสมกับปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน

ในส่วนผลการทำสมดุลมวลไนโตรเจนในช่วงระหว่างวันที่ 1 – 60 ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าปริมาณไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบทั้งในชุดควบคุมและชุดทดลองส่วนใหญ่มาจากอาหารปลาชนิดคิดเป็นร้อยละ 80 – 82 ซึ่งคำนวณเป็นน้ำหนักไนโตรเจนประมาณ 392 ก. รองลงมาคือปริมาณไนโตรเจนในปลาชนิดประมาณร้อยละ 16 ซึ่งคำนวณเป็นน้ำหนักไนโตรเจนประมาณ 83 ก. และส่วนที่เหลือคือสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนที่ละลายน้ำ โดยผลการทำสมดุลมวลไนโตรเจนในวันที่ 60 พบว่าปริมาณสารประกอบไนโตรเจนทั้งหมดในชุดทดลองมีค่าน้อยกว่าในชุดควบคุม ซึ่งคาดว่าเกิดจากการเกิดน้ำรั่วออกจากระบบในวันที่ 30 ทั้งนี้จากการคำนวณได้ประมาณการสูญเสียไนโตรเจนออกไปในช่วงน้ำรั่วประมาณร้อยละ 11 ซึ่งคิดเป็นน้ำหนักไนโตรเจนประมาณ 56 ก. โดยเป็นไนโตรเจนจากสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำและปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำวันที่ 29 อาจกล่าวได้ว่าการใช้งานหน่วยแยกตะกอนสามารถนำไนโตรเจนในรูปตะกอนแขวนลอยออกจากระบบได้ประมาณร้อยละ 18 (92.46 ก.) และเหลืออยู่ในน้ำต่ำกว่าร้อยละ 1 ซึ่งแสดงถึงการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพของหน่วยแยกตะกอนตลอดการทดลอง ขณะที่ชุดควบคุมพบว่ามีไนโตรเจนสะสมในรูปตะกอนแขวนลอยประมาณร้อยละ 10 ของไนโตรเจนทั้งหมด (26.35 ก.)

ตารางที่ 4.5 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบเริ่มต้นในวันที่ 1 และในวันที่ 30 ก่อนระบบเกิดการรั่ว

องค์ประกอบไนโตรเจน	ไนโตรเจน (ก.)	
	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม
<b><u>ไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบในวันแรก (วันที่ 1)</u></b>		
ปลานิล	83.28 (29.28 %)	83.05 (30.48 %)
อาหารปลานิล	186.39 (65.52 %)	186.39 (68.41 %)
แอมโมเนีย	0.04 (0.01 %)	0.14 (0.05 %)
ไนไตรต์	0.04 (0.01 %)	0.02 (0.01%)
ไนเตรต	14.72 (5.17 %)	2.88 (1.06 %)
ตะกอนในระบบ	0.00 (0.00 %)	0.00 (0.00 %)
รวม	284.47 (100 %)	272.48 (100 %)
<b><u>ไนโตรเจนในวันสุดท้าย (วันที่ 30)</u></b>		
ปลานิล	123.10 (43.29 %)	119.15 (41.90 %)
แอมโมเนีย	0.00 (0.00%)	0.13 (0.05 %)
ไนไตรต์	0.12 (0.04 %)	0.05 (0.02 %)
ไนเตรต	70.75 (24.88 %)	74.46 (26.18 %)
ตะกอนในระบบ	1.87 (0.66 %)	26.35 (9.27 %)
ตะกอนที่นำออก	37.07 (13.03 %)	3.77 (1.33 %)
ส่วนที่ขาดหายไป (ไม่สามารถระบุได้)	51.56 (18.12 %)	48.57 (21.23 %)
รวม	232.91 (81.88 %)	223.91 (78.77 %)

ตารางที่ 4.6 ปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบเริ่มต้นในวันที่ 1 และวันที่ 60

องค์ประกอบไนโตรเจน	ไนโตรเจน (ก.)	
	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม
<b><u>ไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบในวันแรก (วันที่ 1)</u></b>		
ปลานิล	83.28 (16.98 %)	83.05 (16.93 %)
อาหารปลานิล	392.40 (80.00 %)	392.40 (82.01 %)
แอมโมเนีย	0.04 (0.01 %)	0.14 (0.03 %)
ไนไตรต์	0.04 (0.01 %)	0.02 (0.01 %)
ไนเตรต	14.72 (3.00 %)	2.88 (0.59 %)
ตะกอนในระบบ	0.00 (0.00 %)	0.00 (0.00 %)
รวม	490.48 (100 %)	478.49 (100 %)
<b><u>ไนโตรเจนในวันสุดท้าย (วันที่ 60)</u></b>		
ปลานิล	170.09 (34.68 %)	155.03 (32.40 %)
แอมโมเนีย	0.03 (0.01 %)	0.02 (0.00 %)
ไนไตรต์	0.10 (0.02 %)	0.12 (0.02 %)
ไนเตรต	62.44 (12.73 %)*	186.94 (39.07 %)
ตะกอนในระบบ	4.11 (0.84 %)	48.27 (10.09 %)
ตะกอนที่นำออก	92.46 (18.85 %)	12.15 (2.54 %)
ไนโตรเจนที่หายไปจากปัญหาน้ำรั่ว (ตะกอนแขวนลอย)	2.96 (0.60 %)	-
ไนโตรเจนที่หายไปจากปัญหาน้ำรั่ว (อนินทรีย์ไนโตรเจน)	53.33 (10.87 %)	-
ส่วนที่ขาดหายไป (ไม่สามารถระบุได้)	104.96 (21.40 %)	75.96 (15.87 %)
รวม	385.52 (78.60 %)	402.53 (84.12 %)

หมายเหตุ \* ปริมาณไนเตรตที่ต่ำกว่าเนื่องมาจากสาเหตุน้ำรั่วออกจากระบบ

#### 4.3.6 สมรรถนะการใช้งานหน่วยแยกตะกอน

หน่วยแยกตะกอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาตรรวม 25 ล. มีพื้นที่ผิวการกรอง 0.12 ตร.ม. และให้ค่าพลັกซ์การกรองเท่ากับ  $6,093 \pm 458$  ล./ตร.ม.-ชม. มีประสิทธิภาพการแยกตะกอนสูงสุดที่ร้อยละ 41 ซึ่งพบว่าสมรรถนะในการแยกตะกอนต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานหน่วยแยกตะกอนกับงานวิจัยอื่นๆ ดังตารางที่ 4.7 อย่างไรก็ตามหน่วยแยกตะกอนจากงานวิจัยนี้สามารถกรองน้ำเสียได้มากกว่า Drum screen filter จากรายงานของ Ali (2013) อยู่ถึง 1.5 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยของเศรษฐศักดิ์ ติวะนันทกร (2556) ซึ่งเป็นหน่วยแยกตะกอนที่ใช้กระบวนการกรองและใช้วัสดุกรองที่มีขนาดช่องว่าง 100 ไมโครเมตร และมีพื้นที่ผิวการกรองประมาณ 0.1 ตร.ม. พบว่าหน่วยแยกตะกอนที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถทำการกรองได้นานกว่าอย่างมีนัยสำคัญและสามารถกรองน้ำเสียได้มากกว่า 2.6 เท่า ซึ่งจะช่วยในด้านการลดต้นทุนระหว่างช่วงการหยุดเดินระบบเพื่อบำรุงรักษา นอกจากนี้หน่วยแยกตะกอนที่พัฒนาขึ้นพบว่ามีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนแขวนลอยต่ำกว่างานวิจัยของธนากร อ้อมุดากุล (2555) ซึ่งใช้ถังกรองทรายแบบชั้นกรอง 2 ชั้น และงานวิจัยของศิวฤกษ์ หนูฤทธิ์ (2554) ซึ่งใช้การตกตะกอนในคอลัมน์ทรงกระบอก อย่างไรก็ตามหน่วยแยกตะกอนจากงานวิจัยทั้งสองสามารถรองรับน้ำเสียได้ในปริมาณน้อย ซึ่งไม่เหมาะกับรูปแบบการเลี้ยงสัตว์น้ำในเชิงเศรษฐกิจ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองซึ่งรายงานไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พบว่าหน่วยแยกตะกอนสามารถกรองน้ำได้มากกว่าถึง 5 เท่า และเมื่อพิจารณาถึงภาระต้นทุนของเกษตรกรรายย่อยในประเทศไทย ความหนาแน่นของสัตว์น้ำที่สามารถเลี้ยงได้ในประเทศ รวมถึงการเข้าถึงหน่วยแยกตะกอนจากต่างประเทศซึ่งมีต้นทุนสูงและมีกลไกที่ซับซ้อนต่อการใช้งาน อาจกล่าวได้ว่ามีความเหมาะสมในการเลือกใช้งานหน่วยแยกตะกอนที่ทำการพัฒนาขึ้นซึ่งใช้งบลงทุนโดยประมาณ 18,000 บาท สำหรับการใช้งานด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติและจะลดลงเหลือเพียง 10,000 บาท เมื่อควบคุมการทำงานด้วยแรงงานคนแทนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อควบคุมการทำงานของระบบ โดยในส่วนของ การปรับปรุงระบบหน่วยแยกตะกอนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น อาจทำการปรับขนาดพื้นที่ผิวการกรองให้มากขึ้นเพื่อรองรับปริมาณน้ำเสียในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำขนาดใหญ่ได้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับอุตสาหกรรมการเลี้ยงสัตว์น้ำในอนาคต หรือทำการปรับปรุงกระบวนการกรองสลับและทำงานสะอาดให้สามารถใช้งานได้ อย่างอัตโนมัติ

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบสมรรถนะหน่วยแยกตะกอนจากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ

งานวิจัยอ้างอิง	กระบวนการในการแยกตะกอน	รูปแบบหน่วยแยกตะกอน	ฟลักซ์ (ล./ตร.ม.-ชม.)	พื้นที่กรอง (ตร.ม.)	ประสิทธิภาพการแยกตะกอน (%)
Ali (2013)	Drum filter	Drum screen filter	4,393	28	52
ชนากร อ้อมุกตกุล (2555)	Rapid sand and slow sand	ถังกรองทรายแบบชั้นกรอง 2 ชั้น	-	-	93
ศิวฤกษ์ หนูฤทธิ (2554)	Solid Separating unit	คอลัมน์แยกตะกอนที่บรรจุแผ่นกั้นภายใน	-	-	73
เศรษฐศักดิ์ ติวะนนทกร (2556)	Filtration unit	หน่วยแยกตะกอนแบบวางเอียง	2,330	0.12	71
งานวิจัยนี้	Filtration unit	หน่วยแยกตะกอนแนวตั้งแบบใช้อากาศช่วยผสม	6,250	0.12	41

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาหน่วยแยกตะกอนสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบปิดโดยอาศัยหลักการกรอง ในช่วงแรกของการทดลองทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตะกอนแขวนลอยเมื่อถูกหมุนวนน้ำผ่านเครื่องสูบน้ำในถังเลี้ยง จากนั้นช่วงที่สองทำการศึกษาถึงสถานะที่เหมาะสมของการใช้งานหน่วยแยกตะกอนที่ออกแบบขึ้น และสุดท้ายในช่วงที่สามได้ทำการประยุกต์ใช้งานหน่วยแยกตะกอนกับระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำร่วมกับถังปฏิกรณ์ที่มีตัวกรองชีวภาพในทรีฟิเคชัน โดยผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ขนาดของตะกอนแขวนลอยในถังเลี้ยงสัตว์น้ำ พบว่ามีขนาดลดลงจากประมาณ 207 ไมโครเมตรเมื่อเริ่มต้นการทดลอง เหลือประมาณ 170 ไมโครเมตรภายหลังหมุนวนน้ำในถังเลี้ยงปลาไหลผ่านเครื่องสูบน้ำทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่เป็นเวลาประมาณ 3 ชม. และพบว่าตะกอนจมตัวได้ยากขึ้นเมื่อมีขนาดลดลง ซึ่งยืนยันได้จากค่าการจมตัวของตะกอนเป็นเวลา 30 นาทีหรือ  $SV_{30}$  ที่มีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไปและความขุ่นที่มีค่าค่อนข้างคงที่ โดยจากผลการทดลองที่ได้รับเป็นแนวทางเพื่อเลือกใช้แผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่างการกรองเท่ากับ 100, 130 และ 160 ไมโครเมตรสำหรับการศึกษาในช่วงต่อไป

5.1.2 การทดลองช่วงที่ 2 ทำการศึกษาถึงสถานะที่เหมาะสมของการใช้งานหน่วยแยกตะกอนซึ่งใช้แผ่นกรองสแตนเลสเป็นวัสดุกรอง ผลการทดลองพบว่ากรองแบบไหลขวางสามารถกรองของเหลวได้นานกว่าการกรองแบบตั้งฉาก และการเป่าอากาศในแนวขนานข้างกับแผ่นกรองสแตนเลสสามารถยืดระยะเวลาในการกรองแบบไหลขวางและคงระดับฟลักซ์การกรองได้ดีกว่าการไม่เป่าอากาศอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณตะกอนสูงสุดที่แยกได้จากน้ำเสียจากถังเลี้ยงปลาไหลมีค่าประมาณ 804 มก. เมื่อทำการกรองแบบไหลขวางด้วยแผ่นกรองสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 130 ไมโครเมตรร่วมกับการเป่าอากาศอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 380 วินาที และจากการทดลองยังพบว่าควรควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้าหน่วยแยกตะกอนไม่น้อยกว่า 750 ล./ชม. และติดตั้งหัวทรายเป่า



อากาศที่ระดับความสูง 1 ซม. จากขอบล่างของวัสดุกรองสแตนเลสด้วยอัตราการไหลของอากาศ 2 ล./นาที่ ทั้งนี้เมื่อทำการเดินระบบหน่วยแยกตะกอนภายใต้สภาวะเหมาะสมพบว่าฟลักซ์การกรองเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการใช้งานมีค่าเท่ากับ  $6,093 \pm 458$  ล./ตร.ม.-ชม. ซึ่งมีประสิทธิภาพการกรองประมาณร้อยละ 41

5.1.3 ผลการศึกษาการประยุกต์ใช้งานหน่วยแยกตะกอนร่วมกับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดที่มีตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชันเป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่าหน่วยแยกตะกอนสามารถแยกตะกอนออกจากน้ำได้ดี ซึ่งยืนยันได้จากความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในน้ำขาออกจากระบบที่มีค่าต่ำกว่ากฎหมายกำหนด (80 มก./ล.) โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ  $56.12 \pm 11.12$  มก./ล. ขณะที่ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรต์ในถังเลี้ยงปลานิลมีค่าต่ำกว่า 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ตลอดระยะเวลาการทดลอง ส่วนไนเตรตในถังเลี้ยงปลานิลมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทดลองซึ่งเป็นผลจากกระบวนการไนทริฟิเคชัน สำหรับความหนาแน่นสุดท้ายของปลานิลที่ได้รับในการทดลองนี้มีค่าประมาณ 12 กก./ลบ.ม. ซึ่งมากกว่าความหนาแน่นที่เกษตรกรในประเทศดำเนินการได้ประมาณ 6 – 10 เท่า ในส่วนผลการประเมินสมดุลไนโตรเจนในชุดทดลองที่มีการใช้งานหน่วยแยกตะกอนร่วมกับตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน พบว่าหน่วยแยกตะกอนสามารถนำไนโตรเจนออกระบบเลี้ยงสัตว์น้ำได้ประมาณร้อยละ 18 ของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบ ไนโตรเจนในรูปของตะกอนที่คงเหลือในถังเลี้ยงปลานิลมีสัดส่วนน้อยกว่าร้อยละ 1 ของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบ และกระบวนการไนทริฟิเคชันมีบทบาทสำคัญในการควบคุมระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรต์ในถังเลี้ยงปลานิลโดยคิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 25 ขณะที่ในผลการประเมินสมดุลไนโตรเจนในชุดควบคุมที่มีการใช้งานเพียงตัวกรองชีวภาพไนทริฟิเคชัน พบว่ามีสัดส่วนของตะกอนที่คงเหลืออยู่ในถังเลี้ยงปลานิลถึงประมาณร้อยละ 10 ของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบ และกระบวนการไนทริฟิเคชันยังคงมีบทบาทสำคัญในการควบคุมระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรต์ในถังเลี้ยงปลานิลคิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 26 นอกจากนี้ทั้งในชุดควบคุมและชุดทดลองพบว่ามีไนโตรเจนหายไปจากระบบประมาณร้อยละ 18 – 21 ซึ่งเป็นผลจากการสูญเสียในรูปก๊าซไนโตรเจนซึ่งเกิดจากกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน คาดว่าเกิดขึ้นในบริเวณที่มีการสะสมของตะกอนในปริมาณมาก เช่น บริเวณก้นถังเลี้ยง หรือบริเวณก้นเก็บตะกอนของหน่วยแยกตะกอน เป็นต้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในระหว่างทำการศึกษพบว่าจะต้องหยุดการใช้งานหน่วยแยกตะกอนเป็นระยะเพื่อทำความสะอาดแผ่นกรองสแตนเลสด้วยการล้างย้อน ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาถึงวิธีการล้างย้อนแบบใหม่หรือปรับปรุงวิธีการเดิมให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เช่น ติดตั้งแปรงขัดทำความสะอาดอัตโนมัติ ทั้งนี้เพื่อลดภาระการใช้แรงงานและลดช่วงเวลาการหยุดการใช้งานหน่วยแยกตะกอน

