

ผลของความหนาแน่นต่อการเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนในบ่อปลากระพงขาว
ที่เลี้ยงด้วยระบบน้ำหมุนเวียน



ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2564

ผลของความหนาแน่นต่อการเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนในบ่อปลากระพงขาว
ที่เลี้ยงด้วยระบบน้ำหมุนเวียน



ศรัณย์ เหมวัน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

ผลของความหนาแน่นต่อการเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนในบ่อปลากระพงขาว
ที่เลี้ยงด้วยระบบน้ำหมุนเวียน

ศรัณย์ เหมวัน

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.นิวุฒิ หวังชัย)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนกันต์ จิตมนัส)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดมลักษณ์ สมพงษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดมลักษณ์ สมพงษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน

อธิการบดี มหาวิทยาลัยแม่โจ้

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	ผลของความหนาแน่นต่อการเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนในบ่อปลากระพง ขาวที่เลี้ยงด้วยระบบน้ำหมุนเวียน
ชื่อผู้เขียน	นายศรัณย์ เหมวัน
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากร ทางน้ำ
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.นิวุฒิ หวังชัย

บทคัดย่อ

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) เป็นระบบที่ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากสามารถเลี้ยงปลาในระดับความหนาแน่นสูงได้ แต่ส่วนที่ต้องคำนึงคือความเหมาะสมของการเติมออกซิเจนภายในบ่อเลี้ยง การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการเติมออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศในบ่อเลี้ยงปลากระพงขาวในน้ำจืดโดยศึกษาผลของการใช้เครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่นและเครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ ต่อการเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนในบ่อเลี้ยง โดยการตรวจสอบค่า K_La ของเครื่องเติมอากาศแต่ละแบบ ในบ่อพลาสติกขนาด 3 ตัน ผลการวิจัยพบว่าเครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่นให้อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่ดีที่สุด ($p < 0.05$) (มีค่า $K_La = 0.0609 \text{ min}^{-1}$) เมื่อเทียบกับเครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ 1 ชุด และ 2 ชุด (มีค่า $K_La = 0.0321 \text{ min}^{-1}$ และ 0.0519 min^{-1} ตามลำดับ) จากนั้นทำการติดตั้งเครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่นในบ่อระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) ขนาด 60 ตัน โดยทำการทดสอบที่ความหนาแน่นของปลากระพงขาว 3 ระดับ ได้แก่ความหนาแน่นที่ 10.9, 15.5 และ 20.5 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ขนาดปลา 300 กรัม/ตัว และที่ความหนาแน่น 11.0, 16.7 และ 21.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร สำหรับปลา 620 กรัม/ตัว ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงออกซิเจนในรอบวัน พบว่าหลังให้อาหารมื้อที่ 2 ระดับ DO ลดลงต่ำกว่า 3 มิลลิกรัม/ลิตร ของทุกความหนาแน่นของปลาทั้ง 2 ขนาด ดังนั้นจึงควรมีระบบการให้ออกซิเจนที่เพียงพอต่อความต้องการของปลากระพงขาวที่เลี้ยงระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด (RAS) ในส่วนการศึกษาต้นทุนผลตอบแทนและวิธีการเพิ่มผลผลิตด้วยการเพิ่มออกซิเจนที่เหมาะสมในการผลิตปลากระพงขาวด้วยระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด (RAS) พบว่า บ่อที่เพิ่มออกซิเจนด้วยเครื่องเติมแบบท่ออย่างยืดหยุ่น 400 วัตต์ จำนวน 2 ตัว จะได้กำไรสูงสุดที่ 40,624 บาท/รอบการเลี้ยง แสดงให้เห็นว่าการเลี้ยงปลากระพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนเหมาะสมสำหรับการเลี้ยงในเชิงพาณิชย์

คำสำคัญ : เครื่องเติมอากาศ, ออกซิเจน, ความหนาแน่น, ปลากระพงขาว, การเลี้ยงระบบน้ำหมุนเวียน



Title	EFFECT OF DENSITIES ON DISSOLVED OXYGEN CONCENTRATIONS IN SEA BASS PONDS CULTURED WITH RECIRCULATING AQUACULTURE SYSTEM (RAS)
Author	Mr. Sarun Haemwan
Degree	Master of Science in Fisheries Technology and Aquatic Resources
Advisory Committee Chairperson	Associate Professor Dr. Niwooti Whangchai

ABSTRACT

Fish culture using recirculating aquaculture system (RAS) is a very popular system due to getting the higher fish density. However, farmers have to consider the suitability of oxygenation in the rearing ponds. The objective of this research was to evaluate the oxygenated efficiency of the aerators in pond reared seabass (*Lates calcarifer*) in fresh water by the air pump with flexible diffuser tube and ejector venturi on using 1 or 2 set. The changes of K_La value of each aerator were investigated in the 3-ton plastic ponds. The result revealed that the air pump with flexible diffuser tube provided the most effective in oxygen transfer rate ($p < 0.05$) ($K_La = 0.0609 \text{ min}^{-1}$) compared to ejector venturi aerator 1 or 2 set ($K_La = 0.0321 \text{ min}^{-1}$ and 0.0519 min^{-1} respectively). Air pump with flexible diffuser tube was installed in 60 ton recirculating aquaculture system (RAS) pond for testing the changes of DO with 3 level densities at densities of 10.9, 15.5 and 20.5 kg/m^3 (300 g fish weight) and Large sizes (620 g fish weight) at densities of 11.0, 16.7 and 21.2 kg/m^3 . It was found that after the second meal feeding, DO levels were lower than 3 milligrams /liter of all densities. Therefore, an adequate oxygenation system should be available for the requirements of the RAS-cultured sea bass. For the study of costs and return, RAS installed 2 set of air pumps with flexible diffuser tube (400 W) could get the highest profit (40,624 baht/crop). It was indicated that the sea bass cultivation in a recirculating water system is suitable for commercial farming.

Keywords : Efficiency of aerators, Oxygen, Densities, Seabass, RAS



กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นิรุฒิ หวังชัย ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ให้คำแนะนำในการวางแผนการทดลองตลอดจนสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์สำหรับการดำเนินงาน จนกระทั่งทำงานทดลองสำเร็จ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนลุล่วงไปด้วยดีและขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนกันต์ จิตมนัส กรรมการที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดมลักษณ์ สมพงษ์กรรมการที่ปรึกษาและรองศาสตราจารย์ ทิพสุคนธ์ พิมพ์พิมล ผู้ให้ความเมตตากรุณา ช่วยเหลือ สนับสนุนและให้คำแนะนำและช่วยแก้ปัญหา อุปสรรคต่าง ๆ สำหรับการทำให้วิทยานิพนธ์มาโดยตลอด ทั้งสละเวลาอันมีค่าในการตรวจแก้ไข วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รุ่งกานต์ กล้าหาญ สาขาเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ คณะ เทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ผู้ให้ความกรุณาเป็นประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณคณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่ได้ อนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่ในการทดลองและห้องปฏิบัติการ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการวิจัยในครั้งนี้รวมทั้ง ขอขอบคุณ บุคลากรทุกท่านในคณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำที่ให้ความช่วยเหลือใน ทุกๆ ด้าน สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และญาติพี่น้องที่ให้การเลี้ยงดูส่งเสริม การศึกษา ให้การสนับสนุนทั้งด้านการเรียนและการดำเนินชีวิต ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และเป็น กำลังใจที่ดีจนทำให้ผู้เขียนประสบความสำเร็จในการศึกษา

ศรัณย์ เหมวัน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร.....	3
ชีววิทยาของปลากะพงขาว.....	3
ลักษณะทั่วไป.....	3
แหล่งที่พบ.....	4
การแพร่กระจาย.....	4
อาหารและการกินอาหาร.....	5
การแยกเพศ.....	5
การผสมพันธุ์และวางไข่.....	5
คุณภาพน้ำที่เหมาะสม.....	6
ราคาที่เกษตรกรจำหน่าย.....	7
สถานการณ์การค้าต่างประเทศ.....	7

การนำเข้า.....	7
การส่งออก	7
รูปแบบการเลี้ยงปลากะพงขาว	8
การเลี้ยงในบ่อดิน	8
การเลี้ยงในกระชัง	8
การเลี้ยงสัตว์น้ำโดยระบบน้ำหมุนเวียน (Recirculating aquaculture systems, RAS).....	9
ข้อได้เปรียบในการเลี้ยงด้วยระบบ RAS.....	10
หลักการทำงานของระบบน้ำหมุนเวียน (Recirculating aquaculture systems, RAS).....	10
การกรองตะกอน (Mechanical filtration tank)	12
การบำบัดทางชีวภาพ	13
ระบบฆ่าเชื้อ (Disinfection)	15
การเติมออกซิเจน (O ₂) ปรับสมดุลสารละลายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	15
ระบบเติมอากาศ	16
ออกซิเจน.....	18
แหล่งที่มาของออกซิเจนในน้ำ	19
สาเหตุทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำลดลง	19
การขาดออกซิเจนในบ่อเลี้ยง.....	20
ความสำคัญของออกซิเจน	21
ความสัมพันธ์ระหว่างการใช้ออกซิเจนในวัฏจักรเครบส์	21
กระบวนการเติมอากาศ (Aeration process).....	22
ทฤษฎี "Two film theory"	24
การถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen transfer).....	25
ขั้นตอนของการถ่ายเทออกซิเจนจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลวหรือการเติมอากาศ... ..	25
ปัจจัยที่มีผลต่อการเติมอากาศ	26

การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน	27
แนวคิดที่เกี่ยวข้องกับต้นทุน	29
ความหมายของต้นทุน	29
แนวคิดที่เกี่ยวข้องกับผลตอบแทน	30
1. ความหมายของผลตอบแทน	30
2. การวิเคราะห์การวิเคราะห์การลงทุนและผลตอบแทนจากการลงทุนของโครงการ.....	31
วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ทางการเงิน	32
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	39
สถานที่ดำเนินการทดลอง	39
อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	39
อุปกรณ์การทดลองระบบออกซิเจน	39
อุปกรณ์การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนในระบบ RAS	39
อุปกรณ์การเลี้ยงปลากระพงขาวในระบบ RAS.....	40
อุปกรณ์วิเคราะห์หาลักษณะคุณสมบัติของน้ำ	40
วิธีการดำเนินงาน	41
การทดลองที่ 1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศในการเพิ่มออกซิเจนละลายน้ำ ให้กับบ่อปลากะพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน ด้วยเครื่องเติมอากาศ แบบท่ออย่าง ยืดหยุ่นและเครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์	41
การทดลองที่ 2 เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนที่ให้อากาศด้วยเครื่องเติม อากาศในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน ในระดับความหนาแน่น ที่ แตกต่างกัน	46
การทดลองที่ 3 เพื่อศึกษาต้นทุนผลตอบแทนและวิธีการเพิ่มผลผลิตด้วยการเพิ่มออกซิเจนที่ เหมาะสมในการผลิตปลากะพงขาวด้วยระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด (RAS)	49
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	55

การทดลองที่ 1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศในการเพิ่มออกซิเจนละลายน้ำให้กับบ่อปลากระพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน ด้วยเครื่องเติมอากาศแบบพวยงยืดหยุ่นและเครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์.....	55
1.1 การเติมออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศ	55
1.2 ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ของเครื่องเติมอากาศทั้ง 3 แบบ	56
การทดลองที่ 2 เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนที่ให้อากาศด้วยเครื่องเติมอากาศในบ่อเลี้ยงปลากระพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด ในระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกัน.....	59
2.1 การเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจน อุณหภูมิและการกินอาหาร	59
การทดลองที่ 3 การศึกษาวิธีการเพิ่มผลผลิตด้วยการเพิ่มออกซิเจนที่เหมาะสมในการผลิตปลากระพงขาวด้วยระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด (RAS).....	64
3.1 อัตราการเจริญเติบโตของปลากระพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด	64
3.2 คุณภาพน้ำของปลากระพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด	67
3.3 ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในระบบการเลี้ยงแบบ RAS1 และ RAS2 ในระยะเวลา 3 เดือน	72
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	78
สรุปผลการศึกษา.....	78
ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป	78
บรรณานุกรม.....	79
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ก ภาพการทำวิจัย	88
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่.....	97
ประวัติผู้วิจัย.....	99

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าปลากะพงขาว ปี 2561-2562.....	7
ตารางที่ 2 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกปลากะพงขาว ปี 2561-2562.....	8
ตารางที่ 3 ปริมาณก๊าซต่าง ๆ ในบรรยากาศ.....	23
ตารางที่ 4 ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่จุดอิ่มตัว (มิลลิกรัม/ลิตร).....	23
ตารางที่ 5 รายละเอียดการเตรียมปลากะพงขาวที่ระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกัน บ่อขนาด 60 ตัน.....	48
ตารางที่ 6 วิธีการและเครื่องมือตรวจสอบคุณภาพน้ำ	53
ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทน	54
ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์การเติมออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศทั้ง 3 แบบ.....	55
ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ค่าไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ของเครื่องเติม อากาศทั้ง 3 แบบ	57
ตารางที่ 10 การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจน อุณหภูมิ และปริมาณอาหารที่กินต่อ วัน ในบ่อปลากะพงขาวที่เลี้ยงแบบหนาแน่นที่แตกต่างกันในบ่อขนาด 60 ตัน.....	60
ตารางที่ 11 การเจริญเติบโตของปลากะพงขาวในระบบ RAS ทั้ง 2 รูปแบบ ระยะเวลา 3 เดือน... 65	65
ตารางที่ 12 คุณภาพน้ำของปลากะพงขาวที่เลี้ยงในระบบ RAS ทั้ง 2 รูปแบบ เวลา 3 เดือน.....	72
ตารางที่ 13 ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในระบบการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ ในระยะเวลา 3 เดือน	73
ตารางที่ 14 การเจริญเติบโตของปลากะพงขาวในระบบ RAS ทั้ง 2 รูปแบบ ระยะเวลา 7 เดือน... 74	74
ตารางที่ 15 ต้นทุนคงที่การผลิตปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด RAS 1 และ RAS 2 ในรอบการผลิต ระยะเวลา 7 เดือน.....	74
ตารางที่ 16 ต้นทุนผันแปรที่การผลิตปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด RAS 1 และ RAS 2 ในรอบการผลิต ระยะเวลา 7 เดือน	75
ตารางที่ 17 ข้อมูลราคาปลากะพงขาว (อ้างอิงราคาตลาดไท ส.ค. 2563 -พ.ย. 2563)	75
ตารางที่ 18 ข้อมูลผลผลิต ราคาขาย รายได้ ต้นทุน ของ RAS ที่น้ำหนัก 600-800 กรัม.....	76

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ลักษณะทั่วไปของปลากระพงขาว.....	4
ภาพที่ 2 หลักการทำงานของระบบหมุนเวียน การบำบัดน้ำขึ้นพื้นฐานระบบประกอบด้วยการกรอง เชิงกลการบำบัดทางชีวภาพและการเติมอากาศ การติดตั้งเพิ่มเติม เช่น การเพิ่มออกซิเจน	11
ภาพที่ 3 บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำรูปแบบต่าง ๆ	12
ภาพที่ 4 องค์ประกอบหลักของระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียน.....	12
ภาพที่ 5 ถังกรองตะกอน (Mechanical filtration tank).....	13
ภาพที่ 6 ถังกรองชีวภาพถังที่ 1 (Moving-bed bioreactor tank).....	14
ภาพที่ 7 ถังกรองชีวภาพถังที่ 2 (Fixed-bed bioreactor tank).....	14
ภาพที่ 8 ระบบฆ่าเชื้อ (Ultraviolet filter).....	15
ภาพที่ 9 ถังปรับสมดุล CO ₂ และ O ₂	16
ภาพที่ 10 โรงเรือนระบบปิด	16
ภาพที่ 11 ระบบเติมอากาศ	17
ภาพที่ 12 ขั้นตอนการใช้ออกซิเจนในวัฏจักรเครบส์	22
ภาพที่ 13 การถ่ายเทมวลสารตามทฤษฎี “Two film theory”	24
ภาพที่ 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำกับเวลา	28
ภาพที่ 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_s - C_t)$ กับเวลา เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทออกซิเจน	29
ภาพที่ 16 เครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่น (400 วัตต์).....	41
ภาพที่ 17 การเคลื่อนที่ของน้ำและฟองอากาศของระบบอีเจคเตอร์.....	42
ภาพที่ 18 เครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ (250 วัตต์).....	42
ภาพที่ 19 รูปแบบการวางเครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่นเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่น (A) และอีเจคเตอร์ (B) พร้อมเซนเซอร์วัดออกซิเจน.....	43
ภาพที่ 20 อุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ	44
ภาพที่ 21 อุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) อุณหภูมิแบบ PT100.....	45
ภาพที่ 22 บ่อเลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) โรงเรือนระบบปิด	47
ภาพที่ 23 ปลากระพงขาวน้ำหนักเฉลี่ย 300 และ 600 กรัม/ตัว.....	47

ภาพที่ 24	เครื่องมือวัดคุณภาพน้ำรุ่น (Multifunction meter CX – 461ELMETRON).....	48
ภาพที่ 25	ระบบการให้อากาศของบ่อ RAS 1 เครื่องให้อากาศจำนวน 1 ตัว และ RAS 2 เครื่องให้อากาศจำนวน 2 ตัว.....	49
ภาพที่ 26	ขนาดบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียน RAS	50
ภาพที่ 27	ระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียน RAS	50
ภาพที่ 28	การคำนวณระบบบำบัดแอมโมเนีย (อาหาร 1 กก. ผลิตแอมโมเนีย (TAN) 36.8 กรัม)	51
ภาพที่ 29	ปลากะพงขาวที่ใช้ในการทดลองทั้ง 3 รอบของการทดลอง เป็นปลาจากฟาร์มเอกชน ที่อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี	51
ภาพที่ 30	น้ำมันกานพลู.....	52
ภาพที่ 31	ค่าออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (DO) ของเครื่องเติมอากาศทั้ง 3 แบบ	56
ภาพที่ 32	ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ของเครื่องเติมอากาศทั้ง 3 แบบ.....	58
ภาพที่ 33	การเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าที่ใช้ในระบบการเติมอากาศ สำหรับทดสอบค่า K_La	58
ภาพที่ 34	การเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวขนาด 300 กรัม ที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน ในระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกัน 3 ระดับ	62
ภาพที่ 35	การเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวขนาด 300 กรัม ที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน ในระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกัน 3 ระดับ	62
ภาพที่ 36	การเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวขนาด 620 กรัม ที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน ในระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกัน 3 ระดับ	63
ภาพที่ 37	การเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวขนาด 620 กรัม ที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน ในระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกัน 3 ระดับ	63

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยได้ประสบปัญหาในเรื่องของภัยธรรมชาติ ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยเฉพาะปัญหาอุทกภัยและภัยแล้ง ส่งผลให้เกษตรกรเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้รับความเดือดร้อน และยังมีปัญหาในด้านการทำประมงที่จำกัดจำนวนเรือที่ออกทำการจับสัตว์น้ำ ส่งผลให้มีปริมาณสัตว์น้ำเข้าสู่ตลาดมีน้อย ทำให้ราคาอาหารทะเลสูงขึ้นและบางส่วนต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นการทำฟาร์มเลี้ยงสัตว์น้ำแบบลดความเสี่ยงจึงเป็นทางเลือกในการรักษาความมั่นคงของอาหาร โดยเฉพาะพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และพื้นที่ภาคเหนือตอนบน พบว่ามีความจำเป็นต้องนำนวัตกรรมมาใช้เพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิตเพื่อยกระดับในการเลี้ยงปลาให้มีคุณภาพ การเพิ่มผลผลิตนั้นสามารถเพิ่มได้ด้วยการเพิ่มความหนาแน่นในการเลี้ยงแบบน้ำหมุนเวียนซึ่งเป็นระบบการเลี้ยงที่ยั่งยืนในอนาคต (Jeffery et al., 2011)

ในปัจจุบันปลาที่สามารถเลี้ยงในน้ำจืดได้และเป็นที่ยอมรับในการรับประทานได้แก่ ปลากะพงขาว จากข้อมูลสถิติกรมประมง ในปี พ.ศ. 2560 พบว่าในประเทศไทยมีฟาร์มที่ทำการเพาะเลี้ยงปลากะพงขาว จำนวน 7,550 ฟาร์ม มีปริมาณผลผลิตถึง 20,453.88 ตัน มูลค่า 2,636.01 ล้านบาท โดยมีวิธีการเลี้ยงอยู่สองแบบ คือการเลี้ยงในบ่อดินและการเลี้ยงในกระชัง (นเรศ, 2562) โดยการเลี้ยงทั้งสองวิธีจะมีความเสี่ยงจากสภาพอากาศและสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง ทำให้ได้ผลผลิตไม่แน่นอน ส่งผลทำให้การเลี้ยงไม่ประสบความสำเร็จ (พายุ, 2554)

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบน้ำหมุนเวียน (Recirculating aquaculture system, RAS) เป็นระบบที่ได้รับความนิยมมากเนื่องจากสามารถเลี้ยงปลาแบบหนาแน่นสูงได้และลดความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ (นิวุฒิ และคณะ, 2563) ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสำเร็จของการเลี้ยงแบบ RAS คือการจัดการคุณภาพน้ำ โดยเฉพาะค่าออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen) เนื่องจากการลดลงของออกซิเจนละลายน้ำขึ้นอยู่กับ ความหนาแน่นของสัตว์น้ำที่เลี้ยงสูง จะมีอัตราการใช้ออกซิเจนก็จะมากตามไปด้วย ทำให้ออกซิเจนลดลง ปริมาณออกซิเจนที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรต่ำกว่า 3 มิลลิกรัม/ลิตร (Boyd, 1982) และ (ภรณ์ยู และยงยุทธ, 2558) ได้ทดลองการใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการเลี้ยงปลาทะเลความหนาแน่นสูงและพบว่า การเพิ่มออกซิเจนในน้ำโดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์มีต้นทุนที่สูงมาก

เนื่องจากในพื้นที่ทางภาคเหนือเป็นเมืองท่องเที่ยวและมีการบริโภคปลากะพงขาวเป็นจำนวนมากซึ่งเป็นที่ต้องการของตลาดดังนั้นเพื่อให้พื้นที่ทางภาคเหนือได้มีการเลี้ยงปลากะพงขาว จึงควรมีการพัฒนาการเลี้ยงให้เหมาะสมบ่อเลี้ยงเชิงพาณิชย์ที่เลี้ยงสัตว์น้ำในความหนาแน่นสูงต้องมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำให้เพียงพอและมีต้นทุนที่เหมาะสมจึงมีความจำเป็นต้องศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศและการเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนในบ่อปลากะพงขาวที่เลี้ยงแบบหนาแน่นในระบบน้ำหมุนเวียนในเขตภาคเหนือที่เหมาะสม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศในการเพิ่มออกซิเจนละลายน้ำให้กับบ่อปลากะพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน ด้วยเครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่นและเครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์
2. เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนที่ให้อากาศด้วยเครื่องเติมอากาศในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน ในระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกัน
3. เพื่อการศึกษาต้นทุนผลตอบแทนและวิธีการเพิ่มผลผลิตด้วยการเพิ่มออกซิเจนที่เหมาะสมในการผลิตปลากะพงขาวด้วยระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด (RAS)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นต้นแบบระบบการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด (RAS)
2. พัฒนาระบบการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนให้มีคุณภาพที่ดี
3. ทราบถึงวิธีการจัดการระบบออกซิเจนให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น
4. สร้างความรู้และเพิ่มศักยภาพของเกษตรกรต้นแบบด้วยระบบ RAS เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในเขตพื้นที่ภาคเหนือ

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

ชีววิทยาของปลากะพงขาว

ลักษณะทั่วไป

ปลากะพงขาว มีลักษณะลำตัวค่อนข้างยาวและหนา แขนงข้างเล็กน้อย บริเวณไหล่โค้งมน ส่วนตัวลาดชันและเว้า ส่วนของขากรรไกรล่างยื่นยาวกว่าขากรรไกรบนเล็กน้อย ปากกว้าง ขอบปากบนเป็นแผ่นใหญ่ แยกเป็นแนวตอนต้นและตอนท้ายอย่างชัดเจน บริเวณส่วนปากยึดหดได้บ้าง ช่องปากเฉียงลงด้านล่างเล็กน้อย มีฟันเล็กละเอียดบนขากรรไกรบนและล่างและที่เพดานปาก ฟันเป็นฟันเขี้ยวอยู่บนขากรรไกรบนและล่าง ขอบกระดูกแก้มเป็นหนามแหลม ขอบกระดูกกระพุ้งเหงือกแข็งและคม คอดหางมีขนาดใหญ่และแข็งแรง เกล็ดใหญ่มีขอบหยักเป็นหนามเมื่อลูบจะสากมือ ครีบหลังอันแรกมีก้านครีบ เป็นหนามแข็ง ปลายแหลม อันที่สองเป็นครีบอ่อนมีขนาดใกล้เคียงกัน ครีบใหญ่ ปลายกลมมน ฟันลำตัวสีขาวเงินปนน้ำตาล แนวสันท้องสีขาวเงิน มีขนาดความยาวประมาณ 20-40 เซนติเมตร พบใหญ่สุดถึง 2 เมตร หนักได้ถึง 60 กิโลกรัม โดยปลาที่พบในทะเลจะมีขนาดใหญ่กว่าปลาที่พบในน้ำจืด ตาของปลาชนิดนี้มีขนาดกลาง ไม่มีเยื่อที่เป็นไขมันหุ้ม แผ่นปิดเหงือกมีขนาดใหญ่ มีขอบหลังเป็นหนามแหลม 4 ซี่ และเรียงต่อกันด้วยซี่เล็ก ๆ จัดตามแนวหลัง ด้านบนส่วนหัว และบนแผ่นเหงือก มีเกล็ดขนาดต่าง ๆ กัน เกล็ดบริเวณลำตัวค่อนข้างใหญ่ ด้านหลังมีสีเทาเงินหรือเขียวปนเทา ส่วนท้องมีสีเงินแกมเหลือง บริเวณด้านข้างของลำตัวมีสีเงิน ครีบหลัง ครีบกัน ครีบหาง จะมีสีเทาปนดำบาง ๆ มีครีบหลัง 2 ตอน ตอนแรกอยู่ตรงตำแหน่งของครีบท้อง มีก้านครีบแข็ง ที่แหลมคมขนาดใหญ่ 7-8 ก้าน เชื่อมต่อกันด้วยเยื่อบาง ๆ ครีบหลังตอนที่ 2 แยกจากตอนแรกอย่างเห็นได้ชัด มีก้านครีบแข็ง 1 ก้าน ก้านครีบอ่อนมีปลายแตกแขนง มี 10-11 ก้าน ครีบหูและครีบอกยาว ไม่ถึงรูกัน ครีบกันมีตำแหน่งใกล้เคียงกับครีบหลังตอนที่ 2 ซึ่ง ประกอบด้วยก้านครีบแข็ง 3 ก้าน ก้านครีบอ่อน 7-8 ก้าน ข้องหางสั้น ครีบหางค่อนข้างกลมเส้นข้างตัว โค้งไปตามแนวสันหลัง มีเกล็ดบนเส้นข้างตัว 52-61 เกล็ด (ริฎวาน, 2558) (ภาพที่ 1)

ปลากะพงขาว มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Lates calcarifer* และชื่อเรียกเป็นภาษาอังกฤษ คือ seabass เป็นปลาน้ำกร่อยที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ ปลากะพงขาว เป็นปลาที่เลี้ยงง่าย โตเร็ว มีความทนทานต่อความเค็มในช่วงกว้าง (Euryhaline) สามารถเลี้ยงได้ในพื้นที่น้ำจืด (FAO, 2013) ขนาดที่พบ โดยทั่วไปปลากะพงขาวอาศัยในแหล่งน้ำจืด จะมีรูปร่างสั้นและหนากว่าปลาน้ำเค็มที่มีรูปร่างยาวเรียว ฉะนั้นปลากะพงในน้ำจืดจะมีน้ำหนักมากกว่าปลากะพงในน้ำเค็มเมื่อมีความยาว

เท่า ๆ กัน ปลากระพงขาวมีขนาดใหญ่ที่สุดเท่าที่ปรากฏมีน้ำหนักประมาณ 30 กิโลกรัม ซึ่งไม่ปรากฏพบบ่อยนัก ขนาดปลาที่พบเสมอ ๆ มีน้ำหนักตัว 5-10 กิโลกรัม (สวัสดี และสุจินต์, 2522) และมีความยาวประมาณ 20-40 เมตร ปลากระพงที่พบในแหล่งน้ำจืดมักเป็นปลาขนาดเล็กกว่าพวกที่พบตามแหล่งน้ำเค็มหรือน้ำกร่อย



ภาพที่ 1 ลักษณะทั่วไปของปลากะพงขาว
ที่มา: เกตุนภัส (2561)

แหล่งที่พบ

ปลากะพงขาวเป็นปลาน้ำกร่อยขนาดใหญ่ สามารถอาศัยอยู่ได้ทั้งในน้ำจืด น้ำกร่อย และน้ำเค็ม สำหรับในประเทศไทยพบปลากะพงขาวแพร่กระจายอยู่ทุกจังหวัดชายทะเลทั้งในอ่าวไทยและฝั่งทะเลอันดามัน จะอาศัยอยู่ในแหล่งน้ำที่ไม่ห่างไกลออกไปจากชายฝั่งมากนักโดยอาศัยอยู่ชุกชุมตามปากแม่น้ำ ลำคลอง และปากทะเลสาบ นอกจากนี้ปลากะพงขาวยังสามารถขึ้นไปอาศัยและเจริญเติบโตในแหล่งน้ำจืดได้อีกด้วย จึงจัดเป็นปลาประเภทสองน้ำ มีการอพยพย้ายถิ่นระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็มอยู่เสมอ โดยเฉพาะเมื่อมีความสมบูรณ์ทางเพศต้องอพยพไปสู่อ่าวปากแม่น้ำและทะเลเพื่อสืบพันธุ์วางไข่ต่อไป โดยธรรมชาติปลากะพงขาวเป็นปลาที่ปราดเปรียว ว่องไว ว่ายน้ำรวดเร็วสามารถกระโดดพ้นน้ำได้สูงขณะตกใจหรือไล่เหยื่อ มีนิสัยชุกชอนอยู่ตามซุ่ม ก่อ หลัก โป๊ะ หรือกองหินใต้น้ำ และออกหากินในบริเวณที่มีกระแสน้ำอ่อน ปลาขนาดใหญ่มักไม่รวมฝูง นอกจากฤดูผสมพันธุ์จะรวมเป็นกลุ่มเล็ก ๆ (กรมประมง, 2544)

การแพร่กระจาย

ถิ่นอาศัย ปลากะพงเป็นปลาที่มีการแพร่กระจายในภูมิภาคเขตอบอุ่นถึงเขตร้อน คือปรากฏพบปลากะพงขาวอาศัยอยู่ตั้งแต่บริเวณตอนใต้ของประเทศจีนจนถึงอ่าวเปอร์เซีย และยังพบแพร่กระจายตามหมู่เกาะต่าง ๆ ได้แก่ ฟิลิปปินส์ บอร์เนียว ซาราวัก นิวกินี อินโดนีเซีย และ ซीलอน จึงเป็นปลาที่รู้จักกันแพร่หลายในภูมิภาคแถบนี้ (สวัสดี และสุจินต์, 2522) สำหรับในประเทศไทย

พบว่าปลากะพงขาวจะแพร่กระจายอยู่ทุกจังหวัดที่มีชายฝั่งทะเลทั้งในอ่าวไทยและอันดามัน จะอาศัยอยู่ในแหล่งน้ำที่ไม่ห่างไกลออกไปจากชายฝั่งมากนัก (กรมประมง, 2536) โดยอาศัยอยู่ชุกชุมบริเวณชายฝั่งทะเลแม่น้ำ และปากแม่น้ำซึ่งเป็นแหล่งน้ำจืดและน้ำกร่อย อธิบายได้ดังนี้

บริเวณน้ำจืด ได้แก่บริเวณที่ราบลุ่มหรือแอ่งน้ำริมทะเล ที่น้ำทะเลท่วมถึงเมื่อน้ำขึ้นสูงสุด รวมถึงป่าชายเลน ในนาข้าวซึ่งสายน้ำติดต่อกันในฤดูฝน บริเวณดังกล่าวมีสภาพเป็นน้ำจืดหรือค่อนข้างกร่อย มีค่าความเค็มของน้ำตั้งแต่ 1.0-20.0 ส่วนในพันส่วน บริเวณนี้จะปรากฏพบลูกปลาขนาดเล็กถึงลูกปลาขนาดกลาง หรือมีความยาวประมาณ 0.5-20.0 เซนติเมตร

บริเวณน้ำกร่อย ได้แก่บริเวณแม่น้ำลำคลอง ทะเลสาบ ซึ่งมีสาขาคือติดต่อกับทะเลภายนอก มีระดับน้ำลึกและมีค่าความเค็มสูงกว่าบริเวณแรก เป็นลักษณะแหล่งน้ำกร่อยซึ่งมีค่าความเค็มเฉลี่ยระหว่าง 20-30 ส่วนในพันส่วน บริเวณนี้จะปรากฏพบปลากะพงขาวขนาดกลางถึงปลาขนาดวัยรุ่น หรือขนาดความยาว 20-50 เซนติเมตร (สวัสต์ และสุจินต์, 2522)

อาหารและการกินอาหาร

อาหารของปลากะพงขาวตามธรรมชาติเป็นเหยื่อมีชีวิตทั้งสิ้น จึงจัดเป็นปลาประเภทกินเนื้อหรือกินสัตว์อื่นเป็นอาหาร ได้แก่ ปลาขนาดเล็กชนิดต่าง ๆ กุ้ง และปู ปลากะพงขาวขนาดเล็กมีนิสัยดีกว่าปลาขนาดใหญ่ มักรวมฝูงล่าเหยื่อและมีนิสัยกินกันเอง หรือกินตัวที่เล็กกว่าหรืออ่อนแอกว่า แต่นิสัยดังกล่าวจะค่อย ๆ เลิกไปเองเมื่อมันเติบโตขึ้นจนสามารถนำมาเลี้ยงรวมฝูงจนเชื่องได้ รวมทั้งสามารถฝึกให้กินอาหารที่ตายแล้ว เช่น เศษปลา หรือปลาเบ็ดได้ดี และไม่สนใจเหยื่อมีชีวิตอีกต่อไป (อลงกรณ์, 2547)

การแยกเพศ

สถานีประมงศรีราชา ฝ่ายสนับสนุนวิชาการ คณะประมง (2546) ได้กล่าวถึงการแยกเพศไว้ดังนี้ ปลากะพงขาวเป็นปลาที่สังเกตเพศได้ยาก แต่ก็สามารถสังเกตเพศได้จากลักษณะภายนอกของตัวปลา โดยปลาเพศผู้จะมีลักษณะลำตัวยาวเรียวกว่าเพศเมีย ลำตัวมีส่วนลึกที่น้อยกว่าปลาเพศเมีย และมีน้ำหนักตัวน้อยกว่าปลาเพศเมียที่มีขนาดลำตัวยาวเท่ากัน ในปลาเพศเมียนั้น เมื่อถึงฤดูวางไข่ในช่วงเดือน พฤษภาคม-กันยายน ส่วนท้องจะอวบป่อง สังเกตได้ชัดเจน เมื่อเวลาเอามือคลำที่ท้องจะมีไข่ไหลออกมา

