รหัสโครงการ SUT3-303-61-12-10

รายงานการวิจัย

โครงการเทคโนโลยีอัจฉริยะในการผลิตสัตว์
(Smart technology for animal production)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT3-303-61-12-10

รายงานการวิจัย

โครงการเทคโนโลยีอัจฉริยะในการผลิตสัตว์
(Smart technology for animal production)

คณะผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร บุญอนันธนสาร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ น.สพ.ดร. ภคนิจ คุปพิทยานันท์

สาขาวิชาเทคโนโลยีและนวัตกรรมทางสัตว์
สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2561
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

เมษายน 2564

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ นางสาวพงษวรรณ ขาวสะอาด นางสาวอารยา แจ้งไพร นายสุขสันต์ ขำคง นักวิจัย นายคณกร พลศิริ นักศึกษาปริญญาเอก ที่ได้ช่วยดำเนินการวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วง

ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายสุนัย พลายมี หัวหน้างานสัตว์น้ำ ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมทั้งบุคลากรฝ่ายสนับสนุนทุกท่าน ที่ได้ให้การช่วยเหลือ ให้คำแนะนำต่าง ๆ จนทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนการวิจัย และขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในการให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือการวิจัย และฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในการทำงานวิจัยนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

โครงการมุ่งพัฒนาเทคโนโลยีอัจฉริยะในการผลิตสัตว์ โดยแบ่งออกเป็น 2 หัวข้องานวิจัยหลัก ได้แก่ 1) การพัฒนาการเลี้ยงกุ้งในระบบการเลี้ยงแบบแนวตั้ง หรือ “กุ้งคอนโด” และ 2) การพัฒนาไบโอเซนเซอร์ในการจัดการสุขภาพสัตว์และปศุสัตว์

การศึกษานี้มุ่งพัฒนาระบบการเลี้ยงแบบแนวตั้งสำหรับผลิตกุ้งก้ามกราม (*Macrobrachium rosenbergii*) โดยศึกษาขนาดห้องเลี้ยงกุ้งที่เหมาะสม ระบบกรองน้ำ ระบบการเลี้ยงในระดับต้นแบบนำร่อง และพัฒนาการใช้อาหารที่ใช้โปรตีนจากพืชทดแทนปลาป่น ผลการศึกษาพบว่าห้องเลี้ยงขนาด 10 - 12 ลิตร เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาดเริ่มต้น 2-18 กรัม และเลี้ยงได้น้ำหนักตัวสุดท้ายประมาณ 30 กรัม ห้องเลี้ยงขนาด 33 - 67 ลิตร เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาดเริ่มต้น 30-40 กรัม และเลี้ยงได้น้ำหนักตัวสุดท้ายประมาณ 100 กรัม ห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาดเริ่มต้น 30-50 กรัม และเลี้ยงได้น้ำหนักตัวสุดท้ายประมาณ 120 กรัม ห้องเลี้ยงขนาด 70 ลิตร เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาดเริ่มต้น 40-50 กรัมขึ้นไป และเลี้ยงได้น้ำหนักตัวสุดท้ายประมาณ 150 กรัม และห้องเลี้ยง ขนาด 120 ลิตร เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามกุ้งก้ามกรามขนาดเริ่มต้น 40-50 กรัม และเลี้ยงได้น้ำหนักตัวสุดท้ายประมาณ 178 กรัม เป็นไปตามที่ได้คากการ์ณไว้ กุ้งก้ามกรามเพศผู้มีสมรรนะการเจริญเติบโต ได้แก่ ค่าน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น (weight gain) น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นต่อวัน (Average Daily gain; ADG) อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific growth rate) เปอร์เซนต์น้ำนักตัวที่เพิ่มขึ้น (Relative Weight Gain) และค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ ดีกว่ากุ้งก้ามกรามเพศเมีย ดังนั้นในการพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระบบการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งควรจะเลี้ยงกุ้งเพศผู้ล้วน ในระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งแบบแนวตั้ง กุ้งมีอัตราการรอดชีวิต 61.17-100 % ระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งแบบแนวตั้งสามารถนำกุ้งจากบ่อดินมาเลี้ยงเพิ่มขนาดได้เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของกุ้งก้ามกราม การพัฒนาระบบน้ำแบบหมุนเวียน และระบบการบำบัดน้ำสำหรับการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับต้นแบบนำร่อง พบว่าระบบบำบัดน้ำ ที่ประกอบด้วยถ่านกัมมันต์ สาร Microban, ไส้กรองดิส (Disc filter) และ ไส้กรองอะตอมไมส์ (Atomize filter) สามารถลดปริมาณแอมโมเนีย ค่าไนไตรต์ และ ค่าไนเตรต และคุณภาพน้ำที่ผ่านการกรองมีค่าอยู่ในช่วงค่าของน้ำที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม การนำเทคโนโลยีการติดตั้งกล้องวิดีโออินฟราเรดในห้องเลี้ยงของกุ้งก้ามกราม ทำให้สามารถสังเกตพฤติกรรมของกุ้งก้ามกรามได้ตลอดเวลาด้วยการดูผ่านแอพลิเคชั่นบนจอมือถือ การเปรียบเทียบกุ้งก้ามกรามทางการค้ากับกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง หรือในคอนโดด้วยระบบหมุนเวียนน้ำ ไม่พบความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมี (ความชื้น โปรตน ไขมน เถ้า) ในตัวกุ้ง แต่มีผลต่อคุณสมบัติของเนื้อกุ้งหลังต้มสุกในด้านสี และการสูญเสียสภาพหลังทำให้สุกและด้านเนื้อสัมผัส ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจในการเป็นโจทย์วิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาสูตรอาหารให้

เหมาะสมกับการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระบบเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้งต่อไป การศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระบบการเพาะเลี้ยงแบบคอนโดและกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในตะกร้าในบ่อดิน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในตะกร้าในบ่อดิน มีการเจริญเติบโตสูงกว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบคอนโด แต่มีอัตรารอดต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการเลี้ยงกุ้งคอนโด การที่กุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในตะกร้าในบ่อดินมีอัตราการรอดที่ต่ำกว่าเป็นผลมาจากความแปรปรวนของสภาพอากาศ และคุณภาพน้ำในบ่อดินที่ควบคุมได้ยากกว่าการเลี้ยงในระบบคอนโดแนวตั้ง นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาผลของการใช้อาหารที่มีปลาป่นสูง และอาหารที่มีการทดแทนปลาป่นด้วยวัตุดิบโปรตีนจากพืช ผลการศึกษาพบว่า การเลี้ยงกุ้งด้วยอาหารที่ใช้ปลาป่น และอาหารที่ใช้วัตถุดิบโปรตีนจากพืชแทนปลาป่น เป็นระยะเวลา 90 วัน ส่งผลให้กุ้งมีสมรรถนะการเจริญเติบโตไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) นอกจากนี้พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของกุ้งที่เลี้ยงด้วยอาหารที่ใช้ปลาป่น และอาหารที่ใช้วัตถุดิบโปรตีนจากพืชแทนปลาป่น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) โดยสรุปการศึกษานี้ได้พัฒนาเทคโนโลยีระบบการเลี้ยงกุ้งแบบแนวตั้งและพัฒนาอาหารที่ใช้วัตถุดิบโปรตีนจากพืชแทนปลาป่นในการเลี้ยงกุ้งแบบคอนโด

เพื่อการพัฒนาไบโอเซนเซอร์ในการจัดการสุขภาพสัตว์และปศุสัตว์ การศึกษานี้ได้พัฒนาระบบติดตามการเคลื่อนไหวของสัตว์และไบโอเซ็นเซอร์ที่ตรวจวัดค่าอุณหภูมิร่างการสัตว์ โครงการได้ทำการพัฒนาระบบที่ใช้ในการตรวจวัดการเคลื่อนไหวของวัวในฟาร์มวัวนม ทำการเก็บข้อมูลการเคลื่อนไหวของวัวในเซิร์ฟเวอร์และนำมาใช้ในการทำนายสุขภาพและวงรอบการเป็นสัด นอกจากนี้การพัฒนาการใช้เทอร์โมมิเตอร์ระบบอินฟาร์เรดวัดอุณหภูมิ ทำให้สามารบันทึกค่าอุณหภูมิร่างกายสัตว์แบบ real-time โดยไม่ทำให้สัตว์เครียด ผลการทดสอบการประยุกต์ใช้ระบบติดตามการเคลื่อนไหวของสัตว์ร่วมกับไบโอเซ็นเซอร์ที่ตรวจวัดค่าอุณหภูมิร่างการสัตว์ เป็นการพัฒนาระบบฟาร์มอัจฉริยะทางหนึ่งที่มีประโยชน์ต่อการจัดการสุขภาพสัตว์ทางด้านสัตว์แพทย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Abstract

This study aimed to develop smart technology for animal production which was divided into 2 activities including 1) Development of Vertical farming system for shrimp production or “Shrimp Condo” and 2) Development of biosensor for management of animal health.

In order to develop vertical farming system for freshwater shrimp (*Macrobrachium rosenbergii*) production, this study investigated the optimum size of culture unit and filtration system for shrimp culture, culture system at pilot scale and plant-based protein diet to replace high fishmeal diet. The results showed that the optimum size of culture unit for growing small shrimp (body size of 2-18 g) was 10 – 12 L. For shrimp at size of initial weight 30 – 50 g, the optimum culture unit should not smaller than 50 L which was optimum to grow shrimp to final body weight at 120 g. For shrimp at size of initial weight 40 – 50 g, the optimum culture unit should not smaller than 70 L which was optimum to grow shrimp to final body weight at 150 g. For shrimp at size of initial weight 40 – 50 g, the optimum culture unit should not smaller than 120 L which was optimum to grow shrimp to final body weight at 178 g. As expected, male shrimp had better growth performance (Weight gain, Average Daily Gain, Specific Growth Rate, Relative Weight Gain and Feed Conversion Ratio) comparing to female shrimp, therefore, the vertical shrimp culture is suitable for all-male shrimp culture. The overall survival rate of shrimp culture was in the range of 61.17-100 %. This system could be able to use for up-size of shrimp from earthen pond which will be benefit for value-added of small-size shrimp harvested from earthen pond. For development of recirculating culture system at pilot scale, the water treatment system included activated carbon, Microban, Disc filter and Atomize filter. This water treatment system was able to decrease ammonia, nitrite and nitrate which was the suitable for shrimp culture system. The culture system which was equipped with infrared video camera would enable as application to real-time monitoring shrimp behavior using mobile phone. Comparing with the commercial shrimp at same size, there were no significant differences in chemical composition (moisture, crude protein, crude fat and ash) of shrimps which were harvested from the vertical culture system except for body colour after cooking. However, for the meat quality of

cooked shrimp, shrimp which were grew from vertical culture system had lower cooking loss, and further studies on diet formulation are needed to improve meat quality of shrimp. This study was also conducted to compare the shrimp production using vertical shrimp culture or “Shrimp condo” and partition culture in earthen pond. The results showed that the shrimp which were grew in earthen pond with partitioning had higher average daily gain but lower survival rate. Low survival rate of shrimp in earthen pond was due to the variation of weather and water quality which were difficult to control when compare to the shrimp production in “Shrimp condo”. Furthermore, this study investigated the effects of high fishmeal diet and plant-based protein diet on growth performance (experimental period 90 days). Our result showed that there were no significant differences in growth performance of shrimp fed with high fishmeal and plant-based protein diets ($P>0.05$). In addition, the chemical composition of shrimp fed with high fishmeal diet and plant-based protein diet appeared to be similar. Taken together, this study developed the vertical shrimp farming technology and providing the information of the use of plant-based protein diet for shrimp production in shrimp-condo.

In order to develop biosensor for health management in animal, this project constructed the system to follow animal movement and biosensor to determine body temperature. The system to monitor and record movement of cow were developed in dairy farm. Data of cow movement were collected in sever which were used for further prediction of animal health and estrous cycle. In addition, infrared thermometer was developed to monitor body temperature of animal. This application was benefit to real-time recordation of the body temperature of animal without stress. Combined these application together, these smart farming systems would benefit to monitor animal health which enable the health management of animal for veterinary.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ก
บทคัดย่อ ..... ข
Abstract ..... ง
สารบัญ ..... ฉ
สารบัญตาราง ..... ช
สารบัญภาพ ..... ญ
บทที่ 1 บทนำ
ที่มาและความสำคัญ 1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3
ขอบเขตของการวิจัย 3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
บทที่ 2 วรรณกรรมและเอกสารที่เกี่ยวข้อง 5
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย
กิจกรรมที่ 1: ระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบอัจฉริยะ 37
การทดลองที่ 1. การศึกษาขนาดห้องเลี้ยงที่เหมาะสม ในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้ง 37
การทดลองที่ 2. การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ด้วยระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง การเตรียมสัตว์ทดลอง การทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล 39
การทดลองที่ 3. การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant 40
การทดลองที่ 4. การทดสอบระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในสภาวะต่าง ๆ 42
การทดลองที่ 5. การพัฒนาอาหารที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงกุ้งในระบบการเลี้ยงแบบแนวตั้ง โดยการศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหารของกุ้งก้ามกราม 43
กิจกรรมที่ 2: การพัฒนา Smart Farming เพื่อประเมินและจัดการสุขภาพสัตว์ 46

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการวิจัย

กิจกรรมที่ 1: ระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบอัจฉริยะ 49

การศึกษาขนาดห้องเลี้ยงที่เหมาะสม ในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม แบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้ง 49

การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ด้วยระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง 73

การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม แบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant 87

การทดสอบระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ในสภาวะต่าง ๆ 118

การศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหาร ของกุ้งก้ามกราม 120

กิจกรรมที่ 2: การพัฒนา Smart Farming เพื่อประเมินและจัดการสุขภาพสัตว์ 123

วิจัยพัฒนาระบบอุปกรณ์ในการติดตามการเคลื่อนที่ของสัตว์ เพื่อตรวจสอบหาสัตว์ป่วย 123

วิจัยและพัฒนาไบโอเซนเซอร์เพื่อประโยชน์ในการจัดการสุขภาพสัตว์ และปศุสัตว์โดยพัฒนาระบบอุปกรณ์ในการตรวจวัดอุณภูมิร่างกาย ของสัตว์โดยไม่ต้องสัมผัสกับตัวสัตว์ 128

การพัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลในคอมพิวเตอร์ Server 130

บทที่ 5 อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

5.1 อภิปรายผลการวิจัย

กิจกรรมที่ 1: ระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบอัจฉริยะ 135

การศึกษาขนาดห้องเลี้ยงที่เหมาะสม ในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม แบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้ง 135

การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ด้วยระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง 141

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม
แบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant..... 142
การทดสอบระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม
ในสภาวะต่าง ๆ..... 148
การศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหาร
ของกุ้งก้ามกราม..... 149

กิจกรรมที่ 2: การพัฒนา Smart Farming เพื่อประเมินและจัดการสุขภาพสัตว์..... 151

5.2 สรุปผลการวิจัย

กิจกรรมที่ 1: ระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบอัจฉริยะ..... 152

กิจกรรมที่ 2: การพัฒนา Smart Farming เพื่อประเมินและจัดการสุขภาพสัตว์..... 153

เอกสารอ้างอิง 154

ประวัตินักวิจัย 161

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ปริมาณการผลิตและมูลค่าสัตว์น้ำจืดที่สำคัญทางเศรษฐกิจ ปี 2561.....6
ตารางที่ 2 ผลของความหนาแน่นในการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามต่อการเจริญเติบโต อัตรารอดชีวิตและผลผลิต (Biomass) 11
ตารางที่ 3 คุณสมบัติของน้ำที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม..... 16
ตารางที่ 4 เปอร์เซ็นต์การใช้ปลาป่นในอาหารสัตว์น้ำ (Cruz, 1997).....21
ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของแหล่งโปรตีนจากสัตว์และพืช.....25
ตารางที่ 6 กรดอะมิโนที่จำเป็นของแหล่งโปรตีนจากสัตว์และพืช.....26
ตารางที่ 7 ผลของโปรตีนจากพืชในอาหาร (plant protein-based diet) ต่อสมรรถนะการเจริญเติบโตของกุ้ง.....30
ตารางที่ 8 ผลของโปรตีนจากพืชในอาหาร (plant protein-based diet) ต่อองค์ประกอบทางเคมีในตัว (Whole body) ของกุ้ง 32
ตารางที่ 9 การศึกษาขนาดของห้องเลี้ยงที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาดต่าง ๆ..... 37
ตารางที่ 10 การเก็บรวบรวมและการวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลอง..... 38
ตารางที่ 11 ส่วนประกอบของระบบกรองในการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำในระบบเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้ง..... 40
ตารางที่ 12 ปริมาณวัตถุดิบและองค์ประกอบทางเคมีของอาหารการทดลอง..... 44
ตารางที่ 13 การเจริญเติบโตของกุ้งที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยง (กุ้ง 50 กรัม ต่อน้ำ 10 ลิตร) เป็นระยะเวลา 30 วัน..... 51
ตารางที่ 14 การเจริญเติบโตของกุ้งที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยง (กุ้ง 30 กรัม ต่อน้ำ 12 ลิตร) เป็นระยะเวลา 3 เดือน..... 53
ตารางที่ 15 การเจริญเติบโตของกุ้งที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงขนาด 37.5 ลิตร เป็นระยะเวลา 7 เดือน..... 56
ตารางที่ 16 การเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามเพศผู้ และเพศเมียที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงขนาด 37.5 ลิตร เป็นระยะเวลา 60 วัน..... 57
ตารางที่ 17 การเจริญเติบโตของกุ้งในห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ ที่ระยะเวลาการเลี้ยง 90 วัน..... 60
ตารางที่ 18 การเจริญเติบโตของกุ้งที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยง (กุ้ง 18 กรัม ต่อน้ำ 10 ลิตร) เป็นระยะเวลา 90 วัน..... 63

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 19 การเจริญเติบโตของกุ้งที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยง (กุ้ง 2 กรัม ต่อน้ำ 10 ลิตร) เป็นระยะเวลา 60 วัน..... 64

ตารางที่ 20 อัตรารอดของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ..... 65

ตารางที่ 21 คุณภาพน้ำในระบบห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม..... 66

ตารางที่ 22 การเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามที่มีขนาด 50 กรัมขึ้นไป มาเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร..... 75

ตารางที่ 23 การเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามที่มีขนาด 30 กรัมขึ้นไป มาเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร..... 77

ตารางที่ 24 คุณภาพน้ำในระบบห้องเลี้ยงขนาดปริมาตรน้ำ 50 ลิตร..... 79

ตารางที่ 25 คุณภาพน้ำจากกุ้งคอนโดที่ผ่านระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด ของระบบกรองที่ 1 และระบบกรองที่ 2.....91

ตารางที่ 26 การเจริญเติบโตของกุ้งที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงเชิงกว้าง ปริมาตรน้ำ 70 ลิตร.....93

ตารางที่ 27 การเจริญเติบโตของกุ้งที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงเชิงลึก ปริมาตรน้ำ 120 ลิตร.....94

ตารางที่ 28 คุณภาพน้ำในระบบห้องเลี้ยง.....100

ตารางที่ 29 ค่าองค์ประกอบทางเคมีในเนื้อและในตัวของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในคอนโด และกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในบ่อดิน.....114

ตารางที่ 30 ค่าสี (Color) ของตัวอย่างกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในคอนโด และกุ้งก้ามกราม ที่เลี้ยงในบ่อดิน แบบที่แกะเปลือกและไม่แกะเปลือก.....116

ตารางที่ 31 ค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียหลังการทำให้สุก (% Cooking loss) ของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในคอนโด และกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในบ่อดิน.....117

ตารางที่ 32 ค่าลักษณะเนื้อสัมผัส (**Texture**) ของตัวอย่างกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในคอนโด และกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในบ่อดิน.....117

ตารางที่ 33 การเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบกุ้งตะกร้าและกุ้งคอนโด.....119

ตารางที่ 34 คุณภาพน้ำในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม.....119

ตารางที่ 35 การเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามที่ได้รับอาหารทดลอง (experimental diet).....121

ตารางที่ 36 คุณภาพน้ำในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม.....121

ตารางที่ 37 องค์ประกอบทางเคมีในตัว (whole body) ของกุ้งก้ามกรามที่ได้รับอาหารทดลอง.....122

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 การผลิตกุ้งก้ามกรามทั่วโลก.....6
ภาพที่ 2 ปริมาณการผลิตและมูลค่าสัตว์น้ำจืดที่สำคัญทางเศรษฐกิจ ปี 2561.....7
ภาพที่ 3 ปริมาณและมูลค่ากุ้งก้ามกรามจากการพะเลี้ยงและที่จับได้ ปี 2557-2561.....7
ภาพที่ 4 รูปแบบการกระจายน้ำหนักของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงด้วยความหนาแน่นทั้ง 4 ระดับ.....13
ภาพที่ 5 การใช้ปลาป่นในอาหารสัตว์.....22
ภาพที่ 6 การผลิตปลาป่นและราคาของปลาป่น.....22
ภาพที่ 7 ระบบน้ำแบบหมุนเวียนแบบปิด ที่ใช้ในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง 39
ภาพที่ 8 การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant โดยมีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด.....41
ภาพที่ 9 แผนการศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหารของกุ้งก้ามกราม.....45
ภาพที่ 10 ระบบการติดตามการเคลื่อนที่โค.....47
ภาพที่ 11 การใช้งาน Sensor GY-906.....47
ภาพที่ 12 การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงน้ำปริมาตร 10 ลิตร ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด.....50
ภาพที่ 13 การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงน้ำปริมาตร 12 ลิตร ที่มีสีห้องเลี้ยงเป็นสีเหลือง สีน้ำเงิน (A) และห้องเลี้ยงสีดำ (B) ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด.....52
ภาพที่ 14 การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงน้ำปริมาตร 37.5 ลิตร ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด.....55
ภาพที่ 15 การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงน้ำปริมาตร 12, 33, 54 และ 67 ลิตร ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด.....59
ภาพที่ 16 อุณหภูมิของอากาศ (°C) ในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม.....67
ภาพที่ 17 อุณหภูมิของน้ำ (°C) ระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ.....68
ภาพที่ 18 ค่าการละลายออกซิเจน (mg/L) ในน้ำระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ในห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ.....69
ภาพที่ 19 ค่าความเป็นกรดด่างในน้ำระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ.....70
ภาพที่ 20 ค่าความกระด้างในน้ำ (mg/L) ระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ในห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ.....71

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 21 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC (ms/cm)) ในน้ำระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ.....72

ภาพที่ 22 การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงน้ำปริมาตร 50 ลิตร ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด.....74

ภาพที่ 23 อัตราการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามขนาด 50 กรัมขึ้นไปที่ถูกเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร เป็นระยะเวลา 7 เดือน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักตัวสุดท้ายและเปอร์เซ็นต์การเจริญเติบโตจำเพาะ(SGR).....76

ภาพที่ 24 อัตราการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามขนาด 30 กรัมขึ้นไปที่ถูกเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร เป็นระยะเวลา 6 เดือน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักตัวสุดท้ายและเปอร์เซ็นต์การเจริญเติบโตจำเพาะ (SGR).....78

ภาพที่ 25 อุณหภูมิของอากาศ (°C) ในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เป็นระยะเวลา 7 เดือน.....80

ภาพที่ 26 อุณหภูมิของน้ำ (°C) ระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด เป็นระยะเวลา 7 เดือน.....81

ภาพที่ 27 ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (mg/L) ระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดเป็นระยะเวลา 7 เดือน.....82

ภาพที่ 28 ค่าความเป็นกรดด่างในน้ำระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด เป็นระยะเวลา 7 เดือน.....83

ภาพที่ 29 ค่าความเค็มในน้ำ (ppt) ระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด เป็นระยะเวลา 7 เดือน.....84

ภาพที่ 30 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC (ms/cm)) ในน้ำระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดเป็นระยะเวลา 7 เดือน.....85

ภาพที่ 31 ค่าความกระด้างในน้ำ (mg/L) ระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด เป็นระยะเวลา 7 เดือน.....86

ภาพที่ 32 การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant โดยมีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด.....89

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 33 ระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด ที่เป็นระบบที่มีการกรองแบบที่ 1 (A) และระบบที่มีการกรองแบบที่ 2 (B).....90

ภาพที่ 34 การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (Average daily gain (ADG), g) ของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบในระบบห้องเลี้ยงเชิงกว้าง และระบบห้องเลี้ยงเชิงลึก.....95

ภาพที่ 35 ค่าน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น (weight gain, g) ของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงเชิงกว้าง ปริมาตรน้ำ 70 ลิตร.....96

ภาพที่ 36 ค่าน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น (weight gain, g) ของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงเชิงลึก ปริมาตรน้ำ 120 ลิตร.....97

ภาพที่ 37 อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (FCR) ของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงเชิงกว้าง ปริมาตรน้ำ 70 ลิตร.....98

ภาพที่ 38 อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (FCR) ของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงเชิงลึก ปริมาตรน้ำ 120 ลิตร.....99

ภาพที่ 39 อุณหภูมิของอากาศ (°C) ในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เป็นระยะเวลา 12 เดือน.....101

ภาพที่ 40 อุณหภูมิของน้ำ (°C) ในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เป็นระยะเวลา 12 เดือน.....102

ภาพที่ 41 ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (mg/L) ของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เป็นระยะเวลา 12 เดือน.....103

ภาพที่ 42 ค่าความเป็นกรดด่างในน้ำของของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เป็นระยะเวลา 12 เดือน.....104

ภาพที่ 43 ค่าแอมโมเนีย (mg/L) ในน้ำของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เป็นระยะเวลา 12 เดือน.....105

ภาพที่ 44 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC (ms/cm)) ในน้ำของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เป็นระยะเวลา 12 เดือน.....106

ภาพที่ 45 ค่าความกระด้าง (mg/L) ในน้ำของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเป็นระยะเวลา 12 เดือน.....107

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 46 ค่าแมกนีเซียม (mg/L) ในน้ำของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด ในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเป็นระยะเวลา 12 เดือน....108

ภาพที่ 47 ค่าแคลเซียม (mg/L) ในน้ำของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด ในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเป็นระยะเวลา 12 เดือน....109

ภาพที่ 48 การสังเกตพฤติกรรมของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโด....111

ภาพที่ 49 ความแตกต่างของสีระหว่างกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในคอนโด และกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในบ่อดิน....114

ภาพที่ 50 การเปรียบเทียบความแตกต่างของสีระหว่างกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในคอนโด และกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในบ่อดิน ก่อนการทำให้สุก (A), (B) และหลังการทำให้สุก (C)....115

ภาพที่ 51 การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระบบตะกร้า (กุ้งตะกร้า) เปรียบเทียบกับการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในคอนโด (กุ้งคอนโด)....118

ภาพที่ 52 ระบบการติดตามการเคลื่อนที่โค....123

ภาพที่ 53 อุปกรณ์ต้นแบบ Sensor Id 1 และ 2....123

ภาพที่ 54 Flow Chart การทำงานของระบบ....124

ภาพที่ 55 ติดตั้ง Sensors Id1 และ 2 เพื่อรับข้อมูล iBeacon....126

ภาพที่ 56 การติดตั้ง iBeacon ที่โค....127

ภาพที่ 57 การใช้งาน Sensor GY-906....128

ภาพที่ 58 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิทั้ง 5 จุด....128

ภาพที่ 59 ขั้นตอนการอ่านอุณหภูมิของไมโครคอนโทรลเลอร์....129

ภาพที่ 60 Dashboard สำหรับแสดงข้อมูลภาพรวมของระบบ....130

ภาพที่ 61 แสดงตำแหน่งเซนเซอร์ตัวที่ 1 และ 2 ที่ติดอยู่ที่ขอบรั้ว....131

ภาพที่ 62 แสดงระยะห่างระหว่างเซนเซอร์ที่ติดอยู่กับตัวโคกับเซนเซอร์หลักตัวที่ 1และ 2....131

ภาพที่ 63 Map total distance แสดงข้อมูลประวัติการเดินและระยะทางรวมที่โคเดิน 132

ภาพที่ 64 ระบุการแสดงผลประวัติตำแหน่งและระยะการเดินของโค....132

ภาพที่ 65 ตัวอย่างการแสดงผลตำแหน่งเส้นทางตั้งแต่ 0 ถึงวินาทีที่ 10....133

ภาพที่ 66 การตรวจวัดจากเจ้าหน้าที่....133

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 67 แสดงหน้าต่าง Temperature ข้อมูลของโค.....133
ภาพที่ 68 แสดงหน้าต่างระบบการแจ้งเตือน Notification.....134

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

กุ้งก้ามกราม (*Macrobrachium rosenbergii*) เป็นกุ้งน้ำจืดที่มีราคาสูง การเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในบ่อดิน ยังประสบปัญหาการเลี้ยงที่ใช้เวลานาน อัตราการรอดต่ำ กุ้งมีขนาดแตกต่างกันมาก และได้กุ้งขนาดใหญ่ที่มีราคาสูงในสัดส่วนที่น้อย ดังนั้นจึงส่งผลให้การเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามยังมีปัญหาและอุปสรรค อื่น ๆ ได้แก่ การขาดแคลนลูกพันธุ์กุ้งที่มีคุณภาพ ลูกพันธุ์กุ้งมีราคาสูง อาหารกุ้งมีราคาแพง และการขาดแคลนแรงงาน อีกทั้งพื้นที่การเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะอยู่ในเขตจังหวัดในภาคกลาง ได้แก่ จังหวัดราชบุรี สุพรรณบุรี และนครปฐม ได้มีข้อมูลจำนวนฟาร์มเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่ได้รับการรับรองมาตรฐานการปฏิบัติทางการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ดี (GAP) (GAP เดือนมีนาคม 2560) รายงานจำนวนฟาร์มเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่ได้รับมาตรฐาน GAP ร้อยละ 84.6 อยู่ที่จังหวัด นครปฐม ราชบุรี และสุพรรณบุรี และอีกร้อยละ 15.4 กระจายอยู่ตามจังหวัด กาฬสินธุ์ ฉะเชิงเทรา กาญจนบุรี สมุทรสาคร อุดรธานี พิษณุโลก เพชรบุรี สมุทรปราการ ชลบุรี ลพบุรี และสมุทรสงคราม (กองวิจัยและพัฒนาประมงน้ำจืด) ซึ่งจะเห็นได้ว่าพื้นที่ในจังหวัดเหล่านี้ จะมีการประมงหรือการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอื่น ๆ เกษตรกรรม และอุตสาหกรรมอื่น ๆ อยู่ด้วย จึงทำให้การขยายตัวการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเป็นไปได้ยาก ดังนั้นการวิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม จึงต้องการการพัฒนาระบบการเลี้ยงกุ้งทางเลือกแบบอื่น ๆ เช่นการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง (vertical shrimp farming) เป็นต้น อีกทั้งการขยายพื้นที่การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเป็นไปได้ยาก เนื่องจากระยะเวลาการเลี้ยงกุ้งนาน 8-10 เดือนเมื่อเปรียบเทียบกับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชนิดอื่น ๆ และการเพาะเลี้ยงกุ้งในบ่อดินมีค่าอัตราการรอดต่ำมาก ดังนั้นการเพาะเลี้ยงกุ้งในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้งจึงเป็นทางเลือกที่สำคัญในการนำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในเชิงพาณิชย์ ซึ่งเหมาะแก่การเลี้ยงกุ้งให้มีขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นกุ้งที่มีราคาสูง ซึ่งการเลี้ยงกุ้งในบ่อดินเพื่อให้ได้กุ้งขนาดใหญ่ต้องใช้พื้นที่มาก และน้ำปริมาตรมาก ระยะเวลานาน จึงเป็นไปได้ยาก

ดังนั้นการวิจัยนี้มุ่งพัฒนาระบบการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้ง (vertical shrimp culture) เพื่อใช้เป็นระบบทางเลือกในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในเชิงธุรกิจ โดยจะนำกุ้งขนาดเล็กมาเลี้ยงต่อในระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งแบบแนวตั้ง ด้วยระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด (Recirculating aquaculture system) โดยในเบื้องต้นเป็นการพัฒนาอุปกรณ์และเครื่องมือ ในการสร้างระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง ที่ประกอบด้วยโครงสร้าง ห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ ระบบน้ำแบบหมุนเวียน ระบบบำบัดน้ำ แล้วนำกุ้งมาเลี้ยงเพื่อทดสอบสมรรถนะการเจริญเติบโต เมื่อพบว่าระบบดังกล่าวนี้สามารถเลี้ยงกุ้งได้ จึงพัฒนาระบบให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น ซึ่งต้องอาศัยการบูรณาการเทคโนโลยีและศาสตร์ด้านต่าง ๆ ได้แก่ เทคโนโลยีด้านวิศวกรรมในการพัฒนาระบบการเลี้ยง ที่ประกอบไปด้วยห้องเลี้ยง ระบบน้ำแบบหมุนเวียน และระบบการบำบัดน้ำเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ร่วมกับเทคโนโลยีการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เนื่องจากเป็นระบบการเลี้ยงที่ต้องมีการดูแลอย่างใกล้ชิด ในเรื่องของการให้อาหาร คุณภาพอาหาร (Feed and feeding) คุณภาพน้ำ ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง ซึ่งมีหลายปัจจัย ได้แก่ ขนาดของห้องเลี้ยง อาหารและคุณภาพของอาหาร อัตราการให้อาหาร สารเสริมในอาหาร เป็นต้น เพื่อเป็นการผลักดันให้โครงการนี้สามารถเป็นการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระดับ Pilot plant ได้

ไบโอเซนเซอร์ (Biosensor) คือ ตัวตรวจวัดทางชีวภาพ ที่อาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างส่วนแปลงสัญญาณ (Transducer) และสารชีวภาพ (Biological Component) ไบโอเซนเซอร์ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อประโยชน์หลายด้าน เช่น ด้านการแพทย์ ด้านอุตสาหกรรม ด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น อุปกรณ์ภายในไบโอเซนเซอร์ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ (1) ส่วนของสารชีวภาพ (Sensitive biological element) เป็นส่วนที่ทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการตรวจวัด เช่น เนื้อเยื่อ แบคทีเรีย เอนไซม์ แอนติบอดี กรดนิวคลีอิค เป็นต้น (2) ส่วนที่จะแปลงสัญญาณจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น (Transducer หรือ detector element) เช่น สัญญาณทางเคมี เสียง แสง แรง ความร้อน กรด-เบส ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า เพื่อจะนำไปวิเคราะห์ต่อไป และ (3) ส่วนที่จะวิเคราะห์สัญญาณ (Associated electronics หรือ signal processors) เมื่อได้สัญญาณมาแล้วจะนำเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้มาเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและแปลผลได้ (อัญชลี, 2554) ไบโอเซนเซอร์ตัวแรกที่ถูกพัฒนาขึ้นคือ เครื่องตรวจวัดระดับน้ำตาลในเลือดของผู้ป่วยเบาหวาน ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ได้พัฒนาไบโอเซนเซอร์อีกจำนวนมาก อาทิเช่น การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าความเป็นกรด-ด่างในกระเพาะโคชนิดไร้สายเพื่อปศุสัตว์ยุคใหม่ (CHULALONGKORN UNIVERSITY RESEARCH AND INNOVATION FOR SOCIETY, 2563) เครื่องตรวจวัดสารอื่นๆ ในร่างกาย (เช่น ยูเรีย ฮอร์โมน กรด-เบส ฯลฯ) (Sures, 2017) เครื่องตรวจวัดสารปนเปื้อนในน้ำ เครื่องตรวจแบคทีเรียในอากาศ เครื่องตรวจจับเชื้อโรค เครื่องตรวจวัดวิตามินในอาหาร เครื่องตรวจวัดปริมาณยาในอาหาร (เช่น ยาปฏิชีวนะ ฮอร์โมนเร่งการเจริญเติบโต สารเร่งเนื้อแดง) เครื่องตรวจวัดโปรตีนในอุตสาหกรรม เป็นต้น (กลุ่มพัฒนาระบบเฝ้าระวังสุขาภิบาลอาหารและน้ำ สำนักสุขาภิบาลอาหารและน้ำ กรมอนามัย, 2556)

ปัจจุบันมีการพัฒนาไบโอเซนเซอร์เพื่อประโยชน์ในการจัดการสุขภาพสัตว์และปศุสัตว์ที่หลากหลาย ไบโอเซนเซอร์ได้ถูกใช้ในการเก็บข้อมูลด้านสรีรวิทยา ด้านสภาพแวดล้อมของฟาร์ม ด้านผลผลิต และด้านคุณลักษณะทางพฤติกรรม ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาช่วยในการบริหารจัดการตลอดจนการวินิจฉัยโรคได้ตั้งแต่ระยะเริ่มต้น นำไปสู่การแก้ไขป้องกันหรือรักษาได้ทันท่วงทีก่อนที่จะมีการสูญเสียทางเศรษฐกิจ ในสหรัฐอเมริกานั้น มีรายงานว่าไบโอเซนเซอร์ในปี 2013 มีมูลค่า 11.39 พันล้านดอลลาร์ และคาดว่าจะเพิ่มขึ้นไปถึง 22.68 พันล้านดอลลาร์ในปี 2020 ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาไบโอเซนเซอร์เพื่อประโยชน์ในการจัดการสุขภาพสัตว์และปศุสัตว์ โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ วิจัยและพัฒนาไบโอเซนเซอร์เพื่อประเมินสภาวะของสัตว์ด้วยการตรวจค่าทางสรีรวิทยา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วัตถุประสงค์ของโครงการ

โครงการมุ่งพัฒนาเทคโนโลยีอัจฉริยะในการผลิตสัตว์ โดยแบ่งออกเป็น 2 หัวข้องานวิจัยหลัก ได้แก่ การพัฒนาการเลี้ยงกุ้งในระบบการเลี้ยงแบบแนวตั้ง และพัฒนาไบโอเซนเซอร์ในการจัดการสุขภาพสัตว์และปศุสัตว์ โดยมีวัตถุประสงค์ ดังนี้

1. เพื่อศึกษาขนาดห้องเลี้ยงที่เหมาะสม ในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้ง
2. เพื่อพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ด้วยระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง
3. เพื่อพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant
4. เพื่อพัฒนาอาหารที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงกุ้งในระบบการเลี้ยงแบบแนวตั้ง โดยการศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหารของกุ้งก้ามกราม
5. เพื่อพัฒนาไบโอเซนเซอร์ในการจัดการสุขภาพสัตว์และปศุสัตว์โดยพัฒนาระบบอุปกรณ์ในการติดตามการเคลื่อนที่ของสัตว์เพื่อตรวจสอบหาสัตว์ป่วยหรือสัตว์ที่มีการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของสัตว์ในฟาร์ม
6. เพื่อพัฒนาไบโอเซนเซอร์เพื่อประโยชน์ในการจัดการสุขภาพสัตว์และปศุสัตว์โดยพัฒนาระบบอุปกรณ์ในการตรวจวัดอุณหภูมิร่างกายของสัตว์โดยไม่ต้องสัมผัสตัวสัตว์ เพื่อความสะดวกในการจัดการสุขภาพของฝูงสัตว์

ขอบเขตของโครงการวิจัย

ขอบเขตของการวิจัยการพัฒนาการเลี้ยงกุ้งในระบบการเลี้ยงแบบแนวตั้ง เป็นศึกษาขนาดห้องเลี้ยงที่เหมาะสม เพื่อพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้งในระดับ Pilot plant อีกทั้งยังพัฒนาอาหารที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงกุ้งในระบบการเลี้ยงแบบแนวตั้ง โดยการศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหารของกุ้งก้ามกราม และประเมินผลในด้านต่าง ๆ ได้แก่ สมรรถนะการเจริญเติบโต องค์ประกอบทางเคมีในตัวปลา และคุณภาพน้ำในระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้ง ซึ่งจะเป็นการสร้างนวัตกรรมหรือสินค้าในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ใช้ระบบนี้ในการผลิตกุ้งเชิงการค้า สร้างอาชีพเสริมให้กับคนทุกอาชีพได้ ทั้งคนสร้างระบบ คนนำระบบไปเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เพื่อเป็นอาหาร หรือเพื่อเป็นผลิตผลของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ขอบเขตของการวิจัยการพัฒนาไบโอเซนเซอร์ในการจัดการสุขภาพสัตว์และปศุสัตว์ เป็นการพัฒนาระบบไบโอเซ็นเซอร์เพื่อประเมินสภาวะทางสรีรวิทยาด้านต่าง ๆ และนำไปสู่การจัดการสุขภาพสัตว์ได้อย่างแม่นยำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของสัตว์ในฟาร์ม และเพิ่มความสะดวกในการจัดการสุขภาพของฝูงสัตว์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

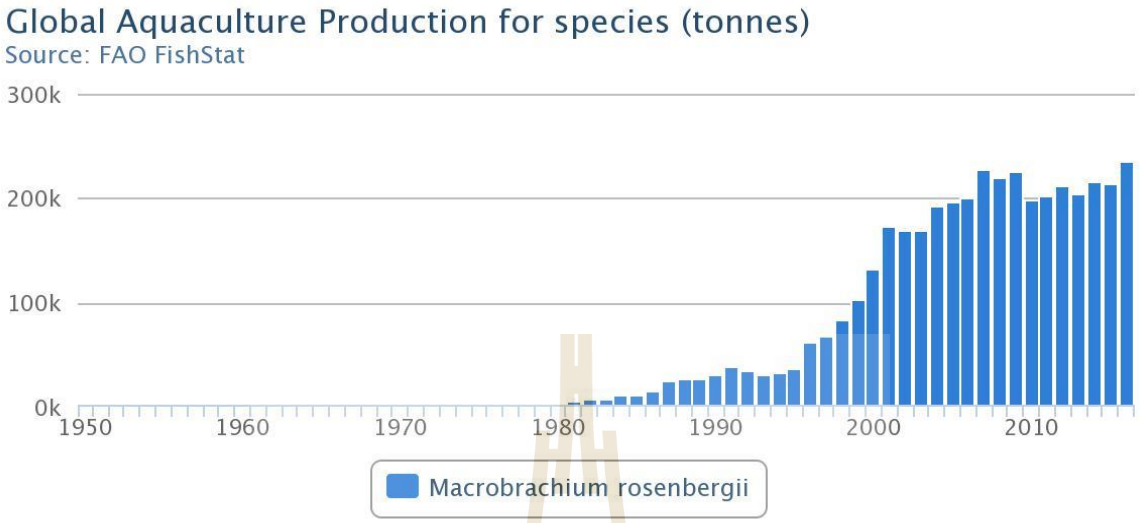
1. ขนาดห้องเลี้ยงที่เหมาะสม สำหรับการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้ง เพื่อให้เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม
2. ระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ด้วยระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง เพื่อใช้เป็นระบบทางเลือกในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในเชิงธุรกิจ
3. ระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant เพื่อผลักดันให้การเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามสู่ในระดับอุตสาหกรรม
4. สูตรอาหารที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงกุ้งในระบบการเลี้ยงแบบแนวตั้ง โดยการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหารของกุ้งก้ามกราม เพื่อพัฒนาสูตรอาหารให้เหมาะสมกับกุ้งก้ามกรามในระบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้ง
5. ต้นแบบไบโอเซนเซอร์เพื่อประโยชน์ในการจัดการสุขภาพสัตว์และปศุสัตว์โดยพัฒนาระบบ
   - อุปกรณ์ในการติดตามการเคลื่อนที่ของสัตว์
   - อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิร่างกายของสัตว์โดยไม่ต้องสัมผัสตัวสัตว์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
วรรณกรรมและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

กุ้งก้ามกราม (Giant freshwater prawn; *M. rosenbergii* de man) เป็นกุ้งน้ำจืดที่พบในแม่น้ำที่มีเขตติดต่อกับทะเล พบในเขตเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เป็นกุ้งที่ได้รับความนิยมบริโภคในเอเชีย และยุโรป ทำให้การผลิตกุ้งก้ามกรามของทั่วโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และในปี 2016 มีปริมาณการผลิตกุ้งก้ามกรามอยู่ที่ 233,898 ตัน (FAO, 2016) (ภาพที่ 1) และในขณะเดียวกันประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกในปี 2016 อยู่ที่ 4,073.53 ตัน เป็นมูลค่า 554.82 ล้านบาท (กลุ่มสถิติการประมง; www4.fisheries.go.th/strategy-stat) ซึ่งทำให้กุ้งก้ามกรามเป็นสัตว์น้ำจืดที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย (ดังตารางที่ 1) จากผลผลิตสัตว์น้ำในปี 2561 ซึ่งมีปริมาณการผลิตรวม 418,070 ตัน มูลค่ารวมทั้งสิ้น 25,741.80 ล้านบาท ซึ่งปริมาณการผลิตกุ้งก้ามกรามเป็นอันดับสามรองจากลานิลและปลาดุกตามลำดับ คือกุ้งก้ามกรามมีปริมาณการผลิต 31,838 ตัน คิดเป็นร้อยละ 7.5 ของปริมาณการผลิตทั้งหมด มีมูลค่า 7,907.20 ล้านบาท (ภาพที่ 2) ถึงแม้ปริมาณการผลิตกุ้งกร้ามกรามจะอยู่ในอันดับที่สาม แต่เมื่อพิจารณาถึงมูลค่าของผลผลิตต่อตัน กุ้งก้ามกรามอยู่ในลำดับที่ 1 มีมูลค่า 252,875 บาทต่อตัน (ภาพที่ 3) ราคาผลผลิตกุ้งก้ามกรามมีราคาค่อนข้างสูง โดยเฉพาะราคาขายส่งของกุ้งมีชีวิตในช่วงปี พ.ศ. 2561- 2563 ในตลาดไท ขนาด 20 ตัวต่อกิโลกรัม มีราคา 245-325 บาท กุ้งขนาด 15-16 ตัวต่อกิโลกรัม มีราคา 345-380 บาท และราคากุ้งมีชีวิตขนาดใหญ่ มีราคาถึง 420-450 บาทต่อกิโลกรัม (www.talaadthai.com) ดังนั้นจึงควรมีการพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เพื่อให้การเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขยายตัว และมีผลผลิตเพิ่มมากขึ้น เพื่อการบริโภคภายในประเทศ และการส่งออก จึงควรมีการส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเชิงวิชาการเพื่อส่งเสริมการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในด้านต่าง ๆ อย่างจริงจัง

จากข้อมูลเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่ากุ้งก้ามกรามเป็นกุ้งที่มีราคาสูง ซึ่งน่าจะจูงใจให้มีการขยายตัวในการเพาะเลี้ยงมากขึ้น แต่การเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในปัจจุบันเป็นการเพาะเลี้ยงในบ่อดิน ยังประสบปัญหาการเลี้ยงที่ใช้เวลานาน อัตราการรอดต่ำ กุ้งมีขนาดแตกต่างกันมาก และได้กุ้งขนาดใหญ่ที่มีราคาสูงในสัดส่วนที่น้อย นอกจากนี้การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามยังมีปัญหาและอุปสรรค อื่น ๆ ได้แก่ การขาดแคลนลูกพันธุ์กุ้งที่มีคุณภาพ ลูกพันธุ์กุ้งมีราคาสูง อาหารกุ้งมีราคาแพง และการขาดแคลนแรงงาน อีกทั้งพื้นที่การเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะอยู่ในเขตจังหวัดในภาคกลาง ได้แก่ จังหวัดราชบุรี สุพรรณบุรี และนครปฐม ได้มีข้อมูลจำนวนฟาร์มเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่ได้รับการรับรองมาตรฐานการปฏิบัติทางการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ดี (GAP) (GAP เดือนมีนาคม 2560) รายงานจำนวนฟาร์มเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่ได้รับมาตรฐาน GAP ร้อยละ 84.6 อยู่ที่จังหวัดนครปฐม ราชบุรี และสุพรรณบุรี และอีกร้อยละ 15.4 กระจายอยู่ตามจังหวัด กาฬสินธุ์ ฉะเชิงเทรา กาญจนบุรี สมุทรสาคร อุดรธานี พิษณุโลก เพชรบุรี สมุทรปราการ ชลบุรี ลพบุรี และสมุทรสงคราม (กองวิจัยและพัฒนาประมงน้ำจืด) ซึ่งจะเห็นได้ว่าพื้นที่ในจังหวัดเหล่านี้ จะมีการประมงหรือการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอื่น ๆ เกษตรกรรม และอุตสาหกรรม อื่น ๆ อยู่ด้วย จึงทำให้การขยายตัวการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเป็นไปได้ยาก ดังนั้นการวิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม จึงต้องการการพัฒนาระบบการเลี้ยงกุ้งทางเลือกแบบอื่น ๆ เช่นการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง (vertical shrimp farming) เป็นต้น

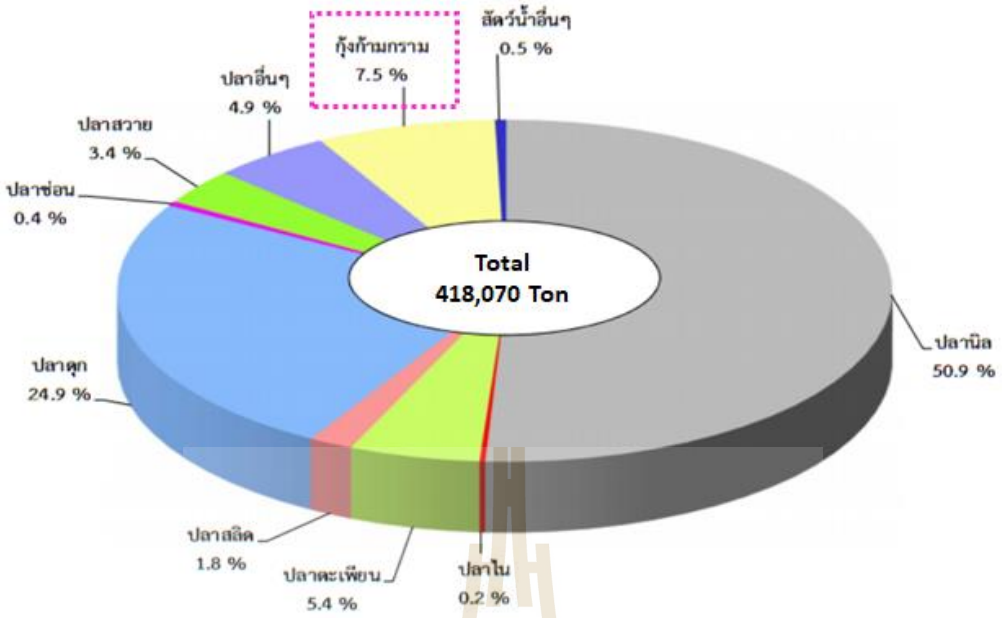


ภาพที่ 1 การผลิตกุ้งก้ามกรามทั่วโลก
(http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Macrobrachium_rosenbergii/en)

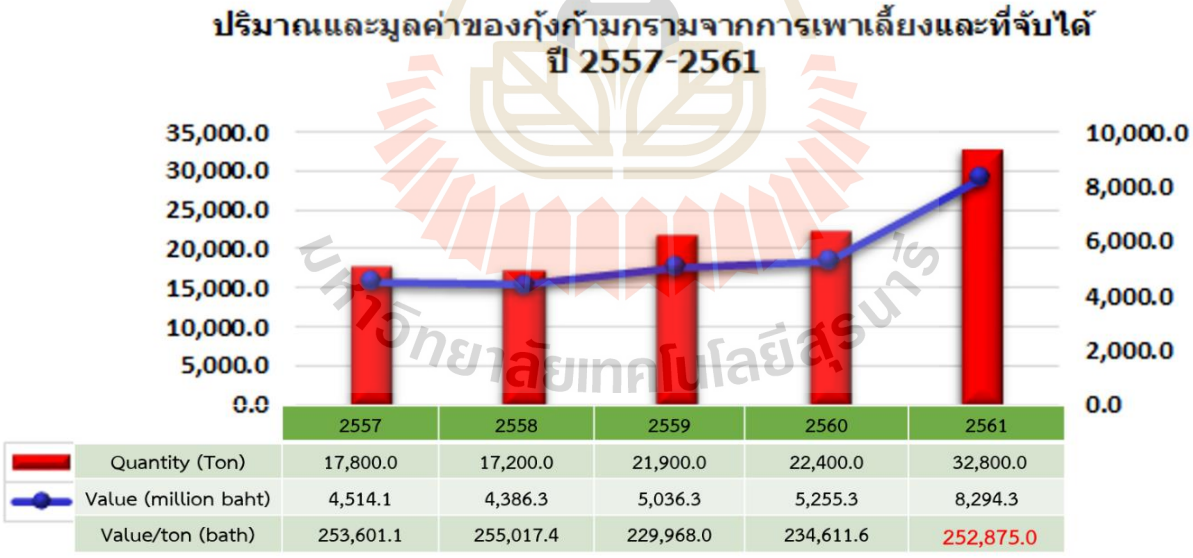
ตารางที่ 1 ปริมาณการผลิตและมูลค่าสัตว์น้ำจืดที่สำคัญทางเศรษฐกิจ ปี 2561

Species	Quantity (Ton)	Value (million baht)	Value/ton (bath)
ปลานิล	216,600.00	10,141.50	46,821.33
ปลาดุก	106,200.00	4,666.50	43,940.68
กุ้งก้ามกราม	31,838.00	7,907.20	248,357.31
ปลาตะเพียน	23,124.00	1,058.94	45,793.98
ปลาสวาย	14,257.00	399.63	28,030.44
ปลาสลิด	7,773.00	543.13	69,873.92
ปลากด	2,810.00	276.10	98,256.23
ปลาช่อน	1,810.00	142.43	78,690.61
กบ	1,795.00	124.42	69,314.76
ปลาอื่น ๆ	11,863.00	481.95	40,626.32
รวม	**418,070.00**	**25,741.80**	

ที่มา กลุ่มสถิติการประมง; www4.fisheries.go.th/strategy-stat)



ภาพที่ 2 ปริมาณการผลิตและมูลค่าสัตว์น้ำจืดที่สำคัญทางเศรษฐกิจ ปี 2561
(กลุ่มสถิติการประมง; www4.fisheries.go.th/strategy-stat)



	2557	2558	2559	2560	2561
Quantity (Ton)	17,800.0	17,200.0	21,900.0	22,400.0	32,800.0
Value (million baht)	4,514.1	4,386.3	5,036.3	5,255.3	8,294.3
Value/ton (bath)	253,601.1	255,017.4	229,968.0	234,611.6	252,875.0

ภาพที่ 3 ปริมาณและมูลค่ากุ้งก้ามกรามจากการพะเลี้ยงและที่จับได้ ปี 2557-2561
(กลุ่มสถิติการประมง; www4.fisheries.go.th/strategy-stat)

กุ้งก้ามกรามเป็นสัตว์ที่อาศัยอยู่ 2 น้ำ ในระยะวัยอ่อน กุ้งก้ามกรามต้องอาศัยในน้ำกร่อยที่มีความเค็มประมาณ 10-15 ส่วนในพันส่วน (parts per thousand) จนถึงอายุครบ 35 วัน จึงเจริญเติบโตเป็นกุ้งวัยรุ่น ที่มีรูปร่างลักษณะเหมือนพ่อแม่กุ้ง และจะเปลี่ยนไปอาศัยในน้ำจืด จากนั้นกุ้งจะใช้เวลาอีกประมาณ 4-5 เดือนจึงมีความสมบูรณ์พันธุ์ และใช้เป็นพ่อแม่พันธุ์กุ้ง การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในเชิงพาณิชย์ ใช้ระยะเวลา 8 – 10 เดือน โดยเกษตรกรนิยมปล่อยลูกกุ้งลงเลี้ยงในบ่อ โดยเกษตรกรนิยมใช้ลูกพันธุ์กุ้งก้ามกรามที่คว่ำ แล้วจากโรงเพาะฟักกุ้ง ที่อายุเฉลี่ย 30 – 35 วัน มีความยาวประมาณ 1 เซนติเมตร ซึ่งปรับให้อยู่ในน้ำจืดแล้ว แล้วจึงนำมาเลี้ยงในบ่อดินส่วนใหญ่เลี้ยงในรูปแบบการเลี้ยงด้วยอัตราความหนาแน่นมาก คือจะปล่อยเลี้ยงในอัตรา 150,000 – 200,000 ตัวต่อไร่ และอนุบาลเป็นระยะเวลา 2-3 เดือน จึงนำกุ้งมาเลี้ยงขุนเป็นกุ้งเนื้อ โดยการจับกุ้งจากบ่ออนุบาลขยายไปเลี้ยงบ่ออีก 1 บ่อ และทำการทยอยจับกุ้งที่ได้ขนาดขาย โดยในระหว่างการเลี้ยงกุ้งจะได้กุ้งขนาดต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน เช่น กุ้งใหญ่ขนาด 1 ซึ่งมีน้ำหนักประมาณ 100 กรัม (10 ตัว/กิโลกรัม) กุ้งรองขนาด 2 มีน้ำหนักประมาณ 70 กรัม (15 ตัว/กิโลกรัม) กุ้งเล็กขนาด 3 มีน้ำหนักประมาณ 50 กรัม (20 ตัว/กิโลกรัม) และราคาของกุ้งแต่ละขนาดแตกต่างกันมาก ถ้าการเลี้ยงกุ้งในแต่ละรอบได้กุ้งขนาด 3 จำนวนมาก จะทำให้ได้ผลผลิตต่ำ หรือมูลค่าของผลผลิตต่ำ ดังนั้น จึงควรมีระบบการเลี้ยงมานำเอากุ้งเล็กขนาด 3 ไปเลี้ยงต่อเพื่อให้ได้กุ้งขนาดใหญ่ ที่มีราคาสูงขึ้น ระบบการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้ง จึงควรนำไปพัฒนาเพื่อใช้ในการเลี้ยงกุ้งเล็กขนาด 3 ให้ได้กุ้งใหญ่ขนาด 1 เพื่อเพิ่มมูลค่าของผลผลิตกุ้งก้ามกรามต่อไป

ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในบ่อเลี้ยง อัตราความหนาแน่นของพันธุ์สัตว์น้ำ (stocking density) ที่ปล่อยลงเลี้ยงมีผลต่ออัตราการเจริญเติบโต (growth rate) น้ำหนักตัวสุดท้าย (final body weight) อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (Feed conversion ratio; FCR) อัตราการรอด (survival rate) และผลผลิต (biomass) ได้มีรายงานการศึกษาโดย Sookying และคณะ (2011) เปรียบเทียบอัตราความหนาแน่นของพันธุ์กุ้งขาวต่อสมรรถนะการเจริญเติบโต โดยเปรียบเทียบการเลี้ยงกุ้งขาวที่อัตราความหนาแน่น 17, 26, 35 และ 45 ตัว/m^2 เลี้ยงในบ่อขนาด 1,000 ตารางเมตร (m^2) เป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์ พบว่ากุ้งขาวที่เลี้ยงที่อัตราความหนาแน่นต่ำที่สุด คือ 17 ตัว/m^2 มีน้ำหนักตัวเฉลี่ย และน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยสูงที่สุด (25.3 กรัม) ในขณะที่กุ้งที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่นอื่น ๆ มีน้ำหนักตัวเฉลี่ย และน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่ำกว่า (20.7-22.0 กรัม) กุ้งที่เลี้ยงที่ความหนาแน่นต่ำ มีค่า FCR ต่ำที่สุด แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) อัตราการรอดของกุ้งทุกความหนาแน่นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) อย่างไรก็ตามพบว่ากุ้งขาวที่เลี้ยงที่ความหนาแน่นสูง (35 และ 45 ตัว/m^2) มีผลผลิตสูงกว่ากุ้งที่เลี้ยงที่ความหนาแน่นต่ำ (17 และ 26 ตัว/m^2) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) และพบว่าการเลี้ยงกุ้งที่ความหนาแน่นสูงส่งผลให้ได้ค่าตอบแทนต่อการเลี้ยงสูง (Sookying et al., 2011) ในการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม มีรายงานว่าอัตราความหนาแน่นของกุ้งที่เลี้ยง และ ขนาดบ่อมีผลต่อน้ำหนักตัวสุดท้ายของกุ้ง และสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของกุ้ง โดยอัตราความหนาแน่นของกุ้งที่เลี้ยงมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับน้ำหนักตัวสุดท้ายของกุ้ง และสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของกุ้ง (Ruiz-Velazco et al., 2010)

ในรายงานการศึกษาอัตราความหนาแน่นต่อการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม โดย Baysa และ Whangchai (2007) ทำการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 5 กรัม ในกระชังบ่อดินที่มีความหนาแน่น 25 ตัว/m^2 และ 50 ตัว/m^2 เป็นระยะเวลา 104 วัน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 25 ตัว/m^2 มี น้ำหนักกุ้งต่อตัว (34.85±1.73 กรัม), growth rate (0.19±0.01 กรัม), FCR (2.43), survival rate (34.27%) และผลผลิต (392.67±27.22 กิโลกรัม) สูงกว่ากุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่น 50 ตัว/m^2 สอดคล้องกับการศึกษาของ Ponce-Palafox และคณะ

(2018) ทำการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 12.1-13.5 กรัม ในกระชังบ่อดิน ขนาด 3x1x1 เมตร (ปริมาตรน้ำ 3 L) โดยทำการเลี้ยงที่ความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1 ตัว/m^3, 3 ตัว/m^3, 6 ตัว/m^3 และ 9 ตัว/m^3 เป็นระยะเวลา 152 วัน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 1 ตัว/m^3 มี growth rate (3.2±1.2 กรัมต่อสัปดาห์), SGR (1.2±0.1 %), FCR (1.4±0.1) และ survival rate (100±2.1 %) สูงที่สุด รองลงมาเป็นเป็นกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่น 3 ตัว/m^3, 6 ตัว/m^3 และ 9 ตัว/m^3 ตามลำดับ กุ้งก้ามกร้ามที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่น 9 ตัว/m^3 มี growth rate, SGR, FCR, survival rate และผลผลิตต่ำที่สุด นอกจากนี้การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่ความหนาแน่น 3 ตัว/m^3 มีผลผลิตสูงที่สุด (1921±122.2 kg/ha) เมื่อเทียบกับกุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่นอื่น ๆ (Ponce-Palafox et al., 2018) (ตารางที่ 2)

แต่อย่างไรก็ตามในรายงานการศึกษาการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามระยะ Juvenile (น้ำหนัก 0.2±0.001 กรัม) ในกระชัง (net cage) ขนาด 0.3x0.3x0.7 เมตร ที่วางในบ่อซีเมนต์ โดยมีความหนาแน่น 8 ตัว/m^3, 15 ตัว/m^3 และ 30 ตัว/m^3 เป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่นต่าง ๆ มี Final weight (1.22-1.55 กรัม), weight gain (0.96-1.34 กรัม), SGR (0.89-1.40 %) และ survival rate (26.67-45.83 %) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ นอกจากกุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่น 8 ตัว/m^3 มี FCR (7.60±1.15) ที่ต่ำที่สุด และ feed conversion efficiency (FER) (13.35±1.91) สูงที่สุด เมื่อเทียบกับกุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่นอื่น ๆ (Avillanosa et al., 2019) เช่นเดียวกับรายงานการศึกษาของ Negrini และคณะ (2017) ทำการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามระยะ Juvenile (น้ำหนัก 0.315±0.06 กรัม) ในแทงค์ทดลอง (experiment tank) ด้วยระบบ Biofloc ที่ความหนาแน่น 50 ตัว/m^2, 100 ตัว/m^2, 150 ตัว/m^2, 200 ตัว/m^2 และ 250 ตัว/m^2 เป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่นต่าง ๆ มี Final weight (2.22-2.54 กรัม), weight gain (1.83-2.23 กรัม) และ SGR (3.20-3.47 %) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ นอกจากนี้กุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่น 50 ตัว/m^2 มี survival rate (73±6%) ที่สูงที่สุด และ FCR (1.28±0.11) ที่ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับกุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่นอื่น ๆ อย่างไรก็ตามกุ้งก้ามกรามเลี้ยงที่ความหนาแน่น 250 ตัว/m^2 มีผลผลิต (33.28±1.17 กรัม) สูงที่สุด เมื่อเทียบกับกุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่นอื่น ๆ (ตารางที่ 2)

นอกจากนี้มีรายงานการศึกษาการอนุบาลลูกกุ้งก้ามกราม โดย Tapparangsee และคณะ (2013) ทำการศึกษาความหนาแน่นที่เหมาะสมต่อการอนุบาลลูกกุ้งก้ามกรามในระบบน้ำหมุนเวียนในบ่อดิน ที่ความหนาแน่น 120 ตัว/m^2, 240 ตัว/m^2 และ 360 ตัว/m^2 เป็นระยะเวลาทดลอง 30 วัน พบว่าระดับความหนาแน่นไม่มีผลต่อ growth rate และ survival rate ของกุ้งก้ามกรามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นอัตราความหนาแน่นที่ควรใช้ในการอนุบาลลูกกุ้งก้ามกรามคือ 360 ตัว/m^2 ซึ่งความหนาแน่นที่มากขึ้นจะเป็นการช่วยลดต้นทุนของระบบการอนุบาลในด้านอาหารที่ใช้ในการอนุบาล การจัดการระหว่างการเลี้ยง ซึ่งให้ผลขัดแย้งกับรายงานการศึกษาของ Marques และคณะ (2000) การอนุบาลกุ้งก้ามกรามในกระชังที่ระดับความหนาแน่น 100 ตัว/m^2, 200 ตัว/m^2, 300 ตัว/m^2, 400 ตัว/m^2, 600 ตัว/m^2 และ 800 ตัว/m^2 เป็นระยะเวลาทดลอง 60 วัน พบว่า final weight, weight gain ของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงหนาแน่น 100 ตัว/m^2 และ 200 ตัว/m^2 สูงกว่าที่ความหนาแน่น 800 ตัว/m^2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$ และ $P<0.01$ ตามลำดับ) แต่อย่างไรก็ตามกุ้งที่เลี้ยงที่ความหนาแน่น 400 ตัว/m^2, 600 ตัว/m^2 และ 800 ตัว/m^2 จะมีผลผลิตสูงกว่ากุ้งที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 100 ตัว/m^2 และ 200 ตัว/m^2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) นอกจากนี้อัตราการรอดของลูกกุ้งก้ามกรามที่อนุบาลด้วยความหนาแน่นต่าง ๆ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ตารางที่ 2) จากรายงานการศึกษาการเจริญเติบโต

ของกุ้งก้ามกรามจะลดลงเมื่อมีการเลี้ยงที่มีความหนาแน่นที่สูงขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าพื้นที่ต่อตัวมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม อีกทั้งกุ้งก้ามกรามมีพฤติกรรมหวงถิ่นจึงมีการต่อสู้และกินกันเอง (Baysa and Whangchai, 2007) จึงมีผลต่ออัตราการรอดของกุ้งก้ามกราม แต่อย่างไรก็ตามการเลี้ยงกุ้งอัตราความหนาแน่นสูงมีปริมาณผลผลิตที่สูงกว่าการเลี้ยงกุ้งที่ความหนาแน่นต่ำ

นอกจากนี้ได้มีรายงานการศึกษาอัตราความหนาแน่นต่อสัดส่วนของกุ้งก้ามกราม ที่ถูกเลี้ยงในร่องสวนมะพร้าว (coconut garden channel) โดยมีความหนาแน่นดังนี้ 5,000 ตัว/ไร่, 10,000 ตัว/ไร่, 15,000 ตัว/ไร่ และ 25,000 ตัว/ไร่ เป็นระยะเวลา 8 เดือน พบว่าการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่ความหนาแน่นต่ำ (5,000 ตัว/ไร่) มีการเจริญเติบโต โดยมีน้ำหนักตัวเฉลี่ย 101.65 กรัม น้ำหนักตัวเพศผู้ 128.6 กรัม และเพศเมีย 68.2 กรัม ซึ่งมีค่าสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการเลี้ยงกุ้งที่ความหนาแน่นอื่น ๆ ซึ่งมีการเจริญเติบโต (55.48-87.73 กรัม) น้ำหนักตัวเพศผู้ 85.3-105.2 กรัม และเพศเมีย 42.8-52.5 กรัม ที่ความหนาแน่นต่ำ 5,000 ตัว/ไร่ มีอัตราการรอดชีวิต (69.44 %) สูงที่สุด ในขณะที่อัตราความหนาแน่นอื่น ๆ มีอัตราการรอดชีวิต (28.21-54.52 %) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของการเลี้ยงเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้การเจริญเติบโตและอัตราการรอดของกุ้งก้ามกรามลดลงด้วย (Ranjeet et al., 2011) แต่อย่างไรก็ตามการเลี้ยงที่ความหนาแน่น 25,000 ตัว/ไร่ มีผลผลิตสูงที่สุด (199.7 กิโลกรัม/ไร่) ในขณะที่ความหนาแน่นต่ำ 5,000 ตัว/ไร่ มีผลผลิตน้อยที่สุด (90.1 กิโลกรัม/ไร่) แต่เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนของกุ้งก้ามกรามที่ไม่ได้ขนาดตามที่ตลาดต้องการ (ตกเกรด) พบว่า เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกุ้งที่ตกเกรดจะมีจำนวนเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความหนาแน่นในการเลี้ยง (ภาพที่ 4) ซึ่งในการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่ความหนาแน่นต่ำ 5,000 ตัว/ไร่ จะมีสัดส่วนของกุ้งที่มีน้ำหนักที่เป็นที่ต้องการของตลาด (กลุ่มน้ำหนัก>120 กรัม) มี 44 % และมีเปอร์เซ็นต์ของกุ้งตกเกรด (กลุ่มน้ำหนัก<50 กรัม) อยู่ในระดับต่ำมี 6% ในทางตรงกันข้ามกลุ่มที่มีการเลี้ยงที่ความหนาแน่น 25,000 ตัว/ไร่ มีเปอร์เซ็นต์ของกุ้งตกเกรดเพิ่มขึ้นถึง 22% การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่ความหนาแน่น 10,000 ตัว/ไร่ และ 15,000 ตัว/ไร่ มีกุ้งก้ามกรามที่มีน้ำหนักมากกว่า 120 กรัม อยู่ในระดับปานกลาง ประมาณ 29% และมีกุ้งกลุ่มที่มีน้ำหนัก 50–80 กรัม อยู่ที่ 40 % จากการรายงานการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเลี้ยงกุ้งที่ความหนาแน่นต่ำ (5,000 ตัว/ไร่) จะมีกุ้งที่มีขนาดที่ตลาดต้องการ (>50 กรัม) ถึง 94% ในขณะที่การเลี้ยงกุ้งที่ความหนาแน่นสูง (25,000 ตัว/ไร่) มีเพียง 78% เท่านั้นที่เป็นกุ้งที่มีน้ำหนักตามตลาดต้องการ (Ranjeet et al., 2011)