5.2.2 ในระหว่างการทดลองพบการเกิดฟิล์มชีวภาพที่บริเวณพื้นผิวและช่องว่างการกรองของแผ่นกรองสแตนเลส ซึ่งเป็นอีกสาเหตุของการอุดตันและหยุดการใช้งานหน่วยแยกตะกอนเพื่อทำความสะอาด ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงชนิดและสมบัติของฟิล์มชีวภาพ และแนวทางในการกำจัดฟิล์มชีวภาพที่เกิดขึ้นบริเวณแผ่นกรองสแตนเลส ทั้งนี้เพื่อเป็นการยืดอายุการใช้งานหน่วยแยกตะกอนและลดค่าใช้จ่ายในการจัดการภายในฟาร์ม

5.2.3 เนื่องจากคุณภาพน้ำที่ได้รับจากชุดควบคุมและชุดทดลองไม่ได้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญแม้ว่ามีการใช้งานหน่วยแยกตะกอนในชุดทดลองอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากระดับความหนาแน่นของสัตว์น้ำที่ไม่สูงนัก ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันถึงประโยชน์ของการใช้งานหน่วยแยกตะกอนจึงควรมีการทดลองซ้ำในสภาวะที่มีความหนาแน่นของสัตว์น้ำสูงขึ้นจนถึงระดับความหนาแน่นสูงที่ประมาณ 40 กก./ลบ.ม. และควรศึกษาถึงการใช้งานหน่วยแยกตะกอนควบคู่กับหน่วยตัวกรองชีวภาพในทริฟิเคชันที่มีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ควรมีการประเมินความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้งานหน่วยแยกตะกอนร่วมกับตัวกรองชีวภาพในทริฟิเคชัน

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กษิดิศ หนูทอง. 2551. การบำบัดไนโตรเจนในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด. *วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง ปีที่ 16* 1: 11-12
- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2554. *มาตรฐานน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด* [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_std\\_water04.html#s13](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html#s13) [2560, เมษายน 16]
- ปกฉัตร ชูติวิศุทธิ์. 2552. *ประสิทธิภาพของระบบกรองแบบแบ่งส่วนในการแยกจุลสาหร่ายและอนุภาคสารแขวนลอยเพื่อควบคุมคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธนากร อ้อมมุกตากุล (2555). *การประยุกต์ใช้การกรองทรายแบบเร็วและแบบช้าในการบำบัดน้ำจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรรณทอรณ สิริพิลากร. 2556. *ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนของตะกอนชีวภาพจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบไบโอฟล็อก*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล. 2557. *พื้นฐานกระบวนการถ่ายเทมวลสารและการแยกทางกายภาพในงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เพ็ญพิชญา พินิจธนภาคย์. 2556. *การพัฒนาถังปฏิกรณ์ร่วมไนทริฟิเคชัน – ดีไนทริฟิเคชัน เพื่อบำบัดไนโตรเจนจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มนวิกานต์ ขจรบุญ. 2551. *การคัดเลือกหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียเพื่อการประยุกต์ใช้กับตัวกรองชีวภาพสำหรับระบบน้ำหมุนเวียนของบ่อเพาะเลี้ยงกุ้งระบบปิด*. วิทยานิพนธ์ปริญญา

มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา. 2539. *การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ*. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

รัชฎาพร ไชยศรี. 2556. *คอลัมน์ร่วมแยกตะกอน-ดีไนทริฟิเคชันสำหรับระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วรรัตน์ วณิชชานัย, 2551. *ผลจากการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนต่อการเกิดตะกอนจุลินทรีย์และคุณภาพน้ำในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบปิด*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิชัย ลาภจตุพร และอรทัย เตียววานิชย์. 2535. *พีเอส*. กรุงเทพมหานคร: แลปอินเตอร์.

วิรัช จิวแหยม. 2544. *ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคุณภาพน้ำและการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิริวรรณ ศิลาภากุล. 2545. *การกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้งโดยถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกที่มีการไหลวนแบบภายนอก*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิวฤกษ์ หนูฤทธิ. 2554. *การพัฒนาหน่วยแยกตะกอนและผลของตะกอนต่อคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เศรษฐศักดิ์ ทิวะนันทกร. 2556. *การกรองตะกอนแขวนลอยในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยแผ่นกรองชนิดวางเอียง*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- APHA, AWWA and WEF. 2005. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21<sup>st</sup> edition. Washington DC: American Public Health Association.
- Ali, S. A. (2013). Design and evaluate a drum screen filter driven by undershot waterwheel for aquaculture recirculating systems. *Aquacultural Engineering*, 54, 38-44.
- 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(1-4), 29-35.
- Buethorn, S., Carstensen, F., Wintgens, T., Melin, T., Volmering, D. and Vossenkaul, K. (2010). Permeate flux decline in cross-flow microfiltration at constant pressure. *Desalination*, 250(3)
- Bower, C. E. and Holm - Hansen, T. 1980. A Salicylate - Hypochlorite Method for Determining Ammonia in Seawater. *Aquacultural Engineering*. 37: 794 - 798.
- Couturier, M., Trofimencoff, T., Buil, J. U. and Conroy, J. (2009). Solids removal at a recirculating salmon-smolt farm. *Aquacultural Engineering*, 41(2), 71-77.
- Davis, M. L. and Cornwell, D. A. *Introduction to environmental engineering*. Landsberg: McGraw-Hill.2003.
- Ebeling, J. M., Welsh, C. F. and Rishel, K. L. (2006). Performance evaluation of an inclined belt filter using coagulation/flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorus from microscreen backwash effluent. *Aquacultural Engineering*, 35(1), 61-77.
- Grasshoff, K., Kremling, K. and Ehrhaedt, M. 1999. *Methods of Seawater Analysis*. 3<sup>rd</sup> ed. Weinheim: Wiley - vch.

- Holan, A. B., Wold, P. A. and Leiknes, T. O. (2014). Intensive rearing of cod larvae (*Gadus morhua*) in recirculating aquaculture system (RAS) implementing a membrane bioreactor (MBR) for enhanced colloidal particle and fine suspended solids removal. *Aquacultural Engineering*, 58, 52-58.
- Lawson, T.B. 1995. *Fundamentals of aquacultural engineering*. New York: Chapman & hall.
- Lin, Y.-C. and Chen, J.-C. (2003). Acute toxicity of nitrite on *Litopenaeus vannamei* (Boone) juveniles at different salinity levels. *Aquaculture*, 224(1-4), 193-201.
- Metcalf and Eddy. (2004). *Wastewater engineering: collection, treatment, disposal*. McGraw-Hill.
- 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.
- Patterson, R. N. and Watts, K. C. (2003). Micro-particles in recirculating aquaculture systems: microscopic examination of particles. *Aquacultural Engineering*, 28(3-4), 115-130.
- Ray, A. J., Dillon, K. S. and Lotz, J. M. (2011). Water quality dynamics and shrimp (*Litopenaeus vannamei*) production in intensive, mesohaline culture systems with two levels of biofloc management. *Aquacultural Engineering*, 45(3), 127-136.
- Timmons, M. B., Ebeling, J. M. Wheaton, F. W., Summerferlt, S. T. and Vinci, B. J. 2002. *Recirculating Aquaculture systems*. 2<sup>nd</sup> edition. New York: Cayuca Aqua Ventures.
- Viadero Jr, R. C. and Noblet, J. A. (2002). Membrane filtration for removal of fine solids from aquaculture process water. *Aquacultural Engineering*, 26(3), 151-169.
- Wang, C.-Y., Chang, C.-Y., Chien, Y.-H. and Lai, H.-T. (2016). The performance of coupling membrane filtration in recirculating aquaponic system for tilapia culture. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 107, 21-30.

- Santos, V. B., Mareco, E. A. and Pai-Silva, M. D. (2013) Growth curves of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) strains cultivated at different temperatures. *Animal Sciences*, 35(3), 235-242
- Strickland, J. D. H. and Parsons, T. R. 1972. *A Practical Handbook of Seawater Analysis*. 2<sup>nd</sup> ed. Ottawa: Fisheries research board of Canada.







## ภาคผนวก ก

## วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

## ก.1 วิธีวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนีย

การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำดัดแปลงมาจากวิธีของ Bower และ Holm-Hansen (1980) โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารเคมีและการวิเคราะห์ดังนี้

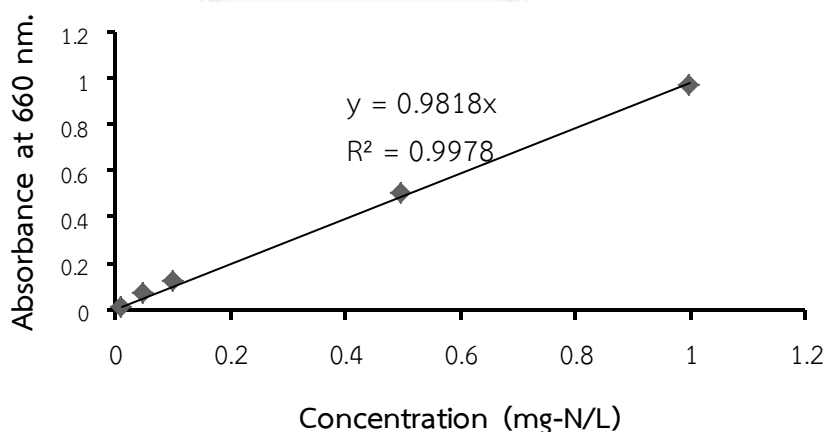
## - การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายซาลิไซเลตคะตะลิสต์ (Salicylate-catalyst solution) เตรียมโดยการละลายโซเดียมซาลิไซเลต (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. ลงในน้ำที่ปราศจากไอออน (De-ionized water) และปรับปริมาตรสารละลายซาลิไซเลตคะตะลิสต์ให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ล. โดยการเก็บสารละลายควรเก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4 °ซ. (ควรเตรียมสารละลายใหม่ทุก 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. ลงในน้ำที่ปราศจากไอออน และปรับปริมาตรสารละลายอัลคาไลน์ซิเตรตให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ล. โดยการเก็บสารละลายควรเก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4 °ซ.
3. สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodium hypochlorite solution) สามารถใช้สารละลายไฮโปคลอไรต์ทางการค้าความเข้มข้น 1.5 นอร์มอล
4. สารละลายอัลคาไลน์ไฮโปคลอไรต์ (Alkaline-hypochlorite solution) สามารถเตรียมได้โดยการผสมสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์และสารละลายอัลคาไลน์ซิเตรตในอัตราส่วน 1:9 ซึ่งเมื่อผสมสารละลายทั้งสองเข้าด้วยกันควรใช้สารละลายอัลคาไลน์ไฮโปคลอไรต์ในกระบวนการวิเคราะห์ภายใน 1 ชม.

- ขั้นตอนการวิเคราะห์

กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C และเก็บน้ำตัวอย่างบรรจุใส่ขวดที่มีฝาปิดสนิท จากนั้นควรทำการวิเคราะห์ทันที หากไม่สามารถทำได้ควรเก็บน้ำตัวอย่างแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $-15^{\circ}\text{C}$ .

กระบวนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มล. ใส่ในหลอดทดลองเติมสารละลายซาลิไซเลตอะลูมิเนียมปริมาตร 0.6 มล. และสารละลายอัลคาไลน์ไฮโปคลอไรต์ ปริมาตร 1.0 มล. ตามลำดับ (ซึ่งนี้สามารถปรับเพิ่มลดปริมาตรน้ำตัวอย่างและสารละลายที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ได้โดยคงอัตราส่วนให้มีค่าเท่าเดิม) เขย่าสารให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาในที่มีดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 1 - 2 ชม. แต่ไม่ควรเกิน 3 ชม. สำหรับการวิเคราะห์แบลนค์ (Blank) สามารถทำได้โดยใช้น้ำที่ปราศจากไอออน ที่มีการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่างและใช้กระบวนการวิเคราะห์เช่นเดิม จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 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. ดังกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน



ภาพที่ ก-1 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน

## ก.2 วิธีวิเคราะห์ปริมาณไนไตรต์

การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไนไตรต์ไนโตรเจนในน้ำดัดแปลงมาจากวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Strickland และ Parsons (1972) โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารเคมีและกระบวนการวิเคราะห์ดังนี้

### - การเตรียมสารเคมี

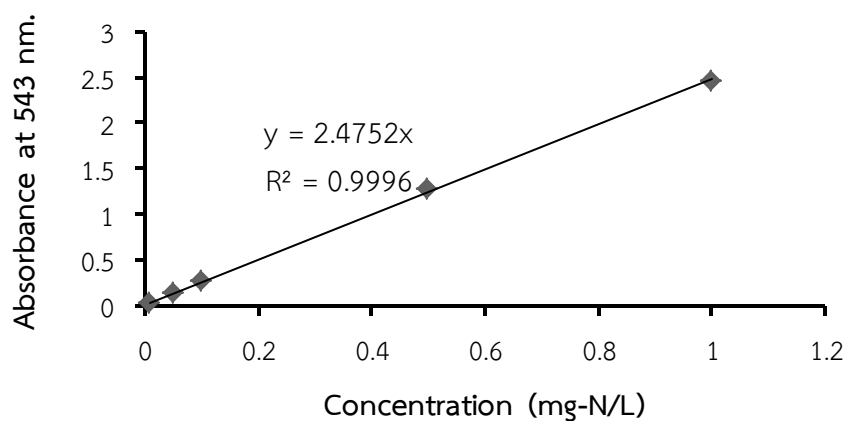
1. สารละลายซัลฟานิลาไมด์ (Sulfanilamide solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายซัลฟานิลาไมด์ (Sulphanilamide;  $C_6H_8N_2O_2S$ ) ปริมาณ 5 ก. ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Hydrochloric acid; HCl) ปริมาตร 50 มล. และปรับปริมาตรสารละลายซัลฟานิลาไมด์ให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ล. โดยการเก็บสารละลายควรเก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $4^{\circ}C$ .
2. สารละลายเอ็นเอ็นอีดี (Naphthylethylenediamine solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายเอ็นเอ็นอีดี (NNED; N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride) ปริมาณ 0.5 ก. ในน้ำที่ปราศจากไอออน และปรับปริมาตรสารละลายเอ็นเอ็นอีดีให้มีปริมาตรเท่ากับ 500 มล. โดยการเก็บสารละลายควรเก็บในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $4^{\circ}C$ . (ควรเตรียมสารละลายใหม่ทุกเดือน)

### - ขั้นตอนการวิเคราะห์

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

ขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มล. ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลายซัลฟานิลาไมด์ปริมาตร 0.1 มล. เขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาประมาณ 2 นาที แต่ไม่ควรเกิน 10 นาที จากนั้นเติมสารละลายเอ็นเอ็นอีดีปริมาตร 0.1 มล. เขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 30 นาที แต่ไม่ควรเกิน 2 ชม. (ทั้งนี้สามารถปรับเพิ่มลดปริมาตรน้ำตัวอย่างและสารละลายที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ได้โดยคงอัตราส่วนให้มีค่าเท่าเดิม) สำหรับการวิเคราะห์แบบลดค่าสามารถทำได้โดยใช้น้ำที่ปราศจากไอออนที่ผ่านการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่างและใช้กระบวนการวิเคราะห์เช่นเดิม จากนั้นนำตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 543 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไนไตรต์มาตรฐาน (Standard nitrite solution) ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 มก.ไนไตรต์-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งเตรียมจาก