การผสมพันธุ์และวางไข่

ฤดูผสมพันธุ์และวางไข่ ปลากะพงขาวจะเจริญเติบโตเป็นปลาสมบูรณ์เพศเมื่อมีขนาดความยาวประมาณ 50 เซนติเมตร หรือน้ำหนักตัวประมาณ 3.0 กิโลกรัม ส่วนขนาดปลาที่สามารถสืบพันธุ์วางไข่ได้มีอายุไม่น้อยกว่า 3.5 ปี และโดยทั่วไปปลาเพศเมียขนาดผสมพันธุ์มักมีขนาดใหญ่และอายุ

มากกว่าปลาเพศผู้ ปลากระพงขาวที่มีไข่และน้ำเชื้อสมบูรณ์ดีจะพบในปลาขนาดความยาว 70-100 เซนติเมตร หรือมีน้ำหนักตัวระหว่าง 7.0-10.0 กิโลกรัม แม่ปลากระพงขาวขนาดนี้จะมีความคอกของไข่ ประมาณ 3-5 ฟอง แต่เนื่องจากการสุกของไข่มีขึ้นไม่พร้อมกันทั้งรังไข่ จึงคาดว่าจะทำให้แม่ปลาวางไข่เป็นจำนวนหลายครั้ง ปริมาณไข่ที่วางในแต่ละครั้งจำนวน 2-4 แสนฟอง แล้วแต่ขนาดแม่ปลา ไข่ปลากระพงขาวเมื่อรับการผสมจากเชื้อตัวผู้แล้วจะลอยน้ำ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร

ตามธรรมชาติปลากระพงขาวจะวางไข่ก่อนถึงฤดูฝนเล็กน้อย ฤดูการวางไข่ตรงกับเดือนมีนาคมถึงเดือนมิถุนายน ในท้องที่ภาคใต้ฝั่งตะวันตก และในระหว่างเดือนกรกฎาคมถึงเดือนตุลาคม ในท้องที่ชายทะเลฝั่งอ่าวไทย ความแตกต่างนี้เกิดขึ้นเพราะอิทธิพลฤดูมรสุมทั้งสองครั้งในรอบปี ฤดูผสมพันธุ์จะเริ่มขึ้นประมาณกลางฤดูร้อน พ่อแม่ปลาขนาดใหญ่มีไข่และน้ำเชื้อเติบโตถึงขั้นจะเดินทางจากแหล่งน้ำจืด สู่อ่างน้ำกร่อยไปอาศัยในทะเลชายฝั่ง และจะคงอยู่ในทะเลจนถึงฤดูวางไข่ ก็จะอพยพกลับเข้ามายังปากแม่น้ำ หรือปากทะเลสาบ ซึ่งในระยะนี้ระดับน้ำภายในสูงขึ้น ความแรงของกระแสน้ำเพิ่มขึ้น แล้วจะผสมพันธุ์กันบริเวณปากแม่น้ำหรือเขตติดต่อกับทะเลซึ่งน้ำมีระดับลึก ไหลแรง และมีความเค็มปานกลาง หรือมีค่าระหว่าง 25-32 ส่วนในพัน ในการผสมพันธุ์พ่อแม่ปลาจะรวมฝูงกันที่ระดับกลางน้ำ อัตราส่วนเพศแม่ปลา 1 ตัวต่อพ่อปลาจำนวน 3-5 ตัว ช่วงการผสมพันธุ์มักเป็นขณะน้ำทะเลเริ่มไหลขึ้นเวลาผสมพันธุ์ระหว่าง 19.00-22.00 น. ของระยะกลางเดือนและปลายเดือน การฟักเป็นตัวของไข่ใช้เวลา 16-18 ชั่วโมง ลูกปลากระพงขาวเมื่อแรกฟักเป็นตัวจากไข่จะมีขนาดความยาว 1.2 มิลลิเมตร ลอยตัวที่ผิวตามกระแสน้ำเข้าไปอาศัยในบริเวณแอ่งน้ำชายฝั่งถัดจากทะเลเข้าไปรวมทั้งบริเวณป่าเลนที่น้ำทะเลท่วมถึง (สวัสดี และสุจินต์, 2522)

คุณภาพน้ำที่เหมาะสม

ค่าความเค็ม บริเวณน้ำจืดที่ค่าความเค็มที่เหมาะสมตั้งแต่ 0-20.0 ppm และบริเวณน้ำกร่อย ค่าความเค็มระหว่าง 20-30 ppm

อุณหภูมิ ปกติอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงและอนุบาลลูกปลาเฉลี่ย 27°C ถ้าอุณหภูมิสูงถึง 30°C หรือ 31°C ลูกปลาจะกินอาหารมาก ว่ายน้ำกระวนกระวาย ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 24°C ลูกปลาจะไม่ค่อยกินอาหารและทำให้อ่อนแอเกิดโรคแทรกได้ง่าย

ปลาจะเจริญเติบโตไม่ดีถ้ามีออกซิเจนต่ำเป็นเวลานาน โดยทั่วไปในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจะมีค่าออกซิเจนไม่ควรต่ำกว่า 3 มิลลิกรัม/ลิตร (ยุพิน, 2560)

จำกัดปริมาณแอมโมเนียอิสระไม่ให้เกิน 0.025 ppm เพื่อมิให้เป็นพิษต่อปลา สภาพต่างของน้ำมีผลกระทบต่อความเป็นพิษของแอมโมเนีย บ่อปลาที่มีสภาพต่างในน้ำสูงย่อมปลอดภัยจากพิษของแอมโมเนียได้ดีกว่าบ่อที่มีสภาพต่างต่ำกว่า (มันสิน และไพพรรณ, 2536)

ราคาที่เกี่ยวข้องกรณีจำหน่าย

ในช่วง 3 เดือนแรกของปี 2562 ปลากะพงขาวที่เกษตรกรจำหน่าย ขนาด 500-800 กรัม/ตัว มีราคาเฉลี่ย 146.33 บาท/กิโลกรัม เพิ่มขึ้นจากปี 2561 ร้อยละ 5.93 (เฉลี่ย 138.14 บาท/กิโลกรัม) ความต้องการของตลาดยังคงมีมากในช่วงต้นปี เนื่องจากมีวันหยุดนักขัตฤกษ์ในช่วงเดือน ม.ค.-ก.พ. จึงทำให้ราคามีแนวโน้มปรับตัวสูงขึ้นแต่หลังจากผ่านพ้นช่วงดังกล่าวจะมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้การปรับตัวขึ้นลงของราคาหน้าฟาร์มจะขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิต (นเรศ, 2562)

สถานการณ์การค้าต่างประเทศ

การนำเข้า

ประเทศไทยนำเข้าปลากะพงขาวในรูปสดแช่เย็น สดแช่แข็ง และแปรรูป ในช่วง 3 เดือนแรกของปี 2562 มีปริมาณ 2,195.49 ตัน มูลค่า 141.59 ล้านบาท ปริมาณและมูลค่าเพิ่มขึ้น 48.04% และ 28.57%ตามลำดับ เมื่อเทียบกับปี 2561 โดยมีสัดส่วนมูลค่าการนำเข้าจากประเทศต่าง ๆ ได้แก่ มาเลเซีย (88.27%) อินโดนีเซีย (5.65%) ไต้หวัน (3.94%) จีน (1.23%) และประเทศอื่น ๆ (0.01%) เนื่องจากราคาปลากะพงขาวจากมาเลเซีย มีราคาถูกกว่าราคาหน้าฟาร์มในประเทศ และมีระยะทางขนส่งที่ไม่ไกล จึงมีการนำเข้าจากประเทศนี้เป็นส่วนใหญ่ (นเรศ, 2562) รายละเอียดแสดงในตาราง (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าปลากะพงขาว ปี 2561-2562

การนำเข้า	ปริมาณ		%	มูลค่า		%
	2561	2562		เปลี่ยนแปลง	2561	
แช่เย็น	1,336.94	2,013.70	+50.62	99.67	126	+26.42
แช่แข็ง	146.05	172.64	+18.21	10.46	15.34	+46.65
แปรรูปอื่น ๆ	-	9.15	-	-	0.25	-
รวมทั้งหมด	1,482.99	2,195.49	+48.04	110.13	141.59	+28.57

ที่มา: นเรศ (2562)

การส่งออก

ประเทศไทยส่งออกปลากะพงขาวในรูปสดแช่เย็น สดแช่แข็ง และแปรรูป ในช่วง 3 เดือนแรกของปี 2562 มีปริมาณ 337.02 ตัน มูลค่า 21.51 ล้านบาท ปริมาณเพิ่มขึ้น 12.84% แต่มูลค่าลดลง 16.17% เมื่อเทียบกับ ปี 2561 โดยมีสัดส่วนมูลค่าการส่งออกไปประเทศต่าง ๆ ได้แก่ เมียน

มาร์ (58.23) สหรัฐอาหรับเอมิเรตส์ (14.09%) ญี่ปุ่น (8.73%) กัมพูชา (6.62%) สิงคโปร์ (5.25%) สหรัฐอเมริกา (3.59%) ซาอุดีอาระเบีย (1.54%) เลบานอน (0.98%) และประเทศอื่น ๆ (0.97%) (นเรศ, 2562) รายละเอียดแสดงในตาราง (ดังตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกปลากระพงขาว ปี 2561–2562

การส่งออก	ปริมาณ		%	มูลค่า		%
	2561	2562		เปลี่ยนแปลง	2561	
แช่เย็น	242.43	261.84	+8.01	15.27	14.11	-7.60
แช่แข็ง	30.34	60.00	+97.76	5.95	5.44	-8.57
แปรรูปอื่น ๆ	25.91	15.18	-41.41	4.44	1.94	-55.86
รวมทั้งหมด	298.67	337.02	+12.84	25.66	21.51	-16.17

ที่มา: นเรศ (2562)

รูปแบบการเลี้ยงปลากระพงขาว

โดยทั่วไปจะมีการเลี้ยงอยู่ 2 แบบ ได้แก่

การเลี้ยงในบ่อดิน

บ่อควรมีขนาดไม่ต่ำกว่า 1 ไร่ ลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อให้ง่ายต่อการเก็บผลผลิต ความลึกไม่ต่ำกว่า 1.5 เมตร อยู่ใกล้กับแหล่งน้ำธรรมชาติและสภาพน้ำต้องสะอาดปราศจากสารพิษ ยาฆ่าแมลงหรือของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและมีปริมาณน้ำที่มากเพียงพอเพื่อใช้ในการเลี้ยง ควรมีระบบสาธารณูปโภค เช่น น้ำ ไฟฟ้า และควรอยู่ในจุดที่การคมนาคมสะดวก เพื่อให้สามารถลำเลียงผลผลิตปลาได้อย่างสะดวก (สวัสดี และสุจินต์, 2522)

การเลี้ยงในกระชัง

ควรมีระดับน้ำลึกพอประมาณพื้นกระชังควรอยู่สูงจากพื้นดินใต้น้ำไม่ควรต่ำกว่า 1 เมตร และควรห่างจากตลิ่งพอสมควรเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดมู้อับในการไหลหรือการระบายของน้ำ ไม่ควรติดตั้งกระชังซ้อนกันหลายใบ ควรมีช่องว่างเพื่อให้การไหลระบายของน้ำ และควรติดตั้งกระชังในแนวขวาง เพื่อให้เกิดเปลี่ยนถ่ายน้ำในกระชังอยู่ตลอดเวลา (สวัสดี และสุจินต์, 2522)

การเลี้ยงสัตว์น้ำโดยระบบน้ำหมุนเวียน (Recirculating aquaculture systems, RAS)

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำหมุนเวียนเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยการนำน้ำกลับมาใช้ในการผลิต เทคโนโลยีนี้มีพื้นฐานมาจากการใช้ตัวกรองเชิงกลและเชิงชีวภาพสามารถนำไปใช้กับสัตว์น้ำที่เพาะเลี้ยงเช่นปลา กุ้ง หอย และอื่น ๆ การใช้ระบบหมุนเวียนน้ำ มีการพัฒนาในหลายพื้นที่ของภาคการเลี้ยงปลาและระบบนี้จะถูกนำไปใช้ในหน่วยการที่มีขนาดใหญ่ที่เพาะเลี้ยงปลาเป็นจำนวนมากต่อปีเพื่อใช้สำหรับการบริโภค (Bregnballe, 2015)

จากมุมมองด้านสิ่งแวดล้อมในเรื่องของการจำกัดปริมาณน้ำที่ใช้ในระบบน้ำหมุนเวียน จัดว่าเป็นประโยชน์แน่นอน เนื่องจากน้ำได้กลายเป็นทรัพยากรที่มีจำกัดในหลายภูมิภาค นอกจากนี้การใช้น้ำที่จำกัด ทำให้ต้นทุนถูกลงมากขึ้น การเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบน้ำหมุนเวียนแม้ว่ามันจะเป็นไปได้ที่จะหลีกเลี่ยงการปล่อยของเสียออกจากฟาร์ม เช่น กากตะกอนและน้ำทั้งหมด แต่การบำบัดน้ำเสียในระดับการเลี้ยงเชิงพาณิชย์นั้น มักเป็นเรื่องที่ทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง ที่จะทำความสะอาดอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นควรมีการวางแผนในเรื่องของการเลี้ยงและการให้อาหารอย่างเหมาะสม

การเลี้ยงปลาแบบธรรมชาตินั้นขึ้นอยู่กับสภาวะภายนอก เช่น อุณหภูมิของสภาพอากาศ คุณภาพในแหล่งน้ำที่เพาะเลี้ยง ระดับออกซิเจนในแหล่งน้ำหรือวัชพืชอื่น ๆ ทำให้มีการจัดและควบคุมคุณภาพได้ยาก

ระบบน้ำหมุนเวียนทำให้ผู้เลี้ยงปลาสามารถควบคุมพารามิเตอร์ทั้งหมดในการผลิตได้อย่างสมบูรณ์และทักษะของผู้เลี้ยงในการใช้งานระบบหมุนเวียนนั้นมีความสำคัญเท่ากับในการดูแลสัตว์น้ำการควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิของน้ำ ระดับออกซิเจนต่อวัน ควรมีการจัดการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำซึ่งทำให้เกิดความเครียดน้อยลงส่งผลต่อเจริญเติบโตได้ดีขึ้น และส่งผลให้เกิดรูปแบบการเติบโตที่มั่นคงและคาดการณ์ล่วงหน้าได้ ทำให้เกษตรกรสามารถมีการวางแผนในการตลาดได้ดีขึ้น ข้อได้เปรียบที่สำคัญนี้คือ สามารถวางแผนการผลิตที่แม่นยำและสามารถคาดการณ์เวลาที่แน่นอนสำหรับการขายปลาได้ (Bregnballe, 2015)

อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งคือโรค พบว่าผลกระทบของเชื้อก่อโรคจะลดลงอย่างมากในระบบน้ำหมุนเวียน เนื่องจากโรคที่แพร่กระจายจากสภาพแวดล้อมภายนอกจะถูกลดลงโดยการใช้น้ำที่มีปริมาณจำกัด ซึ่งมีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคน้อยที่สุดในความเป็นจริงระบบการหมุนเวียนน้ำถ้ามีการจัดการที่เหมาะสมจะไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการเกิดโรค

ข้อดีของระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียน (RAS) คือ สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมได้ตลอดการเลี้ยง สัตว์น้ำที่เลี้ยงจึงมีความแข็งแรง มีอัตราการรอดสูง และมีการเจริญเติบโตที่ดี ทำให้ได้ผลผลิตต่อพื้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการเลี้ยงในบ่อดินหรือกระชัง และสามารถเลี้ยงสัตว์น้ำได้ตลอดทั้งปี นอกจากนี้ยังช่วยลดความเสี่ยงจากการปนเปื้อนด้วยเชื้อก่อโรคต่าง ๆ ลดปริมาณน้ำ

ในการผลิตและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยน้ำทิ้ง จึงนับว่าการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบปิดมีความจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่งต่ออนาคตของอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำภายในประเทศ ข้อดีอื่น ๆ ของระบบนี้คือ ระบบการเพาะเลี้ยงแบบปิดนี้พัฒนาขึ้น เพื่อให้มีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของประเทศไทย และสามารถติดตั้งระบบการเพาะเลี้ยงนี้ที่ใดก็ได้ภายในประเทศไทย ไม่มีข้อจำกัดในเรื่องภูมิประเทศ ส่งผลทำให้คุณภาพและปริมาณสินค้า (ปลา) ที่ได้มีความคงที่ ทำให้เกิดรายได้และอาชีพของเกษตรกรเพาะเลี้ยงที่มั่นคงและยั่งยืน (นิวุฒิ และทิพสุคนธ์, 2561)

ข้อได้เปรียบในการเลี้ยงด้วยระบบ RAS

1. เป็นระบบการเพาะเลี้ยงแบบปิดครบวงจรที่มีประสิทธิภาพ ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม สามารถลดความเสี่ยงจากความไม่แน่นอนทางธรรมชาติ ที่สร้างความเสียหายให้แก่ระบบเพาะเลี้ยงแบบเดิม
 2. ใช้พื้นที่น้อย และสามารถติดตั้งระบบในที่ใดก็ได้ และระบบนี้สามารถคำนวณต้นทุนการผลิตในแต่ละรอบของการเลี้ยงได้
 3. เป็นการเลี้ยงครบวงจรตั้งแต่แรกเกิดจนสามารถนำไปบริโภคได้
 4. ผลผลิตต่อเนื่องทำให้สนองต่อความต้องการของตลาด เนื่องจากเป็นการเพาะเลี้ยงระบบปิดไม่มีผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อม
 5. ผลผลิตที่ได้เป็นผลผลิตปลาเกรดพรีเมียม เนื่องจากไม่มีกลิ่นโคลน
- อย่างไรก็ตามการเลี้ยงในระบบการเพาะเลี้ยงแบบปิด ต้องใช้บุคลากรผู้ควบคุมระบบที่มีความรู้เพียงพอ (Skill labor) ในการดูแล การลงทุนในขั้นต้นสูง ความต้องการของตลาดปลากะพงขาวยังมีแนวโน้มความต้องการบริโภคเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และปัจจุบันภายในประเทศยังไม่มีการผลิตและจำหน่ายระบบการเพาะเลี้ยงแบบปิดเช่นนี้มาก่อน (นิวุฒิ และคณะ, 2561)

หลักการทำงานของระบบน้ำหมุนเวียน (Recirculating aquaculture systems, RAS)

ในระบบหมุนเวียนน้ำจำเป็นต้องบำบัดน้ำอย่างต่อเนื่องเพื่อกำจัดของเสียที่ถูกขับออกจากปลาและเพิ่มออกซิเจนเพื่อให้ปลามีชีวิตอยู่ได้ และมีการเจริญเติบโตที่ดี ในความเป็นจริงระบบการหมุนเวียนมีรูปแบบการทำงานไม่ซับซ้อน โดยเริ่มจากน้ำในบ่อเลี้ยงสูบไปที่ถังกรองตะกอนเมื่อน้ำที่ผ่านการกรองแล้วจะเข้าสู่ระบบกรองชีวภาพก่อนที่จะถูกเติมอากาศเพื่อปรับสมดุลคาร์บอนไดออกไซด์และกลับสู่อบ่อเลี้ยง นี่คือนักการพื้นฐานของการหมุนเวียน สามารถเพิ่มอุปกรณ์อื่น ๆ ได้หลายอย่าง เช่น การเติมออกซิเจนด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์เครื่องฆ่าเชื้อด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) หรือการฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนการควบคุมค่าพีเอช (pH) อัตโนมัติ (ภาพที่ 2)

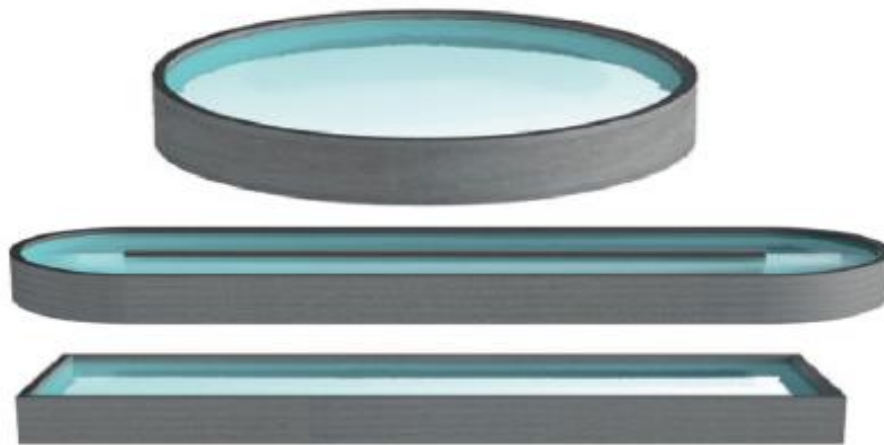


ภาพที่ 2 หลักการทำงานของระบบหมุนเวียน การบำบัดน้ำขั้นพื้นฐานระบบประกอบด้วยการกรองเชิงกลการบำบัดทางชีวภาพและการเติมอากาศ การติดตั้งเพิ่มเติมเช่นการเพิ่มออกซิเจนหรือการฆ่าเชื้อโรคด้วย UV สามารถเพิ่มได้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนด
ที่มา: Bregnballe (2015)

ในบ่อเลี้ยงปลาต้องมีการให้อาหารวันละหลายครั้ง ซึ่งอาหารที่ปลากินจะเกิดการย่อยเปลี่ยนเป็นพลังงานเพื่อไปใช้ในการเจริญเติบโตและไปใช้ในกระบวนการทำงานต่าง ๆ ในร่างกาย

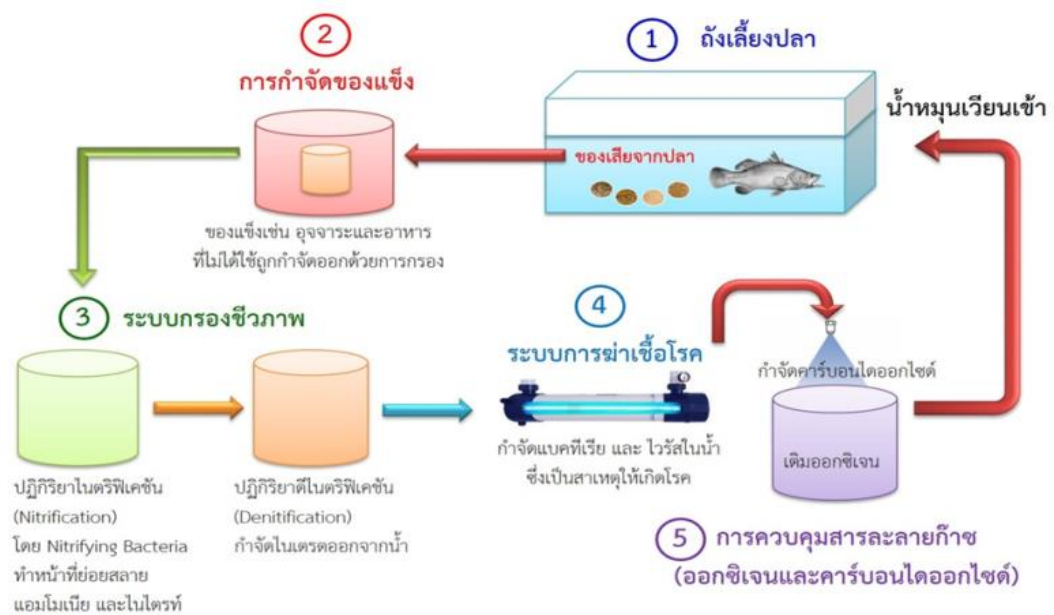
ออกซิเจน (O_2) จะผ่านเข้าสู่เหงือกและเป็นสิ่งจำเป็นในการสร้างพลังงาน และแอมโมเนีย (NH_3) ถูกผลิตออกมาเป็นของเสีย ประกอบอาหารที่ไม่ได้ย่อยจะถูกขับออกมาในน้ำในรูปของเสีย ซึ่งจะมีสารแขวนลอย (SS) และสารอินทรีย์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนียถูกขับออกจากเหงือกลงไปในน้ำ ดังนั้นภายในบ่อเลี้ยงปลาจึงจำเป็นต้องให้ออกซิเจนและปริมาณอาหารที่เหมาะสมเพื่อทำให้น้ำในระบบมีของเสียที่น้อยที่สุด ในระบบหมุนเวียนควรให้อาหารเม็ดทั้งหมด เนื่องจากจะช่วยลดปริมาณสิ่งขับถ่ายลงช่วยลดผลกระทบต่อระบบบำบัดน้ำ (Bregnballe, 2015)

การเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบน้ำหมุนเวียนบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำอาจมีรูปร่างแตกต่างกัน เช่น บ่อกลม บ่อสี่เหลี่ยม และ race way (ภาพที่ 3) ขนาดของบ่อขึ้นอยู่กับ ขนาดของปลา ความหนาแน่นของปลาที่เลี้ยง และระบบบำบัดน้ำ การทำงานเริ่มจากการกำจัดของแข็งโดยการกรองน้ำจากบ่อเลี้ยงปลา ระบบกรองแบบชีวภาพเพื่อลดความเป็นพิษของแอมโมเนีย และระบบการควบคุมการละลายของก๊าซ เพื่อเติมเติมอากาศเพื่อปรับสมดุลคาร์บอนไดออกไซด์ ระบบบำบัดน้ำจะทำงานอย่างต่อเนื่อง ทำให้อุณหภูมิ น้ำดีเหมาะต่อการดำรงชีวิตของปลาตลอดระยะเวลาการเลี้ยง ซึ่งจะทำให้สามารถเลี้ยงปลาในความหนาแน่นที่สูงได้ (นิวุฒิ และคณะ, 2561) องค์ประกอบหลักของระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียน (Recirculating aquaculture systems, RAS) (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 3 บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำรูปแบบต่าง ๆ
ที่มา: Bregnballe (2015)

แผนภาพระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียน มหาวิทยาลัยแม่โจ้



ภาพที่ 4 องค์ประกอบหลักของระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบน้ำหมุนเวียน
ที่มา: นิวุฒิ และคณะ (2561)

การกรองตะกอน (Mechanical filtration tank)

การกรองตะกอนจากน้ำที่สูบออกจากบ่อเลี้ยงเป็นวิธีการกำจัดของเสียภายในบ่อ ในปัจจุบันฟาร์มปลาเกือบทั้งหมดจะกรองตะกอนโดยใช้ถังกรองขนาด 40 ถึง 100 ไมครอน ซึ่งนิยมใช้กันมากที่สุด

ในบ่อจะถูกปั้มน้ำส่งผ่านมาที่บ่อกรองตะกอนเป็นลำดับแรก (ภาพที่ 5) โดยภายในบ่อจะมีแผ่นกรองทำจากไฟเบอร์ที่มีรูพรุน น้ำที่จะผ่านเข้าสู่ถังกรอง โดยใช้ระบบน้ำล้นในการกรอง ของแข็งจะถูกขังอยู่ในถังกรองและจมอยู่ภายในก้นถังโดยการตกตะกอนจากนั้นทำการมาใช้ประโยชน์ในการเกษตรรูปแบบอื่น ๆ ที่สามารถสร้างมูลค่าได้ เช่น การปลูกพืชหรือการเลี้ยงสัตว์อื่น ๆ (Bregnballe, 2015)

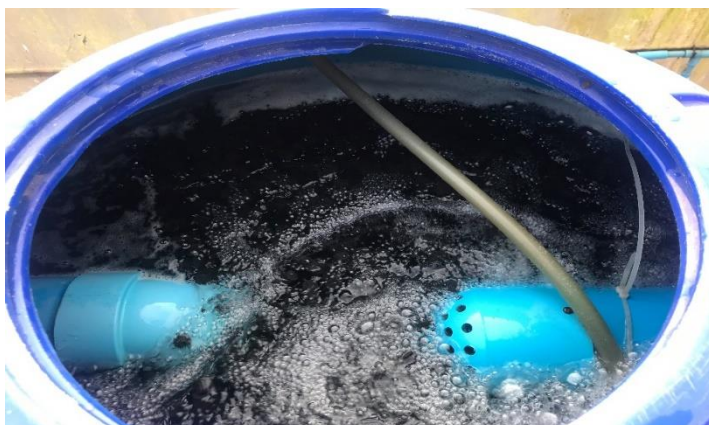


ภาพที่ 5 ถังกรองตะกอน (Mechanical filtration tank)

การบำบัดทางชีวภาพ

ถังบำบัดทางชีวภาพ (Biological filtration Tank) จะประกอบไปด้วยถัง 2 ถัง ดังนี้

สารอินทรีย์บางชนิดจะถูกกำจัดออกไปในถังกรองตะกอน เช่น ฟอสเฟต และไนโตรเจน ฟอสเฟตเป็นสารที่ไม่มีพิษ แต่ไนโตรเจนในรูปแบบของแอมโมเนียอิสระ (NH_3) ซึ่งจะเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ การสลายตัวของสารอินทรีย์และแอมโมเนียเป็นกระบวนการทางชีวภาพ โดยการใช้แบคทีเรียในถังกรองชีวภาพ แบคทีเรียกลุ่ม เฮเทอโรโทรฟิกแบคทีเรีย ในส่วนถังที่ 1 (Moving - bed bioreactor tank) จะใส่เม็ดพลาสติกขนาดเล็กที่ทำเป็นรูปแฉก เพื่อสร้างพื้นที่ให้แบคทีเรียที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนเตรต และในที่สุดก็กลายเป็นไนเตรตที่ไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ (ภาพที่ 6) ภายในถังมีระบบลมให้อากาศผ่านลงในถังเพื่อให้เม็ดพลาสติกมีการเคลื่อนที่ ซึ่งจะช่วยให้แบคทีเรียทำงานในสภาวะที่มีออกซิเจนได้เต็มประสิทธิภาพที่สุด ประสิทธิภาพของการกรองชีวภาพขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิของน้ำ และระดับ pH



ภาพที่ 6 ถังกรองชีวภาพถังที่ 1 (Moving - bed bioreactor tank)

เพื่อให้ได้การบำบัดที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด อุณหภูมิของน้ำควรอยู่ในช่วง 10-35 °C (สูงสุดประมาณ 30 °C) และระดับ pH ระหว่าง 7 ถึง 8 การปรับเพื่อให้ได้การบำบัดที่ดีที่สุด จะส่งผลให้ระดับที่เหมาะสมสำหรับการเติบโตของสัตว์น้ำ การควบคุมค่า pH มีส่วนที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของการกรองชีวภาพนั้นมีความสำคัญเนื่องจากระดับค่า pH ที่ต่ำกว่าจะลดประสิทธิภาพของการกรองชีวภาพ ดังนั้นค่า pH จึงควรไว้ที่สูงกว่า 7.0 เพื่อให้ได้แบคทีเรียทำงานได้ดี แนะนำคือระหว่าง pH 7.0 และ pH 7.5 (Bregnballe, 2015)

ในส่วนถังกรองชีวภาพถังที่ 2 (Fixed-bed bioreactor tank) (ภาพที่ 7) น้ำจากถังที่ 1 จะไหลไปยังถังบำบัดที่ 2 ซึ่งภายในถังจะมีเม็ดพลาสติกขนาดเล็กเช่นถังที่ 1 แต่ในถังที่ 2 นี้จะไม่มี การเติมอากาศในถัง ในถังนี้จะเป็นการบำบัดของเสียไนโตรเจน (ไนเตรท) จากถัง 1 เปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนได้ ต้องให้มีการไหลของน้ำตลอดในช่วงบำบัดน้ำ และต้องมีออกซิเจนไม่ต่ำกว่า 1 มิลลิกรัม/ลิตร หากไม่มีออกซิเจนจะเกิดการผลิตไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซึ่งเป็นพิษอย่างยิ่งต่อปลา ส่งผลให้มีกากตะกอนค่อนข้างสูง ควรมีการทำความสะอาดสัปดาห์ละครั้ง



ภาพที่ 7 ถังกรองชีวภาพถังที่ 2 (Fixed-bed bioreactor tank)

ระบบฆ่าเชื้อ (Disinfection)

น้ำจากถังกรองชีวภาพถังที่ 2 จะถูกปั้มน้ำให้ไหลผ่านไปยังระบบฆ่าเชื้อโรคด้วย UV (Ultraviolet filter) (ภาพที่ 8) การฆ่าเชื้อโรคด้วยแสง UV ทำงานโดยการใช้แสงในช่วงความยาวคลื่นที่ทำลาย DNA ในสิ่งมีชีวิตที่มาจากกรกรองชีวภาพหรือแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ



ภาพที่ 8 ระบบฆ่าเชื้อ (Ultraviolet filter)

ปริมาณรังสียูวีสามารถแสดงได้ในหลาย ๆ หน่วย หนึ่งในการใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดคือไมโครวัตต์-วินาทีต่อ cm^2 ($\mu\text{Ws} / \text{cm}^2$) ประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของสิ่งมีชีวิตเพื่อที่จะควบคุมแบคทีเรียและไวรัส น้ำจำเป็นต้องได้รับการบำบัดอย่างคร่าว ๆ 2,000 ถึง 10,000 $\mu\text{Ws} / \text{cm}^2$ เพื่อฆ่าเชื้อให้ได้ 90% ความเข้มแสง 10,000-100,000 และในกำจัดปรสิตขนาดเล็กจะต้องใช้ความเข้มแสง 50,000-200 000 $\mu\text{Ws} / \text{cm}^2$

การเติมออกซิเจน (O_2) ปรับสมดุลสารละลายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

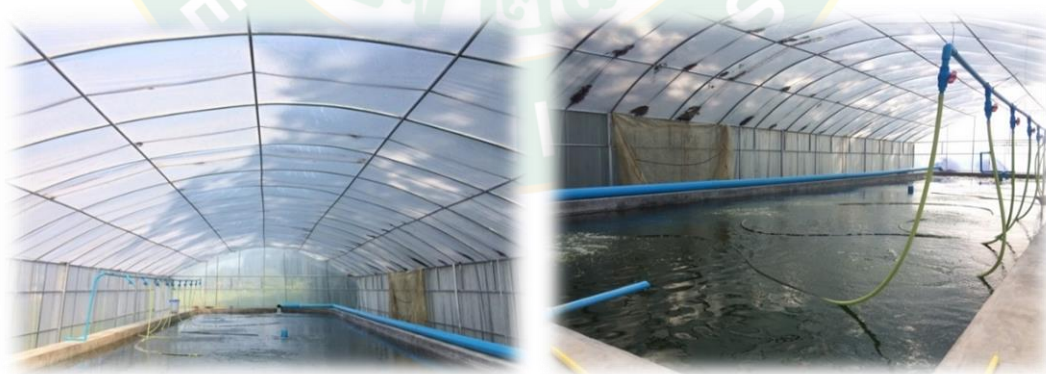
ถังปรับสมดุลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจน น้ำจากระบบฆ่าเชื้อจะไหลเข้าสู่ถัง โดยจะไหลผ่านท่อทางด้านบนของถังเพื่อเป็นการเพิ่มออกซิเจนจากอากาศ และให้สารละลายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกกำจัดไปได้ จากนั้นน้ำจากถังนี้จะไหลเข้าสู่ท่อที่นำน้ำเข้าสู่บ่อเลี้ยง (ภาพที่ 9)



ภาพที่ 9 ถังปรับสมดุล CO₂ และ O₂

กระบวนการเติมออกซิเจนเป็นกระบวนการทางกายภาพ โดยการเพิ่มออกซิเจนบางส่วนให้กับน้ำผ่านการแลกเปลี่ยนง่าย ๆ ระหว่างก๊าซในน้ำและก๊าซในอากาศขึ้นอยู่กับระดับของออกซิเจนในน้ำ ความสมดุลของออกซิเจนในน้ำคือ 100% เมื่อน้ำผ่านบ่อเลี้ยงปลา ปริมาณออกซิเจนจะลดลงโดยทั่วไปลดลงเหลือ 70% และจะถูกลดปริมาณลงในถังกรองชีวภาพต่อไป โดยทั่วไปการเติมน้ำจะทำให้มีออกซิเจนกลับคืนมาประมาณ 90%