ดังนั้นอัตราความหนาแน่นของการปล่อยลูกพันธุ์สัตว์น้ำลงเลี้ยง มีผลต่อสมรรถนะการเจริญเติบโต และผลตอบแทนต่อการเลี้ยง การเลี้ยงสัตว์น้ำจึงต้องมีการศึกษาระดับความหนาแน่นของสัตว์น้ำ หรือพื้นที่ต่อตัวที่เหมาะสม ดังนั้นการพัฒนาการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามด้วยระบบเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้งนี้ จึงควรมีการศึกษาความเหมาะสมของขนาดห้องเลี้ยง เพื่อที่จะได้พัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงที่เหมาะสมต่อไป

ตารางที่ 2 ผลของความหนาแน่นในการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามต่อการเจริญเติบโต อัตรารอดชีวิตและผลผลิต (Biomass)

Stock density	Size of shrimp (g)	Condition	Duration (day)	Result	Reference
25 ตัว/m^2 50 ตัว/m^2	5	กระชังบ่อดิน	104	-ที่ความหนาแน่น 25 ตัว/m^2 มี น้ำหนักกุ้งต่อตัว, growth rate, FCR, survival rate และผลผลิตสูงกว่ากุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่น 50 ตัว/m^2	Baysa and Whangchai, 2007
1 ตัว/m^3 3 ตัว/m^3 6 ตัว/m^3 9 ตัว/m^3	12.1-13.5	กระชังบ่อดิน	152	-ที่ความหนาแน่น 1 ตัว/m^3 มี growth rate, SGR, FCR และ survival rate สูงที่สุด รองลงมาเป็น 3,6,9 ตัว/m^3 ตามลำดับ -ที่ความหนาแน่น 9 ตัว/m^3 มี growth rate, SGR, FCR, survival rate และผลผลิตต่ำที่สุด -ที่ความหนาแน่น 3 ตัว/m^3 มีผลผลิตสูงที่สุด (1921±122.2 kg/ha) เมื่อเทียบกับกุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่นอื่น ๆ	Ponce-Palafox et al., 2018
8 ตัว/m^3 15 ตัว/m^3 30 ตัว/m^3	0.2±0.001	กระชัง (net cage) ในบ่อซีเมนต์	60	- Final weight, weight gain, SGR และ survival rate ของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงความหนาแน่นต่าง ๆ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ -ที่ความหนาแน่น 8 ตัว/m^3 มี FCR (7.60±1.15) ที่ต่ำที่สุด และ FCE (13.35±1.91) สูงที่สุด เมื่อเทียบกับกุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่นอื่น ๆ	Avillanosa et al., 2019
50 ตัว/m^2 100 ตัว/m^2 150 ตัว/m^2 200 ตัว/m^2 250 ตัว/m^2	0.315±0.06	แทงค์ทดลอง (Experiment tank)	60	- Final weight, weight gain และ SGR ของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงความหนาแน่นต่าง ๆ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ -ที่ความหนาแน่น 50 ตัว/m^2 มี survival rate (73±6) ที่สูงที่สุด และ FCR (1.28±0.11) ที่ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับกุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่นอื่น ๆ -ที่ความหนาแน่น 250 ตัว/m^2 มีผลผลิตสูงที่สุด เมื่อเทียบกับกุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่นอื่น ๆ	Negrini et al., 2017

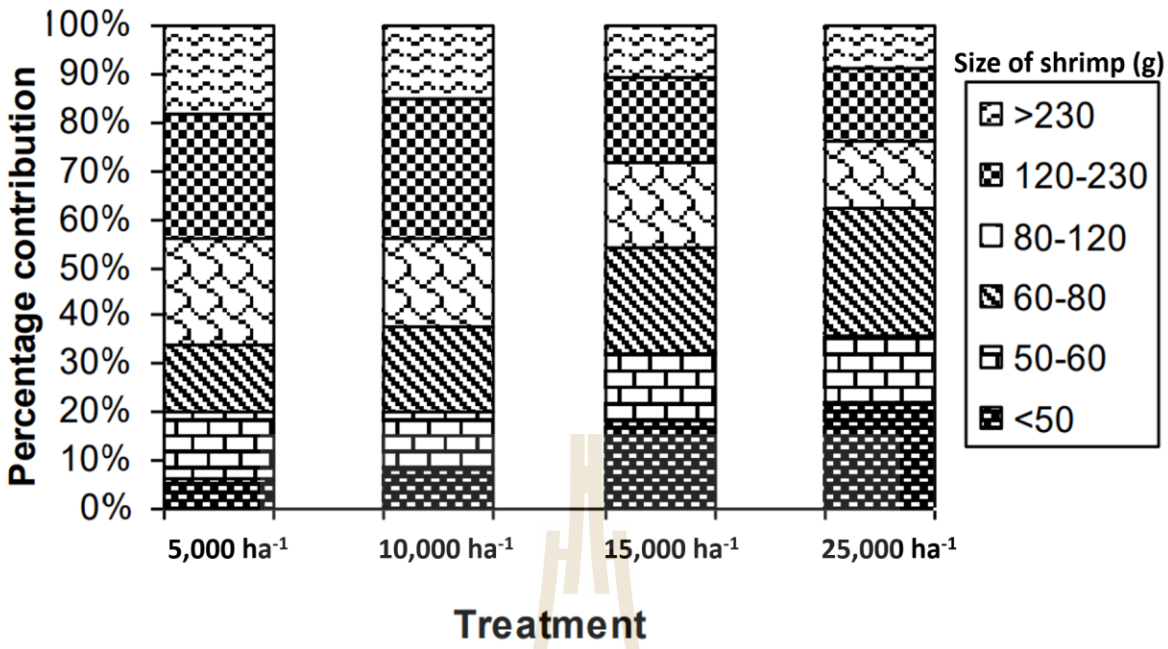
หมายเหตุ SGR = Specific growth rate, FCR = Feed conversion ratio, FCE = Feed conversion efficiency

ตารางที่ 2 ผลของความหนาแน่นในการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามต่อการเจริญเติบโต อัตรารอดชีวิตและผลผลิต (Biomass) (ต่อเนื่อง)

Stock density	Size of shrimp (g)	Condition	Duration (day)	Result	Reference
120 ตัว/m^2 240 ตัว/m^2 360 ตัว/m^2	0.044±0.052	บ่อดิน	30	- growth rate และ survival rate ของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงความหนาแน่นต่าง ๆ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ	Tapparangsee et al., 2013
100 ตัว/m^2 200 ตัว/m^2 300 ตัว/m^2 400 ตัว/m^2 600 ตัว/m^2 800 ตัว/m^2	0.053±0.009	บ่อดิน	60	- Final weight, Average weight gain ของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงหนาแน่น 100 ตัว/m^2 และ 200 ตัว/m^2 สูงกว่าที่ความหนาแน่น 800 ตัว/m^2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$ และ $P<0.01$ ตามลำดับ) -ที่ความหนาแน่น 400 ตัว/m^2, 600 ตัว/m^2 และ 800 ตัว/m^2 มีผลผลิตสูงกว่าที่ความหนาแน่น 100 ตัว/m^2 และ 200 ตัว/m^2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) -อัตราการรอดของลูกกุ้งก้ามกรามที่อนุบาลด้วยความหนาแน่นต่าง ๆ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ	Marques et al., 2000

หมายเหตุ SGR = Specific growth rate, FCR = Feed conversion ratio, FCE = Feed conversion efficiency

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาพที่ 4 รูปแบบการกระจายน้ำหนักของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงด้วยความหนาแน่นทั้ง 4 ระดับ (Ranjeet et al., 2011)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คุณภาพน้ำในการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามถือเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งต่อการเจริญเติบโต และให้ผลผลิต ดังนั้นผู้เลี้ยงจะต้องทำการควบคุมคุณภาพน้ำให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม ได้แก่ อุณหภูมิน้ำที่เหมาะสมแก่การเลี้ยงกุ้งควรอยู่ระหว่าง 28 - 32 องศาเซลเซียส ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สัตว์น้ำสามารถทนได้ คือ 0.2 องศาเซลเซียสต่อนาที และไม่ควรเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรวมเกินช่วง 2 - 4 องศาเซลเซียส (ณัฐพงศ์, 2562) ค่าพีเอชของน้ำมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของกุ้งก้ามกราม เนื่องจากพีเอชมีผลต่อคุณสมบัติของน้ำตัวอื่น ๆ อีก เช่นมีผลต่อความเป็นพิษของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นต้น พีเอชของน้ำที่เหมาะสมแก่การเลี้ยงกุ้งควรอยู่ระหว่าง 7.5-8.5 (ตารางที่ 3) และความแตกต่างของพีเอชในรอบวันไม่ควรมากกว่า 0.5 ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved oxygen: DO) มีผลต่อการกินอาหาร การเจริญเติบโตและสุขภาพกุ้ง ถ้าปริมาณออกซิเจนต่ำเกินไปอาจมีผลทำให้กุ้งตายได้ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำจะเปลี่ยนแปลงคล้ายกับพีเอชคือมีค่าต่ำสุดตอนเช้ามืด เนื่องจากใช้ไปในการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์และการหายใจของสิ่งมีชีวิตในน้ำและบ่อ ในตอนกลางวันเมื่อมีแสงแดดแพลงก์ตอนพืชเริ่มมีการสังเคราะห์แสง ปริมาณออกซิเจนจะเพิ่มขึ้นและจะมีปริมาณสูงสุดในตอนบ่าย ความสามารถในการละลายของออกซิเจนในน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเค็ม น้ำที่มีความเค็มและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นออกซิเจนละลายได้น้อยลง เช่นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จุดอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำจืดเท่ากับ 7.54 ppm (มิลลิกรัมต่อลิตร, mg/L) ค่าออกซิเจนละลายในน้ำที่เหมาะสมแก่การเลี้ยงกุ้งควรมากกว่า 5 mg/L (ตารางที่ 3)

ค่าความเป็นด่าง (alkalinity) ความเป็นด่างคือความสามารถในการรับโปรตอนหรือไฮโดรเจนอิออนของน้ำแล้วทำให้น้ำจากสภาพกรดเป็นกลาง ดังนั้นค่าความเป็นด่างจึงเป็นตัวต้านการเปลี่ยนแปลง pH ควบคุมให้น้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลง pH มาก (buffering capacity) ค่าความเป็นด่างได้จากการใส่ปูนที่มีองค์ประกอบของ ไบคาร์บอเนต (HCO_3^{2-}) คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ซึ่งค่าความเป็นด่างของน้ำมีความสำคัญมากในการเพาะเลี้ยงกุ้ง โดยมีความสัมพันธ์กับอัตรารอดและการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามและกุ้งทุกชนิด ค่าอัลคาไลน์ที่เหมาะสมกับการเลี้ยงกุ้งอยู่ระหว่าง 100-150 mg/L (ตารางที่ 3)

ค่าแอมโมเนียและไนไตรท์ เป็นสารประกอบไนโตรเจนที่เป็นพิษต่อกุ้งและสัตว์น้ำ แหล่งของสารประกอบไนโตรเจนในน้ำส่วนใหญ่มาจากสารอินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่มาจากกระบวนการเน่าสลายของเศษอาหารที่เหลือ แพลงก์ตอนที่ตาย เศษซากพืชซากสัตว์ และสารอินทรีย์อื่น ๆ โดยจุลินทรีย์ แล้วปล่อยแอมโมเนียออกมาสู่แหล่งน้ำโดยตรงเช่นกัน ในสภาวะที่มีออกซิเจนแบคทีเรียจำพวก Nitrifying bacteria จะเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนไตรท์และไนเตรทตามลำดับ

แอมโมเนีย เป็นสารประกอบไนโตรเจนที่เป็นพิษต่อกุ้งและสัตว์น้ำอื่น ๆ ยกเว้นแพลงก์ตอนพืชและแบคทีเรียที่ใช้แอมโมเนียเป็นอาหาร แอมโมเนียที่พบอยู่ในน้ำจะอยู่ในสองรูปแบบ คือ แอมโมเนีย (NH_3) ซึ่งเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ และ แอมโมเนียมอิออน (NH_4^+) ซึ่งไม่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ในการวัดแอมโมเนียโดยทั่วไปจะวัดรวมทั้งสองรูป แอมโมเนียทั้งสองรูปแบบนี้จะเปลี่ยนกลับไปกลับมาตามพีเอชของน้ำและอุณหภูมิของน้ำโดยเฉพาะพีเอชของน้ำที่สูงขึ้นอัตราส่วนของแอมโมเนีย (NH_3) จะสูงขึ้น ทำให้ความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมีมากขึ้น แต่ถ้าพีเอชของน้ำลดลง แอมโมเนียในรูปแอมโมเนียมอิออนจะมีในอัตราส่วนที่มากขึ้น ทำให้ความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำลดลง เมื่อแอมโมเนียในน้ำปริมาณสูงขึ้น จะมีผลให้การขับถ่ายแอมโมเนียของกุ้งทำได้น้อยลงทำให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียในเลือดและเนื้อเยื่อ ส่งผลให้พีเอชของเลือดเพิ่มขึ้นและมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ แอมโมเนียจะทำให้การใช้ออกซิเจนของเนื้อเยื่อสูงขึ้น แอมโมเนียจะไปทำลายเหงือกและความสามารถในการขนส่งออกซิเจน และทำให้กุ้งอ่อนแอเกิดการติดเชื้อโรคได้ง่าย ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ทำให้กุ้งโตช้ายอยู่ในช่วง 0.1-0.4 mg/L หากระดับแอมโมเนียมากกว่า 0.4 กุ้งจะโตช้า

กินอาหารน้อยลงเครียดหรือตาย ซึ่งระดับแอมโมเนียที่ปลอดภัยต่อการเลี้ยงกุ้งควรน้อยกว่า 0.1 mg/L (ตารางที่ 3)

ไนไตรท์ เกิดจากการที่แบคทีเรียในกลุ่ม Nitriflying เช่น *Nitrosomonas spp*. ใช้แอมโมเนียเป็นอาหาร และเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรท์ ส่วน *Nitrobacter* spp. จะเปลี่ยนไนไตรท์เป็นไนเตรทซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า Nitrification ความเป็นพิษของไนไตรท์ต่อสัตว์น้ำเกิดจากการที่ไนไตรท์ไปออกซิไดซ์เหล็ก ซึ่งเป็นองค์ประกอบของฮีโมโกลบิน ทำให้กลายเป็นเมทธีโมโกลบิน ซึ่งไม่สามารถขนถ่ายออกซิเจนได้ ทำให้เกิดการตายเนื่องจากการขาดออกซิเจนในสัตว์ประเภทพวกกุ้งและปูมีเลือดสีน้ำเงิน ซึ่งมีฮีโมไซยานิน ระดับความเป็นพิษของไนไตรท์จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำ และค่าพีเอชน้ำลดลง ซึ่งค่าไนไตรท์ในระดับที่กุ้งสามารถมีการเจริญเติบโตได้เป็นปกติ คือ ที่ระดับน้อยกว่า 0.5 mg/L (ตารางที่ 3)

ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) จะแปรผันตรงกับค่า total dissolved solid เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณอิออนที่ละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าเกลือแร่ที่ละลายอยู่ในน้ำ สารละลายเกลือมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำจืด สัตว์น้ำจืดโดยทั่วไปสามารถดำรงชีวิตได้ในน้ำที่มีค่าการนำไฟฟ้าค่อนข้างกว้าง คือ 30-5,000 µSiemens/cm ซึ่งน้ำที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งน้ำจืด (ตารางที่ 3)

แร่ธาตุมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโตของกุ้ง ได้แก่ แคลเซียม มีความสำคัญต่อการสร้างเปลือก ความสมดุลกรดด่างภายในร่างกาย ความต่างศักย์ของเนื้อเยื่อ การแข็งตัวของเลือด การหดตัวของกล้ามเนื้อ และการดูดซับวิตามิน บี12 กุ้งสามารถดูดซึมแคลเซียมจากน้ำ อาจจะพบการดูดซึมทั้งหมดหรือบางส่วนจากน้ำ จึงไม่จำเป็นต้องเสริมแคลเซียมในอาหารเลี้ยงกุ้งขาว หากต้องการเพิ่มแคลเซียมในน้ำสามารถเลือกใช้ปูนขาว (แคลเซียมคาร์บอเนต) แคลเซียมคลอไรด์ หรือแคลเซียมซัลเฟต (ยิบซั่ม)ได้ ซึ่งระดับแคลเซียมที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงกุ้งควรอยู่ระหว่าง 390-450 mg/L (ตารางที่ 3)

แมกนีเซียม มีความสำคัญต่อกุ้งในแง่เป็นตัวที่ช่วยปรับสมดุลเกลือแร่ภายในร่างกาย ความต่างศักย์ของเนื้อเยื่อ การสร้างเปลือก และการทำงานของเอนไซม์หลายชนิด เป็นแร่ธาตุที่พบปริมาณสูงในน้ำทะเล (1,350 mg/l) หากต้องการเพิ่มแมกนีเซียมในน้ำ แนะนำให้ใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ จะได้ประโยชน์มากกว่าแมกนีเซียมซัลเฟต (ดีเกลือ) กุ้งจะใช้แมกนีเซียมได้อย่างมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อมีสัดส่วนที่สมดุลกับแคลเซียม คือ อัตราส่วน แมกนีเซียม 3 ส่วน ต่อแคลเซียม 1ส่วน ซึ่งระดับแมกนีเซียมที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงกุ้งควรอยู่ระหว่าง 1200-1300 mg/L (ตารางที่ 3) ดังนั้นการควบคุมปริมาณแร่ธาตุให้มีความเหมาะสมจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากแร่ธาตุมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิต และการเจริญเติบโตได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงสัดส่วนของแร่ธาตุด้วย ส่งผลต่อการเจริญเติบโต ความถี่ของการลอกคราบของกุ้งก้ามกราม

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของน้ำที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม

ตัวชี้วัดคุณภาพน้ำ	**ระดับ**
อุณหภูมิน้ำ	28 - 32 องศาเซลเซียส
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	7.0 - 8.5
ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO)	มากกว่า 5 mg/L
ความเป็นด่าง (Alkalinity)	100 - 150 mg/L
ค่าความเค็ม (Salinity)	น้อยกว่า 10 ppt
ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC)	30-5,000 µSiemens/cm
ความกระด้าง (Hardness)	60-120 mg/L
ปริมาณแอมโมเนียรวม (Total ammonia)	น้อยกว่า 0.1 mg/L
ปริมาณไนไตรท์ (Nitrite, NO_2)	น้อยกว่า 0.5 mg/L
ปริมาณไนเตรท (Nitrate, NO_3)	ไม่ควรเกิน 3 mg/L
ปริมาณแคลเซียม ($CaCO_3$)	390-450 mg/L
ปริมาณแมกนีเซียม ($MgCO_3$)	1200-1300 mg/L

ที่มา: ณัฐพงศ์ (2562)

หากคุณภาพน้ำที่ใช้เลี้ยงกุ้งก้ามกรามมีความไม่เหมาะสมจะส่งผลให้กุ้งก้ามกรามเกิดความเครียดมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำลง และมีอัตราการรอดชีวิตที่ต่ำ จากสภาพการณ์น้ำทำให้เกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งก้ามกรามต้องทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำบ่อย ๆ โดยการถ่ายน้ำในบ่อออกและนำน้ำใหม่เข้ามาสู่ในบ่อที่ทำการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเพื่อทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น แต่ถ้าหากว่าเป็นช่วงฤดูแล้งหรือน้ำในแหล่งน้ำสาธารณะมีปริมาณน้อยหรือมีคุณภาพไม่เหมาะสมก็จะทำให้เกษตรกรไม่สามารถทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำได้ซึ่งส่งผลเสียต่อผลผลิตกุ้งก้ามกราม จากเหตุการณ์ดังกล่าวส่งผลกระทบอย่างมากต่อเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งก้ามกรามในเรื่องของการจัดการคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกษตรกรไม่สามารถเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการวิจัยพัฒนาเพื่อให้ได้ระบบการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดหรือระบบการเลี้ยงที่นำน้ำกลับมาใช้ใหม่เพื่อเป็นแนวทางการจัดการการใช้ทรัพยกรน้ำของประเทศไทยที่มีน้อยลงทุกวันให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการเพาะสัตว์น้ำเพื่อให้เกิดการใช้น้ำอย่างคุ้มค่า

ระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด (Aquaculture System; RAS)

การเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามของเกษตรกรนิยมเลี้ยงในบ่อดิน ซึ่งมีการใช้พื้นที่และน้ำในปริมาณมาก ซึ่งถือได้ว่าเป็นข้อจำกัดประการหนึ่งสำหรับการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เนื่องจากในปัจจุบันปริมาณน้ำมีอยู่อย่างจำกัดสำหรับใช้เพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ อีกทั้งคุณภาพน้ำที่ไม่คงที่และความเสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคสูง ซึ่งนำไปสู่ผลผลิตกุ้งที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ ดังนั้นในปัจจุบันได้มีรายงานศึกษาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยใช้ระบบหมุนเวียนแบบปิด (Aquaculture System; RAS) ช่วยให้การผลิตกุ้งมีความยืดหยุ่น สามารถคาดการณ์ผลผลิตได้ สะอาดถูกสุขอนามัย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถเลี้ยงกุ้งที่ความหนาแน่นสูงได้ ซึ่งมีส่วนช่วยให้อุตสาหกรรมกุ้งมีความยั่งยืนมากขึ้น (Suantika et al., 2018) เทคโนโลยี RAS มีข้อได้เปรียบในการใช้ทรัพยากรน้ำอย่างมีประสิทธิภาพโดยส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการบำบัดน้ำโดยการหมุนเวียนน้ำตามส่วนประกอบ RAS นอกจากนี้ยังรวมถึงการกรองทางกายภาพและทางชีวภาพซึ่งสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากปริมาณสารอินทรีย์ในระบบสูงและยังลดความเสี่ยงของการติดเชื้อจากแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคซึ่งอาจมีอยู่ในน้ำที่ไม่ผ่านการบำบัดใหม่ (Suantika et al., 2018)

ของเสียที่เกิดขึ้นจากระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำส่วนใหญ่ คือ ของเสียที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบซึ่งมักจะพบอยู่ในรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ สารประกอบอินทรีในโตรเจน แอมโมเนีย (NH_3) ไนไตรท์ (NO_2) และ ไนเตรท (NO_3) ระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะมีการนำน้ำผ่านระบบบำบัดเพื่อลดปริมาณของเสีย จากนั้นจึงนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่ ทำให้ลดการปล่อยน้ำทิ้งออกจากระบบเลี้ยงซึ่งจะเป็นผลดีต่อสภาวะแวดล้อม (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2556) เช่น จากการศึกษาของ จริยา และ สุรินทร, 2556 ได้ทำการศึกษาการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในระบบ CAS (ระบบถ่ายเทน้ำจากภายนอก) และระบบ RAS ซึ่งเป็นระบบปิดด้วยระบบหมุนเวียนน้ำจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำแบบประดิษฐ์ พบว่าค่าอัตราการเจริญเติบโตต่อตัวต่อวัน ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และค่าน้ำหนักตัวและความยาวไม่แตกต่างกัน ซึ่งจากการศึกษายังพบว่าบ่อเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสมด้วยระบบ CAS และ RAS มีคุณภาพน้ำและอุณหภูมิ pH, BOD_5, TS และ TSS อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานในการเพาะเลี้ยงปลา ซึ่งให้ผลไม่แตกต่างกัน จากรายงานการศึกษาของ Khoda และคณะ (2011) พบว่าการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในถังเลี้ยง (Tank) ซึ่งใช้ระบบ recirculating aquaponic system (RAS) มีผลทำให้กุ้งมีการเจริญเติบโตเป็นปกติ หากกุ้งได้รับสารอาหารที่เพียงพอ (macro-micro nutrients) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าระบบ RAS มีความเป็นไปตามได้ที่สามารถใช้เพื่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม อีกทั้งระบบ RAS ยังมีผลทำให้ลดระดับแอมโมเนียและไนเตรทในระบบน้ำที่เลี้ยงกุ้งซึ่งเป็นการรักษาคุณภาพน้ำให้เหมาะสมในระหว่างช่วงการเลี้ยง

การศึกษาการใช้ระบบหมุนเวียนน้ำ (RAS) ต่อความหนาแน่นของการเลี้ยงกุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*) ในระยะวัยอ่อน (post larvae) ที่ระดับความหนาแน่นต่าง ๆ คือ 500 PL / m^3, 750 PL / m^3 และ 1,000 PL / m^3 เป็นระยะเวลา 84 วัน พบว่าคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเพาะเลี้ยงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ากุ้งขาวที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่นต่าง ๆ มีการเจริญเติบโตที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ได้แก่ final weight (14.87±0.24 g, 13.09±0.78g และ 11.32±0.71g), survival rate (70±1.42%, 53.67±4.16% และ 44±1.35%) , SGR (7.12% BW/day, 6.95% BW/day, 6.79% BW/day) และ FCR (1.32±0.09, 1.45±0.16, 2.05±0.24) ในกุ้งที่เลี้ยงความหนาแน่น 500 PL/m^3, 750 PL/m^3 และ 1,000 PL/m^3 ตามลำดับ ดังนั้นในการเลี้ยงกุ้งขาวโดยใช้ระบบ RAS ที่ความหนาแน่น 500 PL/m^3 มีการเจริญเติบโตของกุ้งที่สูงที่สุด (Suantika et al., 2018) เช่นเดียวกันกับ Tapparangsee และคณะ (2013) รายงานการอนุบาลลูกกุ้งก้ามกรามด้วย

ระบบ RAS ในบ่อดิน (บ่อดินมีพรรณไม้น้ำ ได้แก่บัวสาย และสาหร่ายหางกระรอก) ที่ระดับความหนาแน่น 120 ตัว/m^2, 240 ตัว/m^2 และ 360 ตัว/m^2 เป็นระยะเวลาทดลอง 30 วัน พบว่าค่าคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยคุณภาพน้ำเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง และที่ระดับความหนาแน่นไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อ SGR และ survival rate ซึ่งในระบบ RAS นี้มีพรรณไม้น้ำช่วยในการลดปริมาณสารประกอบไนโตรเจน เช่น แอมโมเนีย หรือไนเตรทได้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเพาะเลี้ยงกุ้งด้วยระบบ RAS สามารถควบคุมภาพน้ำให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งที่เลี้ยงในความหนาแน่นที่แตกต่างกันได้ แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาของ บุญล้ำ และเกศินี (2557) ที่ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตปลากดคลังระยะรุ่นโดยใช้น้ำหมุนเวียนในระบบโรงเรือนปิด พบว่าปลาที่เลี้ยงในบ่อดินมีประสิทธิภาพการเจริญเติบโตดีกว่าการเลี้ยงในระบบปิด ในส่วนของคุณภาพซากของปลากดคังที่เลี้ยงในระบบปิดและบ่อดินไม่พบความแตกต่างของค่าความสว่างของสีเนื้อ และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซากพบค่าโปรตีนและไขมันของเนื้อปลาที่เลี้ยงในบ่อดินมีค่าสูงกว่าปลาที่เลี้ยงในระบบปิดคือ เปอร์เซ็นต์โปรตีน 21.09 และ 18.34 เปอร์เซ็นต์ไขมัน 4.72 และ 3.59 ตามลาดับ ($P<0.05$)

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ในระบบหมุนเวียนน้ำโดยจากการศึกษาของ ชลฤทัย และคณะ (2554) ที่ศึกษาการเปรียบเทียบการเจริญเติบโต และคุณภาพในการเลี้ยงปลาบู่ทรายระบบหมุนเวียนที่ระดับความหนาแน่นต่าง ๆ โดยใช้วัสดุตัวกลางที่ต่างกันในการบำบัดน้ำ คือ ไบโอบอล, ตาข่ายพรางแสงและเนื้ออวน พบว่าการเลี้ยงที่ความหนาแน่น 14 ตัว/ตารางเมตร โดยใช้วัสดุตัวกลางตาข่ายพรางแสงมีอัตราการเจริญเติบโตสูงที่สุดเท่ากับ 0.31 กรัม/วัน เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุตัวกลางอื่น ๆ และจากการศึกษาของ สุฤทธิ์ และคณะ (2551) ที่ศึกษาวัสดุกรองทางชีวภาพ เพื่อใช้ในระบบการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมร่วมกับระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิคส์โดยเลี้ยงในระบบหมุนเวียนน้ำ จากบ่อเข้าสู่ระบบกำจัดตะกอนและระบบกรองชีวภาพใช้วัสดุกรองต่างชนิดกันคือ ชุดที่ 1 วัสดุกรองอิฐ ชุดที่ 2 วัสดุกรองถ่าน ชุดที่ 3 วัสดุกรองโฟม และ ชุดที่ 4 วัสดุกรองไม้ไผ่ ตามลำดับ พบว่าวัสดุกรองอิฐมีประสิทธิภาพในการกรองมากกว่าวัสดุชนิดอื่น ๆ โดยสรุปได้จากผลการเจริญเติบโต อัตรารอด ผลผลิตรวมปลาดุก และผักสลัด

การศึกษาการอนุบาลกุ้งก้ามกรามวัยอ่อนในระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) โดยการบำบัดน้ำทางชีวภาพ ด้วยสาหร่ายไก (*Cladophora sp.*) เปรียบเทียบกับการอนุบาลแบบเปิด เป็นระยะเวลา 25 วัน พบว่า survival rate ของลูกกุ้งในระบบน้ำหมุนเวียนมีค่าต่ำกว่าระบบเปิดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) แต่อัตราการคว่ำ (metamorphosing rate) เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนที่รอดไม่แตกต่างกัน ($P>0.05$) ค่าคุณภาพน้ำตลอดการเลี้ยง ได้แก่ ค่าแอมโมเนีย ไนไตรต์และไนเตรต ของทั้งสองระบบการเลี้ยงมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยระบบน้ำหมุนเวียนมีค่าเฉลี่ยแอมโมเนียต่ำกว่าระบบเปิด แต่มีค่าไนไตรต์และไนเตรตสูงกว่า ส่วนค่าคุณภาพน้ำอื่นไม่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามปริมาณโซเดียม คลอไรด์ และแมกนีเซียมในน้ำของทั้งสองระบบมีแนวโน้มลดลง และต่ำสุดในวันที่ 18 ของการทดลอง และมีผลทำให้กุ้งตายเพิ่มขึ้นในวันที่ 19 ของการอนุบาล แสดงให้เห็นว่าการใช้สาหร่ายไก เพื่อการบำบัดคุณภาพน้ำทางชีวภาพในการอนุบาลลูกกุ้งก้ามกรามวัยอ่อนในระบบน้ำหมุนเวียน ทำให้เกิดการสะสมของไนไตรต์และไนเตรทภายในระบบสูงขึ้น และปริมาณแอมโมเนียมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซับของสาหร่ายและการเกิดกระบวนการ Nitrification ที่ไม่สมบูรณ์ (กิ่งเทียน และคณะ 2554) นอกจากนี้ยังมีรายงานการศึกษาการใช้ Biofloc technology เพื่อประโยชน์การเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) เพื่อให้สามารถนำน้ำที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยทำการศึกษาในกุ้งก้ามกราม (*M. rosenbergii*) (น้ำหนักเริ่มต้น 0.315 ± 0.06 g) ที่เลี้ยงความหนาแน่นที่แตกต่างกัน (50, 100, 150, 200 และ 250 ตัว/m^2) เป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่าค่าคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเลี้ยงไม่มีความแตกต่างกัน อีกทั้งพบว่า ค่า Biomass ของกุ้งก้ามกรามเลี้ยงที่ความ

หนาแน่น 250 ตัว/m² มีค่าสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ (P <0.05) แต่อย่างไรก็ตามกุ้งที่เลี้ยงไว้ที่ความหนาแน่น 50 ตัว/m² มี survival rate (73%) สูงกว่า (P <0.05) และมีค่า FCR (1.28) ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ (P <0.05) เมื่อเปรียบเทียบกับกุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่นอื่น ๆ (Negrini et al., 2017) จากรายงานการศึกษามีการใช้ระบบ RAS ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างแพร่หลาย และมีการปรับองค์ประกอบภายในระบบ RAS เพื่อให้เกิดการบำบัดน้ำได้มีประสิทธิภาพและเหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำให้มากที่สุด ซึ่งคุณภาพน้ำในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง ดังนั้นจึงควรมีการพัฒนาระบบน้ำแบบหมุนเวียน และระบบการบำบัดน้ำเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่สำหรับการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้นเพื่อรองรับระบบการเลี้ยงในเชิงธุรกิจต่อไป

ในระบบการบำบัดน้ำทางชีวภาพมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539 จนกระทั่งในปัจจุบันประสบความสำเร็จ ในการนำน้ำเสียจากระบบเพาะฟักกลับมาหมุนเวียนใช้ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้ตลอดปี ทำให้สามารถพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้เป็นระบบปิด โดยไม่มีการปล่อยน้ำใช้แล้วลงสู่แหล่งน้ำในธรรมชาติ (ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงน้ำจืดชัยนาท, 2553) ซึ่งระบบการบำบัดน้ำทางชีวภาพประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. **บ่อพักน้ำใช้แล้ว**
2. **บ่อตกตะกอน** ซึ่งภายในประกอบด้วยการกรองทางกายภาพ มีหน้าที่ในการดักจับเศษตะกอน ฝุ่นผง เศษอาหาร ทำให้น้ำใสขึ้น วัสดุกรองประเภทนี้ได้แก่ ใยแก้ว และไบโอบอล ซึ่งไบโอบอล มีหน้าที่หลักในการกักเก็บเศษตะกอน เศษอาหารขนาดใหญ่, เพิ่มการกระจายน้ำในระบบกรองทำให้ออกซิเจนหมุนเวียนในระบบมากขึ้น และยังสามารถเป็นที่อยู่ของแบคทีเรีย ได้
3. **บ่อบำบัดน้ำทางชีวภาพ** ประกอบด้วย วัสดุกรองและตัวกลาง (ไบโอบอล) สำหรับให้จุลินทรีย์ได้ยึดเกาะ ซึ่งไบโอบอลจะเป็นที่อยู่ของพวก Nitrifying Bacteria หรือพวกแบคทีเรียที่เปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรท การบำบัดน้ำจะใช้กระบวนการทางกายภาพร่วมกับกระบวนการทางชีวภาพในการย่อยสลายของเสียที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยการใช้จุลินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำหรือเติมลงในระบบเพาะเลี้ยง เพื่อการบำบัดและย่อยสลายเศษอาหารที่เหลือ และของเสียที่กุ้งก้ามกรามขับออกมาในรูปแอมโมเนีย ซึ่งจุลินทรีย์จะเข้าไปย่อยสลายกลายเป็นไนไตรท์ และไนเตรท ต่อมาสารดังกล่าวจะถูกพืชน้ำดึงมาใช้เพื่อการเจริญเติบโต ซึ่งเป็นการดึงของเสียที่อยู่ในน้ำออก ทำให้ไม่เป็นอันตรายต่อกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบ และสามารถนำกลับมาหมุนเวียนใช้ในระบบเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามได้ และนอกจากนี้ในระบบยังประกอบไปด้วยเปลือกหอยนางรม ซึ่งมีคุณสมบัติในการเป็นที่อยู่อาศัยของแบคทีเรีย เนื่องจากเปลือกหอยมีลักษณะเป็นรูพรุนเล็ก ๆ จำนวนมาก มีคุณสมบัติเป็น pH buffer ช่วยให้ค่า pH ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และเปลือกหอยรางรมจะค่อย ๆ ปลดปล่อยสารประกอบจำพวกแคลเซียมออกมา ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการลอกคราบของกุ้งก้ามกราม
4. **บ่อพักน้ำดี** น้ำจากบ่อบำบัดจะไหลลงสู่บ่อพักน้ำดี จากนั้นจะถูกสูบกลับไปที่ระบบเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามต่อไป

การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามด้วยระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง อาจจำเป็นต้องพัฒนาอาหารและสูตรอาหารที่เหมาะสม ได้มีการศึกษาถึงระดับโปรตีนในอาหารกุ้ง ได้แก่ ระดับโปรตีนที่เหมาะสม (optimum protein level for growth) ในกุ้ง *Macrobrachium idea* มีระดับแตกต่างกันในกุ้งระยะการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน เช่น ในกุ้งขนาดเล็ก (น้ำหนักตัว 327.22 $\pm$ 60 มิลลิกรัม) ระดับโปรตีนในอาหารที่เหมาะสมคือ 40.46 เปอร์เซนต์ ในกุ้งขนาดกลาง (น้ำหนักตัว 1266.67 $\pm$ 98 มิลลิกรัม) ระดับโปรตีนในอาหารที่เหมาะสมคือ 38.27 เปอร์เซนต์ และ ในกุ้งขนาดใหญ่ (น้ำหนักตัว 2968.52 $\pm$ 13 มิลลิกรัม) ระดับโปรตีนในอาหารที่เหมาะสมคือ 36.43 เปอร์เซนต์ (Sundaravadivel et al., 2015) ระดับโปรตีนที่เหมาะสมในอาหารกุ้งขาวที่ระยะวัยรุ่น (น้ำหนักตัว 0.09 $\pm$ 0.002 กรัม) เท่ากับ 340 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร และไขมัน 75 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร อย่างไรก็ตาม ระดับโปรตีน 420 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร และไขมัน 75 กรัมต่อกิโลกรัมอาหารส่งผลให้กุ้งขาวมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงที่สุด (Hu et al., 2008) ระดับโปรตีนที่เหมาะสมในอาหารกุ้งขาว (น้ำหนักตัว 1.0 $\pm$ 0.1 กรัม) ที่เลี้ยงในระบบน้ำหมุนเวียนแบบ semi-recirculation system เท่ากับ 43.3 - 44 เปอร์เซ็นต์ (Yun et al., 2015) รายงานการวิจัยระดับโปรตีนที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตในกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบตู้กระจก เท่ากับ 30-45 เปอร์เซ็นต์ (Davassi, 2011) ระดับโปรตีนที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตในกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในบ่อซีเมนต์ เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ (Bhavani et al., 2014) ดังนั้นระดับโปรตีนในอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต อาจแตกต่างกันขึ้นกับระบบการเลี้ยง ระดับโปรตีนในอาหารที่ใช้เลี้ยงกุ้งในระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดในระบบการเลี้ยงแนวตั้งอาจแตกต่างจากอาหารที่ใช้ในระบบการเพาะเลี้ยงในบ่อดิน เนื่องจากในสภาพบ่อดินน้ำมีอาหารธรรมชาติ อาหารที่ให้เป็นอาหารสมทบ แต่ในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้งนั้น กุ้งจะได้รับอาหารและสารอาหารจากอาหารสมทบที่ให้เท่านั้น ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาวิจัยระดับโปรตีนในอาหารที่เหมาะสมให้กับการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระบบการเลี้ยงแบบแนวตั้ง

อีกทั้งในการผลิตกุ้งก้ามกรามมีต้นทุนที่เกี่ยวกับอาหารถึง 30% และต้นทุนที่สำคัญของอาหารกุ้งคือแหล่งโปรตีน คือปลาป่น ซึ่งเป็นแหล่งโปรตีนหลักในอาหารกุ้ง (Lucy, 2010) แต่การผลิตปลาป่นยังคงลดลงและตรงกันข้ามกับราคาปลาป่นที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาการทดแทนปลาป่นในอาหารกุ้งด้วยโปรตีนจากสัตว์ (ได้แก่ Meat and bone meal, Blood meal, และ insect meal) และโปรตีนจากพืช (ได้แก่ Soybean meal, peanut meal และ gluten meal) ซึ่งกากถั่วเหลือง (Soybean meal; SBM) เป็นที่นิยมใช้ในอาหารสัตว์ เช่น ปลา ไก่ สุกร และกุ้ง โดยกากถั่วเหลืองมีสารอาหารสูง เช่น โปรตีนสูงย่อยได้สูง และกรดอะมิโนจำเป็นสูง ซึ่งจากรายงานการศึกษามีการใช้กากถั่วเหลืองในอาหารของกุ้งขาว (*L. vannamei*) อยู่ที่ระดับ 25-75% of SBM ในอาหาร (Chavez *et al.*, 2016; Shao *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2017; Alvarez *et al.*, 2007; Van Nguyen *et al.*, 2018) และที่ระดับ 17.5% ของ SBM ในอาหารกุ้งกุลาดำ (*Peneaus monodon*) (Megahed, et al., 2018) ดังนั้นกากถั่วเหลืองจึงเป็นแหล่งโปรตีนที่น่าสนใจ แต่เนื่องจากการศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วย SBM ในอาหารกุ้งก้ามกรามยังมีอยู่น้อย ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาถึงระดับที่เหมาะสมของการทดแทนปลาป่นด้วย SBM ในอาหารของกุ้งก้ามกรามต่อการเจริญเติบโต และองค์ประกอบในร่างกายของกุ้งก้ามกราม

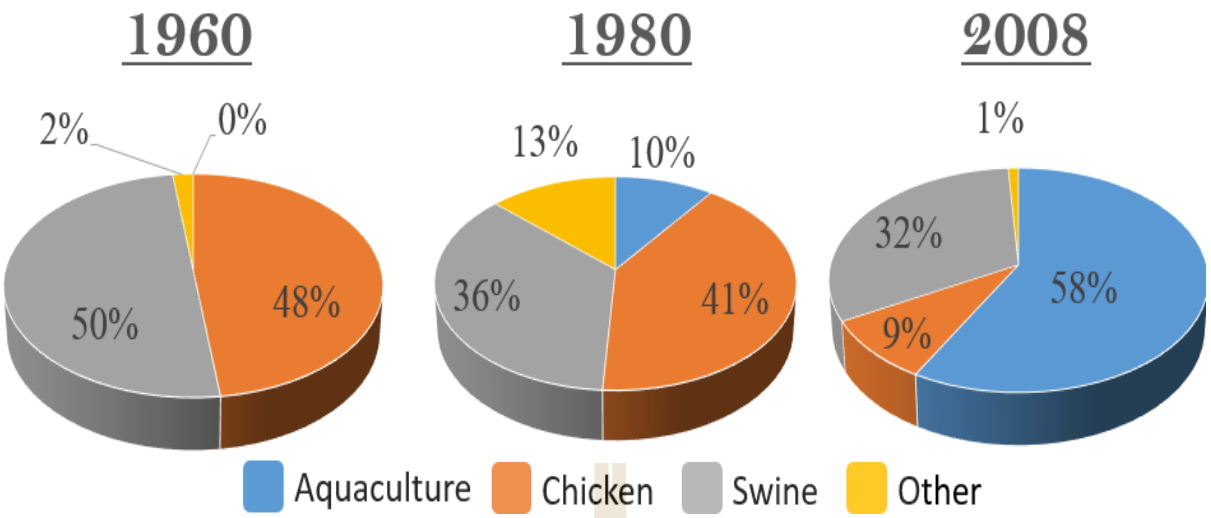
ปลาป่น มีโปรตีน 52.9-71.9% มีกรดอะมิโนจำเป็นอยู่ในระดับสูง ได้แก่ arginine, threonine, leucine, isoleucine, valine, tryptophan, lysine, histidine, phenylalanine และ methionine และย่อยได้ในระดับสูง นอกจากนี้ปลาป่นยังมีกรดไขมันจำเป็นในปริมาณสูง เช่น Eicosapentaenic acid (EPA; C20: 5n3), Docosacexaenoic (DHA; C22: 6n3) และ Polyunsaturated fatty acid (n3-PUFA, n6-PUFA) (FAO, 1997) ดังนั้นปลาป่นจึงเป็นแหล่งโปรตีนที่ดีสำหรับสัตว์น้ำและนิยม

ใช้เป็นแหล่งโปรตีนในอาหารสัตว์น้ำ ปัจจุบันได้มีการใช้ปลาป่นในอาหารสัตว์น้ำในปริมาณสูง เช่น อาหาร rainbow trout 45-62% of diet, อาหารปลา Atlantic salmon 52-60% of diet, อาหารกุ้งก้ามกราม 36-58% of diet, อาหารปลา catfish 25-57% of diet, อาหารปลา nile tilapia 20-50% of diet, อาหารกุ้งขาว 35-40% of diet และอาหารกุ้ง and 20-35% of diet และอาหารกุ้งกุลาดำ 20-35% of diet (ตารางที่ 4) ดังนั้นการใช้ปลาป่นเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งในปี 1960 ไม่มีรายงานการใช้ปลาป่น ต่อมาในปี 1980 มีการใช้ปลาป่นเพิ่มขึ้นเป็น 10% และเพิ่มขึ้นเป็น 58% ในปี 2008 ซึ่งตรงกันข้ามกับการใช้ปลาป่นในอาหารไก่และอาหารสุกรลดลง จากเดิมในปี 1960 มีการใช้ปลาป่นในอาหารไก่ 48% และอาหารสุกร 50% และลดลงในปี 1980 เหลือ 41% ในอาหารไก่ และ 36% ในอาหารสุกร นอกจากนี้การใช้ปลาป่นในปี 2008 ลดลงเหลือ 9% สำหรับอาหารไก่ และ 32% สำหรับอาหารสุกร (Banrie, 2012) (ภาพที่ 5) อย่างไรก็ตาม แนวโน้มการผลิตปลาป่นลดลง ตรงกันข้ามกับราคาปลาป่นเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 6) ดังนั้นการใช้ปลาป่นในอาหารสัตว์จึงไม่ยั่งยืน จำเป็นต้องค้นหาแหล่งโปรตีนทางเลือกอื่น ๆ เพื่อมาทดแทน

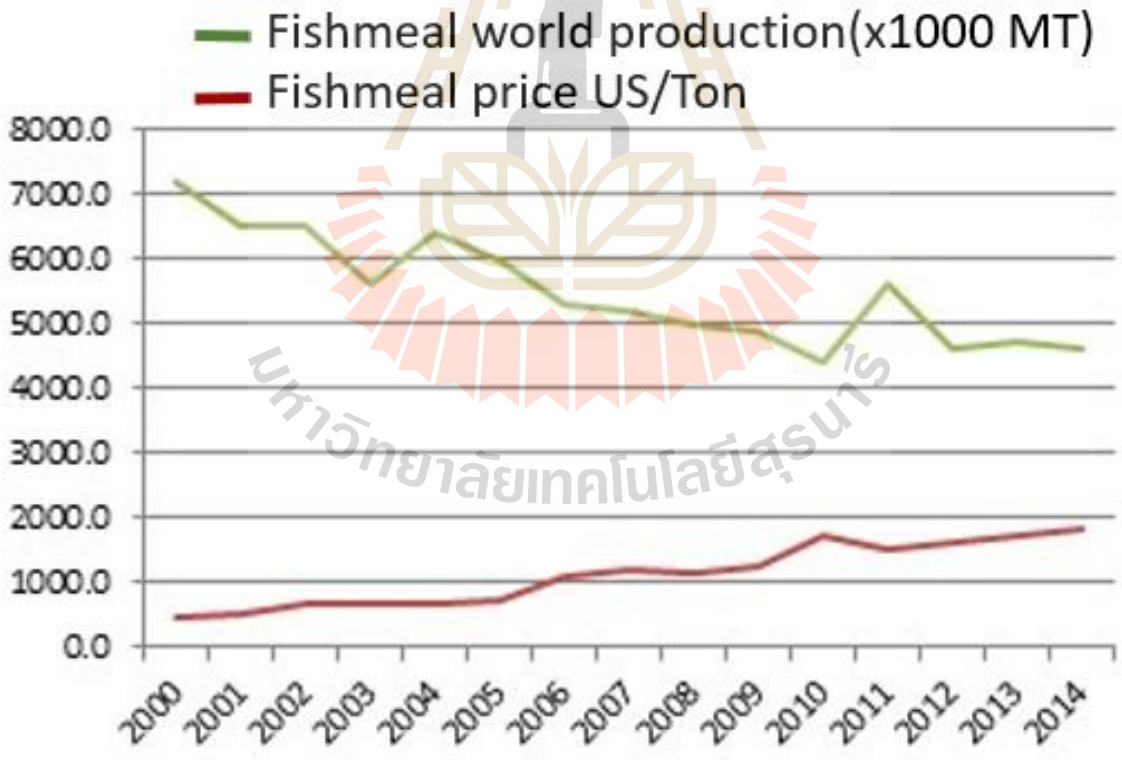
ตารางที่ 4 เปอร์เซ็นต์การใช้ปลาป่นในอาหารสัตว์น้ำ (Cruz, 1997)

Aquatic animal	% of fishmeal in diets
Rainbow trout	45-62
Atlantic salmon	52-60
Giant freshwater shrimp	36-58
Catfish	25-57
Nile Tilapia	20-50
White shrimp	35-40
Tiger shrimp	20-35

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาพที่ 5 การใช้ปลาป่นในอาหารสัตว์ (Banrie, 2012)



ภาพที่ 6 การผลิตปลาป่นและราคาของปลาป่น (FAO, 2015)

แหล่งโปรตีนทางเลือก (Alternative protein source)

ปลาป่นเป็นแหล่งโปรตีนที่สำคัญในอาหารสัตว์น้ำ แต่การผลิตปลาป่นลดลงอย่างต่อเนื่อง ตรงกันข้ามกับการผลิตสัตว์น้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นการค้นหาแหล่งโปรตีนทางเลือกสำหรับอาหารสัตว์น้ำจึงมีความสำคัญ โดยปกติแหล่งโปรตีนทางเลือกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ โปรตีนจากพืชและโปรตีนจากสัตว์ สำหรับโปรตีนจากพืชนิยมนำมาใช้ในอาหารสัตว์ เช่น กากถั่วเหลือง กากข้าวสาลี ข้าวโพด กลูเตนป่น ถั่วลิสง เป็นต้น สำหรับโปรตีนจากสัตว์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ Byproduct จากอุตสาหกรรม (เช่น feather meal, blood meal and meat และ bone meal) และโปรตีนจากสัตว์ (เช่น insect meal) อย่างไรก็ตาม การใช้แหล่งโปรตีนทดแทนสำหรับอาหารสัตว์น้ำมีสิ่งที่ต้องคำนึงถึง เช่น ความสามารถในการย่อยได้ต่ำ การขาดกรดอะมิโนที่จำเป็นบางชนิด และ/หรือ ความน่ารับประทานต่ำ ดังนั้นโปรตีนทางเลือกอาจใช้ในอาหารสัตว์น้ำสำหรับแหล่งโปรตีนบางส่วนเพื่อลดอาหารปลาป่นที่มีอยู่ในอาหารสัตว์น้ำ

แหล่งโปรตีนทางเลือกจากสัตว์

แหล่งโปรตีนจากสัตว์เป็น แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ Byproduct จากอุตสาหกรรม (เช่น feather meal, blood meal and meat และ bone meal) และโปรตีนจากสัตว์ (เช่น insect meal) สำหรับ Byproduct จากอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ จะมีโปรตีนในระดับสูง เช่น Hydrolysate feather meal มีโปรตีน 80.0-85.0%, meat and bone meal มีโปรตีนประมาณ 50.0% และ blood meal มีโปรตีนประมาณ 85.0% (ตารางที่ 5) แต่อย่างไรก็ตามแหล่งโปรตีนจากสัตว์มีกรดอะมิโนที่จำเป็นบางชนิดต่ำกว่าปลาป่น อาทิเช่น กรดอะมิโน lysine, histidine, isoleucine และ methionine (ตารางที่ 6) นอกจากนี้แหล่งโปรตีนจากสัตว์บางชนิดมีการใช้ประโยชน์ได้ต่ำ เช่น meat and bone meal มีไฟเบอร์สูง ซึ่งเป็นเอ็นและกระดูก ต่อมามีรายงานการศึกษาการใช้ insect meal เป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกสำหรับอาหารสัตว์ ได้แก่ mealworm, cricket, black soldier fly, house fly และ silk worm pupae ซึ่ง insect meal มีโปรตีนและไขมันสูง อาทิเช่น black soldier fly larvae มีโปรตีน 42.1-56.9% และไขมัน 11.8-26.0%, house fly มีโปรตีน 50.4-62.1% และไขมัน 18.9-23.3%, meal worm มีโปรตีน 52.8-82.6% และไขมัน 23.6-36.1%, cricket meal มีโปรตีน 59.8-69.0% และไขมัน 13.3-13.9% และ silk worm pupae มีโปรตีน 60.7-81.7% และไขมัน 24.9-25.1% (ตารางที่ 5) แต่ใน insect meal ส่วนใหญ่มีกรดอะมิโนที่จำเป็นบางชนิดอยู่ในระดับต่ำเมื่อเทียบกับปลาป่น (ตารางที่ 6) อีกทั้ง insect meal มีไฟเบอร์ (ไคติน) สูง และองค์ประกอบใน insect meal มีความผันแปรสูง ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะของแมลงและอาหารที่แมลงได้รับ ซึ่งถือได้ว่าเป็นข้อจำกัดในการใช้ insect meal ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์

แหล่งโปรตีนทางเลือกจากพืช

แหล่งโปรตีนทางเลือกจากพืชเป็นที่นิยมในการใช้ในอาหารสัตว์ เช่น soybean meal, wheat meal, corn gluten meal และ peanut meal สำหรับ soybean meal เป็นโปรตีนจากพืชที่มีความนิยมในการนำมาผลิตอาหารสัตว์ เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์โปรตีนใกล้เคียงกับปลาป่น และราคาถูกกว่าปลาป่น สำหรับ wheat meal, corn gluten meal และ peanut meal ถูกนำมาใช้ในอาหารสัตว์เช่นเดียวกัน แต่มีการใช้ในภูมิภาคต่าง ๆ เช่น wheat meal ถูกใช้ในสหรัฐอเมริกาและยุโรป แหล่งโปรตีนจากพืชมีโปรตีนสูงและไขมันต่ำ อาทิเช่น soybean meal มีโปรตีน 44.0-48.0% และมีไขมัน 0.9-4.7%, wheat meal มีโปรตีน 14.0-30.0% และไขมัน 7.0-12.0%, corn gluten meal มีโปรตีน 41.0-43.0% และไขมัน 1.0-3.0% และ peanut meal มีโปรตีน 46.0% และไขมัน 1.0-7.0% (ตารางที่ 5) อย่างไรก็ตามแหล่งโปรตีนจากพืชมีกรดอะมิโนที่จำเป็นบางตัวต่ำกว่าปลาป่น อาทิเช่น methionine, arginine, lysine เป็นต้น (ตารางที่ 6) และแหล่งโปรตีนจากพืชมี Antinutritional factor ที่จะมีผลต่อการใช้ประโชน์จากสารอาหารในสัตว์ ในการเลือกใช้แหล่งโปรตีนทางเลือก ต้องคำนึงถึงองค์ประกอบทางเคมี กรดอะมิโนที่จำเป็น ข้อกำจัดในการใช้ในอาหารสัตว์ ราคาของวัตถุดิบ และความยั่งยืนของวัตถุดิบที่นำมาใช้เพื่อการผลิตอาหารสัตว์ ซึ่งในปัจจุบันแหล่งโปรตีนจากพืชได้รับความนิยมอย่างมากในการเลือกใช้เพื่อการผลิตอาหารสัตว์ เนื่องจากเมื่อพิจารณาถึงคุณค่าทางโภชนะของแหล่งโปรตีน ราคาของวัตถุดิบ และความยั่งยืน ซึ่งได้มีรายงานการศึกษาผลของการใช้แหล่งโปรตีนจากพืชในอาหารกุ้งแต่ละชนิด ต่อการเจริญเติบโตและองค์ประกอบทางเคมีของกุ้ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของแหล่งโปรตีนจากสัตว์และพืช

Chemical composition (%)	Crude protein	Crude lipid	Crude fiber	Ash	Reference
Animal protein					
Fish meal	52.9–71.9	5.8-10.4	0.1-3.1	5.3-24.2	FAO, 1997
Hydrolyzed poultry feather meal	80.0-85.0	~2.5	~1.4	~3.0	FAO, 1986; FAO, 2014
Meat and bone meal	~50.0	8.1-11.0	~3.0	~30.0	
Blood meal	~85.0	0.5-3.0	~2.5	~6.0	
Black soldier fly larvae	42.1-56.9	11.8-26.0	0.7-3.1	6.4-15.9	Van Huis et al., 2013; Kroeckel et al., 2012
House fly	50.4-62.1	18.9-23.3	18.4-19.6	23.1-29.6	Van Huis et al., 2013; Ogungji et al., 2008
Mealworm	52.8-82.6	23.6-36.1	5.7-7.2	0.9-4.7	Van Huis et al., 2013 ; Henry et al., 2018
Cricket meal	59.8-69.0	13.3-13.9	3.6-9.2	0.1-4.8	Van Huis et al., 2013; Taufek et al., 2016
Silk worm pup	60.7-81.7	24.9-25.1	0.8-3.6	0.1-4.0	Van Huis et al., 2013; Finke, 2002; Longvah et al., 2011
Plant protein					
Soybean meal	44.0-48.0	0.9-4.7	2.8-6.0	0.6-16.2	Suárez et al., 2009
Wheat meal	14.0-30.0	7.0-12.0	6.0-12.0	0.1-0.5	Van Nguyen et al., 2018
Corn gluten meal	41.0-43.0	1.0-3.0	4.0-6.0	4.3-10.0	Nieto-López et al., 2011
Peanut meal	~ 46.0	1.0-7.0	10.0-13.0	3.8-9.2	Liu et al., 2012

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 6 กรดอะมิโนที่จำเป็นของแหล่งโปรตีนจากสัตว์และพืช

Protein source	Essential amino acid (%)										Reference
	Arg	Thr	Leu	Ile	Val	Trp	Lys	His	Phe	Met	
Animal protein											
Fishmeal	2.7-4.5	2.3-3.0	2.3.8-7.0	2.4-5.4	2.8-4.1	0.5-0.9	4.2-7.3	1.3-1.8	2.2-2.7	1.5-2.2	FAO, 1997
Feather meal	4.0-5.7	4.0-4.2	6.8-7.1	3.8-4.3	5.8-7.2	2.0-2.1	2.1-2.2	0.6-0.9	4.0-4.2	0.5-0.8	Li et al 2011; Grazziotin et al., 2006
Meat and bone meal	3.2-5.2	1.2-2.7	1.8-5.2	0.8-2.6	1.3-3.6	ND	1.7-4.3	0.5-1.8	1.1-3.2	0.4-1.5	Hendriks et al., 2002
Blood meal	2.4-4.9	3.2-3.9	10.3-11.4	0.8-2.5	5.1-8.2	1.3-1.4	8.0-8.3	5.6-5.7	5.1-5.8	1.2-1.5	Khawaja et al., 2007; Li et al., 2011
Black soldier fly larvae	5.6-5.9	3.7-4.6	7.9-8.6	5.1-5.2	7.2-8.2	0.5-0.8	6.6-7.2	3.0-3.3	3.9-5.2	2.1-2.2	FAO, 2014; Kroeckel et al., 2012
House fly	3.61-4.8	2.7-4.0	4.5-8.6	2.6-4.6	3.7-6.0	ND	1.7-5.4	2.1-3.4	4.0-4.5	1.5-1.6	FAO, 2014; Henry et al., 2018
Meal worm	5.3-6.8	4.0-4.2	8.0-8.7	4.7-4.8	6.0-6.5	0.6-1.0	5.9-6.7	2.2-3.0	2.5-3.8	1.4-1.5	FAO, 2014; Taufek et al., 2016
Cricket meal	2.3-5.6	1.8-5.1	3.0-7.5	1.6-5.1	2.3-5.5	0.7-0.9	2.9-7.0	1.3-2.6	2.2-5.2	1.7-3.5	FAO, 2014; Ji et al., 2015
Silk worm pupae	1.74-4.6	ND	2.1-5.4	0.6-3.2	0.5-4.0	0.6-1.5	1.7-6.1	1.9-2.4	3.8-4.6	1.66-2.2	FAO, 2014

หมายเหตุ: Arg=Arginine, Thr=Threonine, Leu=Leucine, Ile=Isoleucine, Val=Valine, Trp=Tryptophan, Lys=Lysine, His=Histidine, Phe=Phenylalanine, Met=Methionine, ND=Not detect

ตารางที่ 6 กรดอะมิโนที่จำเป็นของแหล่งโปรตีนจากสัตว์และพืช (ต่อเนื่อง)

Protein source	Essential amino acid (%)										Reference
	Arg	Thr	Leu	Ile	Val	Trp	Lys	His	Phe	Met	
Plant protein											
Soybean meal	6.0-8.4	3.5-4.2	7.8-8.4	4.6-5.6	3.1-5.8	ND	5.6-7.0	1.8-2.9	4.4-5.4	0.9-1.5	Cavins et al., 1972
Wheat meal	2.0-2.1	2.0-3.0	10.9-16.1	2.6-3.9	2.7-4.7	ND	1.0-1.2	1.2-1.8	4.3-6.0	1.5-1.8	Oweis et al., 2003
Corn gluten meal	5.3-8.6	1.7-1.9	3.8-3.9	2.0-2.1	2.6-3.0	ND	2.7-3.8	3.2-3.6	1.8-2.2	0.9-1.2	Pereira et al., 2003
Peanut meal	4.5-5.4	1.0-1.3	2.6-3.1	1.4-1.7	1.6-2.0	0.4-0.5	1.4-1.7	1.0-1.2	2.0-2.5	0.4-0.6	Batal et al. (2005)

หมายเหตุ: Arg=Arginine, Thr=Threonine, Leu=Leucine, Ile=Isoleucine, Val=Valine, Trp=Tryptophan, Lys=Lysine, His=Histidine, Phe=Phenylalanine, Met=Methionine, ND=Not detect

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การใช้แหล่งโปรตีนจากพืช (plant protein-based diet) ในอาหารต่อสมรรถนะการเจริญเติบโตของกุ้ง

โปรตีนเป็นสารอาหารหลักสำหรับการเจริญเติบโต ซึ่งได้มีรายงานการศึกษาผลของการใช้แหล่งโปรตีนจากพืชในอาหารกุ้งแต่ละชนิดต่อสมรรถนะการเจริญเติบโตของกุ้ง การศึกษาการใช้ soybean meal (SBM) ในอาหารกุ้ง Kuruma ที่ระดับต่าง ๆ ได้แก่ 0%, 8.4%, 16.7%, 25.1% และ 33.4% of SBM พบว่าการใช้ SBM ที่ระดับต่ำกว่า 25.1% ในอาหาร ไม่ส่งผลเสียต่อ final body weight (FBW), SGR และ feed intake (Bulbul et al., 2015) รายงานการศึกษาการใช้ SBM ที่ระดับ 0%, 2.5%, 5%, 7.5% และ 10% ในอาหารของกุ้ง *L. vannamei* พบว่าที่ระดับ 0%, 2.5%, 5% of SBM มีค่า FBW, weight gain (WG) ของกุ้งสูง และมีค่า FCR ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับกุ้งในกลุ่มที่มีการใช้ SBM ที่ระดับ 7.5% และ 10% ในอาหารอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) (Chen et al., 2017) ชี้ให้เห็นว่าการใช้แหล่งโปรตีนจากพืชในระดับที่เหมาะสมไม่ส่งผลเสียหรือมีการเจริญเติบโตดีเทียบเท่ากับอาหารที่ใช้ปลาป่นเป็นแหล่งโปรตีน แสดงให้เห็นว่าการใช้แหล่งโปรตีนจากพืชสามารถใช้ทดแทนปลาป่นในอาหารกุ้งได้ เช่นเดียวกับการศึกษาในกุ้ง *P. monodon* พบว่าการใช้ SBM ที่ระดับ 0%, 8.75%, 17.5% ในอาหาร มีค่า WG, FI, Protein efficiency ratio (PER) ของกุ้งสูง และมีค่า FCR ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับกุ้งในกลุ่มที่ได้รับอาหารที่มีการใช้ SBM ที่ระดับ 26.5% และ 35% อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) (Paripatananont et al., 2001) แต่อย่างไรก็ตามจากรายงานการใช้ Corn gluten meal (CGM) ที่ระดับ 0%, 8.64%, 17.28%, 25.92% และ 34.56% ในอาหารของกุ้ง *L. vannamei* พบว่ากุ้งในกลุ่มที่ไม่มีการเสริม CGM (0% of CGM) มีการเจริญเติบโตสูงที่สุด (FBW และ SGR) ของกุ้งสูงที่สุด รองลงมาคือ 8.64%, 17.28%, 25.92%, และ 34.56% of CGM ตามลำดับ ($P>0.05$) ซึ่งการเจริญเติบโต (FBW, SGR) ของกุ้ง จะลดลงเมื่อมีระดับ CGM ในอาหารเพิ่มขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่า CGM ไม่สามารถทดแทนปลาป่นในอาหารของกุ้ง *L. vannamei* ได้ (Molina-Poveda et al., 2015) (ตารางที่ 7)

การทดแทนปลาป่นด้วยโปรตีนจากพืชเพียงชนิดเดียวอาจส่งผลเสียต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง ดังนั้นการใช้แหล่งโปรตีนจากพืชแบบผสมผสานอาจช่วยเพิ่มการใช้โปรตีนจากพืชในอาหารได้ ซึ่ง Molina-Povedaและคณะ (2004) ทำการศึกษาระดับของการใช้ Soy bean meal (SBM) และ Wheat gluten (WhG) ในอาหารของกุ้ง *L. vannamei* ที่ระดับ 22.95%, 43.56%, 67.18% และ 85.31% of SBM+WhG พบว่าที่ระดับ 22.95% และ 43.56 % of SBM+WhG มีค่า WG ของกุ้งสูง และมีค่า FCR ต่ำ เมื่อแปรียบเทียบกับกุ้งที่ได้รับอาหารในกลุ่มระดับ 67.18% และ 85.31% of SBM+WhG อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ซึ่งให้ผลไปในทางเดียวกับการศึกษาของ Yue และคณะ (2012) โดยการใช้ Soy bean meal (SBM) และ peanut meal ในอาหารของกุ้ง *L. vannamei* (น้ำหนักเริ่มต้น 0.48 ±0.00 g) พบว่าที่ระดับ 12% และ 30.5% of SBM + peanut meal มีการเจริญเติบโต (FBW, SGR, PER) สูงที่สุดเมื่อเทียบกับกุ้งที่เลี้ยงด้วยอาหารที่ทดแทนปลาป่นที่ระดับอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) และเมื่อเพิ่มระดับของ SBM+ peanut meal (38.5%, 46.5%, 53.5%) ในอาหารกุ้ง มีผลทำให้กุ้งการเจริญเติบโตลดลง เช่นเดียวกับ Liu และคณะ (2012) ทำการศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วย Soy bean meal (SBM) และ peanut meal ในอาหารของกุ้ง *L. vannamei* (น้ำหนักเริ่มต้น 3.35 ±0.012 g) พบว่าที่ระดับ 20%, 27%, 34% และ 41% of SBM + peanut meal ในอาหาร ไม่ส่งผลเสียต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง แต่เมื่อเพิ่มระดับการทดแทนเป็นที่ระดับ 48%, 55% of SBM+ peanut meal กุ้งมีการเจริญเติบโต (FBW, SGR, PER) ลดลงเมื่อเทียบกับกุ้งที่ระดับอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) (ตารางที่ 7) จากรายงานการศึกษาชี้ให้เห็นว่า กุ้งในระยะ juvenile (~ 3.35 g) มีความสามารถในการใช้โปรตีนจากพืชที่มีการทดแทนปลาป่นในอาหารสูงกว่ากุ้งใน

ระยะ larvae (Liu et al., 2012; Yue et al., 2012) นอกจากนี้พบว่าการใช้โปรตีนจากพืช ได้แก่ Soy bean meal (SBM), Corn gluten meal (CGM), SBM + Wheat gluten (WhG) และ SBM + peanut meal ในอาหารของกุ้ง ที่ทุกระดับของการทดแทนปลาป่น ไม่ส่งผลเสียต่อ survival rate ของกุ้ง (Bulbul et al., 2015; Chen et al., 2017; Paripatananont et al., 2001; Molina-Poveda et al., 2015; Molina-Poveda et al., 2004; Yue et al., 2012) ยกเว้นการทดแทนปลาป่นด้วย SBM + peanut meal ในอาหารของกุ้งระยะ juvenile จะมีค่า PER และ survival rate จะลดลงเมื่อมีระดับ SBM+ peanut meal ในอาหารเพิ่มขึ้น (Liu et al., 2012) (ตารางที่ 7)

การใช้แหล่งโปรตีนจากพืช (plant protein-based diet) ในอาหารต่อองค์ประกอบของตัวกุ้ง

การใช้แหล่งโปรตีนจากพืชในอาหารต่อองค์ประกอบของตัวกุ้ง ได้มีรายงานการศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วย SBM ที่ระดับต่าง ๆ ในอาหารของกุ้ง Kuruma พบว่าค่า dry matter (20.4-21.9%), ash (15.6-17.1%) และ crude protein (67.5-68.5%) ของตัวกุ้งที่ได้รับอาหารทดลองไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) แต่มี crude lipid ในตัวกุ้งลดลงเมื่อมีระดับของ SBM ในอาหารเพิ่มขึ้น (Bulbul et al., 2015) เช่นเดียวกับการศึกษาในกุ้ง *L. vannamei* และกุ้ง *P. monodon* ที่ได้รับอาหารที่มีการทดแทนปลาป่นด้วย SBM ที่ระดับต่าง ๆ พบว่าเมื่อมีระดับของ SBM ในอาหารที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า crude lipid ในตัวกุ้งลดลง (Chen et al., 2017; Paripatananont et al., 2001) และที่ทุกระดับ SBM ในอาหารของกุ้ง *P. monodon* ไม่มีผลต่อค่า ash (14.11-14.89%) และ crude protein (68.4-72.245%) ของตัวกุ้ง ($P>0.05$) (Paripatananont et al., 2001) แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษาในกุ้ง *L. vannamei* พบว่าค่า crude protein ในตัวกุ้งจะลดลงเมื่อมีการทดแทนปลาป่นด้วย SBM ในระดับที่เพิ่มขึ้น (Chen et al., 2017) ในการศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วย SBM ที่ระดับต่าง ๆ (0%, 21%, 42%, 62.5% และ 84.0% of SBM) ในอาหารของกุ้ง *M. rosenbergii* พบว่าค่า dry matter (18.68-20.53%), ash (2.08-2.63%), crude lipid (0.30-0.63%) และ crude protein (13.52-14.55%) ของตัวกุ้ง ที่ทุกระดับ SBM ในอาหาร ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) (Du et al., 2003) (ตารางที่ 8) นอกจากนี้ได้มีรายงานการศึกษาการใช้แหล่งโปรตีนจากพืชระหว่าง SBM และ peanut meal ในการทดแทนปลาป่นในอาหารกุ้ง *L. vannamei* พบว่ากุ้งในระยะ larvae (น้ำหนักเริ่มต้น 0.48 ±0.00 g) ในทุกกลุ่มการทดลองมีค่า ash (0.28-0.34%), crude lipid (0.19-0.28%) และ crude protein (18.29-19.12%) ของตัวกุ้ง ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) (Yue et al., 2012) แต่ในกุ้ง *L. vannamei* ระยะ juvenile ที่ได้รับอาหารที่มีการทดแทนปลาป่นด้วย SBM + peanut meal ที่ระดับ 20%, 27%, 34% และ 41% ในอาหาร มีค่า crude protein (17.3-18%) และ ash (4.05-4.35%) ของตัวกุ้ง ไม่แตกต่างกัน ($P>0.05$) และจะมีค่าต่ำที่สุดในกลุ่มของกุ้งที่ได้รับอาหารที่มีการทดแทนปลาป่นที่ระดับ 48%, 55% of SBM+ peanut meal นอกจากนี้ที่ทุกระดับการทดแทนปลาป่นด้วย SBM+ peanut meal ในอาหาร มีค่า crude lipid (1.28-1.36%) ของตัวกุ้ง ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) (Liu et al., 2012) (ตารางที่ 8)