สารละลายสต็อกไนไตรต์ (Stock nitrite solution) ความเข้มข้น 100 มก.ไนไตรต์-ไนโตรเจน/ล. ดังกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ไนไตรต์ในภาพที่ ก-2



ภาพที่ ก-2 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณไนไตรต์ไนโตรเจน

### ก.3 วิธีวิเคราะห์ปริมาณไนเตรต

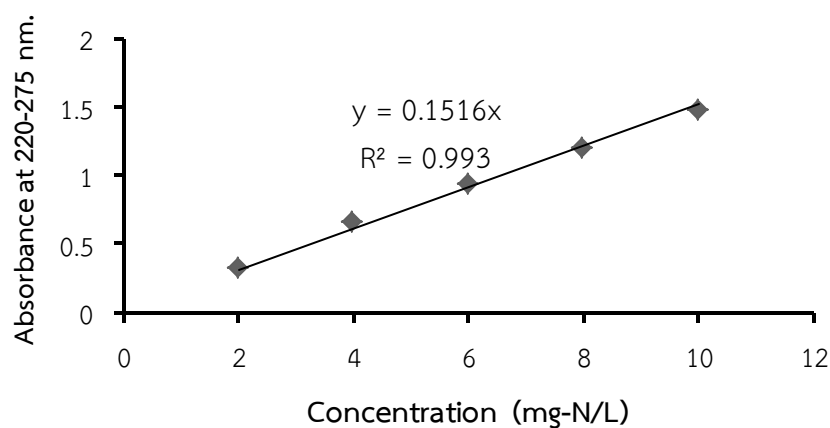
การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไนเตรตไนโตรเจนในน้ำัดแปลงมาจากวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Standard Method (2005) โดยมีกระบวนการวิเคราะห์ดังนี้

#### - กระบวนการวิเคราะห์

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

กระบวนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการเปิดน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มล. ใส่ในหลอดทดลองโดยไม่มีการเติมสารเคมีลงไป สำหรับการวิเคราะห์แบบคลอรีนสามารถทำได้โดยใช้น้ำที่ปราศจากไอออน ที่ไม่มีการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 220 และ 275 นาโนเมตร นำผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นทั้งสองมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณไนเตรตไนโตรเจนในน้ำโดยค่าที่คำนวณได้จะต้องทำการหักลบกับปริมาณไนไตรต์ที่วิเคราะห์ได้จากตัวอย่างเดียวกันเนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ไนเตรตตาม Standard Method (2005) จะมีปริมาณไนไตรต์รวมอยู่ด้วย 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. ดังกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ไนเตรตในภาพที่ ก-3



ภาพที่ ก-3 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรตไนโตรเจน

#### ก.4 วิธีวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำดัดแปลงมาจากวิธีของ Grossholf และคณะ (1999) โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารเคมีและการวิเคราะห์ดังนี้

##### - การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายออกซิไดซ์ (Oxidize solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (Potassium persulfate;  $K_2O_8S_2$ ) ปริมาณ 5 ก. โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 0.75 ก. และกรดบอริก (Boric acid;  $H_3BO_3$ ) ปริมาณ 6 ก. ลงในน้ำที่ปราศจากไอออน และปรับปริมาตรสารละลายออกซิไดซ์ให้มีปริมาตรเท่ากับ 250 มล.
2. สารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ (Borate buffer solution) สามารถเตรียมได้โดยการละลายกรดบอริกปริมาณ 15.45 ก. และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 ก. ลงในน้ำที่ปราศจากไอออน และปรับปริมาตรสารละลายออกซิไดซ์ให้มีปริมาตรเท่ากับ 250 มล.

### - ขั้นตอนการวิเคราะห์

สำหรับการเก็บน้ำตัวอย่างควรเก็บใส่ขวดพลาสติกโดยแบ่งเป็นน้ำตัวอย่างที่ผ่านและไม่ผ่านการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C อย่างละ 30 มล. จากนั้นควรทำการวิเคราะห์ทันที หากไม่สามารถทำได้ควรเก็บน้ำตัวอย่างแช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $-15^{\circ}\text{C}$ .

ขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการปิเปตน้ำตัวอย่างที่ผ่านและไม่ผ่านการกรองปริมาตร 5 มล. ใส่ในหลอดทดลอง โดยน้ำตัวอย่างที่ผ่านและไม่ผ่านการกรองเป็นตัวแทนของปริมาณไนโตรเจน ละลายน้ำและปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดตามลำดับ เติมสารละลายออกซิไดซ์ปริมาตร 2.5 มล. เขย่าให้เข้ากัน ใช้สำลีอุดปากหลอดและนำตัวอย่างไปผ่านกระบวนการย่อย ด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ที่อุณหภูมิ  $121^{\circ}\text{C}$  ความดัน 15 ปอนด์/ตร.นิ้ว เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเติมสารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ปริมาตร 0.5 มล. (ซึ่งนี้สามารถปรับเพิ่มลดปริมาตรน้ำตัวอย่าง และสารละลายที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ได้โดยคงอัตราส่วนให้มีค่าเท่าเดิม) เขย่าให้เข้ากันและนำตัวอย่างไปผ่านการกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) เป็นเวลา 15 นาที สำหรับการวิเคราะห์แบบลงค์สามารถทำได้โดยใช้น้ำปราศจากไอออน ที่มีการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่างและใช้กระบวนการวิเคราะห์เช่นเดิม นำตัวอย่างส่วนที่เป็นน้ำใส่ด้านบนไปวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนตามวิธีที่ระบุในภาคผนวก ก.4 เปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไนเตรตมาตรฐานที่ความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 และ 10 มก.ไนเตรต-ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ดังกราฟมาตรฐาน สำหรับการวิเคราะห์ไนเตรตในภาพที่ ก-3

### ก.5 วิธีวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำอาศัยวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Standard Method (2005) โดยขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการอบกระดาษกรอง Whatman GF/C ขนาด 47 มม. ที่อุณหภูมิ  $103 - 105^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชม. และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง เพื่อเก็บข้อมูลน้ำหนักแห้งของกระดาษกรอง จากนั้นกรองน้ำตัวอย่างด้วยปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ทำการอบและชั่งน้ำหนักกระดาษกรองที่ผ่านการกรองน้ำตัวอย่างเช่นเดิมเพื่อนำผลต่างของน้ำหนักกระดาษกรองที่เพิ่มขึ้นมาคำนวณหาปริมาณของตะกอนแขวนลอยทั้งหมดดังสมการที่ ก-1

ปริมาณความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยทั้งหมด (มก.-ของแข็งแขวนลอย/ล.)

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

## ก.6 วิธีวิเคราะห์ซีโอติ

การวิเคราะห์ซีโอติในน้ำอาศัยวิธีมาตรฐานที่อ้างอิงจาก Standard Method (2005) โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารเคมีและการวิเคราะห์ดังนี้

### - การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต (Standard Potassium Dichromate Solution) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล สามารถเตรียมได้โดยการละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตไดโครเมต (Potassium Dichromate;  $K_2Cr_2O_7$ ) ปริมาณ 4.913 ก. ลงในน้ำที่ปราศจากไอออนปริมาตร 500 มล. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Sulfuric Acid;  $H_2SO_4$ ) ปริมาตร 167 มล. และเมอร์คิวรีซัลเฟต (Mercury (II) Sulphate;  $HgSO_4$ ) ปริมาตร 33.3 ก. คนให้ละลายและตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วทำการปรับปริมาตรสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ล.
2. กรดซัลฟิวริกและซิลเวอร์ซัลเฟต (Conc. Sulfuric Acid with Silver Sulfate) สามารถเตรียมได้โดยการละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver sulfate;  $Ag_2SO_4$ ) ปริมาตร 22 ก. ลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตร 2.5 ล. ตั้งทิ้งไว้เพื่อให้ซิลเวอร์ซัลเฟตละลายประมาณ 1-2 วัน
3. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulfate; FAS) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล สามารถเตรียมได้โดยการละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต (Ferrous Ammonium Hexahydrate;  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ) ปริมาตร 39 ก. ลงในน้ำที่ปราศจากไอออน ปริมาตร 500 มล. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตร 20 มล. คนให้ละลายและตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วทำการปรับปริมาตรสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 ล.
4. สารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ (Feroin Indicator) สามารถเตรียมได้โดยการละลาย 1,10-ฟีแนนทาลีนโมโนไฮเดรต (1,10-Phenanthroline monohydrate;  $C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$ ) ปริมาตร 1.485 ก. และ เฟอร์รัสซัลเฟต (Ferrous Sulfate;  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) ปริมาตร 0.695 ก. ลงในน้ำที่ปราศจากไอออน และปรับปริมาตรสารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ให้มีปริมาตรเท่ากับ 100 มล.

- *ขั้นตอนการวิเคราะห์*

สำหรับการเก็บน้ำตัวอย่างควรเก็บใส่ขวดพลาสติกปริมาตร 30 มล. จากนั้นควรทำการวิเคราะห์ทันที หากไม่สามารถทำได้ควรเก็บน้ำตัวอย่างแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 °ซ.

ขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 มล. ใส่ในหลอดย่อยสลาย (Digestion Tubes) ขนาด 20 x 150 มม. เติมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ปริมาตร 3 มล. และกรดซัลฟิวริกและซิลเวอร์ซัลเฟตปริมาตร 7 มล. ตามลำดับ ปิดฝาหลอดด้วยจุกเกลียว เขย่าให้เข้ากันและนำตัวอย่างไปเข้าเครื่องอบอุณหภูมิสูง (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 150 °ซ. เป็นเวลา 2 ชม. จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วเติมสารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ปริมาตร 2-3 หยด ทำการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟต (FAS) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล โดยจุดยุติจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง สำหรับการวิเคราะห์แบบคล่องสามารถทำได้โดยใช้น้ำที่ปราศจากไอออนที่มีการเติมสารละลายเช่นเดียวกับน้ำตัวอย่างและใช้กระบวนการไทเทรตเช่นเดิม โดยข้อมูลปริมาตรสารละลาย FAS ที่ใช้ในการไทเทรตนำมาคำนวณหาปริมาณซีโอดีในน้ำดังสมการที่ ก-2

$$\text{ซีโอดี (มก./ล.)} = \frac{(A - B) \times N \times 8,000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มล.)}} \quad (\text{ก-2})$$

โดย A = ปริมาตรสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตแบบคล่อง (มก.)

B = ปริมาตรสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตน้ำตัวอย่าง (มก.)

N = นอร์มัลลิตีของสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟต (Normality; N)

เนื่องจาก FAS มีความเข้มข้นลดลงจึงจำเป็นต้องหาความเข้มข้นในหน่วยนอร์มัลลิตีของสารละลายที่แน่นอนก่อนการใช้งานทุกครั้งซึ่งสามารถทำได้โดยตวงน้ำกลั่นปริมาตร 50 มล. ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล. ปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ปริมาตร 5 มล. และกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตร 15 มล. ตามลำดับ เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วใช้กระบวนการไทเทรตเช่นเดิม ข้อมูลปริมาตรสารละลาย FAS ที่ใช้ในการไทเทรตนำมาคำนวณหาความเข้มข้นของ FAS ในหน่วยนอร์มัลลิตี ดังสมการที่ ก-3

$$\text{ความเข้มข้นของ FAS (N)} = \frac{\text{ปริมาตร K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \text{ (มล.)} \times 0.1}{\text{ปริมาตร FAS (มล.)}} \quad (\text{ก-3})$$



## ภาคผนวก ข

ข้อมูลพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ ปริมาณการจมตัวของตะกอนในระยะเวลา 30 นาที ( $SV_{30}$ ) และค่าความขุ่น สำหรับการทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตะกอนแขวนลอยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

ตารางที่ ข-1 ปริมาณการจมตัวของตะกอนในระยะเวลา 30 นาที ( $SV_{30}$ ) เมื่อน้ำในบ่อเลี้ยงปลาไหลถูกวนผ่านเครื่องสูบน้ำ 2 ขนาด ณ เวลาต่างๆ

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	นาที	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง 1		ชุดทดลอง 2	
		(มล./ล.)		(มล./ล.)		(มล./ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
22/01/2559 10:30 น.	0	6	0	6.1	0	6	0
22/01/2559 10:40 น.	10	6	0	6.1	0	6	0
22/01/2559 11:00 น.	20	6	0	6.1	0	6	0
22/01/2559 11:30 น.	30	6	0	6	0	5.8	0
22/01/2559 12:30 น.	60	6	0	5.8	0	5	0
22/01/2559 14:00 น.	90	6	0	5.2	0	4.9	0
22/01/2559 16:00 น.	120	6	0	4.8	0	5.1	0
22/01/2559 19:00 น.	180	6	0	5	0	5	0
23/01/2559 19:00 น.	1440	6	0	4.8	0	5	0

ตารางที่ ข-2 ค่าความขุ่นของน้ำใส่ส่วนบนของกรวยอิมฮอฟเมื่อน้ำในบ่อเลี้ยงปลาชนิดกวนผ่าน  
เครื่องสูบน้ำ 2 ขนาด ณ เวลาต่างๆ

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	นาที่	ชุดควบคุม		ชุดทดลอง 1		ชุดทดลอง 2	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
22/01/2559 10:30 น.	0	0.017	0	0.017	0	0.022	0
22/01/2559 10:40 น.	10	0.017	0	0.038	0	0.042	0
22/01/2559 11:00 น.	20	0.017	0	0.043	0	0.043	0
22/01/2559 11:30 น.	30	0.017	0	0.043	0	0.065	0
22/01/2559 12:30 น.	60	0.017	0	0.042	0	0.062	0
22/01/2559 14:00 น.	90	0.017	0	0.047	0	0.069	0
22/01/2559 16:00 น.	120	0.017	0	0.052	0	0.070	0
22/01/2559 19:00 น.	180	0.017	0	0.052	0	0.071	0
23/01/2559 19:00 น.	1440	0.017	0	0.031	0	0.050	0

## ภาคผนวก ค

ข้อมูลพารามิเตอร์ค่าฟลักซ์การกรอง ปริมาณตะกอนแขวนลอย และความเร็วเกรเดียนท์ สำหรับการทดลองช่วงที่ 2 การออกแบบและศึกษารูปแบบการใช้งานของหน่วยแยกตะกอน

ตารางที่ ค-1 ค่าฟลักซ์การกรองที่เปลี่ยนไปตามเวลาของวัสดุกรองสแตนเลสที่ขนาดรูกรอง 100 ไมโครเมตร (ในรูปแบบการกรองแบบตั้งฉาก)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วินาที	ปริมาตร (ล.)		ฟลักซ์ (ล./ตร.ม./วินาที)
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย
14/01/2559 10:00 น.	5	0.78	0.03	6.10
14/01/2559 10:00 น.	10	1.17	0.06	6.10
14/01/2559 10:00 น.	15	1.57	0.06	6.10
14/01/2559 10:00 น.	20	1.97	0.12	6.00
14/01/2559 10:00 น.	30	2.87	0.06	5.80
14/01/2559 10:00 น.	40	3.73	0.06	5.20
14/01/2559 10:00 น.	45	4.03	0.06	4.80
14/01/2559 10:00 น.	50	4.13	0.06	5.00
14/01/2559 10:00 น.	55	4.25	0.05	4.80

ตารางที่ ค-2 ค่าฟลักซ์การกรองที่เปลี่ยนไปตามเวลาของวัสดุกรองสแตนเลสที่ขนาดรูกรอง 130 ไมโครเมตร (ในรูปแบบการกรองแบบตั้งฉาก)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วินาที	ปริมาตร (ล.)		ฟลักซ์ (ล./ตร.ม./วินาที)
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย
14/01/2559 10:00 น.	5	1.00	0.00	30.30
14/01/2559 10:00 น.	10	1.47	0.06	14.10
14/01/2559 10:00 น.	15	1.95	0.05	14.60
14/01/2559 10:00 น.	20	2.40	0.10	13.60
14/01/2559 10:00 น.	30	2.97	0.06	8.60
14/01/2559 10:00 น.	40	3.87	0.06	13.60
14/01/2559 10:00 น.	50	4.37	0.06	7.60
14/01/2559 10:00 น.	65	5.23	0.06	8.80
14/01/2559 10:00 น.	70	5.30	0.10	2.00