นอกจากนี้การติดตั้งโดมพลาสติกเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิน้ำให้เหมาะสมต่อการกินอาหารซึ่งจะนำไปสู่การมีอัตราการเจริญเติบโตที่สูงขึ้น อุณหภูมิน้ำที่เหมาะสมคือ 27-31 °C (ภาพที่ 10)



ภาพที่ 10 โรงเรือนระบบปิด

ระบบเติมอากาศ

การให้อากาศในบ่อเลี้ยงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากเพื่อให้ในบ่อปลามีออกซิเจนที่เพียงพอสำหรับการดำรงชีพและออกซิเจนยังทำให้ระบบกรองทำงานได้เต็มที่ จุลินทรีย์สามารถกำจัดของเสีย

ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระดับออกซิเจนที่เหมาะสมคือ 3-9 ppm คุณภาพน้ำดีขึ้น และสัตว์น้ำมีสุขภาพแข็งแรง เพื่อนำน้ำในบ่อหมุนเวียนกลับไปใช้ใหม่ได้โดยผ่านตัวกรองของเสีย และยังแก้ปัญหาสภาพแวดล้อมที่ไม่อาจนำน้ำจากแหล่งธรรมชาติมาทำการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้



ภาพที่ 11 ระบบเติมอากาศ

Martins et al. (2010) ได้เปรียบเทียบการเลี้ยงปลาเทราท์ด้วยวิธีการเลี้ยงแบบบ่อน้ำไหล และการเลี้ยงในระบบปิด โดยเปรียบเทียบการใช้พลังงานเทียบกับน้ำหนักปลาที่ได้ พบว่าการเลี้ยงแบบบ่อน้ำไหลใช้พลังงาน 10-12 kWh/kg ในขณะที่การเลี้ยงปลาในระบบปิดใช้พลังงาน 15-20 kWh/kg แต่ให้อัตรการเจริญเติบโตและน้ำหนักของปลาเทราท์สูงกว่าการเลี้ยงแบบบ่อน้ำไหล โดยมี FCR ของการเลี้ยงในระบบปิดมีค่าเท่ากับ 0.86 ในขณะที่การเลี้ยงแบบบ่อน้ำไหลมีค่า FCR เท่ากับ 1.06 ซึ่งค่าใช้จ่ายด้านอาหารจะสูงกว่าค่าพลังงาน จึงทำให้การเลี้ยงแบบระบบปิดจะคุ้มค่ามากกว่า

การเลี้ยงปลาในระบบปิด สำหรับประเทศไทย (ยงยุทธ และคณะ, 2551) สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง ทดลองเลี้ยงปลากะพงระบบปิดที่ความหนาแน่น 20 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร อัตรารอดเฉลี่ย 98.5 เปอร์เซ็นต์ โดย FCR 5.75 ซึ่งพบว่าต้นทุนการผลิตยังสูงอยู่

ในปัจจุบันมีการพัฒนาประสิทธิภาพของการเลี้ยงปลาในระบบปิดเพิ่มขึ้น ปัจจัยที่ทำให้ปลาสามารถเจริญเติบโตได้ดีคือคุณภาพน้ำและการจัดการในระหว่างช่วงการเลี้ยง โดย Zhang et al. (2010) ทดลองเลี้ยงปลาดุกทำการควบคุมคุณภาพน้ำในรูปแบบต่าง ๆ และเก็บข้อมูลคุณภาพน้ำมาเปรียบเทียบกัน พบว่าในกรณีที่คุณภาพน้ำมีค่าที่ดีที่สุด ทำให้ FCR ต่ำ และมีการเจริญเติบโตสูงกว่าคุณภาพน้ำที่แย่ที่สุดของการทดลองถึง 30% นอกจากนี้ในบ่อที่มีคุณภาพน้ำที่ดีที่สุดเหมาะสมทำให้มีค่าอัตราการรอดสูง จึงสรุปได้ว่าการเลี้ยงในระบบปิดจะช่วยทำให้ปลาสามารถเติบโตได้ดี โดยมีคุณภาพน้ำเป็นปัจจัยทำให้ปลาสามารถเจริญเติบโตได้ดี ซึ่งคุณภาพน้ำที่ดีอาจต้องมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น เช่น การติดตั้งเครื่องเติมอากาศเพื่อรักษาปริมาณออกซิเจนให้คงที่สม่ำเสมอ เป็นผลทำให้ต้นทุนการเลี้ยงสูงตามไปด้วย ดังนั้นในอนาคตการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Badiola et al., 2018)

และประสิทธิภาพการเลี้ยงปลาในระบบปิดให้สูงขึ้น เพื่อเพิ่มความคุ้มค่าในการเลี้ยงด้วยการปรับปรุงวิธีการบำบัดน้ำประสิทธิภาพสูงด้วยอุปกรณ์ที่เป็นนวัตกรรมใหม่

ออกซิเจน

ออกซิเจนเป็นก๊าซที่มีความสำคัญในการดำรงชีวิตของคน สัตว์ และพืช เพราะต้องถูกนำไปใช้ในกระบวนการต่าง ๆ เพื่อก่อให้เกิดพลังงาน กระบวนการต่าง ๆ ที่ต้องการออกซิเจนเรียกว่า Aerobic process ออกซิเจนเป็นสิ่งจำเป็นในการย่อยสลายอาหารให้เป็นพลังงานโดยผ่านการหายใจ นอกจากนี้ยังจำเป็นต่อการย่อยสลายอินทรีย์สาร และปล่อยสารอาหารออกมาเป็นประโยชน์ในการสร้างอาหารธรรมชาติ เช่น แพลงก์ตอน ความเข้มข้นของ DO จึงมีผลสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ แม้ว่าในบรรยากาศมีก๊าซออกซิเจนประมาณ 21% แต่ก๊าซออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมาก สัตว์น้ำจึงต้องใช้พลังงานเพื่อการหายใจมากกว่าสัตว์บกเพื่อให้ได้ออกซิเจนเพียงพอต่อความต้องการความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซออกซิเจนขึ้นอยู่กับความกดดันของบรรยากาศ อุณหภูมิและความเค็มของน้ำ โดยก๊าซออกซิเจนละลายน้ำได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความเค็มของน้ำลดลง (ศรีสมร และจงกลณี, 2560)

ค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำจืดมีค่าอยู่ในช่วง 14.6 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ 0 °C และ 7 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ 35 °C ภายใต้ความดันบรรยากาศ 1 บรรยากาศ ซึ่งจะเห็นว่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความจริงข้อนี้มีความสำคัญมาก และความต้องการออกซิเจนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่ออกซิเจนที่ละลายน้ำจะน้อยลง

นอกจากก๊าซออกซิเจนจะได้มาจากการแพร่จากบรรยากาศลงสู่แหล่งน้ำ และจากปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ แหล่งน้ำแล้ว แหล่งที่สำคัญของก๊าซออกซิเจนในแหล่งน้ำยังมาจากการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืช ส่วนการหายใจของสิ่งมีชีวิตและกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์ที่เกิดจากจุลินทรีย์รวมทั้งการทำปฏิกิริยากับสารอนินทรีย์ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในน้ำทำให้แหล่งน้ำสูญเสียออกซิเจน (ศรีสมร และจงกลณี, 2560)

สาเหตุที่ทำให้แหล่งน้ำขาดออกซิเจน อาจเกิดจากผู้สร้าง คือ แพลงก์ตอนพืชตาย หรือลดลงหรือมีน้อย อาจเนื่องจากไม่มีแดดติดต่อกันหลายวัน น้ำขุ่นเพราะตะกอนดิน ขาดแร่ธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืช มีการใช้สารเคมีที่เป็นพิษต่อแพลงก์ตอนพืช หรือผู้ใช้น้ำมากเกินไป เช่น เกิดแลงก์ตอนบลูม (ศรีสมร และจงกลณี, 2560)

ในภาวะทั่วไป ช่วงเวลาเช้ามีค่าก่อนดวงอาทิตย์ขึ้นออกซิเจนละลายน้ำจะมีค่าต่ำสุด แล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในตอนกลางวันจนมีค่าสูงสุดในตอนบ่ายอันเนื่องจากการสังเคราะห์แสงของแพลงก์

ตอนพีช ส่วนในตอนกลางคืนไม่มีกระบวนการสังเคราะห์แสงเกิดขึ้น สิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ที่อาศัยอยู่ในน้ำมีแต่การใช้ ออกซิเจนเพื่อการหายใจ ทำให้ออกซิเจนค่อย ๆ ลดลงอีกครั้ง

อัตราการบริโภคออกซิเจนของสัตว์น้ำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน ขนาดของสัตว์น้ำ ระดับของกิจกรรม เวลาหลังจากการให้อาหาร และอื่น ๆ สัตว์น้ำขนาดเล็กใช้ออกซิเจนมากกว่าสัตว์น้ำขนาดใหญ่เมื่อวัดในน้ำหนักที่เท่ากัน (ศรีสมร และจงกลณี, 2560)

แหล่งที่มาของออกซิเจนในน้ำ

1. จากบรรยากาศโดยตรง เช่น กระแสลมพัดผ่านผิวน้ำ แต่มีปริมาณไม่มาก
2. จากกระบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ของพืชน้ำ เช่น แพลงก์ตอนพืชเป็นแหล่งให้ออกซิเจนในน้ำมากที่สุด ซึ่งตอนกลางวันพืชน้ำจะสังเคราะห์แสงผลิตออกซิเจนออกมาละลายในน้ำ
3. จากกระบวนการเคมีอื่น ๆ ในน้ำโดยแหล่งน้ำบางแหล่งมีแร่ธาตุทำปฏิกิริยากันทำให้เกิดออกซิเจนละลายในน้ำได้

สาเหตุทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำลดลง

1. จากการหายใจของสัตว์น้ำและพืชน้ำ
 2. จากการเน่าสลายของอินทรีย์วัตถุ เช่น แบคทีเรีย
 3. จากขบวนการทางเคมีหรือสารประกอบแร่ธาตุต่าง ๆ
 4. จากการหมุนเวียนของน้ำผสมกับน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำน้อยกว่า
- สัตว์น้ำและพืชน้ำใช้ออกซิเจนละลายน้ำเพื่อการหายใจ การควบคุมปริมาณพืชน้ำและแพลงก์ตอนจึงมีความจำเป็นเพื่อให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเพียงพอตลอดวัน การเน่าสลายของอินทรีย์วัตถุต่าง ๆ โดยแบคทีเรียที่ต้องการใช้ออกซิเจนอย่างเดียวเรียกว่า Biochemical oxygen demand (BOD) จะเป็นดัชนีในการแสดงว่าน้ำมีความเน่าเสียมากน้อยเพียงใด ถ้าปริมาณความต้องการออกซิเจนสูงมาก แสดงว่า ในน้ำมีอินทรีย์วัตถุเน่าสลายอยู่มาก โดยมีแบคทีเรียทำการย่อยสลายโดยทั่วไปปลาไม่สามารถทนอยู่ในน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่า 0.3 มิลลิกรัม/ลิตร หรือต่ำกว่า 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นเวลานานแต่ปลาบางชนิดมีความต้องการออกซิเจนต่ำและมีอวัยวะพิเศษช่วยในการหายใจ สามารถที่จะอยู่ได้ ดังนั้น ในการควบคุมป้องกันไม่ให้สัตว์น้ำได้รับอันตรายไม่ควรให้ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำต่ำกว่า 3 มิลลิกรัม/ลิตร หรือหากต่ำกว่านี้ควรเป็นระยะเวลาสั้นเพียง 2-3 ชั่วโมง (ศรีสมร และจงกลณี, 2560)

การขาดออกซิเจนในบ่อเลี้ยง

การขาดแคลนออกซิเจนในน้ำถึงแม้ไม่ต่ำถึงระดับทำให้ปลาตาย แต่อาจมีผลต่อการดำรงชีวิต สัตว์น้ำได้หลายประการ เช่น ปริมาณออกซิเจนต่ำกว่า 3 มิลลิกรัม/ลิตร ทำให้ระยะฟักไข่ของปลาช้ากว่าปกติ นอกจากนี้สัตว์น้ำขนาดเล็กอ่อนมีความแข็งแรงน้อยลง การเจริญเติบโตและต้านทานสารพิษน้อยลงไปด้วย แนวทางแก้ไขภาวะขาดแคลนออกซิเจนระยะสั้น ควรใช้เครื่องมือพ่นน้ำเป็นฝอยกระจายเพื่อดึงเอาออกซิเจนในบรรยากาศลงมา การป้องกันระยะยาวควบคุมปริมาณแพลงก์ตอนไม่ให้มีมากเกินไป โดยใช้วิธีวัดความโปร่งใส (Transparency) เป็นแผ่นไม้ทาสีขาวสลับดำหย่อนลงในน้ำ หากต่ำกว่า 30 ซม. แสดงว่ามีแพลงก์ตอนมากเกินไประยะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตช่วง 30-60 ซม. การลดปริมาณแพลงก์ตอนโดยการระบายน้ำออกจากบ่อประมาณหนึ่งในสามของปริมาณเดิม เอน้ำใหม่เข้าจากนั้นคอยควบคุมลดปริมาณอาหารและปุ๋ยที่ใส่ในบ่อ นอกจากนี้แพลงก์ตอนพืชชนิดสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue green algae) จะเกิดขึ้นในน้ำมีอุณหภูมิสูงช่วงฤดูร้อน แพลงก์ตอนชนิดนี้อาจตายพร้อมกันในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสลมสงบ ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำลดลงหรือสังเกตจากสีเขียวเป็นสีเทาหรือน้ำตาล แสดงว่าเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงชนิดแพลงก์ตอน ซึ่งต้องเฝ้าดูและตรวจสอบออกซิเจนในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำตลอด (ศรีสมร และจงกลณี, 2560)

ปลาที่อาศัยอยู่ในน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอมักจะว่ายน้ำเร็วกว่าปกติ กระจกวน กระจกววย กระจกโตออกมาจากบ่อหรืออาจจะว่ายน้ำอยู่บริเวณผิวน้ำและโผล่ปากขึ้นมาเหนือน้ำเพื่อสูบอากาศการขาดออกซิเจนในน้ำในบ่อเลี้ยงมักเกิดจากการเปลี่ยนน้ำไม่ดีพอหรือให้อาหารมากเกินไปอาหารที่เหลือจะเกิดการเน่าเปื่อยและใช้ออกซิเจนมากทำให้ออกซิเจนในน้ำลดลง นอกจากนี้การที่น้ำมีอุณหภูมิสูงจะมีผลช่วยเร่งปฏิกิริยาการเน่าเปื่อยของอาหารทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงอีกด้วยการใช้สารเคมีบางชนิดเพื่อรักษาโรค ทำให้เกิดภาวะการขาดออกซิเจน เช่น ฟอ์มาลีนและต่างทับทิม เป็นต้น

การป้องกันการขาดออกซิเจนในบ่อเลี้ยงทำได้โดยการดูแลความสะอาดของบ่อมีระบบการให้อากาศที่ดีและมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำอยู่เสมอโดยดูตุน้ำจากกันบ่อออกให้มากที่สุดเท่าที่ทำได้ นอกจากนี้ไม่ควรปล่อยปลาลงเลี้ยงหนาแน่นเกินไป

การวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำ เช่น ความเค็ม, ความเป็นกรดเป็นด่าง(pH) ความเป็นด่าง ความกระด้าง และปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ ฯลฯ พารามิเตอร์เหล่านี้เป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ดังนั้น การควบคุมและป้องกันคุณสมบัติของน้ำให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำจึงต้องสังเกตสัตว์น้ำและตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำอย่างสม่ำเสมอ (ศรีสมร และจงกลณี, 2560)

ความสำคัญของออกซิเจน

ออกซิเจนเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ การให้ออกซิเจนเสริมมีความจำเป็นในการรักษาสภาพการเจริญเติบโตของปลาให้อยู่ในระดับพอดี สัตว์น้ำต้องการปริมาณออกซิเจนเพื่อการหายใจ การบริโภคอาหาร ซึ่งปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำจะมีผลต่อการกินอาหาร การเจริญเติบโต และสุขภาพสัตว์น้ำ สัตว์น้ำเป็นสัตว์เลือดเย็น ทำให้ความต้องการการบริโภคออกซิเจนของสัตว์น้ำจะเปลี่ยนแปลงไปตาม ชนิด ขนาด อุณหภูมิ และกิจกรรมของปลา โดยอุณหภูมิในร่างกายปลาจะเปลี่ยนแปลงไปตามสิ่งแวดล้อมที่อาศัยอยู่ ดังนั้นหากอุณหภูมิในรอบวันมีการเปลี่ยนแปลงมากเกินไปจะทำให้ปลามีการปรับตัวตลอดเวลา อาจจะทำให้ปลากินอาหารได้น้อยลง (ศรีสมร และจกกลณี, 2560)

ความสัมพันธ์ระหว่างการใช้ออกซิเจนในวัฏจักรเครบส์

กระบวนการสลายสารอาหารเพื่อเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีซึ่งอยู่ในรูปของพันธะเคมี ให้มาอยู่ในรูปของพลังงานเคมีในสารประกอบพลังงานสูง เช่น ATP โดยแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

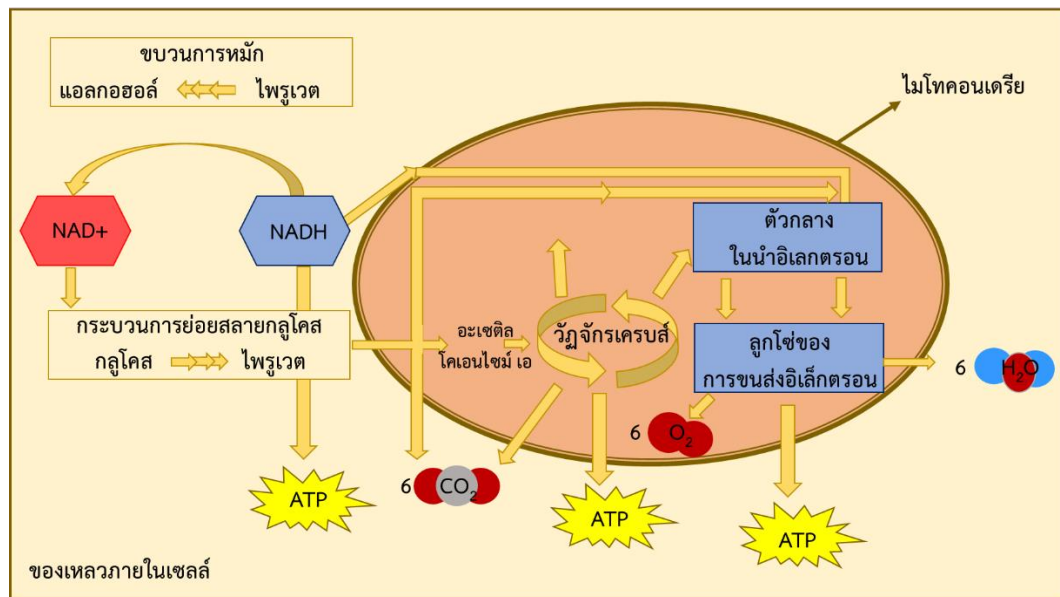
แบบใช้ออกซิเจน (Aerobic respiration) คือ มีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย

แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic respiration) คือ มีสารอื่นที่ไม่ใช้ออกซิเจน เป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย เช่น การหมัก

ในส่วนของออกซิเจนมีส่วนช่วยในเรื่องกระบวนการสร้างพลังงาน การสลายอาหาร หรือที่เรียกว่าการหายใจในระดับเซลล์แบบใช้ออกซิเจนของปลาเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ของร่างกาย ถ้าไม่มีออกซิเจนจะสร้าง ATP หรือพลังงานได้น้อยกว่า แบบใช้ออกซิเจน ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในการหายใจระดับเซลล์แบบใช้ออกซิเจน (อนุรุทธิ์, 2562) (ภาพที่ 12)

การหายใจระดับเซลล์แบบใช้ออกซิเจน ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก คือ

1. Glycolysis
2. การสร้าง Acetyl CoA
3. Krebs cycle
4. Electron transport system



ภาพที่ 12 ขั้นตอนการใช้ออกซิเจนในวัฏจักรเครบส์
ที่มา: ดัดแปลงมาจาก อนุสุทธิ (2560)

กระบวนการเติมอากาศ (Aeration process)

กระบวนการเติมอากาศ (Aeration process) กระบวนการเติมอากาศคือกระบวนการถ่ายเทออกซิเจนจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลวเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในของเหลวหรือน้ำให้สูงขึ้นเพื่อใช้ในการหายใจของสัตว์น้ำหรือใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลชีพในกระบวนการบำบัดน้ำเสียซึ่งปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำได้เป็นไปตามกฎของเฮนรี (Henry's law) (ตารางที่ 3-4)

กฎของเฮนรี (Henry's law) อธิบายปริมาณก๊าซที่สามารถละลายน้ำได้ ณ ที่จุดอิ่มตัวซึ่งเป็นก๊าซที่มีความสามารถในการละลายในน้ำได้น้อยโดยไม่เกิดปฏิกิริยากับน้ำมีความสัมพันธ์กับความดันของก๊าซในก๊าซผสมหรือปริมาณก๊าซนั้นในบรรยากาศเหนือผิวน้ำ (Partial pressure) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$C = K_h \cdot P$$

... 1

- C คือความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายน้ำ (โมล/ลิตร)
 K_h คือค่าคงที่ของ Harry (โมล/ลิตร-บรรยากาศ)
 P คือความดันย่อยของก๊าซในก๊าซผสม (Partial pressure: บรรยากาศ)

ตารางที่ 3 ปริมาณก๊าซต่าง ๆ ในบรรยากาศ

ก๊าซ	สูตรเคมี	ร้อยละโดยปริมาตร	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ไนโตรเจน	N ₂	78.03	75.47
ออกซิเจน	O ₂	20.99	23.18
อาร์กอน	Ar	0.94	1.30
คาร์บอนไดออกไซด์	CO ₂	0.33	0.05
อื่นๆ	-	0.1	-

หมายเหตุ: ก๊าซอื่น ๆ คือก๊าซที่มีปริมาณน้อยในบรรยากาศ ได้แก่ ไฮโดรเจน นีออน ฮีเลียม คริปทอน และซีนอน เป็นต้น

ที่มา: Metcalf and Eddy (2004)

ตารางที่ 4 ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่จุดอิ่มตัว (มิลลิกรัม/ลิตร)

อุณหภูมิ	ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่จุดอิ่มตัว (มิลลิกรัม/ลิตร)									
	ความดันบรรยากาศ (มม.ปรอท)									
	735	740	745	750	755	760	765	770	775	780
0 °C	14.12	14.22	14.31	14.41	14.51	14.60	14.70	14.80	14.89	14.99
5	12.33	12.42	12.50	12.59	12.67	12.76	12.84	12.93	13.01	13.10
10	10.90	10.98	11.05	11.13	11.20	11.28	11.35	11.43	11.50	11.58
15	9.73	9.80	9.87	9.94	10.00	10.07	10.14	10.21	10.27	10.34
20	8.77	8.83	8.89	8.95	9.02	9.08	9.14	9.20	9.26	9.32
25	7.96	8.02	8.08	8.13	8.19	8.24	8.30	8.36	8.41	8.47
30	7.28	7.33	7.38	7.44	7.49	7.54	7.59	7.64	7.69	7.75
35	6.69	6.74	6.79	6.84	6.89	6.93	6.98	7.03	7.08	7.13
40	6.18	6.23	6.27	6.32	6.36	6.41	6.46	6.50	6.55	6.59

ที่มา: Metcalf and Eddy (2004)

จากตารางที่ 3 พบว่าปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศมีประมาณร้อยละ 20.99 โดยปริมาตร และมีค่าคงที่ของเฮนรีเท่ากับ 1.27×10^{-3} โมล/ลิตร-บรรยากาศที่อุณหภูมิ 20 °C (Benjamin, 2002) เมื่อนำค่าดังกล่าวไปคำนวณตามสมการตารางที่ 4 จะได้ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่สภาวะสมดุลที่สอดคล้องกับค่าในตารางที่ 4 คือ 9.08 มิลลิกรัม/ ลิตร เมื่อมีค่าความเค็ม (Salinity) ในน้ำเท่ากับ 0 ppt (Part per thousand, ppt) แสดงให้เห็นว่าออกซิเจนละลายในน้ำได้น้อย อย่างไรก็ตามการคำนวณความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่สภาวะสมดุลตามกฎของเฮนรีเพียงอย่างเดียวไม่

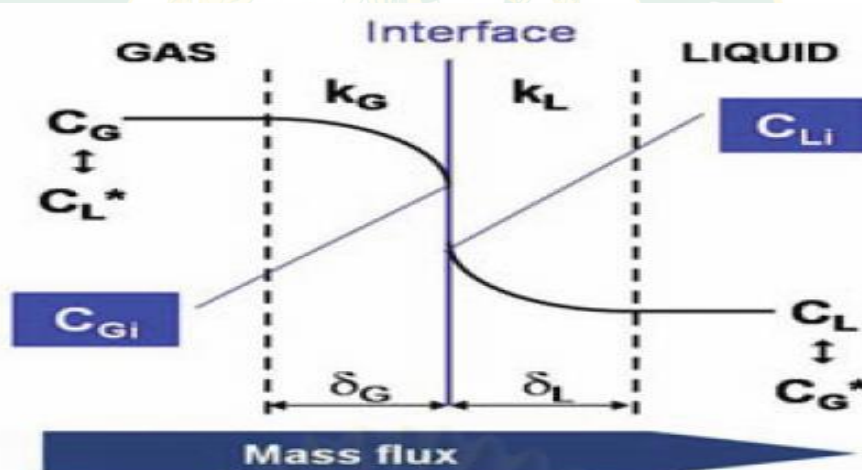
สามารถประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการเติมอากาศหรืออุปกรณ์เติมอากาศได้จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงการถ่ายเทออกซิเจนด้วยซึ่งอธิบายถึงอัตราเร็วของการละลายของออกซิเจนจนกระทั่งถึงสภาวะสมดุล

ทฤษฎี "Two film theory"

มันสัน (2542) ทฤษฎีที่อธิบายถึงการถ่ายเทสารระหว่างสถานะก๊าซและของเหลวโดยการซึมผ่านชั้นกลางระหว่างก๊าซกับของเหลวซึ่งชั้นกลางถูกพิจารณาออกเป็นสองชั้นคือชั้นกลางของก๊าซและชั้นกลางของของเหลวปัจจัยที่ผลต่อการละลายหรือซึมผ่านชั้นกลาง ได้แก่

- ความสามารถในการละลายของสาร
- ความดันย่อยของก๊าซในก๊าซผสม
- ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ
- ปริมาณสารเจือปน (Impurities) ในของเหลว เช่น ค่าความเค็มและของแข็งแขวนลอยเป็นต้น

ต้น



ภาพที่ 13 การถ่ายเทมวลสารตามทฤษฎี "Two film theory"

ที่มา: Spartan Environmental Technologies (2004)

จากภาพที่ 13 แสดงการถ่ายเทสารจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลวโดยมีความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารในก๊าซและของเหลวเป็นแรงขับเคลื่อน (Driving force) ทำให้สารในสถานะก๊าซซึ่งมีความเข้มข้นมากกว่าซึมผ่านชั้นกลางทั้งสองชั้นละลายสู่สถานะของเหลวซึ่งมีความเข้มข้นต่ำกว่าหลังจากนั้นจึงแพร่กระจายจากบริเวณใกล้ชั้นกลางของเหลวไปสู่บริเวณอื่น ๆ จนกระทั่งความเข้มข้นของสารทั้งในสถานะก๊าซและของเหลวอยู่ในสภาวะสมดุลในกระบวนการเติมอากาศซึ่งนิยม

เป่าอากาศใต้น้ำสามารถใช้ทฤษฎี “Two film theory” อธิบายการละลายของออกซิเจนจากอากาศสู่น้ำได้เช่นกัน (มันสิน, 2542)

การถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen transfer)

การถ่ายเทออกซิเจนคือกระบวนการถ่ายเทออกซิเจนจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลวซึ่งกล่าวถึงอัตราเร็วของการเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนในสถานะของเหลวเข้าใกล้สภาวะสมดุล อนุกรมและคามดันบรรยากาศขณะนั้นโดยสามารถประเมินอัตราการถ่ายเทออกซิเจนได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (Volumetric mass transfer coefficient, $K_L a$) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C) \quad \dots 2$$

เมื่อ	dC/dt	คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของก๊าซ (มิลลิกรัม / ลิตร นาที)
	$K_L a$	คือ สัมประสิทธิ์รวมในการถ่ายเทมวลของก๊าซ (1 / นาที)
	C_s	คือ ความเข้มข้นอิ่มตัวของก๊าซในสารละลาย (มิลลิกรัม / ลิตร)
	C	คือ ความเข้มข้นของก๊าซในสารละลาย ณ ช่วงเวลาที่พิจารณา (มิลลิกรัม/ ลิตร)

ขั้นตอนของการถ่ายเทออกซิเจนจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลวหรือการเติมอากาศ

1. การทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยการใช้เครื่องจักรสร้างความปั่นป่วนบริเวณผิวน้ำทำให้เกิดละอองน้ำกระจายในอากาศหรือการปล่อยอากาศใต้น้ำซึ่งขนาดละอองน้ำที่เกิดขึ้นหรือฟองอากาศที่ถูกปล่อยใต้น้ำที่มีขนาดเล็กจึงเกิดพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำได้มากทำให้เกิดการเติมอากาศที่มีประสิทธิภาพ

2. เมื่ออากาศสัมผัสกับน้ำออกซิเจนในอากาศซึ่งความเข้มข้นมากกว่าออกซิเจนละลายในน้ำจึงเกิดแรงขับเคลื่อนทำให้ออกซิเจนในอากาศเคลื่อนผ่านชั้นกลางระหว่างอากาศกับน้ำตามทฤษฎี “Two film theory” กลายเป็นออกซิเจนละลายในน้ำออกซิเจนที่ละลายในน้ำบริเวณพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำจะมีความเข้มข้นมากกว่าบริเวณอื่น ๆ ในน้ำจึงเกิดการแพร่จากบริเวณพื้นที่สัมผัสไปสู่บริเวณอื่น ๆ ของน้ำจนกระทั่งมีความเข้มข้นของออกซิเจนละลายสม่ำเสมอทุกบริเวณในน้ำและมีความเข้มข้นถึงจุดอิ่มตัว

ปัจจัยที่มีผลต่อการเติมอากาศ

1. ความเข้มข้นของออกซิเจนในก๊าซและในของเหลวความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศกับน้ำส่งผลให้เกิดแรงขับเคลื่อนทำให้ออกซิเจนละลายในน้ำได้ ในทางปฏิบัติสามารถเลือกใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในกระบวนการเติมอากาศเพื่อเพิ่มความแตกต่างของความเข้มข้นและขับเคลื่อนทำให้ออกซิเจนละลายในน้ำได้ดีขึ้นความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ

2. ความดันบรรยากาศโดยทั่วไปสามารถทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนต่อออกซิเจนและปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ ตามกฎของเฮนรีการเพิ่มความดันทำให้ออกซิเจนละลายน้ำมากขึ้นได้ ส่วนอุณหภูมิมิมีผลต่อความเข้มข้นอิมตัวของออกซิเจนละลายในน้ำและอัตราการถ่ายเทออกซิเจนอุณหภูมิต่ำทำให้ความเข้มข้นอิมตัวของออกซิเจนละลายในน้ำต่ำลง แต่มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนสูงขึ้นในทางปฏิบัติจึงควรควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้เหมาะสม และสามารถเพิ่มความดันเพื่อให้ออกซิเจนละลายน้ำมากขึ้นได้ ขนาดฟองอากาศกรณีการเติมอากาศโดยปล่อยอากาศใต้น้ำ

3. ขนาดฟองอากาศมีผลต่อพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ ฟองอากาศขนาดเล็กมีพื้นที่สัมผัสมากทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนที่ดี ในทางปฏิบัติจึงควรเลือกอุปกรณ์เติมอากาศที่ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็ก และควบคุมปริมาณการเติมอากาศให้เหมาะสม เพื่อป้องกันการรวมตัวของฟองอากาศขณะลอยขึ้นสู่น้ำซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการเติมอากาศลดลง

4. ความถี่ของการเกิดฟองอากาศส่งผลต่อจำนวนฟองอากาศ และพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ ความถี่ของการเกิดฟองอากาศมาก ทำให้มีพื้นที่สัมผัสมากและเกิดการถ่ายเทออกซิเจนที่ดี ในกระบวนการเติมอากาศจึงควรควบคุมความถี่ของการเกิดฟองอากาศให้เหมาะสม ความถี่ที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดความปั่นป่วนในน้ำมากจนทำให้เกิดการรวมตัวของฟองอากาศ และควรเลือกใช้อุปกรณ์เติมอากาศที่ทำให้เกิดฟองอากาศกระจายอย่างสม่ำเสมอ

5. ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและระยะเวลาสัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลว กรณีการเติมอากาศโดยปล่อยอากาศใต้น้ำ ฟองอากาศที่ถูกปล่อยใต้น้ำจะลอยขึ้นสู่น้ำด้วยความเร็วลอยตัวค่าหนึ่งซึ่งสัมพันธ์กับขนาดฟองอากาศ ฟองอากาศขนาดเล็กจะมีความเร็วลอยตัวน้อยกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ ตามกฎของสโตกส์ (Stoke's law) ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่น้อยทำให้เกิดระยะเวลาสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำที่นาน ในกระบวนการเติมอากาศจึงควรเลือกอุปกรณ์เติมอากาศที่ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กและออกแบบถังเติมอากาศให้มีความลึกที่เหมาะสมเพื่อให้ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมแก่การเติมอากาศ การสร้างความปั่นป่วนให้กับน้ำในระดับที่เหมาะสมโดยการกวนน้ำเป็นวิธีหนึ่งซึ่งช่วยยืดระยะเวลาสัมผัสได้

6. ความปั่นป่วนของน้ำตามทฤษฎี "Two film theory" ออกซิเจนในอากาศจะเคลื่อนผ่านชั้นกลางของอากาศและชั้นกลางของน้ำ ซึ่งชั้นกลางของน้ำเป็นอุปสรรคหลักที่ออกซิเจนต้องใช้เวลาในการเคลื่อนผ่าน การสร้างความปั่นป่วนให้กับน้ำในระดับที่เหมาะสม ทำให้เกิดแรงเฉือนที่

ชั้นกลางของน้ำ ส่งผลให้ชั้นกลางของน้ำบางลง ออกซิเจนจึงสามารถเคลื่อนผ่านได้ง่ายขึ้น ดังนั้นการกวนน้ำขณะเติมอากาศเพื่อให้เกิดการปั่นป่วนในระดับที่เหมาะสมจะช่วยให้มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนสูงขึ้น (นราพงศ์, 2553)

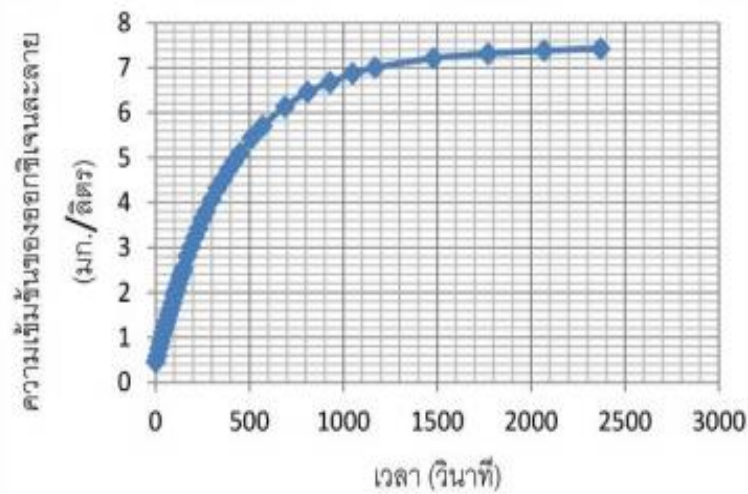
การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

การประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศสามารถประเมินได้จากปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายเทสู่น้ำต่อปริมาณอากาศที่ถูกเติมเข้าสู่ระบบภายใต้สภาวะเดียวกัน เช่น อุณหภูมิสารเจือปนในน้ำ ความลึกของจุดเติมอากาศ (กรณีเติมอากาศโดยปล่อยอากาศใต้น้ำ) เป็นต้น ซึ่งสามารถประเมินประสิทธิภาพได้โดยวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน แต่เนื่องจากประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศอาจเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการใช้งาน ดังนั้นจึงควรวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนทั้งในน้ำสะอาดหรือน้ำประปาและในน้ำจากสภาวะการทำงานจริง (รัชกาล, 2559)

การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำสะอาด องค์กรวิศวกรรมโยธาแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society of Civil Engineers, ASCE) ได้ระบุวิธีการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำสะอาด ซึ่งประกอบไปด้วยการกำจัดออกซิเจนละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen, DO) โดยการเติมโซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนละลายในน้ำดังสมการ



นอกจากนี้ยังสามารถเติมโคบอลต์คลอไรด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้กำจัดออกซิเจนละลายในน้ำเร็วขึ้นได้โดยเติมในปริมาณ 1.5 มิลลิกรัม/ลิตร เพื่อกำจัดออกซิเจนละลาย 1 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำมีค่าเท่ากับ 0 มิลลิกรัม/ลิตร หรือมีค่าต่ำจึงเริ่มเติมอากาศพร้อมกับวัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่เพิ่มขึ้น ณ เวลาต่าง ๆ ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเข้าใกล้จุดอิ่มตัวดังแสดงในภาพที่ 14 (นราพงศ์, 2553)



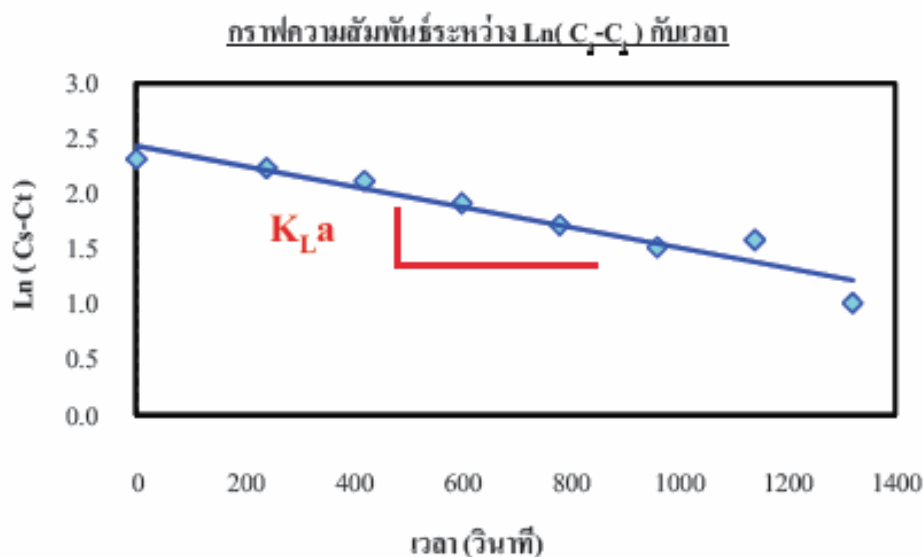
ภาพที่ 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำกับเวลา
ที่มา: รัชกาล (2559)

จากภาพที่ 14 แสดงความเข้มข้นของออกซิเจนละลายขณะเติมอากาศ ณ เวลาใด ๆ เมื่อเติมอากาศอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายจะเข้าใกล้จุดอิ่มตัวซึ่งสามารถวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้น ณ สภาวะสมดุลได้จากข้อมูลความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่วัดได้ สามารถนำมาวิเคราะห์เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน โดยสมการการถ่ายเทมวลสารซึ่งได้จากการอินทิเกรตของสมการที่จนได้สมการเป็นดังนี้

$$\frac{C_s - C_t}{C_s - C_0} = e^{-(K_L a) \times t} \quad \dots 4$$

$$\ln(C_s - C_0) = \ln(C_s - C_t) + (K_L a) \times t \quad \dots 5$$

- เมื่อ $K_L a$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (1 / วินาที)
 C_s คือ ความเข้มข้นของออกซิเจน ณ สภาวะสมดุล (มก. / ลิตร)
 C_t คือ ความเข้มข้นของออกซิเจน ณ เวลาใด ๆ (มก. / ลิตร)
 C_0 คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนที่มีอยู่เดิมในน้ำ (มก. / ลิตร)
 t คือ ระยะเวลาการเติมอากาศ (วินาที)



ภาพที่ 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_s - C_t)$ กับเวลา เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน
 ที่มา: นราพงศ์ (2553)

จากภาพที่ 15 สมการที่เมื่อใส่เครื่องหมายลอการิทึมสามัญ (\ln) ได้สมการที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงและมีความชันเท่ากับค่าลบของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ดังนั้นเมื่อนำข้อมูลความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่วัดได้ขณะเดิมอากาศ ณ เวลาต่าง ๆ มาคำนวณที่และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_s - C_t)$ กับเวลา จะสามารถวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนได้ตามสมการ

$$\ln(C_s - C_0) = \ln(C_s - C_0) - (K_L a) \times t \quad \dots 5$$

แนวคิดที่เกี่ยวข้องกับต้นทุน

ความหมายของต้นทุน

นราทิพย์ (2547) ได้ให้ความหมายของต้นทุนในทางเศรษฐศาสตร์คือ การวิเคราะห์ต้นทุนในทางเศรษฐศาสตร์จะมีความแตกต่างจากการคิดต้นทุนในทางบัญชี หรือต้นทุน ทั่วไปกล่าวคือ ต้นทุนทางบัญชีนั้นจะสามารถวัดค่าใช้จ่ายที่เสียไปเป็นตัวเงินเพียงอย่างเดียวหรือเรียก ได้ว่าเป็นต้นทุนที่เห็นแจ้งชัด (Explicit cost) แต่สำหรับต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ (Economic cost) นั้นจะรวมไปถึงค่าใช้จ่ายที่เสียไปนั้นที่สามารถวัดเป็นตัวเงินได้ และวัดเป็นตัวเงินไม่ได้ นั่นก็คือต้นทุนที่เห็นแจ้งชัด (Explicit cost) และต้นทุนไม่แจ้งชัด (Implicit cost) ในทางเศรษฐศาสตร์นั้นจะเรียก ต้นทุน

ที่มองไม่เห็นอีกอย่างหนึ่งว่า ต้นทุนค่าเสียโอกาส (Opportunity cost) และเป็นต้นทุนอีกตัวหนึ่งที่ต้องมีการประเมิน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ประกอบด้วย

ต้นทุนแจ่งชัดกับต้นทุนไม่แจ่งชัดรวมกับ ต้นทุนทางบัญชีจะมีค่าน้อยกว่าต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์และมีผลต่อไปให้กำไรทางบัญชีมีค่าสูงกว่ากำไรทางเศรษฐศาสตร์

การจำแนกต้นทุนตามความสัมพันธ์กับระดับของกิจกรรม หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การจำแนกต้นทุนตามพฤติกรรม (Cost behavior) การจำแนกต้นทุนโดยวิธีนี้เป็นการจำแนกประเภทโดยพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงต้นทุนเมื่อระดับกิจกรรมเปลี่ยนไป ได้แก่ ต้นทุนคงที่ และต้นทุนผันแปร โดยมีรายละเอียดดังนี้

ต้นทุนคงที่ (Fixed costs) หมายถึง ต้นทุนที่มีจำนวนรวมคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนระดับของกิจกรรม หรือปริมาณการผลิตไม่ว่าจะผลิตในปริมาณมากหรือน้อยเท่าใดก็ตาม ต้นทุนประเภทนี้จะมีจำนวนคงที่ หรือไม่สามารถเปลี่ยนแปลงปริมาณการใช้ได้ภายในระยะเวลาของการผลิต และถ้าไม่ดำเนินการผลิตก็ต้องเสียต้นทุนนี้ ได้แก่ ค่าเช่าที่ดิน ค่าภาษีที่ดิน ค่าเสื่อมราคาอุปกรณ์การเกษตร ค่าเสียโอกาสเงินลงทุนในการซื้ออุปกรณ์การเกษตร และค่าเสียโอกาสการใช้ที่ดินกรณีที่มีที่ดินเป็นของตนเอง

ต้นทุนผันแปร (Variable costs) หมายถึง ต้นทุนที่มีต้นทุนรวมผันแปรไปตามสัดส่วนระดับของกิจกรรม หรือการผลิต ต้นทุนผันแปรจึงเป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการใช้ปัจจัยผันแปรในการผลิต ถ้าทำการผลิตในปริมาณมาก ต้นทุนผันแปรในการผลิตก็จะมาก ถ้าผลิตในปริมาณน้อยต้นทุนผันแปรในการผลิตก็จะน้อย เมื่อไม่ทำการผลิตก็ไม่ต้องจ่ายต้นทุนชนิดนี้เลย และปัจจัยผันแปรจะใช้หมดไปในช่วงการผลิตนั้น ๆ ได้แก่ ค่าจ้างแรงงาน ค่าวัสดุอุปกรณ์การเกษตรตลอดจน ค่าซ่อมแซมอุปกรณ์

แนวคิดที่เกี่ยวข้องกับผลตอบแทน

1. ความหมายของผลตอบแทน

อุกฤษฏ์ (2552) ได้ให้ความหมายของผลประโยชน์ หรือผลตอบแทน (Benefits) ของการลงทุนว่า ผลประโยชน์หรือผลตอบแทน หมายถึง มูลค่าของ สินค้า หรือบริการที่ผลิตได้จากการลงทุน ประกอบด้วย ผลตอบแทนทางตรง ผลตอบแทนทางอ้อม และผลตอบแทนที่ไม่มีตัวตน

ผลตอบแทนทางตรง (Direct benefits) คือ ผลผลิตสุทธิของการลงทุนซึ่งหมายถึงมูลค่าของสินค้าและบริการที่ผลิตได้โดยตรงจากการลงทุน นอกจากนี้ยังหมายถึงการประหยัดและการลดค่าใช้จ่าย จากที่เคยมีอยู่เดิม

ผลตอบแทนทางอ้อม (Indirect benefits) คือ ผลประโยชน์ตอบแทนอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากผลประโยชน์ตอบแทนทางตรง นอกจากนี้ยังรวมถึงผลประโยชน์ตอบแทนด้านสังคมและสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เช่น โครงการนั้นอาจกลายเป็นแหล่งท่องเที่ยวที่สวยงาม ก่อให้เกิดการขยายตัวของการท่องเที่ยวในพื้นที่ที่โครงการตั้งอยู่ เป็นต้น

ผลตอบแทนที่ไม่มีตัวตน (Intangible benefits) คือ ผลตอบแทนที่ไม่สามารถประเมินมูลค่าเป็นตัวเงินได้ เช่น การลงทุนนั้นอาจมีส่วนช่วยยกระดับคุณภาพชีวิต และการกระจายรายได้ให้มีความยุติธรรมมากขึ้น เป็นต้น

ค่าเสียโอกาสของทุน (Opportunity cost of capital) คือ ถ้ามีการกำหนดให้ตลาดทุน (Capital market) ที่มีอยู่สามารถนำเงินตราหรือทรัพยากรไปลงทุนเพื่อสร้างเงินตราให้มีจำนวนมากขึ้นในอนาคตแล้ว สามารถกล่าวได้ว่า ค่าเสียโอกาสของการออมได้เกิดขึ้นแล้ว ทางเลือกต่อการบริโภคในปัจจุบันคือ การใช้เงินทุนหรือทรัพยากรไปในทางที่ก่อให้เกิดรายได้ในอนาคต ซึ่งอย่างน้อยต้องมีมูลค่าเท่ากับเงินตราในปัจจุบันที่เกิดจากการลงทุนในรูปแบบอื่น

2. การวิเคราะห์การวิเคราะห์การลงทุนและผลตอบแทนจากการลงทุนของโครงการ

การวิเคราะห์การลงทุนและผลตอบแทนจากการลงทุนของโครงการใด ๆ โดยเป็นการเปรียบเทียบผลตอบแทนและต้นทุนของโครงการนั้น ๆ ซึ่งผลตอบแทนและต้นทุนของโครงการจะเกิดขึ้นในระยะเวลาต่าง ๆ กัน ตลอดอายุของโครงการดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับค่าของเวลาของโครงการเพื่อให้ได้มาซึ่งผลตอบแทนที่ได้รับและต้นทุนที่เสียไปช่วงในระยะเวลาที่ต่างกันให้เป็นเวลาปัจจุบันก่อนแล้วจึงจะสามารถทำการเปรียบเทียบกันได้อย่างถูกต้องแน่นอนชัดเจนมากยิ่งขึ้น (เสถียร, 2542)

การวิเคราะห์ทางการเงินเป็นการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายหรือเงินลงทุนและผลตอบแทน หรือผลกำไรทางการเงินของโครงการเพื่อวิเคราะห์ว่าโครงการที่จัดทำขึ้นนั้นมีความคุ้มค่ากับการลงทุนหรือไม่โดยทั่วไปแล้ววิธีการวิเคราะห์โดยไม่มีการคิดลด (Undiscounted approach) คือการวัดค่าของต้นทุน และผลตอบแทนจากโครงการโดยไม่คำนึงถึงค่าเงินที่ได้มาหรือใช้ไปในเวลาที่ต่างกัน เช่น รับเงินสด รับในปีที่ 1 จำนวนหนึ่งกับเงินจำนวนเดียวกันนั้นที่จะได้รับในปีที่ 5 จะถือว่ามูลค่าที่เท่ากันการ วิเคราะห์วิธีนี้ เช่น การหาระยะเวลาคืนทุน (Payback period) คือระยะเวลาหรือจำนวนปี การดำเนินงานที่ทำให้ผลตอบแทน สุทธิจากโครงการมีค่าเท่ากับค่าใช้จ่ายในการลงทุนพอมิวิธีการหาระยะคืนทุนหรือหาจำนวนปีที่จะได้รับผลตอบแทนคุ้มกับเงินที่ลงทุนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (ปี)} = \frac{\text{เงินลงทุนเมื่อเริ่มโครงการ}}{\text{ผลตอบแทนเฉลี่ยต่อปี}} \quad \dots 6$$

วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ทางการเงิน

วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ทางการเงิน โดยทั่วไปการวิเคราะห์ทางการเงินวัตถุประสงค์ 4 ประการดังนี้

1. เพื่อประเมินความเป็นไปได้ทางการเงินวัตถุประสงค์สำคัญของการวิเคราะห์ทางการเงินคือการประเมินความสามารถในการทำโครงการนั้นคือโครงการสามารถก่อให้เกิดรายได้ที่คุ้มค่างบกับค่าใช้จ่ายต่าง ๆ และมีอัตราผลตอบแทนที่ดีการประเมินส่วนนี้จะต้องมีการประมาณต้นทุน และผลตอบแทนทั้งสิ้น เพื่อศึกษาหาผลตอบแทนสุทธิของโครงการ

2. เพื่อประเมินแรงจูงใจการวิเคราะห์ทางการเงินจะมีความสำคัญต่อการประเมินแรงจูงใจที่มีต่อเจ้าของโครงการและผู้มีส่วนร่วมกับโครงการ หรือถ้าเป็นโครงการรัฐวิสาหกิจหรือที่รัฐบาลให้การสนับสนุน ก็พิจารณาว่าผลตอบแทนที่ได้รับจะเพียงพอต่อการเลี้ยงตัวเองและบรรลุวัตถุประสงค์ทางการเงินตามที่ต้องการหรือไม่

3. เพื่อจัดให้มีแผนการเงินที่ดี เพื่อให้โครงการมีกำไรและผลตอบแทนที่ดีก็จะต้องมีแผนการเงินที่ดีด้วย โดยเฉพาะการวางแผนจัดหาเงินทุน เพื่อให้ได้มาซึ่งเงินทุนในจำนวนและในเวลาตามที่ต้องการ โดยเสียค่าใช้จ่ายต่ำสุด รวมทั้งเพื่อให้ข้อเสนอแนะถึงวิธีการปรับปรุงความเป็นไปได้ทางการเงินของโครงการ โดยเฉพาะความเหมาะสมของอัตราค่าบริการราคาและปริมาณการผลิตที่คุ้มทุน

4. เพื่อประเมินขีดความสามารถในการบริหารการเงิน สำหรับโครงการลงทุนขนาดใหญ่ที่มีการบริหารการเงินที่สลับซับซ้อน จำเป็นต้องพิจารณาถึงระบบการจัดการด้านการเงินและความสามารถของผู้ที่จะบริหารการเงินด้วย ในกรณีนี้อาจมีการพิจารณาว่าควรจะมีการปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงองค์กรและการจัดการอย่างไร ควรจัดให้มีระบบการควบคุมและการตรวจสอบ การเงินอย่างไร รวมทั้งการฝึกอบรมทักษะเฉพาะทางเรื่องอะไร เพื่อให้โครงการเดินหน้าไปตามกำหนด

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การใช้เครื่องเติมอากาศในบ่อเลี้ยงปลา ศุภวรรณ และคณะ (2549) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการเติมออกซิเจนให้กับน้ำในบ่อเลี้ยงปลาโดยอีเจคเตอร์ 4 ชุด ทำการทดลองภายใต้อัตราการไหลที่แตกต่างกัน 3 อัตราการไหลคือ 15, 20 และ 25 ลิตร/นาที โดยใช้ถังน้ำขนาดความจุ 702 ลิตร ในการทดลองแทนบ่อเลี้ยงปลาจริง ซึ่งก่อนการทดลองต้องเตรียมน้ำให้มีค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำก่อนเริ่มการทดลองเท่ากับศูนย์ โดยการเติมโซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3) เพื่อลดออกซิเจนที่ละลายในน้ำก่อน ผลการทดลองปรากฏว่าอัตราการเติมออกซิเจนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นและสัมพันธ์รวมในการถ่ายเทมวลของออกซิเจนในน้ำจะมีค่าสูงที่สุดในชั่วโมงแรกของการเติมอากาศ ซึ่งจากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองพบว่า อีเจคเตอร์ชุดที่ให้อัตราการเติม

ออกซิเจนได้สูงสุด คืออีเจคเตอร์ชุดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปากทางออกของน็อตเชิลเท่ากับ 6 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม 12.5 มิลลิเมตร ยาว 62.5 มิลลิเมตร ท่อเพิ่มความดันทำมุม 5 °C ยาว 100 มิลลิเมตร ให้อัตราการเติมออกซิเจนเท่ากับ 434.92 มิลลิกรัม/วินาที ที่อัตราการไหล 25 ลิตร/นาที่ และให้สัมประสิทธิ์รวมในการถ่ายเทมวลของออกซิเจนในน้ำสูงสุดในชั่วโมงที่ 1 เท่ากับ 0.0308 min^{-1}

นอกจากนี้ยังพบว่าท่อที่ยืดหยุ่นสามารถเพิ่มออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลา นราพงศ์ (2553) ได้ ทำการศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้ท่อที่ยืดหยุ่นเป็นอุปกรณ์เติมอากาศแบบท่อ โดยศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของท่อที่ยืดหยุ่น ได้แก่ ความหนาผนังท่อ ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ความแข็ง (Hardness) และความยืด (Elongation) เพื่อเลือกตัวอย่างท่อที่เหมาะสม โดยเปรียบเทียบสมรรถภาพด้วยการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La) และประสิทธิภาพเชิงพลังงานในถังเติมอากาศปริมาตรประมาณ 10 ลิตร จากผลการทดลองพบว่า ท่อที่ยืดหยุ่นตัวอย่างที่มีความเหมาะสมในการประยุกต์เป็นอุปกรณ์เติมอากาศเนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมทั้งในด้านการถ่ายเทออกซิเจนและในด้านการใช้พลังงาน การเติมอากาศในน้ำทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กและมีพื้นที่สัมผัสจำเพาะมาก การวิเคราะห์การอุดตันของอุปกรณ์พบว่าไม่ควรหยุดเติมอากาศนานเกิน 3 วัน และควรทำความสะอาดด้วยวิธีการเป่าลมด้วยความดัน 3 บาร์ นาน 30 นาที สำหรับรูปแบบการจัดเรียงท่อเติมอากาศพบว่าให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 15.08 และให้รูปแบบการกระจายอากาศใกล้เคียงกัน โดยควรออกแบบโดยใช้ท่อยาว 7.5 เมตรต่อพื้นที่กั้นถังเติมอากาศ 1.33 ตารางเมตร

นอกจากนี้ยังมีการทดลองเกี่ยวกับเครื่องเติมอากาศในรูปแบบอื่น รัชกาล (2559) ได้ ทำการศึกษางานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาอุปกรณ์เติมอากาศเวนจูรี (Venturi air injector) ในด้านประสิทธิภาพการเติมอากาศ ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศ การพัฒนาประสิทธิภาพการเติมอากาศด้วยการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว (Liquid film forming apparatus) และการสร้างสมการทำนายประสิทธิภาพการเติมอากาศของอุปกรณ์เวนจูรี โดยงานวิจัยเริ่มจากการทดสอบอุปกรณ์เวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (K_La) เท่ากับ 30.57 ชม. ค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTR) เท่ากับ 236.62 กรัม-ออกซิเจน/ชม. ค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (SAE) เท่ากับ 0.22 กิโลกรัม-ออกซิเจน/กิโลวัตต์-ชม. และค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTE) เท่ากับ 3.989 ตามลำดับ ที่อัตราการไหลน้ำ 240 ลิตร/นาที่ แรงดัน 1.15 บาร์ ความลึกน้ำ 70 เซนติเมตร โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเวนจูรีได้แก่ 1. เครื่องสูบน้ำ 2. การออกแบบอุปกรณ์เวนจูรี และ 3. การติดตั้งอุปกรณ์เวนจูรี ปัจจัยแรกควรเลือกเครื่องสูบน้ำให้เหมาะสมกับสภาวะการเดินระบบ (Operating point) ของเวนจูรีแต่ละขนาดซึ่งควรตกอยู่ในช่วงกึ่งกลาง Pump curve ของ

เครื่องสูบน้ำที่เลือกใช้งาน ปัจจัยที่สองการออกแบบอุปกรณ์เวนจูรีพบว่าอัตราส่วนหน้าตัดบริเวณคอคอดต่อหน้าตัดทางน้ำเข้า (O/D) เท่ากับ 0.5 มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ด้านขาเข้าที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 63,000-188,000 ปัจจัยที่สามการติดตั้งเวนจูรีโดยเลือกอัตราไหลน้ำและระดับความลึกน้ำที่เหมาะสมจากการทดลองพบว่า ความเร็วน้ำที่บริเวณคอคอดของเวนจูรีที่ให้ประสิทธิภาพในการดูดอากาศสูงอยู่ในช่วง 12-15 เมตร/วินาที และระดับความลึกน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลประสิทธิภาพการเติมอากาศดีขึ้น แต่อัตราการไหลอากาศจากเวนจูรีที่เหมาะสมจะสูงขึ้นตาม ด้านตัวแปรอุทกศาสตร์ฟองอากาศจากอุปกรณ์เวนจูรีพบว่า การเคลื่อนที่ของฟองอากาศมีลักษณะเป็นเส้นโค้งขึ้นสู่ผิวน้ำ โดยระยะทางที่ฟองอากาศพุ่งไปด้านหน้าจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลน้ำ และตัวแปรขนาดฟองอากาศ (D.) ของเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ที่อัตราไหลอากาศ 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง พบว่ามีค่าเฉลี่ยขนาดฟองอากาศเท่ากับ 3.26 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าฟองอากาศจากหัวทราย แต่มีขนาดใกล้เคียงกับฟองอากาศจากท่ออย่างยัดหยุ่น การพัฒนาประสิทธิภาพอุปกรณ์เวนจูรีโดยการติดตั้งอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลวสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La 5.10-9.43 %) และทำศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเติมอากาศของเครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยัดหยุ่นกับเครื่องเติมอากาศแบบเวนจูรี และค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ พบว่า เครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยัดหยุ่น สามารถเพิ่มระดับค่าออกซิเจนละลายจาก 0 ถึง 6 มิลลิกรัม/ลิตร ได้เร็วที่สุดในอุปกรณ์เติมอากาศทั้งสองชนิด ด้วยเวลา 10 นาที 36 วินาที รองลงมาคือเวนจูรีขนาด 2 นิ้ว ใช้เวลา 17 นาที 3 วินาที และค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ก็พบว่าเครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยัดหยุ่นซึ่งมากกว่าเครื่องเติมอากาศแบบเวนจูรี โดยมีค่า $K_La = 6.78 \text{ min}^{-1}$

และยังพบว่าความขรุขระของพื้นที่ผิวสัมผัสมีผลต่อการเพิ่มออกซิเจน ศิริชัช และคณะ (2562) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลความขรุขระของผนังที่มีต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศของเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กที่ใช้การไหลหมุนควงปะทะผนัง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการเติมอากาศของเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กที่ใช้ หลักการสร้างการไหล หมุนควงของน้ำด้วยความเร็วสูงตัดย่อยฟองอากาศให้มีขนาดเล็กลง โดยศึกษาผลของความขรุขระของผนัง ฟุ้งชนที่วางขวางการไหลของเจ็ทหมุนควงโดยใช้กระดาษทรายติดบนผนัง เพื่อช่วยลดขนาดของฟองอากาศที่ได้ จากเครื่องกำเนิดฟองอากาศ โดยประสิทธิภาพการเติมอากาศสามารถวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำตามเวลาในถังเติมอากาศ พบว่าความขรุขระของผนัง ฟุ้งชนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเติมอากาศของเครื่องกำเนิดฟองอากาศได้ เนื่องจากฟองอากาศที่ได้มีขนาดเล็กลงโดยกรณีผนังฟุ้งชนแบบเรียบจะมีประสิทธิภาพการเติมอากาศ ใกล้เคียงกับกรณีไม่ติดผนังฟุ้งชนและกรณีผนังฟุ้งชนติดกระดาษทรายเบอร์ 800 จะมีประสิทธิภาพการเติมอากาศสูงสุดซึ่งเพิ่มขึ้น 13.12% เมื่อเทียบกับกรณีไม่ติดผนังฟุ้งชน

อย่างไรก็ดีเมื่อนำการศึกษาเครื่องเติมอากาศมาประยุกต์ใช้กับการเลี้ยงปลาในระบบน้ำหมุนเวียนเพื่อนำต่อยอดในการเลี้ยงปลาในระดับความหนาแน่นสูง ภาณุ และยงยุทธ (2558) ได้ทำการศึกษาเทคนิคการเติมออกซิเจนด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์จากถังออกซิเจนเหลวและออกแบบระบบตรวจติดตามและจัดการออกซิเจนอัตโนมัติสำหรับฟาร์มเลี้ยงปลาทะเลความหนาแน่นสูงโดยระบบดังกล่าวสามารถตรวจติดตามปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในบ่อเลี้ยงและบ่อบำบัดน้ำได้ดีสามารถแสดงรายงานแผนภูมิบันทึกข้อมูลและข้อมูลแจ้งเตือนได้ และระบบยังสามารถจัดการเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายน้ำได้อัตโนมัติโดยสั่งปิดเครื่องเติมออกซิเจนและโซลินอยด์วาล์ว เพื่อจ่ายออกซิเจนบริสุทธิ์ตามเวลาที่ตั้งไว้และพบว่าเครื่องผสมออกซิเจนที่ประดิษฐ์ขึ้นมีอัตราการแพร่กระจายออกซิเจนลงน้ำสูงที่สุดเท่ากับ $493 \text{ kg O}_2/\text{h}$ ใช้เวลาเพียง 5 นาทีที่สามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจาก 0.00 มิลลิกรัม/ลิตร จนถึงจุดอิ่มตัวได้ ในสภาวะมาตรฐานน้ำทะเลและมีอัตราการสูญเสียเปล่าน้อยที่สุดเพียงร้อยละ 9.81 เมื่อใช้ร่วมกับก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ดังนั้นเครื่องผสมออกซิเจนจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในกรณีฉุกเฉินร่วมกับออกซิเจนบริสุทธิ์ส่วนประสิทธิภาพในการเติมออกซิเจนลงน้ำพบว่า บัม น้ำเติมออกซิเจน มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ $8.06 \text{ kg O}_2/\text{kw.hr}$ เนื่องจากใช้พลังงานน้อยสุด แต่มีข้อด้อยคือใช้เวลามากในการเติมออกซิเจนและมีอัตราการสูญเสียเปล่าสูงถึงร้อยละ 52.90 ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมกับบ่อขนาดใหญ่และใช้ร่วมกับออกซิเจนบริสุทธิ์สำหรับบ่มจุ่มพ่นอากาศ 1 Hp ทั้งท่อดูดอากาศ 1 และ 1.5 นิ้ว ไม่เหมาะที่จะใช้ร่วมกับออกซิเจนบริสุทธิ์เช่นกัน เนื่องจากมีอัตราการสูญเสียเปล่าสูงร้อยละ 51.77 และ 43.18 ตามลำดับแต่เหมาะที่จะใช้ร่วมกับอากาศธรรมดาซึ่งสามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจาก 0.00 มิลลิกรัม/ลิตร จนถึง 70% ของจุดอิ่มตัวได้ภายในเวลา 12-15 นาทีสำหรับต้นทุนของระบบดังกล่าวจะลงทุนค่อนข้างสูงในปีแรกแต่ค่าเสื่อมราคาของระบบต่อปีประมาณ 70,000 บาท ดังนั้นระบบตรวจติดตามและจัดการออกซิเจนอัตโนมัติรวมกับการเติมออกซิเจนด้วยเครื่องผสมออกซิเจนและออกซิเจนบริสุทธิ์จากถังออกซิเจนเหลวในการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการหรือนักลงทุนในการตัดสินใจทำฟาร์มเลี้ยงปลาทะเลความหนาแน่นสูงเชิงพาณิชย์ต่อไป

นอกจากนี้ ภาณุ และคณะ (2557) ได้ทำการศึกษาการออกแบบระบบจัดการคุณภาพน้ำในฟาร์มเลี้ยงปลาทะเลด้วยระบบสกาด้า (SCADA) ประกอบด้วยศูนย์ควบคุมกลาง ห้องควบคุมคุณภาพน้ำอัตโนมัติ โรงเลี้ยงปลาระบบน้ำหมุนเวียน และระบบสื่อสาร ระบบ SCADA สามารถติดตามคุณภาพน้ำได้แก่ ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ พีเอช และอุณหภูมิ ข้อมูลคุณภาพน้ำจะส่งจากห้องควบคุมคุณภาพน้ำฯ ผ่านระบบสื่อสารมาแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ที่ศูนย์ควบคุมกลางในรูปแบบตัวเลขและกราฟ สามารถเรียกดูรายงาน การตั้งค่าและสั่งการปิดเปิดอุปกรณ์ในระบบผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้พบว่าค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่วัดด้วยระบบ SCADA แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) กับค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่วัดได้ด้วยวิธีไตเตรท ณ บ่อเลี้ยง และในตู้วัดคุณภาพน้ำ

เท่ากับ 5.25 ± 0.69 , 5.21 ± 0.74 และ 5.24 ± 0.65 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ระบบ SCADA ต้นแบบนี้สามารถนำไปใช้ตรวจติดตามและจัดการคุณภาพน้ำสำหรับฟาร์มเลี้ยงปลาทะเลเศรษฐกิจได้ดี การบำรุงรักษาอุปกรณ์ในระบบและปรับเทียบหัวเซ็นเซอร์อยู่เป็นประจำจะช่วยรักษาเสถียรภาพและความถูกต้องของระบบการจัดการคุณภาพน้ำ แต่จำเป็นต้องเป็นสัตว์เศรษฐกิจที่มีมูลค่าสูงเพราะระบบน้ำหมุนเวียนมีต้นทุนที่สูงในการลงทุนและเมื่อนำระบบน้ำหมุนเวียนมาเลี้ยงปลาเศรษฐกิจโดยนิคม และคณะ (2554) ทำการเลี้ยงปลากะพงขาวขนาด 4-6 นิ้วในระบบน้ำหมุนเวียนการทดลองเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนที่เหมือนกัน 2 ชุด แต่ละชุดประกอบด้วย ถังเลี้ยงปลา 3 ถัง ถังรวมน้ำซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนตกตะกอนกับส่วนกรองสารแขวนลอย ถังกรองชีวภาพ ตัวกำจัดโปรตีน ถังพักน้ำ และถังสำหรับเติมน้ำ โดยใช้วัสดุจากธรรมชาติในท้องถิ่นเป็นตัวกรองชีวภาพ เริ่มต้นทดลองปล่อยปลากะพงขาวขนาดความยาวและน้ำหนักเฉลี่ย 3.7 ± 0.2 นิ้ว และ 10.7 ± 1.9 กรัม ตามลำดับ ชุดการทดลองละ 750 ตัว (เฉลี่ย 153 กรัม/ตัว) เมื่อทดลองครบ 30 วัน พบว่า ระบบน้ำหมุนเวียนชุดที่ 1 ปลามีความยาวและน้ำหนักเฉลี่ย 4.9 ± 0.4 นิ้ว และ 25.3 ± 6.3 กรัม ตามลำดับ อัตรารอดตาย 89.9% และอัตราเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ 1.61 ส่วนระบบน้ำหมุนเวียนชุดที่ 2 มีความยาวเฉลี่ย 5.6 ± 0.6 นิ้ว น้ำหนักเฉลี่ย 44.5 ± 12.8 กรัม อัตรารอดตาย 96.3% และมีอัตราเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อเท่ากับ 0.94 ต้นทุนการเลี้ยงสูงใหญ่เป็นค่าพันธุ์ปลาคิดเป็นร้อยละ 58 ของต้นทุนทั้งหมด ระบบน้ำหมุนเวียนที่ใช้เลี้ยงปลากะพงขาวครั้งนี้มีจุดเด่นหลายประการ เช่น ระบบไม่ซับซ้อน การจัดการไม่ยุ่งยาก และใช้วัสดุจากธรรมชาติในท้องถิ่นเป็นตัวกรองชีวภาพ เป็นต้น

นอกจากนี้ออกซิเจนยังเกี่ยวข้องกับการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำและเป็นปัจจัยสำคัญของการเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์ออกซิเจนส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำและอัตราการรอด Thorarensen et al. (2017) ได้ทำการศึกษาผลของความอึดตัวของออกซิเจนต่อการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาค็อดแอตแลนติก (*Gadus morhua* L.) เพื่อตรวจหาความระดับออกซิเจน ที่ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของปลาค็อดแอตแลนติก โดยใช้ปลาค็อดแอตแลนติกมีน้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น 21.9 กรัม และทำการเลี้ยงในที่ระดับของออกซิเจนแตกต่างกัน 5 ระดับได้แก่ 65, 81, 103, 121 และ 150% เป็นเวลา 98 วัน พบว่า ที่ระดับของออกซิเจนต่ำกว่า 100% การเจริญเติบโตของปลาค็อดแอตแลนติกจะลดลง โดยน้ำหนักสุดท้ายของปลาค็อดแอตแลนติก ที่เลี้ยงที่ระดับของออกซิเจน 65% จะมีน้ำหนักน้อยกว่าปลาค็อดแอตแลนติก ที่เลี้ยงที่ระดับของออกซิเจน 100% และน้ำหนักสุดท้ายของปลาค็อดแอตแลนติก ที่เลี้ยงที่ระดับของออกซิเจน 150% สูงกว่าปลาที่เลี้ยงที่ความอึดตัว 100 % อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ระดับออกซิเจนมีผลต่อการกินอาหารสัตว์น้ำ ยิ่งระดับออกซิเจนสูงสัตว์น้ำก็สามารถกินอาหารได้มากขึ้นและส่งผลในเรื่องการเจริญเติบโตดี