ตารางที่ 7 ผลของโปรตีนจากพืชในอาหาร (plant protein-based diet) ต่อสมรรถนะการเจริญเติบโตของกุ้ง

Species	Plant protein-based diet	Level	Result	Reference
Kuruma shrimp (1.5±0.01 g)	Soy bean meal (SBM)	0% 8.4% 16.7% 25.1% 33.4%	-ที่ระดับ 0%, 8.4%, 16.7%, 25.1% of SBM มีค่า FBW, SGR, FI ของกุ้ง ไม่แตกต่างกัน (P>0.05) -ที่ระดับ 33.4 % of SBM มีค่า FBW, SGR, FI ของกุ้ง ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) -ที่ระดับ 0%, 8.4%, 16.7%, 25.1%, 33.4% of SBM มีค่า PER และ survival rate ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)	Bulbul et al., 2015
L. vannamei (1.80±0.10 g)	SBM	0% 2.5% 5% 7.5% 10%	-ที่ระดับ 0%, 2.5%, 5% of SBM มีค่า FBW, WG ของกุ้งสูง และมีค่า FCR ต่ำ เมื่อแปรียบเทียบกับกุ้งในกลุ่ม 7.5% และ 10% of SBM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) -ที่ระดับ 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10% of SBM มีค่า survival rate ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)	Chen et al., 2017
P. monodon (1.82±0.16 g)	SBM	0% 8.75% 17.5% 26.25% 35%	-ที่ระดับ 0%, 8.75%, 17.5% of SBM มีค่า WG, FI, PER ของกุ้งสูง และมีค่า FCR ต่ำ เมื่อแปรียบเทียบกับกุ้งในกลุ่ม 26.5% และ 35% of SBM อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) -ที่ระดับ 0%, 8.75%, 17.5%, 26.25%, 35% of SBM มีค่า survival rate ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)	Paripatananont et al., 2001
L. vannamei (1.19±0.05 g)	Corn gluten meal (CGM)	0% 8.64% 17.28% 25.92% 34.56%	-ที่ระดับ 0% of CGM มีค่า FBW และ SGR ของกุ้งสูงที่สุด รองลงมาคือ 8.64%, 17.28%, 25.92%, และ 34.56% of CGM ตามลำดับ (P>0.05) -การเจริญเติบโต (FBW, SGR) ของกุ้ง จะลดลงเมื่อมีระดับ CGM ในอาหารเพิ่มขึ้น -ค่า survival rate ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)	Molina-Poveda et al., 2015

หมายเหตุ: IBW=Initial body weight, FBW=Final body weight, WG=Weight gain, SGR=Specific growth rate, FI=Feed intake, FCR=Feed convention ratio, PER=Protein efficiency ratio

ตารางที่ 7 ผลของโปรตีนจากพืชในอาหาร (plant protein-based diet) ต่อสมรรถนะการเจริญเติบโตของกุ้ง (ต่อเนื่อง)

Species	Plant protein-based diet	Level	Result	Reference
L. vannamei (2.14±0.02 g)	Soy bean meal (SBM) และ Wheat gluten (WhG)	22.95 43.56 67.18 85.31%	-ที่ระดับ 22.95 และ 43.56 % of SBM+WhG มีค่า WG ของกุ้งสูง และมีค่า FCR ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับกุ้งในกลุ่ม 67.18% และ 85.31% of SBM+WhG อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) -ทุกระดับ 22.95, 43.56, 67.18, 85.31% of SBM+WhG มีค่า survival rate ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)	Molina-Poveda et al., 2004
L. vannamei (0.48±0.00 g)	Soy bean meal (SBM) และ peanut meal	12% 30.5% 38.5% 46.5% 53.5%	-ที่ระดับ 12% และ 30.5% of SBM + peanut meal มีค่า FBW, SGR, PER ของกุ้ง ไม่แตกต่างกัน (P>0.05) -ที่ระดับ 38.5%, 46.5%, 53.5% of SBM+ peanut meal มีการเจริญเติบโต (FBW, SGR, PER) ลดลงเมื่อเทียบกับกุ้งที่ระดับอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) -ที่ระดับ 12%, 30.5%, 38.5%, 46.5%, 53.5% of SBM+ peanut meal มีค่า FI และ survival rate ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)	Yue et al., 2012
L. vannamei (3.35±0.012 g)	Soy bean meal (SBM) และ peanut meal	20% 27% 34% 41% 48% 55%	-ที่ระดับ 20%, 27%, 34% และ 41% of SBM + peanut meal มีค่า FBW และ WG ของกุ้ง ไม่แตกต่างกัน (P>0.05) -ที่ระดับ 48%, 55% of SBM+ peanut meal มีการเจริญเติบโต (FBW, SGR, PER) ลดลงเมื่อเทียบกับกุ้งที่ระดับอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) -ค่า PER และ survival rate จะลดลงเมื่อมีระดับ SBM+ peanut meal ในอาหารเพิ่มขึ้น	Liu et al., 2012

หมายเหตุ: IBW=Initial body weight, FBW=Final body weight, WG=Weight gain, SGR=Specific growth rate, FI=Feed intake, FCR=Feed convention ratio, PER=Protein efficiency ratio

ตารางที่ 8 ผลของโปรตีนจากพืชในอาหาร (plant protein-based diet) ต่อองค์ประกอบทางเคมีในตัว (Whole body) ของกุ้ง

Species	Plant protein-based diet	Level	Result	Reference
Kuruma shrimp (1.5±0.01 g)	Soy bean meal (SBM)	0% 8.4% 16.7% 25.1% 33.4%	-ที่ระดับ 0%, 8.4%, 16.7%, 25.1% of SBM มีค่า crude lipid ของตัวกุ้ง (whole body) ไม่แตกต่างกัน (P>0.05) -ที่ระดับ 33.4 % of SBM มีค่า crude lipid ของตัวกุ้ง ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) -ค่า dry matter (20.4-21.9%), ash (15.6-17.1%) และ crude protein (67.5-68.5%) ของตัวกุ้งที่ทุกระดับ SBM ในอาหาร ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)	Bulbul et al., 2015
L. vannamei (1.80±0.10 g)	SBM	0% 2.5% 5% 7.5% 10%	-ที่ระดับ 0%, 2.5%, 5%, 7.5% of SBM มีค่า crude lipid และ crude protein ของตัวกุ้ง ไม่แตกต่างกัน (P>0.05) -ที่ระดับ 10% of SBM มีค่า crude lipid และ crude protein ของตัวกุ้ง ต่ำที่สุด -ค่า ash (3.07-3.17%) ของตัวกุ้ง ที่ทุกระดับ SBM ในอาหาร ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)	Chen et al., 2017
P. monodon (1.82±0.16 g)	SBM	0% 8.75% 17.5% 26.25% 35%	-ที่ระดับ 0% of SBM มีค่า crude lipid (8.05±0.5%) ของตัวกุ้งสูงที่สุด รองลงมาคือ ที่ระดับ 8.75%, 17.5%, 26.25%, 35% of SBM -ค่า ash (14.11-14.89%) และ crude protein (68.4-72.245%) ของตัวกุ้ง ที่ทุกระดับ SBM ในอาหาร ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)	Paripatananont et al., 2001
L. vannamei (0.48±0.00 g)	Soy bean meal (SBM) และ peanut meal	12% 30.5% 38.5% 46.5% 53.5%	-ค่า ash (0.28-0.34%), crude lipid (0.19-0.28%) และ crude protein (18.29-19.12%) ของตัวกุ้ง ที่ทุกระดับ SBM+ peanut meal ในอาหาร ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)	Yue et al., 2012

ตารางที่ 8 ผลของโปรตีนจากพืชในอาหาร (plant protein-based diet) ต่อองค์ประกอบทางเคมีในตัว (Whole body) ของกุ้ง (ต่อเนื่อง)

Species	Plant protein-based diet	Level	Result	Reference
L. vannamei (3.35±0.012 g)	Soy bean meal (SBM) และ peanut meal	20% 27% 34% 41% 48% 55%	-ที่ระดับ 20%, 27%, 34% และ 41% of SBM + peanut meal มีค่า crude protein (17.3-18%) และ ash (4.05-4.35%) ของตัวกุ้ง ไม่แตกต่างกัน (P>0.05) และมีค่าต่ำที่สุดในกลุ่มระดับ 48%, 55% of SBM+ peanut meal -ค่า crude lipid (1.28-1.36%) ของตัวกุ้ง ที่ทุกระดับ SBM+ peanut meal ในอาหาร ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)	Liu et al., 2012
M. rosenbergii	SBM	0% 21% 42% 62.5% 84.0%	-ค่า dry matter (18.68-20.53%), ash (2.08-2.63%), crude lipid (0.30-0.63%) และ crude protein (13.52-14.55%) ของตัวกุ้ง ที่ทุกระดับ SBM ในอาหาร ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)	Du et al., 2003

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หลักการตรวจสุขภาพสัตว์

สุขภาพสัตว์ที่ดีหรือปกตินั้น หมายถึง สภาวะของความสมบูรณของรางกายสัตวที่เจริญเติบโตอยู่ไดในสภาวะแวดลอม ดังนั้น สัตวเลี้ยงจะมีสุขภาพดีไดนั้นขึ้นอยูกับการเลี้ยงดูที่ดี การกิน อาหารที่มีคุณภาพ ดีการจัดการที่ดีการสุขาภิบาลที่ถูกตอง และมีการปองกันโรคที่ดี (ณรงค์ กิจพาณิชย์. 2529)

การตรวจสุขภาพสัตว์ ทำได้โดยการตรวจวัดต่อไปนี้

1. **การหายใจ** การหายใจของสัตวนั้น จะสังเกตไดจากการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงของทรวงอกอยางสม่ำเสมอ (การเคลื่อนที่ขึ้นและลงของทรวงอก นับเปน 1 ครั้ง) และอัตราการหายใจปกติของสัตวแตและประเภทจะมีค่าแตกต่างกันออกไป อาทิ โค : 27-40 ครั้งตอนาที อัตราการหายใจอาจจะเพิ่มขึ้นกวาปกติเล็กนอย ถาสภาพอากาศรอนหรือสภาพโรงงานอับชื้นซึ่งสาเหตุเนื่องจากสัตวตองการระบายความร่อนออกจากรางกายทางลมหายใจ ใหมากขึ้นหรือสัตวตองการอากาศหายใจมากขึ้น เนื่องจาดสภาพแวดลอมมีการถายเทอากาศไดนอย
2. **การเตนของหัวใจ** สามารถตรวจโดยการจับชีพจรที่เสนเลือดแดงบริเวณใตขากรรไกรลาง ซึ่งอัตราการเตนของหัวใจหรือชีพจรปกติของสัตวแตละประเภทมีคาแตกต่างกันออกไป อาทิ โค : 60-100 ครั้งตอนาที
3. **อุณหภูมิของรางกายสัตว** สามารถตรวจไดโดยใชปรอทวัดไขสอดเขาทางรูทวารหนัก (กอนสอดปรอทวัดไขเขารูทวารหนักจะตองสะบัดแรง ๆ ใหปรอทไหลลงไปในสวนกระเปาะของปรอทวัดไขเสียกอน) โดยสอดปรอทวัดไขใหลึกประมาณ 1.5 - 2 นิ้ว ใหปลายของปรอทวัดไขแตะกับผนังของลำไสใหญ นานประมาณ 1 นาที แลวจึงดึงออกมาอานคา ซึ่งอุณหภูมิของรายกายสัตวปกติ อาทิ โค จะมีคา 100-102.8 องศาฟาเรนไฮต์ ถาสภาพอากาศแวดลอมร่อน อาจมีผลตออุณหภูมิของรางกายสัตวปกติคือสามารถใหอุณหภูมิของรางกายสัตวสูงขึ้นกวาปกติ นอกจากนั้นยังมีผลทำใหอัตราการหายใจเพิ่มขึ้นมากกวาปกติดวย ซึ่งอาจจะเปนสาเหตุทำใหสัตวเจ็บปวยไดงายขึ้นหรือ ช็อคตายได ในกรณีที่ระบบควบคุมอุณหภูมิของรางกายสัตวเสียไป สัตวปวยจะตองมีอุณหภูมิของรางกายสูงกวาปกติหรือเรียกวา "สัตวมีไข้" โคปวย อุณหภูมิจะสูงกวา 103 องศาฟาเรนไฮต หรือกรณีหลังไข่ตกแม่โคสามารถมีอุณหภูมิร่างกายสูงขึ้นได้
4. **ความปกติของอวัยวะต่างๆ** อาทิ เยื่อตาและเหงือก ลูกตา จมูก หู ผิงหนังและขน ระบบสืบพันธุ์ เต้านม
5. **พฤติกรรมสัตว์** อาทิ การเจริญเติบโต การสืบพันธุ์ การขับถ่ายอุจาระ-ปัสสาวะ การกินอาหาร-น้ำ ท่าทางการเดิน การสนใจสิ่งแวดล้อม
6. **อื่นๆ** อาทิ Body condition score หรือการให้คะแนนสภาพร่างกายอ้วน-ผอม

ไบโอเซนเซอร์และเทคโนโลยีกับการตรวจสุขภาพสัตว์

ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีด้านวิทยาศาสตร์ที่เจริญก้าวหน้าอย่างยิ่งในเวลาอันรวดเร็ว รวมถึงเทคโนโลยีสุขภาพ ซึ่งส่งผลต่อการตรวจและวินิจฉัยโรค (ธิติมา, 2556) ความก้าวล้ำของเทคโนโลยีไบโอเซนเซอร์ (ปนัดนา และ รินา, 2556) จะนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีสุขภาพในโลกอนาคต

ไบโอเซนเซอร์ เป็นอุปกรณ์การตรวจวัดทางชีวภาพโดยการใช้สารชีวภาพเปลี่ยนปริมาณสารที่ต้องการตรวจวัดให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าที่สามารถตรวจวัดได้ การพัฒนาไบโอเซนเซอร์และเซนเซอร์ด้านต่าง ๆ ในรอบ 30 ปี มีจำนวนมากขึ้นทั้งในด้านเงินทุน จำนวนผลงานตีพิมพ์ และจำนวนนักวิจัยที่เพิ่มมากขึ้น การใช้งานไบโอเซนเซอร์มีมากมายในหลาย ๆ ด้าน โดยมีอัตราการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นถึง 60% ต่อปี เช่น การแพทย์ อุตสาหกรรม การทหาร และสิ่งแวดล้อม เป็นต้น (ธานินทร์, 2560)

ส่วนประกอบทั้ง 2 ส่วน ของไบโอเซนเซอร์ได้แก่ (ธานินทร์, 2560)

1. สารทางชีวภาพ ได้แก่ เอนไซม์ จุลินทรีย์ เนื้อเยื่อพืชและสัตว์ แอนติเจนและแอนติบอดี เมื่อสารชีวภาพได้รับสารที่มีความเลือกเฉพาะที่ต้องการวัดจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ พร้อมกับส่งสัญญาณให้ส่วนถัดไป
2. ทรานสดิวเซอร์ เพื่อทำหน้าเปลี่ยนสัญญาณที่ได้รับซึ่งอาจจะเป็นสัญญาณทางฟิสิกส์ ทางเคมีและชีวเคมี ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เพื่อส่งต่อให้กับส่วนของการวาดสัญญาณต่อไป

ในการตรวจวัดเพื่อทำให้ได้สัญญาณ และอ่านค่าได้ จำเป็นต้องใส่ส่วนประกอบด้านการขยายสัญญาณหากสัญญาณมีขนาดต่ำ การประมวลผลสัญญาณ และการวาดสัญญาณเพื่อให้ผู้ใช้อ่านค่าได้

คุณลักษณะของไบโอเซนเซอร์ที่ดีต้องสามารถตรวจวัดสารได้อย่างดี โดยไบโอเซนเซอร์หากตรวจวัดได้ดีในตัวอย่างที่มีเมทริกซ์แบบหนึ่งได้ดีแล้ว ไม่ได้หมายความว่าจะตรวจได้ดีเมื่อเปลี่ยนเมทริกซ์ ตัวแปรที่ทำให้ไบโอเซอร์ตรวจวัดได้ดีมีหลายชนิด เช่น อุณหภูมิ ความดัน ขนาด สารรบกวนในระบบ

ปัจจุบันจากการทบทวนวรรณกรรมมีการนำไบโอเซนเซอร์ มาใช้ในการตรวจวินิจฉัยสุขภาพสัตว์พอสรุปได้ดังนี้ (Sures, 2017)

1. Weight estimation of pigs via vision tools
2. Cattle monitoring system and tracking dairy cow behavior
3. Cough analysis in animals using audio and video data for identification of respiratory infections
4. Sound analysis in cows
5. Detection of pig screams
6. Stress detection in laying hens
7. Automatic detection of cow's oestrus in audio surveillance system
8. Noise analysis to evaluate chick thermal comfort
9. Sensor and instrumentation for progesterone detection
10. Wireless system for pregnancy detection in cows by monitoring temperature changes in body

ตัวอย่างหนึ่งในต่างประเทศ Nograles และ Caluyo (2013) ได้พัฒนาระบบไร้สายที่ออกแบบมาเพื่อวัดอุณหภูมิร่างกายจากระยะไกลและตรวจจับระยะเริ่มแรกของการตั้งครรภ์ในแม่โคนม ซึ่งประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) โมดูล Xbee และโปรแกรม MATLAB เครื่องส่งสัญญาณ Xbee พร้อมเซ็นเซอร์อุณหภูมิ LM35 ที่ติดอยู่ใต้โคนหางของโค เพื่อศึกษาว่าอุณหภูมิของร่างกายในโคจะเพิ่มขึ้นหรือไม่หลังจากวันที่ 5 ถึงวันที่ 12 หลังการผสมเทียม ตามหลักการที่การศึกษามาก่อนหน้าว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำนมหรืออุณหภูมิของร่างกาย ซึ่งอาจเป็นตัวบ่งชี้การตอบสนองทางภูมิคุ้มกันของแม่ต่อการเข้าสู่มดลูกของตัวอ่อน ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิของร่างกายเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหลังจากการผสมเทียมในวัวที่ตั้งท้องเมื่อเทียบดับในวัวที่ไม่ได้ตั้งท้อง ผลที่ได้จากการศึกษาสามารถชี้ให้เห็นว่าสามารถใช้ชิ้นส่วนและวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่มีราคาถูกในเชิงพาณิชย์ สามารถนำมาออกแบบเพื่อตรวจหาการตั้งครรภ์แบบไม่ต้องสัมผัสตัวโคนมได้จากระยะไกลได้ถึง 40 เมตรโดยไม่ต้องใช้มนุษย์ในการตรวจวินิจฉัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

กิจกรรมที่ 1: ระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบอัจฉริยะ
การศึกษาวิจัยครั้งนี้แบ่งออกเป็น 5 การทดลองดังนี้

1. การศึกษาขนาดห้องเลี้ยงที่เหมาะสม ในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้ง
2. การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ด้วยระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง
3. การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant
4. การทดสอบระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในสภาวะต่าง ๆ
5. การพัฒนาอาหารที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงกุ้งในระบบการเลี้ยงแบบแนวตั้ง โดยการศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหารของกุ้งก้ามกราม

การทดลองที่ 1. การศึกษาขนาดห้องเลี้ยงที่เหมาะสม ในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้ง

การเตรียมสัตว์ทดลองและการทดลอง

กุ้งก้ามกรามขนาดต่าง ๆ ที่ต้องการทดลอง (ตารางที่ 9) นำมาปรับสภาพสัตว์ทดลองเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ โดยใช้อาหารทางการค้า (commercial diet) ที่มีโปรตีนไม่น้อยกว่า 36% ไขมันไม่น้อยกว่า 4% โดยให้อาหารแบบไม่จำกัด (ad libitum) ทุกวัน ซึ่งมีการให้อาหารวันละ 4 มื้อ (08.00, 11.00, 14.00 และ 17.00 น.) หลังจากนั้นทำการสุ่มชั่งน้ำหนักกุ้งก้ามกรามเพื่อเข้าการทดลอง ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 การศึกษาขนาดของห้องเลี้ยงที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาดต่าง ๆ

Size of unit (L)	Size of shrimp (g)	Duration (day)	Samples
10 L (Condo A & B)	50 กรัม ขึ้นไป	30	59
	2 กรัม ขึ้นไป	60	118
	18 กรัม ขึ้นไป	90	25
12 L	30 กรัม ขึ้นไป	90	24
37.5 L	40 กรัม ขึ้นไป	210	11
	50 กรัม ขึ้นไป	60	6
33 L	30 กรัม ขึ้นไป	90	4
54 L	30 กรัม ขึ้นไป	90	2
67 L	30 กรัม ขึ้นไป	90	2

การเก็บรวบรวมข้อมูล

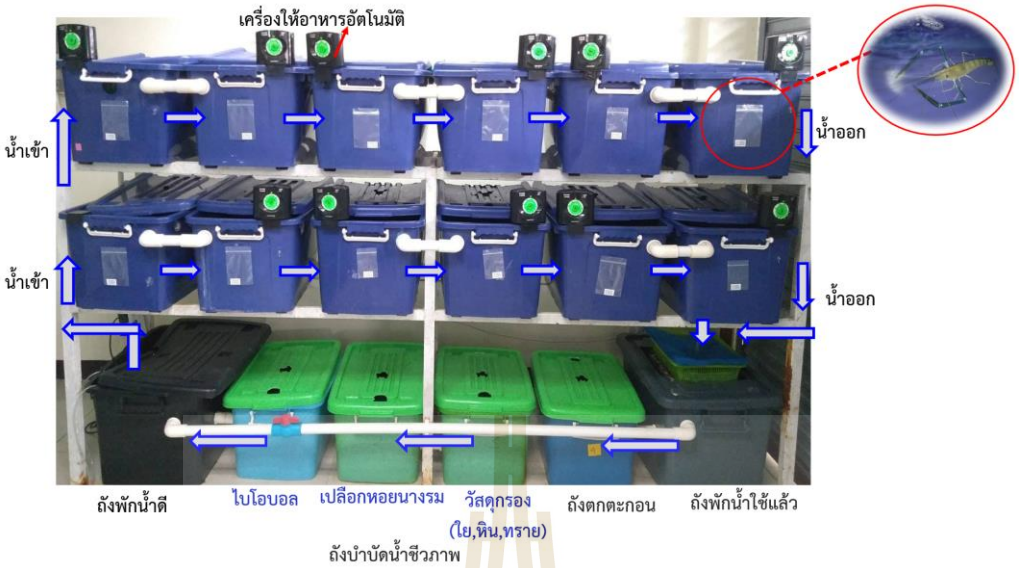
ทำการเก็บข้อมูลสมรรถนะการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม โดยทำการชั่งน้ำหนักทุก 30 วัน จนสิ้นสุดการทดลอง หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณสมรรถนะการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม (ตารางที่ 10) เพื่อทำการวิเคราะห์ผลของขนาดห้องเลี้ยงที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในขนาดต่าง ๆ

ตารางที่ 10 การเก็บรวบรวมและการวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลอง

Parameters	Formular
น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น (Weight gain; WG (g))	((Final weight-Initial weight)/ Initial weight) x 100
น้ำหนักตัวที่เพิ่มเฉลี่ย (Average daily weight gain; ADG (g/day))	(Final body weight – Initial body weight) / Experimental days
อัตราเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific growth rate; SGR (%/day))	((ln final weight - ln initial weight) / Days of culture) x 100
ค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นสัมพัทธ์ (Relative weight gain; RWG (%))	(Weight gain/ Initial weight) x 100
ค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นสัมพัทธ์ต่อวัน (Relative weight gain/day; RWG/day (%/day))	((Weight gain/ initial weight) / Experiment day) x 100
อัตราการเปลี่ยนเนื้อเป็นอาหาร (Feed conversion ratio; FCR)	Dry feed fed / Weight gain
อัตราการรอด (Survival rate; SR (%))	(Final amount of shrimps / Initial amount of shrimps) x 100

การจัดการระบบการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม

การศึกษาขนาดห้องเลี้ยงที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามมีการใช้ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดหรือระบบการเลี้ยงที่นำน้ำกลับมาใช้ใหม่โดยมีการบำบัดน้ำ ซึ่งระบบน้ำแบบหมุนเวียนแบบปิด (ภาพที่ 7) ประกอบไปด้วย ถังรองรับน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงกุ้ง ถังกรอง ซึ่งภายในประกอบด้วยวัสดุกรองเป็นใยแก้ว, ถ่านคาร์บอนช่วยกำจัดอินทรีย์สารที่ทำให้เกิดกลิ่นเน่าเสีย ขจัดสารพิษโลหะหนัก, สารซีโอไลต์ย่อยตะกอนของเสีย, กำจัดสารพิษ, ยับยั้งเชื้อโรค, ไบโอบอล ช่วยทำให้น้ำใสและเป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ และเปลือกหอยมีคุณสมบัติเป็น pH buffer ช่วยให้ค่า pH ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และเปลือกหอยรางรมจะค่อย ๆ ปลดปล่อยสารประกอบจำพวกแคลเซียมออกมา ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการลอกคราบของกุ้งก้ามกราม และถังพักน้ำดี ซึ่งน้ำจะถูกสูบกลับไปที่ระบบเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามต่อไป ในระหว่างการเลี้ยงมีการเติมน้ำเพื่อรักษาปริมาตรน้ำที่สูญเสียจากการระเหย และมีการเติมแร่ธาตุเพื่อรักษาระดับค่า alkalinity ระดับค่า hardness ให้เหมาะสม และทำการวัดคุณภาพน้ำระบบการเลี้ยงกุ้งแบบแนวตั้ง โดยวัดอุณหภูมิอากาศ และคุณภาพน้ำในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในคอนโดที่มีห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิน้ำ ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (Dissolved oxygen; DO) ค่าพีเอช (pH) ค่าความกระด้าง (Alkalinity) และค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC)



ภาพที่ 7 ระบบน้ำแบบหมุนเวียนแบบปิด ที่ใช้ในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง

การทดลองที่ 2. การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ด้วยระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง

การเตรียมสัตว์ทดลอง การทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล

กุ้งก้ามกรามขนาด น้ำหนักตัว 30 กรัมขึ้นไป และน้ำหนักตัว 50 กรัมขึ้นไปที่ต้องการทดสอบมาทำการปรับสภาพสัตว์ทดลองเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ โดยใช้อาหารทางการค้า (commercial diet) ที่มีโปรตีนไม่น้อยกว่า 36% ไขมันไม่น้อยกว่า 4% โดยให้อาหารแบบไม่จำกัด (ad libitum) ทุกวัน ซึ่งมีการให้อาหารวันละ 4 มื้อ (08.00, 11.00, 14.00 และ 17.00 น.) หลังจากนั้นทำการสุ่มชั่งน้ำหนักกุ้งก้ามกรามเพื่อเข้าการทดลอง โดยนำเข้าระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง (คอนโด) ที่มีขนาดห้องเลี้ยง (ปริมาตรน้ำ) 50 ลิตร ซึ่งทำการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่มีน้ำหนักตัวเริ่มต้น 30 กรัมขึ้นไป จำนวน 28 ห้อง (unit) แต่ละunit มีกุ้งก้ามกราม 1 ตัว เป็นระยะเวลาการเลี้ยง 6 เดือน และทำการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่มีน้ำหนักตัวเริ่มต้น 50 กรัมขึ้นไป จำนวน 32 unit แต่ละunit มีกุ้งก้ามกราม 1 ตัว เป็นระยะเวลาการเลี้ยง 7 เดือน จากนั้นทำการเก็บข้อมูลสมรรถนะการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม ซึ่งทำการชั่งน้ำหนักทุก 30 วัน จนสิ้นสุดการทดลอง นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณสมรรถนะการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม (ตารางที่ 10) เพื่อทำการวิเคราะห์ผลของการพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ด้วยระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง

การจัดการระบบการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม

การพัฒนาระบบการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้ง (vertical shrimp culture) โดยทำการศึกษาการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามขนาดประมาณ 30 กรัม และ 50 กรัมขึ้นไปมาเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตรที่มีระบบน้ำแบบหมุนเวียนแบบปิดและมีการจัดการดูแลระบบการเลี้ยงเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 ในระหว่างการเลี้ยงทำการวัดคุณภาพน้ำระบบการเลี้ยงกุ้งแบบแนวตั้ง โดยวัดอุณหภูมิอากาศและคุณภาพน้ำในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในคอนโดที่มีห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิน้ำ ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (Dissolved oxygen; DO) ค่าพีเอช (pH) ค่าความกระด้าง (Alkalinity) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) และค่าความเค็ม (salinity)

การทดลองที่ 3. การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant

การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant ต้องอาศัยการบูรณาการเทคโนโลยีและศาสตร์ด้านต่าง ๆ ได้แก่ เทคโนโลยีด้านวิศวกรรมในการพัฒนาระบบการเลี้ยง ที่ประกอบไปด้วยห้องเลี้ยง ระบบน้ำแบบหมุนเวียน และระบบการบำบัดน้ำเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ร่วมกับเทคโนโลยีการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เพื่อเป็นการผลักดันให้โครงการนี้สามารถเป็นการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระดับ Pilot plant ได้

3.1 การพัฒนาและการทดสอบระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดในการเพาะเลี้ยงกุ้งแบบแนวตั้ง

ในเบื้องต้นก่อนเริ่มต้นทำการทดลองการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant จะทำการพัฒนาและทดสอบระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น เพื่อรองรับระบบการเลี้ยงในเชิงธุรกิจ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาระบบกรอง 2 ระบบ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเพื่อน้ำมาใช้หมุนเวียนในระบบการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม (ตารางที่ 11) และทำการวัดคุณภาพน้ำก่อนผ่านระบบบำบัด (น้ำจากระบบเลี้ยงกุ้งคอนโด) และน้ำหลังผ่านการกรองของทั้ง 2 ระบบ โดยวัดค่าอุณหภูมิน้ำ ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ ค่าพีเอช ค่าปริมาณแอมโมเนียทั้งหมด (Total ammonia) ค่าไนไตรต์ (NO^{2-}) ค่าไนเตรต (NO^{3-}) ค่าความกระด้าง ค่าแคลเซียมและแมกนีเซียม (Ca & Mg) ค่าคลอไรด์ (Cl^{-}) ค่าความขุ่น และค่า COD

ตารางที่ 11 ส่วนประกอบของระบบกรองในการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำในระบบเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้ง

ระบบที่ 1	
ส่วนประกอบ	**หน้าที่**
1. ทรายกรอง (Sand)	ทรายกรองมีหน้าที่กรองความขุ่น สิ่งสกปรก ฝุ่นละออง ตะกอนต่าง ๆ ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ มีขนาด 0.2-0.4 มิลลิเมตร
2. แอนทราไซต์ (anthracite)	แอนทราไซท์เป็นสารกรองน้ำที่ทำหน้าที่ขจัดตะกอน ดักจับสารแขวนลอยต่าง ๆ ไว้ที่บริเวณภายนอกของตัวสาร และมีช่องว่างสามารถกักเก็บสารแขวนลอยได้ในปริมาณมาก โดยส่วนใหญ่มักจะใช้ร่วมกับทรายกรองน้ำสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองน้ำให้สูงขึ้น
3. ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)	ถ่านกัมมันต์สามารถดูดจับกลิ่น สี สารกรอง คลอรีน และสารเคมีต่าง ๆ
ระบบที่ 2	
1. ถ่านกัมมันต์	ถ่านกัมมันต์สามารถดูดจับกลิ่น สี สารกรอง คลอรีน และสารเคมีต่าง ๆ
2. สาร Microban	เป็นสารที่มีเทคโนโลยีป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียจากสหรัฐอเมริกา ลิขสิทธิ์เฉพาะ master
3. ไส้กรองดิส (Disc filter)	สามารถปรับความละเอียดตั้งแต่ 20-80 ไมครอน ทำการดักจับ ตะกอนหยาบ เช่น กรวด ทราย หิน โคลน และสารแขวนลอยขนาดใหญ่
4. ไส้กรองอะตอมไมส์ (Atomize filter)	เป็นไส้กรองละเอียด 0.5 ไมครอน และเป็นเทคโนโลยี High Flow ลิขสิทธิ์เฉพาะ Master ทำให้ได้อัตราการไหลของน้ำสูง ซึ่งในระบบหมุนเวียนน้ำ

3.2 การพัฒนาและการทดสอบระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant

หลังจากได้ระบบกรองที่สามารถบำบัดน้ำที่เหมาสมจากการทดสอบ 3.1 จึงนำมาใช้ในการพัฒนาและการทดสอบระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant

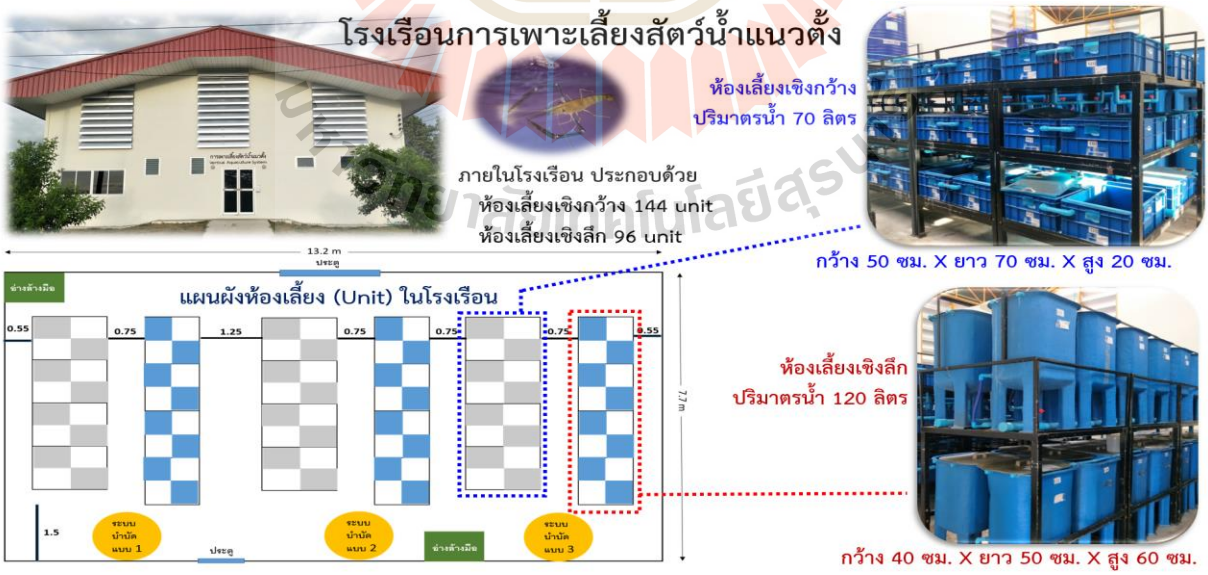
การเตรียมสัตว์ทดลอง การทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล

กุ้งก้ามกรามขนาดที่ต้องการทดสอบ มาทำการปรับสภาพสัตว์ทดลองเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ โดยใช้อาหารทางการค้า (commercial diet) ที่มีโปรตีนไม่น้อยกว่า 36% ไขมันไม่น้อยกว่า 4% โดยให้อาหารแบบไม่จำกัด (ad libitum) ทุกวัน ซึ่งมีการให้อาหารวันละ 4 มื้อ (08.00, 11.00, 14.00 และ 17.00 น.) หลังจากนั้นทำการสุ่มชั่งน้ำหนักกุ้งก้ามกรามเพื่อเข้าการทดลอง โดยผู้วิจัยได้ทำการสร้างโรงเรือนการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแนวตั้ง ซึ่งภายในประกอบด้วย ห้องเลี้ยงเชิงกว้าง 144 unit และห้องเลี้ยงเชิงลึก 96 unit ซึ่งเลี้ยงด้วยระบบน้ำแบบหมุนเวียนแบบบำบัดน้ำเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ (ดังภาพที่ 8)

ห้องเลี้ยงเชิงกว้าง มีขนาด (ปริมาตรน้ำ) 70 ลิตร (ความกว้าง 50 ซม. X ความยาว 70 ซม. X ความสูงของระดับน้ำ 20 ซม.) มีจำนวน 144 unit แต่ละunit มีกุ้งก้ามกราม 1 ตัว ทำการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่มีน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 47.06±5.84 กรัม เป็นระยะเวลาการเลี้ยง 12 เดือน

ห้องเลี้ยงเชิงลึก มีขนาด (ปริมาตรน้ำ) 120 ลิตร (ความกว้าง 40 ซม. X ความยาว 50 ซม. X ความสูงของระดับน้ำ 60 ซม.) มีจำนวน 96 unit แต่ละunit มีกุ้งก้ามกราม 1 ตัว ทำการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่มีน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 49.97±18.17 กรัม เป็นระยะเวลาการเลี้ยง 14 เดือน

จากนั้นทำการเก็บข้อมูลสมรรถนะการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม ซึ่งทำการชั่งน้ำหนักทุก 30 วัน จนสิ้นสุดการทดลอง นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณสมรรถนะการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม (ตารางที่ 10) เพื่อทำการวิเคราะห์ผลของการพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant นอกจากนี้มีการทดสอบการใช้กล้องวิดีโอแบบไม่มีอินฟาเรทเปรียบเทียบกับกล้องวิดีโอแบบมีอินฟาเรท เพื่อสังเกตพฤติกรรมของกุ้งก้ามกร้ามที่เลี้ยงในคอนโดได้



ภาพที่ 8 การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant โดยมีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด

การจัดการระบบการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม

การเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant ที่มีห้องเลี้ยงเชิงกว้าง 144 ห้อง (unit) และห้องเลี้ยงเชิงลึก 96 unit เลี้ยงด้วยระบบน้ำแบบหมุนเวียนแบบปิด เป็นระยะเวลา 12 เดือน ซึ่งในการเลี้ยงกุ้งคอนโดแบ่งชุดกรองน้ำเป็น 3 ชุด ได้แก่ ชุด condo A-B, ชุด condo C-D และชุด condo E-F ซึ่งในแต่ละชุดประกอบด้วยห้องเลี้ยงเชิงกว้าง 48 unit และห้องเลี้ยงเชิงลึก 32 unit เพื่อให้ระบบกรองยังคงประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเพื่อน้ำมาใช้หมุนเวียนในระบบการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามคอนโดได้ ในตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ได้ทำการวัดอุณหภูมิอากาศ และคุณภาพน้ำในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในคอนโดในแต่ละชุดการเลี้ยง ได้แก่ อุณหภูมิน้ำ ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (Dissolved oxygen; DO) ค่าพีเอช (pH) ค่าแอมโมเนีย (Ammonia) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) ค่าความกระด้าง (Alkalinity) ค่าแมกนีเซียม และค่าแคลเซียมของน้ำในระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง

ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในเนื้อ (meat) และในตัว (whole body) ของกุ้งก้ามกราม ได้แก่ โปรตีน ไขมัน ความชื้น เถ้า โดยวิธีของ AOAC (1990) และทำการศึกษาคุณสมบัติของเนื้อกุ้งในด้าน สี (color), การสูญเสียสภาพหลังทำให้สุก (cooking loss) และด้านเนื้อสัมผัส (texture) ตามวิธีของ Xu และคณะ (2016) โดยเปรียบเทียบระหว่างกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโดและกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในบ่อดิน

การทดลองที่ 4. การทดสอบระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในสภาวะต่าง ๆ

การเตรียมสัตว์ทดลอง การทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล

กุ้งก้ามกรามที่ต้องการทดสอบ มาทำการปรับสภาพสัตว์ทดลองเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ โดยใช้อาหารทางการค้า (commercial diet) ที่มีโปรตีนไม่น้อยกว่า 36% ไขมันไม่น้อยกว่า 4% โดยให้อาหารแบบไม่จำกัด (ad libitum) ทุกวัน ซึ่งมีการให้อาหารวันละ 4 มื้อ (08.00, 11.00, 14.00 และ 17.00 น.) หลังจากนั้นทำการสุ่มชั่งน้ำหนักกุ้งก้ามกรามเพื่อเข้าการทดลอง โดยทำศึกษาเปรียบเทียบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง (ขนาดห้องเลี้ยง 70 ลิตร) และการเลี้ยงกุ้งตะกร้า (50 x 35 x 20 ซม.) ต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม เป็นระยะเวลา 1 เดือน จากนั้นทำการเก็บข้อมูลสมรรถนะการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามและนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณสมรรถนะการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม (ตารางที่ 10) เพื่อทำการวิเคราะห์ผลของระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในสภาวะต่าง ๆ ต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง ซึ่งตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ได้ทำการวัดอุณหภูมิอากาศและคุณภาพน้ำในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามได้แก่ อุณหภูมิน้ำ ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (Dissolved oxygen; DO), ค่าพีเอช (pH)

การทดลองที่ 5. การพัฒนาอาหารที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงกุ้งในระบบการเลี้ยงแบบแนวตั้ง โดยการศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหารของกุ้งก้ามกราม

การเตรียมสัตว์ทดลอง

กุ้งก้ามกราม ระยะ Juvenile (น้ำหนักตัวเริ่มต้น 40-50 กรัม) ที่ต้องการทดลอง นำมาปรับสภาพสัตว์ทดลองเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ โดยใช้อาหารทางการค้า (commercial diet) ที่มีโปรตีนไม่น้อยกว่า 36% ไขมันไม่น้อยกว่า 4% โดยให้อาหารแบบไม่จำกัด (ad libitum) ทุกวัน ซึ่งมีการให้อาหารวันละ 4 มื้อ (08.00, 11.00, 14.00 และ 17.00 น.) หลังจากนั้นทำการสุ่มชั่งน้ำหนักกุ้งก้ามกรามเพื่อเข้าการทดลอง โดยทำการเพาะเลี้ยงแบบกุ้งห้องแถว ซึ่งเป็นการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในตาข่ายพลาสติก (40 x 40 x 60 ซม.) ที่วางในบ่อซีเมนต์ (5 x 10 ตารางเมตร) เลี้ยงกุ้งก้ามกราม 1 ตัวต่อ 1 ตาข่ายพลาสติก ซึ่งระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งห้องแถวมรการใช้ระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด (Recirculating Aquaculture system)

อาหารทดลองและการเตรียมอาหาร

อาหารที่ใช้ในการทดลองนี้คำนวณตามหลัก NRC (1993) โดยมีวัตถุดิบอาหารดังแสดงในตารางที่ 12 โดยอาหารทดลอง แบ่งออกเป็นสองกลุ่มอาหารทดลอง (treatment) ประกอบด้วย (1) อาหารที่ไม่มีการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลือง (High fishmeal diet; FD) และ (2) อาหารที่มีการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลือง (Plant protein base diet; PD) ซึ่งอาหารทดลองจะถูกเตรียมผสมให้ละเอียดและอัดเม็ดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร หลังจากอัดเม็ดอาหารเสร็จ อาหารจะถูกทำให้แห้งและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 °c จนกว่าจะใช้ได้ จากนั้นนำอาหารทดลองไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โปรตีน ไขมัน ความชื้น เถ้า โดยวิธีของ AOAC (1990) (ตารางที่ 12)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 12 ปริมาณวัตถุดิบและองค์ประกอบทางเคมีของอาหารการทดลอง

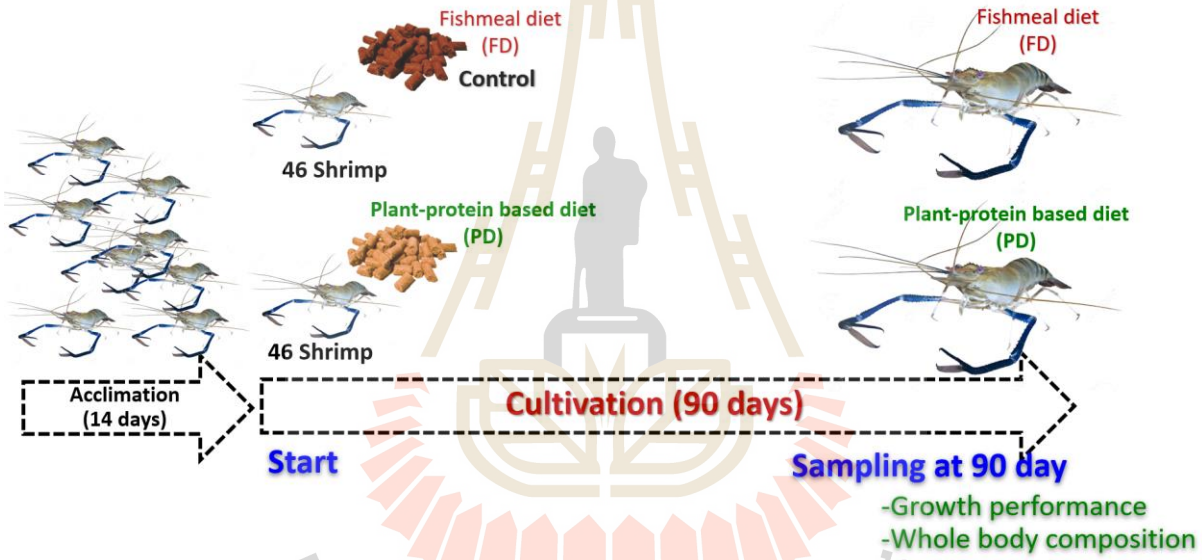
Diets	High fishmeal diet (FD)	Plant protein base diet (PD)
Ingredient (g/kg)		
Fishmeal	269	0
Shrimp head meal	40	40
Soybean meal	240	427
Wheat gluten meal	60	140
Rice bran	100	100
Wheat flour	170	170
Fish oil/Soybean oil*	30	40
Methionine	0	2
Lecithin	10	10
Cholesterol	10	10
Astaxantine	1	1
Sodium propionate	10	10
Dicalcium phosphate	10	10
Mineral and Vitamin premix[a]	40	40
Proximate analyses (%)		
Dry matter	92.79±0.35	93.62±0.30
Crude protein	35.73±0.19	35.86±0.17
Crude lipid	6.33±0.23	6.19±0.03
Crude fiber	5.02±0.30	3.60±0.37
Ash	15.68±0.10	9.18±0.03
Nitrogen free extract	29.29±0.74	38.65±0.76
Energy (kcal/g)	3,756.51±10.95	4,107.21±30.75

[a] Vitamin and trace mineral mix provided the following (IU kg−1 or g kg−1diet): biotin, 0.25 g; folic acid, 0.003 g; inositol, 0.25 mg; niacin, 0.0215 g; pantothenic acid, 0.03 g; vitamin A, 5000 IU; vitamin B1, 0.0025 g; vitamin B2, 0.0012 g; vitamin B6, 0.0075 g; vitamin B12 0.00005 mg; vitamin C, 1 g; vitamin D3, 1000 IU; vitamin E, 100 IU; vitamin K, 0.008 g; copper, 0.02 g; iron, 0.2 g; selenium, 0.3 mg; zinc, 0.32 g.

* FD diet

การทดลองและการเก็บรวบรวมข้อมูล

แผนการทดลองที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (complete randomized design) โดยอาหารที่มีการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลือง และอาหารที่ไม่มีการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่งเหลือง แต่ละกลุ่มทดลองมีจำนวนซ้ำ 46 ซ้ำ (ตัว) ทำการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามด้วยอาหารทดลองเป็นระยะเวลา 90 วัน หลังจากนั้นทำการเก็บข้อมูลสมรรถนะการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม (ภาพที่ 9) และนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณสมรรถนะการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม (ตารางที่ 10) เพื่อทำการวิเคราะห์ผลอาหารที่มีการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองต่อสมรรถนะการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม ในตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ได้ทำการวัดอุณหภูมิอากาศ และคุณภาพน้ำในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในคอนโดในแต่ละชุดการเลี้ยง ได้แก่ อุณหภูมิน้ำ ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (Dissolved oxygen; DO) ค่าพีเอช (pH) ค่าแอมโมเนีย (Ammonia) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) ค่าความกระด้าง (Alkalinity) ค่าแมกนีเซียม และค่าแคลเซียมของน้ำในระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม



ภาพที่ 9 แผนการศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหารของกุ้งก้ามกราม

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในตัว (whole body) ของกุ้งก้ามกราม

ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในตัว (whole body) ของกุ้งก้ามกราม ได้แก่ โปรตีน ไขมัน ความชื้น เถ้า โดยวิธีของ AOAC (1990) จากกุ้งก้ามกรามที่ได้รับอาหารการทดลอง

การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

การศึกษาครั้งนี้ใช้การวิเคราะห์ T-test Analysis of variance (ANOVA) เพื่อวิเคราะห์ค่าความแตกต่างระหว่างกลุ่มทดลอง โดยเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่ไม่มีการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลือง (High fishmeal diet; FD) และกลุ่มอาหารที่มีการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลือง (Plant protein base diet; PD) ตลอดการทดลองนี้ยอมรับความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($P<0.05$)

กิจกรรมที่ 2: การพัฒนา Smart Farming เพื่อประเมินและจัดการสุขภาพสัตว์

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. iBeacons เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งกับเพื่อใช้ระบุตำแหน่ง
2. Infrared Temperature Sensor เซนเซอร์อุณหภูมิแบบ ไร้สัมผัส
3. 3G Router ใช้เป็นเครือข่ายที่เชื่อมโยงอุปกรณ์อุปกรณ์เข้าด้วยกัน
4. ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ใช้สำหรับตรวจสอบระยะทางระหว่าง iBeacons กับตัว ESP32 และทำหน้าที่ส่งข้อมูลไป Server
5. Computer Server ใช้ทำหน้าที่รับข้อมูลจาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32, จัดเก็บข้อมูลลงฐานข้อมูล และประมวลผลข้อมูล

การศึกษากระบวนการทางชีววิทยาและค่าทางสรีรวิทยา

ศึกษากระบวนการทางชีววิทยาและค่าทางสรีรวิทยา (Sensitive biological element) ในตัวสัตว์ที่จะนำมาตรวจวัด ประกอบด้วย การเคลื่อนที่ และ อุณหภูมิ โดยใช้โคนมเป็นโมเดล

การพัฒนาไบโอเซนเซอร์

1. พัฒนาการแปลงสัญญาณจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น (Transducer หรือ detector element) อาทิเช่น อุณหภูมิ การเคลื่อนที่ของสัตว์ ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า เพื่อจะนำไปวิเคราะห์ต่อไป
2. พัฒนาส่วนที่จะวิเคราะห์สัญญาณ (Associated electronics หรือ signal processors) เมื่อได้สัญญาณมาแล้วจะนำเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้มาเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและแปลผลได้

Server

Server จะเป็นแบบ Local MQTT Server เพื่อรับค่าจาก IoT Device โดยสามารถรับค่าด้วย Message Queuing Telemetry Transport Protocol มีระบบ Authentication ด้วย Username และ Password สามารถแยกข้อมูลใน Topic ที่รับมา และบันทึกลงในฐานข้อมูล

ฐานข้อมูล (Database)

ระบบ Database เพื่อบันทึกข้อมูลและประมวลผลข้อมูลมีการใช้งานดังนี้

1. สามารถ Select query เพื่อดึงข้อมูลที่ต้องการได้
2. สามารถ Update query เพื่อแก้ไขข้อมูลได้
3. สามารถ Insert query เพื่อเพิ่มข้อมูลได้
4. สามารถ Delete query เพื่อลบข้อมูลออกได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

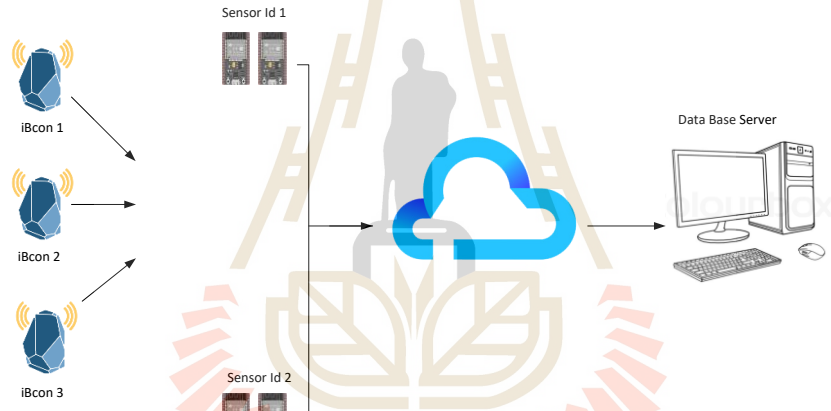
แอพพลิเคชั่นแสดงข้อมูล (Application)

1. การแสดงข้อมูลเป็นระบบ Web Server
2. สามารถแสดงผลแบบ Web Application
3. สามารถแสดงผลพิกัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของสัตว์แต่ล่ะตัวในรูปแบบกราฟ
4. สามารถแสดงผลข้อมูลอุณหภูมิของสัตว์แต่ล่ะตัวได้
5. สามารถกำหนดขอบเขต ค่าสูงสุด ต่ำสุด ของอุณหภูมิและระยะทางที่เคลื่อนที่ สำหรับการแจ้งเตือน
6. สามารถดูข้อมูลย้อนหลังจากฐานข้อมูลแบบรายวันได้

การทำงานของระบบ

1. กระบวนการติดตามตำแหน่ง

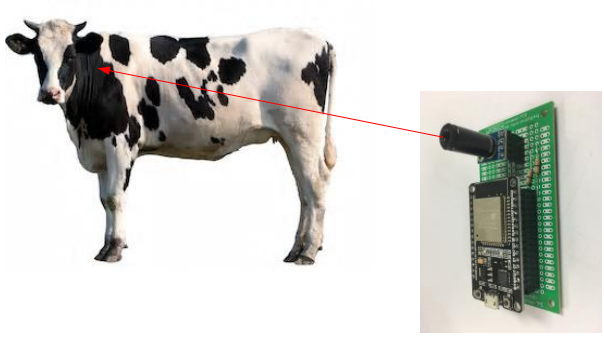
การทำงานของระบบ Sensor Id 1 และ 2 จะสแกนหาตัว iBeacon แล้วนำมาคำนวณหาระยะทางระหว่าง iBeacon แต่ละตัวกับ Sensor Id 1 และ 2 และส่งมูลไปเก็บที่ฐานข้อมูล ตามช่วงเวลาที่กำหนด



ภาพที่ 10 ระบบการติดตามการเคลื่อนที่โค

2. การวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัสตัววัว

การวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส จะใช้ Sensor GY-906 (Infrared Temperature Sensor Module) เซนเซอร์อุณหภูมิแบบไร้สัมผัส ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 11 การใช้งาน Sensor GY-906

ในการวัดค่าอุณหภูมิจะดำเนินการวัด 5 จุด คือ หัว (Head), คอ (Neck) , หัวไหล่ (Shoulder) , ท้อง (Body) และ ต้นขา (Thigh) ต่อจากนั้นก็นำตัววัดอุณหภูมิเข้าไปใกล้ตัว iBecons ที่ระยะห่างไม่เกิน 50 cm ข้อมูลดังกล่าวจะถูกส่งไปจัดเก็บที่ server

3. กระบวนการทำงานของ Server

มีการแสดงผลแบบ Web Application , แสดงผลพิกัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของสัตว์แต่ล่ะตัวในรูปแบบกราฟ ได้แบบ Real Time, สามารถดูข้อมูลย้อนหลังจากฐานข้อมูลแบบรายวันได้ สามารถตั้งการแจ้งเตือนผ่าน Line Notifier, E-mail และ Web Application ได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

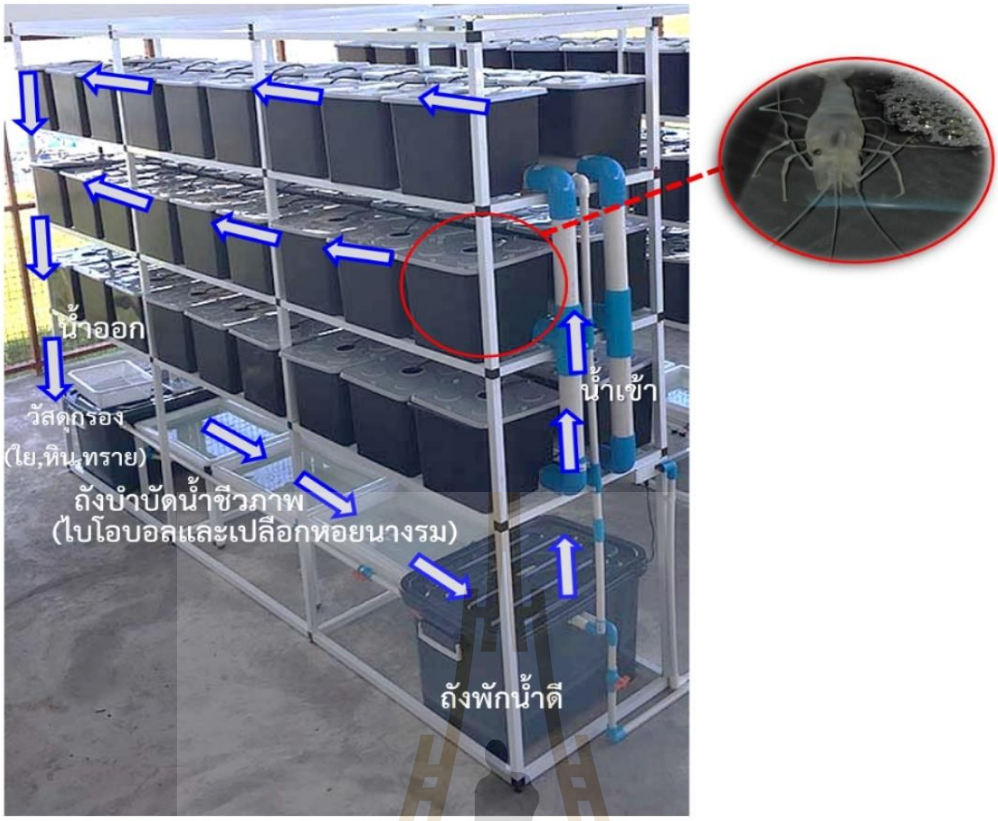
บทที่ 4
ผลการวิจัย

กิจกรรมที่ 1: ระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบอัจฉริยะ

1. การศึกษาขนาดห้องเลี้ยงที่เหมาะสม ในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้ง

จากการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในประเทศไทยมีปัญหาในเรื่องของพื้นที่การเพาะเลี้ยงที่จำกัด จึงทำให้การขยายตัวการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเป็นไปได้ยาก อีกทั้งกุ้งก้ามกรามมีระยะเวลาการเลี้ยงนาน 8-10 เดือน เมื่อเปรียบเทียบกับการเพะเลี้ยงสัตว์น้ำชนิดอื่น ๆ และการเพาะเลี้ยงกุ้งในบ่อดินมีค่าอัตราการรอดต่ำมาก ดังนั้นการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง (vertical shrimp farming) จึงเป็นทางเลือกที่สำคัญในการนำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในเชิงพาณิชย์ ซึ่งเหมาะแก่การเลี้ยงกุ้งให้มีขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นกุ้งที่มีราคาสูง ซึ่งการเลี้ยงกุ้งในบ่อดินเพื่อให้ได้กุ้งขนาดใหญ่ต้องใช้พื้นที่มาก และน้ำปริมาตรมาก ระยะเวลานาน จึงเป็นไปได้ยาก ซึ่งการพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง ต้องมีการศึกษาขนาดห้องเลี้ยงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เป็นต้น

การศึกษาขนาดห้องเลี้ยงที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงกุ้งแบบแนวตั้ง ซึ่งทำการทดสอบห้องเลี้ยงขนาด 10, 12 และ 37.5 ลิตร โดยทำการเลี้ยงกุ้งขนาดประมาณ 50 กรัม มาเลี้ยงห้องละ 1 ตัว ในห้องเลี้ยงที่มีขนาด (ปริมาตรน้ำ) 10 ลิตร (คอนโด A และ B) (ภาพที่ 12) เป็นระยะเวลาประมาณ 1 เดือน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโด A และ B มีน้ำหนักตัวที่เพิ่ม (Weight gain; WG) 7.32±3.21 กรัม และ 7.19±3.36 กรัม มีน้ำหนักตัวที่เพิ่มเฉลี่ย (Average daily weight gain; ADG) 0.25±0.14 กรัมต่อวัน และ 0.23±0.10 กรัมต่อวัน ค่าการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific growth rate; SGR) 0.44±0.23 % และ 0.40±0.20 % กุ้งมีค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (Feed conversion ratio; FCR) 4.34±2.51 และ 4.07±2.12 ตามลำดับ นอกจากนี้อัตราการรอด (survival rate) ของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโดที่มีขนาด 10 ลิตร ตลอดระยะการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 61.17±2.54 % (ตารางที่ 13) จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าควรมีการขยายขนาดห้องเลี้ยงเพิ่มขึ้น และระยะเวลาการเลี้ยง เพื่อเพิ่มสมรรถนะการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม การศึกษาผลของขนาดห้องเลี้ยงปริมาตร 12 ลิตร (ภาพที่ 23) โดยนำกุ้งก้ามกรามประมาณ 30 กรัมขึ้นไปมาเลี้ยงเป็นระยะเวลา 90 วัน จากผลการศึกษาพบว่ากุ้งก้ามกรามมีน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น 9.08±2.11 กรัม มี ADG 0.3±0.07 กรัมต่อวัน มี SGR 0.7±0.04 % มี Relative weight gain (RWG) 23.59±1.37 % มี Relative weight gain/day (RWG/day) 0.79±0.05 %/day และ FCR 1.35±0.05 (ตารางที่ 14) นอกจากนี้ความแตกต่างของสีห้องเลี้ยง ได้แก่ สีเหลือง สีน้ำเงิน และสีดำไม่ส่งผลทำให้การเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโดแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามควรมีการขยายขนาดห้องเลี้ยงเพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มสมรรถนะการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม



ภาพที่ 12 การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงน้ำปริมาตร 10 ลิตร ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด

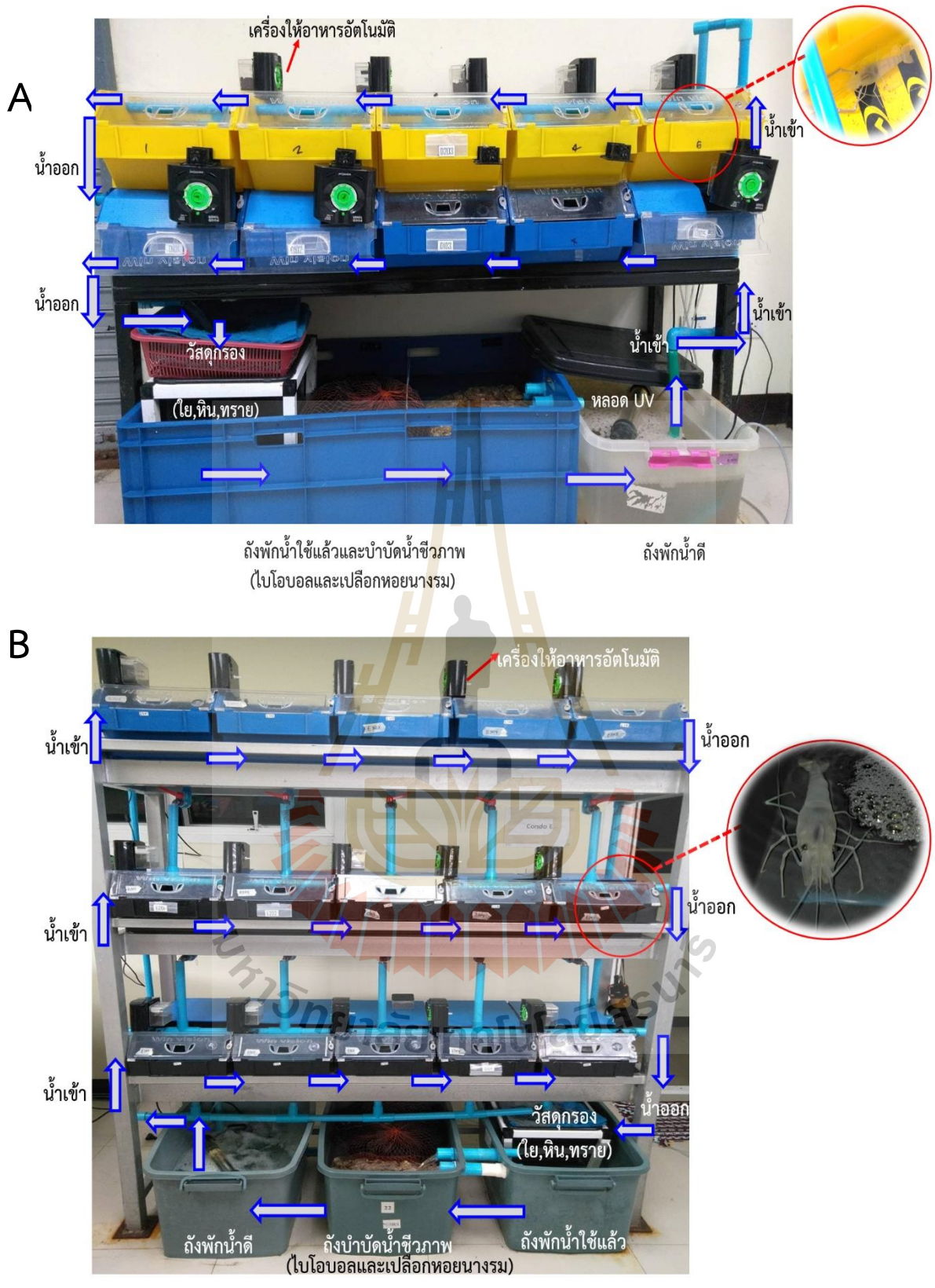
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 13 การเจริญเติบโตของกุ้งที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยง (กุ้ง 50 กรัม ต่อน้ำ 10 ลิตร) เป็นระยะเวลา 30 วัน (mean ± sd, n=59)

Condo	Initial weight (g)	Final weight (g)	Weight gain (g)	ADG (g/day)	SGR (%)	RWG (%)	Feed intake (g/day)	FCR	Survival rate (%)
A	51.83±7.21	59.15±8.29	7.32±3.21	0.25±0.14	0.44±0.23	14.24±6.16	0.77±0.14	4.34±2.51	62.96
B	56.42±7.81	63.61±7.39	7.19±3.36	0.23±0.1	0.4±0.2	13.29±7.05	0.76±0.14	4.07±2.12	59.38
Average	**54.13±3.24**	**61.38±3.15**	**7.25±0.09**	**0.24±0.01**	**0.42±0.03**	**13.76±0.67**	**0.76±0.01**	**4.21±0.19**	**61.17±2.54**

หมายเหตุ Average daily gain (ADG) = (final body weight – initial body weight) / experimental days), Specific growth rate (SGR) = 100 x [(ln final body weight – ln initial body weight) / experimental days], Relative weight gain (RWG) = (Weight gain/ initial weight) x 100, Feed conversion ratio (FCR) = dry feed fed /weight gain

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาพที่ 13 การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงน้ำปริมาตร 12 ลิตร ที่มีสีห้องเลี้ยงเป็นสีเหลือง สีน้ำเงิน (A) และห้องเลี้ยงสีดำ (B) ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด

ตารางที่ 14 การเจริญเติบโตของกุ้งที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยง (กุ้ง 30 กรัม ต่อน้ำ 12 ลิตร) เป็นระยะเวลา 3 เดือน (mean ± sd, n=24)

Duration (month)	Initial weight (g)	Final weight (g)	Weight gain (g)	ADG (g/day)	SGR (%)	RWG (%)	RWG/Day (%/day)	Feed intake (g/day)	FCR
1	31.04±4.87	37.91±5.8	6.87±1.35	0.23±0.05	0.67±0.1	22.2±3.57	0.74±0.12	0.31±0.04	1.41±0.22
2	37.91±5.80	47.2±6.51	9.29±1.13	0.31±0.04	0.74±0.1	24.94±3.77	0.83±0.13	0.4±0.04	1.3±0.17
3	47.18±6.49	58.25±7.62	11.07±1.57	0.37±0.05	0.71±0.07	23.62±2.68	0.79±0.09	0.49±0.04	1.34±0.16
Average	**-**	**-**	**9.08±2.11**	**0.3±0.07**	**0.7±0.04**	**23.59±1.37**	**0.79±0.05**	**0.4±0.09**	**1.35±0.05**

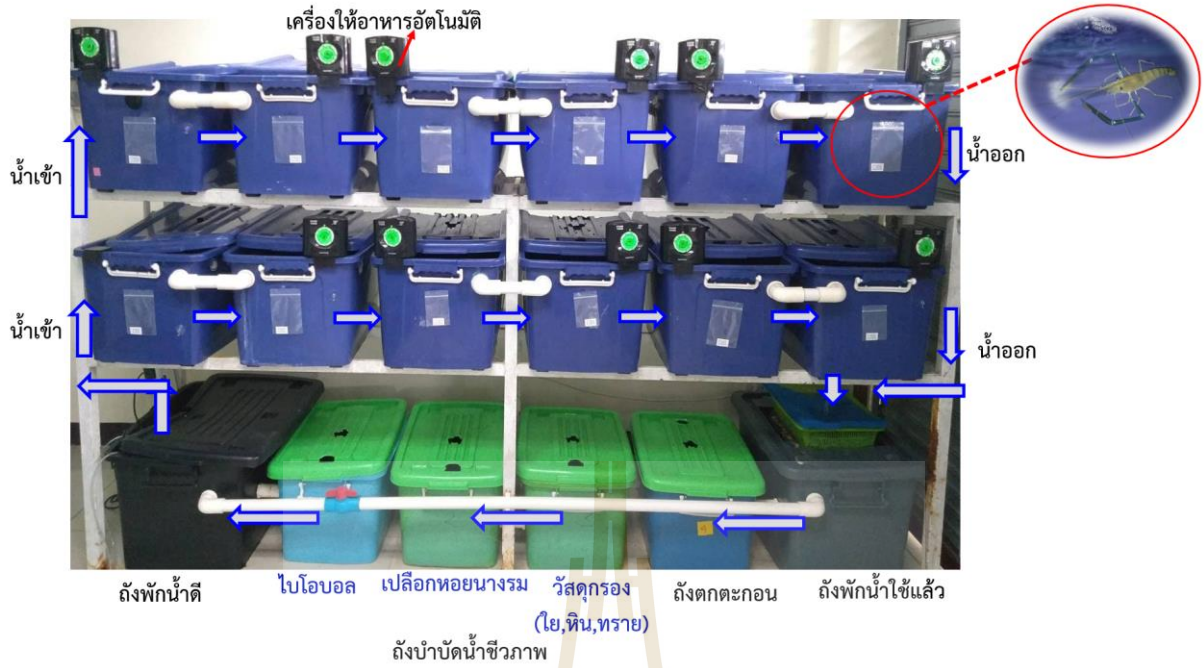
หมายเหตุ Average daily gain (ADG) = (final body weight – initial body weight) / experimental days), Specific growth rate (SGR) = 100 x [(ln final body weight – ln initial body weight) / experimental days], Relative weight gain (RWG) = (Weight gain/ initial weight) x 100, Relative weight gain (RWG)/day = ((Weight gain/ initial weight)/ experiment day) x 100 and Feed conversion ratio (FCR) = dry feed fed /weight gain