ตารางที่ ค-3 ค่าฟลักซ์การกรองที่เปลี่ยนไปตามเวลาของวัสดุกรองสแตนเลสที่ขนาดรูกรอง 160 ไมโครเมตร (ในรูปแบบการกรองแบบตั้งฉาก)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วินาที	ปริมาตร (ล.)		ฟลักซ์ (ล./ตร.ม./วินาที)
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย
14/01/2559 10:00 น.	5	0.98	0.03	29.80
14/01/2559 10:00 น.	10	1.37	0.06	11.62
14/01/2559 10:00 น.	15	1.77	0.06	12.12
14/01/2559 10:00 น.	20	2.13	0.06	11.11
14/01/2559 10:00 น.	30	2.97	0.06	12.63
14/01/2559 10:00 น.	40	3.77	0.06	12.12
14/01/2559 10:00 น.	50	4.23	0.06	7.07
14/01/2559 10:00 น.	55	4.53	0.06	9.09
14/01/2559 10:00 น.	65	4.67	0.06	2.02
14/01/2559 10:00 น.	72	4.75	0.05	1.80

ตารางที่ ค-4 ค่าฟลักซ์การกรองที่เปลี่ยนไปตามเวลาของวัสดุกรองสแตนเลสที่ขนาดรูกรอง 100 ไมโครเมตร (ในรูปแบบการกรองแบบไหลขวาง)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วินาที	ปริมาตร (ล.)		ฟลักซ์ (ล./ตร.ม./วินาที)
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย
15/01/2559 10:00 น.	10	0.60	0.00	9.09
15/01/2559 10:00 น.	20	1.10	0.00	7.58
15/01/2559 10:00 น.	30	1.83	0.06	11.11
15/01/2559 10:00 น.	60	2.47	0.06	3.20
15/01/2559 10:00 น.	90	3.07	0.06	3.03
15/01/2559 10:00 น.	120	3.57	0.06	2.53
15/01/2559 10:00 น.	150	3.77	0.06	1.01
15/01/2559 10:00 น.	180	3.80	0.00	0.17
15/01/2559 10:00 น.	190	3.80	0.00	0.00

ตารางที่ ค-5 ค่าฟลักซ์การกรองที่เปลี่ยนไปตามเวลาของวัสดุกรองสแตนเลสที่ขนาดรูกรอง 130 ไมโครเมตร (ในรูปแบบการกรองแบบไหลขวาง)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วินาที	ปริมาตร (ล.)		ฟลักซ์ (ล./ตร.ม./วินาที)
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย
17/01/2559 10:30 น.	10	12.12	12.12	12.12
17/01/2559 10:30 น.	30	4.29	4.29	4.29
17/01/2559 10:30 น.	60	3.37	3.37	3.37
17/01/2559 10:30 น.	100	3.41	3.41	3.41
17/01/2559 10:30 น.	140	2.78	2.78	2.78
17/01/2559 10:30 น.	160	4.04	4.04	4.04
17/01/2559 10:30 น.	200	3.28	3.28	3.28
17/01/2559 10:30 น.	250	0.30	0.30	0.30
17/01/2559 10:30 น.	300	0.10	0.10	0.10

ตารางที่ ค-6 ค่าฟลักซ์การกรองที่เปลี่ยนไปตามเวลาของวัสดุกรองสแตนเลสที่ขนาดรูกรอง 160 ไมโครเมตร (ในรูปแบบการกรองแบบไหลขวาง)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วินาที	ปริมาตร (ล.)		ฟลักซ์ (ล./ตร.ม./วินาที)
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย
17/01/2559 10:00 น.	10	0.80	0.00	12.12
17/01/2559 10:00 น.	20	1.10	0.00	4.55
17/01/2559 10:00 น.	40	1.90	0.10	6.06
17/01/2559 10:00 น.	60	2.67	0.12	5.81
17/01/2559 10:00 น.	90	3.03	0.06	1.85
17/01/2559 10:00 น.	120	3.77	0.15	3.70
17/01/2559 10:00 น.	150	5.10	0.10	6.73
17/01/2559 10:00 น.	200	6.13	0.06	3.13
17/01/2559 10:00 น.	250	7.10	0.10	2.93
17/01/2559 10:00 น.	300	7.73	0.06	1.92
17/01/2559 10:00 น.	350	7.80	0.10	0.20

ตารางที่ ค-7 ค่าฟลักซ์การกรองที่เปลี่ยนไปตามเวลาของวัสดุกรองสแตนเลสที่ขนาดรูกรอง 100 ไมโครเมตร (ในรูปแบบการกรองแบบไหลขวางร่วมกับการเติมอากาศ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วินาที	ปริมาตร (ล.)		ฟลักซ์ (ล./ตร.ม./วินาที)
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย
18/01/2559 10:00 น.	10	0.60	0.00	9.09
18/01/2559 10:00 น.	20	1.20	0.10	9.09
18/01/2559 10:00 น.	30	1.97	0.06	11.62
18/01/2559 10:00 น.	60	3.83	0.06	9.43
18/01/2559 10:00 น.	90	5.83	0.12	10.10
18/01/2559 10:00 น.	120	7.63	0.21	9.09
18/01/2559 10:00 น.	150	9.13	0.12	7.58
18/01/2559 10:00 น.	180	10.17	0.15	5.22
18/01/2559 10:00 น.	190	10.27	0.15	1.52
18/01/2559 10:00 น.	200	10.30	0.10	0.51

ตารางที่ ค-8 ค่าฟลักซ์การกรองที่เปลี่ยนไปตามเวลาของวัสดุกรองสแตนเลสที่ขนาดรูกรอง 130 ไมโครเมตร (ในรูปแบบการกรองแบบไหลขวางร่วมกับการเติมอากาศ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วินาที	ปริมาตร (ล.)		ฟลักซ์ (ล./ตร.ม./วินาที)
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย
20/01/2559 10:00 น.	10	0.60	0.00	9.09
20/01/2559 10:00 น.	30	1.97	0.06	10.35
20/01/2559 10:00 น.	60	3.73	0.06	8.92
20/01/2559 10:00 น.	100	5.83	0.06	7.95
20/01/2559 10:00 น.	140	8.23	0.06	9.09
20/01/2559 10:00 น.	160	9.10	0.10	6.57
20/01/2559 10:00 น.	200	11.40	0.20	8.71
20/01/2559 10:00 น.	250	14.67	0.21	9.90
20/01/2559 10:00 น.	300	16.00	0.00	4.04
20/01/2559 10:00 น.	310	16.30	0.17	4.55
20/01/2559 10:00 น.	320	16.30	0.10	0.00

ตารางที่ ค-9 ค่าฟลักซ์การกรองที่เปลี่ยนไปตามเวลาของวัสดุกรองสแตนเลสที่ขนาดรูกรอง 160 ไมโครเมตร (ในรูปแบบการกรองแบบไหลขวางร่วมกับการเติมอากาศ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วินาที	ปริมาตร (ล.)		ฟลักซ์ (ล./ตร.ม./วินาที)
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย
22/01/2559 10:30 น.	10	0.80	0.00	12.12
22/01/2559 10:30 น.	20	1.10	0.00	4.55
22/01/2559 10:30 น.	40	2.47	0.15	10.35
22/01/2559 10:30 น.	60	3.77	0.15	9.85
22/01/2559 10:30 น.	90	5.77	0.12	10.10
22/01/2559 10:30 น.	120	7.43	0.06	8.42
22/01/2559 10:30 น.	150	9.00	0.00	7.91
22/01/2559 10:30 น.	200	11.23	0.15	6.77
22/01/2559 10:30 น.	250	14.57	0.12	10.10
22/01/2559 10:30 น.	300	17.13	0.06	7.78
22/01/2559 10:30 น.	350	19.90	0.10	8.38
22/01/2559 10:30 น.	360	20.17	0.06	4.04
22/01/2559 10:30 น.	370	20.23	0.06	1.01
22/01/2559 10:30 น.	380	20.27	0.06	0.51

ตารางที่ ค-10 ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่เปลี่ยนไปตามระยะเวลาของการเดินระบบการกรองที่ขนาดรูกรอง 130 ไมโครเมตร (ในรูปแบบการกรองแบบไหลขวางร่วมกับการเติมอากาศ) ที่อัตราการไหลของอากาศ 1 ล./นาที

วัน/เดือน/ปี	นาที	ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.) ก่อนกรอง		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.) ก่อนกรอง	
		SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย
18/05/2559	0	2.89	99.17	1.44	65.83
18/05/2559	15	4.33	90.00	2.89	60.83
18/05/2559	30	5.00	92.50	6.61	62.50
18/05/2559	45	3.82	90.83	10.41	54.17
18/05/2559	60	1.44	84.17	2.89	63.33
18/05/2559	75	2.50	85.00	2.89	58.33
18/05/2559	90	3.82	83.33	1.44	59.17

ตารางที่ ค-11 ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่เปลี่ยนไปตามระยะเวลาของการเดินระบบการกรองที่ 130 ไมโครเมตร (ในรูปแบบการกรองแบบไหลขวางร่วมกับการเติมอากาศ) ที่อัตราการไหลของอากาศ 2 ล./นาที

วัน/เดือน/ปี	นาที	ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.) ก่อนกรอง		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.) ก่อนกรอง	
		SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย
19/05/2559	0	5.20	119.17	5.00	77.50
19/05/2559	15	7.50	120.00	4.33	72.50
19/05/2559	30	3.82	115.83	4.33	72.50
19/05/2559	45	3.82	114.17	2.89	71.67
19/05/2559	60	2.50	112.50	2.50	72.50
19/05/2559	75	2.89	105.83	4.33	70.00
19/05/2559	90	2.50	102.50	2.50	67.50
19/05/2559	105	7.50	105.00	2.50	70.00
19/05/2559	120	8.04	99.17	6.61	70.00
19/05/2559	135	2.89	94.17	1.44	70.83
19/05/2559	150	2.50	82.50	2.89	69.17



ตารางที่ ค-12 ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่เปลี่ยนไปตามระยะเวลาของการเดินระบบการกรองที่ 130 ไมโครเมตร (ในรูปแบบการกรองแบบไหลขวางร่วมกับการเติมอากาศ) ที่อัตราการไหลของอากาศ 3 ล./นาที

วัน/เดือน/ปี	นาที	ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.) ก่อนกรอง		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.) ก่อนกรอง	
		SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย
19/05/2559	0	1.44	111.67	3.82	84.17
19/05/2559	15	5.00	112.50	1.44	83.33
19/05/2559	30	3.82	108.33	2.50	72.50
19/05/2559	45	2.89	95.83	4.33	75.00
19/05/2559	60	1.44	103.33	3.82	71.67
19/05/2559	75	2.50	97.50	2.50	70.00
19/05/2559	90	2.50	95.00	1.44	65.83
19/05/2559	105	7.50	97.50	2.50	70.00
19/05/2559	120	7.22	90.83	7.50	67.50
19/05/2559	135	2.89	86.67	1.44	70.83
19/05/2559	150	3.82	78.33	5.77	69.17

ตารางที่ ค-13 ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่เปลี่ยนไปตามระยะเวลาของการเดินระบบการกรองที่ 130 ไมโครเมตร (ในรูปแบบการกรองแบบไหลขวางร่วมกับการเติมอากาศ) ที่อัตราการไหลของอากาศ 5 ล./นาที

วัน/เดือน/ปี	นาที	ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.) ก่อนกรอง		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.) ก่อนกรอง	
		SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย
19/05/2559	0	8.78	150.83	5.20	110.83
19/05/2559	15	8.78	144.17	5.20	109.17
19/05/2559	30	5.20	135.83	5.20	113.33
19/05/2559	45	6.29	141.67	2.50	112.50
19/05/2559	60	6.61	130.00	5.20	110.83
19/05/2559	75	11.46	117.50	1.44	110.83
19/05/2559	90	3.82	124.17	5.20	116.67
19/05/2559	105	7.50	125.00	5.00	112.50
19/05/2559	120	5.77	119.17	2.50	110.00
19/05/2559	135	5.00	120.00	6.29	106.67
19/05/2559	150	5.00	110.00	2.50	102.50

ตารางที่ ค-14 ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่เปลี่ยนไปตามระยะเวลาของการเดินระบบการกรองที่ 130 ไมโครเมตร (ในรูปแบบการกรองแบบไหลขวางร่วมกับการเติมอากาศ) ที่อัตราการไหลของอากาศ 2 ล./นาที่ และแปรค่าระดับของหัวจ่ายอากาศอยู่ที่ 1 ซม. (จากขอบด้านล่างของวัสดุกรอง)

วัน/เดือน/ปี	นาที่	ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.) ก่อนกรอง		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.) ก่อนกรอง	
		SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย
19/05/2559	0	5.20	119.17	5.00	77.50
19/05/2559	15	7.50	120.00	4.33	72.50
19/05/2559	30	3.82	115.83	4.33	72.50
19/05/2559	45	3.82	114.17	2.89	71.67
19/05/2559	60	2.50	112.50	2.50	72.50
19/05/2559	75	2.89	105.83	4.33	70.00
19/05/2559	90	2.50	102.50	2.50	67.50
19/05/2559	105	7.50	105.00	2.50	70.00
19/05/2559	120	8.04	99.17	6.61	70.00
19/05/2559	135	2.89	94.17	1.44	70.83
19/05/2559	150	2.50	82.50	2.89	69.17

ตารางที่ ค-15 ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่เปลี่ยนไปตามระยะเวลาของการเดินระบบการกรองที่ 130 ไมโครเมตร (ในรูปแบบการกรองแบบไหลขวางร่วมกับการเติมอากาศ) ที่อัตราการไหลของอากาศ 2 ล./นาที่ และแปรค่าระดับของหัวจ่ายอากาศอยู่ที่ 15 ซม. (จากขอบด้านล่างของวัสดุกรอง)

วัน/เดือน/ปี	นาที่	ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.) ก่อนกรอง		ตะกอนแขวนลอย (มก./ล.) ก่อนกรอง	
		SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย
19/05/2559	0	5.77	116.67	78.33	2.89
19/05/2559	15	5.00	122.50	72.50	2.50
19/05/2559	30	7.50	107.50	70.83	1.44
19/05/2559	45	2.50	107.50	72.50	2.50

ตารางที่ ค-15 ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาของน้ำในถังเลี้ยงสัตว์น้ำ  
ระบบปิดในโรงเรือนที่ความหนาแน่นเริ่มต้น 2 กก./ลบ.ม. เป็นระยะเวลา 30 วัน

วัน/เดือน/ปี	เวลา	ปริมาณสารแขวนลอย (มก./ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD
10/09/2559	11:00	18.33	1.44
11/09/2559	11:00	10.00	2.50
12/09/2559	11:00	22.50	4.33
13/09/2559	11:00	42.50	0.00
14/09/2559	11:00	49.17	3.82
15/09/2559	11:00	79.17	8.78
16/09/2559	11:00	78.33	2.89
17/09/2559	11:00	105.83	6.29
17/09/2559	13:00	74.17	1.44
18/09/2559	11:00	88.33	11.81
19/09/2559	11:00	107.50	4.33
20/09/2559	11:00	100.83	3.82
20/09/2559	13:00	78.33	3.82
21/09/2559	11:00	88.33	1.44
22/09/2559	11:00	103.33	6.29
23/09/2559	11:00	105.00	6.61
24/09/2559	11:00	125.83	2.89
25/09/2559	11:00	121.67	3.82
26/09/2559	11:00	141.67	9.46
26/09/2559	13:00	110.00	5.00
27/09/2559	11:00	141.67	7.22
28/09/2559	11:00	145.83	8.04
29/09/2559	11:00	150.83	5.20

ตารางที่ ค-15 ปริมาณตะกอนแขวนลอยที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาของน้ำในถังเลี้ยงสัตว์น้ำ