McGraw et al. (2001) ทำการศึกษาปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำระดับต่ำและระดับสูง เพื่อเพิ่มผลผลิตกุ้งขาว และ กุ้งแช่บ๊วยในบ่อดิน โดยปล่อยกุ้งที่ความหนาแน่นเฉลี่ย 33 ตัว/บ่อ ในแต่

ละบ่อจะติดตั้งเครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติให้เฉลี่ยอยู่ที่ 29 °C และติดตั้งเครื่องวัดออกซิเจนละลายในน้ำ (DO) และทำการวัดคุณภาพน้ำทุก ๆ 30 นาที และติดตั้งเครื่องเติมอากาศแบบปั๊มขนาด 0.75 กิโลวัตต์ ให้ทำงานโดยอัตโนมัติเมื่อออกซิเจนละลายในน้ำลดลงต่ำกว่า 4.6, 2.8 และ 1.1 มิลลิกรัม/ลิตร ผลการวิจัยพบว่า ผลผลิตกุ้งทั้งสองสายพันธุ์ที่เลี้ยงในออกซิเจนละลายในน้ำไม่ต่ำกว่า 4.6 มิลลิกรัม/ลิตร มีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นอัตราการรอดสูงและมีเพิ่มผลผลิตมากกว่ากุ้งทั้งสองสายพันธุ์ที่เลี้ยงในออกซิเจนละลายในน้ำไม่ต่ำกว่า 2.8 และ 1.1 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีอัตราผลตอบแทนที่สูงขึ้นและมีความสัมพันธ์กับอัตราการรอดที่สูงขึ้น มีผลกระทบโดยตรงมีอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

Tran-Duy et al. (2008) ได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของออกซิเจนและน้ำหนักตัวต่อปริมาณอาหารสูงสุดการเจริญเติบโตของปลานิล (*Oreochromis niloticus*) โดยใช้ปลานิล 2 ขนาดที่น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น 21 กรัม และ 147 กรัม ทำการเลี้ยงในระดับออกซิเจนต่างกัน 2 ระดับ ได้แก่ 3 มิลลิกรัม/ลิตร และ 5.6 มิลลิกรัม/ลิตร และทำการให้อาหาร 2 ครั้ง/วัน โดยใช้อาหารสำเร็จรูปผลการวิจัยพบว่า การกินอาหารและการเจริญเติบโตของปลานิลที่เลี้ยงในระดับ DO 5.6 มิลลิกรัม/ลิตร สูงกว่าที่ปลานิลที่เลี้ยงในระดับ DO 3 มิลลิกรัม/ลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) ปริมาณอาหารยังมีความสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของปลานิลทั้ง 2 ขนาดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$)

Cerezo and García (2005) ทำการศึกษาระดับออกซิเจนละลายในน้ำที่เหมาะสมของปลาหมึกยักษ์ (*Octopus vulgaris* Cuvier, 1797) โดยมีน้ำหนักตัวต่างกันและอุณหภูมิต่างกันเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการหายใจ การศึกษาครั้งนี้มีการจัดการระดับออกซิเจน (ระดับสูงสุด 100%, ระดับที่เหมาะสม 65%, ระดับอันตราย 35%) โดยใช้ปลาหมึกยักษ์ขนาด 0.18–2.20 กิโลกรัม โดยควบคุมอุณหภูมิ อยู่ที่ 15.5–27.4 °C และทำการลดระดับออกซิเจนที่ละลายในน้ำ โดยเริ่มต้นที่ระดับสูงสุดไปจนถึงระดับต่ำสุด เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมและความถี่ในการหายใจของหมึกยักษ์ ผลการทดลองพบว่า ความถี่ในการหายใจของหมึกยักษ์ โดยค่าเฉลี่ย 17.7±3.29 ครั้ง/นาที่ 33.3±5.86 ครั้ง/นาที่ และ 62.8±15.94 ครั้ง/นาที่ โดยความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในน้ำจนกระทั่งถึงความอิ่มตัวของออกซิเจนทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ($p < 0.05$) ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและการกินอาหาร (17–28 °C)

นอกจากออกซิเจนจะมีผลต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำยังพบว่า อุณหภูมิมีผลในการเลี้ยงสัตว์เช่นกัน เยาวนิตย์ และจිරันท์ (2546) ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากการลดและเพิ่มอุณหภูมิต่อระบบภูมิคุ้มกันในปลากะรังและปลากะพงขาว โดยใช้กระบวนการจับกินสิ่งแปลกปลอม (Phagocytosis) เป็นตัวตรวจวัด ผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างกระทันหันทั้งการลดและเพิ่มอุณหภูมิ มีผลทำให้ระบบภูมิคุ้มกันต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับปลาที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

อุณหภูมิ นอกจากนี้ยังพบว่าการลดอุณหภูมิมีผลทำให้ระบบภูมิคุ้มกันต่ำกว่าการเพิ่มอุณหภูมิ เช่นเดียวกันทั้งในปลากะรังและปลากะพงขาว

นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ Whangchai et al. (2007) ได้ทำการอนุบาล ลูกกุ้งก้ามกรามในช่วงฤดูหนาว ซึ่งใช้พลาสติกคลุมบ่อดิน เพื่อรักษาอุณหภูมิน้ำ เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า ลูกกุ้งก้ามกรามที่อนุบาลในบ่อที่คลุมพลาสติกมีน้ำหนัก (5.42 กรัม) มีค่าสูงกว่าลูกกุ้งที่อนุบาล ในบ่อที่ไม่คลุมพลาสติก (2.70 กรัม) ผลของการคลุมบ่อด้วยพลาสติกใดยังช่วยเพิ่มระดับอุณหภูมิน้ำ ให้สูงกว่าบ่อที่ไม่คลุมพลาสติก 5 °C และ Michael (2012) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในบ่อ ปลาดอกอเมริกัน เลี้ยงในบ่อที่มีอุณหภูมิ 23-27, 27-31 และ 31-35 °C เป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่าการ เจริญเติบโต การกินอาหาร น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อวัน อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และอัตราการรอด ในบ่อที่เลี้ยงที่ อุณหภูมิ 27-31 °C ดีที่สุด มากกว่าในบ่อที่เลี้ยงในอุณหภูมิ 23-27 °C จะมีอัตราการ เจริญเติบโต การกินอาหาร น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อวัน อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และอัตราการรอด ในบ่อต่ำ และบ่อที่เลี้ยงในอุณหภูมิ 31-35 °C จะมีอัตราการเจริญเติบโต การกินอาหาร น้ำหนักที่ เพิ่มขึ้นต่อวัน อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และอัตราการรอดในบ่อน้อยที่สุด แต่มีการกินอาหารมาก ที่สุด ซึ่งเกิดจากการทำกิจกรรมของปลาที่มากขึ้น เช่น การย่อยอาหาร การหายใจ การเคลื่อนไหว การขับถ่าย เร็วกว่าปกติทำให้ดูดซึมอาหารได้น้อยลงทำให้การเจริญเติบโตลดลง

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

สถานที่ดำเนินการทดลอง

โรงเพาะเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด (RAS) คณะเทคโนโลยีการประมง
และทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์การทดลองระบบออกซิเจน

1. บ่อพลาสติกทรงกลมขนาด 1.25 x 1.25 x 1 เมตร
2. เครื่องเติมอากาศ รุ่น MITSUBISHI SC-QR ขนาด 1/3 HP
3. ท่อยางยืดหยุ่น
4. เครื่องให้อากาศแบบบีเจคเตอร์ รุ่น MITSUBISHI SSP-255S 1/2 HP
5. ตาชั่ง รุ่น AND HT-500 ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
6. สารละลายโซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3)
7. เครื่องมือวัด ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำด้วยระบบเซนเซอร์ บริษัท Aquatic control
8. สายยางขนาด 25 มิลลิเมตร 0.5 นิ้ว
9. เครื่องตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้า Clamp Meter TENMARS TM-28E TRUE RMS

อุปกรณ์การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนในระบบ RAS

1. บ่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 15 x 4 เมตร
2. เครื่องเติมอากาศ รุ่น MITSUBISHI SC-QR ขนาด 1/3HP (4P)
3. ท่อยางยืดหยุ่น
4. พลาสติกคลุมโรงเรือน
5. ระบบน้ำหมุนเวียน
6. เครื่องมือวัด คุณภาพน้ำด้วยระบบเซนเซอร์ บริษัท Aquatic control
7. สายยางขนาด 25 มิลลิเมตร 0.5 นิ้ว
8. สวิง
9. น้ำมันกานพลู
10. ตาชั่ง AND HT-500 ทศนิยม 2 ตำแหน่ง

อุปกรณ์การเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบ RAS

1. บ่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 15 x 4 เมตร พร้อมคลุมด้วยพลาสติก
2. ชุดระบบน้ำหมุนเวียน
3. พลาสติกคลุมโรงเรือน
4. ระบบให้อากาศ
5. ตาชั่ง รุ่น AND HT-500 ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
6. สวิง
7. น้ำยากันปลู
8. ท่อยางยืดหยุ่น
9. เครื่องมือวัด คุณภาพน้ำด้วยระบบเซนเซอร์ บริษัท Aquatic control
10. ท่อยาง ขนาด 2 นิ้ว
11. สายยาง
12. ถังน้ำขนาด 2 ตัน
13. ตะกร้า
14. เครื่องปั้มน้ำ รุ่น MITSUBISHI SSP-405S

อุปกรณ์วิเคราะห์หาลักษณะคุณสมบัติของน้ำ

1. เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ (Multifunction meter CX – 461ELMETRON
2. เครื่องวัดค่าดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) รุ่น SPECTRO SC และ Cuvette
3. ตู้อบความร้อน ยี่ห้อ WTB binder รุ่น 15115300002020
4. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
5. Hot plate ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น ME204
6. ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้วพื้นฐานในห้องทดลอง

วิธีการดำเนินงาน

การทดลองที่ 1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศในการเพิ่มออกซิเจนละลายน้ำให้กับบ่อปลากระพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน ด้วยเครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่นและเครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์

วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design:CRD) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ทรีตเมนต์และ 3 ซ้ำ ได้แก่

ทรีตเมนต์ 1 เครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่น

ทรีตเมนต์ 2 เครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ 1 ตัว

ทรีตเมนต์ 3 เครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ 2 ตัว

1.1 เตรียมบ่อพลาสติกทรงกลมขนาด 1.25 x 1.25 x 1 เมตร ทำการเติมน้ำลงในบ่อให้ได้ปริมาตรความจุมากกว่า 3 ลูกบาศก์เมตร

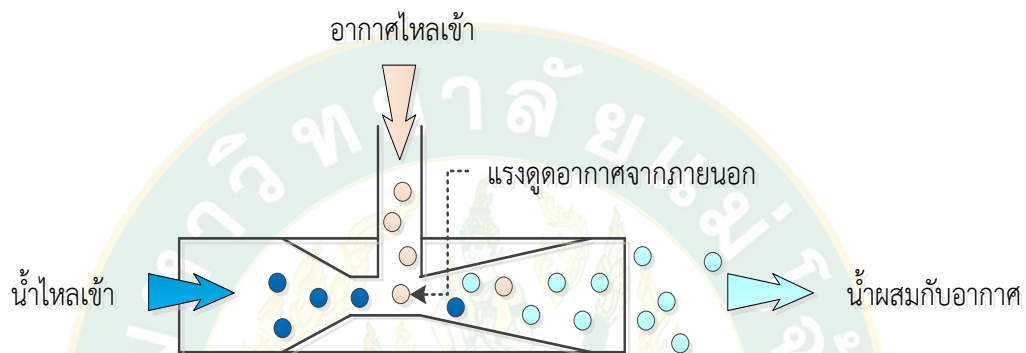
1.2 ทำการติดตั้งระบบการเติมออกซิเจนต่างกัน 3 แบบคือ 1) เครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่น 2) เครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ 1 ชุด 3) เครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ 2 ชุด

1.3 ส่วนประกอบของเครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่น (400 W) ประกอบไปด้วย 1) อุปกรณ์ซูเปอร์ชาร์จ และมู่เลย์ (Pulley) พร้อมมอเตอร์ขนาด 400 วัตต์ ทำหน้าที่เพิ่มแรงดันอากาศ 2) ถังสำรองอากาศอัด 3) ท่อส่งอากาศอัด 4) วาล์วเปิด-ปิดอากาศ 5) อุปกรณ์กระจายอากาศ ท่ออย่างยืดหยุ่น (Diffuser) หลักการทำงานของระบบนี้จะคล้ายกับระบบเติมอากาศแบบรูทโบลเวอร์ ที่สามารถผลิตลมอัดได้ในปริมาณมาก แต่แรงดันต่ำกว่าเมื่อเทียบกับระบบรูทโบลเวอร์ ซึ่งระบบนี้จะเห็นได้ว่ามีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีต้นทุนต่ำและมีอายุการใช้งานที่นาน เนื่องด้วยอุปกรณ์ซูเปอร์ชาร์จที่ใช้งานถูกดัดแปลงมาจากซูเปอร์ชาร์จของเครื่องยนต์ หรือรถบรรทุก (ภาพที่ 16)



ภาพที่ 16 เครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่น (400 วัตต์)

1.4 ส่วนประกอบระบบเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ หรือแบบเวนจูรี (Venturi aeration) เป็นระบบเติมอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงมีการนำมาใช้ในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยหลักการทำงานเบื้องต้นจะต้องอาศัยเครื่องสูบน้ำ หรือปั้มน้ำฉีดน้ำผ่านหัวพ่นอีเจคเตอร์ที่มีลักษณะเป็นคอคอด เมื่อน้ำผ่านคอคอดจะทำให้มีความเร็วเพิ่มสูงขึ้น และเกิดแรงดูดอากาศจากภายนอกเข้ามาผสมกับน้ำ จึงทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนที่อยู่ในอากาศ ร่วมกับน้ำที่ผ่านอีเจคเตอร์เกิดเป็นฟองแล้วจึงฟุ้งออกไปยังบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจน (ภาพที่ 17 และ 18)

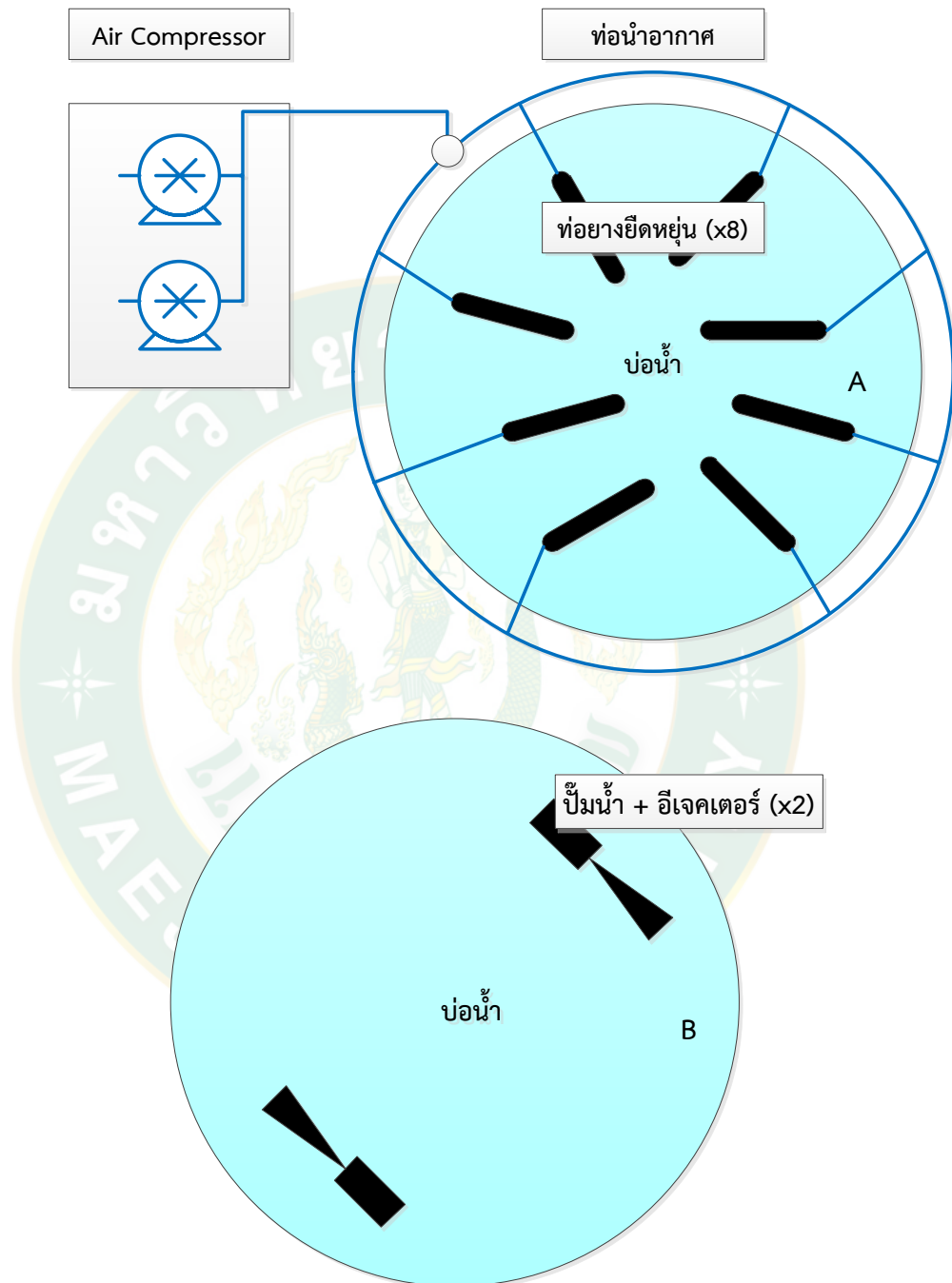


ภาพที่ 17 การเคลื่อนที่ของน้ำและฟองอากาศของระบบอีเจคเตอร์



ภาพที่ 18 เครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ (250 วัตต์)

1.5 จากนั้นทำการออกแบบและจัดวางในบ่อน้ำสำหรับทดสอบระบบ (ภาพที่ 19)



ภาพที่ 19 รูปแบบการวางเครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยัดหยุ่นเติมอากาศแบบท่ออย่างยัดหยุ่น (A) และอีเจคเตอร์ (B) พร้อมเซนเซอร์วัดออกซิเจน

1.6 เติมสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3) ในปริมาณ 250 กรัม/บ่อน้ำ 3 m^3 ลงในบ่อทดสอบ การทดสอบเครื่องเติมอากาศทั้ง 3 แบบ ได้แก่ เครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยัดหยุ่น เครื่อง

เติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ 1 ชุด และเครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ 2 ชุด จะทำการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง โดยมีลำดับขั้นตอนเริ่มต้นที่ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (Dissolved oxygen, DO) ประมาณ 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร (นราพงศ์, 2553) จากนั้นจึงเติมอากาศผ่านเครื่องเติมอากาศดังกล่าว แล้วทำการจับเวลาจนกว่าค่า DO เกือบอิ่มตัว จึงหยุดเวลาแล้วนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์

การเก็บข้อมูลได้แก่ ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (Dissolved oxygen, DO) โดยใช้ระบบเซนเซอร์ที่ผ่านการปรับเทียบมาตรฐาน และระยะเวลาการทดสอบ วิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน ($K_L a$) ของการเติมอากาศในเครื่องเติมอากาศทั้ง 3 แบบ

อุปกรณ์วัดออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved oxygen: DO)

หัวโพรบ DO sensor มีลักษณะเป็นทรงกระบอก สามารถส่งสัญญาณ 4-20 mA มีช่วงการวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ อยู่ระหว่าง 0-20 มิลลิกรัม/ลิตร ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 12-36 โวลต์ (ภาพที่ 20)



ภาพที่ 20 อุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Temperature sensor)

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบ PT100 จะมีลักษณะเป็นแท่งอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 มิลลิเมตร ประกอบติดอยู่กับสายสัญญาณยาวประมาณ 5 เมตร ทั้งนี้อุปกรณ์ดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิในการเพาะเลี้ยงปลา (ภาพที่ 21)



ภาพที่ 21 อุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) อุณหภูมิแบบ PT100

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน

ในกระบวนการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน (Boyd and Tucker, 1998) จะใช้ผลการทดสอบจากอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (DO) ที่เริ่มจาก 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร ไปจนถึง เกือบจะอิ่มตัว พร้อมทั้งบันทึกระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ จากนั้นจะนำผลที่ได้มาคำนวณดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C) \quad \dots 7$$

เมื่อ dC/dt คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของก๊าซ (มิลลิกรัม/ลิตร นาที)
 $K_L a$ คือ สัมประสิทธิ์รวมในการถ่ายเทมวลของก๊าซ (1 /นาที)
 C_s คือ ความเข้มข้นอิ่มตัวของก๊าซในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)
 C คือ ความเข้มข้นของก๊าซในสารละลาย ณ ช่วงเวลาที่พิจารณา (มิลลิกรัม/ลิตร) (นราพงศ์, 2553)

เมื่อได้ผลจากการคำนวณตามสมการข้างต้นแล้ว จะนำค่าที่ได้มาหาความสัมพันธ์เชิงเส้นหรือกราฟแสดงผลระหว่าง เวลา เทียบกับค่าที่ได้จากสมการ $\ln (C_s - C)$ จากนั้นจึงหาค่าความชันของกราฟ (Slope) หรือค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน ($K_L a$)

$K_L a$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (1/ชม.)
 C_s คือ ความเข้มข้นของออกซิเจน ณ จุดอิ่มตัวของก๊าซ (มิลลิกรัม/ลิตร)
 C_t คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัม/ลิตร)

เมื่อนำค่าเฉลี่ยทั้ง 3 ครั้งมาคำนวณดังสมการข้างต้น และทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบความสัมพันธ์ตามสมการต่อไปนี้

$$K_L a = [\ln(C_s - C_0) - \ln(C_s - C_t)] / t \quad \dots 8$$

เมื่อ C_0 คือ ค่าความเข้มข้นของออกซิเจน ณ เวลาเริ่มต้น และปรับให้เป็นสภาวะมาตรฐานที่ 20 องศาเซลเซียส

การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลจากการทดลองในแต่ละชุดการทดลอง โดยนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (One Way -ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

การทดลองที่ 2 เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนที่ให้อากาศด้วยเครื่องเติมอากาศในบ่อเลี้ยงปลากระพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน ในระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกัน

2.1 จัดเตรียมระบบน้ำหมุนเวียน 1 ชุด ประกอบด้วย บ่อคอนกรีตสำหรับเลี้ยงปลากระพงขาว ขนาดบ่อ 15.0×4 เมตร ที่ความลึก 1 เมตร จำนวน 1 บ่อ ถังกรองตะกอนจำนวน 1 ถัง ถังบำบัดชีวภาพ จำนวน 2 ถัง เครื่องฆ่าเชื้อโรคด้วย UV (Ultraviolet filter) จำนวน 1 เครื่อง และถังปรับสมดุลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจน ถังเหล่านี้เป็นจะเป็นพลาสติกทั้งหมด ภายในบ่อเลี้ยงปลากระพงขาว ทำการติดตั้งเครื่องเติมออกซิเจนแบบท่อที่ยืดหยุ่นในโรงเรือนระบบปิด (ภาพที่ 22)

2.2 เตรียมปลากระพงขาว 2 ขนาด ได้แก่ ปลากระพงขาวขนาดเล็กที่น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น 300 กรัม/ตัว จำนวน 2,200 ตัว (ภาพที่ 23) และปลากระพงขาวขนาดใหญ่ที่มีน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 620 กรัม/ตัว จำนวน 1000 ตัว นำไปปล่อยลงในบ่อเลี้ยงระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) ที่เตรียมไว้ ลงในแต่ละบ่อ และทำการให้อาหาร 2 ครั้ง คือ เวลา 9.00 และ 15.00 น.



ภาพที่ 22 บ่อเลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) โรงเรือนระบบปิด



ภาพที่ 23 ปลากะพงขาวน้ำหนักเฉลี่ย 300 และ 600 กรัม/ตัว

2.3 จากนั้นทำการลดปริมาณน้ำลงให้ปลากะพงขาวขนาดเล็ก มีความหนาแน่น 3 ระดับ ความหนาแน่น 10.9, 15.5 และ 20.5 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ส่วนปลากะพงขาวขนาดใหญ่ทำการลดปริมาณน้ำลงที่ความหนาแน่น 3 ระดับ ความหนาแน่น 11.0, 16.7 และ 21.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และทำการให้อาหาร 2 ครั้ง คือ เวลา 9.00 และ 15.00 น. (ตารางที่ 5)

2.4 ทำการเก็บข้อมูลคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) ในแต่ละบ่อ ได้แก่ ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (Dissolved oxygen, DO) และอุณหภูมิ ทุก ๆ 1 ชั่วโมงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง รวมเวลาทั้งหมด 9 วัน โดยใช้เครื่องมือวัดคุณภาพน้ำรุ่น (Multifunction meter CX - 461 ELMETRON) (ภาพที่ 24)



ภาพที่ 24 เครื่องมือวัดคุณภาพน้ำรุ่น (Multifunction meter CX – 461ELMETRON)

การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลจากการทดลองในแต่ละชุดการทดลอง โดยนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (One Way- ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 5 รายละเอียดการเตรียมปลากะพงขาวที่ระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกัน บ่อขนาด 60 ตัน

ขนาดปลา กะพงขาวที่ใช้ ทดลอง	รายละเอียดบ่อ			
	ความหนาแน่น (กก./ลบ.เมตร)	ปริมาตรน้ำ (ลบ.เมตร)	ระดับน้ำในบ่อเลี้ยง (ซ.ม.)	การให้ออกซิเจน
300 กรัม	10.9	50.4	84	เครื่องเติมอากาศ แบบท่ออย่างยืดหยุ่น
	15.5	38.4	64	
	20.5	26.4	44	
620 กรัม	11.0	50.4	84	เครื่องเติมอากาศ ผ่านท่ออย่างยืดหยุ่น
	16.7	38.4	64	
	21.2	26.4	44	

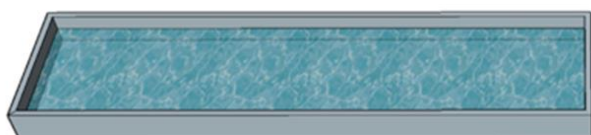
การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลจากการทดลองในแต่ละชุดการทดลอง โดยนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (One Way -ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

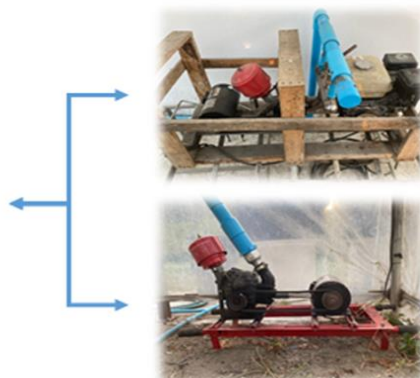
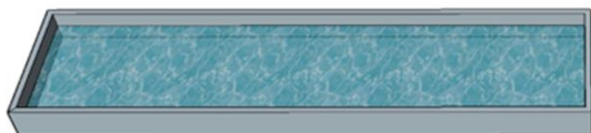
การทดลองที่ 3 เพื่อศึกษาต้นทุนผลตอบแทนและวิธีการเพิ่มผลผลิตด้วยการเพิ่มออกซิเจนที่เหมาะสมในการผลิตปลากะพงขาวด้วยระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด (RAS)

3.1 การทดลองนี้ได้ใช้บ่อซีเมนต์ขนาด 50 ตัน ณ บ่อวิจัยคณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จำนวน 1 บ่อ เพิ่มออกซิเจนด้วยเครื่องเติมแบบท่ออย่างยืดหยุ่น 400 วัตต์ จำนวน 1 ตัว (RAS 1) และเพิ่มออกซิเจนด้วยเครื่องเติมแบบท่ออย่างยืดหยุ่น 400 วัตต์ จำนวน 2 ตัว (RAS 2) ในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนโดยใช้ระยะเวลา 3 เดือน (ภาพที่ 25)

RAS1

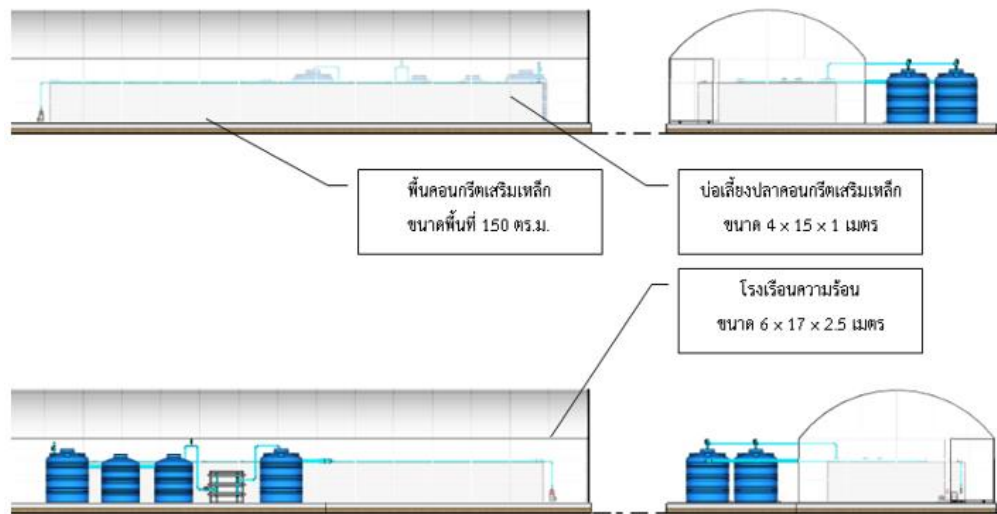


RAS2



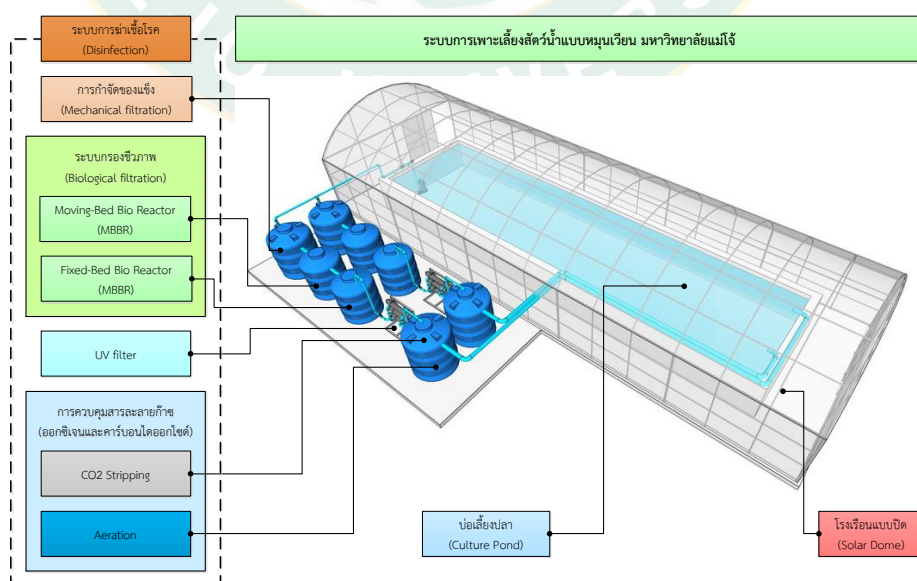
ภาพที่ 25 ระบบการให้อากาศของบ่อ RAS 1 เครื่องให้อากาศจำนวน 1 ตัว และ RAS 2 เครื่องให้อากาศจำนวน 2 ตัว

3.2 จัดเตรียมระบบน้ำหมุนเวียน 1 ชุด ประกอบด้วย บ่อคอนกรีตสำหรับเลี้ยงปลากะพงขาว ขนาดบ่อ 15 x 4 เมตร ที่ความลึก 1 เมตร จำนวน 1 บ่อ ทั้งหมด ภายในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาว ทำการติดตั้งเครื่องเติมออกซิเจนแบบท่ออย่างยืดหยุ่นในโรงเรือนระบบปิด และติดตั้งพลาสติกคลุมเพื่อรักษาความร้อน (ภาพที่ 26)

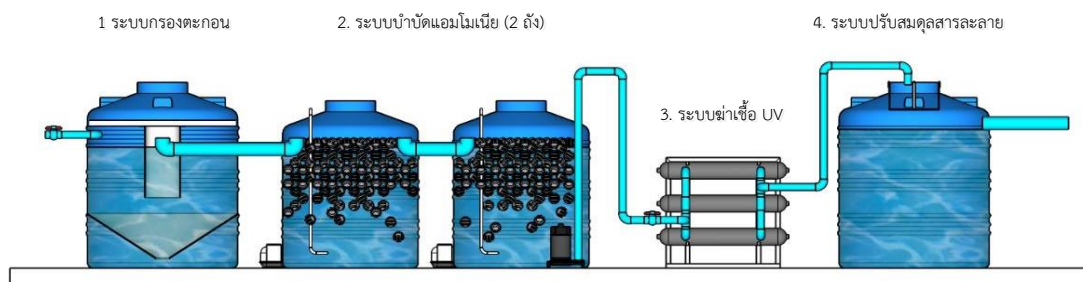


ภาพที่ 26 ขนาดบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียน RAS

การหมุนเวียนน้ำในระบบ RAS ที่ผ่านระบบบำบัด ได้ทำการติดตั้งปั้มน้ำขนาด 2 นิ้ว เพื่อสูบน้ำจากบ่อทดลองเข้าสู่ระบบบำบัด อัตราการหมุนเวียน 500 % ต่อวัน ในส่วนของการบำบัดแอมโมเนียในถัง Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) การบำบัดแอมโมเนียด้วย ระบบ MBBR ในบ่อปลากะพงที่เลี้ยงในระบบหมุนเวียนน้ำ เริ่มจากเป้าหมายการผลิต ปริมาณอาหารต่อวัน โปรตีนในอาหารสัตว์น้ำ อัตราการบำบัดแอมโมเนียมีวัสดุตัวกลางชนิดของจุลินทรีย์ที่เกาะวัสดุตัวกลาง ในถังบำบัดมีการเติมออกซิเจนเพื่อในจุลินทรีย์เจริญเติบโตและบำบัดได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ รายละเอียดถึงบำบัดและรายละเอียด (ดังภาพที่ 27 และ 28)



ภาพที่ 27 ระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียน RAS



ภาพที่ 28 การคำนวณระบบบำบัดแอมโมเนีย (อาหาร 1 กก. ผลิตแอมโมเนีย (TAN) 36.8 กรัม)
ที่มา: Bregnballe, (2015)

3.3 พันธุ์ปลากะพงขาวที่ใช้ในการทดลองทั้ง 3 รอบของการทดลอง เป็นปลาจากฟาร์มเอกชนที่อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ก่อนขนย้ายปลาได้ปรับความเค็มของปลาให้ใกล้เคียง 0 ppt และถูกฝึกให้กินอาหารเม็ด ก่อนขนย้ายได้งดอาหาร 30 ชั่วโมง โดยใช้ปลากะพงขาวขนาดเล็กที่น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น 12.43 กรัม/ตัว จำนวน 1500 ตัว (30 ตัว/ลูกบาศก์เมตร) นำไปปล่อยลงในบ่อเลี้ยงระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) ที่เตรียมไว้ ลงในแต่ละบ่อ และทำการให้อาหาร 2 ครั้ง คือ เวลา 9.00 และ 15.00 น. (ภาพที่ 29)