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ต่อมาทำการขยายขนาดห้องเลี้ยง เป็นขนาดห้องเลี้ยงน้ำปริมาตร 37.5 ลิตร (ภาพที่ 14) โดยนำกุ้งก้ามกรามขนาด 40 กรัมขึ้นไปมาทำการเลี้ยงเป็นระยะเวลา 7 เดือน พบว่าในช่วง 1-3 เดือนแรก กุ้งก้ามกรามมีน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น 15.37-20.33 กรัม มี ADG 0.51-0.68 กรัมต่อวัน มี SGR 0.74-1.03 % มี RWG 25.16-36.08 % มี RWG/day 0.84-1.20 %/day มีการกินได้ 0.73-0.99 กรัมต่อวัน และ FCR 1.29-1.66 และเมื่อเข้าเดือนที่ 4 ถึงเดือนที่ 7 พบว่ากุ้งก้ามกรามมีน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น 8.29-8.6 กรัม มี ADG 0.28-0.29 กรัมต่อวัน มี SGR 0.22-0.28 % มี RWG 6.79-8.91 % มี RWG/day 0.23-0.30 %/day มีการกินได้ 0.82-1.97 กรัมต่อวัน และ FCR 2.95-6.71 (ตารางที่ 15) จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากุ้งก้ามกรามขนาด 40 กรัมขึ้นไปสามารถเจริญเติบโตได้ในห้องเลี้ยงขนาด 37.5 ลิตร จนมีขนาดถึง 97.07±5.48 กรัม และเมื่อเข้าเดือนที่ 4-7 กุ้งก้ามกรามมีค่าน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น ค่า ADG, ค่า SGR, ค่า RWG, ค่า RWG/day ลดลง และ FCR เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าห้องเลี้ยงขนาด 37.5 ลิตร เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามตั้งแต่ขนาด 40 กรัมขึ้นไปและไม่เกิน 100 กรัม

นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามเพศผู้และเพศเมียที่ถูกเลี้ยงในคอนโดที่มีห้องขนาด 37.5 ลิตร พบว่าที่ระยะเวลาการเลี้ยง 30 วัน กุ้งเพศผู้มีน้ำหนักตัวเพิ่ม 35.88±8.32 กรัม มี ADG 1.20±0.28 กรัมต่อวัน มี SGR 1.37±0.31 % มี RWG 51.22±14.67 % ค่าการกินได้ (Feed intake, FI) 2.28±0.56 กรัมต่อวัน และมีค่า FCR 1.9±0.08 ในขณะที่กุ้งเพศเมียมีน้ำหนักตัวเพิ่มขึ้น 29.84±8.18 กรัม มี ADG 0.99±0.27 กรัมต่อวัน มี SGR 1.45± 0.04 % มีค่า RWG 55.27±18.31 % ค่าการกินได้ 1.94±0.50 กรัมต่อวัน และมีค่า FCR 1.96±0.08 และเมื่อทำการเลี้ยงกุ้งที่ระยะเวลาการเลี้ยง 60 วัน พบว่า กุ้งเพศผู้มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นอีก 26.40±5.20 กรัม มี ADG 0.88±0.17 กรัมต่อวัน มีค่า SGR 0.73± 0.09 % มี RWG 24.61±3.18 % ค่าการกินได้ 1.71±0.25 กรัมต่อวัน และมีค่า FCR 1.96±0.25 ส่วนกุ้งเพศเมียมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นอีก 21.45±6.50 กรัม มี ADG 0.71±0.22 กรัมต่อวัน มี SGR 0.74± 0.20 % มี RWG 25.02±7.41 % ค่าการกินได้ 1.57±0.13 กรัมต่อวัน และมีค่า FCR 2.38 ±0.73 และกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาด 37.5 ทั้งในเพศผู้และเพศเมียมีอัตรารอด เท่ากับ 100 % (ตารางที่ 16)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาพที่ 14 การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงน้ำปริมาตร 37.5 ลิตร ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 15 การเจริญเติบโตของกุ้งที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงขนาด 37.5 ลิตร เป็นระยะเวลา 7 เดือน (mean ± sd, n=11)

Duration (month)	Initial weight (g)	Final weight (g)	Weight gain (g)	ADG (g/day)	SGR (%)	RWG (%)	RWG/Day (%)	Feed intake (g/day)	FCR
1	42.6±3.12	57.97±4.4	15.37±1.71	0.51±0.06	1.03±0.08	36.08±3.14	1.2±0.1	0.73±0.05	1.44±0.15
2	57.97±4.4	78.31±4.4	20.33±2.55	0.68±0.08	1.01±0.14	35.35±5.88	1.18±0.2	0.86±0.07	1.29±0.17
3	77.63±4.45	97.07±5.85	19.44±4.88	0.65±0.16	0.74±0.17	25.16±6.37	0.84±0.21	0.99±0.11	1.66±0.62
4	97.07±5.48	105.67±5.26	8.6±1.75	0.29±0.06	0.28±0.06	8.91±2.05	0.3±0.07	0.82±0.08	2.95±0.49
5	105.67±5.26	114±6.07	8.34±1.41	0.28±0.05	0.25±0.04	7.88±1.18	0.26±0.04	0.95±0.09	3.55±0.9
6	114±6.07	122.84±5.97	8.84±0.83	0.29±0.03	0.25±0.03	7.78±0.9	0.26±0.03	1.97±1.13	6.62±3.53
7	122.84±5.97	131.13±5.07	8.29±1.27	0.28±0.04	0.22±0.04	6.79±1.32	0.23±0.04	1.83±1.42	6.71±5.46
Average	-	-	**12.74±5.49**	**0.42±0.18**	**0.54±0.37**	**18.28±13.5**	**0.61±0.45**	**1.17±0.51**	**3.46±2.34**

หมายเหตุ Average daily gain (ADG) = (final body weight – initial body weight) / experimental days), Specific growth rate (SGR) = 100 x [(ln final body weight – ln initial body weight) / experimental days], Relative weight gain (RWG) = (Weight gain/ initial weight) x 100, Relative weight gain (RWG)/day = ((Weight gain/ initial weight)/ experiment day) x 100 and Feed conversion ratio (FCR) = dry feed fed /weight gain

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 16 การเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามเพศผู้ และเพศเมียที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงขนาด 37.5 ลิตร เป็นระยะเวลา 60 วัน (mean ± sd, n=6)

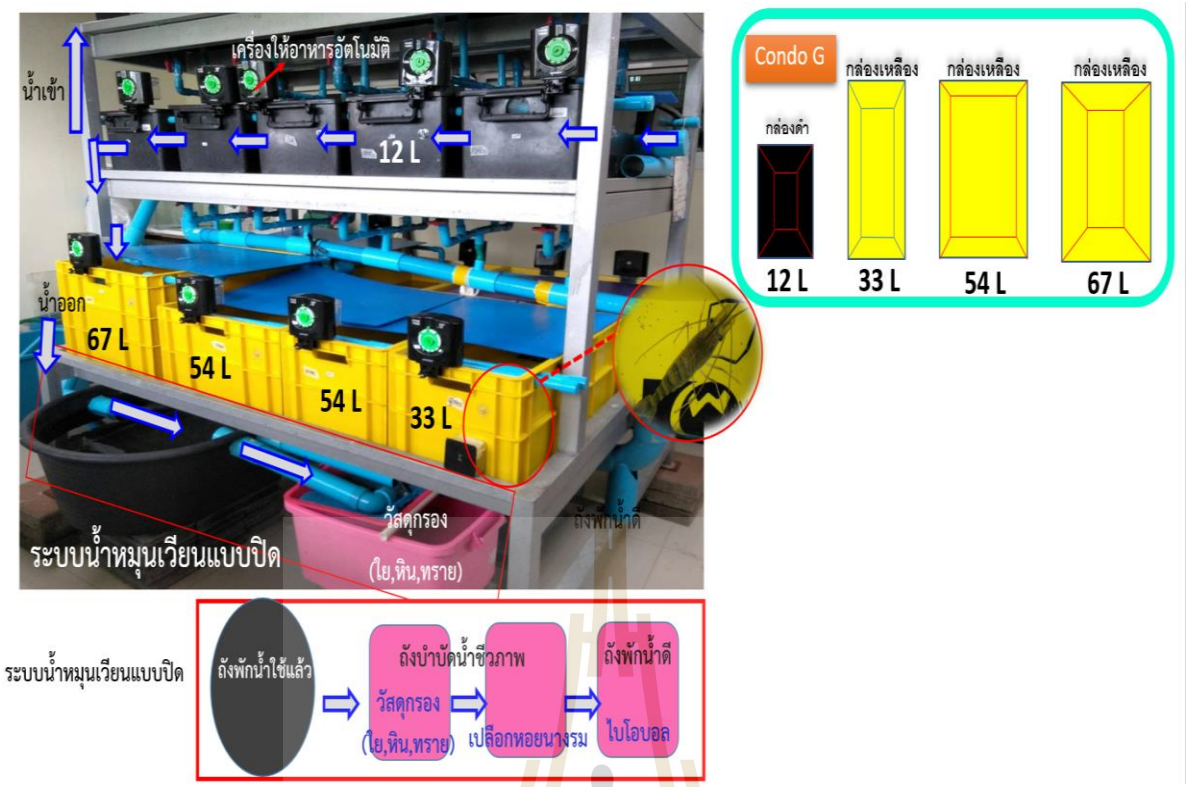
Sex	Initial weight (g)	Final weight (g)	Weight gain (g)	ADG (g/day)	SGR (%)	RWG (%)	Feed intake (g/day)	FCR	Survival rate (%)
1st month									
Male	71.00±7.22	106.88±9.91	35.88±8.32	1.20±0.28	1.37±0.31	51.22±14.67	2.28±0.56	1.90±0.08	100
Female	55.81±5.60	85.65±10.51	29.84±8.18	0.99±0.27	1.45±0.40	55.27±18.31	1.94±0.50	1.96±0.08	100
2nd month									
Male	106.88±9.91	133.27±14.26	26.40±5.20	0.88±0.17	0.73±0.09	24.61±3.18	1.71±0.25	1.96±0.25	100
Female	85.65±5.91	107.10±14.02	21.45±6.50	0.71±0.22	0.74±0.20	25.02±7.41	1.57±0.13	2.38±0.73	100

หมายเหตุ Average daily gain (ADG) = (final body weight – initial body weight) / experimental days), Specific growth rate (SGR) = 100 x [(ln final body weight – ln initial body weight) / experimental days], Relative weight gain (RWG) = (Weight gain/ initial weight) x 100, Feed conversion ratio (FCR) = dry feed fed /weight gain

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การศึกษาผลของห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ ต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม ห้องเลี้ยงมีขนาดปริมาตรน้ำ 12, 33, 54 และ 67 ลิตร (ภาพที่ 15) โดยใช้กุ้งก้ามกรามที่จับได้จากบ่อดิน ซึ่งเป็นกุ้งที่มีขนาดไม่ได้มาตรฐาน (ตก size) หากนำไปขายจะมีราคาต่ำ ดังนั้นจึงนำกุ้งก้ามกรามดังกล่าวมาใช้ในการทดสอบห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ โดยทำการเลี้ยงเป็นระยะเวลา 90 วัน ในระบบการเลี้ยงที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดเดียวกัน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในห้องขนาด 12 ลิตร มี weight gain 36.92±3.97 กรัม มี ADG 0.41±0.04 กรัมต่อวัน มี SGR 0.83±0.09 % มี RWG 111.64±16.15 % มี RWG/day 1.24±0.18 %/day และ FCR 1.16±0.06 กุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในห้องขนาด 33 ลิตร มี weight gain 55.36±1.80 กรัม มี ADG 0.62±0.02 กรัมต่อวัน มี SGR 0.98±0.05 % มี RWG 142.73±10.76 % มี RWG/day 1.59±0.12 %/day และ FCR 1.44±0.04 กุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในห้องขนาด 54 ลิตร มี weight gain 55.76±0.93 กรัม มี ADG 0.62±0.01 กรัมต่อวัน มี SGR 0.96±0.00 % มี RWG 137.38±0.10 % มี RWG/day 1.53±0.00 %/day และ 1.47±0.04 และกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในห้องขนาด 67 ลิตร มี weight gain 61.64±5.64 กรัม มี ADG 0.68±0.06 กรัมต่อวัน มี SGR 0.99±0.02 % มี RWG 144.36±3.34 % มี RWG/day 1.60±0.04 %/day และมีค่า FCR 1.33±0.05 (ตารางที่ 17) จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในห้องขนาด 67 ลิตร มี weight gain สูงที่สุด และมีค่า FCR ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับห้องเลี้ยงขนาด 12, 33 และ 54 ลิตร แต่มีค่า ADG, SGR, RWG และ RWG/day ไม่แตกต่างจากกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในห้องขนาด 33 และ 54 ลิตร นอกจากนี้กุ้งที่เลี้ยงในห้องปริมาตร 12 ลิตร มีอัตราการเจริญเติบโตที่ต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามขนาดของห้องเลี้ยงกุ้งก้ามกรามไม่มีผลต่ออัตรารอดของกุ้งก้ามกราม (ตารางที่ 17)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาพที่ 15 การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงน้ำปริมาตร 12, 33, 54 และ 67 ลิตร ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 17 การเจริญเติบโตของกุ้งในห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ ที่ระยะเวลาการเลี้ยง 90 วัน (mean ± sd)

Size of unit (L)	Initial weight (g)	Final weight (g)	Weight gain (g)	ADG (g/day)	SGR (%)	RWG (%)	RWG/day (%/day)	Feed intake (g/day)	FCR	Survival rate (%)
12 L.	33.28±2.08	70.20±3.19	36.92±3.97	0.41±0.04	0.83±0.09	111.64±16.15	1.24±0.18	0.47±0.03	1.16±0.06	100±0.00
33 L.	38.97±3.43	94.33±4.50	55.36±1.80	0.62±0.02	0.98±0.05	142.73±10.76	1.59±0.12	0.89±0.01	1.44±0.04	100±0.00
54 L.	40.59±0.64	96.34±1.57	55.76±0.93	0.62±0.01	0.96±0.00	137.38±0.10	1.53±0.00	0.91±0.01	1.47±0.04	100±0.00
67 L.	42.67±2.92	104.31±8.56	61.64±5.64	0.68±0.06	0.99±0.02	144.36±3.34	1.60±0.04	0.91±0.05	1.33±0.05	100±0.00

หมายเหตุ Average daily gain (ADG) = (final body weight – initial body weight) / experimental days), Specific growth rate (SGR) = 100 x [(ln final body weight – ln initial body weight) / experimental days], Relative weight gain (RWG) = (Weight gain/ initial weight) x 100, Relative weight gain (RWG)/day = ((Weight gain/ initial weight)/ experiment day) x 100 and Feed conversion ratio (FCR) = dry feed fed /weight gain

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เนื่องจากคอนโดกุ้งที่มีขนาดห้องเลี้ยง 10 ลิตร มีขนาดที่เล็กเกินไปที่จะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่มีขนาดเริ่มต้นประมาณ 40-50 กรัม ดังนั้นโครงการจึงได้ทดลองเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาดที่เล็กลง เพื่อทดสอบความเหมาะสมของห้องเลี้ยงต่อการเจริญเติบโตของการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่มีขนาดเล็ก โดยการนำกุ้งขนาดเล็กที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 18 กรัมขึ้นไป มาทำการเลี้ยงในห้องเลี้ยงที่มีปริมาตรน้ำ 10 ลิตร เป็นระยะเวลา 90 วัน พบว่าในระยะเวลาเดือนที่ 1 เดือน (30 วัน) กุ้งก้ามกรามมี weight gain 6.48±3.09 กรัม มี ADG 0.14±0.07 กรัมต่อวัน มี SGR 6.66±1.11 % มีค่า RWG 34.88±6.89 % ค่า RWG/day 0.78±0.15 %/day มีค่าการกินได้ 0.75±0 กรัมต่อวัน และค่า FCR 6.45±3.13 (ตารางที่ 18) การเจริญเติบโตของกุ้งในเดือนที่ 2 กุ้งก้ามกรามมี weight gain 7.07±1.83 กรัม มี ADG 0.19±0.05 กรัมต่อวัน มี SGR 8.56±1.07 % มีค่า RWG 34.72±5.79 % ค่า RWG/day 0.94±0.16 %/day มีค่าการกินได้ 0.91±0 กรัมต่อวัน และค่า FCR 5.18±1.74 (ตารางที่ 18) และในเดือนที่ 3 ของการลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาด 10 ลิตร พบว่ากุ้งมี weight gain 8.89±2.43 กรัม มี ADG 0.31±0.08 กรัมต่อวัน มี SGR 11.95±1.27 % มีค่า RWG 32.25±5.57 % ค่า RWG/day 1.11±0.19 %/day มีค่าการกินได้ 0.75±0 กรัมต่อวัน และค่า FCR 2.69±1.01 (ตารางที่ 18) ซึ่งที่ระยะเวลาการเลี้ยงในเดือนที่ 3 มีการเจริญเติบโตที่สูงกว่าเดือนที่ 1 และเดือนที่ 2 แสดงให้เห็นว่ากุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงเป็นระยะเวลา 3 เดือน ในห้องขนาด 10 ลิตร มีการปรับตัวเพื่อการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (ADG) เท่ากับ 0.14-0.31 กรัมต่อวัน ถือว่ากุ้งก้ามกรามมีการเจริญเติบโตต่อวันที่ต่ำ ดังนั้นห้องเลี้ยงขนาด 10 ลิตรไม่น่าที่จะเหมาะต่อการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 18 กรัมขึ้นไป เพื่อการเจริญเติบโต ต่อมาทำการศึกษาในกุ้งก้ามกรามที่มีขนาดเล็กที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 2 กรัมขึ้นไป มาทำการเลี้ยงในห้องเลี้ยงที่มีปริมาตรน้ำ 10 ลิตร เป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่าในเดือนที่ 1 กุ้งก้ามกรามมี weight gain 1.27±0.41 กรัม มี ADG 0.03±0.01 กรัมต่อวัน มี SGR 2.08±0.34 % มีค่า RWG 57.98±20.6 % ค่า RWG/day 1.22±0.44 %/day มีค่าการกินได้ 0.06±0.00 กรัมต่อวัน และค่า FCR 2.81±2.16 (ตารางที่ 19) และในเดือนที่ 2 กุ้งก้ามกรามมี weight gain 1.11±0.15 กรัม มี ADG 0.04±0.00 กรัมต่อวัน มี SGR 3.93±0.35 % มีค่า RWG 30.98±8.07 % ค่า RWG/day 1.02±0.22 %/day มีค่าการกินได้ 0.09±0.01 กรัมต่อวัน และค่า FCR 2.77±1.19 (ตารางที่ 19)

อัตรารอดชีวิตของกุ้งก้ามกรามที่ถูกนำมาเลี้ยงในคอนโดกุ้งที่มีห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ พบว่าห้องเลี้ยงขนาด 10 ลิตร ที่ใช้ในการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 50 กรัมขึ้นไป เป็นระยะเวลา 30 วัน มีอัตรารอดของกุ้ง 61.17 % และการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 2 กรัมขึ้นไปเป็นระยะเวลา 60 วัน และกุ้ง 18 กรัมขึ้นไปเป็นระยะเวลาการเลี้ยง 90 วัน มีอัตราการรอด 94.07 % และ 80 % ตามลำดับ คอนโดกุ้งที่มีห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ พบว่าห้องเลี้ยงขนาด 12 ลิตร ที่ใช้ในการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 30 กรัมขึ้นไป เป็นระยะเวลา 90 วัน มีอัตรารอดของกุ้ง 100 % คอนโดกุ้งที่มีห้องเลี้ยงขนาด 37.5 ลิตร ที่ใช้ในการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 40 กรัมขึ้นไปเป็นระยะเวลา 210 วัน และกุ้ง 50 กรัมขึ้นไปเป็นระยะเวลาการเลี้ยง 60 วัน มีอัตราการรอด 45.45 % และ 100 % ตามลำดับ และการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 30 กรัมขึ้นไปเป็นระยะเวลา 90 วัน ในคอนโดที่มีห้องเลี้ยงขนาด 33 ลิตร, 54 ลิตร และ 67 ลิตร มีอัตราการรอด 100 % ดังตารางที่ 20

จากผลการศึกษาห้องเลี้ยงขนาดที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม แสดงให้เห็นว่ากุ้งก้ามกรามที่มีขนาดเริ่มต้น 30-50 กรัมขึ้นไปที่ถูกเลี้ยงในห้องเลี้ยงที่มีขนาดน้ำปริมาตร 33-67 ลิตร มีแนวโน้มที่สามารถจะเจริญเติบโตต่อไปได้ ซึ่งอาจสรุปได้ว่าหากต้องการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่มีขนาดเริ่มต้น 2 กรัมขึ้นไป อาจต้องทำการเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาด 10 ลิตรก่อน เมื่อกุ้งมีขนาดประมาณ 30-50 กรัมขึ้นไปแล้วนั้นจึงควรย้ายไปเลี้ยงในห้องเลี้ยงที่มีขนาด 37.5 ลิตร เพื่อเพิ่มพื้นที่ต่อตัวให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง ดังนั้น

จึงเป็นที่น่าสนใจในการศึกษาต่อไปถึงขนาดห้องเลี้ยงแต่ละขนาดที่กุ้งก้ามกรามขนาดประมาณ 50 กรัมขึ้นไปจะสามารถเจริญเติบโตได้

การศึกษาขนาดห้องเลี้ยงที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามมีการใช้ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดหรือระบบการเลี้ยงที่นำน้ำกลับมาใช้ใหม่โดยมีการบำบัดน้ำ ซึ่งประกอบด้วย ถังพักน้ำใช้แล้ว บ่อตกตะกอน ซึ่งภายในประกอบด้วยวัสดุกรองเป็นใยแก้ว ชั้นหินและทราย บ่อบำบัดน้ำทางชีวภาพ ประกอบด้วย วัสดุกรองและตัวกลาง เช่น ไบโอบอลสำหรับให้จุลินทรีย์ได้ยึดเกาะ นอกจากนี้ในระบบยังประกอบไปด้วยเปลือกหอยนางรม ซึ่งมีคุณสมบัติในการเป็นที่อยู่อาศัยของแบคทีเรีย เนื่องจากเปลือกหอยมีลักษณะเป็นรูพรุนเล็ก ๆ จำนวนมาก มีคุณสมบัติเป็น pH buffer ช่วยให้ค่า pH ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และเปลือกหอยรางรมจะค่อย ๆ ปลดปล่อยสารประกอบจำพวกแคลเซียมออกมา ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการลอกคราบของกุ้งก้ามกราม และถังพักน้ำดี ซึ่งน้ำจะถูกสูบกลับไปที่ระบบเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามต่อไป

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการวัดอุณหภูมิอากาศ (ภาพที่ 16) และคุณภาพน้ำในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในคอนโดที่มีห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ (ตารางที่ 21) ได้แก่ อุณหภูมิน้ำ (ภาพที่ 17), ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (Dissolved oxygen; DO) (ภาพที่ 16), ค่าพีเอช (pH) (ภาพที่ 17) ค่าความกระด้าง (Alkalinity) (ภาพที่ 20) และค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) (ภาพที่ 21) โดยทำการวัดค่าคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม อุณหภูมิอากาศมีค่าเท่ากับ 29.81±0.08 ถึง 29.85±0.11 ^{o}C คุณภาพน้ำในคอนโดกุ้งที่มีห้องเลี้ยงในขนาดต่าง ๆ พบว่าค่าคุณภาพน้ำไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งอุณหภูมิน้ำมีค่าเท่ากับ 27.62±0.04 ถึง 28.11±0.04 ^{o}C มีค่า DO เท่ากับ 6.3±0.02 ถึง 6.57±0.02 mg/L ค่าพีเอชในน้ำมีค่าเท่ากับ 7.24±0.04 ถึง 7.55±0.01 ค่าความกระด้าง (Alkalinity) มีค่าเท่ากับ 182.14±0.03 ถึง 182.79±0.06 mg/L และค่าการนำไฟฟ้า (EC) มีค่าเท่ากับ 14390.38±695.59 ถึง 24900.69±202.76 ms/cm (ตารางที่ 21)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 18 การเจริญเติบโตของกุ้งที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยง (กุ้ง 18 กรัม ต่อน้ำ 10 ลิตร) เป็นระยะเวลา 90 วัน (mean ± sd, n=25)

Duration (month)	Initial weight (g)	Final weight (g)	Weight gain (g)	ADG (g/day)	SGR (%)	RWG (%)	RWG/day (%/day)	Feed Intake (g/day)	FCR
1	18.69±7.74	25.17±10.6	6.48±3.09	0.14±0.07	6.66±1.11	34.88±6.89	0.78±0.15	0.75±0	6.45±3.13
2	21.29±7.54	28.35±9.15	7.07±1.83	0.19±0.05	8.56±1.07	34.72±5.79	0.94±0.16	0.91±0	5.18±1.74
3	28.35±9.15	37.25±11.4	8.89±2.43	0.31±0.08	11.95±1.27	32.25±5.57	1.11±0.19	0.75±0	2.69±1.01
Average	**-**	**-**	**7.48±1.26**	**0.21±0.08**	**9.06±2.68**	**33.95±1.48**	**0.94±0.17**	**0.8±0.09**	**4.77±1.91**

หมายเหตุ Average daily gain (ADG) = (final body weight – initial body weight) / experimental days), Specific growth rate (SGR) = 100 x [(ln final body weight – ln initial body weight) / experimental days], Relative weight gain (RWG) = (Weight gain/ initial weight) x 100, Relative weight gain (RWG)/day = ((Weight gain/ initial weight)/ experiment day) x 100 and Feed conversion ratio (FCR) = dry feed fed /weight gain

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 19 การเจริญเติบโตของกุ้งที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยง (กุ้ง 2 กรัม ต่อน้ำ 10 ลิตร) เป็นระยะเวลา 60 วัน (mean ± sd, n= 118)

Duration (month)	Initial weight (g)	Final weight (g)	Weight gain (g)	ADG (g/day)	SGR (%)	RWG (%)	RWG/day (%/day)	Feed Intake (g/day)	FCR
1st month									
Condo A	2.26±0.31	3.56±0.52	1.29±0.47	0.03±0.01	2.12±0.4	58.67±23.37	1.25±0.5	0.06±0.00	3.05±2.85
Condo B	2.22±0.27	3.47±0.39	1.25±0.34	0.03±0.01	2.04±0.27	57.27±17.46	1.19±0.36	0.06±0.00	2.56±1.02
Average	**2.24±0.29**	**3.51±0.46**	**1.27±0.41**	**0.03±0.01**	**2.08±0.34**	**57.98±20.6**	**1.22±0.44**	**0.06±0.00**	**2.81±2.16**
2nd month									
Condo A	3.56±0.52	4.72±0.50	1.11±0.14	0.04±0.00	3.97±0.36	31.01±7.96	1±0.26	0.09±0.01	2.71±0.64
Condo B	3.47±0.39	4.61±0.43	1.11±0.16	0.04±0.01	3.90±0.34	30.95±8.25	1.04±0.18	0.09±0.00	2.83±1.58
Average	**3.51±0.46**	**4.66±0.47**	**1.11±0.15**	**0.04±0.00**	**3.93±0.35**	**30.98±8.07**	**1.02±0.22**	**0.09±0.01**	**2.77±1.19**

หมายเหตุ Average daily gain (ADG) = (final body weight – initial body weight) / experimental days), Specific growth rate (SGR) = 100 x [(ln final body weight – ln initial body weight) / experimental days], Relative weight gain (RWG) = (Weight gain/ initial weight) x 100, Relative weight gain (RWG)/day = ((Weight gain/ initial weight)/ experiment day) x 100 and Feed conversion ratio (FCR) = dry feed fed /weight gain

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 20 อัตรารอดของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ (mean ± sd)

Size of unit (L)	Size of shrimp (g)	Duration (day)	Survival rate (%)
10 L	50 กรัม ขึ้นไป	30	61.17
(Condo A & B)	2 กรัม ขึ้นไป	60	94.07
	18 กรัม ขึ้นไป	90	80.00
12 L	30 กรัม ขึ้นไป	90	100.00
37.5 L	40 กรัม ขึ้นไป	210	45.45
	50 กรัม ขึ้นไป	60	100.00
33 L	30 กรัม ขึ้นไป	90	100.00
54 L	30 กรัม ขึ้นไป	90	100.00
67 L	30 กรัม ขึ้นไป	90	100.00

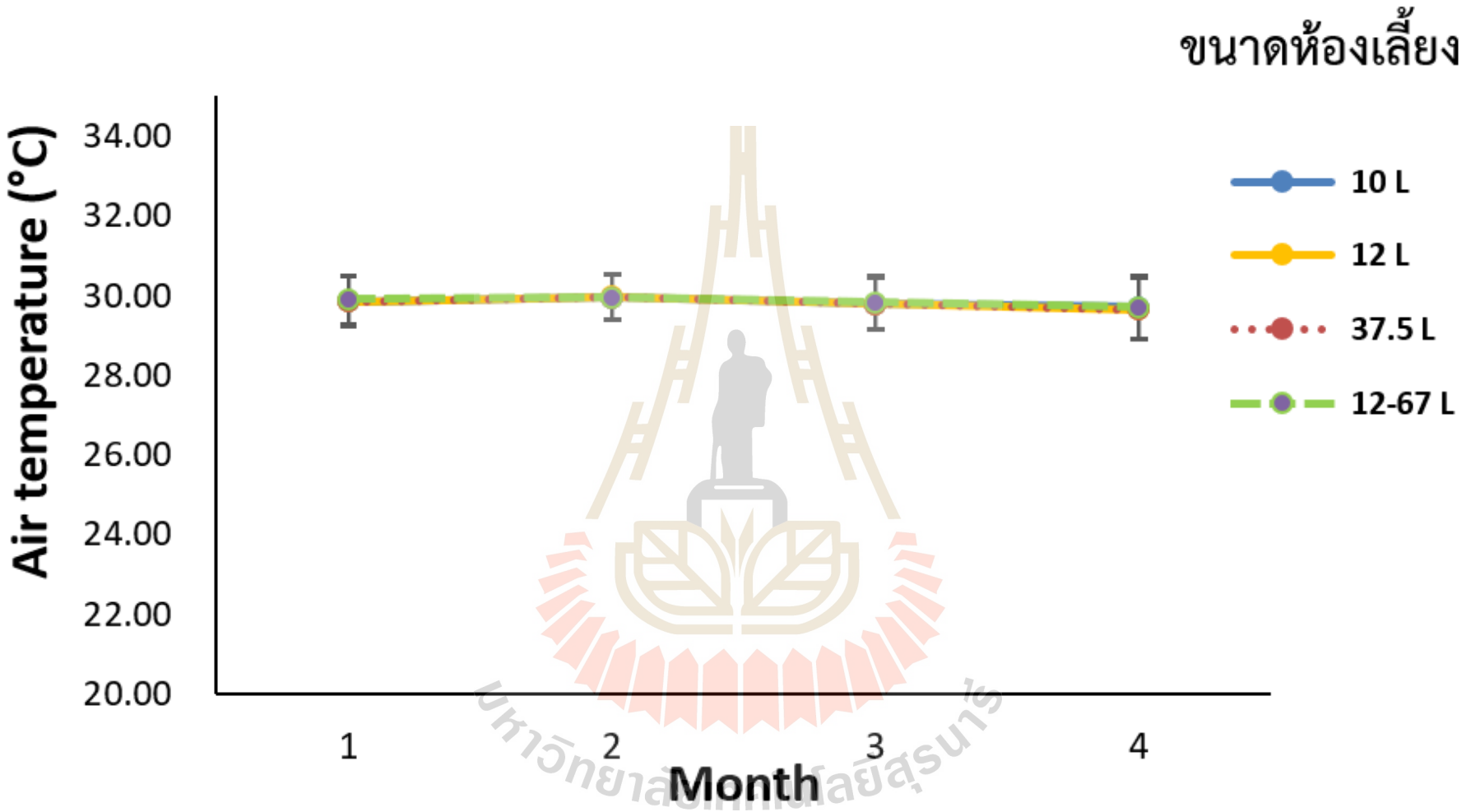
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 21 คุณภาพน้ำในระบบห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม (mean ± sd)

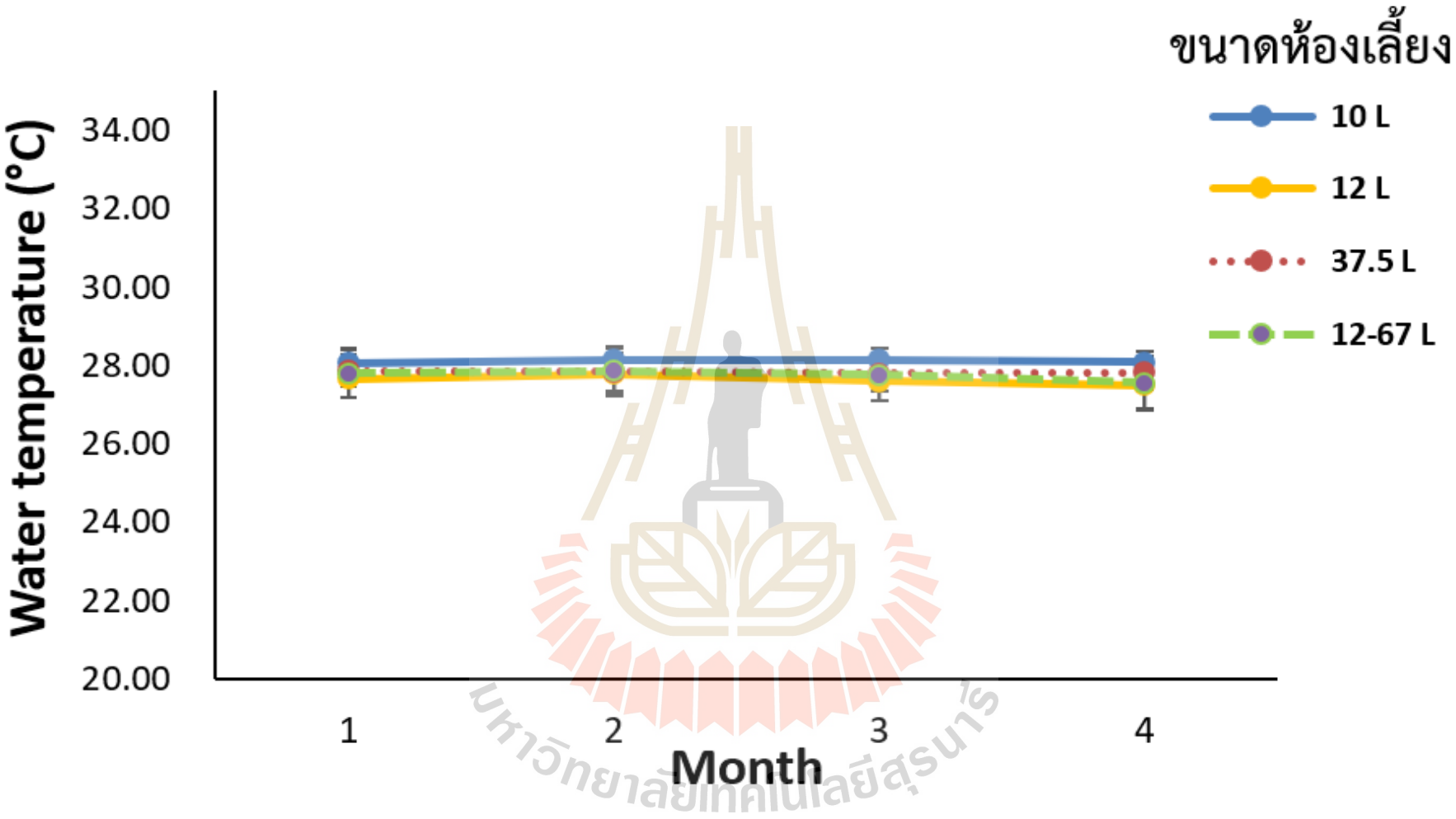
Size of unit	Parameters					
(L)	DO (mg/L)	pH	Alkalinity (mg/L)	EC (ms/cm)	Water temperature (°C)	Air temperature (°C)
10 L	6.3±0.02	7.51±0.01	182.58±0.03	22781.48±2010.88	28.11±0.04	29.82±0.08
12 L	6.42±0.01	7.24±0.04	182.79±0.06	24900.69±202.76	27.62±0.04	29.81±0.08
37.5 L	6.52±0.02	7.35±0.04	182.14±0.03	18905.9±199.43	27.83±0.02	29.81±0.08
12-67 L	6.57±0.02	7.55±0.01	182.48±0.09	14390.38±695.59	27.74±0.03	29.85±0.11

หมายเหตุ ค่าการนำไฟฟ้า [Electric conductivity (EC) (ms/cm)]

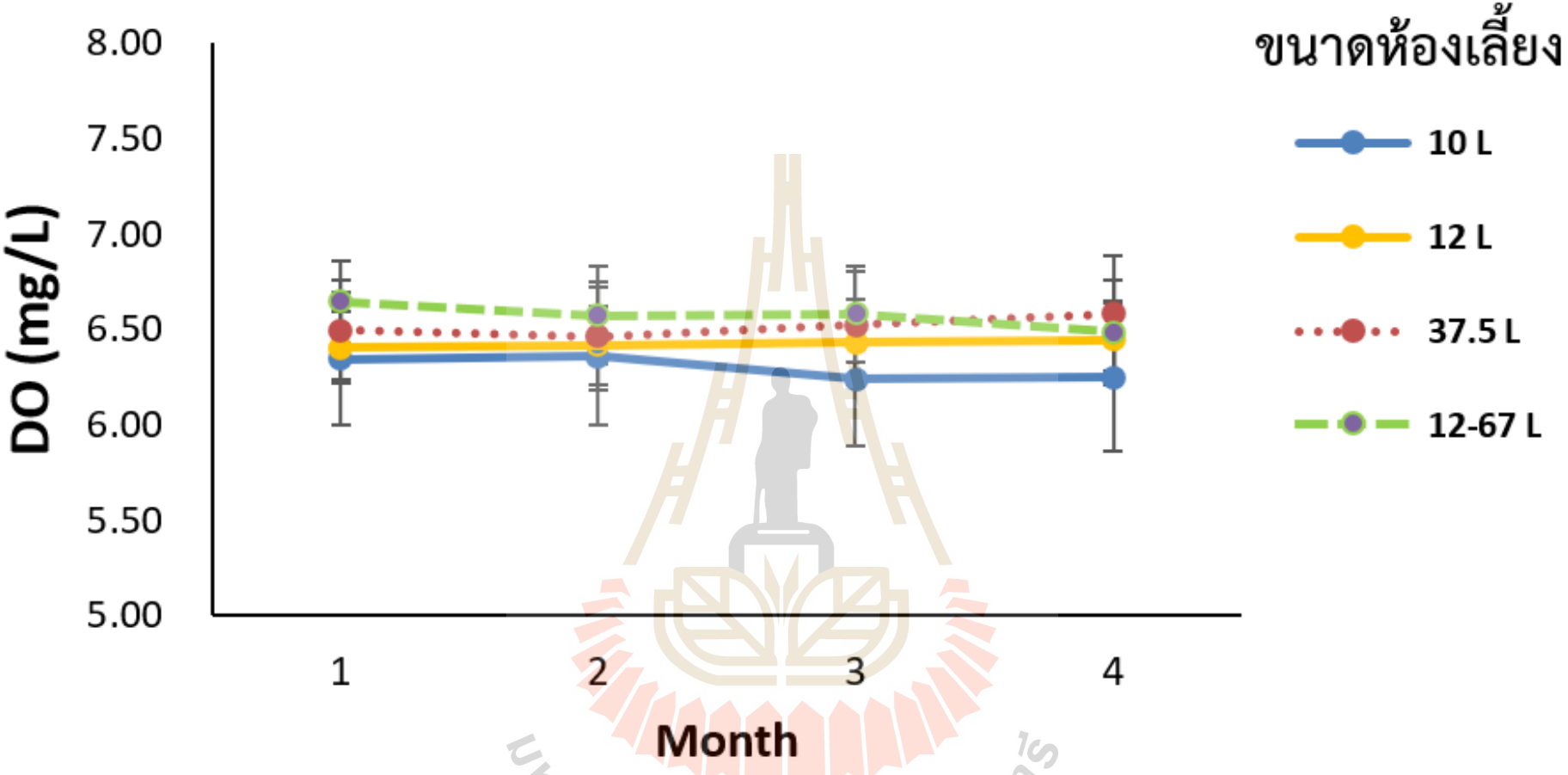
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาพที่ 16 อุณภูมิของอากาศ (°C) ในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม

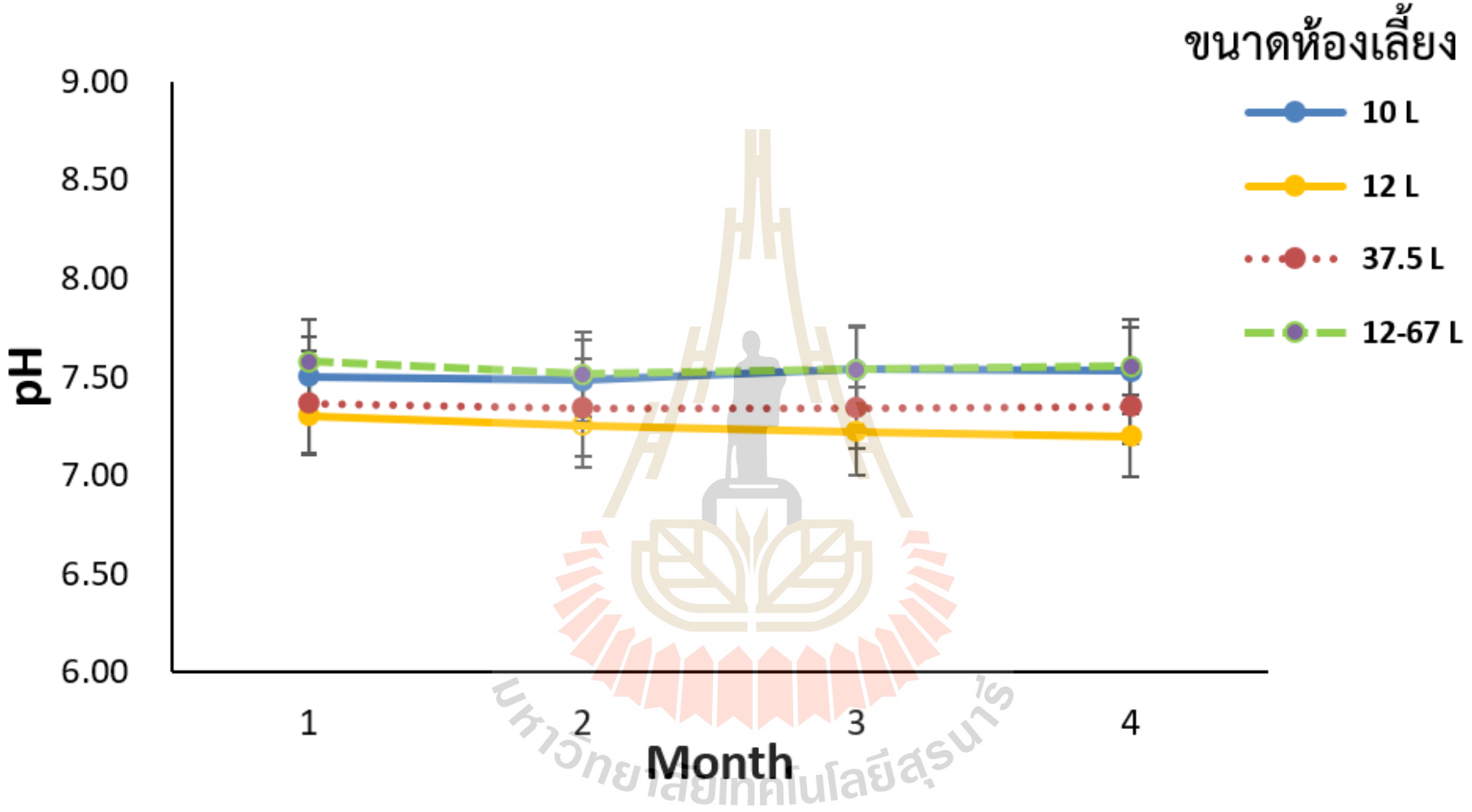


ภาพที่ 17 อุณภูมิของน้ำ (°C) ระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ (ห้องเลี้ยงขนาด 10, 12, 37.5 และ 12-67 ลิตร)

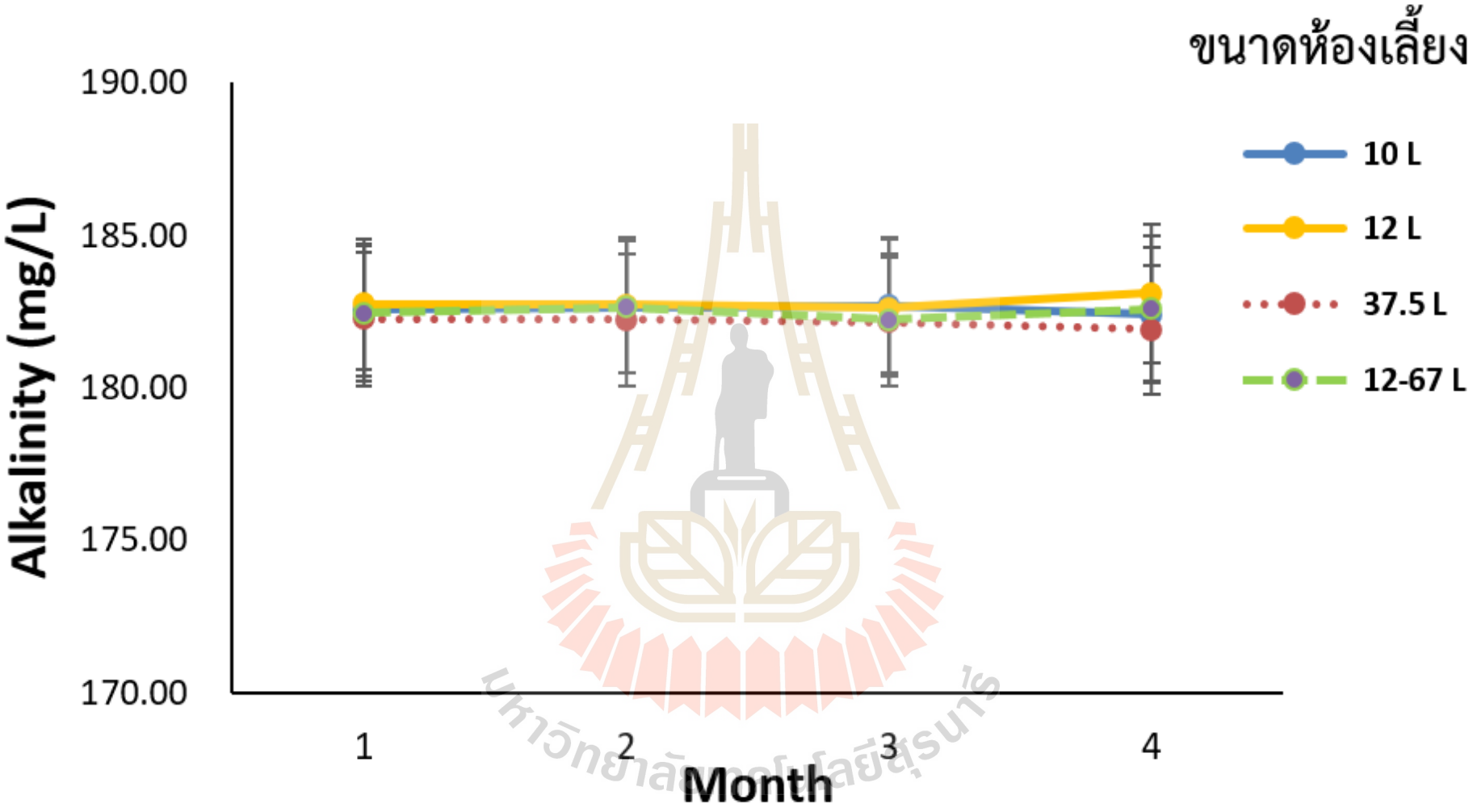


ภาพที่ 18 ค่าการละลายออกซิเจน (mg/L) ในน้ำระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ (ห้องเลี้ยงขนาด 10, 12, 37.5 และ 12-67 ลิตร)

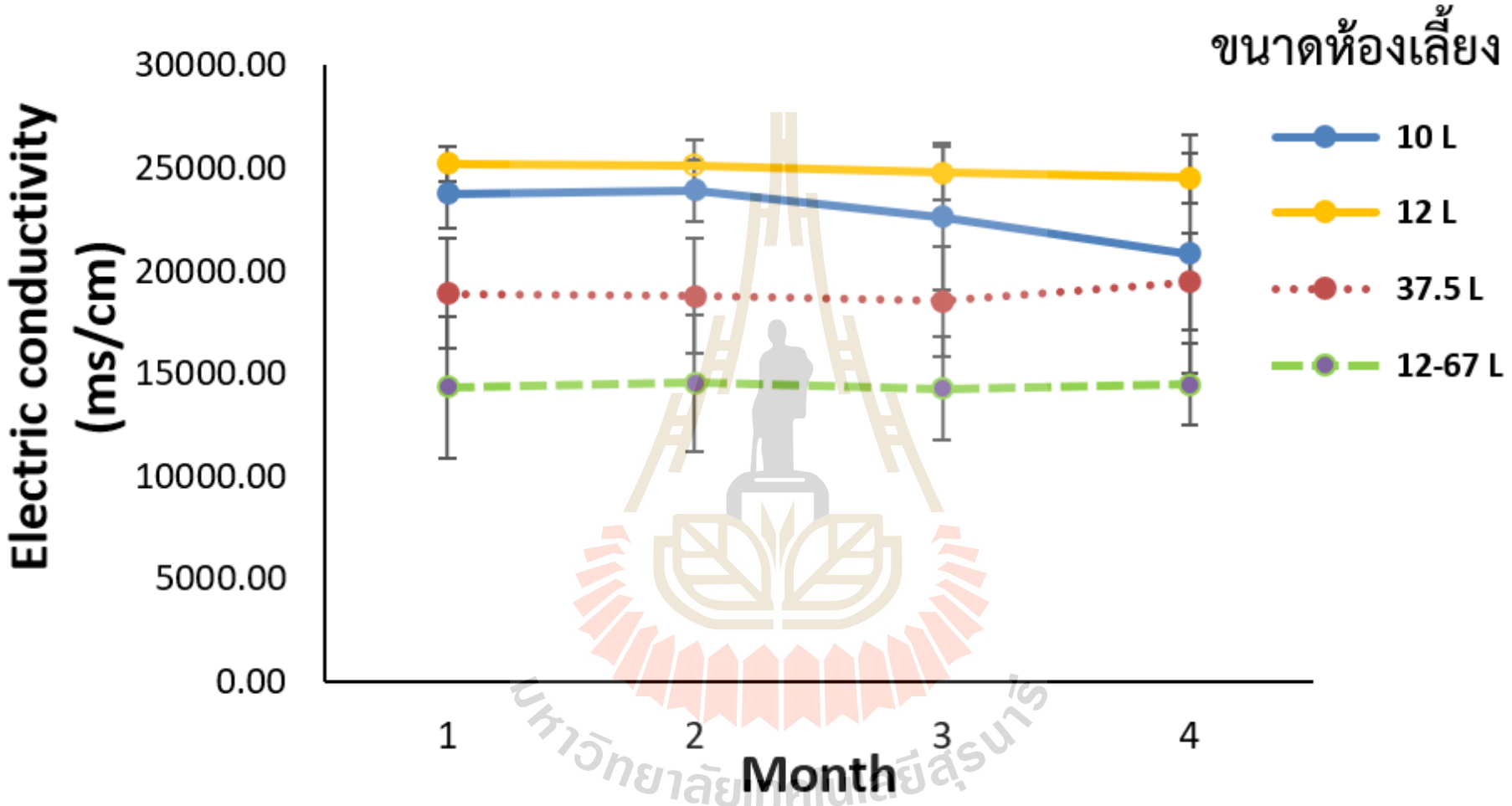
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาพที่ 19 ค่าความเป็นกรดด่างในน้ำระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ (ห้องเลี้ยงขนาด 10, 12, 37.5 และ 12-67 ลิตร)



ภาพที่ 20 ค่าความกระด้างในน้ำ (mg/L) ระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ (ห้องเลี้ยงขนาด 10, 12, 37.5 และ 12-67 ลิตร)

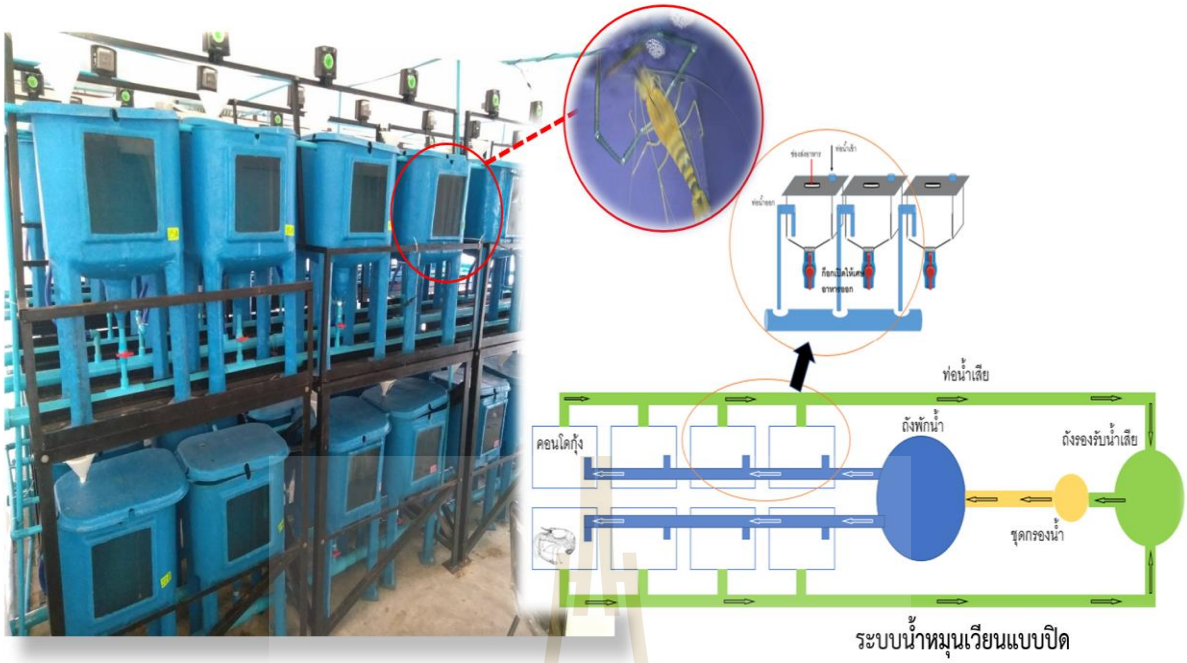


ภาพที่ 21 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC (ms/cm)) ในน้ำระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ (ห้องเลี้ยงขนาด 10, 12, 37.5 และ 12-67 ลิตร)

2. การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ด้วยระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง

การพัฒนาระบบการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ด้วยระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง (vertical shrimp culture) เพื่อใช้เป็นระบบทางเลือกในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในเชิงธุรกิจ โดยจะนำกุ้งขนาดเล็กประมาณ 50 กรัม มาเลี้ยงต่อในระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งแบบแนวตั้ง ด้วยระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด (Recirculating aquaculture system) โดยในเบื้องต้นเป็นการสร้างระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง ที่ประกอบด้วยโครงสร้าง ห้องเลี้ยง ระบบน้ำแบบหมุนเวียน ระบบบำบัดน้ำ แล้วนำกุ้งมาเลี้ยงเพื่อทดสอบระบบ ซึ่งจากการศึกษาในข้างต้นแสดงให้เห็นว่ากุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาด (ปริมาตรน้ำ) 33, 37.5, 54 และ 67 ลิตร มีการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามที่ไม่ต่างกัน ดังนั้นจึงพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงให้เหมาะสมยิ่งขึ้น โดยทำการศึกษาการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามขนาดประมาณ 30 กรัม และ 50 กรัมขึ้นไปมาเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตรที่มีระบบน้ำแบบหมุนเวียนแบบปิด (ภาพที่ 22) การศึกษาการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามขนาด 50 กรัมขึ้นไป ในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร เป็นระยะเวลา 7 เดือน พบว่าการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามในตลอดระยะเวลาการเลี้ยงมีค่าเฉลี่ยของค่าน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น 13.25±2.19 กรัม มี ADG 0.44±0.07 กรัมต่อวัน มี SGR 0.47±0.19 % ค่า RWG 15.31±6.66 % ค่า RWG/day 0.51±0.22 %/day มีค่าการกินได้ 1.03±0.14 กรัมต่อวัน ค่า FCR 2.36±0.14 และอัตราการรอด 90.18±8.73 % (ตารางที่ 22) จากผลการศึกษาจะเห็นว่าอัตราการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามลดลงในเดือนที่ 5 ซึ่งมีค่าน้ำหนักสุดท้าย (final weight) 126.09±6.04 กรัม มีค่า weight gain 12.28±0.96 กรัม ค่า ADG 0.41±0.03 กรัมต่อวัน มี SGR 0.34±0.03 % ค่า RWG 10.83±1.15 % ค่า RWG/day 0.36±0.04 %/day มีค่าการกินได้ 0.94±0.08 กรัมต่อวัน ค่า FCR 2.31±0.07 (ตารางที่ 22) ซึ่งอัตราการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามลดลงในเดือนที่ 5, 6 และ 7 (ภาพที่ 21)

การศึกษาการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามขนาด 30 กรัมขึ้นไป ในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร เป็นระยะเวลา 6 เดือน พบว่าการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามในตลอดระยะเวลาการเลี้ยงมีค่าเฉลี่ยของค่าน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น 12.31±1.48 กรัม มี ADG 0.42±0.06 กรัมต่อวัน มี SGR 0.6±0.26 % ค่า RWG 19.96±9.18 % ค่า RWG/day 0.67±0.32 %/day มีค่าการกินได้ 0.96±0.11 กรัมต่อวัน ค่า FCR 2.33±0.13 และอัตราการรอด 75.6±8.57 % (ตารางที่ 23) อย่างไรก็ตามอัตราการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามลดลงในเดือนที่ 6 ซึ่งมีค่าน้ำหนักสุดท้าย 112.62±6.22 กรัม มีค่า weight gain 10.80±1.10 กรัม ค่า ADG 0.36±0.04 กรัมต่อวัน มี SGR 0.34±0.03 % ค่า RWG 10.61±0.99 % ค่า RWG/day 0.35±0.03 %/day มีค่าการกินได้ 0.86±0.06 กรัมต่อวัน ค่า FCR 2.41±0.18 (ตารางที่ 23 และภาพที่ 23) จากผลการศึกษาการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามขนาดประมาณ 30 กรัม และ 50 กรัมขึ้นไปที่ถูกเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร จะมีอัตราการเจริญเติบโตที่ลดลง (ADG และ SGR ลดลง) เมื่อมีน้ำหนักสุดท้าย 112.62±6.22 กรัม และ 126.09±6.04 กรัม ตามลำดับ นั้นอาจชี้ให้เห็นว่าห้องเลี้ยงที่มีขนาด 50 ลิตร เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามขนาด 30-50 กรัม จนถึงขนาดไม่เกิน 120 กรัม



ภาพที่ 22 การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงน้ำปริมาตร 50 ลิตร ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด

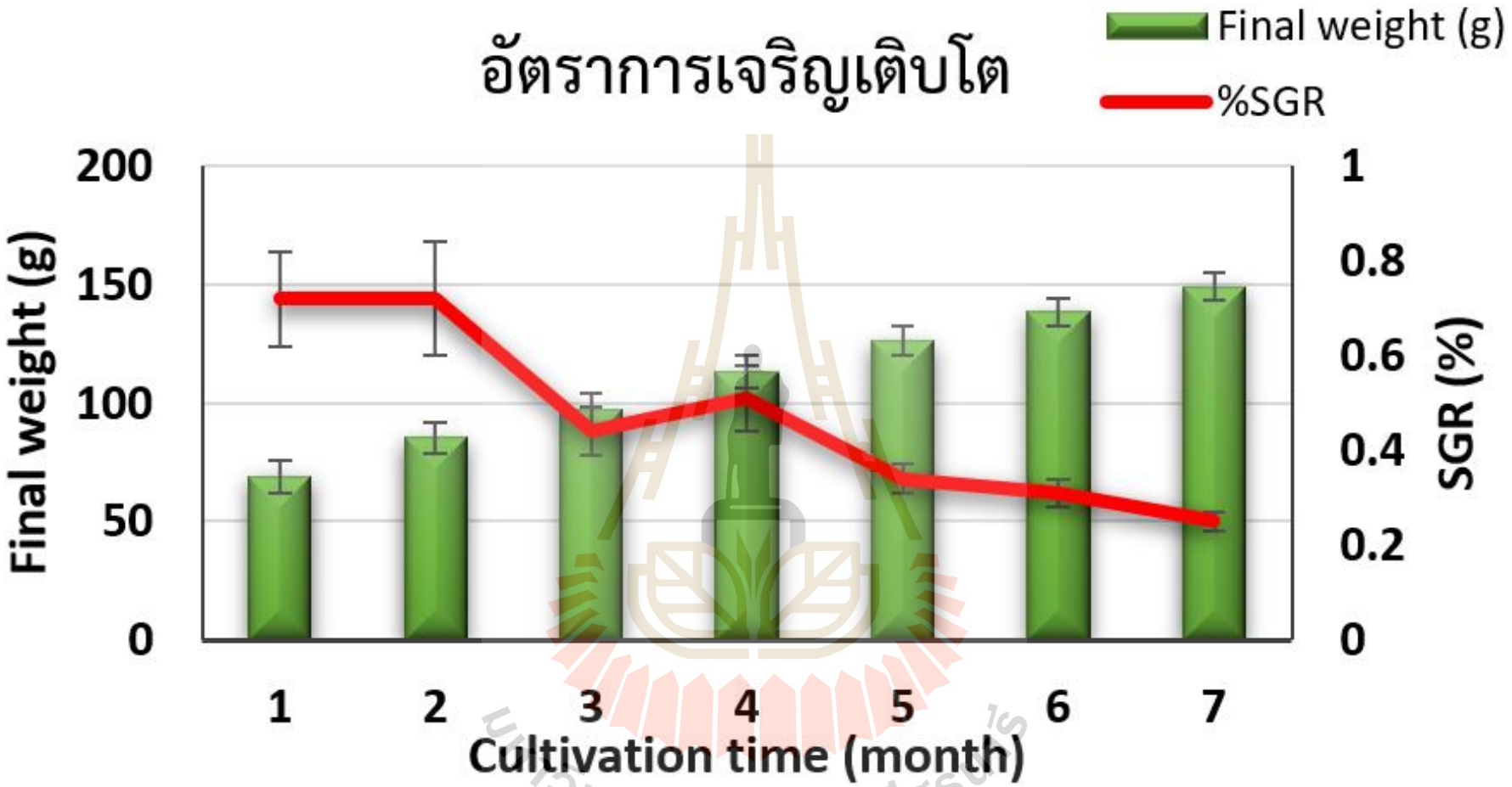
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 22 การเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามที่มีขนาด 50 กรัมขึ้นไป มาเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร (mean ± sd, n=32)

Duration (month)	Initial weight (g)	Final weight (g)	Weight gain (g)	ADG (g/day)	SGR (%)	RWG (%)	RWG/Day (%/day)	Feed intake (g/day)	FCR	Survival rate (%)
1	55.58±6.20	68.80±6.77	13.21±1.82	0.44±0.06	0.72±0.10	23.99±3.92	0.80±0.13	1.13±0.11	2.60±0.28	100
2	68.80±6.77	85.21±6.66	16.42±2.12	0.55±0.07	0.72±0.12	24.16±4.30	0.81±0.14	1.20±0.16	2.20±0.19	100
3	85.05±6.78	96.89±6.89	11.84±1.03	0.39±0.03	0.44±0.05	14.00±1.61	0.47±0.05	0.95±0.05	2.42±0.22	93.75
4	96.89±6.89	112.97±6.74	16.09±2.01	0.54±0.07	0.51±0.07	16.71±2.52	0.56±0.08	1.21±0.12	2.26±0.20	93.75
5	113.81±6.21	126.09±6.04	12.28±0.96	0.41±0.03	0.34±0.03	10.83±1.15	0.36±0.04	0.94±0.08	2.31±0.07	81.25
6	126.09±6.04	138.31±5.89	12.22±1.22	0.41±0.04	0.31±0.03	9.72±1.13	0.32±0.04	0.92±0.08	2.26±0.07	81.25
7	138.31±5.89	149.00±5.79	10.68±0.86	0.36±0.03	0.25±0.02	7.74±0.77	0.26±0.03	0.87±0.06	2.44±0.20	81.25
Average			**13.25±2.19**	**0.44±0.07**	**0.47±0.19**	**15.31±6.66**	**0.51±0.22**	**1.03±0.14**	**2.36±0.14**	**90.18±8.73**

หมายเหตุ Average daily gain (ADG) = (final body weight – initial body weight) / experimental days), Specific growth rate (SGR) = 100 x [(ln final body weight – ln initial body weight) / experimental days], Relative weight gain (RWG) = (Weight gain/ initial weight) x 100, Relative weight gain (RWG)/day = ((Weight gain/ initial weight)/ experiment day) x 100 and Feed conversion ratio (FCR) = dry feed fed /weight gain

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



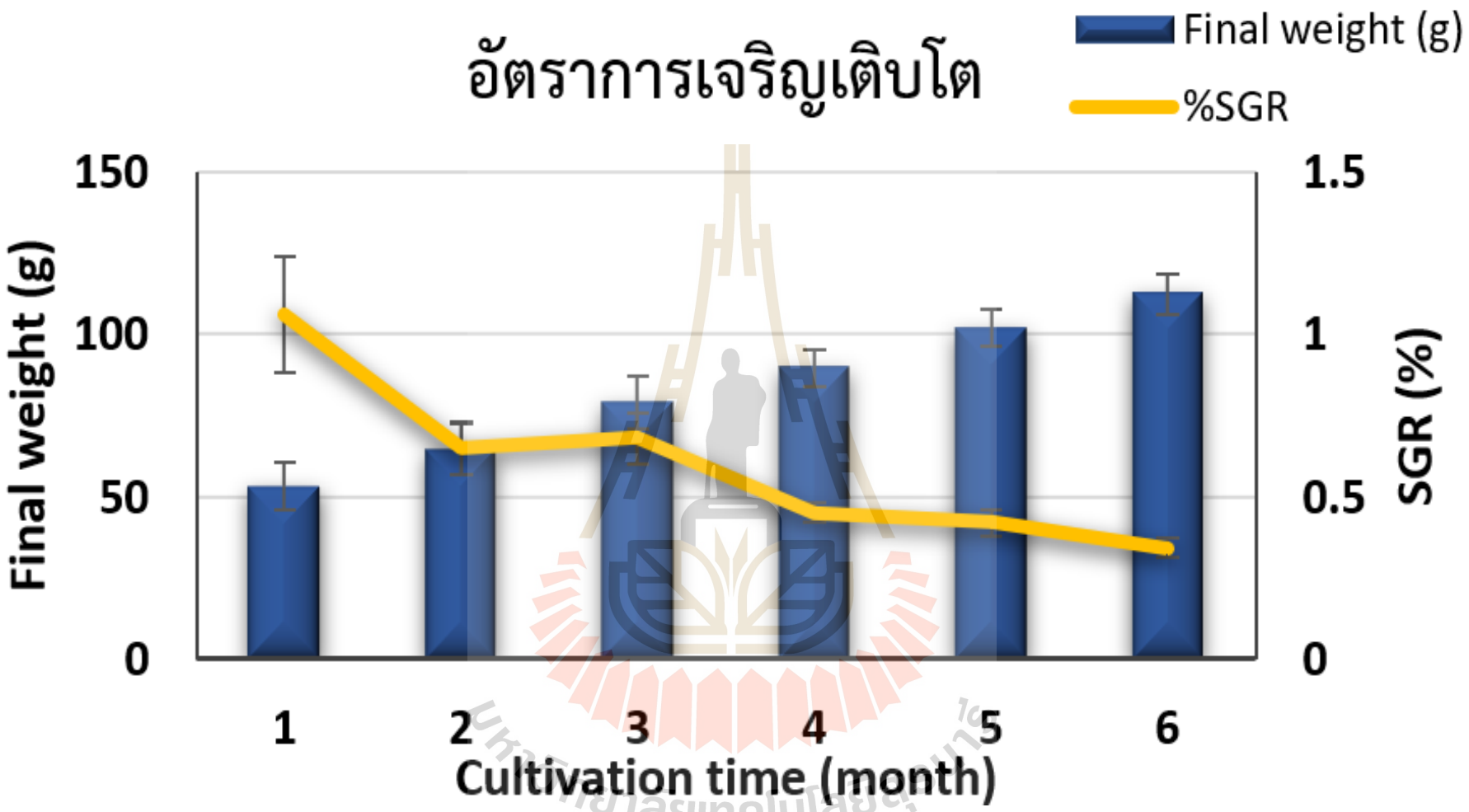
ภาพที่ 23 อัตราการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามขนาด 50 กรัมขึ้นไปที่ถูกเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร เป็นระยะเวลา 7 เดือน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักตัวสุดท้ายและเปอร์เซ็นต์การเจริญเติบโตจำเพาะ (SGR)

ตารางที่ 23 การเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามที่มีขนาด 30 กรัมขึ้นไป มาเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร (mean ± sd, n=28)

Duration (month)	Initial weight (g)	Final weight (g)	Weight gain (g)	ADG (g/day)	SGR	RWG (%)	RWG/Day (%)	Feed intake (g/day)	FCR	Survival rate (%)
1	39.23±7.11	53.08±7.30	13.84±1.13	0.49±0.14	1.06±0.18	36.18±6.27	1.24±0.22	1.04±0.38	2.13±0.21	85.71
2	53.26±7.41	64.65±7.67	11.39±1.02	0.38±0.03	0.65±0.08	21.67±2.95	0.72±0.10	0.94±0.04	2.50±0.22	82.14
3	64.65±7.67	79.08±8.26	14.42±1.58	0.48±0.05	0.68±0.08	22.50±2.93	0.75±0.10	1.13±0.12	2.36±0.19	82.14
4	78.42±5.20	89.70±5.60	11.28±0.85	0.38±0.03	0.45±0.03	14.41±1.13	0.48±0.04	0.86±0.07	2.30±0.09	67.86
5	89.70±5.60	101.82±5.69	12.12±0.83	0.40±0.03	0.42±0.04	14.41±1.13	0.45±0.04	0.92±0.07	2.27±0.05	67.86
6	101.82±5.69	112.62±6.22	10.80±1.10	0.36±0.04	0.34±0.03	10.61±0.99	0.35±0.03	0.86±0.06	2.41±0.18	67.86
Average			**12.31±1.48**	**0.42±0.06**	**0.6±0.26**	**19.96±9.18**	**0.67±0.32**	**0.96±0.11**	**2.33±0.13**	**75.6±8.57**

หมายเหตุ Average daily gain (ADG) = (final body weight – initial body weight) / experimental days), Specific growth rate (SGR) = 100 x [(ln final body weight – ln initial body weight) / experimental days], Relative weight gain (RWG) = (Weight gain/ initial weight) x 100, Relative weight gain (RWG)/day = ((Weight gain/ initial weight)/ experiment day) x 100 and Feed conversion ratio (FCR) = dry feed fed /weight gain