ระบบปิดในโรงเรือนที่ความหนาแน่นเริ่มต้น 2 กก./ลบ.ม.เป็นระยะเวลา 30 วัน (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี เวลา	ปริมาณสารแขวนลอย (มก./ล.)	
	ค่าเฉลี่ย	SD
30/09/2559 11:00	141.67	6.29
31/09/2559 11:00	145.83	1.44
01/10/2559 11:00	170.00	2.50
02/10/2559 11:00	174.17	3.82
03/10/2559 11:00	200.00	5.00
03/10/2559 13:00	154.17	5.20
04/10/2559 11:00	180.83	6.29
05/10/2559 11:00	169.17	1.44
06/10/2559 11:00	177.50	13.92
07/10/2559 11:00	197.50	7.50
08/10/2559 11:00	226.67	2.89
09/10/2559 11:00	235.83	30.24

ตารางที่ ค-16 ความเร็วเกรเดียนท์ ณ ค่าอัตราการไหลของอากาศต่างๆ

วัน/เดือน/ปี	อัตราการไหลของอากาศ (ล./นาที)	Velocity gradient (1/s)	
		SD	ค่าเฉลี่ย
25/11/2559	5	5	2.886
25/11/2559	3	3	2.235
25/11/2559	2	2	1.825
25/11/2559	1	1	1.291

## ภาคผนวก ง

ข้อมูลพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ ปริมาณตะกอนแขวนลอย และข้อมูลการเจริญเติบโตของปลาไนล สำหรับการทดลองช่วงที่ 3 การประยุกต์ใช้หน่วยแยกตะกอนกับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดภายในโรงเรือน

ตารางที่ ง-1 การติดตามตรวจวัดพารามิเตอร์คุณภาพน้ำแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตจากบ่อเลี้ยง สัตว์น้ำ (ชุดทดลอง)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
01/12/2559 11:00 น.	0	0.020	0.026	0.021	0.005	7.359	0.681
02/12/2559 11:00 น.	1	0.081	0.006	0.129	0.005	6.301	0.884
03/12/2559 11:00 น.	2	0.099	0.003	0.039	0.001	2.154	0.026
04/12/2559 11:00 น.	3	0.396	0.027	0.159	0.012	2.388	0.010
05/12/2559 11:00 น.	4	0.749	0.012	0.543	0.012	2.866	0.026
06/12/2559 11:00 น.	5	0.129	0.004	0.619	0.040	3.041	0.063
07/12/2559 11:00 น.	6	0.058	0.019	0.900	0.011	4.503	0.031
08/12/2559 11:00 น.	7	0.021	0.013	0.171	0.002	5.986	0.048
09/12/2559 11:00 น.	8	0.000	0.000	0.178	0.006	5.877	0.027
10/12/2559 11:00 น.	9	0.014	0.000	0.131	0.005	6.674	0.047
11/12/2559 11:00 น.	10	0.000	0.000	0.053	0.008	7.368	0.032
12/12/2559 11:00 น.	11	0.000	0.000	0.029	0.002	8.014	0.181
13/12/2559 11:00 น.	12	0.000	0.000	0.004	0.004	8.388	0.086
14/12/2559 11:00 น.	13	0.000	0.000	0.012	0.006	8.702	0.041
15/12/2559 11:00 น.	14	0.000	0.000	0.017	0.002	9.465	0.051
15/12/2559 11:00 น.	15	0.001	0.002	0.044	0.004	10.011	0.017
17/12/2559 11:00 น.	16	0.023	0.000	0.062	0.008	14.785	0.248
18/12/2559 11:00 น.	17	0.088	0.000	0.204	0.007	12.811	0.317
19/12/2559 11:00 น.	18	0.042	0.000	0.148	0.004	25.220	3.587

ตารางที่ ง-1 การติดตามตรวจวัดพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรดจากบ่อ  
เลี้ยงสัตว์น้ำ (ชุดทดลอง) (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย		ไนไตรต์		ไนเตรต	
		(มก.ไนโตรเจน/ล.)		(มก.ไนโตรเจน/ล.)		(มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
20/12/2559 11:00 น.	19	0.156	0.000	0.123	0.006	20.753	2.392
21/12/2559 11:00 น.	20	0.000	0.000	0.136	0.001	20.876	2.427
22/12/2559 11:00 น.	21	0.000	0.000	0.160	0.027	21.869	1.878
23/12/2559 11:00 น.	22	0.044	0.000	0.098	0.008	20.451	0.204
24/12/2559 11:00 น.	23	0.076	0.000	0.098	0.010	24.331	5.682
25/12/2559 11:00 น.	24	0.140	0.000	0.167	0.011	26.051	0.699
26/12/2559 11:00 น.	25	0.000	0.000	0.218	0.004	25.927	0.629
27/12/2559 11:00 น.	26	0.087	0.000	0.612	0.015	25.287	0.407
28/12/2559 11:00 น.	27	0.027	0.000	0.217	0.005	30.856	0.407
29/12/2559 11:00 น.	28	0.034	0.000	0.181	0.003	34.687	0.475
30/12/2559 11:00 น.	29	0.022	0.000	0.190	0.006	35.374	1.494
31/12/2559 11:00 น.	30	0.067	0.000	0.025	0.001	10.616	1.715
01/01/2560 11:00 น.	31	0.015	0.000	0.037	0.005	5.693	0.083
02/01/2560 11:00 น.	32	0.010	0.000	0.069	0.006	7.225	0.057
03/01/2560 11:00 น.	33	0.027	0.000	0.059	0.004	7.990	0.056
04/01/2560 11:00 น.	34	0.051	0.012	0.068	0.003	4.332	0.076
05/01/2560 11:00 น.	35	0.063	0.012	0.062	0.006	8.368	0.242
06/01/2560 11:00 น.	36	0.058	0.009	0.064	0.013	9.014	0.104
07/01/2560 11:00 น.	37	0.066	0.006	0.056	0.002	9.322	0.140
08/01/2560 11:00 น.	38	0.056	0.012	0.065	0.002	9.942	0.081
09/01/2560 11:00 น.	39	0.050	0.003	0.070	0.001	10.478	0.281
10/01/2560 11:00 น.	40	0.093	0.012	0.044	0.023	11.719	0.211

ตารางที่ ง-1 การติดตามตรวจวัดพารามิเตอร์คุณภาพน้ำแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตจากบ่อเลี้ยง  
สัตว์น้ำ (ชุดทดลอง) (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
11/01/2560 11:00 น.	41	0.044	0.005	0.014	0.002	12.544	0.122
12/01/2560 11:00 น.	42	0.047	0.012	0.101	0.001	12.717	0.273
13/01/2560 11:00 น.	43	0.044	0.006	0.096	0.002	15.096	0.329
14/01/2560 11:00 น.	44	0.064	0.004	0.116	0.020	16.539	0.187
15/01/2560 11:00 น.	45	0.056	0.017	0.110	0.004	15.419	0.229
16/01/2560 11:00 น.	46	0.029	0.002	0.112	0.003	17.472	0.324
17/01/2560 11:00 น.	47	0.040	0.009	0.127	0.001	18.451	0.590
18/01/2560 11:00 น.	48	0.041	0.012	0.101	0.007	18.881	0.228
19/01/2560 11:00 น.	49	0.043	0.011	0.118	0.013	17.184	0.497
20/01/2560 11:00 น.	50	0.103	0.001	0.084	0.000	22.240	0.175
21/01/2560 11:00 น.	51	0.000	0.000	0.081	0.006	23.539	0.745
22/01/2560 11:00 น.	52	0.000	0.000	0.106	0.003	24.541	0.152
23/01/2560 11:00 น.	53	0.000	0.000	0.097	0.004	26.165	0.834
24/01/2560 11:00 น.	54	0.017	0.012	0.107	0.009	20.853	0.562
25/01/2560 11:00 น.	55	0.000	0.000	0.103	0.001	27.103	0.405
26/01/2560 11:00 น.	56	0.063	0.059	0.093	0.004	28.307	0.210
27/01/2560 11:00 น.	57	0.141	0.039	0.151	0.016	27.054	0.105
28/01/2560 11:00 น.	58	0.119	0.002	0.065	0.012	29.751	0.440
29/01/2560 11:00 น.	59	0.014	0.014	0.059	0.022	31.111	0.191
30/01/2560 11:00 น.	60	0.013	0.004	0.061	0.029	31.221	0.336



ตารางที่ ง-2 การติดตามตรวจวัดพารามิเตอร์คุณภาพน้ำแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตจากบ่อเลี้ยง  
สัตว์น้ำ (ชุดควบคุม)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย		ไนไตรต์		ไนเตรต	
		(มก.ไนโตรเจน/ล.)		(มก.ไนโตรเจน/ล.)		(มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
01/12/2559 11:00 น.	0	0.069	0.053	0.008	0.001	1.440	0.043
02/12/2559 11:00 น.	1	0.186	0.007	0.029	0.002	1.807	0.012
03/12/2559 11:00 น.	2	0.186	0.003	0.148	0.004	2.174	0.029
04/12/2559 11:00 น.	3	0.243	0.007	0.230	0.012	2.879	0.015
05/12/2559 11:00 น.	4	0.204	0.012	0.573	0.036	3.596	0.055
06/12/2559 11:00 น.	5	0.009	0.004	0.557	0.014	4.404	0.043
07/12/2559 11:00 น.	6	0.005	0.005	0.935	0.018	4.703	0.041
08/12/2559 11:00 น.	7	0.018	0.014	0.277	0.009	6.062	0.026
09/12/2559 11:00 น.	8	0.000	0.000	0.164	0.002	6.905	0.056
10/12/2559 11:00 น.	9	0.000	0.000	0.131	0.003	7.574	0.071
11/12/2559 11:00 น.	10	0.000	0.000	0.116	0.008	8.299	0.066
12/12/2559 11:00 น.	11	0.000	0.000	0.016	0.001	8.993	0.009
13/12/2559 11:00 น.	12	0.000	0.000	0.022	0.002	9.205	0.050
14/12/2559 11:00 น.	13	0.000	0.000	0.031	0.007	9.361	0.106
15/12/2559 11:00 น.	14	0.000	0.000	0.026	0.004	9.830	0.051
15/12/2559 11:00 น.	15	0.000	0.000	0.071	0.013	10.219	0.032
17/12/2559 11:00 น.	16	0.047	0.000	0.095	0.008	16.773	0.061
18/12/2559 11:00 น.	17	0.004	0.000	0.084	0.003	18.384	1.918
19/12/2559 11:00 น.	18	0.006	0.000	0.111	0.010	18.262	2.666
20/12/2559 11:00 น.	19	0.039	0.000	0.173	0.007	19.814	1.887
21/12/2559 11:00 น.	20	0.000	0.000	0.237	0.005	13.459	10.107

ตารางที่ ง-2 การติดตามตรวจวัดพารามิเตอร์คุณภาพน้ำแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตจากบ่อเลี้ยง  
สัตว์น้ำ (ชุดควบคุม) (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
22/12/2559 11:00 น.	21	0.042	0.024	0.316	0.006	21.468	0.729
23/12/2559 11:00 น.	22	0.044	0.016	0.363	0.022	22.502	0.430
24/12/2559 11:00 น.	23	0.010	0.000	0.325	0.020	23.432	2.060
25/12/2559 11:00 น.	24	0.052	0.037	0.489	0.024	33.516	1.404
26/12/2559 11:00 น.	25	0.000	0.000	0.338	0.024	28.506	0.526
27/12/2559 11:00 น.	26	0.002	0.000	0.142	0.008	36.417	1.815
28/12/2559 11:00 น.	27	0.004	0.000	0.125	0.003	28.383	0.245
29/12/2559 11:00 น.	28	0.000	0.000	0.116	0.008	32.048	1.131
30/12/2559 11:00 น.	29	0.000	0.000	0.073	0.004	37.226	0.176
31/12/2559 11:00 น.	30	0.000	0.000	0.061	0.004	40.853	0.191
01/01/2560 11:00 น.	31	0.000	0.000	0.047	0.002	41.808	0.252
02/01/2560 11:00 น.	32	0.000	0.000	0.063	0.007	41.752	0.524
03/01/2560 11:00 น.	33	0.000	0.000	0.062	0.003	41.511	0.560
04/01/2560 11:00 น.	34	0.015	0.002	0.031	0.002	36.620	0.270
05/01/2560 11:00 น.	35	0.003	0.006	0.045	0.009	42.307	0.417
06/01/2560 11:00 น.	36	0.001	0.002	0.041	0.006	42.511	1.909
07/01/2560 11:00 น.	37	0.004	0.004	0.036	0.003	41.380	0.853
08/01/2560 11:00 น.	38	0.000	0.000	0.029	0.018	41.476	0.253
09/01/2560 11:00 น.	39	0.006	0.008	0.027	0.001	40.009	1.947
10/01/2560 11:00 น.	40	0.003	0.006	0.047	0.003	43.885	0.506

ตารางที่ ง-2 การติดตามตรวจวัดพารามิเตอร์คุณภาพน้ำแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตจากบ่อเลี้ยง  
สัตว์น้ำ (ชุดควบคุม) (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนไตรต์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)		ไนเตรต (มก.ไนโตรเจน/ล.)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
11/01/2560 11:00 น.	41	0.000	0.000	0.057	0.002	40.602	0.204
12/01/2560 11:00 น.	42	0.004	0.007	0.018	0.001	41.912	0.667
13/01/2560 11:00 น.	43	0.006	0.010	0.018	0.004	46.738	0.774
14/01/2560 11:00 น.	44	0.003	0.001	0.021	0.007	45.987	1.057
15/01/2560 11:00 น.	45	0.001	0.002	0.007	0.004	48.787	0.440
16/01/2560 11:00 น.	46	0.000	0.000	0.011	0.003	52.679	1.522
17/01/2560 11:00 น.	47	0.042	0.029	0.012	0.007	51.543	0.634
18/01/2560 11:00 น.	48	0.006	0.006	0.022	0.003	55.120	1.522
19/01/2560 11:00 น.	49	0.018	0.020	0.025	0.004	54.085	0.542
20/01/2560 11:00 น.	50	0.064	0.095	0.056	0.009	69.010	0.219
21/01/2560 11:00 น.	51	0.000	0.000	0.023	0.002	76.155	0.822
22/01/2560 11:00 น.	52	0.000	0.000	0.042	0.001	77.820	0.822
23/01/2560 11:00 น.	53	0.000	0.000	0.041	0.003	73.191	0.334
24/01/2560 11:00 น.	54	0.007	0.012	0.037	0.005	75.510	3.031
25/01/2560 11:00 น.	55	0.000	0.000	0.037	0.003	85.737	1.982
26/01/2560 11:00 น.	56	0.003	0.005	0.048	0.000	95.281	5.480
27/01/2560 11:00 น.	57	0.000	0.000	0.046	0.005	84.928	0.884
28/01/2560 11:00 น.	58	0.007	0.006	0.046	0.013	88.927	0.648
29/01/2560 11:00 น.	59	0.000	0.000	0.038	0.007	93.648	0.550
30/01/2560 11:00 น.	60	0.008	0.011	0.051	0.004	93.468	0.718

ตารางที่ ง-3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอยในบ่อเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลา 60 วัน  
ของการทดลอง (ในบ่อชุดทดลองและบ่อชุดควบคุม)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ปริมาณสารแขวนลอย (ชุดทดลอง)		ปริมาณสารแขวนลอย (ชุดควบคุม)	
		ค่าเฉลี่ย (มก./ล.)	SD	ค่าเฉลี่ย (มก./ล.)	SD
01/12/2559 11:00 น.	0	-	-	-	-
02/12/2559 11:00 น.	1	59.17	1.44	23.33	10.10
03/12/2559 11:00 น.	2	54.17	3.82	40.83	1.44
04/12/2559 11:00 น.	3	49.17	1.44	52.50	0.00
05/12/2559 11:00 น.	4	65.00	0.00	89.17	1.44
06/12/2559 11:00 น.	5	66.67	1.44	114.17	1.44
07/12/2559 11:00 น.	6	71.67	2.89	119.17	6.29
08/12/2559 11:00 น.	7	72.50	2.50	125.00	6.61
09/12/2559 11:00 น.	8	50.00	6.61	130.83	3.82
10/12/2559 11:00 น.	9	45.00	2.50	131.67	2.89
11/12/2559 11:00 น.	10	48.33	12.83	174.83	4.62
12/12/2559 11:00 น.	11	54.17	18.43	169.17	3.82
13/12/2559 11:00 น.	12	69.17	6.29	163.33	1.44
14/12/2559 11:00 น.	13	63.33	1.44	195.83	2.89
15/12/2559 11:00 น.	14	84.17	10.10	201.67	1.44
15/12/2559 11:00 น.	15	77.50	6.61	203.33	5.20
17/12/2559 11:00 น.	16	75.00	2.50	245.83	1.44
18/12/2559 11:00 น.	17	69.17	5.20	226.67	20.21
19/12/2559 11:00 น.	18	68.33	3.82	244.17	1.44
20/12/2559 11:00 น.	19	66.67	5.20	211.67	1.44
21/12/2559 11:00 น.	20	56.67	5.20	228.33	1.44