ภาพที่ 29 ปลากะพงขาวที่ใช้ในการทดลองทั้ง 3 รอบของการทดลอง เป็นปลาจากฟาร์มเอกชนที่อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี

3.4 ทำการเก็บข้อมูลน้ำหนักปลากะพงขาว เพื่อวิเคราะห์การเจริญเติบโต โดยชั่งน้ำหนักเริ่มต้น และทุก 15 วัน ในระยะเวลา 3 เดือน ขณะทำการชั่งน้ำหนักได้ลดความเครียดด้วยน้ำมันกานพลู (ภาพที่ 30) ข้อมูลที่ได้นำมาคำนวณ ดังนี้



ภาพที่ 30 น้ำมันกานพลู

การคำนวณ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น การเจริญเติบโต การแลกเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ อัตราการรอด

1. น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (Weight Gain, WG)

$$WG = \frac{\text{น้ำหนักเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดการทดลอง} - \text{น้ำหนักเฉลี่ยเมื่อเริ่มการทดลอง}}{\text{จำนวนวันที่เลี้ยง}}$$

2. อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (Average Daily Gain, ADG, กรัม/วัน)

$$ADG = \frac{\text{น้ำหนักสุดท้าย} - \text{น้ำหนักเริ่มต้น}}{\text{จำนวนวันที่เลี้ยง}}$$

3. อัตราการแลกเนื้อ (Feed Conversion Ratio, FCR)

$$FCR = \frac{\text{น้ำหนักอาหารที่ปลากิน}}{\text{น้ำหนักปลาที่เพิ่มขึ้น}}$$

4. อัตราการรอด (Survival Rate %)

$$\text{อัตราการรอด} = \frac{\text{จำนวนปลาที่เหลือ}}{\text{จำนวนปลาทั้งหมด}} \times 100$$

3.5 การเก็บข้อมูลคุณภาพน้ำ ตามวิธีการของ ISO 10260 (1992) ในบ่อเลี้ยงปลากระพงขาว ระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด (RAS) ทุก ๆ 15 วันในแต่ละชุดการทดลองโดยใช้ขวดพลาสติกที่มีขนาด 500 มิลลิลิตร และนำน้ำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการตามพารามิเตอร์ต่าง ๆ (ตารางที่ 6) โดยมีการตรวจวัดดังนี้

เก็บข้อมูลต้นทุนการผลิตของการเลี้ยงปลากะพงขาวที่ใช้เครื่องเติมอากาศแบบท่อยาง ยึดหุ่นในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด (RAS) (ตารางที่ 7) โดยใช้วิธีการคำนวณดังนี้

การวิเคราะห์นำข้อมูลในแต่ละชุดการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (One – way analysis of variance: One –Way ANOVA) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยข้อมูลในแต่ละชุดการทดลอง โดยวิธี Duncan’s Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($p < 0.05$) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

ตารางที่ 6 วิธีการและเครื่องมือตรวจสอบคุณภาพน้ำ

Water quality parameters	วิธีการ/เครื่องมือที่ใช้เพื่อการวิเคราะห์
DO (mg/l)	เครื่อง INTELLIGENT METER รุ่น YK-2001 และ DO Sensor
Temperature (°C)	Multimeter TOA Model WQC-22A และ Temp sensor
pH	pH meter (Schott-Gerate CG 840) และ pH sensor
Total ammonia nitrogen, TAN (mg/l)	Phenate method
Nitrite nitrogen (mg/l)	Diazotizing colorimetric method
Nitrate nitrogen (mg/l)	Cadmium reduction method
Phosphate Phosphorus (mg/l)	Stannous chloride
Alkalinity (mg/l as CaCO ₃)	Titration (Boyd, 2015)
Chlorophyll a (µg/l)	Wongrat and Boonyapiwat (2003)

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทน

ต้นทุนทั้งหมด	ต้นทุนคงที่ + ต้นทุนผันแปร
ต้นทุนคงที่	ค่าเสื่อมราคาเครื่องมือและ อุปกรณ์ + ค่าเสียโอกาสพ่อ เครื่องมือ และอุปกรณ์
ต้นทุนในการเลี้ยงทั้งหมด	ต้นทุนคงที่+ต้นทุนผันแปร
ต้นทุนผันแปร	ค่าพันธุ์ปลา + ค่าอาหาร + ค่าไฟฟ้า + ค่าวัสดุอุปกรณ์ + ค่าซ่อมแซมเครื่องมือ + ค่าแรง + ค่าเสียโอกาสเงินลงทุน
กำไรสุทธิ	รายได้ทั้งหมด-ต้นทุนทั้งหมด
รายได้	จำนวนผลผลิตปลากระพงขาวทั้งหมด (กก.) X ราคาปลากระพงขาวที่ ขายได้(บาท)
ผลตอบแทนต่อการลงทุน	(กำไรสุทธิ/ต้นทุนทั้งหมด) X 100

ที่มา: นราทิพย์ (2547)



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองที่ 1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศในการเพิ่มออกซิเจนละลายน้ำให้กับ
บ่อปลากระพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน ด้วยเครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่นและ
เครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์

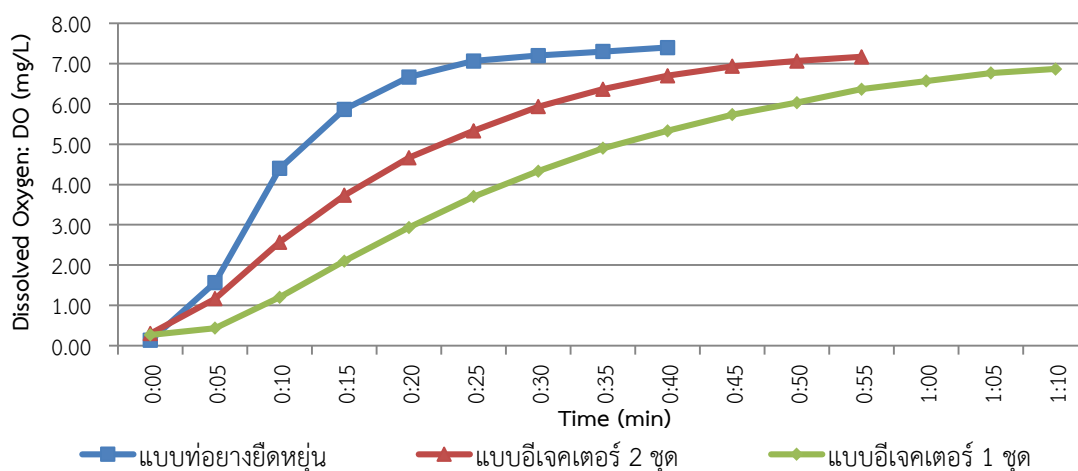
1.1 การเติมออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศ

ผลการทดลองการเติมออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศทั้ง 3 แบบพบว่า เครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่นมีอัตราการเติมออกซิเจนในน้ำมากกว่า เครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ โดยใช้ระยะเวลาประมาณ 40 นาที ในการเติมออกซิเจนให้อิมตัวที่ประมาณ 7.40 มิลลิกรัม/ลิตร ในทางกลับกันเครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ 1 ตัว และเครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ 2 ตัว นั้นจะต้องใช้ถึงเวลา 55–70 นาที ในการเติมออกซิเจนให้อิมตัวที่ประมาณ 6.87–6.97 มิลลิกรัม/ลิตร จากการเปรียบเทียบทางสถิติพบว่าปริมาณของเครื่องเติมอากาศในแต่ละหน่วยการทดลองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ภาพที่ 31 และตารางที่ 8)

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์การเติมออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศทั้ง 3 แบบ

วิธีการให้ออกซิเจน	เวลา (นาที)	ออกซิเจนอิมตัว (มก./ลิตร)
เครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่น (400 วัตต์)	40±1.45 ^a	7.40±0.05 ^a
เครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ 1 ตัว (250 วัตต์)	70±2.40 ^b	6.87±0.10 ^b
เครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ 2 ตัว (500 วัตต์)	55±0.33 ^c	6.97±0.43 ^b

หมายเหตุ อักษร a, b, c ที่ไม่เหมือนกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



ภาพที่ 31 ค่าออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (DO) ของเครื่องเติมอากาศทั้ง 3 แบบ

1.2 ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ของเครื่องเติมอากาศทั้ง 3 แบบ

จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ของเครื่องเติมอากาศทั้ง 3 แบบ พบว่า ค่า K_La ของเครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยี่ดหุ่่นมีค่ามากกว่าเครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ทั้ง 1 ตัวและ 2 ตัว มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0609 min^{-1} , 0.0519 min^{-1} และ 0.0321 min^{-1} ตามลำดับ ในส่วนของค่าไฟฟ้าพบว่าของเครื่องเติมอากาศทั้ง 3 แบบ พบว่าของเครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยี่ดหุ่่นมีการใช้ค่าไฟฟ้าน้อยกว่าเครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ทั้ง 1 ตัวและ 2 ตัว มีค่าไฟฟ้าอยู่ที่ 28 บาท/วัน 35 บาท/วัน และ 70 บาท/วัน จากการเปรียบเทียบทางสถิติพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน (K_La) และค่าไฟฟ้าของเครื่องเติมอากาศทั้ง 3 แบบ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ภาพที่ 32 และ 33 ตารางที่ 9)

จากงานวิจัยนี้พบว่าการใช้เครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยี่ดหุ่่น เหมาะสมกับการเลี้ยงปลา กะพงขาวระบบ RAS มากที่สุด เนื่องจากมีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่ดีที่สุด โดยมีค่า $K_La = 0.0609 \text{ min}^{-1}$ ซึ่งมากกว่าเครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ และสอดคล้องกับรายงานของ นราพงศ์ (2553) ที่กล่าวว่า เครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยี่ดหุ่่นมีบทบาทต่อการเพิ่มออกซิเจนในน้ำเนื่องจากท่ออย่างยี่ดหุ่่นนั้นมีประสิทธิภาพในการเติมออกซิเจนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนสูง โดยคุณสมบัติทางกายภาพของท่ออย่างยี่ดหุ่่นมีความสัมพันธ์กับกลไกการถ่ายเทออกซิเจน ซึ่งมีความทนต่อแรงดึงและความยืดหยุ่นของท่ออย่างยี่ดหุ่่นเป็นปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อค่าความดันขณะเติมอากาศซึ่งส่งผลต่อการไหลของอากาศทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากจึงส่งผลให้พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมากเป็นสาเหตุทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เช่นเดียวกับกับงานวิจัยของ รัชกาล (2559) ที่ทำศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

การเติมอากาศของเครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่นกับเครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์และค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ พบว่า เครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่น สามารถเพิ่มระดับค่าออกซิเจนละลายจาก 0 ถึง 6 มิลลิกรัม/ลิตร ได้เร็วที่สุดในอุปกรณ์เติมอากาศทั้งสองชนิด ด้วยเวลา 10 นาที 36 วินาที รองลงมาคืออีเจคเตอร์ขนาด 2 นิ้ว ใช้เวลา 17 นาที 3 วินาที และค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ก็พบว่าเครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่นซึ่งมากกว่าเครื่องเติมอากาศแบบเวนจูรี โดยมีค่า $K_La = 6.78 \text{ min}^{-1}$ ด้วยเหตุนี้เครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่นจึงสามารถกระจายฟองอากาศออกไปครอบคลุมพื้นที่ได้มากกว่าทำให้ประสิทธิภาพการเติมอากาศจึงสูงกว่าเครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ นอกจากนี้ ศิริรัช และคณะ (2562) กล่าวว่า ความขรุขระของพื้นที่ผิวสัมผัส สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเติมอากาศของเครื่องเติมอากาศได้ เนื่องจากทำให้ฟองอากาศที่ได้ มีขนาดเล็กลง ซึ่งผิวสัมผัสของท่ออย่างยืดหยุ่นนั้นมีความขรุขระอยู่แล้ว ยังมีผลทำให้เพิ่มฟองอากาศกับน้ำเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเพิ่มขึ้น

ในส่วนของผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเติมอากาศ พบว่าเครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่นกับเครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ใช้พลังงานไฟฟ้าไม่แตกต่างกัน แต่ถ้าเพิ่มระดับความลึกของน้ำจะพบว่าเครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์จะใช้พลังงานมากกว่าเนื่องจากเครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่นนั้นอาศัยการสุบลมไปยังหัวกระจายอากาศโดยตรง ในขณะที่เครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้การสูบน้ำผสมกับอากาศจึงสูญเสียพลังงานมากกว่าอุปกรณ์ที่ใช้การสูบน้ำอากาศโดยตรงเนื่องจากมวลของน้ำที่มิน้ำหนักมากกว่าอากาศ ย่อมต้องใช้พลังงานในสูบน้ำจากตัวเครื่องสูบน้ำมากกว่าเพื่อที่จะให้อัตราการไหลและปริมาณออกซิเจนที่ใกล้เคียงกัน

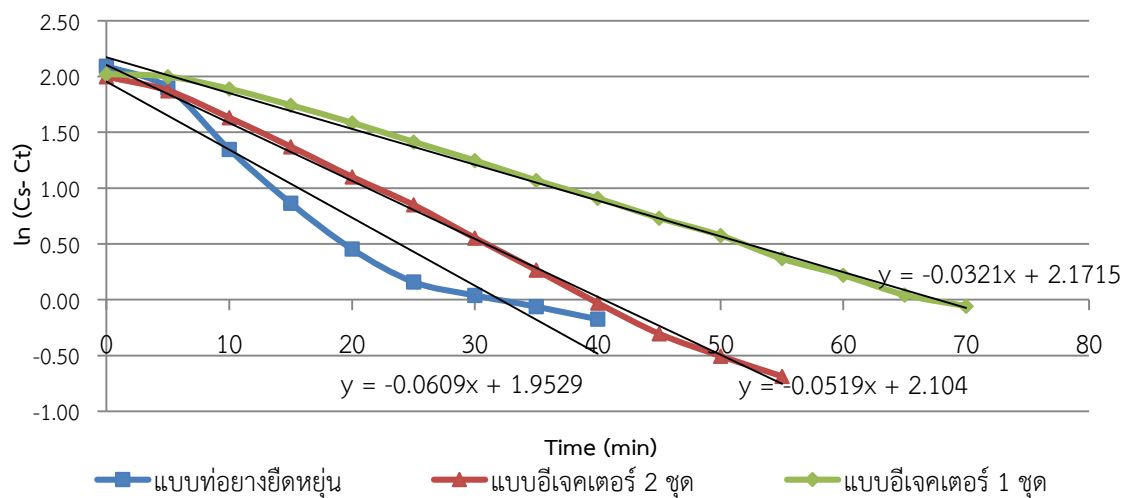
ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ค่าไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน (K_La) ของเครื่องเติมอากาศทั้ง 3 แบบ

วิธีการให้ออกซิเจน	ค่า K_La (min^{-1})	ค่าไฟฟ้า/บาท/วัน
เครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่น (400 วัตต์)	0.0609 ± 0.006^a	28.00 ^a
เครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ 1 ตัว (250 วัตต์)	0.0321 ± 0.001^b	35.00 ^b
เครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ 2 ตัว (500 วัตต์)	0.0519 ± 0.03^c	70.00 ^c

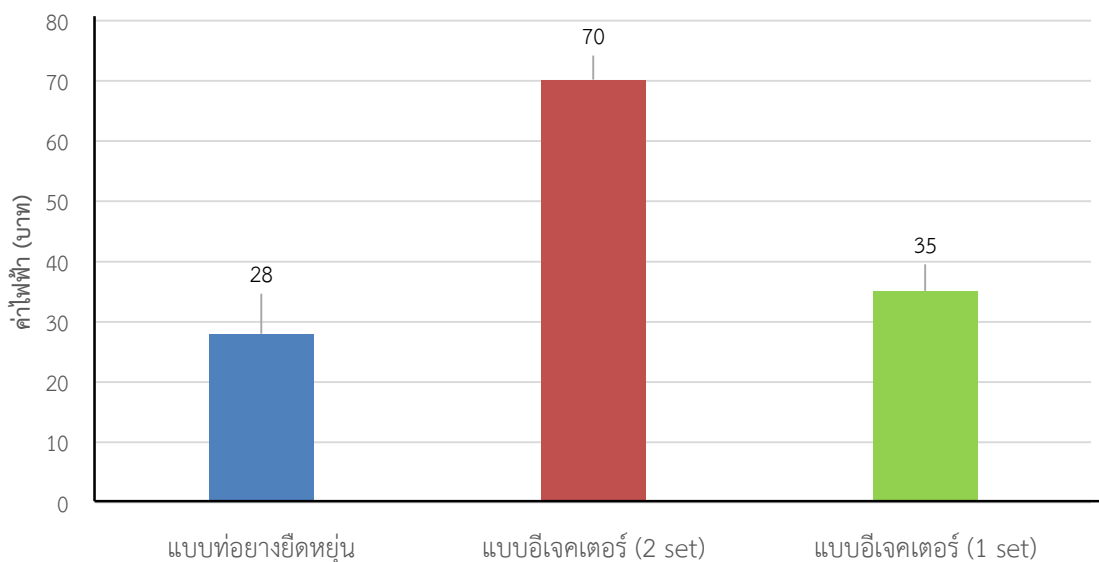
หมายเหตุ อักษร a, b, c ที่ไม่เหมือนกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 9 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มเครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ 2 ตัว (500 วัตต์) ไม่ได้ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน (K_La) เพิ่มสูงขึ้นจากการเติมอีเจคเตอร์ 1 ตัวมากนัก

เนื่องจาก ณ จุดอิ่มตัวของออกซิเจนละลายน้ำ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าอุณหภูมิน้ำ ซึ่งหากอุณหภูมิสูงขึ้น ค่า K_{La} จะมีค่าต่ำลง ในการทดลองครั้งนี้ ทดลองที่อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 30 °C จะมีค่าจุดอิ่มตัวของออกซิเจนละลายน้ำ หรือค่า K_{La} อยู่ที่ 7.38 มิลลิกรัม/ลิตร (ค่าความดันบรรยากาศ 730.06 มิลลิเมตรปรอท) (ตารางที่ 4) (Metcalf and Eddy, 2004) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ไม่สามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน (K_{La}) สูงมากไปกว่านี้ได้



ภาพที่ 32 ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน (K_{La}) ของเครื่องเติมอากาศทั้ง 3 แบบ



ภาพที่ 33 การเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าที่ใช้ในระบบการเติมอากาศ สำหรับทดสอบค่า K_{La}

การทดลองที่ 2 เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนที่ให้อากาศด้วยเครื่องเติมอากาศ ในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด ในระดับความหนาแน่น ที่แตกต่างกัน

2.1 การเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจน อุณหภูมิและการกินอาหาร

ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด ในระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกัน 3 ระดับของปลากะพงขาวขนาด 300 กรัม ได้แก่ ความหนาแน่นที่ 10.9, 15.5 และ 20.5 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร พบว่ามีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำอยู่ที่ 4.40, 3.98 และ 4.57 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ 29.86, 29.56 และ 30.26 °C ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบทางสถิติพบว่า การเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวขนาด 300 กรัมที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน ในระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกัน 3 ระดับมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 10)

ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด ในระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ของปลากะพงขาวขนาด 620 กรัม ได้แก่ ความหนาแน่นที่ 11.0, 16.7 และ 21.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร พบว่ามีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำอยู่ที่ 3.24, 3.53 และ 3.01 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับและมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ 29.1, 27.67 และ 30.17 °C ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบทางสถิติพบว่า การเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวขนาด 620 กรัม ที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน ในระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกัน 3 ระดับ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 10)

การตรวจสอบการกินอาหารของปลากะพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด ในระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกัน พบว่า ในระดับความหนาแน่นที่ 10.9 และ 15.5 ของปลาขนาดเล็กในระดับความหนาแน่นที่ 11.0 16.7 ของปลาขนาดใหญ่ พบว่าปลากะพงขาวทั้งสองขนาดสามารถกินอาหารได้ปกติที่ 14 และ 11 กิโลกรัม/วัน ซึ่งแตกต่างกับระดับความหนาแน่นที่ 20.5 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ของปลาขนาดเล็ก และในระดับความหนาแน่นที่ 21.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ของปลาขนาดใหญ่ ปลากะพงขาวจะกินอาหารลดลงเหลือ 3 กิโลกรัม/วัน และ 5 กิโลกรัม/วัน ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สามารถบอกได้ถึงความเครียดที่มาจากความหนาแน่นที่สูงขึ้น ทำให้ส่งผลต่อการกินอาหารของสัตว์น้ำ (ตารางที่ 10)

ตารางที่ 10 การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจน อุณหภูมิ และปริมาณอาหารที่กินต่อวัน ในบ่อปลากะพงขาวที่เลี้ยงแบบหนาแน่นที่แตกต่างกันในบ่อขนาด 60 ตัน

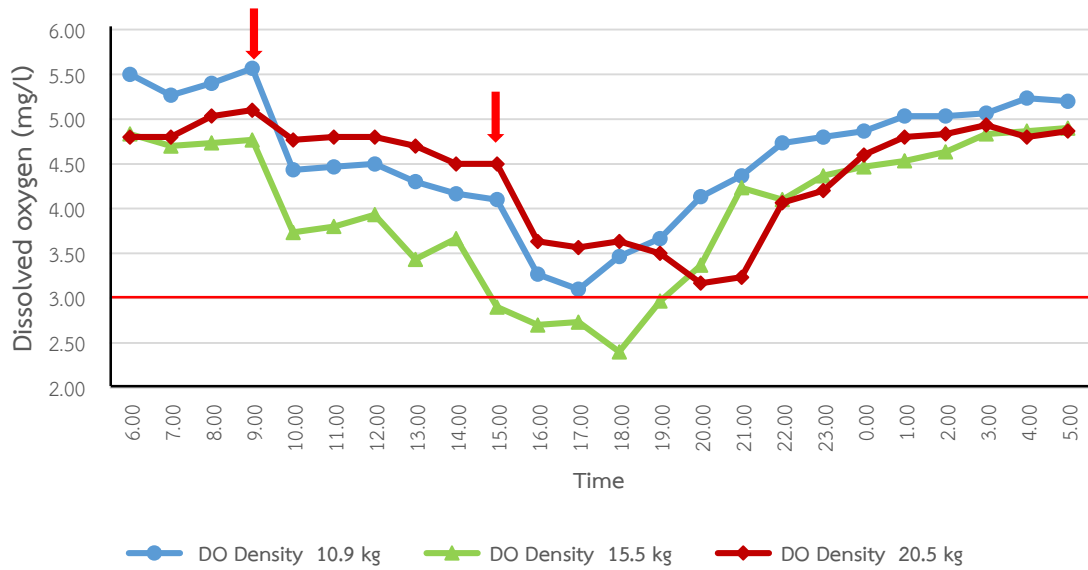
ขนาดปลากะพง ขาวที่ใช้ทดลอง	รายละเอียดบ่อ				
	ความหนาแน่น (kg/m ³) (n=3)	ออกซิเจน เฉลี่ย/วัน (mg/L) (n=3*24)	ออกซิเจน สูงสุด - ต่ำสุด (mg/L)	อุณหภูมิ เฉลี่ย/วัน (°C)	การกิน อาหาร/ วัน (kg)
300 กรัม/ตัว	10.9	4.40±1.03 ^a	3.10-5.57	29.86±1.36 ^{ab}	14.00 ^a
	15.5	3.98±1.00 ^b	2.40-4.90	29.56±0.93 ^b	14.00 ^a
	20.5	4.57±0.70 ^a	3.17-5.10	30.26±1.36 ^a	3.00 ^b
620 กรัม/ตัว	11.0	3.24±0.72 ^a	2.24-3.63	29.1±1.27 ^a	11.00 ^a
	16.7	3.53±0.76 ^b	2.57-4.45	27.67±5.58 ^b	11.00 ^a
	21.2	3.01±0.48 ^a	2.12-4.19	30.17±0.80 ^a	5.00 ^b

หมายเหตุ อักษร a, b, ab ที่ไม่เหมือนกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

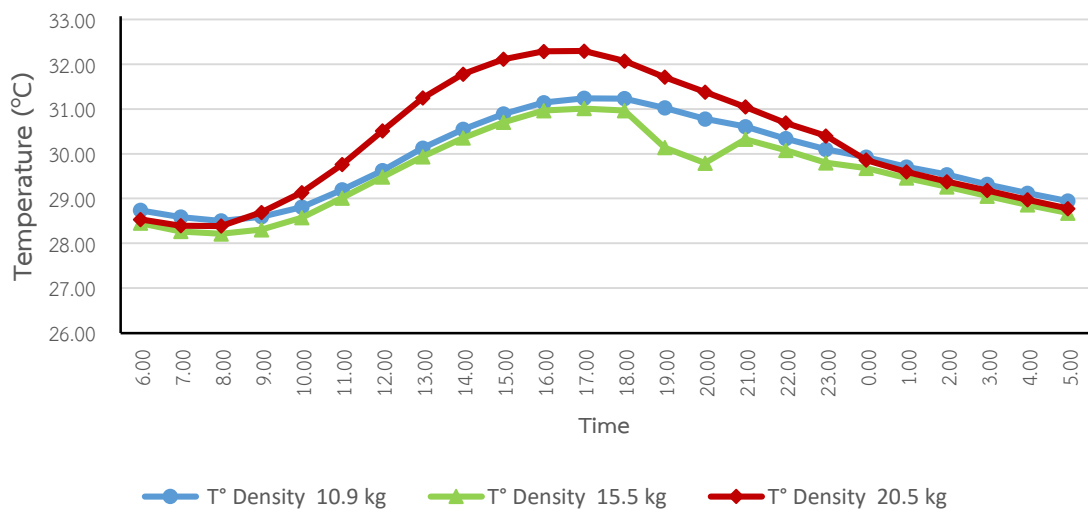
การเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและอุณหภูมิในรอบวัน (24 ชม.) ของปลากะพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด ในระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกัน พบว่า ปลากะพงขาวทั้ง 2 ขนาด เมื่อได้กินอาหารในช่วงเวลา 9.00 และ 15.00 น. ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำจะลดเนื่องจากร่างกายของสัตว์น้ำมีความจำเป็นต้องใช้ออกซิเจนเพื่อไปใช้ในกระบวนการย่อยอาหาร ซึ่งบวกกับการเลี้ยงในระบบปิดมีการคลุมบ่อด้วยพลาสติกใส ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิน้ำสูงกว่า 25 °C (ภาพที่ 34-37) ส่งผลให้ปลากะพงขาวสามารถกินอาหารได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำอยู่ระหว่าง 28-32 °C เนื่องจากสัตว์น้ำเป็นสัตว์เลือดเย็น และไม่มีระบบที่จะควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ เมื่อใดก็ตามที่มีการเปลี่ยนแปลงออกซิเจนและอุณหภูมิของน้ำ ในระดับสูงหรือต่ำกว่าระดับที่เหมาะสม สัตว์น้ำจะมีการเคลื่อนไหวน้อย ทำให้ความต้องการใช้พลังงานลดลง ซึ่งส่งผลต่อการกินอาหารของสัตว์น้ำโดยตรง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Cerezo and Benjamin (2005) ได้ทำการศึกษาระดับออกซิเจนละลายในน้ำที่เหมาะสมของปลาหมึกยักษ์ (*Octopus vulgaris* cuvier, 1797) โดยให้น้ำหนักและอุณหภูมิต่างกัน เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมและความถี่ในการหายใจ การศึกษาครั้งนี้มีการจัดการระดับออกซิเจน (ระดับสูงสุด 100 %, ระดับที่เหมาะสม 65%, ระดับอันตราย 35 %) โดยใช้ปลาหมึกยักษ์ขนาด 0.18–2.20 กิโลกรัม ซึ่งควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 15.5–27.4 °C) และทำการลดระดับออกซิเจนที่ละลายในน้ำ โดยเริ่มต้นที่ระดับสูงสุดไปจนถึงระดับต่ำสุดเพื่อดูพฤติกรรม

และความถี่ในการหายใจของหมึกยักษ์ พบว่า ความถี่ในการหายใจของหมึกยักษ์ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 17.7 ± 3.29 , 33.3 ± 5 และ 62.8 ± 15.94 ครั้ง/นาที โดยความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ จนกระทั่งถึงความอิ่มตัวของออกซิเจนทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ($p < 0.05$)

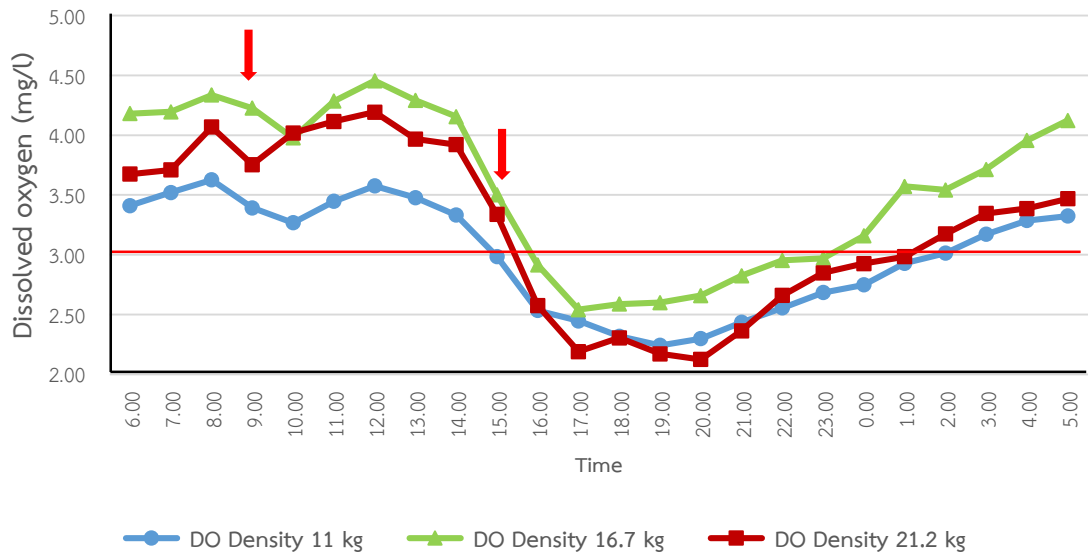
การเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ ขึ้นอยู่กับอัตราความหนาแน่นของสัตว์น้ำที่เลี้ยง ยิ่งความหนาแน่นสูง จะพบว่ามีการใช้ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำจำนวนมาก ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ ที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ ไม่ควรต่ำกว่า 3 มิลลิกรัม/ลิตร (Boyd, 1982) ในการทดลองครั้งนี้ พบว่าค่าต่ำสุดของออกซิเจนที่ละลายน้ำของปลากะพงขาวทั้ง 2 ขนาด อยู่ที่ 2.20 มิลลิกรัม/ลิตร 2.40 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นการชี้ให้เห็นว่า เครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่นให้อากาศไม่เพียงพอโดยเฉพาะหลังให้อาหาร เนื่องจากปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่ต่ำลง เป็นตัวแปรสำคัญในการจำกัดปริมาณผลผลิตในการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบน้ำหมุนเวียนในความหนาแน่นสูง ดังนั้นการจัดการในเรื่องของออกซิเจนจึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้ในการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำให้อยู่ในระดับที่เพียงพอ (Ebeling, 1998) จากการทดลองครั้งนี้ ค่า DO ลดลงหลังให้อาหารซึ่งเป็นผลมาจากความต้องการออกซิเจนที่มากขึ้นเพื่อใช้ในการย่อยอาหาร (Goddard, 1996) ประกอบกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ส่งผลให้การใช้ออกซิเจนเพิ่มขึ้นด้วย โดยทั่วไปสัตว์น้ำต้องการออกซิเจน ในอัตรา 250 กรัม O_2 /อาหารปลา 1 กิโลกรัม ดังนั้นการจัดการออกซิเจนให้เพียงพอตอนหลังให้อาหารจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง สัตว์น้ำต้องการออกซิเจนสูงขึ้นหลังจากให้อาหาร Boyd (1982) รายงานว่าปลาที่เพิ่งได้รับอาหารใหม่ ๆ จะต้องการปริมาณออกซิเจน 520 มิลลิกรัม/อาหาร 1 กิโลกรัม/ชั่วโมง แต่หลังจากให้อาหารแล้ว 1 ชั่วโมง จะต้องการปริมาณออกซิเจน 680 มิลลิกรัม /ชั่วโมง การเลี้ยงปลาที่หนาแน่นเกินไปจะส่งผลต่อความเครียดของปลา การเลี้ยงปลากะพงขาวเกิน 18.75 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร จะทำให้ปลาเกิดความเครียด (Ardiansyah and Fotedar, 2016) จากการวิจัยนี้มีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยในการทดลองครั้งนี้ ที่พบว่าเมื่อความหนาแน่นของปลากะพงขาวในบ่อสูง (20.5-21.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) ปลากินอาหารลดลง ซึ่งเห็นได้ชัดทั้งในปลาขนาดเล็กและปลาขนาดใหญ่ บ่งบอกถึงความเครียดของปลาที่มาจากความหนาแน่นสูงขึ้น



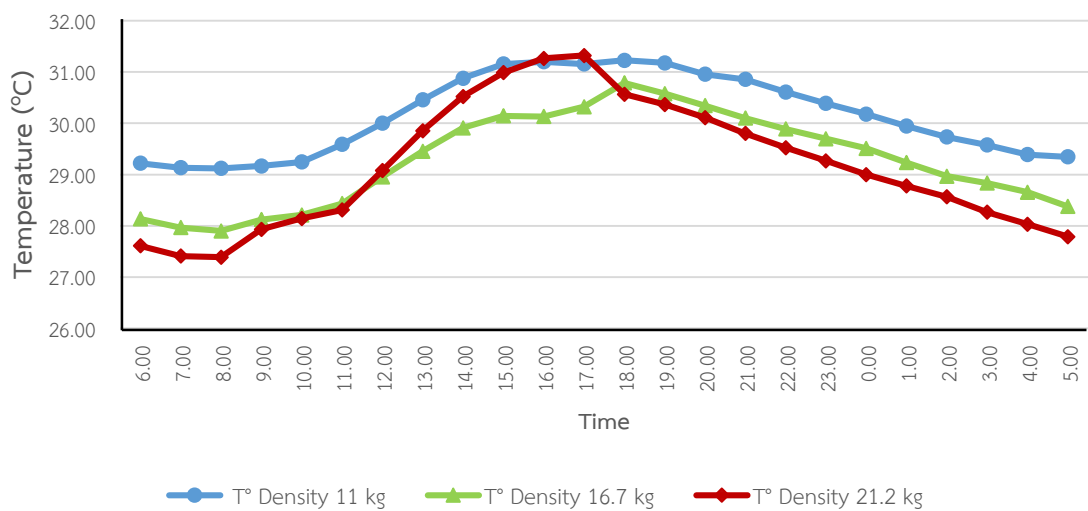
ภาพที่ 34 การเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวขนาด 300 กรัม ที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน ในระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกัน 3 ระดับ (ลูกศรสีแดงคือช่วงเวลาให้อาหาร)



ภาพที่ 35 การเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวขนาด 300 กรัม ที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน ในระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกัน 3 ระดับ



ภาพที่ 36 การเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวขนาด 620 กรัม ที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน ในระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกัน 3 ระดับ (ลูกศรสีแดงคือช่วงเวลาให้อาหาร)



ภาพที่ 37 การเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวขนาด 620 กรัม ที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน ในระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกัน 3 ระดับ