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาพที่ 24 อัตราการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามขนาด 30 กรัมขึ้นไปที่ถูกเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร เป็นระยะเวลา 6 เดือน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักตัวสุดท้ายและเปอร์เซ็นต์การเจริญเติบโตจำเพาะ (SGR)

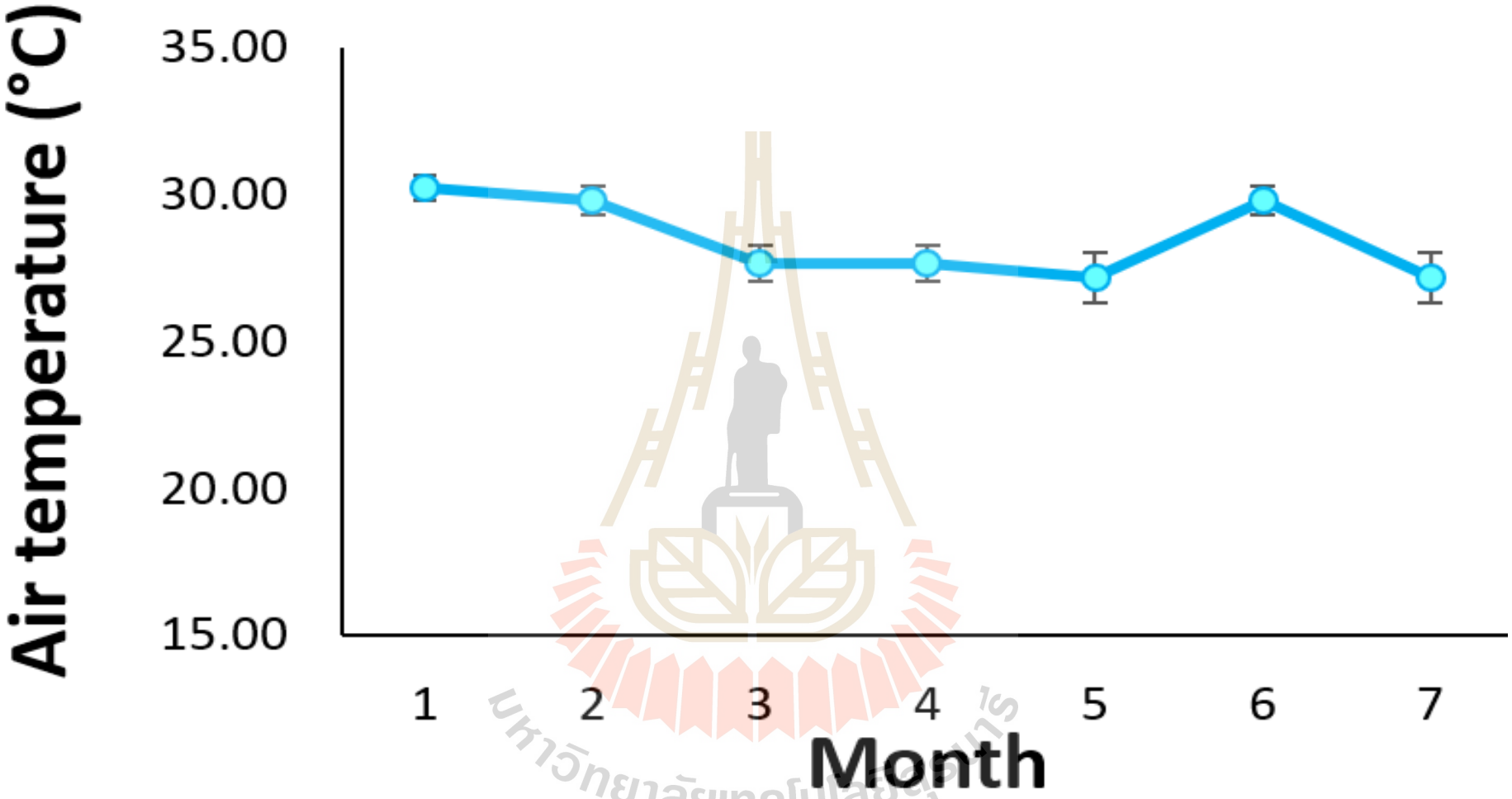
การพัฒนาระบบการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้ง (vertical shrimp culture) โดยทำการศึกษาการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามขนาดประมาณ 30 กรัม และ 50 กรัมขึ้นไปมาเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตรที่มีระบบน้ำแบบหมุนเวียนแบบปิด ซึ่งระบบน้ำแบบหมุนเวียนแบบปิด ประกอบไปด้วย ถังรองรับน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงกุ้ง ถังกรอง ซึ่งภายในประกอบด้วยวัสดุกรองเป็นใยแก้ว, ถ่านคาร์บอนช่วยกำจัดอินทรีย์สารที่ทำให้เกิดกลิ่นเน่าเสีย ขจัดสารพิษโลหะหนัก, สารซีโอไลต์ย่อยตะกอนของเสีย, กำจัดสารพิษ, ยับยั้งเชื้อโรค, ไบโอบอล ช่วยทำให้น้ำใสและเป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ และเปลือกหอยมีคุณสมบัติเป็น pH buffer ช่วยให้ค่า pH ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และเปลือกหอยรางรมจะค่อย ๆ ปลดปล่อยสารประกอบจำพวกแคลเซียมออกมา ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการลอกคราบของกุ้งก้ามกราม และถังพักน้ำดี ซึ่งน้ำจะถูกสูบกลับไปที่ระบบเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามต่อไป

ในตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ได้ทำการวัดอุณหภูมิอากาศ (ภาพที่ 25) และคุณภาพน้ำในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในคอนโดที่มีห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ (ตารางที่ 24) ได้แก่ อุณหภูมิน้ำ (ภาพที่ 26), ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (Dissolved oxygen; DO) (ภาพที่ 27), ค่าพีเอช (pH) (ภาพที่ 28) ค่าความเค็ม (salinity) (ภาพที่ 29) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) (ภาพที่ 30) และค่าความกระด้าง (Alkalinity) (ภาพที่ 31) ซึ่งอุณหภูมิอากาศมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28.49±1.37 องศาเซลเซียส คุณภาพน้ำในคอนโดกุ้งที่มีห้องเลี้ยงในขนาดต่าง ๆ พบว่าค่าคุณภาพน้ำไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งอุณหภูมิน้ำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 27.14±0.74 องศาเซลเซียส ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (DO) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.58±0.16 mg/L ค่าพีเอชในน้ำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.37±0.04 ค่าความเค็ม (salinity) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.25±0.12 ppt ค่าการนำไฟฟ้า (EC) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19539.81±1773.87 ms/cm ค่าความกระด้าง (Alkalinity) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 182.51±0.69 mg/L (ตารางที่ 24)

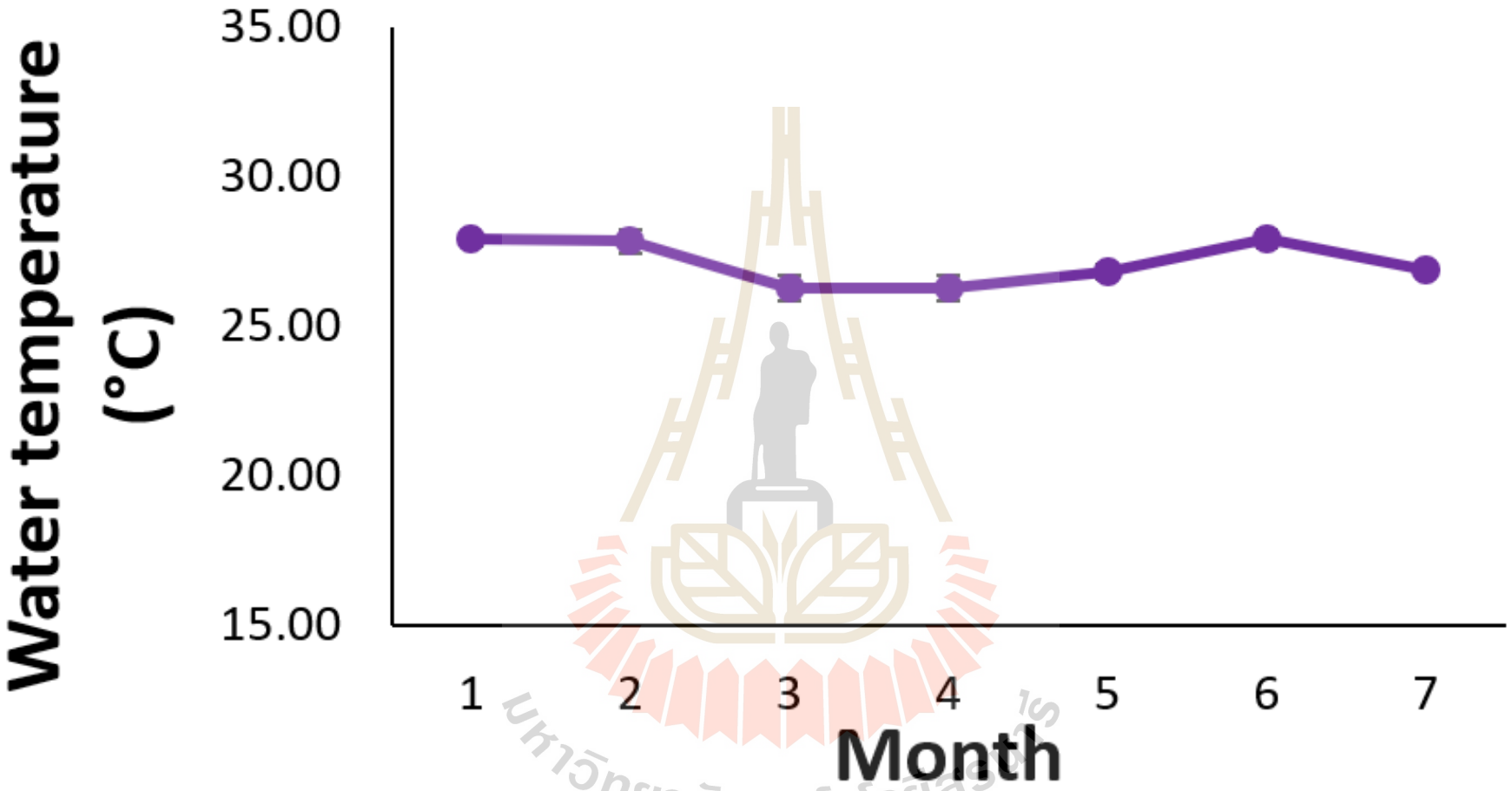
ตารางที่ 24 คุณภาพน้ำในระบบห้องเลี้ยงขนาดปริมาตรน้ำ 50 ลิตร (mean ± sd)

Parameters	Values
DO (mg/L)	6.58±0.16
pH	7.37±0.04
Salinity (ppt)	3.25±0.12
EC (ms/cm)	19539.81±1773.87
Alkalinity (mg/L)	182.51±0.69
Water Temperature (°C)	27.14±0.74
Air temperature (°C)	28.49±1.37

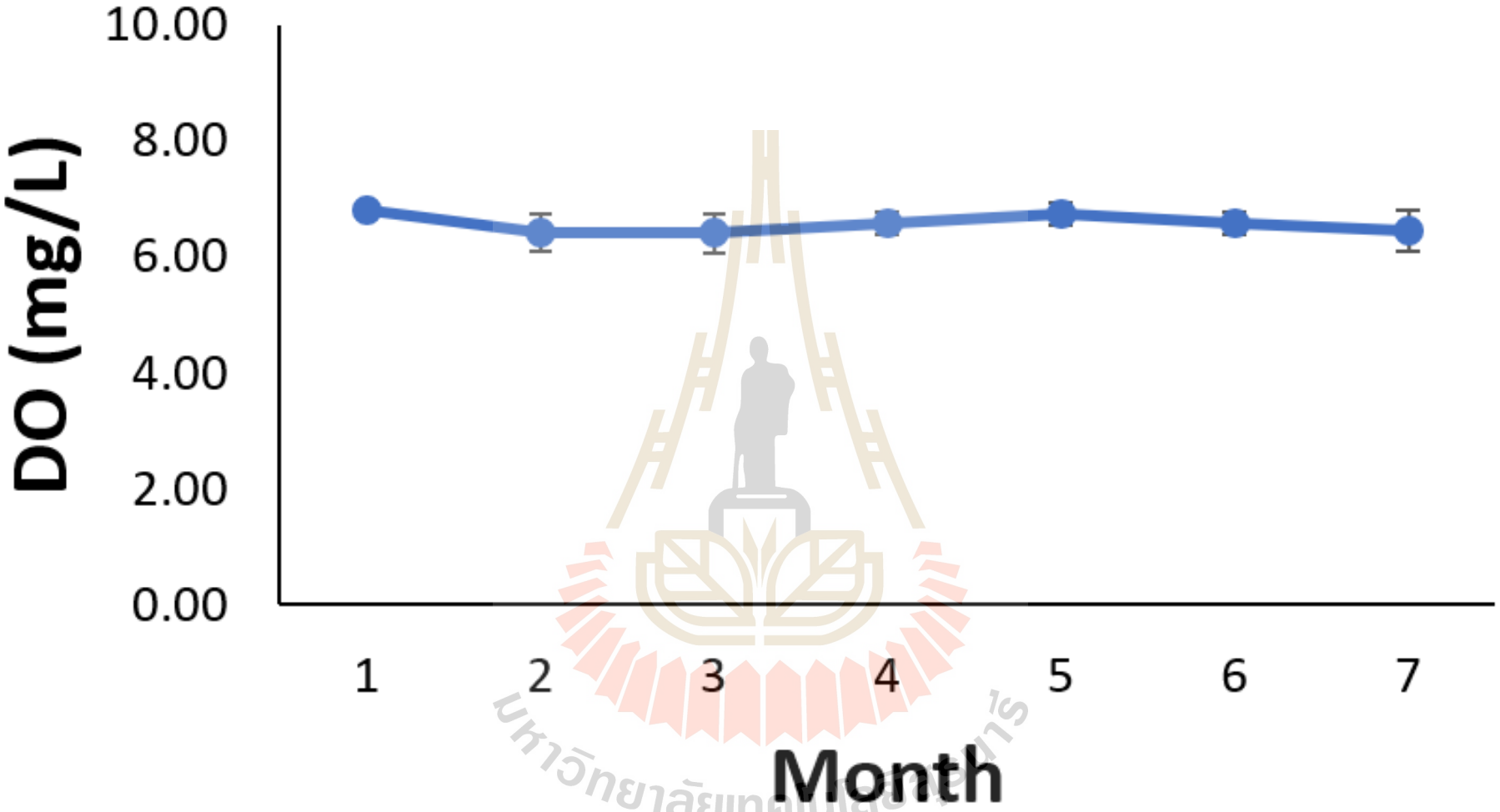
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



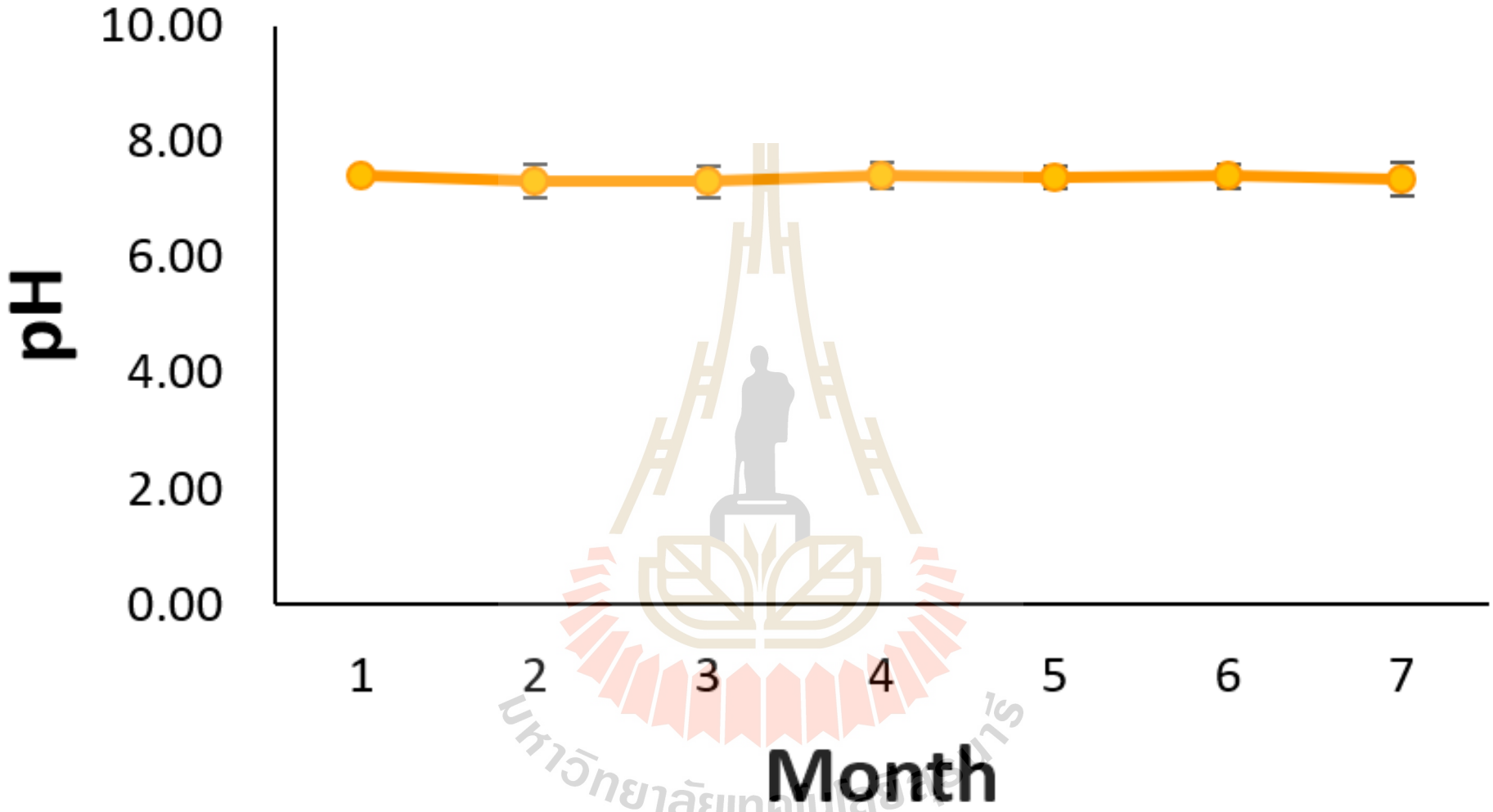
ภาพที่ 25 อุณภูมิของอากาศ (°C) ในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เป็นระยะเวลา 7 เดือน



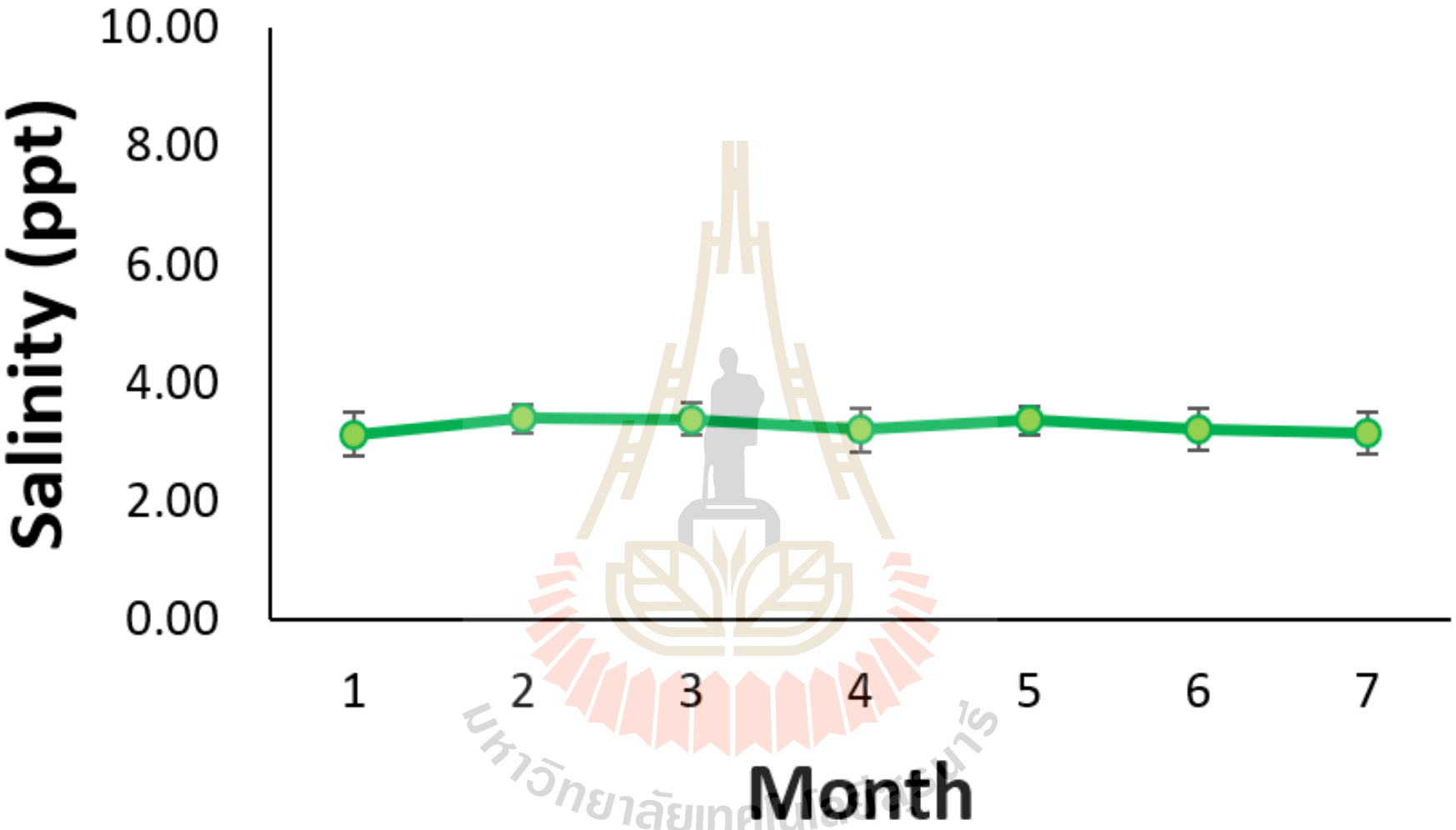
ภาพที่ 26 อุณภูมิของน้ำ (°C) ระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด เป็นระยะเวลา 7 เดือน



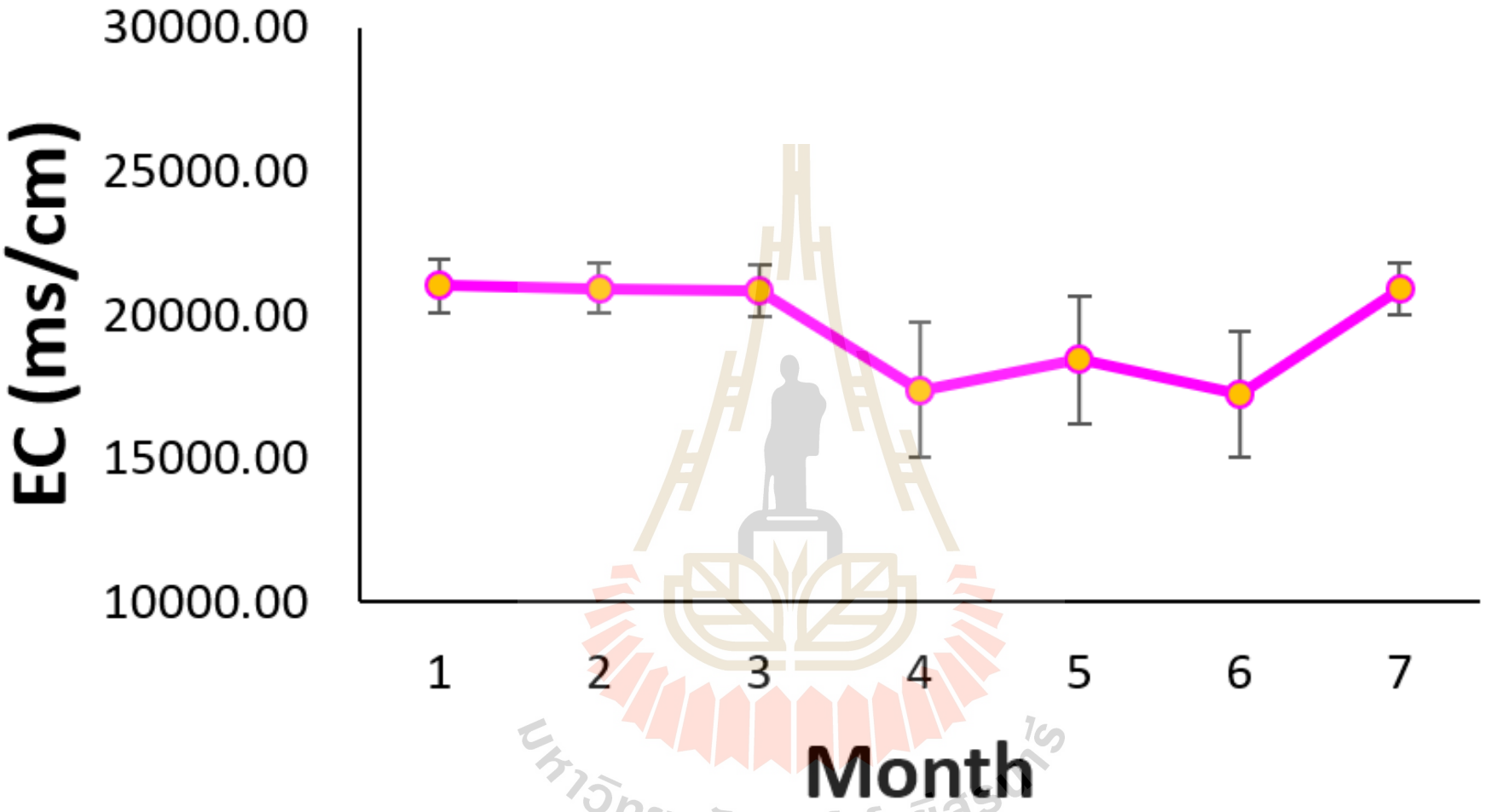
ภาพที่ 27 ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (mg/L) ระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด เป็นระยะเวลา 7 เดือน



ภาพที่ 28 ค่าความเป็นกรดด่างในน้ำระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด เป็นระยะเวลา 7 เดือน

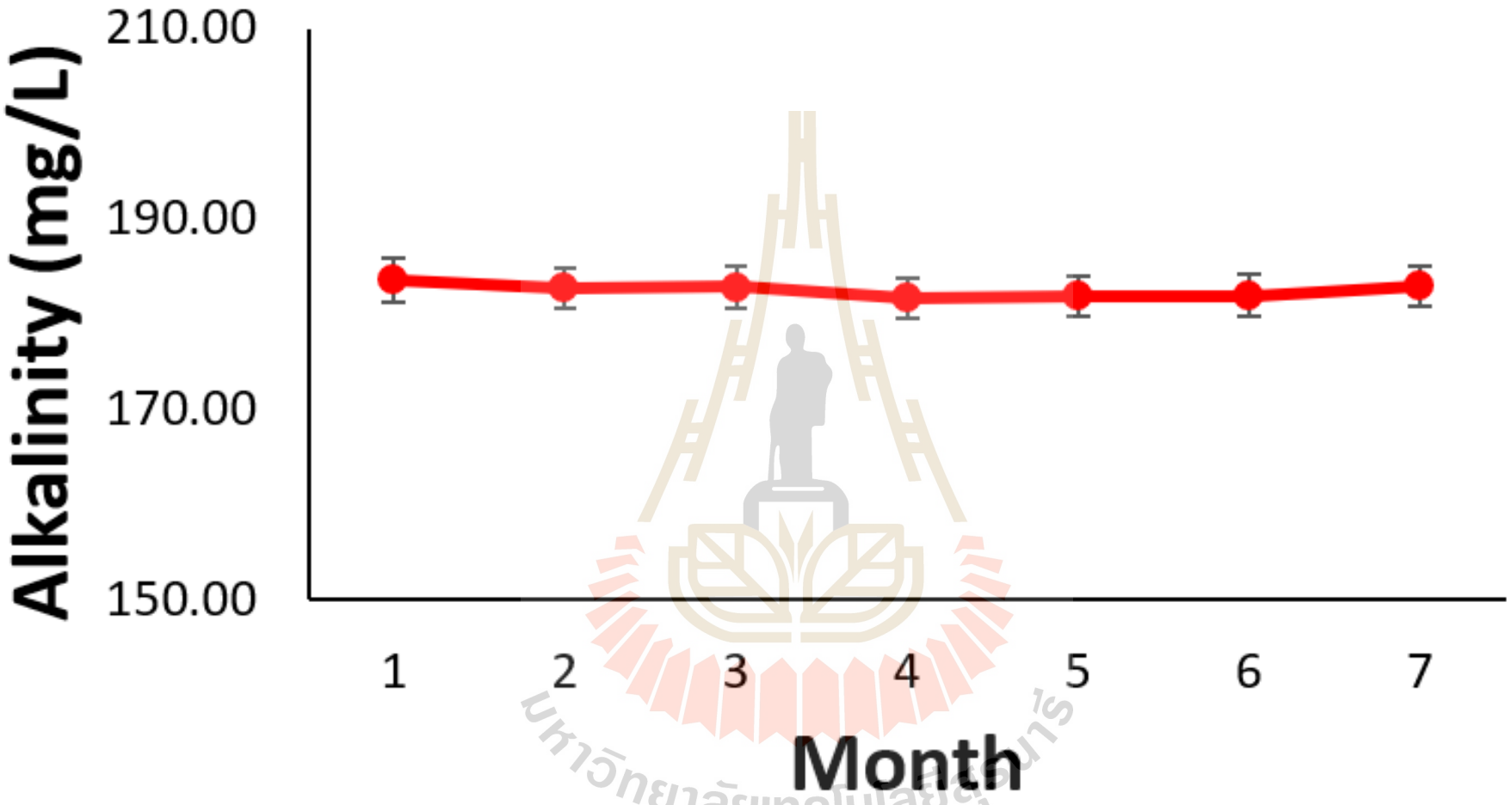


ภาพที่ 29 ค่าความเค็มในน้ำ (ppt) ระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด เป็นระยะเวลา 7 เดือน



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาพที่ 30 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC (ms/cm)) ในน้ำระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด เป็นระยะเวลา 7 เดือน



ภาพที่ 31ค่าความกระด้างในน้ำ (mg/L) ระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร ที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด เป็นระยะเวลา 7 เดือน

3. การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant

การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant ต้องอาศัยการบูรณาการเทคโนโลยีและศาสตร์ด้านต่าง ๆ ได้แก่ เทคโนโลยีด้านวิศวกรรมในการพัฒนาระบบการเลี้ยง ที่ประกอบไปด้วยห้องเลี้ยง ระบบน้ำแบบหมุนเวียน และระบบการบำบัดน้ำเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ร่วมกับเทคโนโลยีการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เพื่อเป็นการผลักดันให้โครงการนี้สามารถเป็นการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระดับ Pilot plant ได้ ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการสร้างโรงเรือนการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแนวตั้ง ซึ่งภายในประกอบด้วย ห้องเลี้ยงเชิงกว้าง 144 ห้อง (unit) และห้องเลี้ยงเชิงลึก 96 unit ซึ่งเลี้ยงด้วยระบบน้ำแบบหมุนเวียนแบบบำบัดน้ำเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ (ภาพที่ 32) นอกจากนี้ยังมีการติดกล้องเพื่อสังเกตพฤติกรรมของกุ้งก้ามกร้ามที่เลี้ยงในคอนโดด้วย

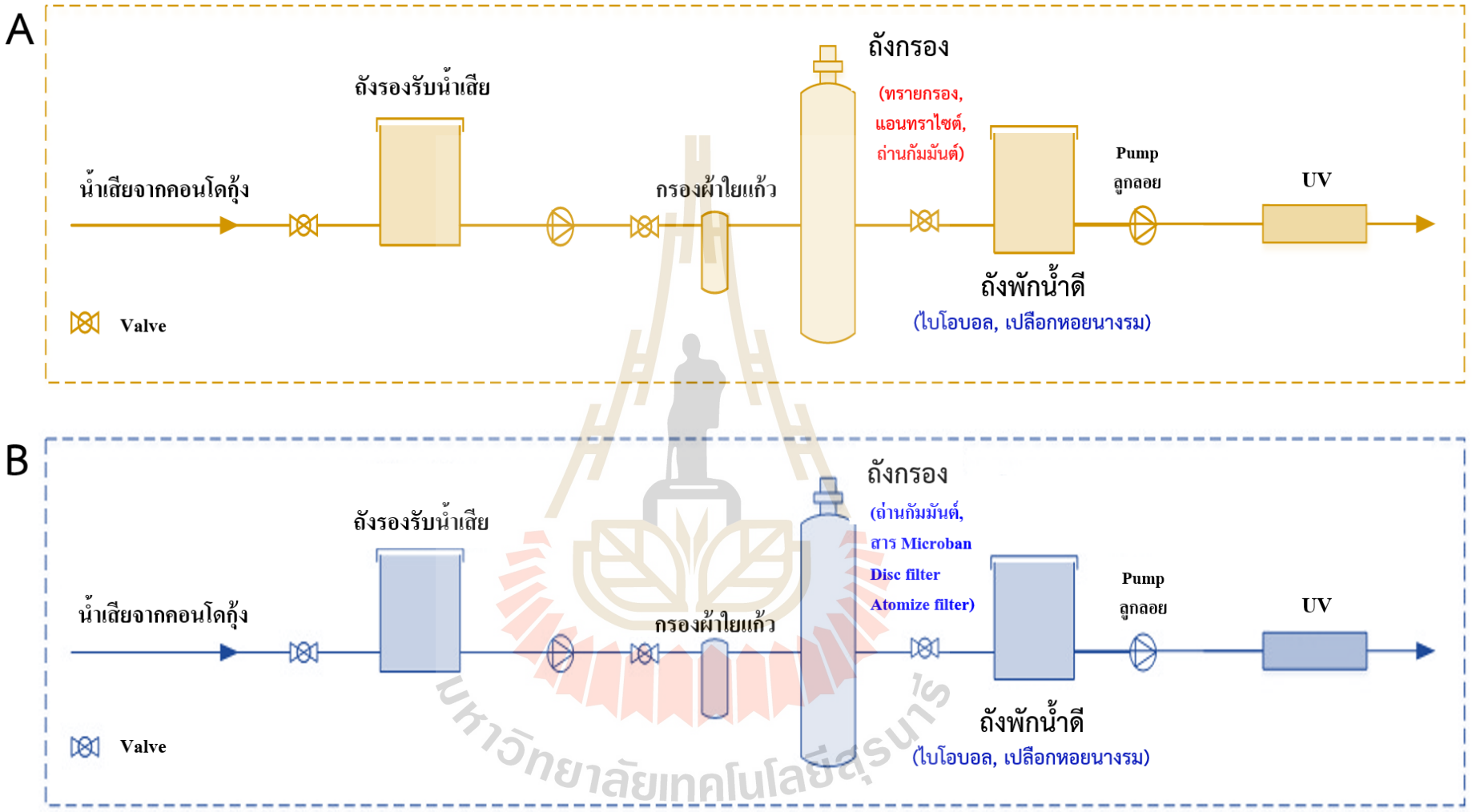
คุณภาพน้ำในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาการใช้ระบบน้ำแบบหมุนเวียนแบบปิดในระหว่างการเพาะเลี้ยงกุ้ง พบว่าระบบดังกล่าวนี้สามารถเลี้ยงกุ้งได้ ดังนั้นการพัฒนาระบบน้ำแบบหมุนเวียน และระบบการบำบัดน้ำเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่สำหรับการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้นเพื่อรองรับระบบการเลี้ยงในเชิงธุรกิจ ซึ่งระบบน้ำแบบหมุนเวียนและระบบการบำบัดน้ำ ประกอบไปด้วย ถังรองรับน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงกุ้ง กรองผ้าใยแก้วเพื่อกรองตะกอนอาหารและขี้กุ้ง ถังกรองซึ่งภายในประกอบด้วยวัสดุกรองชนิดต่าง ๆ และถังพักน้ำดีที่มีไบโอบอล ช่วยทำให้น้ำใสและเป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ และเปลือกหอยมีคุณสมบัติเป็น pH buffer ช่วยให้ค่า pH ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และเปลือกหอยรางรมจะค่อย ๆ ปลดปล่อยสารประกอบจำพวกแคลเซียมออกมา ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการลอกคราบของกุ้งก้ามกราม ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาระบบกรอง 2 ระบบ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเพื่อนำมาใช้หมุนเวียนในระบบการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ระบบที่ 1 ประกอบด้วย ทรายกรอง (Sand), แอนทราไซต์ (anthracite) และถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซึ่งทรายกรองมีหน้าที่กรองความขุ่น สิ่งสกปรก ฝุ่นละออง ตะกอนต่าง ๆ ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ มีขนาด 0.2-0.4 มิลลิเมตร แอนทราไซท์เป็นสารกรองน้ำที่ทำหน้าที่ขจัดตะกอน ดักจับสารแขวนลอยต่าง ๆ ไว้ที่บริเวณภายนอกของตัวสาร และมีช่องว่างสามารถกักเก็บสารแขวนลอยได้ในปริมาณมาก โดยส่วนใหญ่มักจะใช้ร่วมกับทรายกรองน้ำสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองน้ำให้สูงขึ้น และถ่านกัมมันต์สามารถดูดจับกลิ่น สี สารกรอง คลอรีน และสารเคมีต่าง ๆ และระบบที่ 2 ประกอบด้วย ถ่านกัมมันต์, สาร Microban เป็นสารที่มีเทคโนโลยีป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียจากสหรัฐอเมริกา ลิขสิทธิ์เฉพาะ master, ไส้กรองดิส (Disc filter) สามารถปรับความละเอียดตั้งแต่ 20-80 ไมครอน ทำการดักจับ ตะกอนหยาบ เช่น กรวด ทราย หิน โคลน และ สารแขวนลอยขนาดใหญ่ และ ไส้กรองอะตอมไมส์ (Atomize filter) เป็นไส้กรองละเอียด 0.5 ไมครอน และเป็นเทคโนโลยี High Flow ลิขสิทธิ์เฉพาะ Master ทำให้ได้อัตราการไหลของน้ำสูง ซึ่งในระบบหมุนเวียนน้ำ (ภาพที่ 33)

การศึกษาระบบกรอง 2 ระบบ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเพื่อน้ำมาใช้หมุนเวียนในระบบการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามคอนโด จากการศึกษาพบว่าน้ำจากระบบเลี้ยงกุ้งคอนโด มีอุณหภูมิ 29.28-30.14 °C ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ 7.06-7.08 mg/L ค่าพีเอช 8.23-8.27 ค่าปริมาณแอมโมเนียทั้งหมด (Total ammonia) 0.25 mg/L ค่าไนไตรต์ (NO^{2-}) 0.00178-0.00226 mg/L ค่าไนเตรต (NO^{3-}) 3.62-3.87 mg/L ค่าความกระด้าง (Alkalinity) 115-125 mg/L ค่าแคลเซียมและแมกนีเซียม (Ca & Mg) 385-395 mg/L ค่าคลอไรด์ (Cl^{-}) 1224.62-1324.59 mg/L ค่าความขุ่น 0-1 NTU และค่า COD 22.56-27.36 mg/l เมื่อน้ำจากการเพาะเลี้ยงกุ้งผ่านการบำบัดด้วยระบบกรองชุดที่ 1 พบว่าน้ำหลังผ่านการกรองมีอุณหภูมิ 29.12-29.81 °C ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ 7.05-7.06 mg/L ค่าพีเอช 8.12-8.32 ค่าปริมาณแอมโมเนียทั้งหมด 0.25 mg/L ค่าไนไตรต์ 0.00141-0.00186 mg/L ค่าไนเตรต 2.27-3.76 mg/L ค่าความกระด้าง 120 mg/L ค่าแคลเซียมและแมกนีเซียม 335-395 mg/L ค่าคลอไรด์ 1049.67-1254.61 mg/L ค่าความขุ่น 0.000 NTU และค่า COD 20.44-20.80 mg/l และคุณภาพน้ำหลังผ่านระบบกรองน้ำชุดที่ 2 น้ำหลังผ่านการกรองมีอุณหภูมิ 29.21 °C ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ 7.05 mg/L ค่าพีเอช 8.15 ค่าปริมาณแอมโมเนียทั้งหมด 0-0.25 mg/L ค่าไนไตรต์ 0.000420 mg/L ค่าไนเตรต 3.753 mg/L ค่าความกระด้าง 105 mg/L ค่าแคลเซียมและแมกนีเซียม 325 mg/L ค่าคลอไลน์ 930 mg/L ค่าความขุ่น 0.000 NTU และค่า COD 11.04 mg/l (ตารางที่ 25) ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าคุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดของระบบที่ 1 และ 2 สามารถช่วยลดความขุ่น และ ค่า COD ของน้ำได้ อีกทั้งค่าคุณภาพน้ำจากทั้งสองระบบกรองไม่มีความแตกต่างกันในส่วนของอุณหภูมิน้ำ ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ ค่าพีเอช ค่าความกระด้าง ค่าแคลเซียมและแมกนีเซียม ค่าคลอไรด์ และค่าความขุ่น แต่อย่าไรก็ตามค่าคุณภาพน้ำที่ผ่านการกรองด้วยระบบที่ 2 ได้แก่ค่าปริมาณแอมโมเนียทั้งหมด ค่าไนไตรต์ ค่าไนเตรต และค่า COD ต่ำกว่าค่าคุณภาพน้ำที่ผ่านการกรองด้วยระบบที่ 1 แสดงให้เห็นว่าระบบกรองน้ำชุดที่ 2 มีความสามารถในการกรองและบำบัดได้ดีกว่าระบบกรองน้ำชุดที่ 1 ดังนั้นในการศึกษาระบบกรองที่ 2 จึงถูกใช้เพื่อการศึกษาต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาพที่ 32 การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant โดยมีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาพที่ 33 ระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด ที่เป็นระบบที่มีการกรองแบบที่ 1 (A) และระบบที่มีการกรองแบบที่ 2 (B)

ตารางที่ 25 คุณภาพน้ำจากกุ้งคอนโดที่ผ่านระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด ของระบบกรองที่ 1 และระบบกรองที่ 2

		น้ำที่ผ่านการบำบัด	
Parameters	**น้ำจากระบบเลี้ยงกุ้งคอนโด**	**ระบบกรองที่ 1**	**ระบบกรองที่ 2**
Water temp (°C)	29.28-30.14	29.12-29.81	29.21
DO (mg/l)	7.06-7.08	7.05-7.06	7.05
pH	8.23-8.27	8.12-8.32	8.15
Total ammonia (mg/L)	0.25	0.25	0-0.25
NO^{2-} (mg/l)	0.00178-0.00226	0.00141-0.00186	0.000420
NO^{3-} (mg/l)	3.62-3.87	2.27-3.76	3.753
Alkalinity (mg/l as $CaCO_3$)	115-125	120	105
Ca & Mg (mg/l as $CaCO_3$)	385-395	335-395	325
Cl^- (mg/l)	1224.62-1324.59	1049.67-1254.61	930
ความขุ่น (NTU)	0-1	0.000	0.000
COD (mg/l)	22.56-27.36	20.44-20.80	11.04

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากการศึกษาในข้างต้นชี้ให้เห็นว่าห้องเลี้ยงที่มีขนาด 50 ลิตร เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามขนาด 30-50 กรัม จนถึงขนาดไม่เกิน 120 กรัม ซึ่งเป็นที่น่าสนใจในการศึกษาวิจัยต่อไปเกี่ยวกับลักษณะของห้องเลี้ยงที่สามารถเพิ่มการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามได้ โดยทำการศึกษาห้องเลี้ยง 2 ลักษณะ คือ ห้องเลี้ยงเชิงกว้าง ปริมาตรน้ำ 70 ลิตร และห้องเลี้ยงเชิงลึก ปริมาตรน้ำ 120 ลิตร ในระบบห้องเลี้ยงเชิงกว้าง ปริมาตรน้ำ 70 ลิตร มีความกว้าง 50 เซนติเมตร (ซม.) ความยาว 70 ซม. และความสูงของระดับน้ำ 20 ซม. ซึ่งกุ้งก้ามกรามมีน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 47.06±5.84 กรัม ค่าสูงสุด 68.57 กรัม และค่าต่ำสุด 30.63 กรัม ทำการเลี้ยงเป็นระยะเวลา 12 เดือน พบว่ากุ้งก้ามกรามมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นตั้งในเดือนที่ 1 ถึง เดือนที่ 9 ซึ่งในเดือนที่ 9 กุ้งก้ามกรามมีน้ำหนักสุดท้ายเท่ากับ 149.47±7.92 กรัม มีค่า weight gain เท่ากับ 10.4±2.86 กรัม มีค่า RWG เท่ากับ 7.56±2.25 % มีค่า ADG เท่ากับ 0.35±0.1 กรัมต่อวัน มีค่า SGR เท่ากับ 0.24±0.07 % มีค่าการกินได้เท่ากับ 0.8±0.14 กรัมต่อวัน และมีค่า FCR เท่ากับ 2.39±0.34 แต่เมื่อเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในเดือนที่ 10 พบว่ากุ้งก้ามกร้ามมีการเจริญเติบโตลดลง โดยมีค่า ADG ลดลง คือ 0.27±0.11 กรัมต่อวัน มีค่า weight gain เท่ากับ 10.48±1.68 กรัม มีค่า RWG เท่ากับ 7.07±1.45 % มีค่า SGR เท่ากับ 0.18±0.08 % มีค่าการกินได้เท่ากับ 0.69±0.18 กรัมต่อวัน และมีค่า FCR เท่ากับ 2.67±0.42 ซึ่งทำให้กุ้งมี ซึ่งมีค่าน้ำหนักสุดท้ายเท่ากับ 159.95±6.88 กรัม (ตารางที่ 26 และภาพที่ 34, 35 และ 36)

การศึกษาการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงเชิงลึก ปริมาตรน้ำ 120 ลิตร มีความกว้าง 40 ซม. ความยาว 50 ซม. และความสูงของระดับน้ำ 60 ซม. ซึ่งนำกุ้งน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 48.72±5.97 กรัม ค่าสูงสุด 71.58 กรัม และค่าต่ำสุด 36.94 กรัม เลี้ยงเป็นระยะเวลา 14 เดือน พบว่ากุ้งก้ามกรามมีเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นในเดือนที่ 1 ถึงเดือนที่ 10 ซึ่งในเดือนที่ 10 กุ้งก้ามกรามมีน้ำหนักตัวสุดท้ายเท่ากับ 177.74±10.45 กรัม ค่า weight gain เท่ากับ 12.78±1.28 กรัม มี RWG เท่ากับ 7.74±0.55 % มีค่า ADG เท่ากับ 0.43±0.04 กรัมต่อวัน มีค่า SGR เท่ากับ 0.25±0.02 % มีค่าการกินได้เท่ากับ 0.94±0.1 กรัมต่อวัน ค่า FCR 2.21±0.07 อย่างไรก็ตามอัตราการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามลดลงในเดือนที่ 11 ซึ่งมีค่าน้ำหนักสุดท้าย 184.69±9.84 กรัม มีค่า weight gain เท่ากับ 9.8±1.38 กรัม ค่า RWG เท่ากับ 5.66±1.11 % ค่า ADG เท่ากับ 0.33±0.05 กรัมต่อวัน ค่า SGR เท่ากับ 0.18±0.03 % ค่าการกินได้เท่ากับ 0.73±0.11 กรัมต่อวัน ค่า FCR เท่ากับ 2.25±0.08 (ตารางที่ 27 และภาพที่ 34, 36 และ 38) นอกจากนี้พบว่าอัตราการรอดชีวิตของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงเชิงกว้างและระบบห้องเลี้ยงเชิงลึกมีค่าอัตราการรอด 84-88% ซึ่งไม่แตกต่างกัน จากผลการศึกษาการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามในระบบห้องเลี้ยงเชิงกว้าง และระบบห้องเลี้ยงเชิงลึกนั้นให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อทำการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ที่มีขนาดเริ่มต้น 40-50 กรัม ในระบบห้องเลี้ยงเชิงกว้างจะสามารถเลี้ยงกุ้งให้มีน้ำหนักสุดท้าย 149.47±7.92 กรัม ในระยะเวลา 9 เดือน และในระบบห้องเลี้ยงเชิงลึกจะสามารถเลี้ยงกุ้งให้มีน้ำหนักสุดท้าย 177.74±10.45 กรัม ในระยะเวลา 10 เดือน นั้นแสดงให้เห็นว่าห้องเลี้ยงที่มีขนาด 70 ลิตร และ 120 ลิตร เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามขนาด 40-50 กรัม จนถึงขนาดไม่เกิน 150 กรัม และ 178 กรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 26 การเจริญเติบโตของกุ้งที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงเชิงกว้าง ปริมาตรน้ำ 70 ลิตร (น้ำหนักเริ่มต้น 47.06±5.84 g ค่าสูงสุด 68.57 g และค่าต่ำสุด 30.63 g) (mean ± sd, n=285)

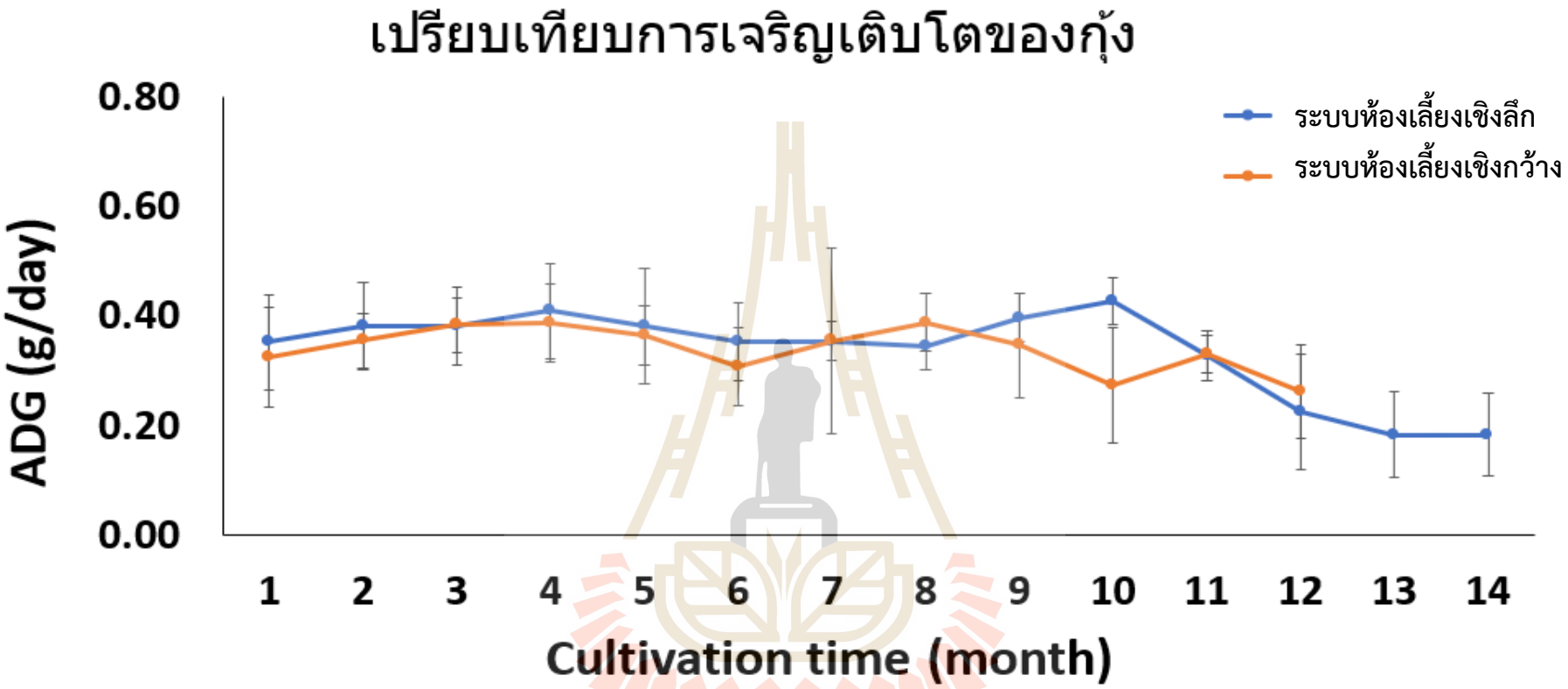
Duration (month)		ระบบห้องเลี้ยงเชิงกว้าง						
		Final weight (g)	WG (g)	RWG (%)	ADG (g/day)	SGR (%/day)	FI (g/day)	FCR
1	Mean	56.41±6.2	9.35±1.72	20.16±4.72	0.32±0.09	0.63±0.15	0.68±0.19	2.12±0.18
	Max	79.85	15.84	47.50	0.88	1.45	1.94	2.62
	Min	45.18	6.05	11.11	0.20	0.35	0.41	1.66
2	Mean	66.71±6.12	10.64±1.5	19.15±3.06	0.35±0.05	0.58±0.09	0.77±0.09	2.17±0.2
	Max	97.79	18.47	29.77	0.62	0.87	1.29	2.86
	Min	54.16	5.38	8.01	0.18	0.26	0.41	1.57
3	Mean	77.79±6.44	11.29±2.07	17.05±3.33	0.38±0.05	0.54±0.08	0.83±0.1	2.19±0.17
	Max	108.07	15.91	25.60	0.53	0.76	1.23	2.70
	Min	56.10	1.22	2.07	0.13	0.16	0.27	1.61
4	Mean	89±5.62	10.99±2.59	14.23±3.75	0.39±0.07	0.47±0.1	0.85±0.15	2.21±0.14
	Max	123.07	17.39	24.28	0.75	0.93	1.36	2.77
	Min	76.48	1.48	1.93	0.18	0.19	0.37	1.77
5	Mean	100.03±5.44	10.82±1.19	12.18±1.62	0.36±0.05	0.39±0.05	0.8±0.11	2.19±0.13
	Max	135.80	14.29	16.49	0.75	0.66	1.72	2.45
	Min	88.46	6.31	7.04	0.21	0.23	0.47	1.77
6	Mean	109.17±6.68	9.25±2.14	9.24±1.96	0.31±0.07	0.29±0.06	0.81±0.18	2.68±0.41
	Max	146.67	15.58	15.01	0.52	0.47	1.22	3.70
	Min	95.26	4.05	4.13	0.14	0.13	0.08	0.26
7	Mean	117.93±8.39	8.79±3.64	8.05±3.31	0.39±0.13	0.35±0.13	0.91±0.33	2.48±0.87
	Max	156.70	18.00	16.27	0.77	0.70	3.26	7.82
	Min	101.24	1.82	1.71	0.14	0.12	0.11	0.23
8	Mean	140.58±10.09	11.29±2.1	8.82±1.95	0.39±0.05	0.29±0.05	0.83±0.1	2.14±0.14
	Max	166.92	16.48	13.50	0.55	0.42	1.03	2.37
	Min	123.85	4.50	3.30	0.31	0.21	0.67	1.87
9	Mean	149.47±7.92	10.4±2.86	7.56±2.25	0.35±0.1	0.24±0.07	0.8±0.14	2.39±0.34
	Max	162.90	14.69	9.91	0.49	0.32	0.98	3.12
	Min	134.82	5.88	4.00	0.20	0.13	0.49	2.00
10	**Mean**	**159.95±6.88**	**10.48±1.68**	**7.07±1.45**	**0.27±0.11**	**0.18±0.08**	**0.69±0.18**	**2.67±0.42**
	Max	171.25	14.61	10.76	0.49	0.34	1.10	3.30
	Min	144.96	8.27	5.13	0.16	0.10	0.53	2.05
11	Mean	166.79±7.37	9.91±0.99	6.36±0.92	0.33±0.03	0.21±0.03	0.73±0.08	2.2±0.11
	Max	176.08	11.29	7.79	0.38	0.25	0.83	2.38
	Min	156.25	8.52	5.21	0.28	0.17	0.63	2.00
12	Mean	171.68±7.54	7.85±2.59	4.77±1.47	0.26±0.09	0.16±0.05	0.68±0.15	2.67±0.32
	Max	181.51	12.26	7.24	0.41	0.23	0.95	3.08
	Min	163.46	5.25	3.24	0.18	0.11	0.54	2.32

หมายเหตุ Average daily gain (ADG) = (final body weight – initial body weight) / experimental days), Specific growth rate (SGR) = 100 x [(ln final body weight – ln initial body weight) / experimental days], Relative weight gain (RWG) = (Weight gain/ initial weight) x 100, Relative weight gain (RWG)/day = ((Weight gain/ initial weight)/ experiment day) x 100 and Feed conversion ratio (FCR) = dry feed fed /weight gain

ตารางที่ 27 การเจริญเติบโตของกุ้งที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงเชิงลึก ปริมาตรน้ำ 120 ลิตร (น้ำหนักเริ่มต้น 48.72±5.97 g ค่าสูงสุด 71.58 g และค่าต่ำสุด 36.94 g) (mean ± sd, n=187)

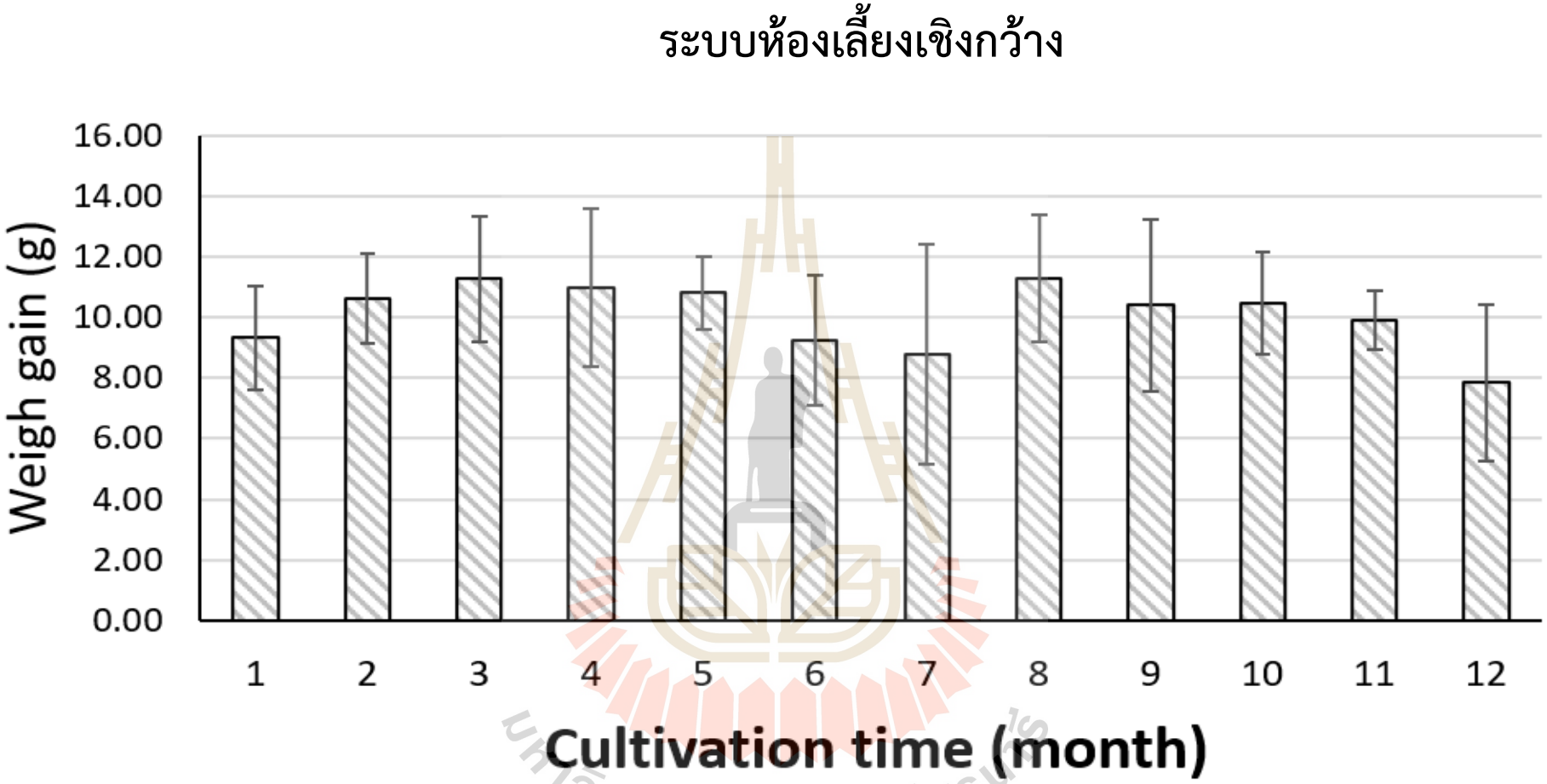
Duration (month)		ระบบห้องเลี้ยงเชิงลึก						
		Final weight (g)	WG (g)	RWG (%)	ADG (g/day)	SGR (%/day)	FI (g/day)	FCR
1	Mean	58.75±6.65	10.03±1.86	20.8±4.26	0.35±0.09	0.66±0.14	0.78±0.23	2.22±0.25
	Max	87.61	16.36	38.66	0.84	1.27	1.89	3.11
	Min	49.32	7.45	12.95	0.25	0.45	0.60	1.75
2	Mean	70.21±7.84	11.46±2.4	19.6±3.54	0.38±0.08	0.6±0.1	0.84±0.17	2.2±0.16
	Max	107.24	20.36	33.14	0.68	0.95	1.42	2.65
	Min	58.86	4.75	6.67	0.16	0.22	0.39	1.90
3	Mean	80.95±8.72	11.19±2.96	16.1±4.54	0.38±0.07	0.51±0.1	0.84±0.17	2.19±0.2
	Max	120.44	16.14	25.23	0.54	0.75	1.31	2.84
	Min	61.00	0.41	0.65	0.12	0.20	0.25	1.27
4	Mean	93.9±9.43	11.97±3.06	14.6±3.35	0.41±0.09	0.46±0.08	0.9±0.19	2.21±0.14
	Max	133.22	20.68	22.40	0.69	0.67	1.40	2.63
	Min	82.10	3.35	4.26	0.17	0.19	0.42	1.83
5	Mean	105.12±10.26	10.78±2.3	11.49±2.5	0.38±0.11	0.38±0.11	0.85±0.22	2.23±0.16
	Max	145.59	20.34	22.56	0.99	0.98	2.17	2.51
	Min	91.35	2.15	2.29	0.18	0.18	0.37	1.15
6	Mean	115.75±11.33	10.6±2.16	10.1±2	0.35±0.07	0.32±0.06	0.92±0.17	2.64±0.28
	Max	157.00	19.08	18.99	0.64	0.58	1.52	3.22
	Min	96.48	5.13	5.62	0.17	0.18	0.52	2.05
7	Mean	143.11±10.99	10.62±1.07	8.07±1.09	0.35±0.04	0.26±0.03	0.83±0.11	2.36±0.26
	Max	168.00	13.20	11.79	0.44	0.37	1.09	2.88
	Min	120.85	8.20	6.98	0.27	0.22	0.62	1.72
8	Mean	153.75±10.38	10.32±1.25	7.27±1.31	0.34±0.04	0.23±0.04	0.73±0.06	2.12±0.14
	Max	176.26	13.52	10.65	0.45	0.34	0.87	2.39
	Min	130.69	8.13	4.92	0.27	0.16	0.63	1.87
9	Mean	165.64±10.07	11.89±1.32	7.79±1.17	0.4±0.04	0.25±0.04	0.87±0.08	2.2±0.23
	Max	186.17	14.87	10.58	0.50	0.34	1.01	3.32
	Min	141.51	8.75	5.62	0.29	0.18	0.70	2.00
10	Mean	177.74±10.45	12.78±1.28	7.74±0.55	0.43±0.04	0.25±0.02	0.94±0.1	2.21±0.07
	Max	188.96	14.73	8.96	0.49	0.29	1.10	2.36
	Min	152.17	10.16	6.76	0.34	0.22	0.75	2.01
11	**Mean**	**184.69±9.84**	**9.8±1.38**	**5.66±1.11**	**0.33±0.05**	**0.18±0.03**	**0.73±0.11**	**2.25±0.08**
	Max	196.22	12.68	8.33	0.42	0.27	0.97	2.38
	Min	164.85	7.26	3.84	0.24	0.13	0.50	2.01
12	Mean	192.21±9.46	6.72±3.17	3.66±1.87	0.22±0.11	0.12±0.06	0.56±0.18	2.62±0.39
	Max	199.89	17.62	10.33	0.59	0.33	1.19	3.27
	Min	169.53	3.67	1.87	0.12	0.06	0.40	2.03
13	Mean	195.61±9.59	5.57±1.8	2.96±1.02	0.18±0.08	0.09±0.04	0.49±0.24	2.72±1.18
	Max	207.50	8.25	4.57	0.41	0.22	0.86	3.83
	Min	177.28	2.05	1.09	0.12	0.06	0.00	0.00
14	Mean	203.27±4.62	1.72±1.1	0.85±0.53	0.18±0.08	0.09±0.04	0.62±0.1	3.96±1.66
	Max	211.46	4.16	2.01	0.31	0.16	0.70	7.38
	Min	198.20	0.67	0.33	0.06	0.03	0.44	1.92

หมายเหตุ Average daily gain (ADG) = (final body weight – initial body weight) / experimental days), Specific growth rate (SGR) = 100 x [(ln final body weight – ln initial body weight) / experimental days], Relative weight gain (RWG) = (Weight gain/ initial weight) x 100, Relative weight gain (RWG)/day = ((Weight gain/ initial weight)/ experiment day) x 100 and Feed conversion ratio (FCR) = dry feed fed /weight gain

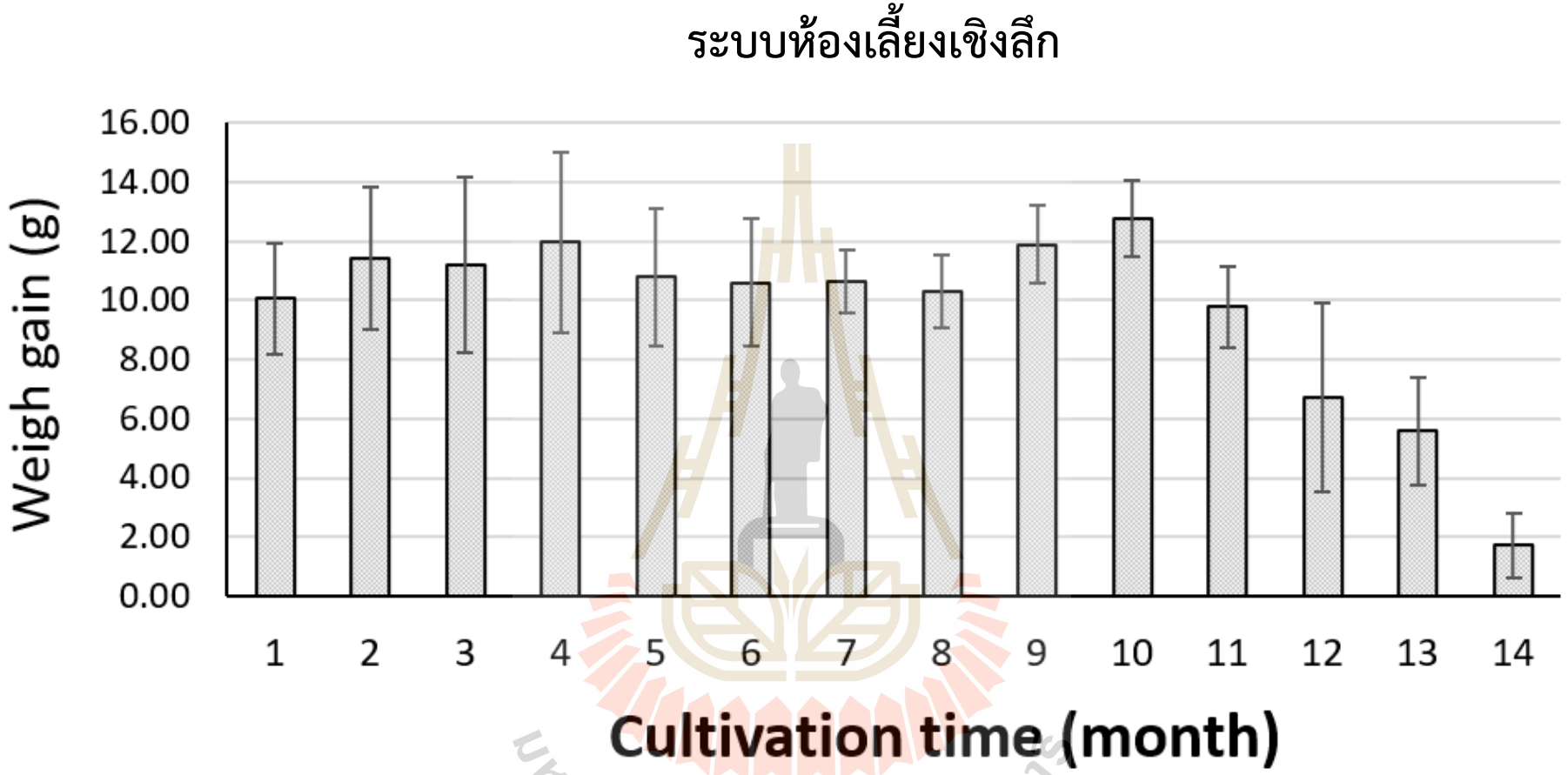


ภาพที่ 34 การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (Average daily gain (ADG), g) ของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบในระบบห้องเลี้ยงเชิงกว้าง และระบบห้องเลี้ยงเชิงลึก