ตารางที่ ง-3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอยในบ่อเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลา 60 วัน  
ของการทดลอง (ในบ่อชุดทดลองและบ่อชุดควบคุม) (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ปริมาณสารแขวนลอย (ชุดทดลอง)		ปริมาณสารแขวนลอย (ชุดทดลอง)	
		ค่าเฉลี่ย (มก./ล.)	SD	ค่าเฉลี่ย (มก./ล.)	SD
22/12/2559 11:00 น.	21	60.00	6.61	256.67	2.89
23/12/2559 11:00 น.	22	73.33	3.82	212.50	0.00
24/12/2559 11:00 น.	23	49.17	8.78	243.33	1.44
25/12/2559 11:00 น.	24	58.33	5.77	235.00	10.90
26/12/2559 11:00 น.	25	65.83	2.89	255.00	5.00
27/12/2559 11:00 น.	26	58.33	3.82	285.00	2.50
28/12/2559 11:00 น.	27	56.67	7.64	305.83	1.44
29/12/2559 11:00 น.	28	61.67	3.82	326.67	1.44
30/12/2559 11:00 น.	29	29.17	2.89	338.33	1.44
31/12/2559 11:00 น.	30	30.83	1.44	411.67	6.29
01/01/2560 11:00 น.	31	40.83	5.77	396.67	1.44
02/01/2560 11:00 น.	32	40.83	1.44	401.67	1.44
03/01/2560 11:00 น.	33	42.50	10.90	450.00	8.66
04/01/2560 11:00 น.	34	55.00	6.61	460.00	4.33
05/01/2560 11:00 น.	35	42.50	10.90	467.50	7.50
06/01/2560 11:00 น.	36	45.83	3.82	440.83	5.20
07/01/2560 11:00 น.	37	48.33	1.44	464.17	7.22
08/01/2560 11:00 น.	38	45.83	13.77	468.33	3.82
09/01/2560 11:00 น.	39	48.33	5.20	458.33	20.97
10/01/2560 11:00 น.	40	60.00	6.61	469.17	7.64

ตารางที่ ง-3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอยในบ่อเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลา 60 วัน  
ของการทดลอง (ในบ่อชุดทดลองและบ่อชุดควบคุม) (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี เวลา (น.)	วันที่	ปริมาณสารแขวนลอย (ชุดทดลอง)		ปริมาณสารแขวนลอย (ชุดควบคุม)	
		ค่าเฉลี่ย (มก./ล.)	SD	ค่าเฉลี่ย (มก./ล.)	SD
11/01/2560 11:00 น.	41	51.67	5.20	485.83	3.82
12/01/2560 11:00 น.	42	56.67	1.44	495.83	6.29
13/01/2560 11:00 น.	43	47.50	5.00	490.00	4.33
14/01/2560 11:00 น.	44	60.00	6.61	535.00	28.39
15/01/2560 11:00 น.	45	52.50	5.00	574.17	8.04
16/01/2560 11:00 น.	46	51.67	3.82	518.33	1.44
17/01/2560 11:00 น.	47	66.67	1.44	547.50	2.50
18/01/2560 11:00 น.	48	65.83	1.44	641.67	10.41
19/01/2560 11:00 น.	49	50.00	4.33	542.50	8.66
20/01/2560 11:00 น.	50	50.00	6.61	551.67	2.89
21/01/2560 11:00 น.	51	50.83	3.82	556.67	5.20
22/01/2560 11:00 น.	52	50.00	2.50	615.00	8.66
23/01/2560 11:00 น.	53	59.17	1.44	636.67	7.22
24/01/2560 11:00 น.	54	53.33	1.44	632.50	4.33
25/01/2560 11:00 น.	55	53.33	2.89	663.33	1.44
26/01/2560 11:00 น.	56	42.50	2.50	676.67	8.78
27/01/2560 11:00 น.	57	60.83	10.10	760.83	1.44
28/01/2560 11:00 น.	58	40.83	5.20	760.00	6.61
29/01/2560 11:00 น.	59	66.67	11.27	754.17	2.89
30/01/2560 11:00 น.	60	64.17	1.44	754.17	1.44

ตารางที่ ง-4 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของน้ำในบ่อเลี้ยงปลานิลของชุดทดลองและชุดควบคุม โดยทำการตรวจวัดที่เวลา 11:00 น. ของทุกๆ วัน ตลอดระยะเวลา 60 วัน ของการทดลอง

วัน/เดือน/ปี	วันที่	ชุดทดลอง			ชุดควบคุม		
		ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	อุณหภูมิ (องศา)	พีเอช	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	อุณหภูมิ (องศา)	พีเอช
01/12/2559	0	7.6	26.5	7.8	7.5	26.8	7.9
02/12/2559	1	7.6	26.6	7.8	7.4	27.2	8.0
03/12/2559	2	7.3	28.8	7.7	7.2	26.2	8.0
04/12/2559	3	7.0	27.3	7.7	7.2	26.2	7.9
05/12/2559	4	6.5	27.0	7.5	6.9	26.4	7.5
06/12/2559	5	6.9	27.2	7.5	7.2	26.3	7.5
07/12/2559	6	7.7	26.3	7.5	7.8	25.8	7.5
08/12/2559	7	7.2	26.2	7.5	7.3	25.7	7.5
09/12/2559	8	7.1	26.4	7.5	7.0	25.6	7.5
10/12/2559	9	7.2	26.1	7.5	7.3	25.5	7.5
11/12/2559	10	7.2	26.2	7.5	7.3	25.5	7.5
12/12/2559	11	7.1	25.8	7.5	7.1	25.3	7.5
13/12/2559	12	7.2	25.8	7.5	7.1	25.4	7.5
14/12/2559	13	7.0	26.3	7.5	6.9	25.6	7.5
15/12/2559	14	7.1	27.2	7.5	6.9	26.3	7.5
16/12/2559	15	7.1	26.2	7.5	6.9	25.7	7.5
17/12/2559	16	7.3	25.0	7.5	7.3	24.2	7.5
18/12/2559	17	7.3	25.0	7.5	7.2	24.3	7.5
19/12/2559	18	7.2	25.9	7.5	7.2	25.0	7.5
20/12/2559	19	7.1	27.4	7.5	7.0	26.4	7.5
21/12/2559	20	7.1	27.9	7.5	7.0	26.9	7.5
22/12/2559	21	7.1	28.2	7.5	7.0	28.4	7.5

ตารางที่ ง-4 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของน้ำในบ่อเลี้ยงปลานิลของชุดทดลองและชุดควบคุม โดยทำการตรวจวัดที่เวลา 11:00 น. ของทุกๆ วัน ตลอดระยะเวลา 60 วัน ของการทดลอง (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	วันที่	ชุดทดลอง			ชุดควบคุม		
		ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	อุณหภูมิ (องศา)	พีเอช	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	อุณหภูมิ (องศา)	พีเอช
23/12/2559	22	7.2	27.5	7.5	7.0	27.4	7.5
24/12/2559	23	7.0	27.5	7.5	7.0	26.9	7.5
25/12/2559	24	7.0	27.2	7.5	7.2	26.4	7.5
26/12/2559	25	7.0	27.5	7.5	7.2	26.3	7.5
27/12/2559	26	7.1	26.8	7.5	7.4	26.3	7.5
28/12/2559	27	7.4	27.0	7.5	7.2	26.0	7.5
29/12/2559	28	7.3	26.5	7.5	7.2	26.6	7.5
30/12/2559	29	7.3	26.7	7.5	7.4	26.2	7.5
31/12/2559	30	7.3	26.4	7.5	7.0	26.2	7.5
01/01/2560	31	7.0	26.9	7.5	7.2	26.4	7.5
02/01/2560	32	7.5	25.4	7.5	7.6	24.7	7.5
03/01/2560	33	7.5	26.0	7.5	7.4	25.4	7.5
04/01/2560	34	7.5	26.0	7.5	7.5	25.5	7.5
05/01/2560	35	7.5	26.4	7.5	7.3	25.8	7.5
06/01/2560	36	7.5	26.0	7.5	7.4	25.4	7.5
07/01/2560	37	7.5	26.2	7.5	7.5	25.7	7.5
08/01/2560	38	7.1	26.6	7.5	7.0	26.1	7.5
09/01/2560	39	6.8	26.0	7.5	6.7	25.6	7.5
10/01/2560	40	7.1	25.7	7.5	7.1	25.4	7.5
11/01/2560	41	7.3	26.2	7.5	7.1	25.6	7.5
12/01/2560	42	7.4	26.5	7.5	7.2	25.9	7.5
13/01/2560	43	7.3	26.8	7.5	7.0	26.6	7.5
14/01/2560	44	7.4	26.5	7.5	7.2	26.4	7.5
15/01/2560	45	7.5	27.5	7.5	7.5	26.9	7.5
16/01/2560	46	7.5	27.7	7.5	7.3	26.9	7.5
17/01/2560	47	7.4	27.1	7.5	7.4	26.7	7.5
18/01/2560	48	7.5	27.6	7.5	7.4	26.8	7.5



ตารางที่ ง-4 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของน้ำในบ่อเลี้ยงปลานิลของชุดทดลองและชุดควบคุม โดยทำการตรวจวัดที่เวลา 11:00 น. ของทุกๆ วัน ตลอดระยะเวลา 60 วัน ของการทดลอง (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	วันที่	ชุดทดลอง			ชุดควบคุม		
		ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	อุณหภูมิ (องศา)	พีเอช	ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	อุณหภูมิ (องศา)	พีเอช
19/01/2560	49	7.5	27.4	7.5	7.4	26.5	7.5
20/01/2560	50	7.5	27.4	7.5	7.5	26.7	7.5
21/01/2560	51	7.5	26.8	7.5	7.5	26.5	7.5
22/01/2560	52	7.5	26.6	7.5	7.5	26.5	7.5
23/01/2560	53	7.5	26.3	7.5	7.4	26.4	7.5
24/01/2560	54	7.5	26.1	7.5	7.3	26.1	7.5
25/01/2560	55	7.5	26.1	7.5	7.4	25.3	7.5
26/01/2560	56	7.5	26.3	7.5	7.4	25.2	7.5
27/01/2560	57	7.5	26.6	7.5	7.5	25.4	7.5
28/01/2560	58	7.5	26.3	7.5	7.4	25.9	7.5
29/01/2560	59	7.5	26.4	7.5	7.4	26.1	7.5
30/01/2560	60	7.5	26.6	7.5	7.4	26.2	7.5

## ภาคผนวก จ

## Post Hoc Tests

## Homogeneous Subsets

## NotAIR

Duncan<sup>a</sup>

size	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
100.00	3	140.0000	
130.00	3	142.6667	
160.00	3		168.0000
Sig.		.522	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

## AIR

Duncan<sup>a</sup>

size	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
100.00	3	142.6667	
130.00	3	150.6667	
160.00	3		165.3333
Sig.		.107	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

จ.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับการทดลองที่ 1

## Descriptives

		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
						Lower Bound	Upper Bound		
NotAIR	100.00	3	140.0000	.00000	.00000	140.0000	140.0000	140.00	140.00
	130.00	3	142.6667	2.30940	1.33333	136.9298	148.4035	140.00	144.00
	160.00	3	168.0000	8.00000	4.61880	148.1269	187.8731	160.00	176.00
	Total	9	150.2222	14.01586	4.67195	139.4487	160.9958	140.00	176.00
AIR	100.00	3	142.6667	6.11010	3.52767	127.4883	157.8450	136.00	148.00
	130.00	3	150.6667	2.30940	1.33333	144.9298	156.4035	148.00	152.00
	160.00	3	165.3333	6.11010	3.52767	150.1550	180.5117	160.00	172.00
	Total	9	152.8889	10.91380	3.63793	144.4998	161.2780	136.00	172.00

## Test of Homogeneity of Variances

	Levene Statistic	df1	df2	Sig.
NotAIR	3.027	2	6	.123
AIR	1.333	2	6	.332

## ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
NotAIR	Between Groups	1432.889	2	716.444	31.000	.001
	Within Groups	138.667	6	23.111		
	Total	1571.556	8			
AIR	Between Groups	792.889	2	396.444	14.867	.005
	Within Groups	160.000	6	26.667		
	Total	952.889	8			

จ.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับการทดลองที่ 1 (ต่อ)



## Post Hoc Tests

### Homogeneous Subsets

SS

Duncan<sup>a</sup>

ขนาด	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
100.00	3	82.6667		
130.00	3		110.6667	
160.00	3			146.6667
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

>Error # 2070

>The application is unable to communicate properly with the license server.

>The license server may be down, or there may be other network-related

>communication or DNS issues interfering. This command is not executed.

>Execution of this command stops.

>Specific symptom number: 5

End of job: 22 command lines 1 errors 0 warnings 1 CPU seconds

จ.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับการทดลองที่ 2.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## → Oneway

[DataSet0]

### Descriptives

SS

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
100.00	3	82.6667	2.30940	1.33333	76.9298	88.4035	80.00	84.00
130.00	3	110.6667	2.30940	1.33333	104.9298	116.4035	108.00	112.00
160.00	3	146.6667	2.30940	1.33333	140.9298	152.4035	144.00	148.00
Total	9	113.3333	27.85678	9.28559	91.9207	134.7459	80.00	148.00

### Test of Homogeneity of Variances

SS

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
.000	2	6	1.000

### ANOVA

SS

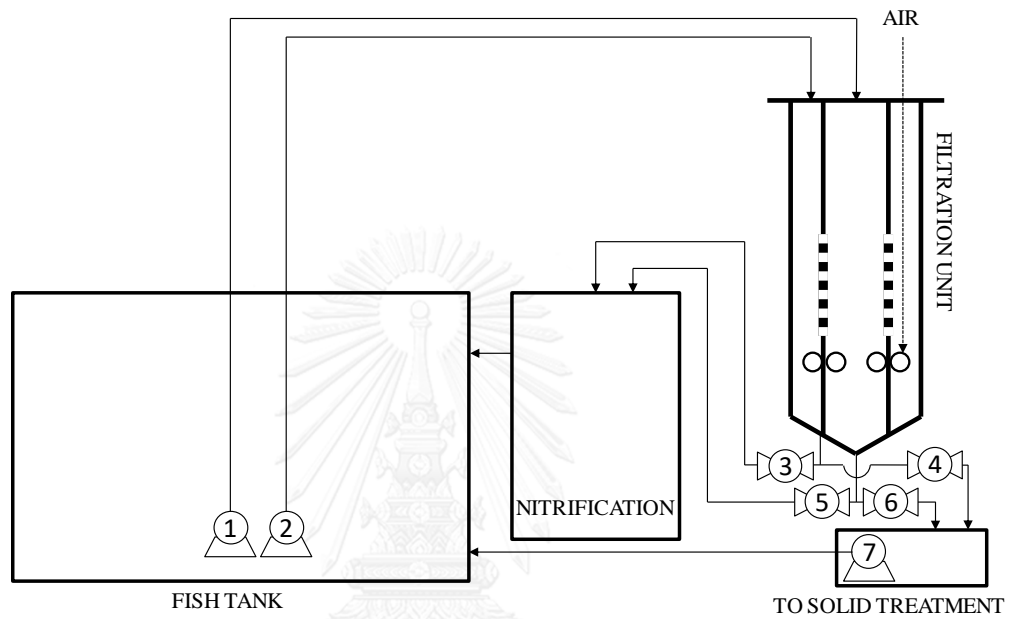
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	6176.000	2	3088.000	579.000	.000
Within Groups	32.000	6	5.333		
Total	6208.000	8			

จ.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับการทดลองที่ 2.1 (ต่อ)

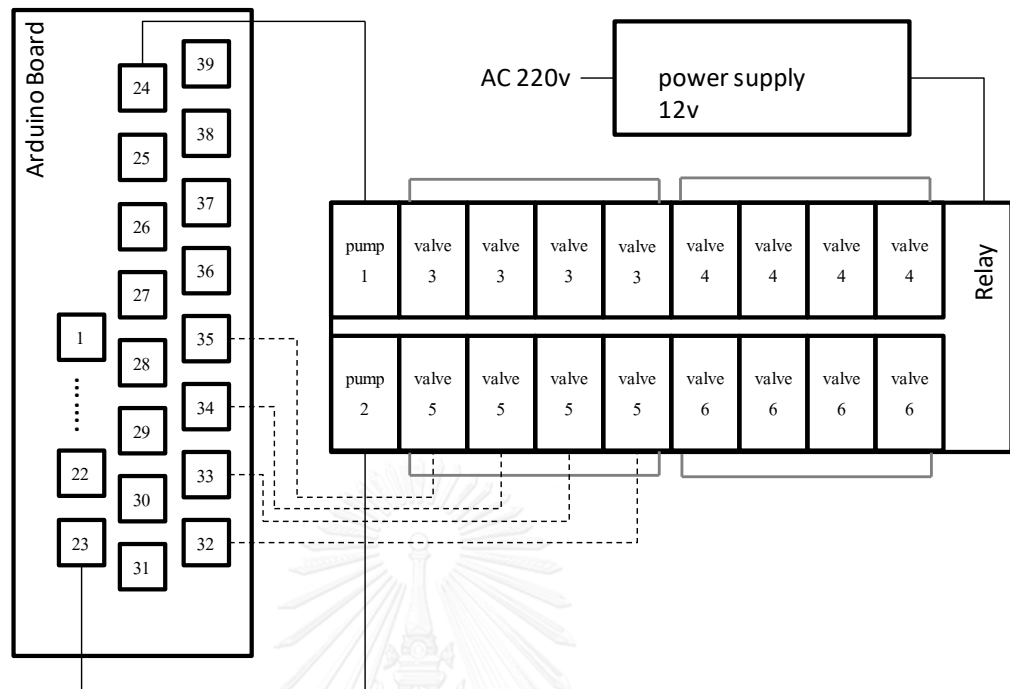


## ภาคผนวก ฉ

โปรแกรมที่ควบคุมการทำงานของระบบแยกตะกอนแบบอัตโนมัติ ที่เขียนลงในบอร์ด Arduino โดยใช้ซอฟต์แวร์ Arduino รุ่น 1.8.1.