การทดลองที่ 3 การศึกษาวิธีการเพิ่มผลผลิตด้วยการเพิ่มออกซิเจนที่เหมาะสมในการผลิตปลา กะพงขาวด้วยระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด (RAS)

3.1 อัตราการเจริญเติบโตของปลากะพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด

จากผลการทดลองการเจริญเติบโตของปลากะพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ ได้แก่ RAS 1 เพิ่มออกซิเจนด้วยเครื่องเติมแบบท่ออย่างยืดหยุ่น 1 เครื่องและ RAS 2 เพิ่มออกซิเจนด้วยเครื่องเติมแบบท่ออย่างยืดหยุ่น 2 เครื่อง ตัวในระยะเวลา 3 เดือนได้ผลการเจริญเติบโต ดังนี้

3.1.1 น้ำหนักเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 ในระยะเวลา 3 เดือน โดยน้ำหนักปลากะพงขาวเริ่มต้นที่ RAS 1 12.43 ± 1.65 กรัม และ ที่ RAS 2 12.43 ± 1.15 กรัม พบว่าการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด RAS 2 มีน้ำหนักเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 333.87 ± 17.33 กรัม ซึ่งมีค่าเฉลี่ยมากกว่าการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด RAS 1 โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 282.91 ± 13.85 กรัม เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่า น้ำหนักเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นของปลากะพงขาวมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 11)

3.1.2 อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน

จากผลการทดลองการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 ในระยะเวลา 3 เดือน พบว่าการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด RAS 2 มีอัตราการเจริญเติบโตต่อวัน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.71 ± 0.19 กรัม ซึ่งมีค่าเฉลี่ยมากกว่า การเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด RAS 1 โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.14 ± 0.15 กรัม เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่า อัตราการเจริญเติบโตต่อวันของปลากะพงขาวมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 11)

3.1.3 อัตราการรอด

จากผลการทดลองการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 ในระยะเวลา 3 เดือน พบว่ามีอัตราการรอด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 88.95 ± 0.05 เปอร์เซ็นต์ และ 90.46 ± 2.84 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่าอัตราการรอดของปลากะพงขาวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) จากผลการทดลองการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ แสดงให้เห็นว่ามีอัตราการรอดสูงและอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยในเรื่องผลผลิตต่อรอบการเลี้ยงปลากะพงขาว (ตารางที่ 11)

3.1.4 อัตราการแลกเนื้อ (FCR)

จากผลการทดลองการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 ในระยะเวลา 3 เดือน พบว่าอัตราการแลกเนื้อ (FCR) โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.52 ± 0.14 และ 1.56 ± 0.08 เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่า อัตราการแลกเนื้อ (FCR) ของปลากะพงขาวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 11)

3.1.5 ปริมาณอาหารทั้งหมด

จากผลการทดลองการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 ในระยะเวลา 3 เดือน พบว่าปริมาณอาหารทั้งหมดที่ใช้เลี้ยงปลากะพงขาว RAS 2 อยู่ที่ 518.78 กิโลกรัม ซึ่งมากกว่า RAS 1 ที่ใช้ไปทั้งหมด 430.31 กิโลกรัม เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่า ปริมาณอาหารทั้งหมดที่ใช้เลี้ยงปลากะพงขาวมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 11) เนื่องจากการเลี้ยงปลากะพงขาว RAS 2 มีการเจริญเติบโตที่ดีกว่า RAS 1 ส่งผลให้กินอาหารมากขึ้น ทำให้ใช้ปริมาณอาหารทั้งหมดมากกว่า

3.1.5 ผลผลิตที่เก็บเกี่ยวทั้งหมด

จากผลการทดลองการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 ในระยะเวลา 3 เดือน พบว่าการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบ RAS 2 มีผลผลิตมากกว่า RAS 1 โดยมีผลผลิตทั้งหมด 470.07 กิโลกรัม และ 394.05 เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่า ปริมาณอาหารทั้งหมดที่ใช้เลี้ยงปลากะพงขาวมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 11) เนื่องจากการเลี้ยงปลากะพงขาว RAS 2 มีการเจริญเติบโตที่ดีกว่า RAS 1 ส่งผลให้กินอาหารมากขึ้น ทำให้มีผลผลิตมากกว่า

ตารางที่ 11 การเจริญเติบโตของปลากะพงขาวในระบบ RAS ทั้ง 2 รูปแบบ ระยะเวลา 3 เดือน

การเจริญเติบโต	RAS 1	RAS 2
น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)	12.43±1.65	12.43±1.15
น้ำหนักสุดท้าย (กรัม)	295.33±12.74 ^b	346.08± 16.25 ^a
น้ำหนักที่เฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น (กรัม)	282.91± 13.85 ^b	333.87± 17.33 ^a
อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (กรัม)	3.14± 0.15 ^b	3.71± 0.19 ^a
อัตราการรอด (%)	88.95± 0.05	90.46± 2.84
อัตราการแลกเนื้อ (FCR)	1.52±0.14	1.56± 0.08
ปริมาณอาหารทั้งหมด (กิโลกรัม)	430.31±128.60 ^b	518.78±143.30 ^a
ผลผลิตที่เก็บเกี่ยวทั้งหมด (กิโลกรัม)	394.05± 18.86 ^b	470.07±36.30 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามแนวนอนในแต่ละแถวแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($p < 0.05$)

ทั้งนี้อัตราการเจริญเติบโตของปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด RAS 2 ที่สูงกว่า RAS 1 นั้นเนื่องจาก มีปริมาณออกซิเจนสูงกว่าซึ่งทำให้มีผลต่อการเจริญเติบโตของปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด กิจกรรมและการบริโภคอาหารได้รับอิทธิพลอย่างมากจากปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมคือ ออกซิเจนและอุณหภูมิ (Kestemont and Baras, 2001) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Thorarensen et al. (2017) ที่ทำการศึกษาผลของความอึดตัวของออกซิเจนต่อการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาค็อดแอตแลนติก (*Gadus morhua* L.) เพื่อตรวจหาความระดับออกซิเจน ที่ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของปลาค็อดแอตแลนติก โดยใช้ปลาค็อดแอตแลนติกที่มีน้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น 21.9 กรัม และทำการเลี้ยงในที่ระดับของออกซิเจนแตกต่างกัน 5 ระดับได้แก่ 65, 81, 103, 121 และ 150% เป็นเวลา 98 วัน พบว่า ที่ระดับของออกซิเจนต่ำกว่า 100% การเจริญเติบโตของปลาค็อดแอตแลนติกจะลดลง โดยน้ำหนักสุดท้ายของปลาค็อดแอตแลนติก ที่เลี้ยงในระดับของออกซิเจน 65% จะมีน้ำหนักน้อยกว่าปลาค็อดแอตแลนติก ที่เลี้ยงในระดับของออกซิเจน 100% และน้ำหนักสุดท้ายของปลาค็อดแอตแลนติกที่เลี้ยงในระดับของออกซิเจน 150% สูงกว่าปลาที่เลี้ยงที่ความอึดตัว 100 % อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ระดับออกซิเจนมีผลต่อการกินอาหารสัตว์น้ำยิ่ง โดยระดับออกซิเจนที่สูงสัตว์น้ำก็สามารถกินอาหารได้มากขึ้นและส่งผลในเรื่องการเจริญเติบโต และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tran-Duy et al. (2008) ที่ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของออกซิเจนและน้ำหนักตัวต่อปริมาณอาหารสูงสุดต่อการเจริญเติบโตของปลานิล (*Oreochromis niloticus*) โดยใช้ปลานิล 2 ขนาดที่น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น 21 และ 147 กรัม ทำการเลี้ยงในระดับออกซิเจนต่างกัน 2 ระดับ ได้แก่ 3 และ 5.6 มิลลิกรัม/ ลิตร และทำการให้อาหาร 2 ครั้ง/วัน โดยใช้อาหารสำเร็จรูปผลการวิจัยพบว่า การกินอาหารและการเจริญเติบโตของปลานิลที่เลี้ยงในระดับออกซิเจน 5.6 มิลลิกรัม/ ลิตร สูงกว่าที่ปลานิลที่เลี้ยงในระดับ ออกซิเจน 3 มิลลิกรัม/ ลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) ปริมาณอาหารยังมีความสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของปลานิลทั้ง 2 ขนาดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) และ Chabot and Dutil (1999) ให้เหตุผลว่าความสัมพันธ์ระหว่างการกินอาหารของปลาและออกซิเจน มีความสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตเนื่องจากจำเป็นต้องใช้ออกซิเจนเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการย่อยอาหารโดยทั่วไปสัตว์น้ำต้องการออกซิเจน ในอัตรา 250 กรัม O_2 /อาหารปลา 1 กิโลกรัม ดังนั้นการจัดการออกซิเจนให้เพียงพอในช่วงหลังการให้อาหารจึงมีความจำเป็น ซึ่งสัตว์น้ำต้องการปริมาณออกซิเจนสูงขึ้นหลังจากให้อาหาร Boyd (1982) รายงานว่าปลาที่เพิ่งได้รับอาหารใหม่ ๆ จะต้องการปริมาณออกซิเจน 520 มิลลิกรัม/อาหาร 1 กิโลกรัม/ชั่วโมง แต่หลังจากให้อาหารแล้ว 1 ชั่วโมง จะต้องการปริมาณออกซิเจน 680 มิลลิกรัม/ชั่วโมง เนื่องจากต้องใช้ออกซิเจนในการกระบวนการย่อยอาหาร โดย (Fry, 1947) กล่าวว่าออกซิเจนเป็นปัจจัยหนึ่งที่สามารถเพิ่มกระบวนการเมแทบอลิซึมในร่างกายเพื่อนำไปใช้ในการเผาผลาญอาหารซึ่งกระบวนการเมแทบอลิซึมในร่างกายสูง การเผาผลาญอาหารมีมากขึ้นซึ่งมีผลทำให้

ปลามีการเจริญเติบโตที่ดีขึ้น และ Eliason and Farrell (2014) กล่าวว่าออกซิเจนที่อยู่ในระดับที่เหมาะสมสัตว์น้ำก็สามารถเจริญเติบโตได้ดี แต่ถ้าอยู่ในภาวะขาดออกซิเจนจะจำกัดการทำงาน กระบวนการเมแทบอลิซึม ส่งผลให้การเจริญเติบโตลดลงเนื่องจากใช้เวลาในการย่อยอาหารนานขึ้น และส่งผลต่อปริมาณผลผลิตในการเลี้ยง Plante et al. (1998) ได้กล่าวว่าถ้าปริมาณออกซิเจนลดลง จะมีผลต่ออัตราการรอดอัตราการแลกเนื้อและการเจริญเติบโตของปลากะพงขาว และ Kausar and Salim (2006) รายงานว่า อัตราการแลกเนื้อที่ดีที่สุดใปลาที่สกเทศจะมีออกซิเจนมากกว่าอยู่ที่ 4 มิลลิกรัม/ลิตร อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 25–29 °C มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Andrews and Stickney (1972) รายงานว่าปลาดุกที่เลี้ยงในช่วงอุณหภูมิ 18–34 °C ให้อัตราการแลกเนื้อที่ดีที่สุด อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 30 °C จากงานวิจัยพบว่าการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบถ้าทำในเชิงพาณิชย์ที่จำเป็นต้องเลี้ยงปลากะพงขาวที่มีความหนาแน่นสูงสามารถบอกได้ว่า เลยออกซิเจนมีบทบาทสำคัญเป็นอย่างมากเนื่องจากเป็นตัวกำหนดผลผลิตต่อรอบของการเลี้ยงดังนั้น ควรมีการจัดการออกซิเจนให้เหมาะสม

3.2 คุณภาพน้ำของปลากะพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด

จากผลการทดลอง คุณภาพน้ำของปลากะพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 เพิ่มออกซิเจนด้วยเครื่องเติมแบบท่ออย่างยืดหยุ่น 1 เครื่องและ RAS 2 เพิ่มออกซิเจนด้วยเครื่องเติมแบบท่ออย่างยืดหยุ่น 2 ในระยะเวลา 3 เดือนได้ผลดังนี้

3.2.1 ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved oxygen, DO)

จากผลการทดลองการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 ในระยะเวลา 3 เดือน พบว่า มีค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ DO โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 5.3 ± 0.2 และ 6.9 ± 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่า ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ DO ในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 12)

ออกซิเจนละลายในน้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งที่สามารถเป็นตัวกำหนด อัตราความหนาแน่นที่ปล่อย อัตราการเจริญเติบโต ผลต่ออัตราการรอด พฤติกรรมของของปลา และผลผลิตในเพาะเลี้ยงเชิงพาณิชย์ ทั้งหมดนี้ได้รับการยืนยันในการศึกษาเกี่ยวกับปลาหลายชนิด เช่น ปลาเรนโบว์เทราต์ *Oncorhynchus mykiss* (Dabrowski et al., 2004; Glencross, 2009) ปลาแซลมอน แอตแลนติก *Salmo salar* (Bergheim et al., 2006; Remen et al., 2012; Thorarensen and Farrell, 2011) และปลากะพงขาว ซึ่งในระบบ RAS ระดับออกซิเจนควรไม่ต่ำกว่า 3 มิลลิกรัม/ลิตร จากการทดลองการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ มีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของปลากะพงขาว แต่ RAS 2 มีระดับออกซิเจนที่สูงกว่า RAS 1 ซึ่งทำให้มีผลในเรื่องอัตราการเจริญเติบโต อัตราการรอดและผลผลิตที่

มากกว่าในแต่ละรอบของการเลี้ยงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ McGraw et al. (2001) ที่ทำการศึกษากุ้งออกซิเจนที่ละลายในน้ำระดับต่ำและระดับสูงเพื่อจะเพิ่มผลผลิตกุ้งขาว และ กุ้งแช่บ๊วย ในบ่อดิน โดยปล่อยกุ้งที่ความหนาแน่นเฉลี่ย 33 ตัว/บ่อ ในแต่ละบ่อจะติดตั้งเครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติให้เฉลี่ยอยู่ที่ 29 °C และติดตั้งเครื่องวัดออกซิเจนละลายในน้ำ (DO) และทำการวัดคุณภาพน้ำทุก ๆ 30 นาที และติดตั้งเครื่องเติมอากาศแบบปั๊มขนาด 0.75 กิโลวัตต์ ให้ทำงานโดยอัตโนมัติเมื่อออกซิเจนละลายในน้ำลดลงต่ำกว่า 4.6, 2.8 และ 1.1 มิลลิกรัม/ลิตร ผลการวิจัยพบว่าผลผลิตกุ้งทั้งสองสายพันธุ์ที่เลี้ยงในออกซิเจนละลายในน้ำไม่ต่ำกว่า 4.6 มิลลิกรัม/ลิตร มีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นอัตราการรอดสูงและมีเพิ่มผลผลิตมากกว่ากุ้งทั้งสองสายพันธุ์ที่เลี้ยงในออกซิเจนละลายในน้ำไม่ต่ำกว่า 2.8 และ 1.1 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีอัตราผลตอบแทนที่สูงขึ้นและมีความสัมพันธ์กับอัตราการรอดที่สูงขึ้น มีผลกระทบโดยตรงมีอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จากการเจริญเติบโตของปลากะพงขาว RAS 2 มีระดับออกซิเจนที่สูงกว่า RAS 1 ซึ่งทำให้มีผลผลิตที่มากกว่า และเป็นผลดีต่อการเลี้ยงปลากะพงขาวในเชิงพาณิชย์

3.2.2 อุณหภูมิ น้ำ Temperature (°C)

จากผลการทดลองการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 ในระยะเวลา 3 เดือน พบว่า มีค่าอุณหภูมิ น้ำ Temperature (°C) โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 29.5 ± 0.8 และ 29.3 ± 0.1 °C เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่า อุณหภูมิ น้ำในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 12)

อุณหภูมิ น้ำเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสัตว์น้ำมากกว่าตัวแปรของสิ่งแวดล้อมตัวอื่น ๆ โดยอุณหภูมิของน้ำมีผลต่อการกินอาหาร การย่อย และการดูดซึมอาหาร รวมถึงพฤติกรรม ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโต การคลุมบ่อด้วยพลาสติกช่วยให้สัตว์น้ำกินอาหารดีและโตเร็วขึ้น สอดคล้องกับ ไมตรี และจากรวรรณ (2528) ที่กล่าวตามกฎของ Van Hoff ว่ากระบวนการเมแทบอลิซึมของสิ่งมีชีวิตจะเพิ่มเป็น 2-3 เท่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 °C กิจกรรมต่าง ๆ ในร่างกายจะเพิ่มขึ้นด้วย เช่น การย่อยอาหาร การหายใจ การเคลื่อนไหว การกินอาหาร การเจริญเติบโต มีความสอดคล้องกับ Al-Asgah and Ali (1997) และ Shcherbina and Kazlauskene, (1971) รายงานว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ น้ำเป็นการเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ย่อยอาหาร ซึ่งอาจเร่งการย่อยอาหารของสารอาหารจึงทำให้เกิดการเจริญเติบโตที่ดี และเป็นกลไกที่เป็นตัวกำกับความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตและอุณหภูมิมีความเกี่ยวข้องกับการปรับเอนไซม์ของกระบวนการเผาผลาญอาหารในปลา Afzal et al. (2004) พบว่าปลาที่อาศัยอยู่ในน้ำที่มีอุณหภูมิสูงส่งผลต่อการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น โดยเปรียบเทียบกับปลาที่เลี้ยงในโรงเรือนพลาสติกที่มีอุณหภูมิ 19 °C เปรียบเทียบกับปลาที่เลี้ยงในบ่อกลางแจ้งที่ อุณหภูมิ 14.8 °C และจากการศึกษา Majhi and Das (2014) พบว่าการเลี้ยงปลาด้วยอุณหภูมิ 35 °C มีการเจริญเติบโตกว่าปลาที่เลี้ยงอุณหภูมิ 20 °C เช่นเดียวกับ Hilge (1985) ที่พบว่า

อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตที่ดีที่สุดของปลาเวเลสย์โรอยู่ที่ 25–28 °C ซึ่งคล้ายคลึงกับผลการศึกษาของ Michael et al. (2012) ที่ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในบ่อปลากดอเมริกัน เลี้ยงในบ่อที่มี อุณหภูมิ 23-27, 27-31 และ 31-35 °C เป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่าการเจริญเติบโต การกินอาหาร น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อวัน อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และอัตราการรอดในบ่อที่เลี้ยงด้วยอุณหภูมิ 27-31 °C ดีที่สุด มากกว่าในบ่อที่เลี้ยงในอุณหภูมิ 23-27 °C จะมีอัตราการเจริญเติบโต การกินอาหาร น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อวัน อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และอัตราการรอดในบ่อต่ำ และบ่อที่เลี้ยงในอุณหภูมิ 31-35 °C จะมีอัตราการเจริญเติบโต การกินอาหาร น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อวัน อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และอัตราการรอดในบ่อน้อยที่สุด แต่มีการกินอาหารมากที่สุด ซึ่งเกิดจากการทำกิจกรรมของปลาที่มากขึ้น เช่น การย่อยอาหาร การหายใจ การเคลื่อนไหว การขับถ่าย เร็วกว่าปกติทำให้ดูดซึมอาหารได้น้อยลงทำให้การเจริญเติบโตลดลง จากการศึกษาของ Whangchai et al. (2007) ได้ทำการอนุบาลลูกกุ้งก้ามกรามในช่วงฤดูหนาว โดยใช้พลาสติกคลุมบ่อดิน เพื่อรักษาอุณหภูมิน้ำ เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ลูกกุ้งก้ามกรามที่อนุบาลในบ่อที่คลุมพลาสติกมีน้ำหนัก (5.42 กรัม) ซึ่งสูงกว่าลูกกุ้งที่อนุบาลในบ่อที่ไม่คลุมพลาสติก (2.70 กรัม) ผลของการคลุมบ่อด้วยพลาสติกใดยังช่วยเพิ่มระดับอุณหภูมิน้ำให้สูงกว่าบ่อที่ไม่คลุมพลาสติก 5 °C ข้อมูลอุณหภูมิน้ำงานวิจัยครั้งนี้ พบว่า ระบบ RAS 1 และ RAS 2 มีอุณหภูมิสูงถึง 29.5 °C และปริมาณออกซิเจนสูงเพียงพอส่งผลให้ปลากะพงเจริญเติบโตได้ดี

3.2.3 แอมโมเนีย (Ammonia nitrogen)

จากผลการทดลองการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 ในระยะเวลา 3 เดือน พบว่า มีค่าแอมโมเนีย โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.13 ± 0.04 และ 0.17 ± 0.02 มิลลิกรัม/ ลิตร เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่าแอมโมเนีย (Ammonia) ในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 12)

แอมโมเนียเป็นสารที่ปลาขับถ่ายออกมาจากกระบวนการเผาผลาญโปรตีน เมื่อแอมโมเนียลงสู่น้ำจะมีการแตกตัวอยู่ในสองรูปแบบได้แก่ รูปแบบไม่แตกตัวเป็นไอออน (NH_3) ที่เป็นพิษต่อปลา และรูปแบบแตกตัวเป็นไอออน (NH_4^+) ที่มีความเป็นพิษต่ำต่อปลา ทั้งสองรูปแบบนี้รวมเป็นปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (Total Ammonia Nitrogen, TAN) (Boyd and Tucker, 1998) โดยที่อัตราส่วนระหว่างรูปแบบทั้งสองนั้นจะถูกควบคุมโดยค่า pH อุณหภูมิ และความเค็มของน้ำ จากการศึกษาในปลาน้ำจืดพบว่า ค่าความเป็นพิษเฉียบพลันโดยเฉลี่ยสำหรับแอมโมเนียคือ 2.79 mg NH_3/L (Randall and Tsui, 2002) การกำจัดแอมโมเนียในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งโดยเฉพาะการเลี้ยงแบบหนาแน่น โดยการกำจัดแอมโมเนียแบบดั้งเดิมในระบบหมุนเวียนแอมโมเนียจะถูกกำจัดโดยเครื่องกรองชีวภาพแบบไนตริไฟอิง อุปกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อให้จุลินทรีย์ที่สามารถออกซิไดซ์แอมโมเนียเป็นไนไตรท์ และไนเตรทได้ โดยแอมโมเนียถูกออกซิไดซ์ในเครื่องกรอง

ชีวภาพ โดยจุลินทรีย์กลุ่มไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่ส่วนใหญ่นิยมใช้ ได้แก่ *Nitrosomonas* spp., *Nitrosococcus* spp., *Nitrospira* spp., *Nitrobacter* spp. และ *Nitrococcus* spp. (Prosser, 1990) การให้ออกซิเจนเพียงพอสามารถเร่งปฏิกิริยาแอมโมเนียฟิเคชันและปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันทำให้มีปริมาณแอมโมเนียน้อย โดยค่าแอมโมเนียรวม (TAN) ในระบบ RAS 1 และ RAS 2 มีค่าค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เป็นเพราะระบบบำบัดมีประสิทธิภาพที่ดี โดยปรกติ อาหาร 1 กิโลกรัม. ผลิต TAN เข้าสู่ระบบ 24.7 กรัม และระดับที่ยอมรับได้ คือ 1.8 มิลลิกรัม/ ลิตร (Losordo and Hobbs, 2000) โดยทั่วไป จะใช้พื้นที่ในการบำบัดแอมโมเนีย 607 g/m³ โดยภาพรวมแล้วคุณภาพน้ำใน RAS 1 และ RAS 2 อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียน

นอกจากนี้ด้วยระบบ RAS จะมีการคลุมบ่อด้วยพลาสติกใส ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้ปลากะพงขาวกินอาหารดีขึ้น โตเร็วขึ้น ซึ่งการยกระดับอุณหภูมิในระบบ RAS จะเป็นผลดีต่อการเลี้ยงปลาในเขตภาคเหนือ (Sriyasak et al., 2013) ดังนั้น ในการเลี้ยงในน้ำจืดในพื้นที่ภาคเหนือด้วยระบบ RAS ที่ควบคุมอุณหภูมิ มีความเหมาะสมต่อการเลี้ยงปลากะพงขาวเป็นอย่างมาก

3.2.4 ไนไตรท์ (Nitrite nitrogen)

จากผลการทดลองการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 ในระยะเวลา 3 เดือน พบว่า มีค่าไนไตรท์ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.22±0.04 และ 0.21±0.05 มิลลิกรัม/ ลิตร เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่า ไนไตรท์ (Nitrite) ในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 12)

3.2.5 ไนเตรท (Nitrate nitrogen)

จากผลการทดลองการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 ในระยะเวลา 3 เดือน พบว่ามีค่าไนเตรท โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.16±1.84 และ 3.11±1.65 มิลลิกรัม/ ลิตร เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่า ไนเตรท ในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 12)

ในระบบน้ำหมุนเวียน RAS มีการบำบัดด้วยด้วยวิธีการผ่านทางปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่อาศัยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มออกโตโทรปที่จำเป็นต้องใช้ออกซิเจนเพื่อเปลี่ยนแอมโมเนียให้เป็นไนไตรท์ และไนเตรท ตามลำดับนั้น การเติมออกซิเจนที่เพียงพอจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มนี้ให้สามารถทำงานได้ดียิ่งขึ้นและยังช่วยให้สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนอยู่ในรูปไนเตรทซึ่งไม่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ

3.2.6 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

จากผลการทดลองการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 ในระยะเวลา 3 เดือนพบว่ามีค่า ความเป็นกรด-ด่าง (pH) โดยมีค่าเฉลี่ย

อยู่ที่ 7.6 เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่า pH ในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 12)

โดยปกติค่า pH เป็นสิ่งบ่งบอกให้ทราบถึงความเข้มข้นของสภาพความเป็นกรดเป็นด่าง มันสิน (2542) กล่าวว่า pH ที่อยู่ในช่วง 6.5–8.5 ทำให้สัตว์น้ำดำรงชีวิตได้ปกติ แต่ถ้ามีค่าต่ำมากหรือสูงมากจะส่งผลต่อสัตว์น้ำ pH 4–5 จะทำให้ไม่สืบพันธุ์ pH 9–11 ทำให้เจริญเติบโตได้ช้า จากงานวิจัยนี้การเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย

3.2.7 ฟอสเฟต ฟอสฟอรัส (Phosphate phosphorus)

จากผลการทดลองการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 ในระยะเวลา 3 เดือนพบว่ามีค่าฟอสเฟต โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.06 ± 0.020 และ 0.07 ± 0.021 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่า ฟอสเฟต ฟอสฟอรัส ในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 12)

3.2.8 ความเป็นด่าง (Alkalinity)

จากผลการทดลองการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 ในระยะเวลา 3 เดือนพบว่ามีค่า ความเป็นด่าง (Alkalinity) โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 96.8 ± 7.1 และ 99.1 ± 1.7 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่า ความเป็นด่างในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 12)

3.2.9 Chlorophyll A

จากผลการทดลองการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 ในระยะเวลา 3 เดือนพบว่ามีค่า Chlorophyll A โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 11.6 ± 2.2 และ 12.5 ± 2.2 $\mu\text{g/l}$ เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่า Chlorophyll A ในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 12)

3.2.10 BOD

จากผลการทดลองการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 ในระยะเวลา 3 เดือนพบว่ามีค่า BOD โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 59.7 ± 9.0 และ 48.7 ± 17.4 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่า BOD ในบ่อเลี้ยงปลากะพงขาวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 12)

โดยปกติค่า BOD ไม่ควรเกิน 20 มิลลิกรัม/ลิตร (กรมควบคุมมลพิษ 2555) ในส่วนของการทดลองนี้พบว่า BOD มีปริมาณสูงกว่าค่ามาตรฐานเป็นผลมาจากการจัดการให้อาหารและการจัดการในบ่อเลี้ยงปลา ซึ่งสอดคล้องกับ Musig and Aue – umneoy (2008) ทำการศึกษาคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงปลาดุกกลุ่มสมระบบปิด พบว่า ค่า BOD ในบ่อเลี้ยงปลาดุกกลุ่มสมมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่

25.1-61.7 มิลลิกรัม/ ลิตร โดยฟาร์มส่วนใหญ่ที่เลี้ยงปลาในระบบปิด จึงไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ประกอบกับมีการเลี้ยงแบบหนาแน่นสูง ทำให้มีการให้อาหารมากกว่าปกติ ซึ่งให้เกิดการสะสมและการสลายตัวของสารอินทรีย์ในอัตราสูง ส่งผลให้ค่า BOD สูงขึ้นตามไปด้วย

ในส่วนของคุณภาพน้ำ ฟอสเฟต ฟอสฟอรัส ความเป็นด่าง และ Chlorophyll A ในการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 ในระยะเวลา 3 เดือน อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อการเลี้ยงปลากะพงขาวโดยผ่านมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ (กรมควบคุมมลพิษ, 2555)

ตารางที่ 12 คุณภาพน้ำของปลากะพงขาวที่เลี้ยงในระบบ RAS ทั้ง 2 รูปแบบ เวลา 3 เดือน

Water quality parameters	RAS 1	RAS 2
Average DO (mg/l)	5.3±0.20 ^a	6.9±0.10 ^b
Average Temperature (°C)	29.5±0.80	29.3±0.10
Average Ammonia nitrogen (mg/l)	0.13±0.04	0.17±0.02
Average Nitrite nitrogen (mg/l)	0.22±0.04	0.21±0.05
Average Nitrate nitrogen (mg/l)	3.16±1.84	3.11±1.65
Average pH	7.60±0.10	7.60±0.20
Average Phosphate Phosphorus (mg/l)	0.07±0.021	0.06±0.020
Average Alkalinity (mg/l as CaCO ₃)	96.8±7.10	99.1±1.70
Chlorophyll a (µg/l)	11.6±2.20	12.5±2.20
Average BOD (mg/l)	59.7±9.00	48.7±17.40

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามแนวนอนในแต่ละแถวแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ($p < 0.05$)

3.3 ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในระบบการเลี้ยงแบบ RAS1 และ RAS2 ในระยะเวลา 3 เดือน

จากผลการทดลองค่าไฟฟ้าสำหรับการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ โดยมีอุปกรณ์ไฟฟ้า RAS 1 ซึ่งประกอบด้วย เครื่องเติมอากาศจำนวน 1 เครื่อง เครื่องปั๊มน้ำในบ่อเลี้ยง เครื่องปั๊มน้ำในถังกรอง และ UV (Ultraviolet filter) โดยใช้ค่าไฟฟ้าทั้งหมดในระยะเวลาที่เลี้ยง 3 เดือน โดยมีค่าไฟฟ้าอยู่ที่ 9,402 บาท ในส่วน RAS 2 เครื่องเติมอากาศจำนวน 2 เครื่อง เครื่องปั๊มน้ำในบ่อเลี้ยง เครื่องปั๊มน้ำในถังกรอง และ UV (Ultraviolet filter) โดยใช้ค่าไฟฟ้าทั้งหมดในระยะเวลาที่เลี้ยง 3 เดือน โดยมีค่าไฟฟ้าอยู่ที่ 11,942 บาท (ตารางที่ 13)

ตารางที่ 13 ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในระบบการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ ในระยะเวลา 3 เดือน

ชุดที่	เครื่องใช้ไฟฟ้าใน โรงเรือน	กำลังไฟ (วัตต์)	ไฟฟ้าที่ใช้ (ยูนิต/วัน)	ค่าไฟฟ้าที่ใช้ ต่อวัน (บาท)	ค่าไฟฟ้าที่ใช้ 3 เดือน (บาท)
RAS 1					
1	เครื่องเติมอากาศ	400	9.6	28.22	2,540
2	เครื่องปั้มน้ำในบ่อเลี้ยง	400	9.6	28.22	2,540
3	เครื่องปั้มน้ำในถังกรอง	400	9.6	28.22	2,540
4	UV (Ultraviolet filter)	165	3.96	19.80	1,782
	RAS1 รวม		32.76	104.46	9,402
ชุดที่	เครื่องใช้ไฟฟ้าใน โรงเรือน	กำลังไฟ (วัตต์)	ไฟฟ้าที่ใช้ (ยูนิต/วัน)	ค่าไฟฟ้าที่ใช้ ต่อวัน (บาท)	ค่าไฟฟ้าที่ใช้ 3 เดือน (บาท)
RAS 2					
1	เครื่องเติมอากาศ 2เครื่อง	400x2	19.2	56.44	5,080
2	เครื่องปั้มน้ำในบ่อเลี้ยง	400	9.6	28.22	2,540
3	เครื่องปั้มน้ำในถังกรอง	400	9.6	28.22	2,540
4	UV (Ultraviolet filter)	165	3.96	19.80	1,782
	RAS2 รวม		42.36	132.68	11,942

ในส่วนของต้นทุนและผลตอบแทนในช่วงระยะเวลา 3 เดือน ไม่ได้คิดในเรื่องต้นทุนเนื่องจากขนาดของปลา ยังไม่ได้ตามที่ตลาดต้องการ จำเป็นต้องเลี้ยงครบ 7 เดือนให้ได้ขนาดที่ตลาดต้องการ และจับขาย ถึงจะไปคิดในเรื่องต้นทุนและผลตอบแทน

เมื่อทำการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 ต่อจนครบในระยะเวลา 7 เดือน พบว่า น้ำหนักเริ่มต้น เฉลี่ยอยู่ที่ 12.43 กรัม/ตัว เมื่อสิ้นสุดการเลี้ยง RAS 2 มีน้ำหนักมีเฉลี่ยอยู่ที่ 740 กรัม/ตัว และมีอัตราการรอดอยู่ที่ 90.4 เปอร์เซ็นต์ โดยมีการเจริญเติบโตต่อวัน เฉลี่ยอยู่ที่ 3.71 ในส่วนของ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ จะอยู่ที่ 1.56 โดยใช้ปริมาณอาหารทั้งหมด 1,115 กิโลกรัม ซึ่งให้ผลผลิตทั้งหมด 1,200 กิโลกรัม และเมื่อสิ้นสุดการเลี้ยง RAS 1 มีน้ำหนักมีเฉลี่ยอยู่ที่ 680 กรัม/ตัว และมีอัตราการรอดอยู่ที่ 88.6 เปอร์เซ็นต์ โดยมีการเจริญเติบโตต่อวัน เฉลี่ยอยู่ที่ 3.42 ในส่วนของ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ จะอยู่ที่ 1.52 โดยใช้ปริมาณอาหารทั้งหมด 1,048 กิโลกรัม ซึ่งให้ผลผลิตทั้งหมด 1,000 กิโลกรัม ซึ่งจะเห็นได้ว่า RAS 2 มีการเจริญเติบโตที่ดีกว่า RAS 1 และส่งผลเนื่องทำให้ผลผลิตที่มากกว่า (ตารางที่ 14)

ตารางที่ 14 การเจริญเติบโตของปลากะพงขาวในระบบ RAS ทั้ง 2 รูปแบบ ระยะเวลา 7 เดือน

การเจริญเติบโต	RAS 1	RAS 2
น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)	12.43	12.43
น้ำหนักสุดท้าย (กรัม)	680	740
น้ำหนักที่เฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น (กรัม)	667.57	727.57
อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (กรัม)	3.42	3.71
อัตราการรอด (%)	88.95	90.46
อัตราการแลกเนื้อ (FCR)	1.52	1.56
ปริมาณอาหารทั้งหมด (กิโลกรัม)	1,048	1,115
ผลผลิตที่เก็บเกี่ยวทั้งหมด (กิโลกรัม)	1,000	1,200

เมื่อนำผลการเจริญเติบโตที่ได้จากการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดเลี้ยงจนถึงขนาดที่ตลาดต้องการ(ขนาด 600-800 กรัม) มาวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์พบว่าผลผลิตการเลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 มีผลผลิตอยู่ประมาณ 1,000 กิโลกรัม/บ่อ/รุ่น และ 1,200 กิโลกรัม/บ่อ/รุ่น ทำให้เกิดผลกำไรในการเลี้ยงได้โดยมีต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปรดังนี้ (ตารางที่ 15 และ 16)