ภาพที่ ฉ-1 แผนผังของระบบเลี้ยงปลาชนิดแบบปิด โดย (1, 2 และ 7 แทนเครื่องสูบน้ำ ส่วน 3, 4, 5 และ 6 แทนโซลินอยด์วาล์ว)



หมายเหตุ: อักษรเลข 1 – 39 แทนจำนวนช่องคำสั่งจากบอร์ด Arduino ซึ่งสามารถเลือกใช้ช่องคำสั่งใดก็ได้ โดยจะต้องกำหนดช่องคำสั่งให้ถูกต้องในการเขียนโปรแกรมคำสั่งลงในซอฟต์แวร์ Arduino รุ่น 1.8.1.

ภาพที่ ฉ-1 แผนผังการเชื่อมต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Arduino micro controller) กับรีเลย์ (Relay) สำหรับการควบคุมการทำงานของเครื่องสูบน้ำและวาล์ว

## ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมคำสั่งลงในซอฟต์แวร์

## arduino รุ่น 1.8.1.

[code]

```

int CH2_1 = 24;
int CH2_2 = 25;
int CH2_3 = 26;
int CH2_4 = 27;
int CH2_5 = 28;
int CH2_6 = 29;
int CH2_7 = 30;
int CH2_8 = 31;
int CH2_9 = 32;
int CH2_10 = 33;
int CH2_11 = 34;
int CH2_12 = 35;
int CH2_13 = 36;
int CH2_14 = 37;
int CH2_15 = 38;
int CH2_16 = 39;
int x;
/*int CH_5 = 9;
int CH_6 = 8;
int x;*/
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode(CH_1, OUTPUT);

  pinMode(CH_4, OUTPUT);

  pinMode(CH2_1, OUTPUT);
  pinMode(CH2_2, OUTPUT);
  pinMode(CH2_3, OUTPUT);
  pinMode(CH2_4, OUTPUT);
  pinMode(CH2_5, OUTPUT);
  pinMode(CH2_6, OUTPUT);
  pinMode(CH2_7, OUTPUT);
  pinMode(CH2_8, OUTPUT);
  pinMode(CH2_9, OUTPUT);
  pinMode(CH2_10, OUTPUT);
  pinMode(CH2_11, OUTPUT);
  pinMode(CH2_12, OUTPUT);
  pinMode(CH2_13, OUTPUT);
  pinMode(CH2_14, OUTPUT);
  pinMode(CH2_15, OUTPUT);
  pinMode(CH2_16, OUTPUT);
  /* pinMode(CH_5, OUTPUT);
  pinMode(CH_6, OUTPUT);*/
  digitalWrite(CH_1, HIGH);
  delay(50);
  digitalWrite(CH_4, HIGH);
  delay(50);
  digitalWrite(CH2_1, HIGH);
  delay(50);
  digitalWrite(CH2_2, HIGH);
  delay(50);
  digitalWrite(CH2_3, HIGH);
  delay(50);
  digitalWrite(CH2_4, HIGH);
  delay(50);
  digitalWrite(CH2_5, HIGH);
  delay(50);
  digitalWrite(CH2_6, HIGH);
  delay(50);
  digitalWrite(CH2_7, HIGH);
  delay(50);
  digitalWrite(CH2_8, HIGH);
  delay(50);
  digitalWrite(CH2_9, HIGH);
  delay(50);

```



```

    digitalWrite(CH2_10, HIGH);
    delay(50);
    digitalWrite(CH2_11, HIGH);
    delay(50);
    digitalWrite(CH2_12, HIGH);
    delay(50);
    digitalWrite(CH2_13, HIGH);
    delay(50);
    digitalWrite(CH2_14, HIGH);
    delay(50);
    digitalWrite(CH2_15, HIGH);
    delay(50);
    digitalWrite(CH2_16, HIGH);
    delay(50);
}

void loop() {
    digitalWrite(CH2_13, HIGH);
    //delay(50);
    digitalWrite(CH2_14, HIGH);
    //delay(50);
    digitalWrite(CH2_15, HIGH);
    //delay(50);
    digitalWrite(CH2_16, HIGH);
    delay(1000);
    delay(1000);
    delay(1000);
    delay(1000);
    digitalWrite(CH2_13, LOW); // open valve6
    //delay(50);
    digitalWrite(CH2_14, HIGH);
    //delay(50);
    digitalWrite(CH2_15, HIGH);
    //delay(50);
    digitalWrite(CH2_16, LOW);
    delay(1000);
    delay(1000);
    delay(1000);
    delay(1000);
    digitalWrite(CH2_13, HIGH);
    //delay(50);
    digitalWrite(CH2_14, HIGH);
    //delay(50);
    digitalWrite(CH2_15, HIGH);
    //delay(50);
    digitalWrite(CH2_16, HIGH);
    delay(1000);
    delay(1000);
    delay(1000);
    delay(1000);
    // put your main code here, to run
    repeatedly:
    digitalWrite(CH_1, LOW); //open pump1
    delay(50);
    digitalWrite(CH_4, HIGH); //close pump2
    //delay(50);
    for(x=0;x<7200;x++) // Adjust 120 to 7200
    for 2 hour
    {
        delay(1000); //Delaey 1000 = 1 s
    }
    // put your main code here, to run
    repeatedly:
    digitalWrite(CH_1, HIGH); //close pump1
    //delay(50);
    delay(1000);
    delay(1000);
    delay(1000);
    delay(1000);
    //////////////////////////////////////
}

```

```

digitalWrite(CH2_13, HIGH);// close valve6          //delay(50);
//delay(50);                                       digitalWrite(CH2_2, HIGH);
digitalWrite(CH2_14, LOW);                          //delay(50);
//delay(50);                                       digitalWrite(CH2_3, HIGH);
digitalWrite(CH2_15, LOW);                          //delay(50);
//delay(50);                                       digitalWrite(CH2_4, LOW);
digitalWrite(CH2_16, HIGH);                          delay(1000);
delay(1000);                                       delay(1000);
delay(1000);                                       delay(1000);
delay(1000);                                       delay(1000);
digitalWrite(CH2_13, HIGH);                          digitalWrite(CH2_1, HIGH);
//delay(50);                                       //delay(50);
digitalWrite(CH2_14, HIGH);                          digitalWrite(CH2_2, HIGH);
//delay(50);                                       //delay(50);
digitalWrite(CH2_15, HIGH);                          digitalWrite(CH2_3, HIGH);
//delay(50);                                       //delay(50);
digitalWrite(CH2_16, HIGH);                          digitalWrite(CH2_4, HIGH);
delay(1000);                                       delay(1000);
delay(1000);                                       delay(1000);
delay(1000);                                       delay(1000);
delay(1000);                                       delay(1000);
delay(1000);                                       delay(1000);
//////////////////////////////////////                for(x=0;x<60;x++)//Adjust 60 to 600 for
////////////////////////////////////////////////////                10 minute
digitalWrite(CH2_1, HIGH);                            {
//delay(50);                                       delay(1000);
digitalWrite(CH2_2, HIGH);                            }
//delay(50);                                       digitalWrite(CH2_1, HIGH);
digitalWrite(CH2_3, HIGH);                          //delay(50);
//delay(50);                                       digitalWrite(CH2_2, HIGH);
digitalWrite(CH2_4, HIGH);                          //delay(50);
delay(1000);                                       digitalWrite(CH2_3, HIGH);
delay(1000);                                       //delay(50);
delay(1000);                                       digitalWrite(CH2_4, HIGH);
delay(1000);                                       delay(1000);
digitalWrite(CH2_1, LOW);//open valve2              delay(1000);

```

```

delay(1000);
delay(1000);
digitalWrite(CH2_1, HIGH);// close valve2
//delay(50);
digitalWrite(CH2_2, LOW);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_3, LOW);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_4, HIGH);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
digitalWrite(CH2_1, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_2, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_3, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_4, HIGH);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);

////////////////////////////////////

digitalWrite(CH2_5, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_6, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_7, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_8, HIGH);
delay(1000);
delay(1000);

delay(1000);
delay(1000);
digitalWrite(CH2_5, LOW);// open valve3
//delay(50);
digitalWrite(CH2_6, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_7, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_8, LOW);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
digitalWrite(CH2_5, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_6, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_7, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_8, HIGH);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);

// put your main code here, to run
repeatedly:
digitalWrite(CH_1, HIGH);//close pump1
delay(50);
digitalWrite(CH_4, LOW);//open pump2
//delay(50);

for(x=0;x<7200;x++) // Adjust 120 to 7200
for 2 hours

```

```

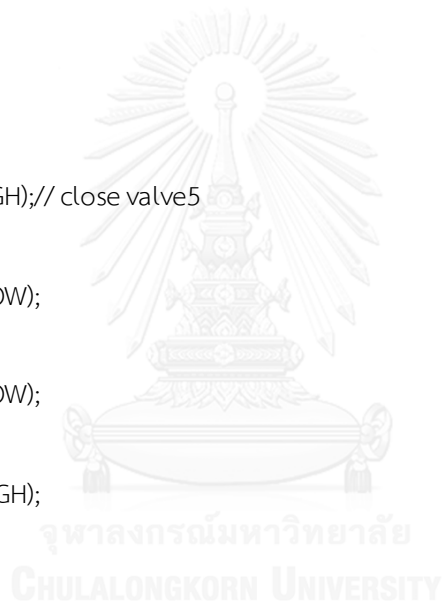
{
    delay(1000); //Delay 1000 = 1 s
}
// put your main code here, to run
repeatedly:
digitalWrite(CH_4, HIGH);//close pump2
//delay(50);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
////////////////////////////////////
digitalWrite(CH2_5, HIGH);// close valve3
delay(50);
digitalWrite(CH2_6, LOW);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_7, LOW);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_8, HIGH);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
digitalWrite(CH2_5, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_6, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_7, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_8, HIGH);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
////////////////////////////////////
digitalWrite(CH2_9, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_10, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_11, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_12, HIGH);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
digitalWrite(CH2_9, LOW);// open valve5
//delay(50);
digitalWrite(CH2_10, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_11, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_12, LOW);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
digitalWrite(CH2_9, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_10, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_11, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_12, HIGH);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
for(x=0;x<60;x++)//Adjust 60 to 600 for
10 minute

```

```

{
    delay(2000);
}
digitalWrite(CH2_9, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_10, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_11, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_12, HIGH);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
digitalWrite(CH2_9, HIGH);// close valve5
//delay(50);
digitalWrite(CH2_10, LOW);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_11, LOW);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_12, HIGH);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);
digitalWrite(CH2_9, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_10, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_11, HIGH);
//delay(50);
digitalWrite(CH2_12, HIGH);
delay(1000);
delay(1000);
delay(1000);

```



## ภาคผนวก ข

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

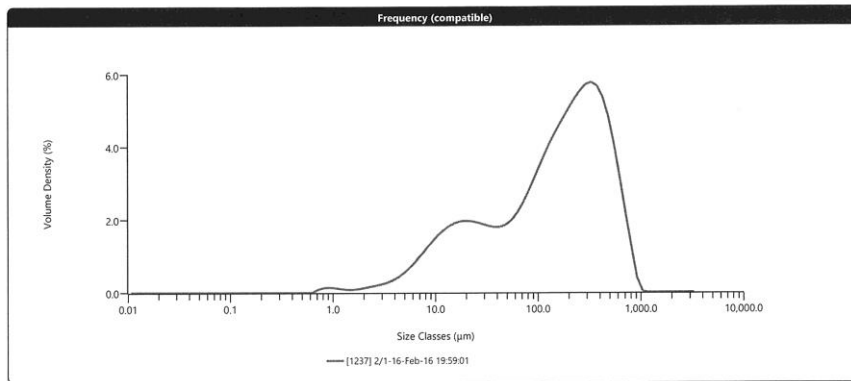
Created by: Admin  
Last edited: 06-May-15 13:01:03



Sample Details	
Sample Name: Z/1	Instrument Type: Mastersizer3000
File Name: S590287	Instrument Serial No.: MAL1099267
Measurement Date Time: 16-Feb-16 19:59:01	Accessory Name: Hydro EV

Analysis details	
Particle Name: Standard wet	Particle Refractive Index: 1.530
Dispersant Name: Water	Particle Absorption Index: 0.100
Dispersant Refractive Index: 1.330	Particle Density: 1.00 g/cm <sup>3</sup>
Analysis Model: General Purpose	Laser Obscuration: 18.18 %
Analysis Sensitivity: Normal	Ultrasound Achieved: 0 %
Scattering Model: Mie	Stirrer Speed Achieved: 2500 rpm
Weighted Residual: 0.26 %	Particle Notes:

Result	
Concentration: 0.0799 %	Span: 3.065
Uniformity: 0.965	Result Units: Volume
Specific Surface Area: 191.7 m <sup>2</sup> /kg	Dv (10): 13.2 μm
D [3,2]: 31.3 μm	Dv (50): 160 μm
D [4,3]: 213 μm	Dv (90): 503 μm