ตารางที่ 15 ต้นทุนคงที่การผลิตปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด RAS 1 และ RAS 2 ในรอบการผลิต ระยะเวลา 7 เดือน

รายการ/ปี	ผลผลิต RAS 1 1,000 กิโลกรัม	ผลผลิต RAS 2 1,200 กิโลกรัม
ต้นทุนคงที่		
ค่าเสื่อมโครงเหล็ก	1,500	1,500
ค่าเสื่อมพลาสติกคลุม	1,500	1,500
ค่าเสื่อมบ่อเลี้ยงและระบบกรอง	500	500
ค่าเสื่อมระบบน้ำและท่อ	1,000	1,000
ค่าเสื่อมระบบออกซิเจน	1,000	1,000
ค่าเสื่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ (รวม)	1,000	1,000
ค่าเสื่อมที่ดิน	500	500
ค่าเสื่อมค่าเสียโอกาสลงทุน	1,000	1,000
รวมต้นค่าเสื่อมต้นทุนคงที่	8,000	8,000

ตารางที่ 16 ต้นทุนผันแปรที่การผลิตปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด RAS 1 และ RAS 2 ในรอบการผลิต ระยะเวลา 7 เดือน

รายการ/ปี	ผลผลิต RAS 1 1,000 กิโลกรัม	ผลผลิต RAS 2 1,200 กิโลกรัม
ต้นทุนผันแปร		
ค่าไฟ	21,936	27,876
ค่าอาหาร (FCR=1.5)	66,000	72,000
ค่าลูกพันธุ์	13,500	13,500
ค่าแรง	28,000	28,000
ค่าซ่อม	2,000	2,000
รวมต้นทุนผันแปร	131,436	143,376
ต้นทุนทั้งหมด	139,436	151,376

ต้นทุนผลตอบแทนจากพบว่าผลผลิตการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด ทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 ต่อบรอบการผลิต (ระยะเวลา 7 เดือน) พบว่า RAS 1 ที่ผลผลิต 1,000 กิโลกรัม/รอบการผลิต จะทำให้มีรายได้ 160,000 บาท (อ้างอิงราคาขายของตลาดไทที่ 160 บาท/กิโลกรัม) (ตารางที่ 17) โดยมีต้นทุนทั้งหมด 139,436 บาท ได้กำไรทั้งหมด 20,564 บาท (ตารางที่ 18) ในส่วนของ RAS 2 ที่ผลผลิต 1,200 กิโลกรัม/รอบการผลิต จะทำให้มีรายได้ 192,000 บาท (อ้างอิงราคาขายของตลาดไทที่ 160 บาท/กิโลกรัม) (ตารางที่ 17) โดยมีต้นทุนทั้งหมด 151,376 บาท ได้กำไรทั้งหมด 40,624 บาท (ตารางที่ 18) ดังนั้นถ้ามีการเพิ่มความหนาแน่นมากขึ้นเต็มประสิทธิภาพจะสามารถทำให้ได้ผลตอบแทนที่มากขึ้นได้อีก

ตารางที่ 17 ข้อมูลราคาปลากะพงขาว (อ้างอิงราคาตลาดไท ส.ค. 2563 -พ.ย. 2563)

วันที่	ราคาขาย ปลากะพงขาว (บาท/กิโลกรัม)
8 ส.ค. 2563	140-155
8 ก.ย. 2563	150-160
8 ต.ค. 2563	155-245
8 พ.ย. 2563	155-245

ที่มา: ตลาดไท (2563)

ตารางที่ 18 ข้อมูลผลผลิต ราคาขาย รายได้ ต้นทุน ของ RAS ที่น้ำหนัก 600-800 กรัม

ผลผลิต (กก.)	ราคาขาย (บาท/กก.)	รายได้ (บาท)	ต้นทุน (บาท/กก.)	ต้นทุน (บาท)	กำไร (บาท)
1,000	160	160,000	139	139,367	20,633
1,200	160	192,000	126	151,376	40,624

สำหรับต้นทุนผลตอบแทนพบว่าผลผลิตการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดทั้ง 2 รูปแบบ RAS 1 และ RAS 2 ต่อรอบการผลิต (ระยะเวลา 7 เดือน) พบว่า RAS 1 มีผลผลิต 1,000 กิโลกรัม/รอบการผลิต จะทำให้มีรายได้ 160,000 บาท โดยมีต้นทุนทั้งหมด 139,436 บาท ได้กำไรทั้งหมด 20,564 บาท ในส่วนของ RAS 2 มีผลผลิต 1,200 กิโลกรัม/รอบการผลิต จะทำให้มีรายได้ 192,000 บาท โดยมีต้นทุนทั้งหมด 151,376 บาท ได้กำไรทั้งหมด 40,624 บาท ดังนั้นถ้ามีการเพิ่มความหนาแน่นมากขึ้นเต็มประสิทธิภาพจะสามารถทำให้ได้ผลตอบแทนที่มากขึ้นได้อีกเมื่อเปรียบเทียบกับ การเลี้ยงปลากะพงขาวในกระชัง จังหวัดสตูลส่วนเศรษฐกิจการประมง ส่วนเศรษฐกิจการประมง สำนักพัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยีการประมง กรมประมง (2554) พบว่า การเลี้ยงปลากะพงในกระชัง 8 เดือน จะให้ผลตอบแทนเท่ากับ 22,500 บาท/รอบการเลี้ยงและยังเปรียบเทียบกับ การเลี้ยงปลากะพงขาวของ สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งกรมประมง (2553) พบว่า การเลี้ยงปลากะพงขาวในกระชัง 5 เดือน จะให้ผลตอบแทนเท่ากับ 7,367 บาท/รอบการเลี้ยง แสดงให้เห็นว่าการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนเหมาะสมสำหรับการเลี้ยงในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการเลี้ยง 7 เดือน สามารถเก็บผลผลิตอีกทั้งยังเพิ่มผลผลิตได้มากขึ้น แต่ควรเลี้ยงให้ได้เกิน 800 กิโลกรัม/รอบการเลี้ยง หรือที่ความหนาแน่น 18.75 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ถึงจะเริ่มได้กำไรในการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียน (RAS)

สำหรับปัญหาและ อุปสรรคของการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด พบว่ามีปัญหาอยู่สองประเด็น คือ ปัญหาด้านลูกพันธุ์ที่มีคุณภาพไม่แน่นอน เช่น ในบางช่วงลูกพันธุ์เจริญเติบโตช้าเนื่องจากฝึกลูกปลากะพงให้เริ่มกินอาหาร และมีการตายมากในช่วง 1-2 สัปดาห์แรกของการเลี้ยง คล้ายคลึงกับผลการศึกษาของ เทพบุตร และคณะ (2555) การวิเคราะห์ต้นทุน และผลตอบแทนของการเลี้ยงปลากะพงขาวกรณีศึกษา การเลี้ยงปลากะพงขาวในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งพบปัญหาด้านลูกพันธุ์ที่มีคุณภาพไม่แน่นอน เช่น ในบางช่วงลูกพันธุ์เจริญเติบโตช้า และมีการตายมากในช่วง 2-3 สัปดาห์แรกของการเลี้ยง ไม่ค่อยกินอาหาร อ่อนแอ และทยอยตาย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลูกพันธุ์ปลากะพงซึ่งไม่เกี่ยวกับระบบ RAS ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียนเหมาะสมสำหรับการเลี้ยงในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการเลี้ยง 7 เดือน สามารถเก็บผลผลิตได้อีกทั้งยังสามารถเพิ่มผลผลิตได้ด้วยการเพิ่มระดับความหนาแน่นและยังเป็น

ระบบการเลี้ยงที่ยั่งยืนในอนาคต (Jeffery et, al., 2011) แต่จำเป็นต้องเป็นสัตว์น้ำเศรษฐกิจที่มีมูลค่าสูงเพราะระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิดมีต้นทุนที่สูงในการลงทุน



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการศึกษา

1. จากศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศในการเพิ่มออกซิเจนละลายน้ำให้กับปลากะพงขาวที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียน ด้วยเครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่นและเครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์ พบว่าการใช้เครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยืดหยุ่น เหมาะสมกับการเลี้ยงปลาระบบ RAS มากที่สุด ให้อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่ดีที่สุด

2. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ ขึ้นอยู่กับ อัตราความหนาแน่นของสัตว์น้ำ การเลี้ยงปลาที่ความหนาแน่นเกิน 18.75 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ส่งผลต่อความเครียด ทำให้ปลากินอาหารลดลง ดังนั้นถ้าต้องการเลี้ยงปลาที่มีความหนาแน่นสูง ควรศึกษาเรื่องการเติมออกซิเจนให้เหมาะสมกับความหนาแน่นของสัตว์น้ำ

3. การศึกษาต้นทุนและผลตอบแทนด้วยการเพิ่มออกซิเจนที่เหมาะสมในการผลิตปลากะพงขาวด้วยระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด (RAS) พบว่า การเลี้ยงปลากะพงขาวโดยติดตั้งเครื่องเติมแบบท่ออย่างยืดหยุ่น จำนวน 2 เครื่อง มีการเจริญเติบโตที่ดีและระดับออกซิเจนอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม แต่ควรเลี้ยงให้ได้เกิน 800 กิโลกรัม/รอบการเลี้ยงหรือที่ความหนาแน่น 18.75 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ถึงจะเริ่มได้กำไรในการเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) งานที่ต้องพัฒนาเพื่อเพิ่มค่าออกซิเจนละลายน้ำให้มีประสิทธิภาพและหาวิธีการเพิ่มความหนาแน่นการเลี้ยงปลากะพงในระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) ต่อไป

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรมีการตรวจวัดปริมาณอัตราการไหลของอากาศ (ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง หรือ ลิตร / นาที) ที่เข้าสู่ระบบเติมอากาศทั้ง 3 รูปแบบ เพื่อการวิเคราะห์ผลที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น

2. ควรมีการทดลองเลี้ยงกับสัตว์น้ำชนิดอื่นเพื่อศึกษาต้นทุนและผลตอบแทนในระบบน้ำหมุนเวียนระบบปิด

บรรณานุกรม

- กรมประมง. 2536. **การเลี้ยงปลาน้ำกร่อย**. กรุงเทพฯ: กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กรมประมง. 2544. **การเลี้ยงปลาน้ำกร่อย**. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทยจำกัด.
- เกตุณภัส ศรีไพโรจน์. 2561. **หน่วยวิจัยและพัฒนาประมงในทะเลสาบหนองหาร**. สกลนคร: คณะทรัพยากรธรรมชาติและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ.
- ตลาดไท. 2563. **ราคาปลากะพงขาวประจำวัน**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา talaadthai.com (19 ตุลาคม 2562).
- เทพบุตร เวชกามา, วุฒิชัย อ่อนเอี่ยม, วาสนา อากรรัตน์ และ รัชกร ออรชุน. 2555. **การวิเคราะห์ต้นทุน และผลตอบแทนของการเลี้ยงปลากะพงขาว กรณีศึกษา การเลี้ยงปลากะพงขาวในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์**. สถานีวิจัยประมงคลองวาฬ ฝ่ายสนับสนุนวิชาการ คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นราทิพย์ ชูติวงศ์. 2547. **ทฤษฎีเศรษฐศาสตร์จุลภาค**. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นราพงศ์ หงส์ประสิทธิ์. 2553. **การวิเคราะห์อุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นจากของเสียประเภทยางในกระบวนการเติมอากาศ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นเรศ กิจจาพัฒน์พันธ์. 2562. **สถานการณ์การผลิตและการค้าปลากะพงขาวและผลิตภัณฑ์ ในช่วง 3 เดือนแรก ปี 2562**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [https://www.fisheries.go.th/strategy/UserFiles/files/25\(1\).pdf](https://www.fisheries.go.th/strategy/UserFiles/files/25(1).pdf) (19 ตุลาคม 2562).
- นิคม ละอองศิริวงศ์, ลักขณา ละอองศิริวงศ์, พัชรา แม่เริาะ และ คมน์ ศิลปาจารย์. 2554. **การเลี้ยงปลากะพงขาวขนาด 4-6 นิ้วในระบบน้ำหมุนเวียน**. หน้า 92-99. ใน **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49**.
- นิวุฒิ หวังชัย, เกียรติศักดิ์ เม่งอำพัน, จงกล พรหมยะ, ทิพสุคนธ์ พิมพ์พิมล, อนุภาพ วรรณภาพ, ขจรเกียรติ ศรีนวลสม และ นายเทพพิทักษ์ บุญทา. 2561. **คู่มือประมงอินทรีย์แม่โจ้**. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- นิวุฒิ หวังชัย และ ทิพสุคนธ์ พิมพ์พิมล. 2561. **ระบบการเลี้ยงปลากะพงแบบน้ำหมุนเวียน**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา www.organic.mju.ac.th/wtms_documentDownload.aspx?id=MzUyNjQ= (19 ตุลาคม 2562).

- นิวุฒิ หวังชัย, ทิพสุคนธ์ พิมพ์พิมล และ บัญชา ทองมี. 2563. **หนังสือคู่มือนวัตกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิดเพื่อการผลิตสัตว์น้ำแบบปลอดภัยและคุณภาพสูง**. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้
- พายุ อินตะนัย. 2554. **การศึกษาคุณสมบัติและความเหมาะสม การใช้ถังบำบัดแบบวัสดุกรองชีวภาพเคลื่อนที่ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ภรณ์ยู ฤมผลกรัง และ ยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร. 2558. การพัฒนาเทคนิคการเติมออกซิเจนด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์จากถังออกซิเจนเหลวกับระบบตรวจติดตามและจัดการออกซิเจนอัตโนมัติในฟาร์มเลี้ยงปลาทะเลความหนาแน่นสูง. หน้า 105-120. ใน **รายงานการประชุมวิชาการประมง ประจำปี 2558**. กรมประมง.
- ภรณ์ยู ฤมผลกรัง, ยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร และ โสมลดา ประเสริฐสม. 2557. การออกแบบและการทำงานของระบบจัดการคุณภาพน้ำในฟาร์มเลี้ยงปลาทะเลด้วยระบบควบคุมและประมวลผลแบบศูนย์รวม (SCADA). หน้า 157-170. ใน **รายงานการประชุมวิชาการประมงประจำปี 2557**. กรมประมง.
- มันสิน ตันทุลเวศน์. 2542. **วิศวกรรมการประปา เล่ม 1**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันทุลเวศน์ และ ไพพรรณ พรประภา. 2536. **การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่น ๆ**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไมตรี ดวงสวัสดิ์ และ จารุวรรณ สมสิริ. 2528. **คุณสมบัติของน้ำและวิธีวิเคราะห์สำหรับวิจัยทางประมง**. กรุงเทพฯ: สถาบันประมงน้ำจืดแห่งชาติ กรมประมง.
- ยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร, นิคม ละอองศิริวงศ์, อรัญญา อัศวอารีย์ และ ภรณ์ยู ฤมผลกรัง. 2551. **โครงการพัฒนาฟาร์มต้นแบบการเลี้ยงปลากะพงขาวความหนาแน่นสูงในระบบน้ำหมุนเวียนเชิงพาณิชย์**. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร.
- ยุพิน พุนดี, ฉวีวรรณ บุญเรือง, วิไลลักษณ์ สอนมะลิ และ ณัฐวุฒิ คุ่มสุข. 2560. **การมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์คลองโพธิ์ของประชาชน ตำบลสามเรือน อำเภอบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา**. พระนครศรีอยุธยา.
- เยาวนิตย์ ดนยดล และ จีรนนท์ อุไรประสิทธิ์ 2546. ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อขบวนการ phagocytosis ในปลากะรังและปลากะพงขาว. ใน **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41: สาขาประมง**.

- รัชกาล พันธวิศิษฐ์. 2559. **ประสิทธิภาพและเกณฑ์การออกแบบอุปกรณ์เติมอากาศแบบเวนจัวร์และ การใช้งานร่วมกับอุปกรณ์สร้างฟิล์มของเหลว.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- ริ้ววาน สาและ. 2558. **การเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำต่อการเจริญเติบโต ออสโมเรกูเลชัน เมแทบอลิซึม และอัตราการอยู่รอดของปลากะพงขาว (*Lates calcarifer*).** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตปัตตานี.
- ศรีสมร สิทธิกาญจนกุล และ จงกตณี วรรณเพ็ญสกุล. 2560. **การใช้แพลตฟอร์มพีชเป็นดัชนีบ่งชี้ คุณภาพน้ำ.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://digital.lib.kmutt.ac.th/journal/loadfile.php?A_ID=779. (9 กันยายน 2563).
- ศิริชัช สังขพันธ์, สมชาย แซ่อึ้ง และ ชยุต นันทดุสิต. 2562. **อิทธิพลความขรุขระของผนังที่มีต่อ ประสิทธิภาพการเติมอากาศของเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กที่ใช้การไหลหมุนควงปะทะ ผนัง.** วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 26(1), 10-24.
- ศุภวรรณ สงวนรัตน์, นริส ประทินทอง และ ศิริชัย เทพา. 2549. **การทดลองศึกษาหาสมรรถนะการ ถ่ายเทออกซิเจนในกระบวนการเติมอากาศโดยใช้ฮีเจคเตอร์.** หน้า 76-81. ใน **การประชุม วิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 5, 6-7 เมษายน.**
- สถานีประมงศรีราชา ฝ่ายสนับสนุนวิชาการ คณะประมง. 2546. **การเพาะเลี้ยงปลากะพงขาว.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.ku.ac.th/emagazinejuly46/agri/fish_kapong.html (19 ตุลาคม 2562).
- สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งกรมประมง. 2553. **การเลี้ยงปลากะพงขาวในกระชังจังหวัด สตูล.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.fisheries.go.th/strategy/fisheconomic/pdf> (7 สิงหาคม 2563).
- ส่วนเศรษฐกิจการประมง สำนักพัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยีการประมง กรมประมง. 2554. **ต้นทุน และผลตอบแทนการเพาะเลี้ยงปลากะพงขาวในกระชัง จ.สตูล ปี2554.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.fisheries.go.th/cf-phuket/aofamru%20Lates%20calcarifer.pdf> (7 สิงหาคม 2563).
- สวัสดิ์ วงศ์สมนึก และ สุจินต์ มณีวงศ์. 2522. **คำแนะนำการเลี้ยงปลากะพงขาว.** กรุงเทพฯ: สถานี ประมงจังหวัดสงขลา กองประมงน้ำกร่อย กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- เสถียร ศรีบุญเรือง. 2542. **การวางแผนและประเมินโครงการ.** เชียงใหม่: คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

- อนุรุทธิ์ หมดเสี้ยน. 2562. **Cellular respiration**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.scimath.org/lesson-biology/item/6980-cellular-respiration> (7 สิงหาคม 2563).
- อลงกรณ์ โพธิ์กราน. 2547. การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อวิเคราะห์หาพื้นที่ที่มีศักยภาพต่อการเลี้ยงปลากะพงขาวในกระชัง : กรณีศึกษาทะเลสาบสงขลาตอนล่าง จ.สงขลา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- อุกฤษฏ์ พงษ์วานิชอนันต์. 2552. การศึกษาต้นทุน และ ผลตอบแทน การผลิตอ้อยโรงงาน ตำบลดอนเจดีย์ อำเภอนมทวน จังหวัดกาญจนบุรี ปีการเพาะปลูก 2550/2551. สารนิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- Afzal Khan, M., Jafri, A. K. and Chadha, N. K. 2004. Growth and body composition of rohu, *Labeo rohita* (Hamilton), fed compound diet: winter feeding and rearing to marketable size. **Journal of Applied Ichthyology**, 20(4), 265-270.
- Al-Asgah, N. and Ali, A. 1997. Growth performance and body composition of *Oreochromis niloticus* reared at different water temperatures. **Annales de zootechnie**, 46(4), 331-338.
- Andrews, J. W. and Stickney, R. R. 1972. Interactions of Feeding Rates and Environmental Temperature on Growth, Food Conversion, and Body Composition of Channel Catfish. **Transactions of the American Fisheries Society**, 101(1), 94-99.
- Ardiansyah and Fotedar, R. 2016. Water quality, growth and stress responses of juvenile barramundi (*Lates calcarifer* Bloch), reared at four different densities in integrated recirculating aquaculture systems. **Aquaculture**, 458, 113-120.
- Badiola, M., Basurko, O. C., Piedrahita, R., Hundley, P. and Mendiola, D. 2018. Energy use in Recirculating Aquaculture Systems (RAS): A review. **Aquacultural Engineering**, 81, 57-70.
- Benjamin, M. 2002. **WATER CHEMISTRY** Singapore: McGraw-Hill.
- Bergheim, A., Gausen, M., Næss, A., Hølland, P. M., Krogedal, P. and Crampton, V. 2006. A newly developed oxygen injection system for cage farms. **Aquacultural Engineering**, 34(1), 40-46.
- Boyd, C. E. 1982. **Water Quality Management for Pond Fish Culture**. Amsterdam: Elsevier.

- Boyd, C. E. 2015. **Water quality**. Switzerland: Springer International publishing.
- Boyd, C. E. and Tucker, C. S. 1998. **Pond aquaculture water quality management**. Netherland: Kluwer academic publishers.
- Bregnballe, J. 2015. **A guide to recirculation aquaculture. An introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems**. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). EUROFISH International Organisation.
- Cerezo Valverde, J. and García García, B. 2005. Suitable dissolved oxygen levels for common octopus (*Octopus vulgaris cuvier*, 1797) at different weights and temperatures: analysis of respiratory behaviour. **Aquaculture**, 244(1), 303-314.
- Chabot, D. and Dutil, J.-D. 1999. Reduced growth of Atlantic cod in non-lethal hypoxic conditions. **Journal of Fish Biology**, 55(3), 472-491.
- Dabrowski, K., Lee, K.-J., Guz, L., Verlhac, V. and Gabaudan, J. 2004. Effects of dietary ascorbic acid on oxygen stress (hypoxia or hyperoxia), growth and tissue vitamin concentrations in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). **Aquaculture**, 233(1), 383-392.
- Ebeling, J. M. 1998. Development of evaluation of a feedback control system for dynamic control of dissolved oxygen in intensive recirculating aquaculture systems. p. 366-367. In **G. Libey, (Ed) Proceedings of 2nd international conference on recirculating aquaculture**, . Northeast regional agricultural engineering service, Ithaca.
- Eliason, E. J. and Farrell, A. P. 2014. Effect of hypoxia on specific dynamic action and postprandial cardiovascular physiology in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). **Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology**, 171, 44-50.
- FAO. 2013. **Cultured Aquatic Species Information Programme Latescalcarifer (Block,1790)**. [Online]. Available http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Lates_calcarifer/en. (25 March 2020).
- Fry, F. 1947. LXVIII. Effects of the environment on animal activity.

- Glencross, B. D. 2009. Reduced water oxygen levels affect maximal feed intake, but not protein or energy utilization efficiency of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). **Aquaculture Nutrition**, 15(1), 1-8.
- Goddard, S. (1996). Feeds in Intensive Aquaculture. In S. Goddard (Ed.), **Feed Management in Intensive Aquaculture** (pp. 1-22). Boston, MA: Springer US.
- Hilge, V. 1985. The influence of temperature on the growth of the European catfish (*Silurus glanis* L.). **Journal of Applied Ichthyology**, 1(1), 27-31.
- ISO 10260. 1992. **Water quality-measurement of biochemical parameters spectrometric determination of the chlorophyll-a concentration**. Switzerland: International Organization for Standardization.
- Jeffery, K., N., S. and T., E. 2011. **A review of the land-based, warm-water recirculation fish farm sector in England and Wales FES220**. Centre for Environment, Fisheries & Aquaculture Science.
- Kausar, R. and Salim, M. 2006. Effect of water temperature on the growth performance and feed conversion of *Labeo rohita*. **Pakistan Veterinary journal**, 26(3), 105 - 108.
- Kestemont, P. and Baras, E. 2001. **Environmental factors and feed intake: mechanisms and interactions**. Oxford: Blackwell Science.
- Losordo, T. M. and Hobbs, A. O. 2000. Using computer spreadsheets for water flow and biofilter sizing in recirculating aquaculture production systems. **Aquacultural Engineering**, 23(1), 95-102.
- Majhi, S. K. and Das, S. K. 2014. Feed Utilization, Gonadal Maturation, Carcass Composition and Stress of the Catfish, *Heteropneustes fossilis* (Bloch) Fed with Animal Viscera-Based Diets at Varied Temperatures. p. 83-89. In **Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences**.
- Martins, C. I. M., Eding, E. H., Verdegem, M. C. J., Heinsbroek, L. T. N., Schneider, O., Blancheton, J. P., d'Orbcastel, E. R. and Verreth, J. A. J. 2010. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. **Aquacultural Engineering**, 43(3), 83-93.

- McGraw, W., Teichert-Coddington, D. R., Rouse, D. B. and Boyd, C. E. 2001. Higher minimum dissolved oxygen concentrations increase penaeid shrimp yields in earthen ponds. **Aquaculture**, 199(3), 311-321.
- Metcalf and Eddy, I. 2004. **Wastewater Engineering Treatment and Reuse**. Singapore: McGraw-Hill.
- Michael Brigham Arnold. 2012. **Growth and swimming endurance of juvenile channel catfish in high temperature environments**. Master Degree Thesis. Mississippi State University.
- Musig, Y. and Aue – umneoy, D. 2008. Quality and characteristics of effluents from hybrid catfish ponds. **Kasetsart University Fisheries Research Bulletin**, 32(3), 1-8.
- Plante, S., Chabot, D. and Dutil, J.-D. 1998. Hypoxia tolerance in Atlantic cod. **Journal of Fish Biology**, 53(6), 1342-1356.
- Prosser, J. I. 1990. **Autotrophic Nitrification in Bacteria**. Academic Press.
- Randall, D. J. and Tsui, T. K. N. 2002. Ammonia toxicity in fish. **Marine Pollution Bulletin**, 45(1), 17-23.
- Remen, M., Oppedal, F., Torgersen, T., Imsland, A. K. and Olsen, R. E. 2012. Effects of cyclic environmental hypoxia on physiology and feed intake of post-smolt Atlantic salmon: Initial responses and acclimation. **Aquaculture**, 326-329, 148-155.
- Shcherbina, M. A. and Kazlauskene, O. P. 1971. Water temperature and digestibility of nutrient substances by carp. **Hydrobiologia**, 9, 40-44.
- Spartan Environmental Technologies. 2004. **Fine Bubble Diffuser Contactors for Ozone Water Treatment, Air and Water Treatment** [Online]. Available <http://www.spartanwaterTreatment.com/ozone-fine-bubble-diffusers.html> (25 March 2020).
- Sriyasak, P., Chitmanat, C., Whangchai, N., Promya, J. and Lebel, L. 2013. Effects of temperature upon water turnover in fish ponds in northern Thailand. **International Journal of Geosciences**, 4(5B), 18-23.
- Thorarensen, H. and Farrell, A. P. 2011. The biological requirements for post-smolt Atlantic salmon in closed-containment systems. **Aquaculture**, 312(1), 1-14.

- Thorarensen, H., Gústavsson, A., Gunnarsson, S., Árnason, J., Steinarsson, A., Björnsdóttir, R. and Imsland, A. K. D. 2017. The effect of oxygen saturation on the growth and feed conversion of juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua* L.). **Aquaculture**, 475, 24-28.
- Tran-Duy, A., Schrama, J. W., van Dam, A. A. and Verreth, J. A. J. 2008. Effects of oxygen concentration and body weight on maximum feed intake, growth and hematological parameters of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. **Aquaculture**, 275(1), 152-162.
- Whangchai, N., Ungsethaphand, T., Chitmanat, C., Mengumphan, K. and Uraiwan, S. 2007. Performance of Giant Freshwater Prawn (*Macrobrachium rosenbergii* de Man) Reared in Earthen Ponds Beneath Plastic Film Shelters. **Chiang Mai J. Sci.**, 34(1), 89-96.
- Wongrat, L. and Boonyapiwat, S. 2003. **Plankton collecting and determination manual guide**. Bangkok: Kasetsart University Print.
- Zhang, S., Zhou, Q., Xu, D., Liang, W., Du, C. and Wu, Z. 2010. Vertical-Flow Constructed Wetlands Applied in a Recirculating Aquaculture System for Channel Catfish Culture: Effects on Water Quality and Zooplankton. **Polish Journal of Environmental Studies**, 19(5), 1063-1070.



ภาคผนวก



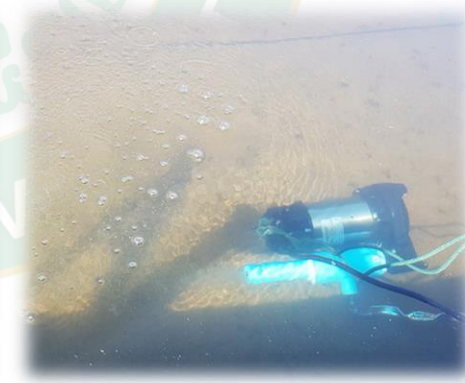
ภาคผนวก ก
ภาพการทำวิจัย



ภาคผนวกที่ 1 เตรียมบ่อกลมพลาสติกขนาด 5 ลบ. เมตร พร้อมเติมน้ำเพื่อใช้ในการทดลอง



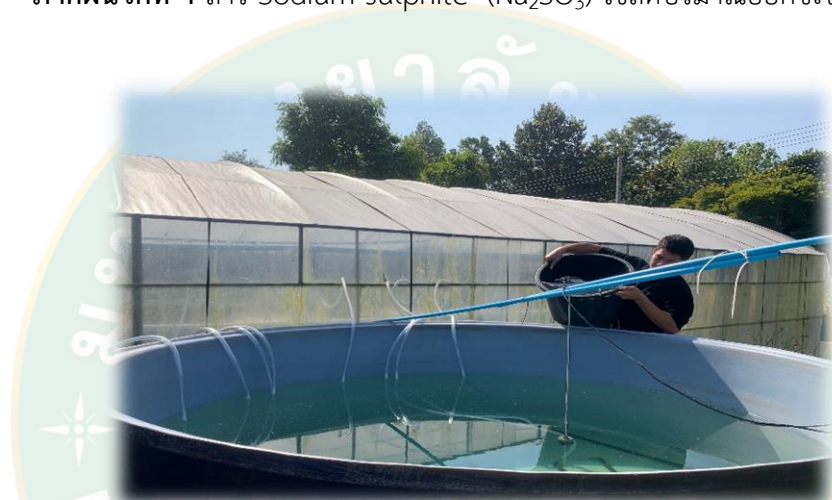
ภาคผนวกที่ 2 เครื่องเติมอากาศแบบท่อหยัดหยุด



ภาคผนวกที่ 3 เครื่องเติมอากาศแบบอีเจคเตอร์



ภาคผนวกที่ 4 สาร Sodium sulphite (Na_2SO_3) ใช้ลดปริมาณออกซิเจนในน้ำ



ภาคผนวกที่ 5 เติมสาร(Na_2SO_3) ในบ่อทดลอง



ภาคผนวกที่ 6 อุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ



ภาคผนวกที่ 7 ตู้แสดงข้อมูลคุณภาพน้ำ



ภาคผนวกที่ 8 บ่อเลี้ยงปลากะพงในระบบน้ำหมุนเวียน RAS



ภาคผนวกที่ 9 ปลากะพงขาวขนาด 300 กรัม/ตัว ปลากะพงขาวขนาด 620 กรัม/ตัว



ภาคผนวกที่ 10 ให้อาหาร 2 มื้อ/วัน 9.00 และ 15.00



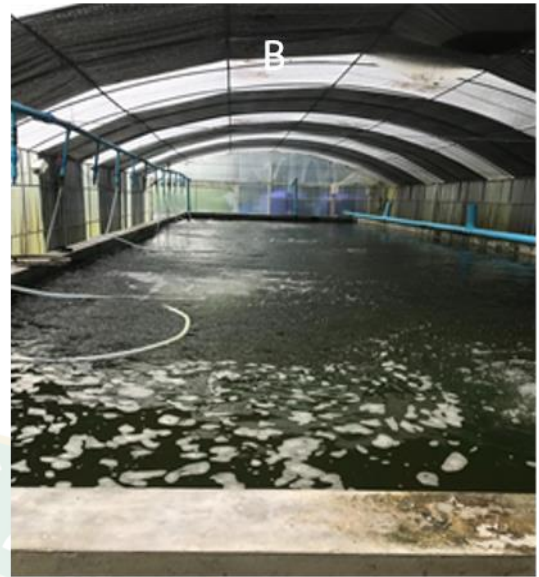
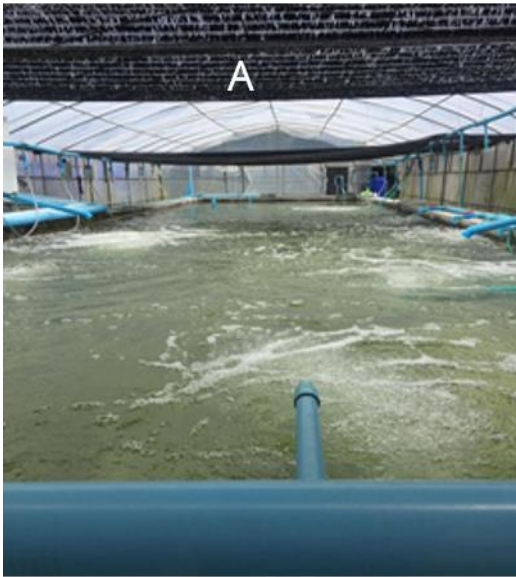
ภาคผนวกที่ 11 วัดปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ ทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ภาคผนวกที่ 12 ทำความสะอาดท่อเลี้ยงปลากะพงขาวในระบบน้ำหมุนเวียน



ภาคผนวกที่ 13 การจัดเตรียมท่อเลี้ยงปลากในระบบน้ำหมุนเวียน



ภาคผนวกที่ 14 บ่อเลี้ยงปลากะพงขาวระบบน้ำหมุนเวียนที่ติดตั้งเครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่าง
ยี่ดหุ่่น 2 เครื่อง (A) และ เครื่องเติมอากาศแบบท่ออย่างยี่ดหุ่่น 1 เครื่อง (B)



ภาคผนวกที่ 15 เตรียมลงลูกปลากะพงขาวน้ำหนักเฉลี่ย 12 กรัม/ตัว



ภาคผนวกที่ 16 ทำการชั่งน้ำหนักปลาทุก 15 วันเป็นระยะเวลา 3 เดือน



ภาคผนวกที่ 17 น้ำหนักปลาจะพุ่งเมื่อสิ้นสุดการเลี้ยง ในระยะเวลา 3 เดือน



ภาคผนวกที่ 18 น้ำหนักปลากะพงเมื่อสิ้นสุดการเลี้ยง ในระยะเวลา 7 เดือน





ภาคผนวก ข
ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่

ศรัณย์ เหมวัน, กระสินธุ์ หังสพฤกษ์, ทิพสุคนธ์ พิมพ์พิมล, บัญชา ทองมี, Nakao Nomura และ นิรุฒิ หวังชัย. 2563. การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศและการเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจนในบ่อปลากระพงขาวที่เลี้ยงแบบหนาแน่นในระบบน้ำหมุนเวียนในเขตภาคเหนือ. หน้า 305 – 315. ใน รายงานสืบเนื่องการประชุมสัมมนาวิชาการ นำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติเครือข่ายบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏภาคเหนือ.



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายศรัณย์ เหมวัน
เกิดเมื่อ	23 พฤษภาคม พ.ศ.2537
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2557 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำวิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีเพชรบุรี พ.ศ. 2560 ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต (การประมง) มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2561 ผู้ช่วยนักวิจัย คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่