Size (μm)	% Volume In	Size (μm)	% Volume In	Size (μm)	% Volume In	Size (μm)	% Volume In	Size (μm)	% Volume In	Size (μm)	% Volume In	Size (μm)	% Volume In
0.0100	0.00	0.0679	0.00	0.460	0.00	3.12	0.22	21.2	1.63	144	3.75	976	0.00
0.0114	0.00	0.0771	0.00	0.523	0.00	3.55	0.27	24.1	1.60	163	3.98	1110	0.00
0.0129	0.00	0.0876	0.00	0.594	0.00	4.03	0.35	27.4	1.56	186	4.21	1260	0.00
0.0147	0.00	0.0995	0.00	0.675	0.08	4.58	0.44	31.1	1.52	211	4.43	1430	0.00
0.0167	0.00	0.113	0.00	0.767	0.11	5.21	0.56	35.3	1.50	240	4.62	1630	0.00
0.0189	0.00	0.128	0.00	0.872	0.12	5.92	0.70	40.1	1.50	272	4.77	1850	0.00
0.0215	0.00	0.146	0.00	0.991	0.11	6.72	0.85	45.6	1.55	310	4.83	2100	0.00
0.0244	0.00	0.166	0.00	1.13	0.08	7.64	1.01	51.8	1.65	352	4.75	2390	0.00
0.0278	0.00	0.188	0.00	1.28	0.07	8.68	1.16	58.9	1.82	400	4.49	2710	0.00
0.0315	0.00	0.214	0.00	1.45	0.07	9.86	1.31	66.9	2.05	454	4.04	3080	0.00
0.0358	0.00	0.243	0.00	1.65	0.08	11.2	1.43	76.0	2.32	516	3.40	3500	0.00
0.0407	0.00	0.276	0.00	1.88	0.10	12.7	1.52	86.4	2.62	586	2.63		
0.0463	0.00	0.314	0.00	2.13	0.13	14.5	1.59	98.1	2.93	666	1.81		
0.0526	0.00	0.357	0.00	2.42	0.16	16.4	1.63	111	3.22	756	1.05		
0.0597	0.00	0.405	0.00	2.75	0.19	18.7	1.64	127	3.50	859	0.30		

ภาพที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์ขนาดของตะกอนแขวนลอยในน้ำที่ผ่านเครื่องสูบน้ำขนาดเล็ก  
(2,800 ล./ชม.) สำหรับการทดลองที่ 1

# Analysis Result

Created by: Admin  
Last edited: 06-May-15 13:01:03

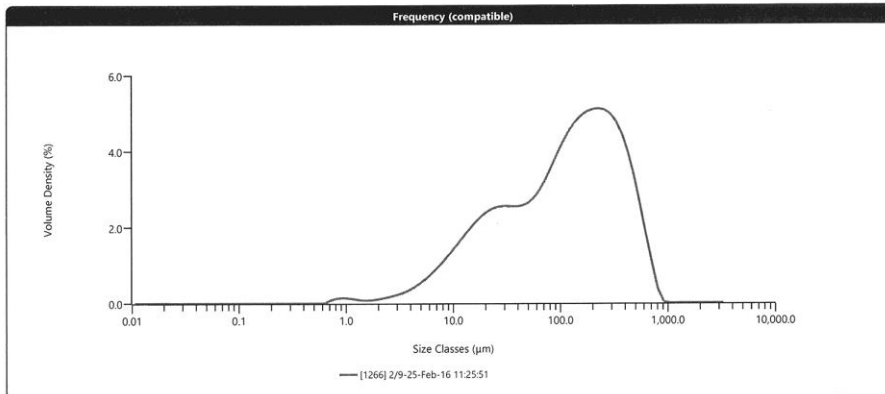
Scientific and Technological Research Equipment Centre (STREC), Chulalongkorn University



Sample Details	
Sample Name 2/9	Instrument Type Mastersizer3000
File Name S590287	Instrument Serial No. MAL1099267
Measurement Date Time 25-Feb-16 11:25:51	Accessory Name Hydro EV

Analysis details	
Particle Name Standard wet	Particle Refractive Index 1.530
Dispersant Name Water	Particle Absorption Index 0.100
Dispersant Refractive Index 1.330	Particle Density 1.00 g/cm <sup>3</sup>
Analysis Model General Purpose	Laser Obscuration 11.09 %
Analysis Sensitivity Normal	Ultrasound Achieved 0 %
Scattering Model Mie	Stirrer Speed Achieved 2500 rpm
Weighted Residual 0.29 %	Particle Notes

Result	
Concentration 0.0452 %	Span 3.401
Uniformity 1.056	Result Units Volume
Specific Surface Area 198.4 m <sup>2</sup> /kg	Dv (10) 13.7 μm
D [3,2] 30.2 μm	Dv (50) 118 μm
D [4,3] 170 μm	Dv (90) 415 μm



Size (μm)	% Volume In	Size (μm)	% Volume In	Size (μm)	% Volume In	Size (μm)	% Volume In	Size (μm)	% Volume In	Size (μm)	% Volume In
0.0100	0.00	0.0679	0.00	0.460	0.00	3.12	0.22	21.2	2.07	144	4.11
0.0114	0.00	0.0771	0.00	0.523	0.00	3.55	0.27	24.1	2.12	163	4.20
0.0129	0.00	0.0876	0.00	0.594	0.00	4.03	0.35	27.4	2.13	186	4.25
0.0147	0.00	0.0995	0.00	0.675	0.07	4.58	0.43	31.1	2.13	211	4.27
0.0167	0.00	0.113	0.00	0.767	0.11	5.21	0.54	35.3	2.12	240	4.25
0.0189	0.00	0.128	0.00	0.872	0.12	5.92	0.65	40.1	2.13	272	4.17
0.0215	0.00	0.146	0.00	0.991	0.11	6.72	0.79	45.6	2.18	310	4.00
0.0244	0.00	0.166	0.00	1.13	0.09	7.64	0.93	51.8	2.28	352	3.72
0.0278	0.00	0.188	0.00	1.28	0.07	8.68	1.08	58.9	2.45	400	3.32
0.0315	0.00	0.214	0.00	1.45	0.06	9.86	1.25	66.9	2.68	454	2.79
0.0358	0.00	0.243	0.00	1.65	0.07	11.2	1.41	76.0	2.95	516	2.17
0.0407	0.00	0.276	0.00	1.88	0.09	12.7	1.58	86.4	3.25	586	1.52
0.0463	0.00	0.314	0.00	2.13	0.11	14.5	1.73	98.1	3.53	666	0.90
0.0526	0.00	0.357	0.00	2.42	0.14	16.4	1.87	111	3.77	756	0.29
0.0597	0.00	0.405	0.00	2.75	0.18	18.7	1.99	127	3.97	859	0.00



ภาพที่ ข-2 ผลการวิเคราะห์ขนาดของตะกอนแขวนลอยในน้ำที่ผ่านเครื่องสูบน้ำขนาดใหญ่  
(8,500 ล./ชม.) สำหรับการทดลองที่ 1

C:\TOC3201\Data\2559\600225\TOC\_2017\_02\_23\_13\_41\_00\_0.i32

	Type	Analysis	Sample Name	SO	Origin	Dilut	Result	N/Cd	Status	Ac
1	Standard	NPOC	Untitled	U	0:C:\TOC3201\	1.00			Completed	
2	Unknown	NPOC	Rinse	U	0:C:\TOC3201\	1.00	NPOC:0.5670mg/L		Completed	
3	Unknown	NPOC	Test 10 ppm	U	0:C:\TOC3201\	1.00	NPOC:9.612mg/L		Completed	
4	Unknown	NPOC	Rinse	U	0:C:\TOC3201\	1.00	NPOC:0.4601mg/L		Completed	
5	Unknown	NPOC	C-Tank	U	0:C:\TOC3201\	1.00	NPOC:11.21mg/L		Completed	
6	Unknown	NPOC	T-Tank	U	0:C:\TOC3201\	1.00	NPOC:25.03mg/L		Completed	
7	Unknown	NPOC	Rinse	U	0:C:\TOC3201\	1.00	NPOC:0.3422mg/L		Completed	
8	Unknown	NPOC	Test 10 ppm	U	0:C:\TOC3201\	1.00	NPOC:9.546mg/L		Completed	
9	Unknown	NPOC	Rinse	U	0:C:\TOC3201\	1.00	NPOC:0.4935mg/L		Completed	
10	Unknown	NPOC	Rinse	U	0:C:\TOC3201\	1.00	NPOC:0.2548mg/L		Completed	

System Administrator 24/2/2560 9:16:33 TOC\_2017\_02\_23\_13\_41\_00\_0.i32 หน่วยความจำหลัก

Sample

Sample Name: C-Tank  
 Sample ID: Untitled  
 Origin: NPOC600225.met  
 Status: Completed  
 Chk. Result: Completed

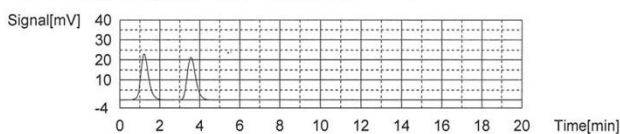
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:11.21mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	63.81	11.13mg/L	50uL	1		NPOC600225.2017_02_23_14_13_18.cal	23/2/2560 17:18:16
2	64.73	11.29mg/L	50uL	1		NPOC600225.2017_02_23_14_13_18.cal	23/2/2560 17:20:50

Mean Area 64.27  
 Mean Conc. 11.21mg/L  
 SD Area 0.6505  
 CV Area 1.01%  
 SD Conc 0.1135  
 CV Conc 1.01%



System Administrator 24/2/2560 9:16:33 TOC\_2017\_02\_23\_13\_41\_00\_0.i32 หน่วยความจำหลัก

Sample

Sample Name: T-Tank  
 Sample ID: Untitled  
 Origin: NPOC600225.met  
 Status: Completed  
 Chk. Result: Completed

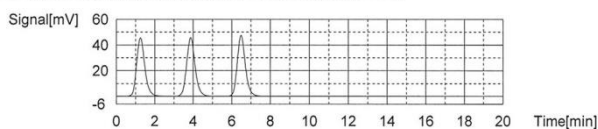
Type	Anal.	Dil.	Result
Unknown	NPOC	1.000	NPOC:25.03mg/L

1. Det

Anal.: NPOC

No.	Area	Conc.	Inj. Vol.	Aut. Dil.	Ex.	Cal. Curve	Date / Time
1	137.7	24.03mg/L	50uL	1	E	NPOC600225.2017_02_23_14_13_18.cal	23/2/2560 17:30:18
2	143.7	25.07mg/L	50uL	1		NPOC600225.2017_02_23_14_13_18.cal	23/2/2560 17:33:11
3	143.2	24.99mg/L	50uL	1		NPOC600225.2017_02_23_14_13_18.cal	23/2/2560 17:35:58

Mean Area 143.5  
 Mean Conc. 25.03mg/L  
 SD Area 0.3536  
 CV Area 0.25%  
 SD Conc 0.06169  
 CV Conc 0.25%



ภาพที่ ข-3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำ (Total Organic Carbon; TOC) สำหรับการทดลองที่ 3



## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-1 การแสดงการคำนวณปริมาณไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบ (วันที่ 1) โดยเลี้ยงปลานิลความหนาแน่นเริ่มต้น 2.96 กก./ลบ.ม. และให้อาหารที่มีโปรตีนร้อยละ 18 เป็นปริมาณ 5.7 กก. ในถังพลาสติก 2,000 ล. เป็นระยะเวลา 30 วัน

แหล่งที่มา ไนโตรเจน	ไนโตรเจนเข้า (ก.ไนโตรเจน)	ไนโตรเจนเข้า (%)	ไนโตรเจนออก (ก.ไนโตรเจน)	ไนโตรเจนออก (%)
ปลานิล	83.28**	$\frac{83.28}{284.39} \times 100$ = 29.28	123.10	43.29
อาหารปลา	$\frac{3.27}{100} \times 5700$ = 186.39**	65.52	-	-
แอมโมเนีย	ไม่พบ	ไม่พบ	0.00	0.00
ไนไตรต์	$0.05 \times 10^{-3}$ ก./ล. $\times$ 2,000 ล. = 0.10	0.01	0.12	0.04
ไนเตรต	$7.36 \times 10^{-3}$ ก./ล. $\times$ 2,000 ล. = 14.72	5.18	70.75	24.88
ตะกอนในถังเลี้ยง	-	-	1.87**	0.66
ผลรวมไนโตรเจน	284.39	100	232.91	81.88

หมายเหตุ \*\*ร้อยละไนโตรเจนในเนื้อปลานิล อาหารปลา และตะกอน สามารถดูได้จากตารางที่ ข-2

ตารางที่ ซ-2 สัดส่วนปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนในอาหารปลา ตะกอนในระบบและ  
ในปลานิล เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ CHN Analyzer (LECO Coporation, 628 Series: CHN)

ตัวอย่าง	ร้อยละ		
	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน
อาหารปลานิลที่มีโปรตีนไม่ต่ำกว่าร้อยละ15	42.69	7.48	3.27
ตะกอนจากบ่อปลานิล*	29.21	4.66	3.2
ปลานิล (นน.เปียก 86.55 ก. และ นน. แห้ง 19.17 ก.)**	53.48	9.55	6.35

หมายเหตุ \*ผลการวิเคราะห์ตะกอนจากบ่อปลานิล อ้างอิงจากงานวิจัยของพรรณทภรณ์ สิทธิพลางกูร (2556)

\*\*ผลการวิเคราะห์ปลานิล อ้างอิงจากงานวิจัยของเพ็ญพิชญา พินิจธนาภักย์ (2556)



### ภาคผนวก ฉ

ตัวอย่างแสดงการคำนวณความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity gradient:  $G$ )

กำหนดให้ที่อุณหภูมิมาตรฐาน 25 °ซ. และความดัน 1 บรรยากาศ

$d_b$	0.005	m.
$\rho_w$	997	kg/m <sup>3</sup>
$\mu$	890	N.s/m <sup>2</sup>
$\rho_b$	1.1839	kg/m <sup>3</sup>
$V_{air}$	1.2	m <sup>3</sup> /hr
$V_{total}$	0.01122	m <sup>3</sup>
$g$	9.80665	m/s <sup>2</sup>
$C_d$	1	spheres

#### ขั้นตอนการคำนวณหาค่า $G$

1 ประมาณค่าความเร็วของฟองอากาศขึ้นมา 1 ค่าความเร็วเพื่อนำไปคำนวณในสมการที่ 1.2

$$v_p(t) = \sqrt{\frac{4g}{3C_d} \times \frac{\rho_p - \rho_w}{\rho_w} \times d_p} \quad (1.1)$$

2 นำค่า  $v$  ที่ได้จากการประมาณแทนในสมการที่ 1.2

$$N_R = \frac{v_p d_p}{\nu} \quad (1.2)$$

3 นำค่า  $N_R$  ที่ได้จากสมการที่ 1.2 แทนในสมการที่ 1.3

$$C_d = \frac{16}{N_R} + \frac{3}{\sqrt{N_R}} + 0.34 \quad (1.3)$$

4 นำค่า  $C_d$  ที่ได้จากสมการที่ 1.3 แทนในสมการที่ 1.1 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่า  $v$  ที่ประมาณขึ้น

4.1 ค่า  $v$  ตรงกับค่าที่ประมาณขึ้น ให้แทนในสมการที่ 1.4

4.2 ค่า  $v$  ไม่ตรงกับค่าที่ประมาณขึ้น ให้ประมาณค่า  $v$  ใหม่อีกครั้ง

$$G_b = \left[ \frac{3}{4} C_d \frac{U_b^3 \rho_f V_{air}}{d_b \mu_f V_{total}} \right]^{0.5} \quad (1.4)$$

หมายเหตุ:

ค่า  $G$  ที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation)  $350 - 1,700 \text{ s}^{-1}$

ค่า  $G$  ที่ใช้ในกระบวนการฟล็อกคูเลชัน (Flocculation)  $< 100 \text{ s}^{-1}$



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกรกฎ อ๋านองโพธิ์ เกิดเมื่อวันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ.2534 ที่จังหวัดราชบุรี ปัจจุบันอายุ 25 ปี จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสารสิทธิ์พิทยาลัย จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาได้รับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร เมื่อปีการศึกษา 2556 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557

ผลงานที่ได้รับการเผยแพร่

(1) Korrakot Aumnongpho, Wiboonluk Pungrasmi, Sorawit Powtongsook and Kasidit Nootong. 2013. *Enhanced Performance of Aeration-Assisted Crossflow Filtration Unit for Aquaculture Solids Removal*. The 42<sup>nd</sup> Congress on Science and Technology of Thailand, November 30<sup>th</sup> – December 2<sup>nd</sup>, 2016 Centara Grand at Central Plaza Ladprao, Bangkok, Thailand. (Oral presentation)

(2) กรกฎ อ๋านองโพธิ์, วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี, สรวิต เผ่าทองสุข และกษิติศ หนูทอง. 2560. การเพิ่มประสิทธิภาพการกรองของหน่วยแยกตะกอนแนวตั้งเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 16, 17-18 พฤษภาคม 2560, จัดโดยสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, โรงแรมเดอะทวินทาวเวอร์ กรุงเทพมหานคร. (นำเสนอผลงานแบบบรรยายมีเรื่องเต็ม)