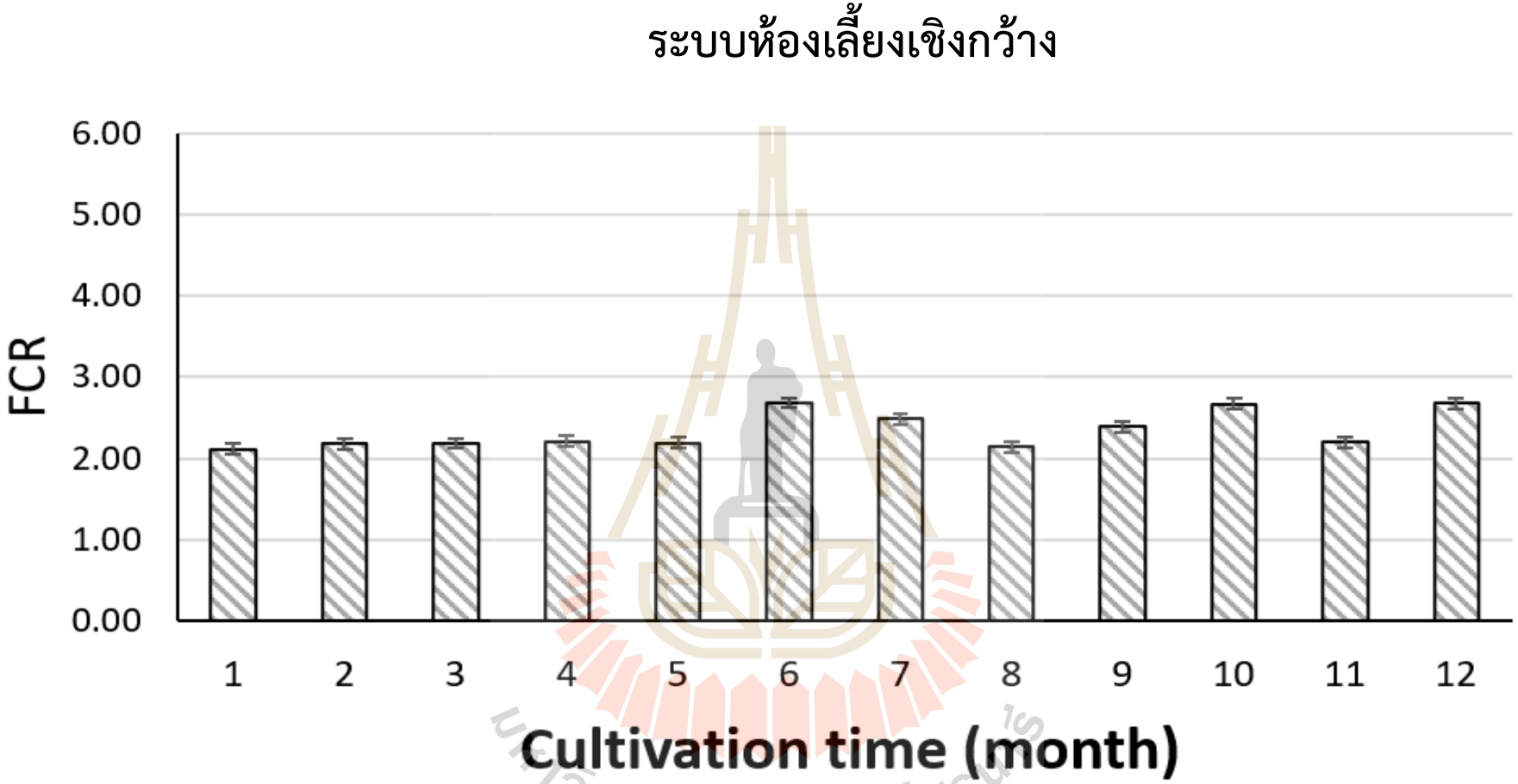
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



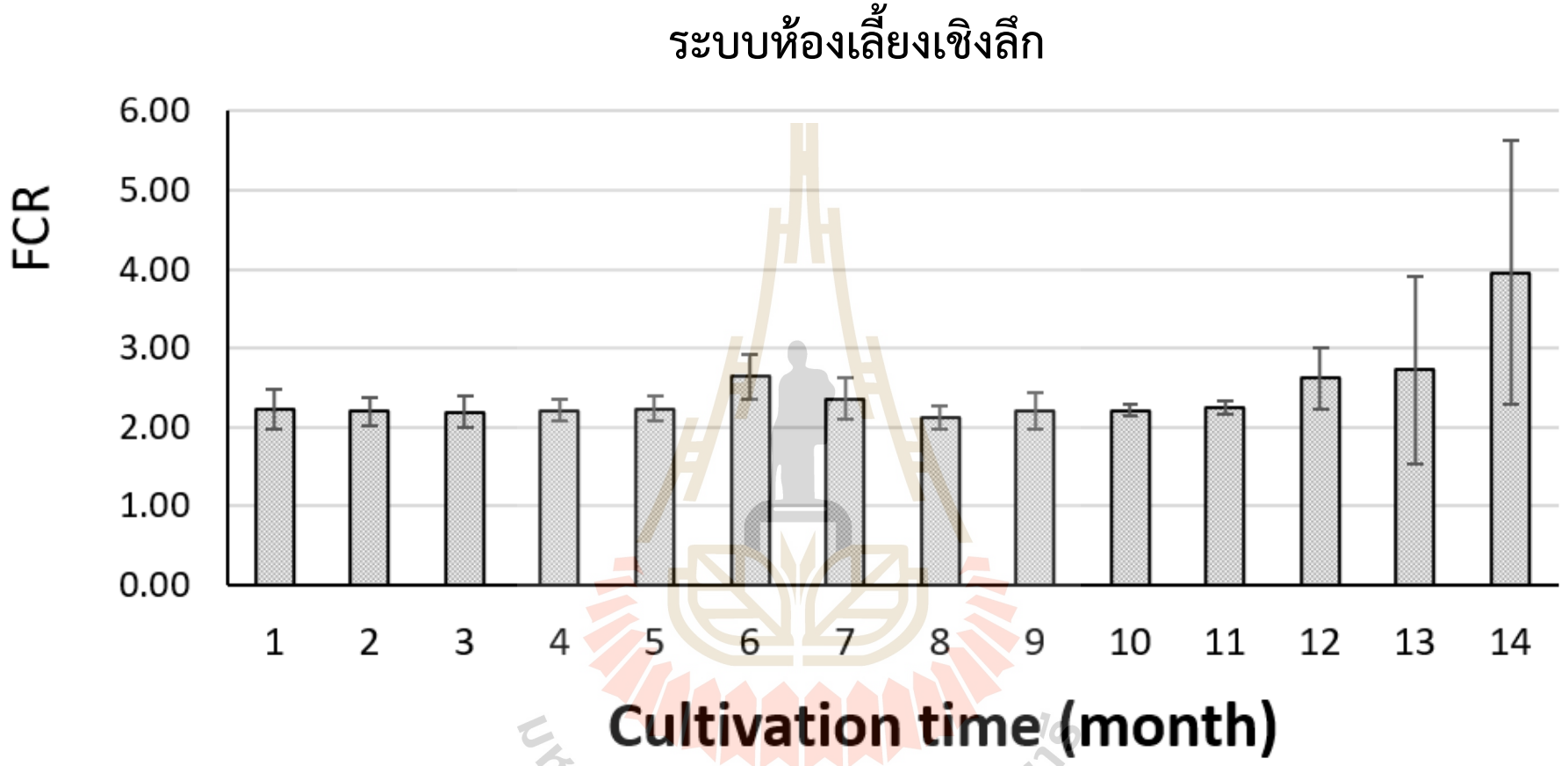
ภาพที่ 35 ค่าน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น (weight gain, g) ของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงเชิงกว้าง ปริมาตรน้ำ 70 ลิตร



ภาพที่ 36 ค่าน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น (weight gain, g) ของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงเชิงลึก ปริมาตรน้ำ 120 ลิตร



ภาพที่ 37 อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (FCR) ของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงเชิงกว้าง ปริมาตรน้ำ 70 ลิตร

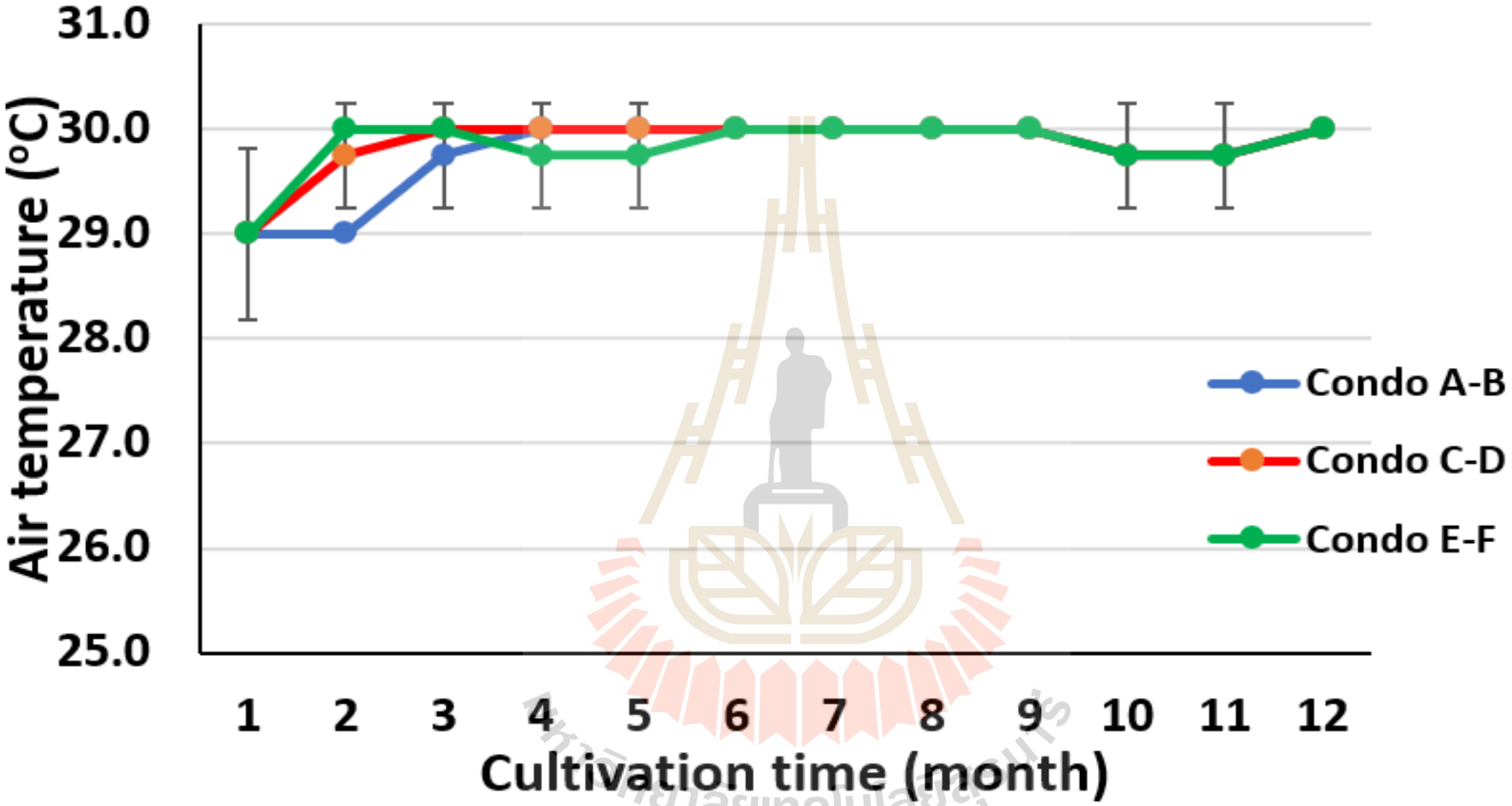


ภาพที่ 38 อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (FCR) ของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงเชิงลึก ปริมาตรน้ำ 120 ลิตร

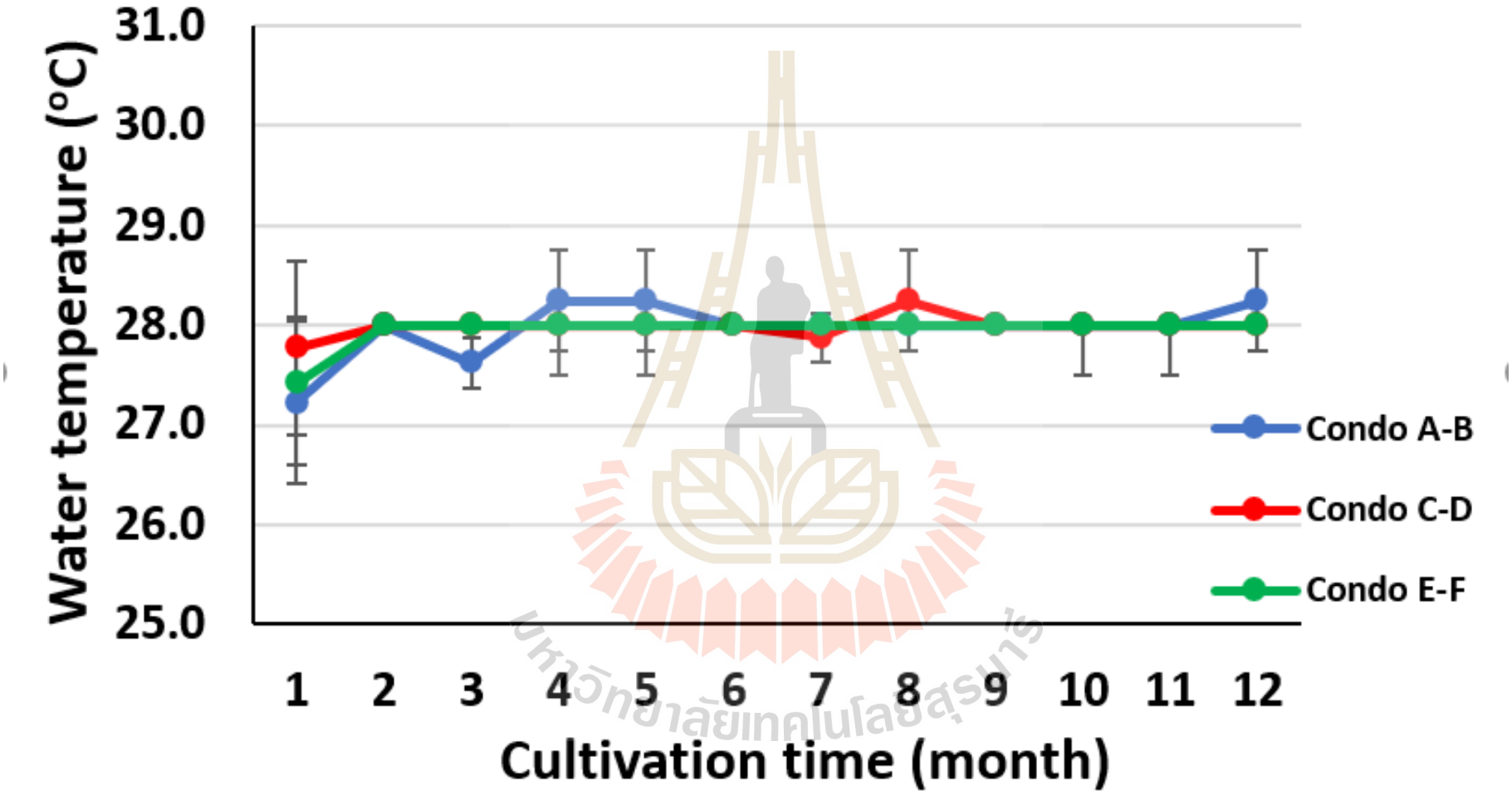
การเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant ที่มีห้องเลี้ยงเชิงกว้าง 144 ห้อง (unit) และห้องเลี้ยงเชิงลึก 96 unit เลี้ยงด้วยระบบน้ำแบบหมุนเวียนแบบปิด เป็นระยะเวลา 12 เดือน ซึ่งในการเลี้ยงกุ้งคอนโดแบ่งชุดกรองน้ำเป็น 3 ชุด ได้แก่ ชุด condo A-B, ชุด condo C-D และชุด condo E-F ซึ่งในแต่ละชุดประกอบด้วยห้องเลี้ยงเชิงกว้าง 48 unit และห้องเลี้ยงเชิงลึก 32 unit เพื่อให้ระบบกรองยังคงประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเพื่อน้ำมาใช้หมุนเวียนในระบบการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามคอนโดได้ ในตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ได้ทำการวัดอุณหภูมิอากาศ (ภาพที่ 39) และคุณภาพน้ำในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในคอนโดในแต่ละชุดการเลี้ยง (ตารางที่ 28) ได้แก่ อุณหภูมิน้ำ (ภาพที่ 40), ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (Dissolved oxygen; DO) (ภาพที่ 41), ค่าพีเอช (pH) (ภาพที่ 42) ค่าแอมโมเนีย (Ammonia) (ภาพที่ 43) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) (ภาพที่ 44) ค่าความกระด้าง (Alkalinity) (ภาพที่ 45) ค่าแมกนีเซียม (ภาพที่ 46) และค่าแคลเซียม (ภาพที่ 47) ซึ่งอุณหภูมิอากาศมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 29.77-29.8 °C คุณภาพน้ำในคอนโดกุ้งในแต่ละชุดการเลี้ยงพบว่าค่าคุณภาพน้ำไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งอุณหภูมิน้ำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 27.95-27.99 °C ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (DO) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.45-6.56 mg/L ค่าพีเอชในน้ำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.44-7.49 ค่าแอมโมเนียมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 mg/L ค่าการนำไฟฟ้า (EC) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3217.35-3257.23 ms/cm ค่าความกระด้าง (Alkalinity) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 111.04-111.25mg/L ค่าแมกนีเซียมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 783.33-787.5 mg/L และค่าแคลเซียมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 391.67-391.67 mg/L ดังตารางที่ 28

ตารางที่ 28 คุณภาพน้ำในระบบห้องเลี้ยง (mean ± sd)

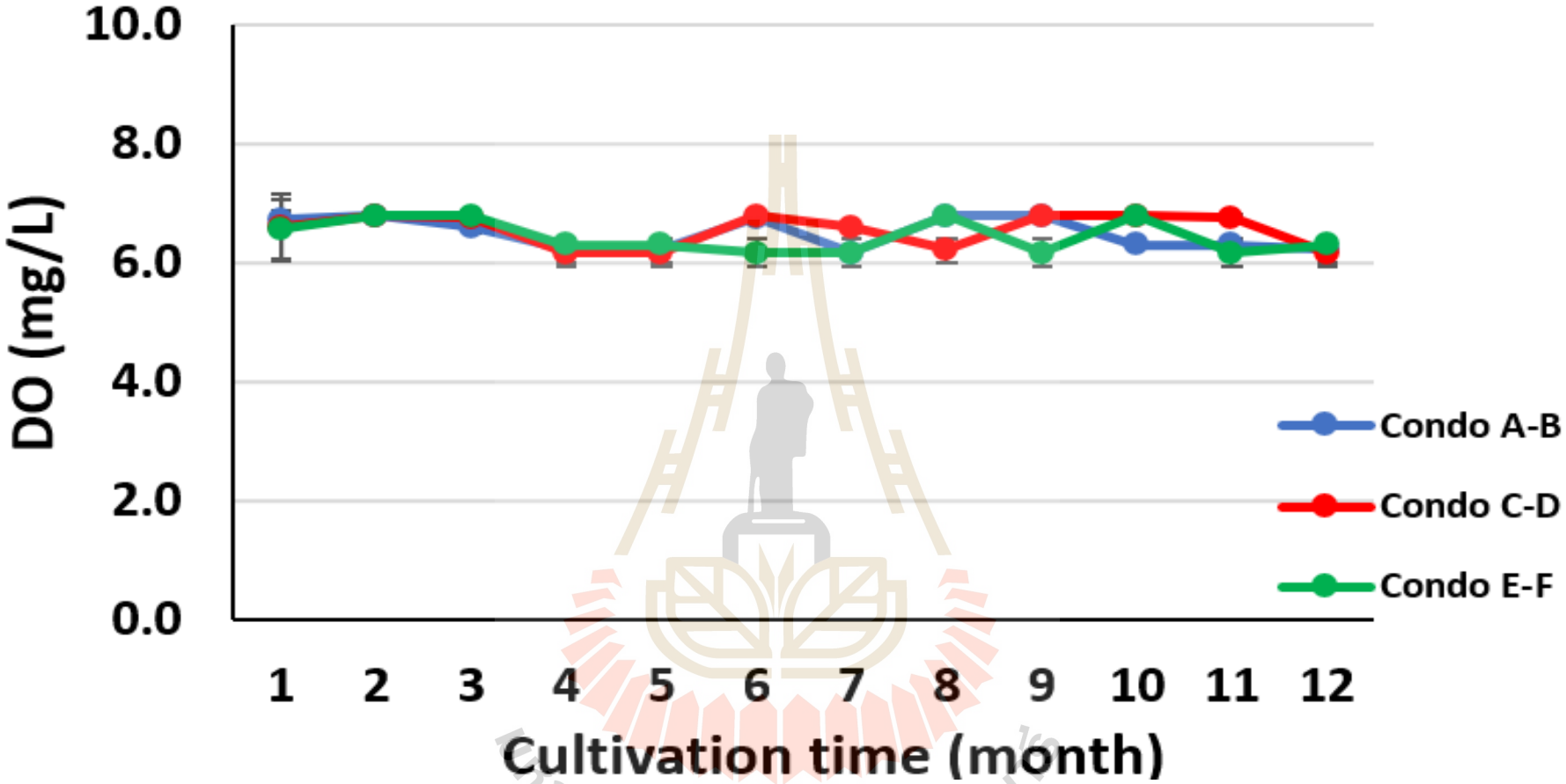
Parameters	Condo A-B	Condo C-D	Condo E-F
Air temp (°C)	29.77±0.38	29.85±0.29	29.83±0.29
Water temp (°C)	27.97±0.29	27.99±0.11	27.95±0.17
Do (mg/L)	6.5±0.27	6.56±0.28	6.45±0.28
pH	7.47±0.17	7.49±0.15	7.44±0.13
Ammonia ion NH_3 (mg/L)	0.24±0.01	0.24±0.02	0.24±0.02
EC (ms/cm)	3217.35±148.48	3230.33±128.61	3257.23±174.01
Alkalinity (mg/L)	111.04±1.67	111.25±1.69	111.25±1.69
Mg kit (mg/L)	787.5±43.3	787.5±43.3	783.33±57.74
Ca kit (mg/L)	391.67±28.87	393.75±21.65	391.67±28.87



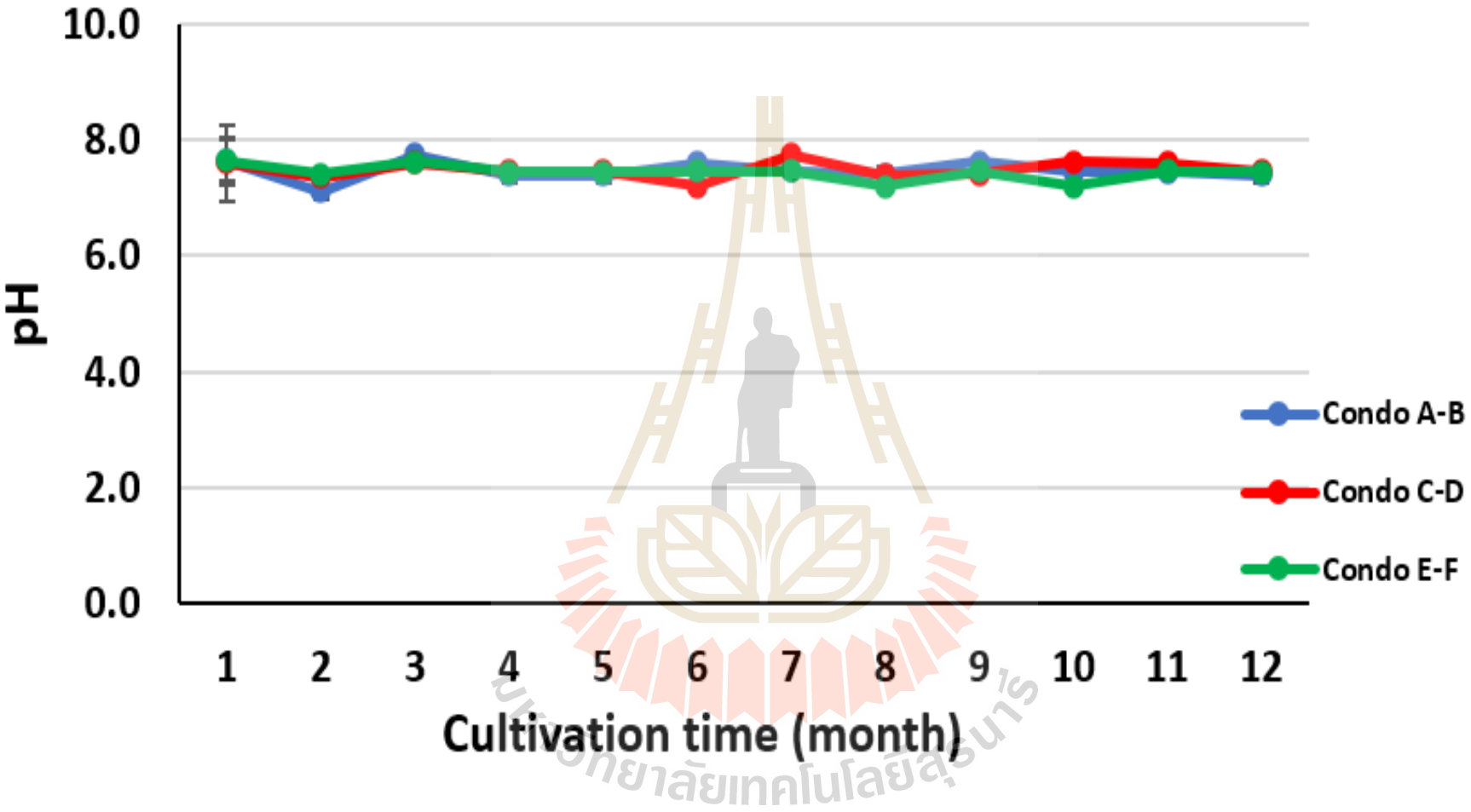
ภาพที่ 39 อุณหภูมิของอากาศ (°C) ในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เป็นระยะเวลา 12 เดือน



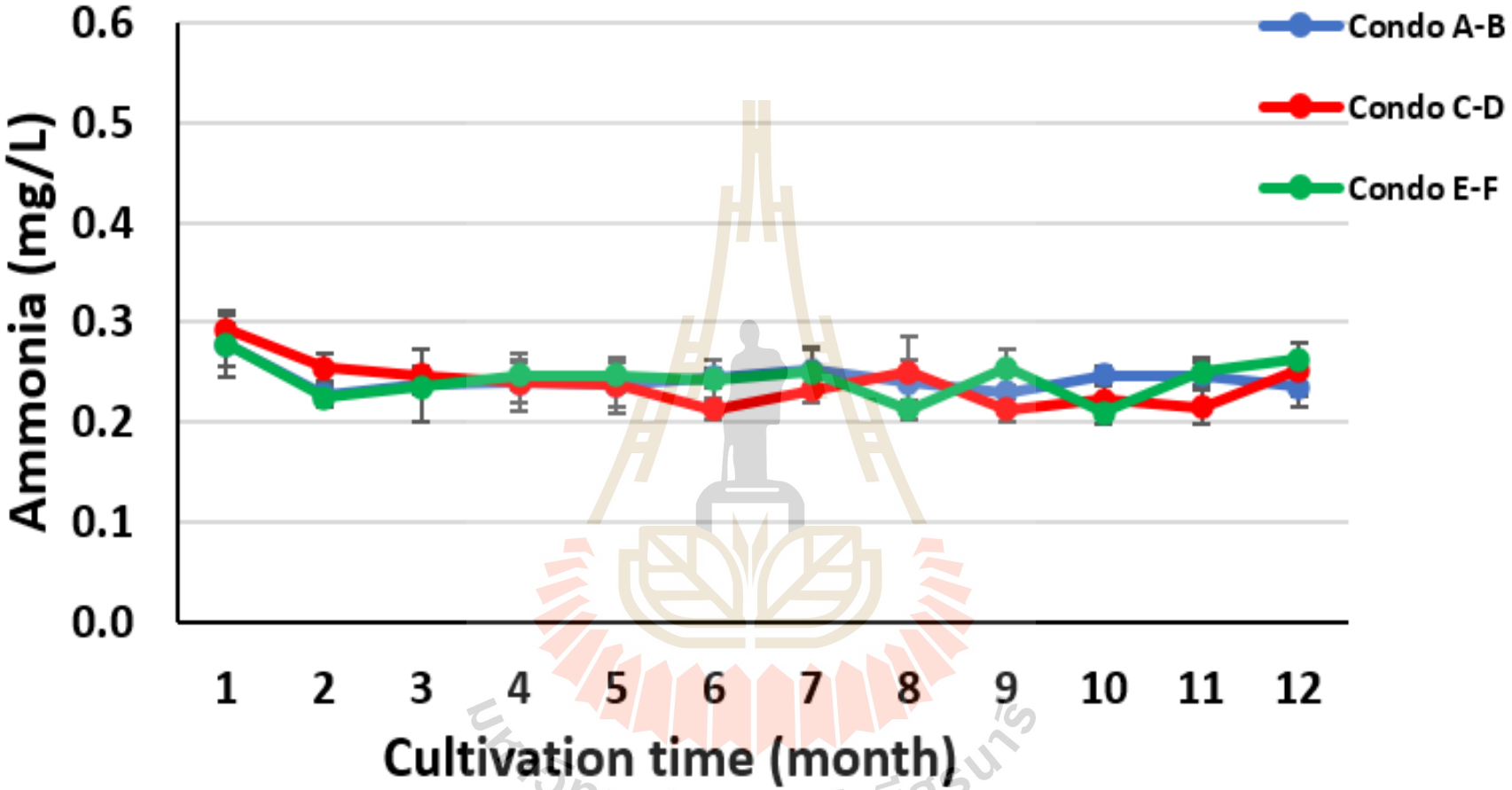
ภาพที่ 40 อุณภูมิของน้ำ (°C) ในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เป็นระยะเวลา 12 เดือน



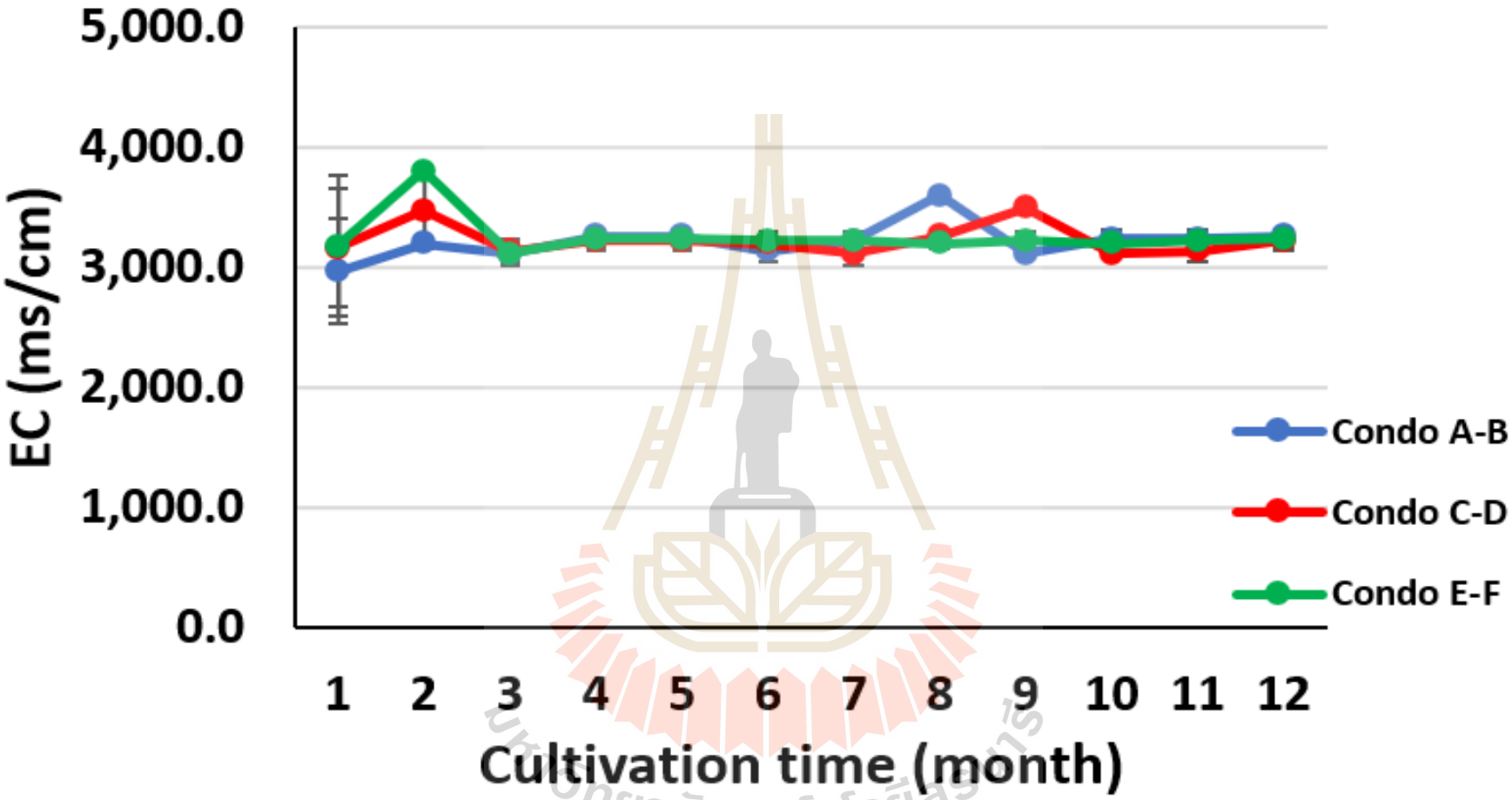
ภาพที่ 41 ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (mg/L) ของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เป็นระยะเวลา 12 เดือน



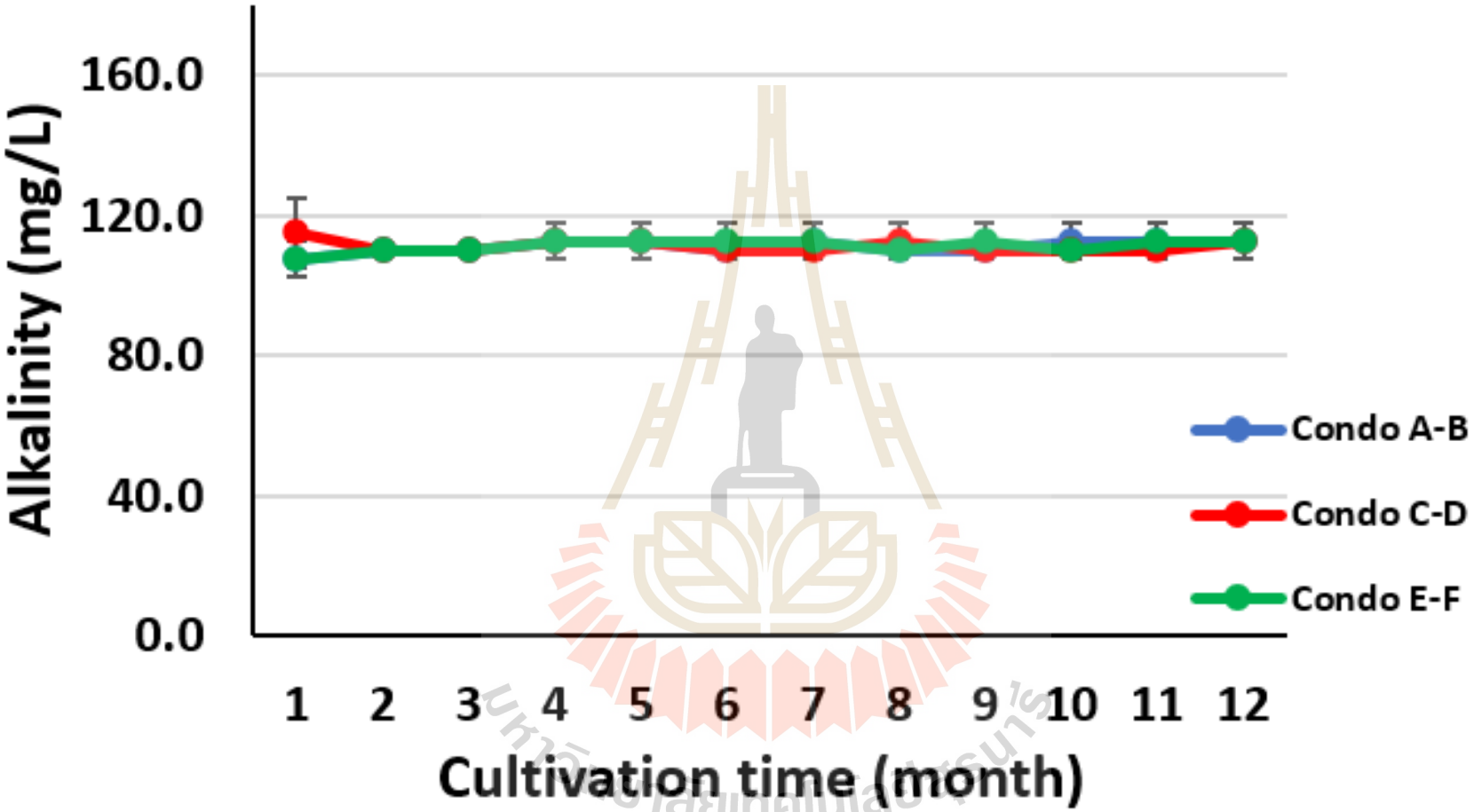
ภาพที่ 42 ค่าความเป็นกรดด่างในน้ำของของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เป็นระยะเวลา 12 เดือน



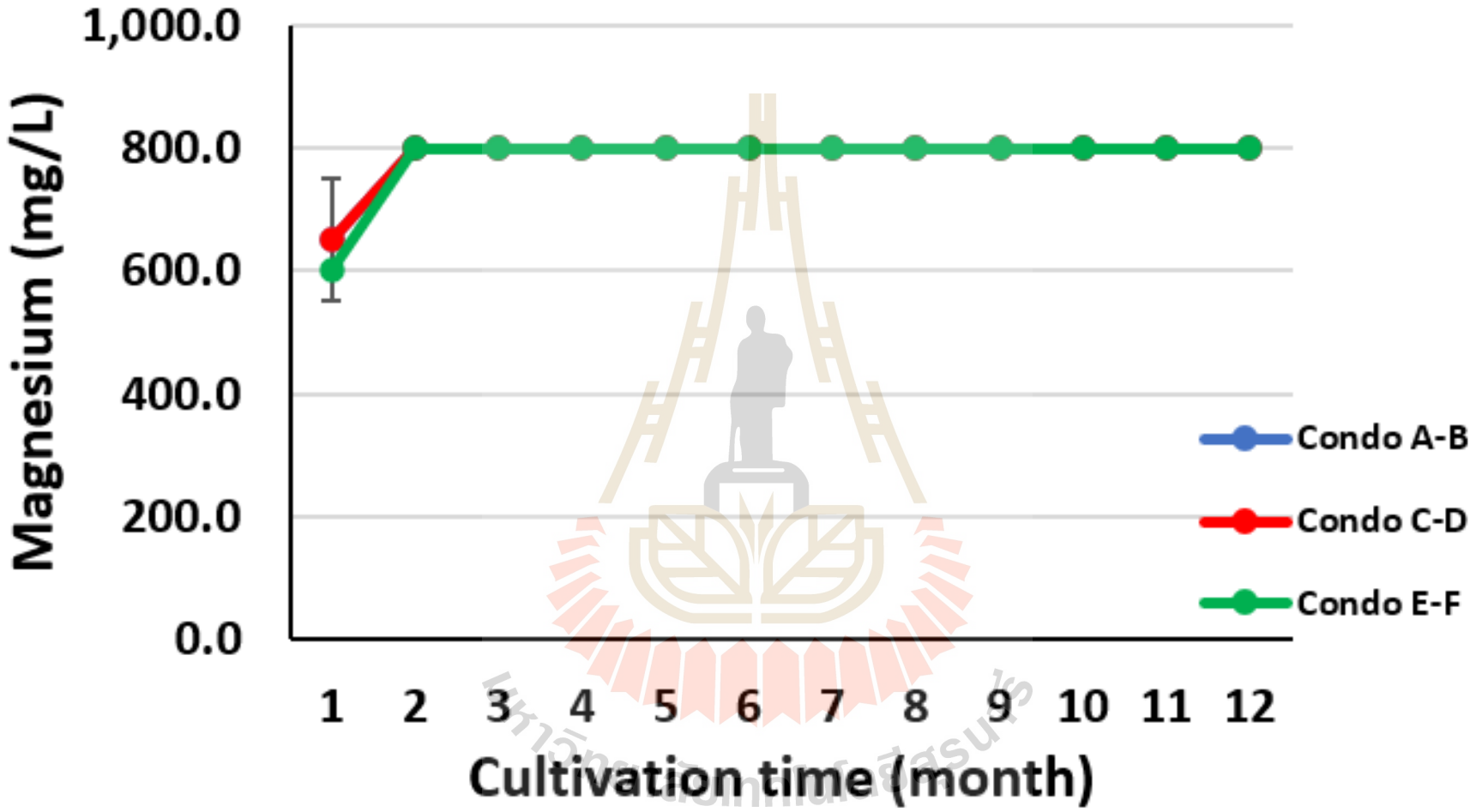
ภาพที่ 43 ค่าแอมโมเนีย (mg/L) ในน้ำของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เป็นระยะเวลา 12 เดือน



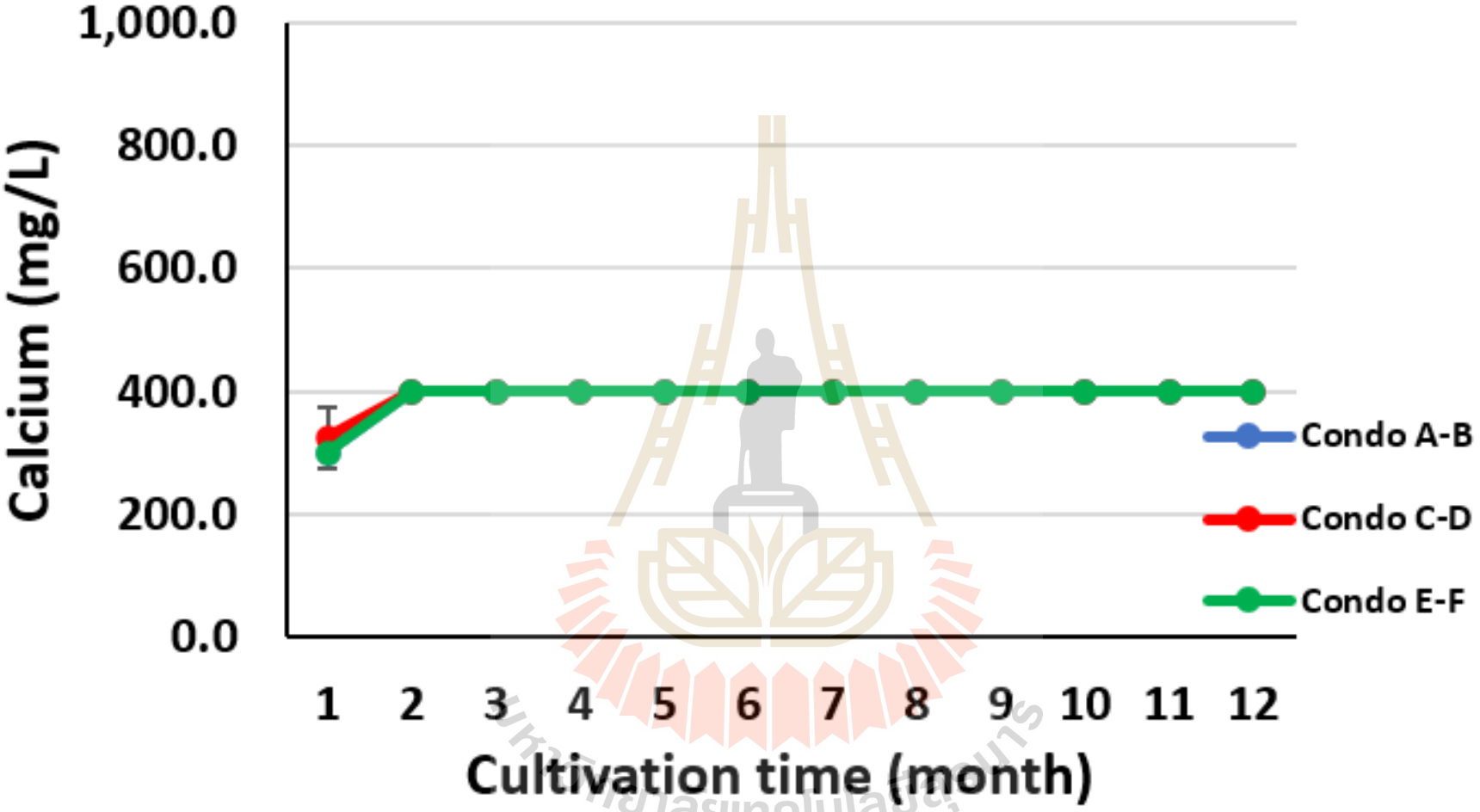
ภาพที่ 44 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC (ms/cm)) ในน้ำของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เป็นระยะเวลา 12 เดือน



ภาพที่ 45 ค่าความกระด้าง (mg/L) ในน้ำของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเป็นระยะเวลา 12 เดือน



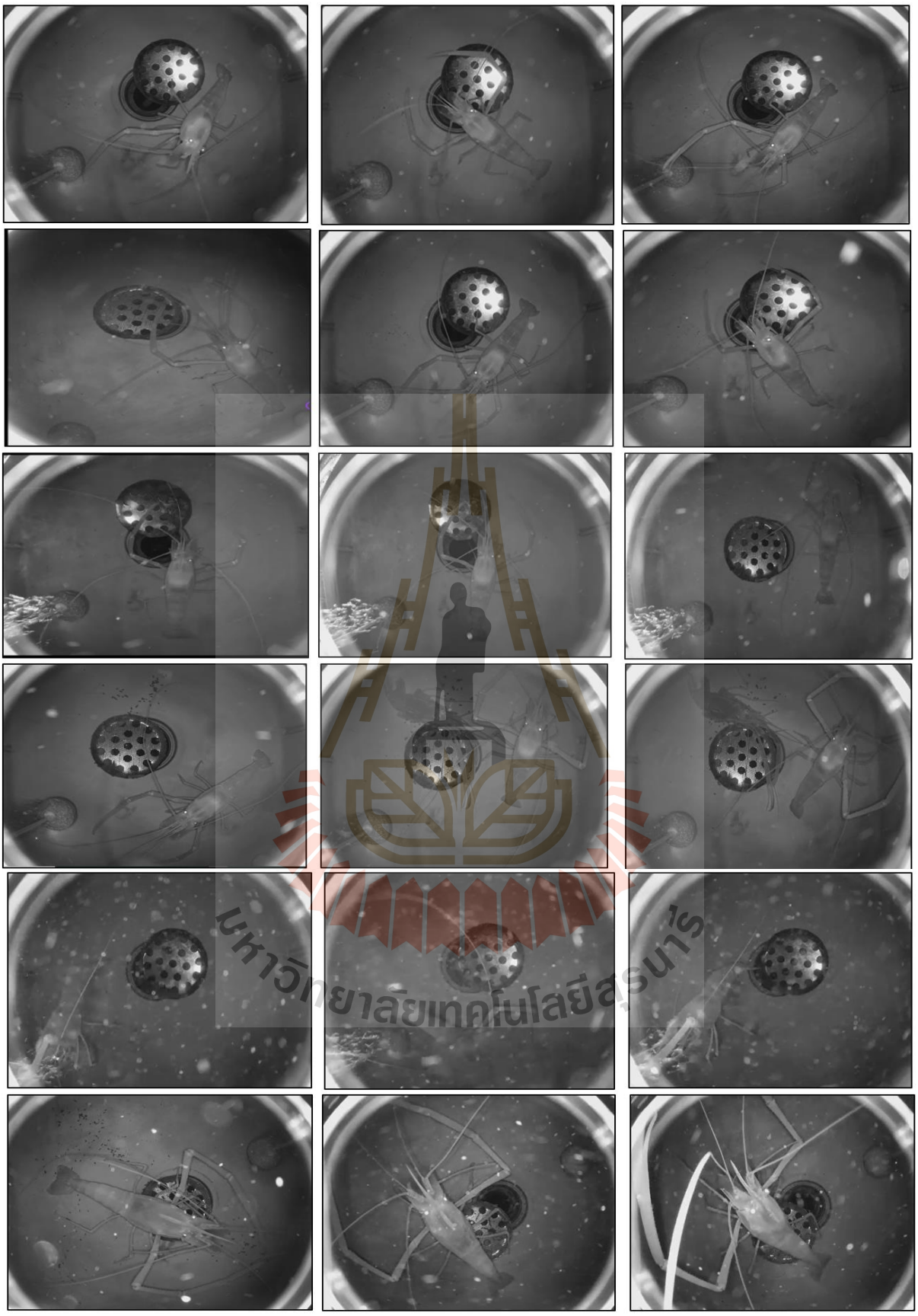
ภาพที่ 46 ค่าแมกนีเซียม (mg/L) ในน้ำของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด ในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเป็นระยะเวลา 12 เดือน



ภาพที่ 47 ค่าแคลเซียม (mg/L) ในน้ำของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด ในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเป็นระยะเวลา 12 เดือน

การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant ต้องอาศัยการบูรณาการเทคโนโลยีและศาสตร์ด้านต่าง ๆ ได้แก่ เทคโนโลยีด้านวิศวกรรมในการพัฒนาระบบการเลี้ยง ที่ประกอบไปด้วยห้องเลี้ยง ระบบน้ำแบบหมุนเวียน และระบบการบำบัดน้ำเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ร่วมกับเทคโนโลยีการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant มีความเป็นไปไปได้ทั้งในด้านของการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม ระบบการหมุนเวียนน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นในลำดับถัดมาจึงได้นำเทคโนโลยีมาเข้ามา โดยการติดกล้องเพื่อสังเกตพฤติกรรมของกุ้งก้ามกร้ามที่เลี้ยงในคอนโดด้วย โดยในการทดสอบมีการใช้กล้องวิดีโอแบบไม่มีอินฟาเรทเปรียบเทียบกับกล้องวิดีโอแบบมีอินฟาเรท พบว่ารุ่นของกล้องวิดีโอที่ใช้ควรเป็นกล้องอินฟาเรทเพื่อที่สามารถสังเกตพฤติกรรมของกุ้งก้ามกร้ามได้ทั้งในช่วงกลางวันและกลางคืน อีกทั้งระยะความสูงของกล้องมีผลต่อการมองเห็นกุ้งก้ามกรามในมุมมองที่กว้างขึ้น (widespread) ซึ่งระยะดังกล่าวขึ้นอยู่กับความสูงของห้องเลี้ยง ดังภาพที่ 48

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาพที่ 48 การสังเกตพฤติกรรมของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติของเนื้อกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในคอนโด

จาการศึกษาที่ผ่านมาเป็นการศึกษาในเรื่องของการพัฒนาเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง ซึ่งพบว่าการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งมีความเป็นไปไปได้ทั้งในด้านของการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม ระบบการหมุนเวียนน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ แต่อย่างไรก็ตามผู้ทำการวิจัยพบว่าเมื่อทำการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเป็นระยะเวลา 7 เดือนขึ้นไป กุ้งก้ามกรามจะมีสีซีดเมื่อเปรียบเทียบกุ้งที่ถูกเลี้ยงในบ่อดิน ดังภาพที่ 49 ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติของเนื้อกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในคอนโด โดยทำการศึกษาในกุ้งกร้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโดที่มีขนาดห้องเลี้ยง 50 ลิตร เป็นระยะเวลา 7 เดือน มาทำการศึกษาองค์ประกอบเคมีในเนื้อ (meat) และ ตัวกุ้ง (whole body) ได้แก่ โปรตีน (crude protein), ไขมัน (crude lipid), ความชื้น (moisture) และเถ้า (ash และทำการศึกษาคุณสมบัติของเนื้อกุ้งในด้านเนื้อสัมผัส และรูปแบบโปรตีนของเนื้อกุ้ง โดยเปรียบเทียบกับกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในบ่อดิน พบว่าองค์ประกอบเคมีในเนื้อและตัวกุ้ง ได้แก่ crude protein, crude lipid, moisture และ ash ของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโดและกุ้งก้ามกรามจากบ่อดินไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ซึ่งในเนื้อของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในกุ้งคอนโด มีค่า crude protein 18.47±0.96 %, crude lipid 1.83±0.39 %, moisture 78.65±1.37 % และash 6.48±0.29 % และในเนื้อของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในบ่อดิน มีค่า crude protein 19.13±0.78 %, crude lipid 1.91±0.29 %, moisture 77.47±0.64 % และash 6.23±0.07 % นอกจากนี้ค่าองค์ประกอบทางเคมีในตัวของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโดมีค่า crude protein 13.54±0.38 %, crude lipid 2.01±0.26 %, moisture 74.52±0.47 % และash 29.11±0.54 % และกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในบ่อดิน มีค่า crude protein 13.65±0.38 %, crude lipid 2.2±0.23 %, moisture 74.92±0.69 % และash 29.27±0.62 % (ตารางที่ 29)

ทำการศึกษาคุณสมบัติของเนื้อกุ้งในด้าน สี (Color), การสูญเสียสภาพหลังทำให้สุก (Cooking loss) และด้านเนื้อสัมผัส (Texture) โดยเปรียบเทียบระหว่างกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโดและกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในบ่อดิน พบว่าลักษณะของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโดเป็นระยะเวลา 7 เดือน ลำตัวกุ้งจะมีสีขาวซีดเมื่อเปรียบเทียบกับกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในบ่อดินที่มีสีเข้มกว่าดังภาพที่ 50 และเมื่อทำการวัดค่าสี (color) ของกุ้งก้ามกรามด้วยเครื่องวัดสี พบว่ากุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโดที่เป็นกุ้งสด (raw) สีมีขาวอมเขียว ซึ่งค่าสีของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโด ที่ยังไม่ถูกแกะเปลือกมีค่า L^* เท่ากับ 43.4 ± 6.57 ค่า a^* เท่ากับ -2.57 ± 0.33 และค่า b^* เท่ากับ 2.07 ± 1.71 และค่าสีของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโด ที่ถูกแกะเปลือกมีค่า L^* เท่ากับ 44.00 ± 4.51 ค่า a^* เท่ากับ -2.32 ± 0.22 และค่า b^* เท่ากับ -3.76 ± 1.09 และกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในบ่อดินที่เป็นกุ้งสดมีสีขาวอมเขียวน้ำเงิน ซึ่งค่าสีของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในบ่อดิน ที่ยังไม่ถูกแกะเปลือกมีค่า L^* เท่ากับ 35.79 ± 5.13 ค่า a^* เท่ากับ -3.18 ± 0.47 และค่า b^* เท่ากับ -1.85 ± 3.66 และค่าสีของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในบ่อดิน ที่ถูกแกะเปลือกมีค่า L^* เท่ากับ 46.76 ± 2.40 ค่า a^* เท่ากับ -1.87 ± 1.08 และค่า b^* เท่ากับ -2.97 ± 2.99 (ตารางที่ 30) นอกจากนี้เมื่อทำการวัดค่าสีของกุ้งก้ามกรามที่ถูกทำให้สุก พบว่าการทำให้กุ้งก้ามกรามสุก (นึ่ง) มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า L* a* b* ซึ่งกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโดที่ไม่แกะเปลือกมีสีส้มอ่อนออกขาว โดยมีค่า L^* เท่ากับ 72.90 ± 4.91 ค่า a^* เท่ากับ 8.65 ± 7.05 และค่า b^* เท่ากับ 16.73 ± 4.81 และค่าสีของกุ้งก้ามกรามคอนโด ที่ถูกแกะเปลือกมีค่า L^* เท่ากับ 84.84 ± 2.22 ค่า a^* เท่ากับ -1.52 ± 1.60 และค่า b^* เท่ากับ 7.95 ± 3.74 และกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในบ่อดินที่ยังไม่ถูกแกะเปลือกมีสีส้มเข้มกว่ากุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโด โดยมีค่า L^* เท่ากับ 57.83 ± 5.19 ค่า a^* เท่ากับ 27.44 ± 7.92 และค่า b^* เท่ากับ 30.95 ± 3.90 และค่าสีของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในบ่อดิน ที่ถูกแกะเปลือกมีค่า L^* เท่ากับ 72.99 ± 7.55 ค่า a^* เท่ากับ 21.64 ± 11.32 และค่า b^* เท่ากับ 28.97 ± 7.57 (ตารางที่ 30)

เมื่อทำการวัดค่าการสูญเสียหลังทำให้สุก (cooking loss) ของกุ้งก้ามกราม โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโดและกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในบ่อดิน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโดมีค่าการสูญเสียหลังทำให้สุก เท่ากับ 2.84 ± 0.96 % ซึ่งน้อยกว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในบ่อดิน มีค่าการสูญเสียหลังทำให้สุก เท่ากับ 4.87 ± 3.51 % (ตารางที่ 31) นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture) ของกุ้งก้ามกราม โดยทำการทดสอบค่าแรงเฉือนเป็นการจำลองการกัดของมนุษย์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส พบว่ากุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโด ก่อนการทำให้สุกและหลังการทำให้สุก มีค่าแรงเฉือน เท่ากับ 2063.23 ± 109.42 กรัม และ 1699.39 ± 93.78 กรัม ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแรงเฉือนของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในบ่อดิน ทั้งในส่วนที่ยังไม่ได้ทำให้สุกและหลังการทำให้สุก ซึ่งมีค่าแรงเฉือน เท่ากับ 2869.18 ± 315.38 กรัม และ 3580.29 ± 306.15 กรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 32)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

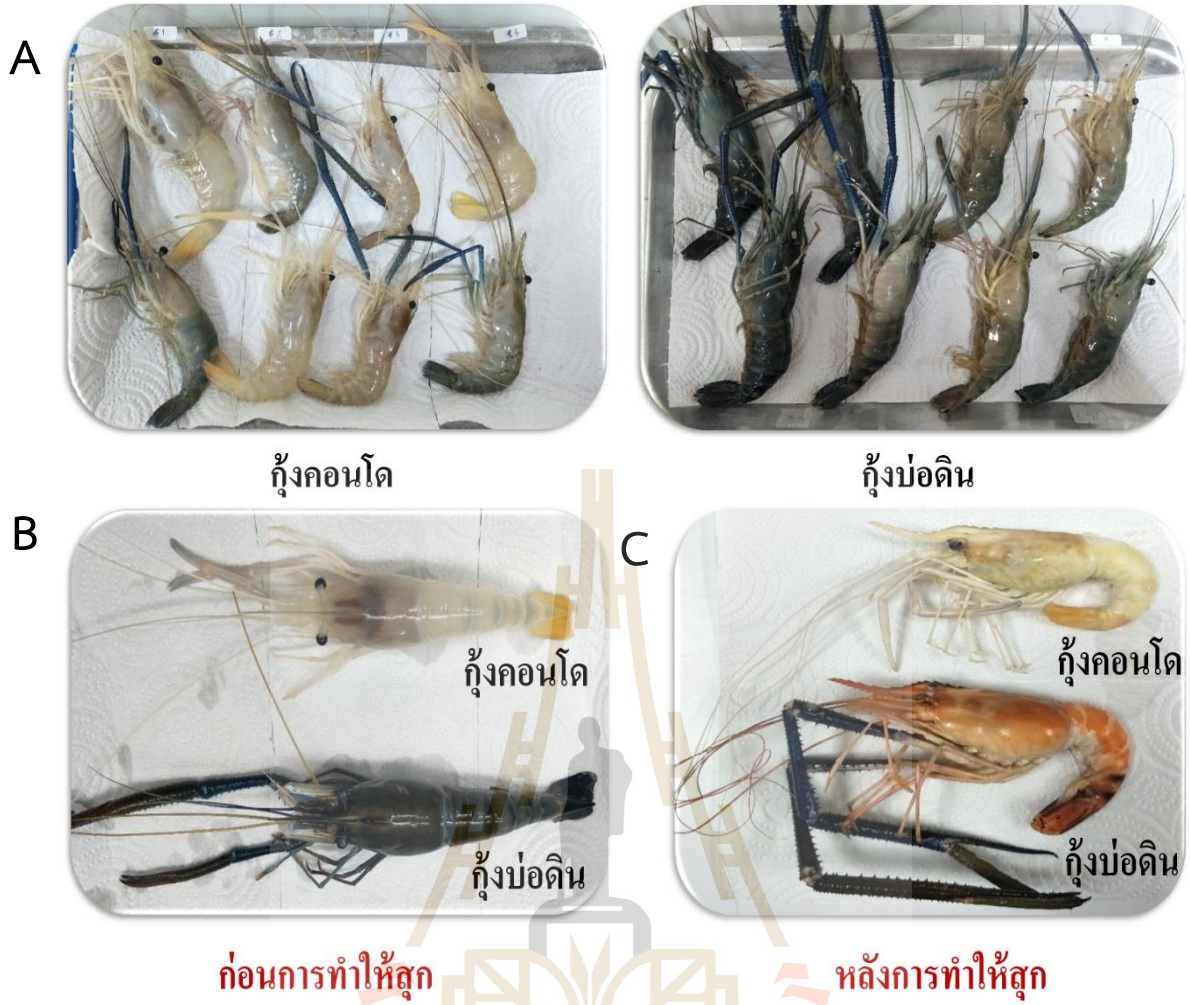
กุ้งคอนโด กุ้งบ่อดิน

ภาพที่ 49 ความแตกต่างของสีระหว่างกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในคอนโด และกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในบ่อดิน

ตารางที่ 29 ค่าองค์ประกอบทางเคมีในเนื้อและในตัวของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในคอนโด และกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในบ่อดิน (Mean ± SD; n=3)

	Meat		Whole Body	
Parameters (%)	Shrimp condo	Shrimp earthen pond	Shrimp condo	Shrimp earthen pond
Ash	6.48±0.29	6.23±0.07	29.11±0.54	29.27±0.62
Moisture	78.65±1.37	77.47±0.64	74.52±0.47	74.92±0.69
Crude protein	18.47±0.96	19.13±0.78	13.54±0.38	13.65±0.38
Crude lipid	1.83±0.39	1.91±0.29	2.01±0.26	2.2±0.23

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาพที่ 50 การเปรียบเทียบความแตกต่างของสีระหว่างกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในคอนโด และกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในบ่อดิน ก่อนการทำให้สุก (A), (B) และหลังการทำให้สุก (C)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 30 ค่าสี (Color) ของตัวอย่างกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในคอนโด และกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในบ่อดิน แบบที่แกะเปลือกและไม่แกะเปลือก (Mean ± SD; n=4)

Treatment	Shrimp with shell (กุ้งไม่แกะเปลือก)			Shrimp without shell (กุ้งแกะเปลือก)		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
ก่อนการทำให้สุก (Raw)						
กุ้งคอนโด	43.4 ± 6.57	-2.57 ± 0.33	2.07 ± 1.71	44.00 ± 4.51	-2.32 ± 0.22	-3.76 ± 1.09
กุ้งบ่อดิน	35.79 ± 5.13	-3.18 ± 0.47	-1.85 ± 3.66	46.76 ± 2.40	-1.87 ± 1.08	-2.97 ± 2.99
หลังการทำให้สุก (Cook)						
กุ้งคอนโด	72.90 ± 4.91	8.65 ± 7.05	16.73 ± 4.81	84.84 ± 2.22	-1.52 ± 1.60	7.95 ± 3.74
กุ้งบ่อดิน	57.83 ± 5.19	27.44 ± 7.92	30.95 ± 3.90	72.99 ± 7.55	21.64 ± 11.32	28.97 ± 7.57

หมายเหตุ

แกน L* จะบรรยายถึงความสว่าง (lightness) จากค่า +L* แสดงถึงสีขาว จนไปถึง –L* แสดงถึงสีดำ

แกน a*จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว (-a*) ไปจนถึงแดง (+a*)

แกน b* จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน (-b*) ไปเหลือง (+b*)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 31 ค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียหลังการทำให้สุก (% Cooking loss) ของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในคอนโด และกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในบ่อดิน (Mean ± SD; n=4)

Treatment	No. of shrimp	Weight of shrimp (g)		Cooking loss (%)	Mean (%)
		Before cooking	After cooking		
กุ้งคอนโด	1	54.71	52.51	4.02	2.84 ± 0.96
	2	22.94	22.43	2.22	
	3	19.23	18.61	3.22	
	4	29.31	28.75	1.91	
กุ้งบ่อดิน	1	68.46	66.84	2.37	4.87 ± 3.51
	2	89.23	87.53	1.91	
	3	39.27	37.02	5.73	
	4	38.99	35.30	9.46	

ตารางที่ 32 ค่าลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture) ของตัวอย่างกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในคอนโด และกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในบ่อดิน (Mean ± SD; n= 3)

Treatment	No. of shrimp	Force (g)	Mean (g)
ก่อนการทำให้สุก (Raw)			
กุ้งคอนโด	1	2153.90 ± 361.49	2063.23 ± 109.42
	2	1941.70 ± 239.69	
	3	2094.10 ± 337.01	
กุ้งบ่อดิน	1	2981.73 ± 282.27	2869.18 ± 315.38*
	2	3112.83 ± 525.29	
	3	2512.97 ± 421.91	
หลังการทำให้สุก (Cook)			
กุ้งคอนโด	1	2124.43 ± 463.75	1699.39 ± 93.78
	2	479.63 ± 279.10	
	3	2494.10 ± 399.95	
กุ้งบ่อดิน	1	3933.77 ± 450.99	3580.29 ± 306.15*
	2	3408.00 ± 301.86	
	3	3399.10 ± 179.33	

หมายเหตุ กำหนดให้ Prop: Warner-Bratzler
Speed: 2.0 mm/s

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4. การทดสอบระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในสภาวะต่าง ๆ

การทดสอบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้งเปรียบเทียบกับการเลี้ยงกุ้งตะกร้า (ภาพที่ 51) พบว่ากุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในตะกร้าเป็นระยะเวลา 9 วัน มี weight gain เท่ากับ 3.04±1.85 กรัม มีค่า ADG เท่ากับ 1.06±1.27 กรัมต่อวัน ค่า SGR เท่ากับ 1.93±2.42 % มีค่าการกินได้เท่ากับ 0.58±0.35 กรัมต่อวันและค่า FCR เท่ากับ 1.13±0.94 ในขณะที่กุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในคอนโด เป็นระยะเวลา 31 วัน มีค่า weight gain เท่ากับ 8.99±5.36 กรัม มีค่า ADG เท่ากับ 0.38±0.11 กรัมต่อวัน ค่า SGR เท่ากับ 0.64±0.21% มีค่าการกินได้เท่ากับ 0.56±0.16 กรัมต่อวัน และค่า FCR เท่ากับ 1.56±0.76 ดังตารางที่ 33 จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในตะกร้ามีการเจริญเติบโตสูงกว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบคอนโด ซึ่งค่า ADG ของกุ้งตะกร้าสูงกว่าค่า ADG ของกุ้งคอนโด 2.79 เท่า แต่อย่างไรก็ตามการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบตะกร้ามีอัตรารอดที่ต่ำเมื่อเทียบกับกุ้งคอนโด ซึ่งสามารถเลี้ยงได้เพียง 9 วันเท่านั้น เนื่องจากความแปรปรวนของสภาพอากาศ (ช่วงพายุเข้า) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามคอนโดสามารถลดความเสี่ยงต่อความเสียหายเมื่อสภาวะอากาศแปรปรวนได้

ในตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ได้ทำการวัดอุณหภูมิอากาศและคุณภาพน้ำในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามได้แก่ อุณหภูมิน้ำ ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (Dissolved oxygen; DO), ค่าพีเอช (pH) ซึ่งอุณหภูมิอากาศมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 31.54 - 34.84 °C คุณภาพน้ำในคอนโดกุ้งและในบ่อดินไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งอุณหภูมิน้ำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28.52-32.44 °C ค่า DO มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.15-5.81 mg/L และค่า pH ในน้ำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.36- 8.56 (ตารางที่ 34)

ภาพที่ 51 การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระบบตะกร้า (กุ้งตะกร้า) เปรียบเทียบกับการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในคอนโด (กุ้งคอนโด)

ตารางที่ 33 การเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบกุ้งตะกร้าและกุ้งคอนโด (mean ± sd, n=18)

Treatment	Initial weight (g)	Final weight (g)	Weight gain (g)	ADG (g/day)	SGR (%)	Feed intake (g/day)	FCR
กุ้งตะกร้า ระยะเวลาการเลี้ยง 1-9 วัน							
Mean	55.61±3.07	58.65±2.71	3.04±1.85	1.06±1.27	1.93±2.42	0.58±0.35	1.13±0.94
Max	59.65	63.54	7.99	4.26	8.14	2.00	3.51
Min	50.25	54.52	1.14	0.14	0.24	0.50	0.12
กุ้งคอนโด ระยะเวลาการเลี้ยง 1-31 วัน							
Mean	55.44±2.60	64.42±7.15	8.99±5.36	0.38±0.11	0.64±0.21	0.56±0.16	1.56±0.76
Max	59.63	73.32	14.78	0.58	1.12	1.00	4.00
Min	50.32	51.32	0.25	0.13	0.23	0.50	0.87

หมายเหตุ Average daily gain (ADG) = (final body weight – initial body weight) / experimental days), Specific growth rate (SGR) = 100 x [(ln final body weight – ln initial body weight) / experimental days] and Feed conversion ratio (FCR) = dry feed fed /weight gain

ตารางที่ 34 คุณภาพน้ำในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม (mean ± sd)

Parameters	กุ้งตะกร้า	กุ้งคอนโด
Do (mg/L)	5.81±0.52	5.15±0.51
pH	8.36±0.25	8.56±0.17
Water temperature (°C)	32.44±0.52	28.52±0.16
Air temperature (°C)	34.84±0.23	31.54±0.77

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5. การศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหารของกุ้งก้ามกราม

การศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหารต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม

การพัฒนาเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant ต้องอาศัยการบูรณาการเทคโนโลยีและศาสตร์ด้านต่าง ๆ ได้แก่ เทคโนโลยีด้านวิศวกรรมในการพัฒนาระบบการเลี้ยง ที่ประกอบไปด้วยห้องเลี้ยง ระบบน้ำแบบหมุนเวียนแบบปิด ระบบการให้อากาศในน้ำ ระบบการบำบัดน้ำเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ร่วมกับเทคโนโลยีการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เนื่องจากเป็นระบบการเลี้ยงที่ต้องมีการดูแลอย่างใกล้ชิด ในเรื่องของการให้อาหาร คุณภาพอาหาร (Feed and feeding) คุณภาพน้ำ ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของกุ้งซึ่งมีหลายปัจจัย ได้แก่ ขนาดของห้องเลี้ยง อาหารและคุณภาพของอาหาร อัตราการให้อาหาร สารเสริมในอาหาร เป็นต้น

การศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหารต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม โดยการเปรียบเทียบระหว่างอาหารทดลอง 2 ชนิด คือ อาหารที่ไม่มีการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลือง (High fishmeal diet; FD) และอาหารที่มีการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลือง (Plant protein base diet; PD) ไปเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเป็นระยะเวลา 90 วัน พบว่าการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามทั้ง 2 กลุ่มการทดลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ซึ่งกุ้งก้ามกรามที่ได้รับอาหาร FD มีค่าน้ำหนักตัวสุดท้ายเท่ากับ 83.87±11.81 กรัม ค่า weight gain เท่ากับ 30.90±11.41 กรัม ค่า ADG เท่ากับ 0.34±0.13 กรัมต่อวัน ค่า FCR เท่ากับ 2.37±0.25 ค่า SGR เท่ากับ 0.49±0.14 % ค่าการกินได้เท่ากับ 0.80±0.25 กรัมต่อวัน และค่าอัตราการรอดชีวิต เท่ากับ 64.39 % และในกุ้งก้ามกรามที่ได้รับอาหาร PD มีค่าน้ำหนักตัวสุดท้ายเท่ากับ 84.85±12.1 กรัม ค่า weight gain เท่ากับ 32.81±10.98 กรัม ค่า ADG เท่ากับ 0.36±0.12 กรัมต่อวัน ค่า FCR เท่ากับ 2.42±0.28 ค่า SGR เท่ากับ 0.52±0.13 % ค่าการกินได้เท่ากับ 0.88±0.30 กรัมต่อวัน และค่าอัตราการรอดชีวิต เท่ากับ 60.57 % (ตารางที่ 35) ซึ่งระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามมีการใช้ระบบน้ำหมุนเวียน และในตลอดระยะเวลาการเลี้ยง 90 วัน มีการวัดอุณหภูมิอากาศและคุณภาพน้ำในระบบการเลี้ยง ได้แก่ อุณหภูมิน้ำ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ ค่า Alkalinity ค่า pH ค่า Magnesium ที่ละลายในน้ำ ค่า Calcium ที่ละลายในน้ำ และแอมโมเนียที่ละลายน้ำ อยู่ในระดับ 27.30±0.53 °C, 27.10±0.38 °C, 4.40±0.24 mg/L, 105.30±11.45 mg/L, 8.30±0.11, 393.50±24.63 mg/L, 196.80±17.72 mg/L, และ 0.20±0.04 mg/L ตามลำดับ (ตารางที่ 36)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 35 การเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามที่ได้รับอาหารทดลอง (experimental diet) (mean ± sd, n=46)

Treatment	Initial Body weight (g)	Final body weight (g)	Weight gain (g)	ADG (g/day)	FCR	SGR (%/day)	FI (g/day)
FD Mean	52.97±3.48	83.87±11.81	30.90±11.41	0.34±0.13	2.37±0.25	0.49±0.14	0.80±0.25
Max	59.11	118.85	63.81	0.71	2.86	0.87	1.36
Min	37.08	60.01	18.77	0.21	1.45	0.31	0.53
PD Mean	52.25±4.63	84.85±12.1	32.81±10.98	0.36±0.12	2.42±0.28	0.52±0.13	0.88±0.30
Max	58.96	117.11	65.99	0.73	2.87	0.89	1.46
Min	37.08	59.82	18.57	0.21	1.76	0.31	0.56
P-value	**0.546**	**0.635**	**0.453**	**0.445**	**0.803**	**0.126**	**0.685**

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษกำกับในแต่ละคอลัมน์ที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

FD = High fishmeal diet, PD= Plant protein base diet, Average daily gain (ADG) = (final body weight – initial body weight) / experimental days), Specific growth rate (SGR) = 100 x [(ln final body weight – ln initial body weight) / experimental days] and Feed conversion ratio (FCR) = dry feed fed /weight gain

ตารางที่ 36 คุณภาพน้ำในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม (mean ± sd)

Duration (month)	Air temp. (°c)	Water temp. (°c)	DO (mg/L)	Alkalinity (mg/L)	pH	Magnesium (mg/L)	Calcium (mg/L)	Ammonia (mg/L)
1	27.30±0.64	27.00±0.42	4.50±0.27	92.30±6.63	8.30±0.13	380.60±39.83	190.30±29.81	0.18±0.04
2	27.20±0.52	27.20±0.37	4.50±0.27	109.70±4.75	8.30±0.11	400.0±0.00	200.00±0.00	0.10±0.10
3	27.30±0.39	27.10±0.33	4.40±0.16	116.50±4.82	8.30±0.08	400.00±0.00	200.00±0.00	0.20±0.02
Average	**27.30±0.53**	**27.10±0.38**	**4.40±0.24**	**105.30±11.45**	**8.30±0.11**	**393.5±24.63**	**196.80±17.72**	**0.20±0.04**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหารต่อองค์ประกอบทางเคมีในตัว (whole body) ของกุ้งก้ามกราม

การศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหารต่อองค์ประกอบทางเคมีในตัว (whole body) ของกุ้งก้ามกราม โดยการเปรียบเทียบระหว่างอาหารทดลอง 2 ชนิด คือ อาหารที่ไม่มีการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลือง (High fishmeal diet; FD) และอาหารที่มีการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลือง (Plant protein base diet; PD) ไปเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเป็นระยะเวลา 90 วัน พบว่าองค์ประกอบเคมีในตัว (whole body) ของกุ้งก้ามกราม ได้แก่ moisture, crude protein, crude lipid และ ash ของกุ้งก้ามกรามทั้ง 2 กลุ่มการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ซึ่งกุ้งก้ามกรามที่ได้รับอาหาร FD มีค่า moisture เท่ากับ 75.53±111.22 % ค่า crude protein เท่ากับ 22.38±1.15% ค่า crude lipid เท่ากับ 0.47±0.07% และค่า ash เท่ากับ 1.57±0.21 ส่วนกุ้งก้ามกรามที่ได้รับอาหาร PD มีค่า moisture เท่ากับ 74.64±1.50%, ค่า crude protein เท่ากับ 23.10±1.35%, ค่า crude lipid เท่ากับ 0.48±0.09% และค่า ash เท่ากับ 1.57±0.21% (ตารางที่ 37)

ตารางที่ 37 องค์ประกอบทางเคมีในตัว (whole body) ของกุ้งก้ามกรามที่ได้รับอาหารทดลอง (mean ± sd, n=46)

Treatment	Moisture (%)	Crude protein (%)	Crude lipid (%)	Ash (%)
FD	75.53±1.22	22.38±1.15	0.47±0.07	1.57±0.21
PD	74.64±1.50	23.10±1.35	0.48±0.09	1.57±0.21
P-value	**0.062**	**0.180**	**0.135**	**0.526**

หมายเหตุ FD = High fishmeal diet, PD= Plant protein base diet

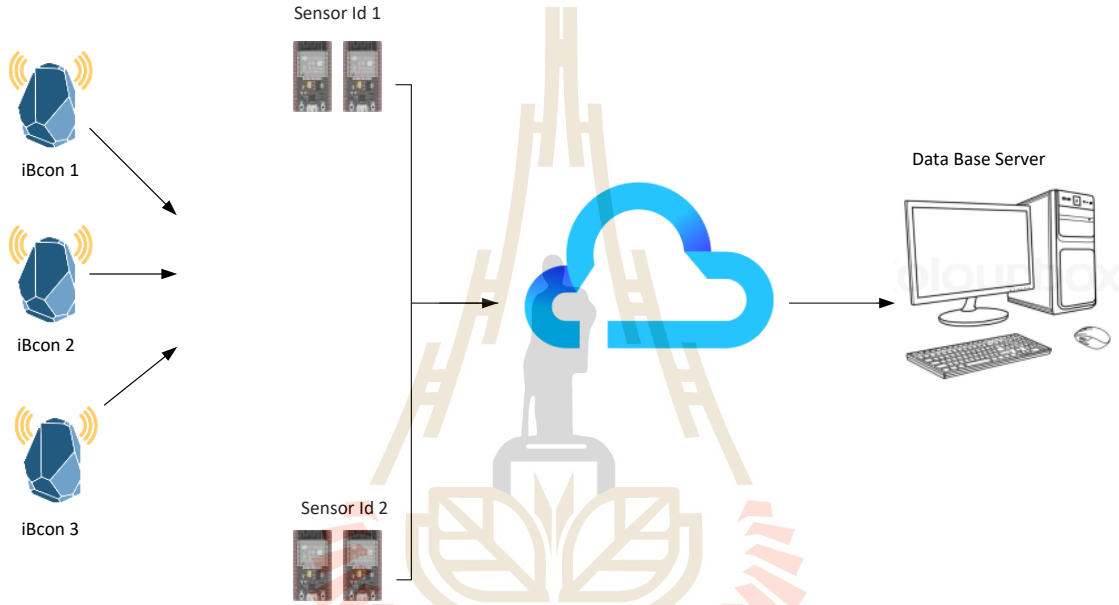
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กิจกรรมที่ 2: การพัฒนา Smart Farming เพื่อประเมินและจัดการสุขภาพสัตว์

1. วิจัยพัฒนาระบบอุปกรณ์ในการติดตามการเคลื่อนที่ของสัตว์เพื่อตรวจสอบหาสัตว์ป่วย

เพื่อศึกษาพฤษติกรรมการเคลื่อนที่ของโค จะมีอุปกรณ์การตรวจสอบและเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่ของโค สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกเซนเซอร์ iBeacon เพื่อติดตามการเคลื่อนที่ และเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่แต่ละช่วงเวลาไปวิเคราะห์ (https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5750778/)

การทำงานของระบบ Sensor Id 1 และ 2 จะสแกนหาตัว iBeacon แล้วนำมาคำนวณหาระยะทางระหว่าง iBeacon แต่ละตัวกับ Sensor Id 1 และ 2 และส่งมูลไปเก็บที่ฐานข้อมูลที่คอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าเป็น Server ตามช่วงเวลาที่กำหนด



ภาพที่ 52 ระบบการติดตามการเคลื่อนที่โค

ภาพที่ 53 อุปกรณ์ต้นแบบ Sensor Id 1 และ 2

ภาพที่ 54 Flow Chart การทำงานของระบบ

Flow Chart การทำงานของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 3 มีการทำงานแต่ละส่วน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การอ่านค่า Beacons Id, Tx Power และ RSSI จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 (Sensor Id 1,2) จะดำเนินการทำการสแกนหา ตัว iBeacons ที่อยู่ในระยะรัศมี ไม่เกิน 20 เมตร พร้อมทั้งตรวจสอบกำลังส่ง (Tx Power) และวัดความแรงสัญญาณ (Received Signal Strength Indicator : RSSI) ที่ไมโครคอนโทรลเลอร์รับได้เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการหระยะห่าง

ขั้นตอนที่ 2 การคำนวณระยะห่างของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 กับ iBeacons จะใช้ดังสมการ (1) (https://iotandelectronics.wordpress.com/2016/10/07/how-to-calculate-distance-from-the-rssi-value-of-the-ble-beacon/)

$$Distance = 10^{((Measured\ Power - RSSI) / (10 * N))} \quad (1)$$

Distance คือ ระยะทาง (เมตร)

Measured Power คือ RSSI ที่ระยะห่าง 1 เมตร (dBm)

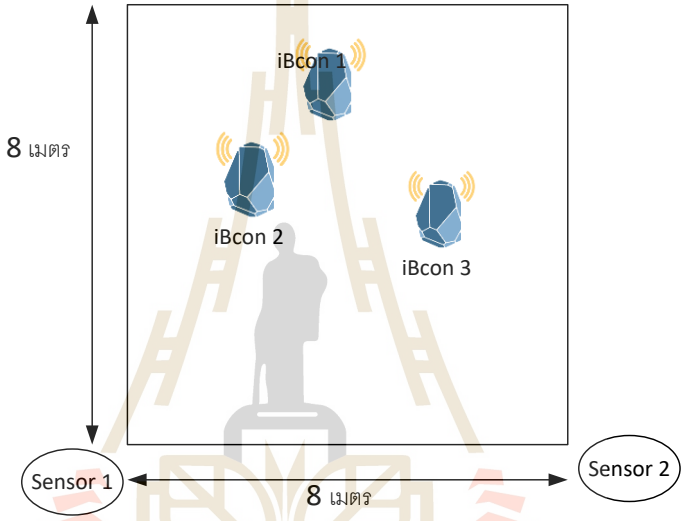
RSSI คือ Received Signal Strength Indicator (dBm)

N คือ Environmental factor. Range 2-4

ขั้นตอนที่ 3 การประมาณค่าระยะห่างด้วยการใช้ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter) (https: / / www. ai magin.com/downloads/ dl/file/id/64/kalman_filter.pdf) เนื่องด้วยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 คำนวณระยะห่างด้วยตัวบ่งชี้ความแรงของสัญญาณที่ได้รับ พบว่ามีการคลาดเคลื่อนจากค่าที่เป็นจริง โดย RMS error ของแต่ละจุดดังนี้ คือ ที่ระยะห่าง 1 เมตร มีค่าเท่ากับ 0.388 เมตร, ที่ระยะห่าง 2 เมตร มีค่าเท่ากับ 0.434 เมตร, ระยะห่าง 5 เมตร มีค่าเท่ากับ 0.676 เมตร, ระยะห่าง 10 เมตร มีค่าเท่ากับ 2.416 เมตร และระยะห่าง 15 เมตร มีค่าเท่ากับ 3.260 เมตร เพื่อแก้ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจึงนำตัวกรองคาลมานมาใช้ โดยจะมี RMS error ลดลง ดังนี้ คือ ที่ระยะห่าง 1 เมตร มีค่าเท่ากับ 0.048 เมตร, ที่ระยะห่าง 2 เมตร มีค่าเท่ากับ 0.108 เมตร, ระยะห่าง 5 เมตร มีค่าเท่ากับ 0.124 เมตร, ระยะห่าง 10 เมตร มีค่าเท่ากับ 0.460 เมตร และระยะห่าง 15 เมตร มีค่าเท่ากับ 0.972 เมตร

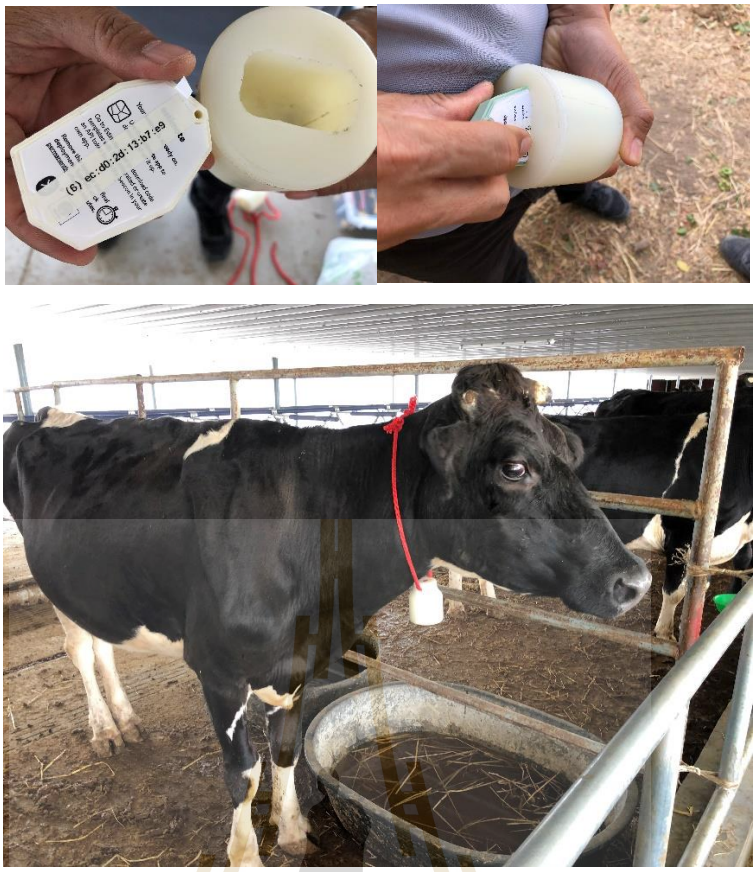
ขั้นตอนที่ 4 การส่งข้อมูลจัดเก็บที่ Server ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จะดำเนินการส่งข้อมูลไปให้คอมพิวเตอร์ Server ด้วยโปรโตคอล Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) โดยที่ฝั่งคอมพิวเตอร์ Server จะต้องดำเนินการพัฒนาโปรแกรมเพื่อรับข้อมูลด้วยโปรโตคอลเดียวกัน สำหรับข้อมูลที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ส่งไปนั้นจะประกอบไปด้วย หมายเลข iBeacon, ระยะห่าง (เมตร) และ เวลาที่ตรวจพบตัว iBeacon

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาพที่ 55 ติดตั้ง Sensors Id1 และ 2 เพื่อรับข้อมูล iBeacon

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

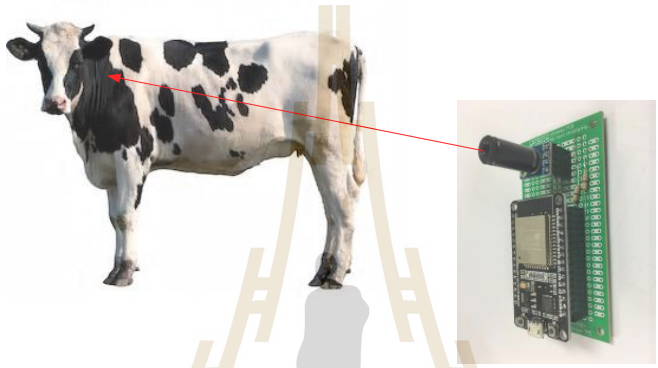


ภาพที่ 56 การติดตั้ง iBeacon ที่โค

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

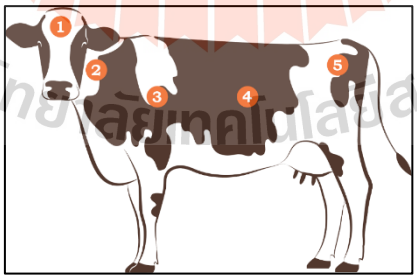
2. วิจัยและพัฒนาไบโอเซนเซอร์เพื่อประโยชน์ในการจัดการสุขภาพสัตว์และปศุสัตว์โดยพัฒนาระบบอุปกรณ์ในการตรวจวัดอุณภูมิร่างกายของสัตว์โดยไม่ต้องสัมผัสกับตัวสัตว์

การวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัสจะใช้ Sensor GY-906 (https://cdnshop.adafruit.com/datasheets/MLX90614.pdf) ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 โดยที่ GY-906 คือ โมดูลวัดอุณหภูมิแบบอินฟาเรดไร้การสัมผัส ใช้ ไฟเลี้ยง 3V - 5V เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 แบบ I2C ใช้สาย 2 เส้นในการควบคุม สามารถวัดอุณหภูมิที่เป้าหมายแบบไร้การสัมผัสที่ -70 ถึง 380 องศาเซลเซียส และยังสามารถวัดอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมได้ที่ -40 ถึง 125 องศาเซลเซียส ความละเอียดของอุณหภูมิที่วัดได้ 0.02 องศาเซลเซียส

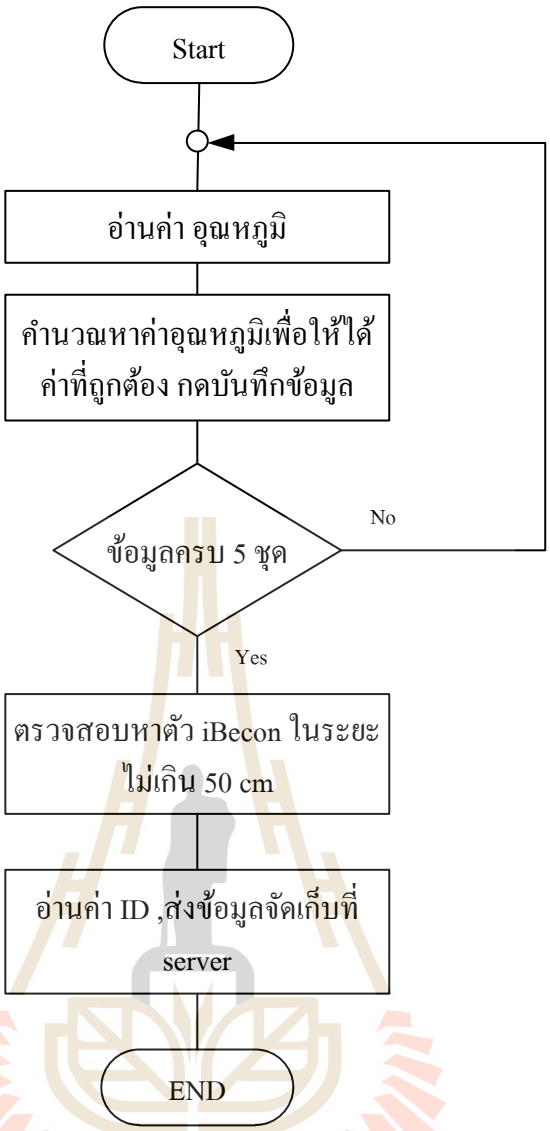


ภาพที่ 57 การใช้งาน Sensor GY-906

ในการวัดค่าอุณหภูมิจะดำเนินการวัด 5 จุด คือ หัว (Head), คอ (Neck) , หัวไหล่ (Shoulder) , ท้อง (Body) และ ต้นขา (Thigh) ต่อจากนั้นก็นำตัววัดอุณหภูมิเข้าไปใกล้ตัว iBecons ที่ระยะห่างไม่เกิน 50 cm ข้อมูลดังกล่าวจะถูกส่งไปจัดเก็บที่ server ต่อไป



ภาพที่ 58 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิทั้ง 5 จุด



ภาพที่ 59 ขั้นตอนการอ่านอุณหภูมิของไมโครคอนโทรลเลอร์

การอ่านอุณหภูมิของไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับโคแต่ละตัว ดังแสดงในรูปที่ 8 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การอ่านค่าอุณหภูมิ ให้ส่องตัวกระบอก GY-906 ไปจุดที่ต้องการตรวจสอบอุณ์หภูมิ โดยระห่างจากปลายกระบอก GY-906 ถึงจุดที่ต้องการตรวจสอบไม่ควรเกินระยะ 1 เมตรเพื่อลดข้อผิดพลาดในการวัดอุณหภูมิ

ขั้นตอนที่ 2 การคำนวณค่าอุณหภูมิ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่คลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะวนอ่านข้อมูลและหาค่าเฉลี่ยอุณหภูมิไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะกดบันทึกข้อมูล จนครบ 5 ตำแหน่ง

ขั้นตอนที่ 3 การตรวจสอบหาตัว iBeacon รัศมีไม่เกิน 50 cm มีจุดประสงค์เพื่อหาหมายเลข iBeacon Id ประจำตัววัวแต่ละตัว ก่อนที่จะส่งข้อมูลไปจัดเก็บที่ คอมพิวเตอร์ Server

ขั้นตอนที่ 4 การส่งข้อมูลจัดเก็บที่ Server ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จะดำเนินการส่งข้อมูลไปให้คอมพิวเตอร์ Server ด้วยโปรโตคอล Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) โดยที่ฝั่งคอมพิวเตอร์ Server จะต้องดำเนินการพัฒนาโปรแกรมเพื่อรับข้อมูลด้วยโปรโตคอลเดียวกัน สำหรับข้อมูลที่

ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ส่งไปนั้นจะประกอบไปด้วย หมายเลข iBeacon, ค่าอุณหภูมิทั้ง 5 จุด และ เวลาที่ส่งข้อมูล

3. การพัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลในคอมพิวเตอร์ Server

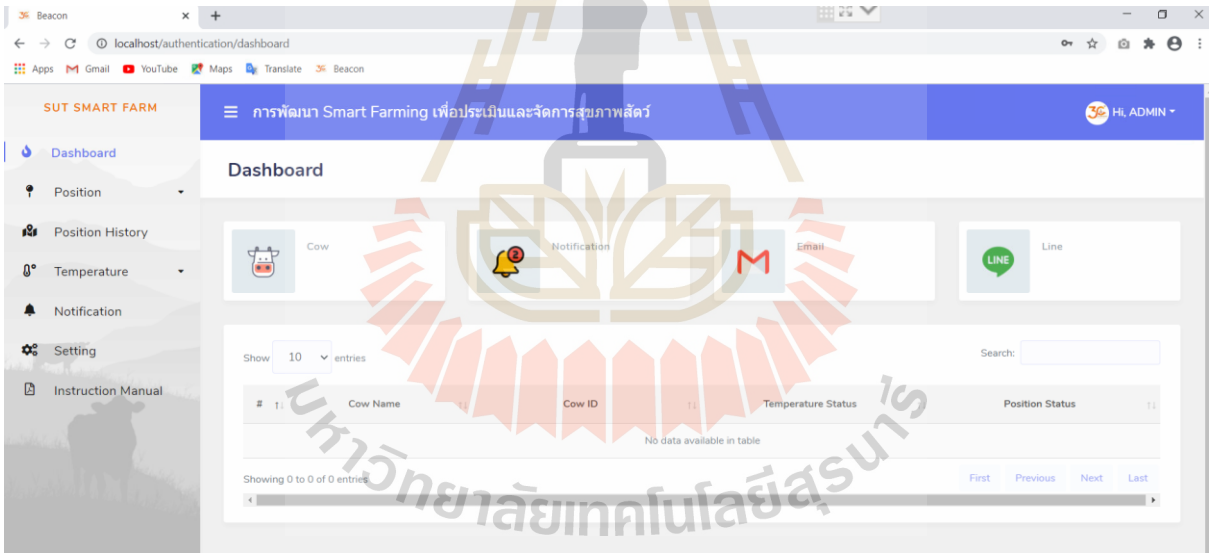
สำหรับงานในส่วนที่ 3 จะเป็นการพัฒนาระบบติดตามและวิเคราะห์ข้อมูลการป่วยของสัตว์ คือเว็บแอพพลิเคชั่น “Web application” ที่ทำหน้าที่ติดตามและวิเคราะห์ข้อมูลการป่วยของโค ซึ่งแสดงข้อมูลตำแหน่ง, ระยะการเดินและอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ของโค พร้อมทั้งสามารถส่งข้อมูลแจ้งเตือนให้ผู้ใช้งานผ่านทางอีเมล์และ Line application โดยระบบดังกล่าวจะมีส่วนประกอบดังนี้

3.1 Position สำหรับแสดงข้อมูลตำแหน่งและระยะการเดินของโค

3.2 Position History สำหรับแสดงข้อมูลตำแหน่งระยะการเดินของโคแบบย้อนหลัง

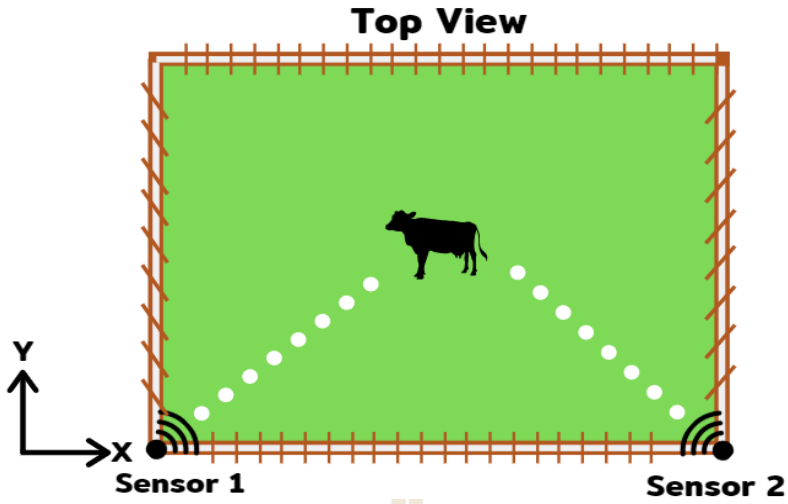
3.3 Temperature สำหรับแสดงข้อมูลอุณหภูมิแต่ละจุดของโค

3.4 Notification สำหรับแสดงข้อมูลการแจ้งเตือน

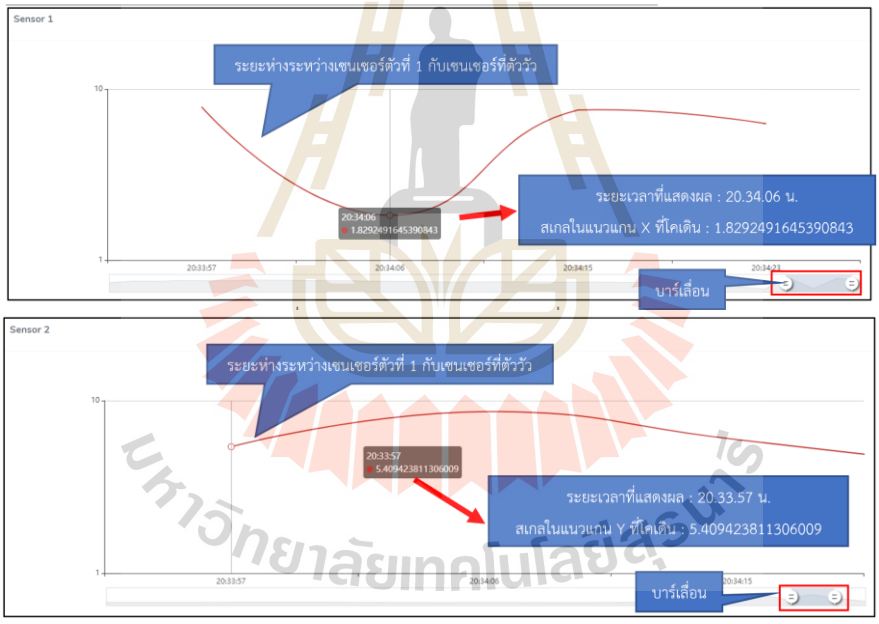


ภาพที่ 60 Dashboard สำหรับแสดงข้อมูลภาพรวมของระบบ

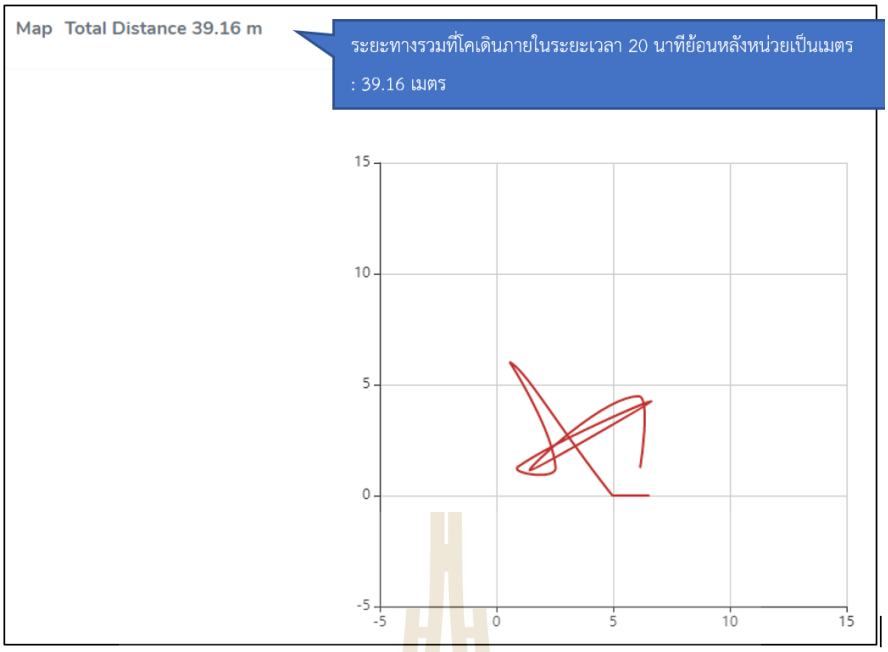
3.1 Position สำหรับแสดงข้อมูลตำแหน่งและระยะการเดินของโค เป็นหน้าต่างสำหรับแสดงระยะทางการเดินของโค โดยแบ่งข้อมูลการแสดงผลเป็น 2 ส่วนคือ แสดงระยะห่างระหว่างเซนเซอร์ที่ติดอยู่กับตัวโคกับเซนเซอร์หลักตัวที่ 1และ 2 ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเลือกช่วงเวลาได้ และ Map total distance แสดงข้อมูลประวัติการเดินและระยะทางรวมที่วัวเดินภายในช่วงเวลาที่กำหนดหน่วยเป็นเมตรต่อนาที



ภาพที่ 61 แสดงตำแหน่งเซนเซอร์ตัวที่ 1 และ 2 ที่ติดอยู่ที่ขอบรั้ว



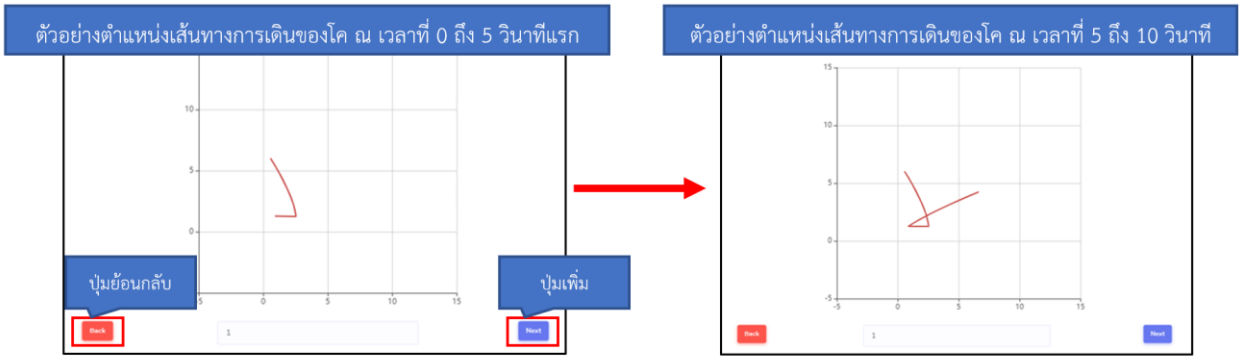
ภาพที่ 62 แสดงระยะห่างระหว่างเซนเซอร์ที่ติดอยู่กับตัวโคกับเซนเซอร์หลักตัวที่ 1และ 2



ภาพที่ 63 Map total distance แสดงข้อมูลประวัติการเดินและระยะทางรวมที่โคเดิน

3.2 Position History สำหรับแสดงข้อมูลตำแหน่งระยะการเดินของโคแบบย้อนหลัง โดยสามารถแสดงข้อมูลตำแหน่งและระยะทางการเดินย้อนหลังได้โดย ระบุตัวโค ,วันที่ และช่วงระยะเวลา

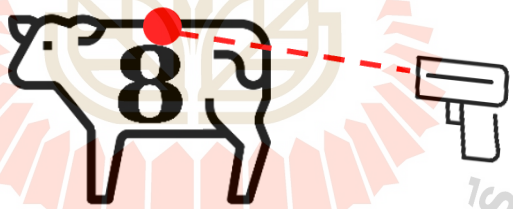
ภาพที่ 64 ระบุการแสดงผลประวัติตำแหน่งและระยะการเดินของโค



ภาพที่ 65 ตัวอย่างการแสดงผลตำแหน่งเส้นทางตั้งแต่ 0 ถึงวินาทีที่ 10

ซึ่งผลการทดลองพบว่าโคปกติจะเคลื่อนที่ไปมาเฉลี่ย 39.16 เมตร ในช่วงเวลา 20 นาทีหรือ 1.958 เมตรต่อนาที ค่านี้จะใช้ตั้งในโปรแกรม โคที่เคลื่อนที่มากหรือน้อยกว่านี้บ่งบอกถึง การเข้าสู่วงรอบการเป็นสัด หรือ โคป่วย ดังแสดงในรูปที่ 63, 64, และ 65

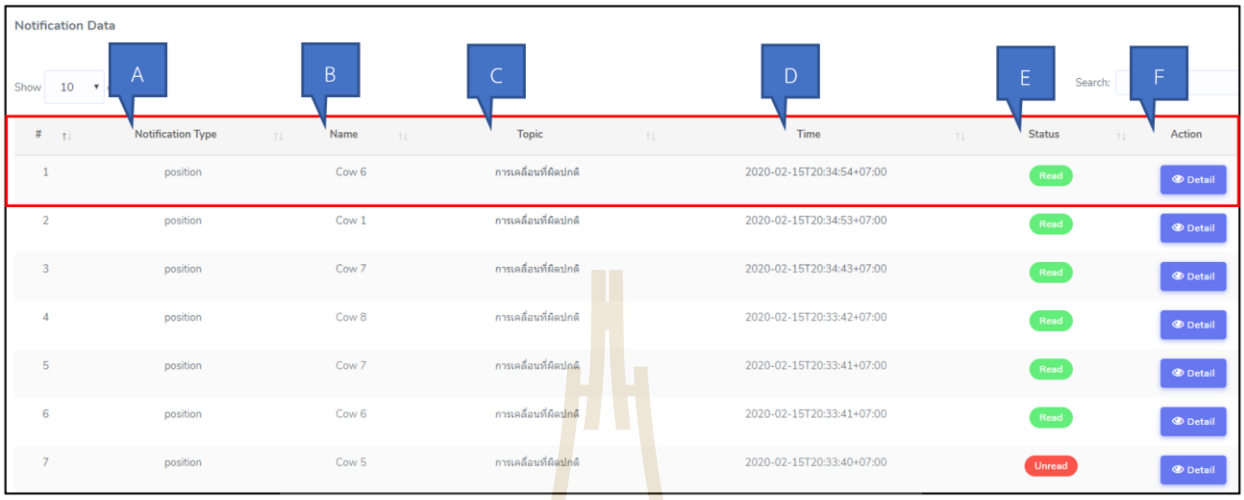
3.3 Temperature สำหรับแสดงข้อมูลอุณหภูมิแต่ละจุดของโค ประกอบด้วย 5 จุดคือ หัว (Head), คอ (Neck) , หัวไหล่ (Shoulder) , ท้อง (Body) และ ต้นขา (Thigh) ข้อมูลดังกล่าวจะถูกส่งมาเป็นชุด ๆ ทั้ง 5 จุด จากการตรวจวัดจริงจากเจ้าหน้าที่ โดยศึกษาอุณหภูมิปกติของสัตว์เทียบกับอุณหภูมิที่วัดได้จากพื้นผิวส่วนต่างๆ จำนวน 5 ตำแหน่ง ของร่างกายแล้วนำมาหาสมการความสัมพันธ์และค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิร่างกายต่อไป



ภาพที่ 66 การตรวจวัดจากเจ้าหน้าที่

ภาพที่ 67 แสดงหน้าต่าง Temperature ข้อมูลของโค

3.4 Notification สำหรับแสดงข้อมูลการแจ้งเตือน เป็นหน้าต่างที่มีไว้สำหรับแจ้งเตือนเมื่อค่าระยะการเดินหรืออุณหภูมิของวัวเกินค่าที่ตั้งไว้ โดยส่งข้อมูลทาง Line Application และ Email โดยผู้ใช้งานสามารถเข้าใช้งานระบบนี้ได้จากหน้าต่างหลักดังแสดงในรูปที่ 68



ภาพที่ 68 แสดงหน้าต่างระบบการแจ้งเตือน Notification

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

5.1 อภิปรายผลการวิจัย

กิจกรรมที่ 1: ระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบอัจฉริยะ

1. การศึกษาขนาดห้องเลี้ยงที่เหมาะสม ในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้ง

การเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในประเทศไทยมีปัญหาในเรื่องของพื้นที่การเพาะเลี้ยงที่จำกัด การเพาะเลี้ยงกุ้งในบ่อดินมีค่าอัตราการรอดต่ำ ดังนั้นการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง (vertical shrimp farming) จึงเป็นทางเลือกที่สำคัญในการนำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในเชิงพาณิชย์ ซึ่งการพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง ต้องมีการศึกษาขนาดห้องเลี้ยงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม

จากการศึกษาขนาดห้องเลี้ยงที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงกุ้งแบบแนวตั้ง ซึ่งทำการทดสอบห้องเลี้ยงขนาด 10 ลิตร โดยทำการเลี้ยงกุ้งขนาดประมาณ 50 กรัม ห้องเลี้ยง (unit) ละ 1 ตัว เป็นระยะเวลาประมาณ 1 เดือน พบว่ากุ้งก้ามกรามมีน้ำหนักตัวที่เพิ่ม 7.19-7.32 กรัม มี ADG 0.23-0.25 กรัมต่อวัน ค่า SGR 0.40-0.44 % มีค่า FCR 4.07-4.34 และตลอดระยะการทดลองกุ้งมีอัตราการรอดเท่ากับ 61.17±2.54 % ในขณะที่การทดสอบการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 30 กรัมขึ้นไปมาเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาด 12 ลิตร เป็นระยะเวลา 90 วัน พบว่ากุ้งก้ามกรามมีน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น 9.08±2.11 กรัม มี ADG 0.3±0.07 กรัมต่อวัน มี SGR 0.7±0.04 % มี Relative weight gain (RWG) 23.59±1.37 % มี Relative weight gain/day (RWG/day) 0.79±0.05 %/day และ FCR 1.35±0.05 อีกทั้งพบว่าความแตกต่างของสีห้องเลี้ยง ได้แก่ สีเหลือง สีน้ำเงิน และสีดำไม่ส่งผลทำให้การเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโดแตกต่างกัน ต่อมาทำการขยายขนาดห้องเลี้ยง เป็นขนาดห้องเลี้ยงน้ำปริมาตร 37.5 ลิตร โดยนำกุ้งก้ามกรามขนาด 40 กรัมขึ้นไปมาทำการเลี้ยงเป็นระยะเวลา 7 เดือน พบว่าในช่วง 1-3 เดือนแรก กุ้งก้ามกรามมีน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น 15.37-20.33 กรัม มี ADG 0.51-0.68 กรัมต่อวัน มี SGR 0.74-1.03 % มี RWG 25.16-36.08 % มี RWG/day 0.84-1.20 %/day มีการกินได้ 0.73-0.99 กรัมต่อวัน และ FCR 1.29-1.66 และเมื่อเข้าเดือนที่ 4 ถึงเดือนที่ 7 พบว่ากุ้งก้ามกรามมีการเจริญเติบโตที่ลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากุ้งก้ามกรามขนาด 40 กรัมขึ้นไปสามารถเจริญเติบโตได้ในห้องเลี้ยงขนาด 37.5 ลิตร จนมีขนาดถึง 97.07±5.48 กรัม และเมื่อเข้าเดือนที่ 4-7 กุ้งก้ามกรามมีค่าน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น ค่า ADG, ค่า SGR, ค่า RWG, ค่า RWG/day ลดลง และ FCR เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าห้องเลี้ยงขนาด 37.5 ลิตร เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามตั้งแต่ขนาด 40 กรัมขึ้นไปและไม่เกิน 100 กรัม ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับรายงานการศึกษาถึงพื้นที่ต่อตัวหรือความหนาแน่นของการเลี้ยงของกุ้ง มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโต (growth rate) น้ำหนักตัวสุดท้าย (final body weight) อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (FCR) อัตราการรอด (survival rate) และผลผลิต (biomass) จากรายงานการศึกษาของ Ponce-Palafox และคณะ (2018) ทำการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 12.1-13.5 กรัม ในกระชังบ่อดินขนาด 3x1x1 เมตร (ปริมาตรน้ำ 3 L) โดยทำการเลี้ยงที่ความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1 ตัว/m^3, 3 ตัว/m^3, 6 ตัว/m^3 และ 9 ตัว/m^3 เป็นระยะเวลา 152 วัน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 1 ตัว/m^3 มี growth rate, SGR, FCR และ survival rate สูงที่สุด รองลงมาเป็นเป็นกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่น 3 ตัว/m^3, 6 ตัว/m^3 และ 9 ตัว/m^3 ตามลำดับ กุ้งก้ามกร้ามที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่น 9

ตัว/m^3 มี growth rate, SGR, FCR, survival rate และผลผลิตต่ำที่สุด เช่นเดียวกับการศึกษาของ Baysa และ Whangchai (2007) ทำการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 5 กรัม ในกระชังบ่อดินที่มีความหนาแน่น 25 ตัว/m^2 และ 50 ตัว/m^2 เป็นระยะเวลา 104 วัน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 25 ตัว/m^2 มีน้ำหนักกุ้งต่อตัว, growth rate, FCR, survival rate และผลผลิตสูงกว่ากุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่น 50 ตัว/m^2 นอกจากนี้ยังมีรายงานการศึกษา เปรียบเทียบอัตราความหนาแน่นของพันธุ์กุ้งขาวต่อสมรรถนะการเจริญเติบโต โดยเปรียบเทียบการเลี้ยงกุ้งขาวที่อัตราความหนาแน่น 17, 26, 35 และ 45 ตัว/m^2 เลี้ยงในบ่อขนาด 1,000 ตารางเมตร (m^2) เป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์ พบว่ากุ้งขาวที่เลี้ยงที่อัตราความหนาแน่นต่ำที่สุด 17 ตัว/m^2 มีน้ำหนักตัวเฉลี่ย และน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยสูงที่สุด (25.3 กรัม) ในขณะที่กุ้งที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่นอื่น ๆ มีน้ำหนักตัวเฉลี่ย และน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่ำกว่า (20.7-22.0 กรัม) กุ้งที่เลี้ยงที่ความหนาแน่นต่ำ มีค่า FCR ต่ำที่สุด แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) อย่างไรก็ตามพบว่ากุ้งขาวที่เลี้ยงที่ความหนาแน่นสูง (35 และ 45 ตัว/m^2) มีผลผลิตสูงกว่ากุ้งที่เลี้ยงที่ความหนาแน่นต่ำ (17 และ 26 ตัว/m^2) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) และพบว่าการเลี้ยงกุ้งที่ความหนาแน่นสูงส่งผลให้ได้ค่าตอบแทนต่อการเลี้ยงสูง (Sookying et al., 2001) และในการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม มีรายงานว่าอัตราความหนาแน่นของกุ้งที่เลี้ยง และขนาดบ่อมีผลต่อน้ำหนักตัวสุดท้ายของกุ้ง และสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของกุ้ง โดยอัตราความหนาแน่นของกุ้งที่เลี้ยงมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับน้ำหนักตัวสุดท้ายของกุ้ง และสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของกุ้ง (Ruiz-Velazco et al., 2010)

แต่อย่างไรก็ตามในรายงานการศึกษาการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามระยะ Juvenile (น้ำหนัก 0.2±0.001 กรัม) ในกระชัง (net cage) ขนาด 0.3x0.3x0.7 เมตร ที่วางในบ่อซีเมนต์ โดยมีความหนาแน่น 8 ตัว/m^3, 15 ตัว/m^3 และ 30 ตัว/m^3 เป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่นต่าง ๆ มีค่าน้ำหนักตัวสุดท้าย, weight gain, SGR ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่กุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่น 8 ตัว/m^3 มี FCR ที่ต่ำที่สุด และ feed conversion efficiency (FER) สูงที่สุด เมื่อเทียบกับกุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่นอื่น ๆ (Avillanosa et al., 2019) เช่นเดียวกับ Negrini และคณะ (2017) ทำการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามระยะ Juvenile (น้ำหนัก 0.315±0.06 กรัม) ในแทงค์ทดลอง (experiment tank) ด้วยระบบ Biofloc ที่ความหนาแน่น 50 ตัว/m^2, 100 ตัว/m^2, 150 ตัว/m^2, 200 ตัว/m^2 และ 250 ตัว/m^2 เป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่นต่าง ๆ มีน้ำหนักตัวสุดท้าย, weight gain และ SGR ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และกุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่น 50 ตัว/m^2 มีค่า FCR (1.28±0.11) ที่ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับกุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่นอื่น ๆ นอกจากนี้มีรายงานการศึกษาการอนุบาลกุ้งก้ามกราม ระยะ larvae ด้วยระบบน้ำหมุนเวียนในบ่อดิน ที่ความหนาแน่น 120 ตัว/m^2, 240 ตัว/m^2 และ 360 ตัว/m^2 เป็นระยะเวลาทดลอง 30 วัน พบว่าระดับความหนาแน่นไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นอัตราความหนาแน่นที่ควรใช้ในการอนุบาลลูกกุ้งก้ามกรามคือ 360 ตัว/m^2 ซึ่งความหนาแน่นที่มากขึ้นจะเป็นการช่วยลดต้นทุนของระบบการอนุบาลในด้านอาหารที่ใช้ในการอนุบาล การจัดการระหว่างการเลี้ยง (Tapparangsee et al., 2013) ซึ่งขัดแย้งกับรายงานการศึกษาของ Marques และคณะ (2000) การอนุบาลกุ้งก้ามกรามในกระชังเป็นระยะเวลาทดลอง 60 วัน พบว่าค่าน้ำหนักตัวสุดท้าย, weight gain ของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงหนาแน่น 100 ตัว/m^2 และ 200 ตัว/m^2 สูงกว่าที่ความหนาแน่น 800 ตัว/m^2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$ และ $P<0.01$ ตามลำดับ) แต่อย่างไรก็ตามกุ้งที่เลี้ยงที่ความหนาแน่น 400 ตัว/m^2, 600 ตัว/m^2 และ 800 ตัว/m^2 จะมีผลผลิตสูงกว่ากุ้งที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 100 ตัว/m^2 และ 200 ตัว/m^2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) จากรายงานการศึกษาการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามจะลดลงเมื่อมีการ

เลี้ยงที่มีความหนาแน่นที่สูงขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าพื้นที่ต่อตัวมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษานี้ ชี้ให้เห็นว่าถึงพื้นที่ต่อตัวที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง ดังนั้นควรมีการขยายขนาดห้องเลี้ยงเพิ่มขึ้น และระยะเวลาการเลี้ยง เพื่อเพิ่มสมรรถนะการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม

ในปัจจุบันกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในบ่อดิน จะมีทั้งกุ้งที่ได้ขนาดตลาด และกุ้งที่มีขนาดไม่ได้มาตรฐาน (ตก size) หากนำไปขายจะมีราคาต่ำ ดังนั้นผู้วิจัยได้เล็งเห็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าของกุ้งก้ามกรามตก size โดยนำกุ้งก้ามกรามดังกล่าว (น้ำหนักเริ่มต้นประมาณ 30 กรัมขึ้นไป) มาใช้ในการทดสอบการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ ได้แก่ 12, 33, 54 และ 67 ลิตร โดยทำการเลี้ยงเป็นระยะเวลา 90 วัน ในระบบการเลี้ยงที่มีระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดเดียวกัน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในห้องขนาด 67 ลิตร มี weight gain สูงที่สุด และมีค่า FCR ต่ำที่สุด ซึ่งมีน้ำหนักตัวสุดท้าย ถึง 104.31±8.56 กรัม รองลงมาคือ ห้องเลี้ยงขนาด 54, 33 และ 12 (มีน้ำหนักตัวสุดท้าย 70.20-96.34 กรัม) ตามลำดับ แต่ที่ห้องขนาด 67 ลิตร มีค่า ADG, SGR, RWG และ RWG/day ไม่แตกต่างจากกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในห้องขนาด 33 และ 54 ลิตร จากการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการนำกุ้งก้ามกรามตก size มาเลี้ยงในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้งที่มีขนาดห้องเลี้ยง 67 ลิตร สามารถเพิ่มการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามได้และเป็นการเพิ่มมูลค่าของกุ้งก้ามกรามตก size ได้ด้วย แต่อย่างไรก็ตามกุ้งที่เลี้ยงในห้องปริมาตร 12 ลิตร มีอัตราการเจริญเติบโตที่ต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในกุ้งก้ามกรามขนาด 5-13 กรัม ถึงความหนาแน่นหรือพื้นที่ต่อตัวที่เหมาะสมมีผลต่อสมรรถนะการเจริญเติบโต (Ponce-Palafox et al., 2018; Baysa and Whangchai, 2007) เช่นเดียวกับรายงานการศึกษาการอนุบาลกุ้งก้ามกรามในกระชังที่ระดับความหนาแน่นต่าง ๆ เป็นระยะเวลาทดลอง 60 วัน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงหนาแน่นต่ำมีการเจริญเติบโต ค่าน้ำหนักตัวสุดท้ายและ weight gain สูงกว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่นสูง (Marques et al., 2000) แต่อย่างไรก็ตามในรายงานการศึกษาการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามระยะ Juvenile (น้ำหนักเริ่มต้น 0.2-0.315 กรัม) ในกระชัง (net cage) ขนาด 0.3x0.3x0.7 เมตร ที่วางในบ่อซีเมนต์ หรือในแทงค์ทดลอง (experiment tank) ด้วยระบบ Biofloc พบว่าความหนาแน่นหรือพื้นที่ต่อตัวไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง (Avillanosa et al., 2019; Negrini et al., 2017) เช่นเดียวกับการอนุบาลกุ้งก้ามกรามระยะ larvae ในระบบน้ำหมุนเวียนในบ่อดิน เป็นระยะเวลาทดลอง 30 วัน พบว่าความหนาแน่นไม่มีผลต่อ growth rate ของกุ้งก้ามกรามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Tapparangsee et al., 2013) จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นหรือพื้นที่ต่อตัวจะมีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของกุ้ง จากรายงานการศึกษาการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามจะลดลงเมื่อมีการเลี้ยงที่มีความหนาแน่นที่สูงขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าพื้นที่ต่อตัวมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม แต่อย่างไรก็ตามในบางรายงานการศึกษาในกุ้งก้ามกรามระยะ larvae และ ระยะ juvenile ความหนาแน่นหรือพื้นที่ต่อตัวไม่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโต ซึ่งอาจเป็นเพราะการจัดการระหว่างการเลี้ยงหรืออนุบาล ดังนั้นจึงควรต้องมีการศึกษาถึงความหนาแน่นหรือพื้นที่ต่อตัวที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามในแต่ละขนาดหรือช่วงอายุเพื่อให้ได้ข้อมูลและสามารถนำไปใช้เพื่อทำการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้งให้ครบวงจรของการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามได้

จากผลการศึกษาการทดสอบความเหมาะสมของห้องเลี้ยงต่อการเจริญเติบโตของการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่มีขนาดเล็ก โดยการนำกุ้งขนาดเล็กที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 18 กรัมขึ้นไป มาทำการเลี้ยงในห้องเลี้ยงที่มีปริมาตรน้ำ 10 ลิตร เป็นระยะเวลา 90 วัน พบว่าการเจริญเติบโต ได้แก่ weight gain, ADG, SGR, RWG, RWG/day และค่าการกินได้ของกุ้งมีการเพิ่มขึ้นในแต่ละเดือน และมีการเจริญเติบโตสูงสุด และมีค่า FCR ต่ำลง ในเดือนที่ 3 ซึ่งมีการเจริญเติบโตที่สูงกว่าเดือนที่ 1 และเดือนที่ 2 แสดงให้เห็นว่ากุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยง

เป็นระยะเวลา 3 เดือน ในห้องขนาด 10 ลิตร มีการปรับตัวเพื่อการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (ADG) เท่ากับ 0.14-0.31 กรัมต่อวัน ถือว่ากุ้งก้ามกรามมีการเจริญเติบโตต่อวันที่ต่ำ ดังนั้นห้องเลี้ยงขนาด 10 ลิตรไม่น่าที่จะเหมาะต่อการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 18 กรัมขึ้นไป เพื่อการเจริญเติบโต และจากผลการศึกษาในกุ้งก้ามกรามที่มีขนาดเล็กที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 2 กรัมขึ้นไป มาทำการเลี้ยงในห้องเลี้ยงที่มีปริมาตรน้ำ 10 ลิตร เป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่ากุ้งก้ามกรามขนาด 2 กรัม มีการเจริญเติบโตได้แก่ weight gain, ADG, SGR, RWG, RWG/day และค่าการกินได้ของกุ้งมีการเพิ่มขึ้นในแต่ละเดือน และมีการเจริญเติบโตสูงสุด และมีค่า FCR ต่ำลง ในเดือนที่ 2 นั้นแสดงให้เห็นว่ากุ้งก้ามกรามขนาด 2 กรัมสามารถมีการเจริญเติบโตได้ในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง แต่อย่างไรก็ตามอัตราการเจริญเติบโต ADG และ SGR ต่ำกว่าอัตราการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามในบ่อดิน (Tapparangsee et al., 2013; Marques et al., 2000)

จากผลการศึกษาการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามเพศผู้และเพศเมียที่ถูกเลี้ยงในคอนโดที่มีห้องขนาด 37.5 ลิตร เป็นระยะเวลาการเลี้ยง 60 วัน พบว่ากุ้งเพศผู้มีอัตราการเจริญเติบโต ได้แก่ ค่า weight gain, ADG, SGR และ RWG สูงกว่า และค่า FCR ต่ำกว่ากุ้งก้ามกรามเพศเมีย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ranjeet และคณะ (2011) ศึกษาอัตราความหนาแน่นต่อสัดส่วนของกุ้งก้ามกราม ที่ถูกเลี้ยงในร่องสวนมะพร้าว (coconut garden channel) เป็นระยะเวลา 8 เดือน พบว่าการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่ความหนาแน่นต่ำ (5,000 ตัว/ไร่) มีการเจริญเติบโต โดยมีน้ำหนักตัวเฉลี่ย 101.65 กรัม น้ำหนักตัวเพศผู้ 128.6 กรัม และเพศเมีย 68.2 กรัม ซึ่งมีค่าสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการเลี้ยงกุ้งที่ความหนาแน่นอื่น ๆ ซึ่งมีการเจริญเติบโต (55.48-87.73 กรัม) น้ำหนักตัวเพศผู้ 85.3-105.2 กรัม และเพศเมีย 42.8-52.5 กรัม ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของการเลี้ยงเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้การเจริญเติบโตและอัตราการรอดของกุ้งก้ามกรามลดลงด้วย และสัดส่วนของกุ้งก้ามกรามที่ไม่ได้ขนาดตามที่ตลาดต้องการ (ตกเกรด) มีจำนวนเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความหนาแน่นในการเลี้ยง (Ranjeet et al., 2011) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Banu และคณะ (2016) ทำการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเพศผู้ล้วน ที่ระดับความหนาแน่นต่าง ๆ พบว่าการเลี้ยงเพศผู้ล้วนที่ระดับความหนาแน่นต่ำ (20 ตัว/m^2) มีการเจริญเติบโต น้ำหนักตัวสุดท้ายและ SGR สูง และมีสัดส่วนของกุ้งขนาดใหญ่ (male morphotypes) ได้แก่ Orange claw male (น้ำหนักตัวสุดท้าย 42.24±0.37 กรัม) มีจำนวน 62.5%, Blue claw male (น้ำหนักตัวสุดท้าย 29.65±0.28 กรัม) มีจำนวน 21% และ Small male (น้ำหนักตัวสุดท้าย 28.63±0.73 กรัม) มีจำนวน 17% ดีกว่าที่การเลี้ยงระดับความหนาแน่นอื่น ๆ (30 ตัว/m^2 และ 40 ตัว/m^2) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าในการพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงที่เหมาะสมของระบบการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้ง ควรจะเลี้ยงเพศผู้ล้วนเนื่องจากกุ้งก้ามกรามเพศผู้มีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่าเพศมีย

จากรายงานการศึกษาอัตราความหนาแน่นต่อการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามของ Baysa และ Whangchai (2007) โดยเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 5 กรัม ในกระชังบ่อดินที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 104 วัน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 25 ตัว/m^2 มีอัตราการรอดชีวิต (34.27%) สูงกว่ากุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่น 50 ตัว/m^2 สอดคล้องกับการศึกษาการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 12.1-13.5 กรัม ในกระชังบ่อดิน ขนาด 3 x 1 x 1 เมตร (ปริมาตรน้ำ 3 L) โดยทำการเลี้ยงที่ความหนาแน่นที่แตกต่างกันได้แก่ 1 ตัว/m^3, 3 ตัว/m^3, 6 ตัว/m^3 และ 9 ตัว/m^3 เป็นระยะเวลา 152 วัน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 1 ตัว/m^3 มีอัตราการรอดชีวิต (100±2.1 %) สูงที่สุด เมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น ๆ (Ponce-Palafox et al., 2018) เช่นเดียวกับรายงานการศึกษาของ Negrini และคณะ (2017) ทำการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามระยะ

Juvenile (น้ำหนัก 0.315±0.06 กรัม) ในแทงค์ทดลอง (experiment tank) ด้วยระบบ Biofloc ที่ความหนาแน่น 50 ตัว/m^2, 100 ตัว/m^2, 150 ตัว/m^2, 200 ตัว/m^2 และ 250 ตัว/m^2 เป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่ากุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่น 50 ตัว/m^2 มีอัตราการรอดชีวิต (73±6%) ที่สูงที่สุด เมื่อเทียบกับกุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่นอื่น ๆ นอกจากนี้ได้มีรายงานการศึกษาอัตราความหนาแน่นต่อสัดส่วนของกุ้งก้ามกราม ที่ถูกเลี้ยงในร่องสวนมะพร้าว (coconut garden channel) โดยมีความหนาแน่นดังนี้ 5,000 ตัว/ไร่, 10,000 ตัว/ไร่, 15,000 ตัว/ไร่ และ 25,000 ตัว/ไร่ เป็นระยะเวลา 8 เดือน พบว่าการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่ความหนาแน่นต่ำ (5,000 ตัว/ไร่) มีอัตราการรอดชีวิต (69.44 %) สูงที่สุด ในขณะที่อัตราความหนาแน่นอื่น ๆ มีอัตราการรอดชีวิต (28.21-54.52 %) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของการเลี้ยงเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้การเจริญเติบโตและอัตราการรอดของกุ้งก้ามกรามลดลงด้วย (Ranjeet et al., 2011) เช่นเดียวกับการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเพศผู้ล้วนที่อัตราความหนาแน่นต่ำจะมีอตราการรอดชีวิตถึง 90 % เมื่อเทียบกับการเลี้ยงกุ้งที่ความหนาแน่นอื่น ๆ (88.5-89%) แต่อย่างไรก็ตามในรายงานการศึกษาการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามระยะ Juvenile (น้ำหนัก 0.2±0.001 กรัม) ในกระชัง (net cage) ขนาด 0.3x0.3x0.7 เมตร ที่วางในบ่อซีเมนต์ โดยมีความหนาแน่น 8 ตัว/m^3, 15 ตัว/m^3 และ 30 ตัว/m^3 เป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่นต่าง ๆ ไม่มีผลต่ออัตราการรอดชีวิต (26.67-45.83 %) (Avillanosa et al., 2019) เช่นเดียวกับ Tapparangsee และคณะ (2013) ทำการศึกษาความหนาแน่นที่เหมาะสมต่อการอนุบาลลูกกุ้งก้ามกรามในระบบน้ำหมุนเวียนในบ่อดิน ที่ความหนาแน่น 120 ตัว/m^2, 240 ตัว/m^2 และ 360 ตัว/m^2 เป็นระยะเวลาทดลอง 30 วัน พบว่าระดับความหนาแน่นไม่มีผลต่ออัตราการรอดของลูกกุ้งก้ามกรามที่อนุบาล จากรายงานการศึกษาความหนาแน่นของการเลี้ยงกุ้งที่เพิ่มขึ้น หรือพื้นที่ต่อตัวของการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่น้อยลงมีผลทำให้อัตราการรอดชีวิตของกุ้งลดลง แต่ไม่มีผลต่อการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาดเล็ก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าพื้นที่ต่อตัวมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม อีกทั้งกุ้งก้ามกรามมีพฤติกรรมหวงถิ่นจึงมีการต่อสู้และกินกันเอง (Baysa and Whangchai, 2007) จึงมีผลต่ออัตราการรอดของกุ้งก้ามกราม

เช่นเดียวกับผลการศึกษาต่ออัตรารอดชีวิตของกุ้งก้ามกรามที่ถูกนำมาเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ พบว่าห้องเลี้ยงขนาด 10 ลิตร ที่ใช้ในการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 50 กรัมขึ้นไป เป็นระยะเวลา 30 วัน มีอัตรารอดของกุ้ง 61.17 % และการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 2 กรัมขึ้นไปเป็นระยะเวลา 60 วัน และกุ้ง 18 กรัมขึ้นไปเป็นระยะเวลาการเลี้ยง 90 วัน มีอัตราการรอด 94.07 % และ 80 % ตามลำดับ ห้องเลี้ยงขนาด 12 ลิตร ที่ใช้ในการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 30 กรัมขึ้นไป เป็นระยะเวลา 90 วัน มีอัตรารอดของกุ้ง 100 %, ห้องเลี้ยงขนาด 37.5 ลิตร ที่ใช้ในการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 40 กรัมขึ้นไปเป็นระยะเวลา 210 วัน และกุ้ง 50 กรัมขึ้นไปเป็นระยะเวลาการเลี้ยง 60 วัน มีอัตราการรอด 45.45 % และ 100 % ตามลำดับ และการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 30 กรัมขึ้นไปเป็นระยะเวลา 90 วัน ในห้องเลี้ยงขนาด 33 ลิตร, 54 ลิตร และ 67 ลิตร มีอัตราการรอด 100 % จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ที่มีขนาด 2 , 18, 30, 40 และ 50 กรัมขึ้นไป ในห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ ได้แก่ 10, 12, 33, 37.5, 54 และ 60 ลิตร ที่ระยะเวลาการเลี้ยงต่าง ๆ (30, 60 และ 90 วัน) มีอัตราการรอดชีวิต 61.17-100 % แต่อย่างไรก็ตามการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 40 กรัมขึ้นไป ในห้องเลี้ยงขนาด 37.5 ลิตร เป็นระยะเวลา 210 วัน มีอัตราการรอด 45.45 % นั้นอาจหมายถึงว่ากุ้งก้ามกรามเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นในห้องเลี้ยง 37.5 ลิตร อาจไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการดำรงชีวิตของกุ้งก้ามกรามต่อไป ดังนั้นจึงควรมีการเพิ่มขนาดห้องเลี้ยงหรือพื้นที่ต่อตัว เพื่อให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามต่อไป

จากผลการศึกษาห้องเลี้ยงขนาดที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม แสดงให้เห็นว่ากุ้งก้ามกรามที่มีขนาดเริ่มต้น 30-50 กรัมขึ้นไปที่ถูกเลี้ยงในห้องเลี้ยงที่มีขนาดน้ำปริมาตร 33-67 ลิตร มีแนวโน้มที่สามารถจะเจริญเติบโตต่อไปได้ ซึ่งอาจสรุปได้ว่าหากต้องการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่มีขนาดเริ่มต้น 2 กรัมขึ้นไป อาจต้องทำการเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาด 10 ลิตรก่อน เมื่อกุ้งมีขนาดประมาณ 30-50 กรัมขึ้นไปแล้วนั้นจึงควรย้ายไปเลี้ยงในห้องเลี้ยงที่มีขนาด 37.5 ลิตร เพื่อเพิ่มพื้นที่ต่อตัวให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจในการศึกษาต่อไปถึงขนาดห้องเลี้ยงแต่ละขนาดที่กุ้งก้ามกรามขนาดประมาณ 50 กรัมขึ้นไปจะสามารถเจริญเติบโตได้

จากผลการศึกษาขนาดห้องเลี้ยงที่เหมาะสม ในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้ง ด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด (RAS) ซึ่งได้ทำการวัดค่าคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม โดยวัดอุณหภูมิอากาศมีค่าเท่ากับ 29.81±0.08 ถึง 29.85±0.11 ^{o}C คุณภาพน้ำในคอนโดกุ้งที่มีห้องเลี้ยงในขนาดต่าง ๆ พบว่าค่าคุณภาพน้ำไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งอุณหภูมิน้ำมีค่าเท่ากับ 27.62±0.04 ถึง 28.11±0.04 ^{o}C มีค่า DO เท่ากับ 6.3±0.02 ถึง 6.57±0.02 mg/L ค่าพีเอชในน้ำมีค่าเท่ากับ 7.24±0.04 ถึง 7.55±0.01 ค่าความกระด้าง (Alkalinity) มีค่าเท่ากับ 182.14±0.03 ถึง 182.79±0.06 mg/L และค่าการนำไฟฟ้า (EC) มีค่าเท่ากับ 14390.38±695.59 ถึง 24900.69±202.76 ms/cm ซึ่งค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงค่าของน้ำที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม (ณัฐพงค์, 2562) ชี้ให้เห็นว่าการใช้ระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งสามารถคงคุณสมบัติของค่าน้ำที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามได้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการใช้ระบบหมุนเวียนน้ำ (RAS) ต่อความหนาแน่นของการเลี้ยงกุ้งขาว (*L. vannamei*) ในระยะวัยอ่อน (post larvae) ที่ระดับความหนาแน่นต่าง ๆ คือ 500 PL / m^3, 750 PL / m^3 และ 1,000 PL / m^3 เป็นระยะเวลา 84 วัน พบว่าคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเพาะเลี้ยงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) และไม่มีผลเสียต่อการเจริญเติบโตของกุ้งขาว (Suantika et al., 2018) เช่นเดียวกันกับ Tapparangsee และคณะ (2013) รายงานการอนุบาลลูกกุ้งก้ามกรามด้วยระบบ RAS ในบ่อดิน (บ่อดินมีพรรณไม้น้ำ ได้แก่บัวสาย และสาหร่ายหางกระรอก) ที่ระดับความหนาแน่น 120 ตัว/m^2, 240 ตัว/m^2 และ 360 ตัว/m^2 เป็นระยะเวลาทดลอง 30 วัน พบว่าค่าคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยคุณภาพน้ำเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งและที่ระดับความหนาแน่นไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อ SGR และอัตราการรอดชีวิต ซึ่งในระบบ RAS มีส่วนช่วยในการลดปริมาณสารประกอบไนโตรเจน เช่น แอมโมเนีย หรือไนเตรทได้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเพาะเลี้ยงกุ้งด้วยระบบ RAS สามารถควบคุมภาพน้ำให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งที่เลี้ยงในความหนาแน่นที่แตกต่างกันได้ นอกจากนี้ยังมีรายงานการศึกษาการใช้ Biofloc technology ในระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) ในการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม (น้ำหนักเริ่มต้น 0.315 ± 0.06 g) ที่เลี้ยงความหนาแน่นที่แตกต่างกัน (50, 100, 150, 200 และ 250 ตัว/m^2) เป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่าค่าคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเลี้ยงไม่มีความแตกต่างกัน และไม่ส่งผลเสียต่อการเจริญเติบโตและการรอดชีวิตของกุ้งก้ามกราม (Negrini et al., 2017)

2. การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ด้วยระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง

การพัฒนาระบบการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ด้วยระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง (vertical shrimp culture) เพื่อใช้เป็นระบบทางเลือกในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในเชิงธุรกิจ ซึ่งจากการศึกษาในข้างต้นแสดงให้เห็นว่ากุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาด (ปริมาตรน้ำ) 33, 37.5, 54 และ 67 ลิตร มีการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามที่ไม่ต่างกัน ดังนั้นจึงพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงให้เหมาะสมยิ่งขึ้น โดยทำการศึกษาการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม ขนาดประมาณ 30 กรัม และ 50 กรัมขึ้นไปมาเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตรที่มีระบบน้ำแบบหมุนเวียนแบบปิด

จากผลการศึกษาการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามขนาด 50 กรัมขึ้นไป ในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร เป็นระยะเวลา 7 เดือน พบว่าการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามในตลอดระยะเวลาการเลี้ยงมีค่าเฉลี่ยของค่าน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น 13.25±2.19 กรัม มี ADG 0.44±0.07 กรัมต่อวัน มี SGR 0.47±0.19 % ค่า RWG 15.31±6.66 % ค่า RWG/day 0.51±0.22 %/day มีค่าการกินได้ 1.03±0.14 กรัมต่อวัน ค่า FCR 2.36±0.14 และอัตราการรอด 90.18±8.73 % จากผลการศึกษาจะเห็นว่าอัตราการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามลดลงในเดือนที่ 5 ซึ่งมีค่า weight gain 12.28±0.96 กรัม ค่า ADG 0.41±0.03 กรัมต่อวัน มี SGR 0.34±0.03 % ค่า RWG 10.83±1.15 % ค่า RWG/day 0.36±0.04 %/day มีค่าการกินได้ 0.94±0.08 กรัมต่อวัน ค่า FCR 2.31±0.07 ซึ่งกุ้งก้ามกรามมีน้ำหนักสุดท้ายเท่ากับ 126.09±6.04 กรัม และจากผลการศึกษาการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามขนาด 30 กรัมขึ้นไป ในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร เป็นระยะเวลา 6 เดือน พบว่าการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามในตลอดระยะเวลาการเลี้ยงมีค่าเฉลี่ยของค่าน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น 12.31±1.48 กรัม มี ADG 0.42±0.06 กรัมต่อวัน มี SGR 0.6±0.26 % ค่า RWG 19.96±9.18 % ค่า RWG/day 0.67±0.32 %/day มีค่าการกินได้ 0.96±0.11 กรัมต่อวัน ค่า FCR 2.33±0.13 และอัตราการรอด 75.6±8.57 % อย่างไรก็ตามอัตราการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามลดลงในเดือนที่ 6 ซึ่งมีค่า weight gain 10.80±1.10 กรัม ค่า ADG 0.36±0.04 กรัมต่อวัน มี SGR 0.34±0.03 % ค่า RWG 10.61±0.99 % ค่า RWG/day 0.35±0.03 %/day มีค่าการกินได้ 0.86±0.06 กรัมต่อวัน ค่า FCR 2.41±0.18 ซึ่งกุ้งก้ามกรามมีค่าน้ำหนักสุดท้ายเท่ากับ 112.62±6.22 กรัม จากผลการศึกษาการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามขนาดประมาณ 30 กรัม และ 50 กรัมขึ้นไปที่ถูกเลี้ยงในห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร จะมีอัตราการเจริญเติบโตที่ลดลง (ADG และ SGR ลดลง) เมื่อมีน้ำหนักสุดท้าย 112.62±6.22 กรัม และ 126.09±6.04 กรัม ตามลำดับ นั้นอาจชี้ให้เห็นว่าห้องเลี้ยงที่มีขนาด 50 ลิตร เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามขนาด 30-50 กรัม จนถึงขนาดไม่เกิน 120 กรัม ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในกุ้งก้ามกรามขนาด 5-13 กรัม ถึงความหนาแน่นหรือพื้นที่ต่อตัวที่เหมาะสมมีผลต่อสมรรถนะการเจริญเติบโต (Ponce-Palafox et al., 2018; Baysa and Whangchai, 2007) เช่นเดียวกับรายงานการศึกษาการอนุบาลกุ้งก้ามกรามในกระชังที่ระดับความหนาแน่นต่าง ๆ เป็นระยะเวลาทดลอง 60 วัน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงหนาแน่นต่ำมีการเจริญเติบโต ค่าน้ำหนักตัวสุดท้าย ค่า weight gain และอัตราการรอดชีวิตสูงกว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่นสูง (Marques et al., 2000) และจากรายงานการศึกษาของ Banu และคณะ (2016) และการศึกษาของ Ranjeet และคณะ (2011) พบว่าการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเพศผู้ล้วน ที่ถูกเลี้ยงในถังไฟเบอร์ (fiberglass tank) และการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามระยะ juvenile ที่ถูกเลี้ยงในร่องสวนมะพร้าว (coconut garden channel) ที่มีพื้นที่ต่อตัวที่เหมาะสมหรือการเลี้ยงที่ระดับความหนาแน่นต่ำ มีผลทำให้กุ้งก้ามกรามมีการเจริญเติบโตที่สูง ซึ่งมีน้ำหนักตัวสุดท้าย 25.83 กรัม และ 101.65 กรัม และมีอัตรารอด 90.0% และ 69.44% ตามลำดับ

จากผลการศึกษาการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามด้วยระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง ด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด (RAS) ซึ่งได้ทำการวัดค่าคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ในตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ได้ทำการวัดอุณหภูมิอากาศมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28.49±1.37 องศาเซลเซียส และคุณภาพน้ำในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในคอนโดที่มีห้องเลี้ยงขนาดต่าง ๆ พบว่าค่าคุณภาพน้ำไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งอุณหภูมิน้ำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 27.14±0.74 องศาเซลเซียส ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (DO) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.58±0.16 mg/L ค่าพีเอชในน้ำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.37±0.04 ค่าความเค็ม (salinity) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.25±0.12 ppt ค่าการนำไฟฟ้า (EC) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19539.81±1773.87 ms/cm ค่าความกระด้าง (Alkalinity) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 182.51±0.69 mg/L ซึ่งค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงค่าของน้ำที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม (ณัฐพงศ์, 2562) ชี้ให้เห็นว่าการใช้ระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งสามารถคงคุณสมบัติของค่าน้ำที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามได้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการใช้ระบบหมุนเวียนน้ำ (RAS) ต่อการเลี้ยงกุ้งขาวในระยะวัยอ่อน (post larvae), การอนุบาลลูกกุ้งก้ามกรามด้วยระบบ RAS ในบ่อดิน และการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม โดยใช้ Biofloc technology ในระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) พบว่าคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเพาะเลี้ยงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) และไม่มีผลเสียต่อการเจริญเติบโต และอัตราการรอดของกุ้ง (Suantika et al., 2018; Tapparangsee et al., 2013; Negrini et al., 2017)

3. การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant

การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant ต้องอาศัยการบูรณาการเทคโนโลยีและศาสตร์ด้านต่าง ๆ ได้แก่ เทคโนโลยีด้านวิศวกรรมในการพัฒนาระบบการเลี้ยง ที่ประกอบไปด้วยห้องเลี้ยง ระบบน้ำแบบหมุนเวียน และระบบการบำบัดน้ำเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ร่วมกับเทคโนโลยีการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เพื่อเป็นการผลักดันให้โครงการนี้สามารถเป็นการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระดับ Pilot plant ได้ ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการสร้างโรงเรือนการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแนวตั้ง ซึ่งภายในประกอบด้วย ห้องเลี้ยงเชิงกว้าง 144 ห้อง (unit) และห้องเลี้ยงเชิงลึก 96 unit ซึ่งเลี้ยงด้วยระบบน้ำแบบหมุนเวียนแบบบำบัดน้ำเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ นอกจากนี้ยังมีการติดกล้องเพื่อสังเกตพฤติกรรมของกุ้งก้ามกร้ามที่เลี้ยงในคอนโดด้วย

การพัฒนาระบบน้ำแบบหมุนเวียน และระบบการบำบัดน้ำเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่สำหรับการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้นเพื่อรองรับระบบการเลี้ยงในเชิงธุรกิจ ซึ่งทำการทดสอบระบบกรองน้ำทั้ง 2 ระบบ โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเพื่อน้ำมาใช้หมุนเวียนในระบบการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามคอนโด พบว่าน้ำจากระบบเลี้ยงกุ้งคอนโด มีอุณหภูมิ 29.28-30.14 ^{o}C ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ 7.06-7.08 mg/L ค่าพีเอช 8.23-8.27 ค่าปริมาณแอมโมเนียทั้งหมด (Total ammonia) 0.25 mg/L ค่าไนไตรต์ (NO^{2-}) 0.00178-0.00226 mg/L ค่าไนเตรต (NO^{3-}) 3.62-3.87 mg/L ค่าความกระด้าง (Alkalinity) 115-125 mg/L ค่าแคลเซียมและแมกนีเซียม (Ca & Mg) 385-395 mg/L ค่าคลอไรด์ (Cl^{-}) 1224.62-1324.59 mg/L ค่าความขุ่น 0-1 NTU และค่า COD 22.56-27.36 mg/l เมื่อน้ำจากการเพาะเลี้ยงกุ้งผ่านการบำบัดด้วยระบบกรองชุดที่ 1 พบว่าน้ำหลังผ่านการกรองมีอุณหภูมิ 29.12-29.81 ^{o}C ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ 7.05-7.06 mg/L ค่าพีเอช 8.12-8.32 ค่าปริมาณแอมโมเนียทั้งหมด 0.25 mg/L ค่าไนไตรต์ 0.00141-0.00186 mg/L ค่าไนเตรต 2.27-3.76 mg/L ค่าความกระด้าง 120 mg/L ค่าแคลเซียมและแมกนีเซียม 335-395 mg/L ค่าคลอไรด์ 1049.67-1254.61 mg/L ค่าความขุ่น 0.000 NTU และค่า COD

20.44-20.80 mg/l และคุณภาพน้ำหลังผ่านระบบกรองน้ำชุดที่ 2 น้ำหลังผ่านการกรองมีอุณหภูมิ 29.21 °C ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ 7.05 mg/L ค่าพีเอช 8.15 ค่าปริมาณแอมโมเนียทั้งหมด 0-0.25 mg/L ค่าไนไตรต์ 0.000420 mg/L ค่าไนเตรต 3.753 mg/L ค่าความกระด้าง 105 mg/L ค่าแคลเซียมและแมกนีเซียม 325 mg/L ค่าคลอไลน์ 930 mg/L ค่าความขุ่น 0.000 NTU และค่า COD 11.04 mg/l ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าคุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดของระบบที่ 1 และ 2 สามารถช่วยลดความขุ่น และ ค่า COD ของน้ำได้ อีกทั้งค่าคุณภาพน้ำจากทั้งสองระบบกรองไม่มีความแตกต่างกันในส่วนของอุณหภูมิน้ำ ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ ค่าพีเอช ค่าความกระด้าง ค่าแคลเซียมและแมกนีเซียม ค่าคลอไรด์ และค่าความขุ่น แต่อย่าไรก็ตามค่าคุณภาพน้ำที่ผ่านการกรองด้วยระบบที่ 2 ได้แก่ค่าปริมาณแอมโมเนียทั้งหมด ค่าไนไตรต์ ค่าไนเตรต และค่า COD ต่ำกว่าค่าคุณภาพน้ำที่ผ่านการกรองด้วยระบบที่ 1 แสดงให้เห็นว่าระบบกรองน้ำชุดที่ 2 มีความสามารถในการกรองและบำบัดได้ดีกว่าระบบกรองน้ำชุดที่ 1 ซึ่งอาจเป็นเพราะในระบบกรองที่ 2 มีถ่านกัมมันต์, สาร Microban เป็นสารที่มีเทคโนโลยีป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียจากสหรัฐอเมริกา ลิขสิทธิ์เฉพาะ master, ไส้กรองดิส (Disc filter) สามารถปรับความละเอียดตั้งแต่ 20-80 ไมครอน ทำการดักจับ ตะกอนหยาบ เช่น กรวด ทราย หิน โคลน และ สารแขวนลอยขนาดใหญ่ และ ไส้กรองอะตอมไมส์ (Atomize filter) เป็นไส้กรองละเอียด 0.5 ไมครอน และเป็นเทคโนโลยี High Flow ลิขสิทธิ์เฉพาะ Master ทำให้ได้อัตราการไหลของน้ำสูง ซึ่งในระบบหมุนเวียนน้ำ จึงสามารถลดปริมาณแอมโมเนีย ค่าไนไตรต์ ค่าไนเตรต และค่า COD ให้มีค่าต่ำกว่าค่าคุณภาพน้ำที่ผ่านการกรองด้วยระบบที่ 1 อีกทั้งค่าคุณภาพน้ำที่ผ่านการกรอง มีค่าอยู่ในช่วงค่าของน้ำที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม (ณัฐพงศ์, 2562) ชี้ให้เห็นว่าการใช้ระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งสามารถคงคุณสมบัติของค่าน้ำที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามได้ ซึ่งในปัจจุบันได้มีรายงานการศึกษาการใช้ระบบหมุนเวียนน้ำ (RAS) ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อให้ระบบ RAS ช่วยในการบำบัดของเสียในน้ำจากการเพาะเลี้ยง จากนั้นจึงนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่ ทำให้ลดการปล่อยน้ำทิ้งออกจากระบบเลี้ยงซึ่งจะเป็นผลดีต่อสภาวะแวดล้อม (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2556) เช่นในรายงานการศึกษาของ จริยา และ สุรินทร(2556) ได้ทำการศึกษาการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในระบบ CAS (ระบบถ่ายเทน้ำจากภายนอก) และระบบ RAS ซึ่งเป็นระบบปิดด้วยระบบหมุนเวียนน้ำจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำแบบประดิษฐ์ พบว่าบ่อเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสมด้วยระบบ CAS และ RAS มีคุณภาพน้ำและอุณหภูมิ pH, BOD_5, TS และ TSS อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานในการเพาะเลี้ยงปลา ซึ่งให้ผลไม่แตกต่างกัน และไม่ส่งผลเสียต่อการเจริญเติบโตของปลาดุก จากรายงานการศึกษาการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในถังเลี้ยง (Tank) และการเลี้ยงกุ้งขาวในระยะวัยอ่อน (post larvae) ที่มีการใช้ระบบ recirculating aquaponic system (RAS) ในการเพาะเลี้ยง ไม่ส่งผลเสียต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง (Khoda et al., 2011; Suantika et al., 2018) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าระบบ RAS มีความเป็นไปตามได้ที่สามารถใช้เพื่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม อีกทั้งระบบ RAS ยังมีผลทำให้ลดระดับแอมโมเนียและไนเตรทในระบบน้ำที่เลี้ยงกุ้งซึ่งเป็นการรักษาคุณภาพน้ำให้เหมาะสมในระหว่างช่วงการเลี้ยง

ในการศึกษานี้เป็นการพัฒนาระบบกรองของระบบหมุนเวียนน้ำ โดยการใช้ระบบกรองทางกายภาพที่มีความสามารถในการบำบัดทั้งในส่วนการลดปริมาณแอมโมเนีย ค่าไนไตรต์ ค่าไนเตรต และค่า COD ของน้ำในระบบเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม เช่นเดียวกับรายงานการศึกษาการใช้วัสดุตัวกลางในระบบหมุนเวียนน้ำ เพื่อช่วยในการบำบัดน้ำ คือ ไบโอบอล, ตาข่ายพรางแสง เนื้ออวน กรองอิฐ กรองถ่าน วัสดุกรองโฟม และวัสดุกรองไม้ไผ่ ตามลำดับ พบว่าปลาบู่ทรายที่เลี้ยงในน้ำผ่านระบบหมุนเวียนน้ำโดยใช้วัสดุตัวกลางตาข่ายพรางแสงมีอัตราการเจริญเติบโตสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุตัวกลางอื่น ๆ และการเลี้ยงปลาดุก

ลูกผสมที่เลี้ยงในน้ำที่มีระบบหมุนเวียนที่มีตัวกลางเป็นวัสดุกรองอิฐ มีการเจริญเติบโตสูงที่สุด เมื่อเทียบกับวัสดุตัวกลางชนิดอื่น ๆ (ชลฤทัย และคณะ, 2554; สุฤทธิ์ และคณะ, 2551) การศึกษาการอนุบาลกุ้งก้ามกรามวัยอ่อนในระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) โดยการบำบัดน้ำทางชีวภาพ ด้วยสาหร่ายไก (*Cladophora sp.*) เปรียบเทียบกับการอนุบาลแบบเปิด พบว่าค่าคุณภาพน้ำตลอดการเลี้ยง ได้แก่ ค่าแอมโมเนีย ไนไตรต์และไนเตรต ของทั้งสองระบบการเลี้ยงมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยระบบน้ำหมุนเวียนมีค่าเฉลี่ยแอมโมเนียต่ำกว่าระบบเปิด แต่มีค่าไนไตรต์และไนเตรตสูงกว่า ส่วนค่าคุณภาพน้ำอื่นไม่แตกต่างกัน (กิ่งเทียน และคณะ 2554) นอกจากนี้ยังมีรายงานการศึกษาการใช้ Biofloc technology เพื่อประโยชน์การเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) เพื่อให้สามารถนำน้ำที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยทำการศึกษาในกุ้งก้ามกราม พบว่าค่าคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเลี้ยงไม่มีความแตกต่างกัน (Negrini et al., 2017) จะเห็นได้ว่ามีการใช้ระบบ RAS ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างแพร่หลาย และมีการปรับองค์ประกอบภายในระบบ RAS โดยการใช้ระบบกายภาพ ระบบชีวภาพ และ Biofloc technologyเพื่อให้เกิดการบำบัดน้ำได้มีประสิทธิภาพและเหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำให้มากที่สุด เช่นเดียวกับในการศึกษานี้ ที่มีการใช้ระบบกรองทางกายภาพในระบบหมุนเวียนน้ำ ดังนั้นระบบกรองที่ 2 จึงถูกใช้เพื่อการศึกษาต่อไป

จากผลการศึกษาในข้างต้นชี้ให้เห็นว่าห้องเลี้ยงที่มีขนาด 50 ลิตร เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามขนาด 30-50 กรัม จนถึงขนาดไม่เกิน 120 กรัม ซึ่งเป็นที่น่าสนใจในการศึกษาวิจัยต่อไปเกี่ยวกับลักษณะของห้องเลี้ยงที่สามารถเพิ่มการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามได้ โดยทำการศึกษาห้องเลี้ยง 2 ลักษณะ คือ ห้องเลี้ยงเชิงกว้าง ปริมาตรน้ำ 70 ลิตร และห้องเลี้ยงเชิงลึก ปริมาตรน้ำ 120 ลิตร ในระบบห้องเลี้ยงเชิงกว้าง ปริมาตรน้ำ 70 ลิตร ซึ่งกุ้งก้ามกรามมีน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 47.06±5.84 กรัม ทำการเลี้ยงเป็นระยะเวลา 12 เดือน พบว่ากุ้งก้ามกรามมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นตั้งในเดือนที่ 1 ถึง เดือนที่ 9 ซึ่งในเดือนที่ 9 กุ้งก้ามกรามมีน้ำหนักสุดท้ายเท่ากับ 149.47±7.92 กรัม มีค่า weight gain เท่ากับ 10.4±2.86 กรัม มีค่า RWG เท่ากับ 7.56±2.25 % มีค่า ADG เท่ากับ 0.35±0.1 กรัมต่อวัน มีค่า SGR เท่ากับ 0.24±0.07 % มีค่าการกินได้เท่ากับ 0.8±0.14 กรัมต่อวัน และมีค่า FCR เท่ากับ 2.39±0.34 แต่เมื่อเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในเดือนที่ 10 พบว่ากุ้งก้ามกร้ามมีการเจริญเติบโตลดลง โดยมีค่า ADG ลดลง คือ 0.27±0.11 กรัมต่อวัน มีค่า weight gain เท่ากับ 10.48±1.68 กรัม มีค่า RWG เท่ากับ 7.07±1.45 % มีค่า SGR เท่ากับ 0.18±0.08 % มีค่าการกินได้เท่ากับ 0.69±0.18 กรัมต่อวัน และมีค่า FCR เท่ากับ 2.67±0.42 ซึ่งทำให้กุ้งมีซึ่งมีค่าน้ำหนักสุดท้ายเท่ากับ 159.95±6.88 กรัม และจากผลการศึกษาการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบห้องเลี้ยงเชิงลึก ปริมาตรน้ำ 120 ลิตร ซึ่งนำกุ้งน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 48.72±5.97 กรัม เลี้ยงเป็นระยะเวลา 14 เดือน พบว่ากุ้งก้ามกรามมีเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นในเดือนที่ 1 ถึงเดือนที่ 10 ซึ่งในเดือนที่ 10 กุ้งก้ามกรามมีน้ำหนักตัวสุดท้ายเท่ากับ 177.74±10.45 กรัม ค่า weight gain เท่ากับ 12.78±1.28 กรัม มี RWG เท่ากับ 7.74±0.55 % มีค่า ADG เท่ากับ 0.43±0.04 กรัมต่อวัน มีค่า SGR เท่ากับ 0.25±0.02 % มีค่าการกินได้เท่ากับ 0.94±0.1 กรัมต่อวัน ค่า FCR 2.21±0.07 อย่างไรก็ตามอัตราการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามลดลงในเดือนที่ 11 ซึ่งมีค่าน้ำหนักสุดท้าย 184.69±9.84 กรัม มีค่า weight gain เท่ากับ 9.8±1.38 กรัม ค่า RWG เท่ากับ 5.66±1.11 % ค่า ADG เท่ากับ 0.33±0.05 กรัมต่อวัน ค่า SGR เท่ากับ 0.18±0.03 % ค่าการกินได้เท่ากับ 0.73±0.11 กรัมต่อวัน ค่า FCR เท่ากับ 2.25±0.08 สอดคล้องกับรายงานการศึกษาในกุ้งก้ามกรามขนาด 5-13 กรัม ถึงความหนาแน่นหรือพื้นที่ต่อตัวที่เหมาะสมมีผลต่อการเพิ่มสมรรถนะการเจริญเติบโต (Ponce-Palafox et al., 2018; Baysa and Whangchai, 2007) เช่นเดียวกับรายงานการศึกษาการอนุบาลกุ้งก้ามกรามในกระชังที่ระดับความหนาแน่นต่าง ๆ เป็นระยะเวลาทดลอง 60 วัน พบว่ากุ้ง

ก้ามกรามที่เลี้ยงหนาแน่นต่ำมีการเจริญเติบโต ค่าน้ำหนักตัวสุดท้าย ค่า weight gain และอัตราการรอดชีวิตสูงกว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่นสูง (Marques et al., 2000) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าพื้นที่ต่อตัวมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม เมื่อพิจารณาถึงอัตราการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง ในระบบห้องเลี้ยงเชิงกว้าง (70 ลิตร) และในระบบห้องเลี้ยงเชิงลึก (120 ลิตร) เป็นระยะเวลา 9 เดือน และ 10 เดือน มีค่า ADG เท่ากับ 0.35±0.1 และ 0.43±0.04 กรัมต่อวัน มีค่า SGR เท่ากับ 0.24±0.07 % และ 0.25±0.02 % และมีน้ำหนักตัวสุดท้ายเท่ากับ 149.47±7.92 กรัม และ 177.74±10.45 กรัม ตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ Ranjeet และคณะ (2011) มีการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามระยะ juvenile ในร่องสวนมะพร้าว (coconut garden channel) เป็นระยะเวลา 8 เดือน มีค่า ADG 0.42 กรัมต่อวัน และมีน้ำหนักตัวสุดท้ายเท่ากับ 101.65 กรัม ซึ่งมีอัตราการเจริญเติบโตใกล้เคียงกันกับการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง แต่อย่างไรก็ตามในรายงานการศึกษาของ Banu และคณะ (2016) พบว่าการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเพศผู้ล้วนในถังไฟเบอร์ (fiberglass tank) เป็นเวลา 80 วัน มีผลทำให้กุ้งก้ามกรามมีการเจริญเติบโตสูง โดยมีค่า SGR เท่ากับ 1.24±0.03 กรัมต่อวัน และมีค่าน้ำหนักตัวสุดท้าย 25.83±1.33 กรัม เช่นเดียวกับการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 12.1-13.5 กรัม ในกระชังบ่อดิน เป็นระยะเวลา 152 วัน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 1 ตัว/m^3 มีการเจริญเติบโตที่สูง โดยมีค่า SGR (1.2±0.1 %) และมีค่าน้ำหนักตัวสุดท้าย 82.4±9.1 กรัม (Ponce-Palafox et al., 2018) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบการเพาะเลี้ยง (ถังไฟเบอร์หรือบ่อดิน) การจัดการ และช่วงอายุของกุ้งก้ามกรามมีผลต่ออัตราการเจริญเติบโต นอกจากนี้พบว่าอัตราการรอดชีวิตของกุ้งก้ามกรามที่เพาะเลี้ยงในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง ในห้องเลี้ยงเชิงกว้างและห้องเลี้ยงเชิงลึกมีค่าอัตราการรอด 84-88% ซึ่งไม่แตกต่างกัน ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเพศผู้ล้วนในถังไฟเบอร์มีอัตรารอด 90.0% การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 12.1-13.5 กรัม ในกระชังบ่อดิน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 1 ตัว/m^3 มีอัตราการรอดชีวิต (100±2.1 %) สูงที่สุด เมื่อเทียบกับการเลี้ยงที่ความหนาแน่นอื่น ๆ (Ponce-Palafox et al., 2018) เช่นเดียวกับรายงานการศึกษาของ Negrini และคณะ (2017) ทำการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามระยะ Juvenile (น้ำหนัก 0.315±0.06 กรัม) ในแทงค์ทดลอง (experiment tank) ด้วยระบบ Biofloc ที่ความหนาแน่น 50 ตัว/m^2, 100 ตัว/m^2, 150 ตัว/m^2, 200 ตัว/m^2 และ 250 ตัว/m^2 เป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่ากุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่น 50 ตัว/m^2 มีอัตราการรอดชีวิต (73±6%) ที่สูงที่สุด เมื่อเทียบกับกุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่นอื่น ๆ ซึ่งให้ผลการศึกษาสวนทางกับการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในบ่อดินหรือการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่มีพื้นที่ต่อตัวไม่เหมาะสมหรือมีความหนาแน่นสูง จากรายงานการศึกษาของ Baysa และ Whangchai (2007) โดยเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 5 กรัม ในกระชังบ่อดินที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 104 วัน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่นต่ำมีอัตราการรอดชีวิต (34.27%) สูงกว่ากุ้งที่ถูกเลี้ยงที่ความหนาแน่นสูง เช่นเดียวกับการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในร่องสวนมะพร้าวเป็นระยะเวลา 8 เดือน พบว่าการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่ความหนาแน่นต่ำ (5,000 ตัว/ไร่) มีอัตราการรอดชีวิต (69.44 %) สูงที่สุด ในขณะที่อัตราความหนาแน่นอื่น ๆ มีอัตราการรอดชีวิต (28.21-54.52 %) (Ranjeet et al., 2011) ซึ่งจะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของการเลี้ยงหรือพื้นที่ต่อตัวที่เหมาะสมมีผลต่ออัตราการรอดชีวิต และการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้งหรือถังไฟเบอร์ มีอัตราการรอดชีวิตที่สูงกว่าการเลี้ยงในบ่อดิน จากผลการศึกษาการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามในระบบห้องเลี้ยงเชิงกว้างและระบบห้องเลี้ยงเชิงลึกนั้นให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อทำการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่มีขนาดเริ่มต้น 40-50 กรัม ในระบบห้องเลี้ยงเชิงกว้างจะสามารถเลี้ยงกุ้งให้มีน้ำหนักสุดท้าย 149.47±7.92 กรัม ในระยะเวลา 9 เดือน และในระบบห้องเลี้ยงเชิงลึกจะสามารถเลี้ยงกุ้งให้มีน้ำหนักสุดท้าย 177.74±10.45 กรัม

ในระยะเวลา 10 เดือน นั้นแสดงให้เห็นว่าห้องเลี้ยงที่มีขนาด 70 ลิตร และ 120 ลิตร เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามขนาด 40-50 กรัม จนถึงขนาดไม่เกิน 150 กรัม และ 178 กรัม ตามลำดับ

ในการศึกษาการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant ที่มีห้องเลี้ยงเชิงกว้าง 144 ห้อง (unit) และห้องเลี้ยงเชิงลึก 96 unit เลี้ยงด้วยระบบน้ำแบบหมุนเวียนแบบปิด เป็นระยะเวลา 12 เดือน ซึ่งในการเลี้ยงกุ้งคอนโดแบ่งชุดกรองน้ำเป็น 3 ชุด ได้แก่ ชุด condo A-B, ชุด condo C-D และชุด condo E-F ซึ่งในแต่ละชุดประกอบด้วยห้องเลี้ยงเชิงกว้าง 48 unit และห้องเลี้ยงเชิงลึก 32 unit เพื่อให้ระบบกรองยังคงประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเพื่อน้ำมาใช้หมุนเวียนในระบบการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามคอนโดได้ ในตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ได้ทำการวัดอุณหภูมิอากาศมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 29.77-29.8 °C คุณภาพน้ำในคอนโดกุ้งในแต่ละชุดการเลี้ยงพบว่าค่าคุณภาพน้ำไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งอุณหภูมิน้ำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 27.95-27.99 °C ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (DO) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.45-6.56 mg/L ค่าพีเอชในน้ำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.44-7.49 ค่าแอมโมเนียมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.24 mg/L ค่าการนำไฟฟ้า (EC) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3217.35-3257.23 ms/cm ค่าความกระด้าง (Alkalinity) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 111.04-111.25mg/L ค่าแมกนีเซียมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 783.33-787.5 mg/L และค่าแคลเซียมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 391.67-391.67 mg/L ซึ่งค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงค่าของน้ำที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม (ณัฐพงค์, 2562) ชี้ให้เห็นว่าการใช้ระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิด ด้วยระบบกรองที่ 2 ที่ถูกใช้ในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งสามารถคงคุณสมบัติของค่าน้ำที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามได้ ซึ่งสอดคล้องกับการอนุบาลลูกกุ้งก้ามกรามด้วยระบบ RAS ในบ่อดิน และการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม โดยใช้ Biofloc technology ในระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) พบว่าคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเพาะเลี้ยงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) และไม่มีผลเสียต่อการเจริญเติบโต และอัตราการรอดของกุ้ง (Tapparangsee et al., 2013; Negrini et al., 2017)

การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant ต้องอาศัยการบูรณาการเทคโนโลยีและศาสตร์ด้านต่าง ๆ ได้แก่ เทคโนโลยีด้านวิศวกรรมในการพัฒนาระบบการเลี้ยง ดังนั้นจึงได้นำเทคโนโลยีมาเข้ามา ด้วยการติดตั้งกล้องวิดีโอในห้องเลี้ยงของกุ้งก้ามกราม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสามารถสังเกตพฤติกรรมของกุ้งก้ามกรามได้ตลอดเวลาด้วยการดูผ่านแอพลิเคชั่นบนจอมือถือ ซึ่งจะเป็นการยกระดับการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามให้เป็น Smart farming โดยมีการทดสอบการใช้กล้องวิดีโอแบบไม่มีอินฟาเรทเปรียบเทียบกับกล้องวิดีโอแบบมีอินฟาเรท ในการสังเกตพฤติกรรมของกุ้งตลอด 24 ชั่วโมง พบว่ากล้องวิดีโอที่ใช้ควรเป็นกล้องแบบอินฟาเรท เพื่อที่สามารถสังเกตพฤติกรรมของกุ้งก้ามกร้ามได้ทั้งในช่วงกลางวันและกลางคืน อีกทั้งระยะความสูงของกล้องมีผลต่อการมองเห็นกุ้งก้ามกรามในมุมมองที่กว้างขึ้น (widespread) ซึ่งระยะดังกล่าวขึ้นอยู่กับความสูงของห้องเลี้ยงด้วย

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติของเนื้อกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในคอนโด

จากผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง (คอนโด) ที่มีระบบน้ำหมุนเวียน เป็นระยะเวลา 7 เดือน พบว่าค่า crude protein, crude lipid, moisture และ ash ในตัว (whole body) และในเนื้อ (meat) ของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโดและกุ้งก้ามกรามจากบ่อดินไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการศึกษาของ จริยา และ สุรินทร, 2556 ทำการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในระบบ CAS (ระบบถ่ายเทน้ำจากภายนอก) และระบบ RAS

ซึ่งเป็นระบบปิดด้วยระบบหมุนเวียนน้ำจากระบบพื้นที่ชุ่มน้ำแบบประดิษฐ์ พบว่าค่าองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ crude protein, crude lipid, moisture และ ash ในตัวปลาที่ถูกเลี้ยงด้วยทั้งสองระบบ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่อย่างไรก็ในการศึกษาของ บุญล้ำ และเกศินี (2557) ที่ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตปลากดคลังระยะรุ่นโดยใช้น้ำหมุนเวียนในระบบโรงเรือนปิด พบว่าค่า crude protein และ crude lipid ของเนื้อปลาที่เลี้ยงในบ่อดินมีค่าสูงกว่าปลาที่เลี้ยงในระบบปิด ($P<0.05$) จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งด้วยระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) ไม่ส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของตัวกุ้งก้ามกราม

จากผลการศึกษาคุณสมบัติของเนื้อกุ้งในด้าน สี (Color), การสูญเสียสภาพหลังทำให้สุก (Cooking loss) และด้านเนื้อสัมผัส (Texture) โดยเปรียบเทียบระหว่างกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโดและกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในบ่อดิน พบว่าลักษณะของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโดเป็นระยะเวลา 7 เดือน ลำตัวกุ้งจะมีสีขาวซีดเมื่อเปรียบเทียบกับกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในบ่อดินที่มีสีเข้มกว่า และเมื่อทำการวัดค่าสี (color) ของกุ้งก้ามกรามด้วยเครื่องวัดสี พบว่ากุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโดที่เป็นกุ้งสด (raw) สีมีขาวอมเขียว และกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในบ่อดินที่เป็นกุ้งสดมีสีขาวอมเขียวน้ำเงิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการที่กุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในคอนโดและกุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในบ่อดินมีค่าสีที่แตกต่างกัน น่าจะเกิดจากสภาพแวดล้อมการเลี้ยงกุ้งและอาหารตามธรรมชาติที่กุ้งก้ามกรามได้รับ (ชลอ ลิ้มสุวรรณ และคณะ, 2547) นอกจากนี้เมื่อทำการวัดค่าสีของกุ้งก้ามกรามที่ถูกทำให้สุก พบว่ากุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโดที่ไม่แกะเปลือกมีสีส้มอ่อนออกขาว และกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในบ่อดินที่ยังไม่ถูกแกะเปลือกมีสีส้มเข้มกว่ากุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโด ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากุ้งก้ามกรามที่ยังไม่ถูกแกะเปลือกมีค่าสีต่ำกว่ากุ้งก้ามกรามที่แกะถูกเปลือก เนื่องจากที่เนื้อกุ้งมีแอสตาแซนธิน ซึ่งเป็นรงควัตถุในแคโรทีนอยด์ที่ให้สีแดง ส้ม เหลือง เมื่อกุ้งถูกให้ความร้อนโปรตีนจะเสียสภาพ ทำให้สารแอสตาแซนทินหลุดออกมาจากโอโวทร์ดิน จึงเห็นกุ้งเป็นสีแดงส้ม (Martínez-Alvarez et al., 2009; Niamnuy et al., 2007) และเมื่อทำการวัดค่าการสูญเสียหลังทำให้สุก (cooking loss) ของกุ้งก้ามกราม พบว่ากุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโดมีค่าการสูญเสียหลังทำให้สุก เท่ากับ 2.84 ± 0.96 % ซึ่งน้อยกว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในบ่อดิน มีค่าการสูญเสียหลังทำให้สุก เท่ากับ 4.87 ± 3.51 % และผลการศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture) ของกุ้งก้ามกราม โดยทำการทดสอบค่าแรงเฉือนเป็นการจำลองการกัดของมนุษย์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส พบว่ากุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในคอนโด ก่อนการทำให้สุกและหลังการทำให้สุก มีค่าแรงเฉือนน้อยกว่าของกุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในบ่อดิน ทั้งในส่วนที่ยังไม่ได้ทำให้สุกและหลังการทำให้สุก ซึ่งค่าแรงเฉือนของกุ้งจะขึ้นอยู่กับการเคลื่อนไหวกล้ามเนื้อของกุ้งในระหว่างการเลี้ยง และความสดของเนื้อกุ้ง ยิ่งค่าแรงเฉือนมาก กุ้งสุกจะยิ่งมีลักษณะเนื้อแน่น ไม่เละ ส่วนกุ้งสดจะสีลักษณะเนื้อเด้ง ไม่เละหรือนิ่มเกินไป (Xu et al., 2015) แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาของ บุญล้ำ และเกศินี (2557) ที่ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตปลากดคลังระยะรุ่นโดยใช้น้ำหมุนเวียนในระบบโรงเรือนปิด ไม่พบความแตกต่างของค่าความสว่างของสีเนื้อของปลากดคลังที่เลี้ยงด้วยทั้ง 2 ระบบ จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการที่กุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง หรือในคอนโด ด้วยระบบหมุนเวียนน้ำ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีในตัวกุ้ง แต่มีผลต่อคุณสมบัติของเนื้อกุ้งในด้าน สี, การสูญเสียสภาพหลังทำให้สุก และด้านเนื้อสัมผัส ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจในการเป็นโจทย์วิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาสูตรอาหารให้เหมาะสมกับการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระบบเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้งต่อไป

4. การทดสอบระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในสภาวะต่าง ๆ

จากผลการทดสอบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้งเปรียบเทียบกับการเลี้ยงกุ้งตะกร้า พบว่ากุ้งก้ามกรามที่ถูกเลี้ยงในตะกร้าเป็นระยะเวลา 9 วัน มี weight gain เท่ากับ 3.04±1.85 กรัม มีค่า ADG เท่ากับ 1.06±1.27 กรัมต่อวัน ค่า SGR เท่ากับ 1.93±2.42 % มีค่าการกินได้เท่ากับ 0.58±0.35 กรัมต่อวันและค่า FCR เท่ากับ 1.13±0.94 ในขณะที่กุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงนะบบเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง (คอนโด) เป็นระยะเวลา 31 วัน มีค่า weight gain เท่ากับ 8.99±5.36 กรัม มีค่า ADG เท่ากับ 0.38±0.11 กรัมต่อวัน ค่า SGR เท่ากับ 0.64±0.21% มีค่าการกินได้เท่ากับ 0.56±0.16 กรัมต่อวัน และค่า FCR เท่ากับ 1.56±0.76 จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในตะกร้ามีการเจริญเติบโตสูงกว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบคอนโด ซึ่งค่า ADG ของกุ้งตะกร้าสูงกว่าค่า ADG ของกุ้งคอนโด 2.79 เท่า ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาด 12.1-13.5 กรัม ในกระชังบ่อดิน เป็นระยะเวลา 152 วัน พบว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 1 ตัว/m^3 มีการเจริญเติบโตที่สูง โดยมีค่า SGR (1.2±0.1 %) และมีค่าน้ำหนักตัวสุดท้าย 82.4±9.1 กรัม ที่สุดเมื่อเทียบกับการเลี้ยงกุ้งที่ความหนาแน่นอื่น ๆ (Ponce-Palafox et al., 2018) นอกจากนี้ได้มีรายงานการศึกษาของ Banu และคณะ (2016) พบว่าการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเพศผู้ล้วนในถังไฟเบอร์ (fiberglass tank) เป็นเวลา 80 วัน มีผลทำให้กุ้งก้ามกรามมีการเจริญเติบโตสูง โดยมีค่า SGR เท่ากับ 1.24±0.03 กรัมต่อวัน และมีค่าน้ำหนักตัวสุดท้าย 25.83±1.33 กรัม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบการเพาะเลี้ยง (ถังไฟเบอร์หรือบ่อดิน) การจัดการ และช่วงอายุของกุ้งก้ามกรามมีผลต่ออัตราการเจริญเติบโต แต่อย่างไรก็ตามการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบตะกร้ามีอัตรารอดที่ต่ำเมื่อเทียบกับกุ้งคอนโด ซึ่งสามารถเลี้ยงได้เพียง 9 วันเท่านั้น เนื่องจากความแปรปรวนของสภาพอากาศ (ช่วงพายุเข้า) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามคอนโดสามารถลดความเสี่ยงต่อความเสียหายเมื่อสภาวะอากาศแปรปรวนได้ ซึ่งสอดคล้องกับ การเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในบ่อดินหรือการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามที่มีพื้นที่ต่อตัวไม่เหมาะสมหรือมีความหนาแน่นสูง กุ้งก้ามกรามจะมีอัตรารอดระหว่าง 28.21-69.44 % (Baysa and Whangchai, 2007; Ranjeet et al., 2011) ในขณะที่การเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้งหรือถังไฟเบอร์ มีอัตราการรอดชีวิตที่สูง คือ 73-100% (Ranjeet et al., 2011; Ponce-Palafox et al., 2018; Negrini et al., 2017)

ในตลอดระยะเวลาการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ได้ทำการวัดอุณหภูมิอากาศและคุณภาพน้ำในระหว่างการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามได้แก่ อุณหภูมิน้ำ ค่าการละลายออกซิเจนในน้ำ (Dissolved oxygen; DO), ค่าพีเอช (pH) ซึ่งอุณหภูมิอากาศมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 31.54 - 34.84 °C คุณภาพน้ำในคอนโดกุ้งและในบ่อดินไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งอุณหภูมิน้ำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28.52-32.44 °C ค่า DO มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.15-5.81 mg/L และค่า pH ในน้ำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.36- 8.56 ซึ่งค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงค่าของน้ำที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม (ณัฐพงศ์, 2562) ซึ่งคุณภาพน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้ง มีการใช้ระบบ RAS ในการบำบัดน้ำจากการเพาะเลี้ยงซึ่งระบบ RAS สามารถคงคุณสมบัติของค่าน้ำที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามได้ ซึ่งสอดคล้องการอนุบาลลูกกุ้งก้ามกรามด้วยระบบ RAS ในบ่อดิน และการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามโดยใช้ Biofloc technology ในระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) พบว่าคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเพาะเลี้ยงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) และไม่มีผลเสียต่อการเจริญเติบโต และอัตราการรอดของกุ้ง (Tapparangsee et al., 2013; Negrini et al., 2017) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อสภาพอากาศ หรือฤดูกาลมีการเปลี่ยนแปลงแบบเฉียบพลัน (พายุเข้า) จะมีผลกระทบอย่างมากต่อการเลี้ยงกุ้งตะกร้าหรือการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามบ่อดิน คือมีผลทำให้กุ้งมีอัตราการตายสูง

5. การศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหารของกุ้งก้ามกราม

การศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหารต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม

การพัฒนาเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant ต้องอาศัยการบูรณาการเทคโนโลยีและศาสตร์ด้านต่าง ๆ ในเรื่องของการให้อาหาร คุณภาพอาหาร (Feed and feeding) ถือเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามที่สำคัญ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหารต่อการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกราม โดยการเปรียบเทียบระหว่างอาหารทดลอง 2 ชนิด คือ อาหารที่ไม่มีการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลือง (High fishmeal diet; FD) และอาหารที่มีการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลือง (Plant protein base diet; PD) ไปเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเป็นระยะเวลา 90 วัน พบว่าการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามทั้ง 2 กลุ่มการทดลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ซึ่งกุ้งก้ามกรามที่ได้รับอาหาร FD และอาหาร PD มีค่าน้ำหนักตัวสุดท้ายเท่ากับ 83.87±11.81 และ 84.85±12.1 กรัม ค่า weight gain เท่ากับ 30.90±11.41 และ 32.81±10.98 กรัม ค่า ADG เท่ากับ 0.34±0.13 และ 0.36±0.12 กรัมต่อวัน ค่า FCR เท่ากับ 2.37±0.25 และ 2.42±0.28 ค่า SGR เท่ากับ 0.49±0.14 และ 0.52±0.13 % ค่าการกินได้เท่ากับ 0.80±0.25 และ 0.88±0.30 กรัมต่อวัน ชี้ให้เห็นว่าการใช้แหล่งโปรตีนจากพืชในระดับที่เหมาะสมไม่ส่งผลเสียหรือมีการเจริญเติบโตดีเทียบเท่ากับอาหารที่ใช้ปลาป่นเป็นแหล่งโปรตีน แสดงให้เห็นว่าการใช้แหล่งโปรตีนจากพืชสามารถใช้ทดแทนปลาป่นในอาหารกุ้งได้ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับรายงานการศึกษาการใช้ soybean meal (SBM) ในอาหารกุ้ง Kuruma ที่ระดับต่าง ๆ พบว่าการใช้ SBM ที่ระดับต่ำกว่า 25.1% ในอาหาร ไม่ส่งผลเสียต่อ final body weight (FBW), SGR และ feed intake (Bulbul et al., 2015) การศึกษาการใช้ SBM ที่ระดับต่าง ๆ ในอาหารของกุ้ง *L. vannamei* พบว่าที่ระดับ 0%, 2.5%, 5% of SBM มีค่า FBW, weight gain (WG) ของกุ้งสูง และมีค่า FCR ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับกุ้งในกลุ่มที่มีการใช้ SBM ที่ระดับ 7.5% และ 10% ในอาหารอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) (Chen et al., 2017) เช่นเดียวกับการศึกษาในกุ้ง *P. monodon* พบว่าการใช้ SBM ที่ระดับ 0%, 8.75%, 17.5% ในอาหาร มีค่า WG, FI, Protein efficiency ratio (PER) ของกุ้งสูง และมีค่า FCR ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับกุ้งในกลุ่มที่ได้รับอาหารที่มีการใช้ SBM ที่ระดับ 26.5% และ 35% อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) (Paripatananont et al., 2001) แต่อย่างไรก็ตามจากรายงานการใช้ Corn gluten meal (CGM) ที่ระดับต่าง ๆ ในอาหารของกุ้ง *L. vannamei* พบว่ากุ้งในกลุ่มที่ไม่มีการเสริม CGM (0% of CGM) มีการเจริญเติบโตสูงที่สุด (FBW และ SGR) ของกุ้งสูงที่สุด รองลงมาคือ 8.64%, 17.28%, 25.92%, และ 34.56% of CGM ตามลำดับ ($P>0.05$) ซึ่งการเจริญเติบโต (FBW, SGR) ของกุ้ง จะลดลงเมื่อมีระดับ CGM ในอาหารเพิ่มขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่า CGM ไม่สามารถทดแทนปลาป่นในอาหารของกุ้ง *L. vannamei* ได้ (Molina-Poveda et al., 2015) นอกจากนี้มีรายงานการศึกษาการใช้ Soy bean meal (SBM) และ peanut meal ในอาหารของกุ้ง *L. vannamei* ระยะ larvae และระยะ juvenile พบว่ากุ้ง *L. vannamei* ในระยะ juvenile (~ 3.35 g) มีความสามารถในการใช้โปรตีนจากพืชที่มีการทดแทนปลาป่นในอาหารสูงกว่ากุ้งในระยะ larvae (Liu et al., 2012; Yue et al., 2012) และจากผลการศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหารของกุ้งก้ามกราม ทั้ง 2 กลุ่มการทดลอง พบว่ากุ้งก้ามกรามมีค่าอัตราการรอดชีวิต (60.57 และ 64.39 %) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการศึกษาการใช้โปรตีนจากพืช ได้แก่ Soy bean meal (SBM), Corn gluten meal (CGM), SBM + Wheat gluten (WhG) และ SBM + peanut meal ในอาหารของกุ้ง ที่ทุกระดับของการทดแทนปลาป่น ไม่ส่งผลเสียต่อ survival rate ของกุ้ง (Bulbul et al., 2015; Chen et al., 2017; Paripatananont et al., 2001; Molina-Poveda et al., 2015; Molina-

Poveda et al., 2004; Yue et al., 2012) ยกเว้นการทดแทนปลาป่นด้วย SBM + peanut meal ในอาหารของกุ้งระยะ juvenile จะมีค่า PER และ survival rate จะลดลงเมื่อมีระดับ SBM+ peanut meal ในอาหารเพิ่มขึ้น (Liu et al., 2012)

ในระหว่างการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในการศึกษานี้มีการใช้ระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) และในตลอดระยะเวลาการเลี้ยง 90 วัน มีการวัดอุณหภูมิอากาศและคุณภาพน้ำในระบบการเลี้ยง ได้แก่ อุณหภูมิน้ำ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ ค่า Alkalinity ค่า pH ค่า Magnesium ที่ละลายในน้ำ ค่า Calcium ที่ละลายในน้ำ และแอมโมเนียที่ละลายน้ำ อยู่ในระดับ 27.30±0.53 °C, 27.10±0.38 °C, 4.40±0.24 mg/L, 105.30±11.45 mg/L, 8.30±0.11, 393.50±24.63 mg/L, 196.80±17.72 mg/L, และ 0.20±0.04 mg/L ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงค่าของน้ำที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม (ณัฐพงค์, 2562) ซึ่งคุณภาพน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม มีการใช้ระบบ RAS ในการบำบัดน้ำจากการเพาะเลี้ยงซึ่งระบบ RAS สามารถคงคุณสมบัติของค่าน้ำที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามได้ ซึ่งสอดคล้องการอนุบาลลูกกุ้งก้ามกรามด้วยระบบ RAS ในบ่อดิน และการเลี้ยงกุ้งก้ามกราม โดยใช้ Biofloc technology ในระบบน้ำหมุนเวียน (RAS) พบว่าคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการเพาะเลี้ยงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) และไม่มีผลเสียต่อการเจริญเติบโต และอัตราการรอดของกุ้ง (Tapparangsee et al., 2013; Negrini et al., 2017)

การศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหารต่อองค์ประกอบทางเคมีในตัว (whole body) ของกุ้งก้ามกราม

การศึกษาการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลืองในอาหารต่อองค์ประกอบทางเคมีในตัว (whole body) ของกุ้งก้ามกราม โดยการเปรียบเทียบระหว่างอาหารทดลอง 2 ชนิด คือ อาหารที่ไม่มีการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลือง (High fishmeal diet; FD) และอาหารที่มีการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลือง (Plant protein base diet; PD) ไปเลี้ยงกุ้งก้ามกรามเป็นระยะเวลา 90 วัน พบว่าองค์ประกอบเคมีในตัว (whole body) ของกุ้งก้ามกราม ได้แก่ moisture, crude protein, crude lipid และ ash ของกุ้งก้ามกรามทั้ง 2 กลุ่มการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) แสดงให้เห็นว่าการใช้โปรตีนจากพืช (กากถั่งเหลือง) ในการทดแทนปลาป่นในอาหารของกุ้งก้ามกรามไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีในตัวของกุ้งก้ามกราม ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Du และคณะ (2003) ทำการทดแทนปลาป่นด้วย SBM ที่ระดับต่าง ๆ (0%, 21%, 42%, 62.5% และ 84.0% of SBM) ในอาหารของกุ้งก้ามกราม (*M. rosenbergii*) พบว่าค่าองค์ประกอบทางเคมี Crude protein ค่า Crude lipid ค่า moisture และค่า ash ของกุ้งก้ามกรามที่ได้รับอาหารที่การทดแทนปลาป่นด้วย SBM ในทุกระดับ ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) เช่นเดียวกับรายงานการศึกษาการใช้แหล่งโปรตีนจากพืชระหว่าง SBM และ peanut meal ในการทดแทนปลาป่นในอาหารกุ้ง *L. vannamei* พบว่ากุ้งในระยะ larvae (น้ำหนักเริ่มต้น 0.48 ±0.00 g) ในทุกกลุ่มการทดลองมีค่า ash ค่า crude lipid และ crude protein ของตัวกุ้ง ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) (Yue et al., 2012) แต่อย่างไรก็ตามการใช้แหล่งโปรตีนจากพืช ได้แก่ SBM ในอาหาร ของกุ้ง Kuruma และกุ้ง *P. monodon* มีค่าองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ค่า dry matter, ash และ crude protein ของตัวกุ้งที่ได้รับอาหารทดลองไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) แต่มี crude lipid ในตัวกุ้งลดลงเมื่อมีระดับของ SBM ในอาหารเพิ่มขึ้น (Bulbul et al., 2015; Paripatananont et al., 2001) นอกจากนี้พบว่าในกุ้ง *L. vannamei* เมื่อมีระดับของ SBM ในอาหารที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า crude lipid และ ค่า crude protein ในตัวกุ้งจะลดลง (Chen et al., 2017)

เช่นเดียวกับการศึกษาในกุ้ง *L. vannamei* ระยะ juvenile ที่ได้รับอาหารที่มีการทดแทนปลาป่นด้วย SBM + peanut meal ที่ระดับ 20%, 27%, 34% และ 41% ในอาหาร มีค่า crude protein (17.3-18%) และ ash (4.05-4.35%) ของตัวกุ้ง ไม่แตกต่างกัน (P>0.05) และจะมีค่าต่ำที่สุดในกลุ่มของกุ้งที่ได้รับอาหารที่มีการทดแทนปลาป่นที่ระดับ 48%, 55% of SBM+ peanut meal นอกจากนี้ที่ทุกระดับการทดแทนปลาป่นด้วย SBM+ peanut meal ในอาหาร มีค่า crude lipid (1.28-1.36%) ของตัวกุ้ง ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05) (Liu et al., 2012)

กิจกรรมที่ 2: การพัฒนา Smart Farming เพื่อประเมินและจัดการสุขภาพสัตว์

การวิจัยนี้ได้พัฒนาไบโอเซนเซอร์เพื่อประโยชน์ในการจัดการสุขภาพสัตว์และปศุสัตว์ โดยได้วิจัยและพัฒนาอุปกรณ์เพื่อประเมินสภาวะของสัตว์ด้วยการตรวจค่าทางสรีรวิทยา โดยใช้โคนมเป็น Model ประกอบด้วย

1. วิจัยและพัฒนาระบบอุปกรณ์ต้นแบบ ในการติดตามพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของสัตว์ว่ามีการเคลื่อนที่มากหรือน้อยเกินไปเพื่อใช้ติดตามหาสัตว์ที่มีความผิดปกติ เช่น สัตว์ป่วย (การเคลื่อนที่เฉลี่ยน้อยกว่า 39.16 เมตร ในช่วงเวลา 20 นาทีหรือ 1.958 เมตรต่อนาที) เพื่อให้การรักษาได้อย่างทันท่วงที หรือเพื่อการจัดการบางอย่างเช่นการผสมเทียม จากการที่สัตว์ที่มีการเคลื่อนที่มากกว่าปกติ (การเคลื่อนที่เฉลี่ยมากกว่า 39.16 เมตร ในช่วงเวลา 20 นาทีหรือ 1.958 เมตรต่อนาที) เมื่อเข้าสู่วงรอบการเป็นสัด (Estrus cycle) ได้อย่างทันเวลาเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสัตว์และลดการใช้แรงงานคนในฟาร์ม โดยเป็นการศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้นแบบในการใช้เพื่อติดตามหาสัตว์ที่มีความผิดปกติหรือป่วย พร้อมระบบประมวลผลข้อมูลและรายงานผลแบบแจ้งเตือน โดยสามารถดูรายงานผลข้อมูลได้ผ่านทางระบบ internet โดยใช้ computer หรือ โทรศัพท์มือถือ

2. วิจัยและพัฒนาไบโอเซนเซอร์เพื่อประโยชน์ในการจัดการสุขภาพสัตว์และปศุสัตว์โดยพัฒนาระบบอุปกรณ์ในการตรวจวัดอุณภูมิร่างกายของสัตว์จากระยะไกล เพื่อให้ทราบสภาวะร่างกายของสัตว์ที่ผิดปกติได้โดยไม่ต้องจับบังคับหรือสัมผัสที่ตัวสัตว์ (ซึ่งปกติจะกระทำได้ลำบากเพราะต้องจับบังคับสัตว์และใช้เวลามากในการวัด) เพื่อนำไปสู่การดูแลและจัดการสุขภาพสัตว์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ระบบอุปกรณ์ในการตรวจวัดอุณภูมิร่างกายของสัตว์จากระยะไกล พร้อมระบบประมวลผลข้อมูลและรายงานผลแบบแจ้งเตือน โดยสามารถดูรายงานผลข้อมูลได้ผ่านทางระบบ internet จากเครื่อง computer หรือ จากโทรศัพท์มือถือ

5.2 สรุปผลการวิจัย

กิจกรรมที่ 1: ระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบอัจฉริยะ

1. ในระบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้งที่มีห้องเลี้ยงขนาด 10 - 12 ลิตร เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาดเริ่มต้น 2-18 กรัม และเลี้ยงได้น้ำหนักตัวสุดท้ายประมาณ 30 กรัม

2. ในระบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้งที่มีห้องเลี้ยงขนาด 33 - 67 ลิตร เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาดเริ่มต้น 30-40 กรัม และเลี้ยงได้น้ำหนักตัวสุดท้ายประมาณ 100 กรัม

3. ในระบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้งที่มีห้องเลี้ยงขนาด 50 ลิตร เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาดเริ่มต้น 30-50 กรัม และเลี้ยงได้น้ำหนักตัวสุดท้ายประมาณ 120 กรัม

4. ในระบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้งที่มีห้องเลี้ยงเชิงกว้าง ขนาด 70 ลิตร เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาดเริ่มต้น 40-50 กรัม และเลี้ยงได้น้ำหนักตัวสุดท้ายประมาณ 150 กรัม

5. ในระบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้งที่มีห้องเลี้ยงเชิงกว้าง ขนาด 120 ลิตร เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามขนาดเริ่มต้น 40-50 กรัม และเลี้ยงได้น้ำหนักตัวสุดท้ายประมาณ 178 กรัม

6. กุ้งก้ามกรามเพศผู้มีอัตราการเจริญเติบโต ได้แก่ ค่า weight gain, ADG, SGR และ RWG สูงกว่า และค่า FCR ต่ำกว่ากุ้งก้ามกรามเพศเมีย ซึ่งชี้ให้เห็นว่าในการพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในห้องเลี้ยงที่เหมาะสมของระบบการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้ง ควรจะเลี้ยงกุ้งเพศผู้ล้วนเนื่องจากกุ้งก้ามกรามเพศผู้มีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่าเพศเมีย

7. ในการพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงแนวตั้ง พบว่ากุ้งมีอัตราการรอดชีวิต 61.17-100 %

8. การนำกุ้งก้ามกรามตก size มาเลี้ยงในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้งที่มีขนาดห้องเลี้ยง 67 ลิตร สามารถเพิ่มการเจริญเติบโตของกุ้งก้ามกรามได้และเป็นการเพิ่มมูลค่าของกุ้งก้ามกรามตก size ได้ด้วย

9. การพัฒนาระบบน้ำแบบหมุนเวียน และระบบการบำบัดน้ำเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่สำหรับการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant พบว่าระบบกรองที่ 2 ซึ่งภายในระบบประกอบด้วย ถ่านกัมมันต์, สาร Microban, ไส้กรองดิส (Disc filter) และ ไส้กรองอะตอมไมส์ (Atomize filter) สามารถลดปริมาณแอมโมเนีย ค่าไนไตรต์ ค่าไนเตรต และค่า COD ให้มีค่าต่ำกว่าค่าคุณภาพน้ำที่ผ่านการกรองด้วยระบบที่ 1 อีกทั้งค่าคุณภาพน้ำที่ผ่านการกรองมีค่าอยู่ในช่วงค่าของน้ำที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกราม ชี้ให้เห็นว่าการใช้ระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดในการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งสามารถคงคุณสมบัติของค่าน้ำที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามได้

10. การพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบแนวตั้งในระดับ Pilot plant ด้วยการนำเทคโนโลยีการติดตั้งกล้องวิดีโอในห้องเลี้ยงของกุ้งก้ามกราม เพื่อสามารถสังเกตพฤติกรรมของกุ้งก้ามกรามได้ตลอดเวลาด้วยการดูผ่านแอพลิเคชั่นบนจอมือถือ ซึ่งจะเป็นการยกระดับการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามให้เป็น Smart farming พบว่ากล้องวิดีโอที่ใช้ควรเป็นกล้องแบบอินฟราเรท เพื่อที่สามารถสังเกตพฤติกรรมของกุ้งก้ามกร้ามได้ทั้งในช่วงกลางวันและกลางคืน อีกทั้งระยะความสูงของกล้องมีผลต่อการมองเห็นกุ้งก้ามกรามในมุมมองที่กว้างขึ้น (widespread) ซึ่งระยะดังกล่าวขึ้นอยู่กับความสูงของห้องเลี้ยงด้วย

11. การที่กุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบการเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้ง หรือในคอนโด ด้วยระบบหมุนเวียนน้ำ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีในตัวกุ้ง แต่มีผลต่อคุณสมบัติของเนื้อกุ้งในด้านสี, การสูญเสียสภาพหลังทำให้สุก และด้านเนื้อสัมผัส ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจในการเป็นโจทย์วิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาสูตรอาหารให้เหมาะสมกับการเพาะเลี้ยงกุ้งก้ามกรามในระบบเพาะเลี้ยงแบบแนวตั้งต่อไป

12. กุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในตะกร้ามีการเจริญเติบโตสูงกว่ากุ้งก้ามกรามที่เลี้ยงในระบบคอนโด ซึ่งค่า ADG ของกุ้งตะกร้าสูงกว่าค่า ADG ของกุ้งคอนโด 2.79 เท่า แต่อย่างไรก็ตามการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามแบบตะกร้ามีอัตรารอดที่ต่ำเมื่อเทียบกับกุ้งคอนโด ซึ่งสามารถเลี้ยงได้เพียง 9 วันเท่านั้น เนื่องจากความแปรปรวนของสภาพอากาศ (ช่วงพายุเข้า) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเลี้ยงกุ้งก้ามกรามคอนโดสามารถลดความเสี่ยงต่อความเสียหายเมื่อสภาวะอากาศแปรปรวนได้

13. กุ้งก้ามกรามที่ได้กินอาหารที่ใช้ปลาป่น (High fishmeal diet; FD) และกุ้งที่กินอาหารที่มีการทดแทนปลาป่นด้วยกากถั่วเหลือง (Plant-Based protein diet; PD) เป็นระยะเวลา 90 วัน มีการเจริญเติบโตและอัตราการรอดไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ชี้ให้เห็นว่าการใช้แหล่งโปรตีนจากพืชในระดับที่เหมาะสมไม่ส่งผลเสียหรือมีการเจริญเติบโตดีเทียบเท่ากับอาหารที่ใช้ปลาป่นเป็นแหล่งโปรตีน แสดงให้เห็นว่าการใช้แหล่งโปรตีนจากพืชสามารถใช้ทดแทนปลาป่นในอาหารกุ้งได้

14. องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ moisture, crude protein, crude lipid และ ash ในตัว (whole body) ของกุ้งก้ามกรามที่กินอาหาร FD และอาหาร PD เป็นระยะเวลา 90 วัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) แสดงให้เห็นว่าการใช้โปรตีนจากพืช (กากถั่งเหลือง) ในการทดแทนปลาป่นในอาหารของกุ้งก้ามกรามไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีในตัวของกุ้งก้ามกราม

กิจกรรมที่ 2: การพัฒนา Smart Farming เพื่อประเมินและจัดการสุขภาพสัตว์

1. การพัฒนาระบบที่ใช้ในการตรวจวัดการเคลื่อนไหวของวัวในฟาร์มวัวนม ทำการเก็บข้อมูลการเคลื่อนไหวของวัวในเซิร์ฟเวอร์และนำมาใช้ในการทำนายสุขภาพและวงรอบการเป็นสัด

2. การพัฒนาการใช้เทอร์โมมิเตอร์ระบบอินฟาร์เรดวัดอุณหภูมิ ทำให้สามารบันทึกค่าอุณหภูมิร่างกายสัตว์แบบ real-time โดยไม่ทำให้สัตว์เครียด

3. ผลงานจากสิ่งประดิษฐ์ที่เกิดจากงานวิจัยนี้ เป็นอุปกรณ์ต้นแบบที่มีประโยชน์ในการใช้จัดการสุขภาพสัตว์และการผลิตปศุสัตว์ แบบ Smart Farm ช่วยลดปัญหาเรื่องการขาดแคลนแรงงานในภาคเกษตรกรรม และยังช่วยยกระดับและเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการด้านการผลิตสัตว์ให้กับเกษตรกร และเพื่อรองรับการเข้าสู่เกษตร 4.0 ของประเทศไทยต่อไปอย่างภาคภูมิ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอกสารอ้างอิง

กิ่งเทียน เรืองตนนอก, สุนทราภรณ์ ลิ่มสกุล, ส่งศรี มหาสวัสดิ์, สมหวัง พิมลบุตร, สุรังสี ทัพพะรังสี และเรือง วิชญ์ ยุ้นพันธ์. 2554. การอนุบาลลูกกุ้งก้ามกรามวัยอ่อนในระบบน้ำหมุนเวียน โดยการบำบัดน้ำทางชีวภาพ. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 12. 606-616.

กลุ่มพัฒนาระบบเฝ้าระวังสุขาภิบาลอาหารและน้ำ สำนักสุขาภิบาลอาหารและน้ำ กรมอนามัย. (2556). “รายงานสถานการณ์สารเคมีปนเปื้อนในอาหาร ปี 2550-2554”. 2556. http://foodsan.anamai.moph.go.th/download/D_surveillance/สถานการณ์สารเคมีปนเปื้อนในอาหาร%2050-54%20บอแรกซ์.pdf

จริยา ยิ้มรัตนบวร และ สุรินทร บุญอนันธนสาร. 2556. ศักยภาพการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สำหรับการเพาะเลี้ยงปลาดุกลูกผสม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ชลฤทัย พิญเดช ประจวบ ฉายบุ เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน และ ฐปน ชื่นบาล.2554. การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตและคุณภาพน้ำในการเลี้ยงปลาบู่ทรายระบบปิด.วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมงปีที่ 5 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม.

ชลอ ลิ้มสุวรรณ, นิติ ชูเชิด, วราห์ เทพาหุดี และปัทมาภรณ์ เหล่าเกียรติโสภณ. 2547. การศึกษาชนิดและปริมาณแพลงก์ตอนคุณภาพน้ำและองค์ประกอบอาหารในกระเพาะอาหารของ กุ้งขาวแวน-นาไม (*Litopenaeus vannamei* Boone, 1931) ที่เลี้ยงด้วยน้ำความเค็มต่ำ. การสัมมนาเผยแพร่ ผลงานวิจัย เรื่องการวิจัยเพื่อแก้ปัญหาอุตสาหกรรมการเลี้ยงกุ้งของประเทศไทย, 28 กันยายน 2547, ณ โรงแรมมิราเคิล แกรนด์กรุงเทพฯ. น. 27-39.

ณรงค์ กิจพาณิชย์. (2529). สุขศาสตร์สัตว์. พิมพลักษณ์: ขอนแก่น มหาวิทยาลัยขอนแก่น. น.303.

ณัฐพงศ์ วรรณพัฒน์ กองวิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด กรมประมง ปี 2562

ธานินทร์ แตงกวารัมย์. (2560, มีนาคม). ไบโอเซนเซอร์. มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2560. https://erp.mju.ac.th/acticleDetail.aspx?qid=659

ธิติมา บุญเจริญ. (2013). แนวโน้มใหม่ของเทคโนโลยีสุขภาพ. SCIENCE AND TECHNOLOGY NAKHON SAWAN RAJABHAT UNIVERSITY JOURNAL, 5(5), 25-32.

นาวาตรี ดร. กฤษฎา แสงเพ็ชรสอง. (2019). แนะนำ Kalman Filter Algorithm. https://www.aimagin.com/downloads/dl/file/id/64/kalman_filter.pdf. (Accessed 1 May 2019.)

บุญล้ำ สิงห์ปลา และ เกศินี เกตุพยัคฆ์. 2557. ประสิทธิภาพการผลิตปลากดคังระยะรุ่นโดยใช้น้ำหมุนเวียนในระบบโรงเรือนปิด. วารสารสัตวศาสตร์แห่งประเทศไทย 1 (2): 46-57.

ปนัดนา อเนกเวียง และ รินา ภัทรมานนท์. (2556). ความก้าวล้ำของเทคโนโลยีไบโอเซนเซอร์: นวัตกรรมสู่โลกอนาคต. วารสารวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2556, (41(2)), 262-280.

ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงน้ำจืดชัยนาท. ชัยนาท. 2553

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2556. ระบบหมุนเวียนน้ำสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด. ปทุมธานี.

สุฤทธิ์ สมบูรณ์ชัย, ประจวบ ฉายบุ, เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน และอานัฐ ตันโช. 2551. การศึกษาวัสดุกรองทางชีวภาพเพื่อใช้ในระบบการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมร่วมกับระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิคส์. วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน.

อัญชลี สำเภา. (2554). ไบโอเซนเซอร์ : การสร้าง การทำงาน และประโยชน์ของไบโอเซนเซอร์. เทคโนโลยีวัสดุ, 2554 (62), 13-18. https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/254_13-18.pdf

CHULALONGKORN UNIVERSITY RESEARCH AND INNOVATION FOR SOCIETY. (2563). อุปกรณ์วัดค่าความเป็นกรด-ด่างในกระเพาะโคชนิดไร้สายเพื่อปศุสัตว์ยุคใหม่. CHULALONGKORN UNIVERSITY RESEARCH AND INNOVATION FOR SOCIETY, 2563. https://www.research.chula.ac.th/th/news/6821/

Alvarez, J. S., Hernández‐Llamas, A., Galindo, J., Fraga, I., García, T., & Villarreal, H. (2007). Substitution of fishmeal with soybean meal in practical diets for juvenile white shrimp *Litopenaeus schmitti* (Pérez‐Farfante & Kensley 1997). Aquaculture research, 38(7), 689-695.

AOAC (1990). Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists, Vol. 1, 14th edn. AOAC, Arlington, VA, USA.

Avillanosa, A. L., Ecube, K. M. A., Española, M. D., Caipang, C. M. A., Palla, H. P., & Becira, J. G. (2019). Effects of stocking density and artificial shelters during the nursery production of giant freshwater prawn, *Macrobrachium rosenbergii* (De Man, 1879) in net cages. Int. J. of Aquatic Science, 10(2), 76-82.

Banrie. (2012). Explaining the production and consumption of fishmeal. Retrived: 24/8/2019. form https://thefishsite.com/articles/production-consumption-of-fishmeal.

Banu, M. R., Christianus, A., Siraj, S. S., Ikhsan, N. F. M., & Rajaee, A. H. (2016). Effects of stocking density on growth performance and survival of three male morphotypes in all-male culture of *Macrobrachium rosenbergii* (De Man). Iranian Journal of Fisheries Sciences, 15(2), 738-750.

Batal, A., Dale, N., & Café, M. (2005). Nutrient composition of peanut meal. Journal of applied poultry research, 14(2), 254-257.

Baysa, R. P., & Whangchai, N. (2007). Effect of culture season and stocking density on growth and production of giant freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii* de Man) raised in northern Thailand. Mj. Int. J. Sci. Tech, 1(02), 216-221.

Bhavani, M., Hareesh, K., Suneetha, Y., Srinivasulu Reddy, M. (2014). The effect of dietary protein on the growth potentials and nitrogen excretion in freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*. International Journal of Fisheries and Aquatic Studies. 2:243-248.

Bulbul, M., Koshio, S., Ishikawa, M., Yokoyama, S., & Abdul Kader, M. (2015). Growth performance of juvenile kuruma shrimp, *Marsupenaeus japonicus* (Bate) fed diets replacing fishmeal with soybean meal. Aquaculture Research, 46(3), 572-580.

Cavins, J. F., Kwolek, W. F., Inglett, G. E., & Cowan, J. C. (1972). Amino acid analysis of soybean meal: interlaboratory study. J. Assoc. Off. Anal. Chem, 55(4), 686.

Chavez, N. N. G., Ragaza, J. A., Corre Jr, V. L., Serrano Jr, A. E., & Traifalgar, R. F. M. (2016). Effects of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) leaf protein concentrate as soybean protein replacement in white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone) postlarvae diet. Aquaculture research, 47(8), 2642-2649.

Chen, J., Li, X., Xu, H., Sun, W., & Leng, X. (2017). Substitute of soy protein concentrate for fish meal in diets of white shrimp (*Litopenaeus vannamei* Boone). Aquaculture international, 25(3), 1303-1315.

Cruz, P. S. (1997). Aquaculture feed and fertilizer resource atlas of the Philippines (p. 259). FAO.

Davassi, L. A. (2011). Survival and growth of the freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* in relation to different nutrients composition. Journal of fisheries and Aquatic Science, 6(6), 649.

Du, L., & Niu, C. J. (2003). Effects of dietary substitution of soya bean meal for fish meal on consumption, growth, and metabolism of juvenile giant freshwater prawn, *Macrobrachium rosenbergii*. Aquaculture Nutrition, 9(2), 139-143.

FAO. (1986). The production of fish meal and oil. Retrived: 4/6/2019. Form: http://www.fao.org/3/x6899e/X6899E00.HTM.

FAO: FAO Technical Guidelines for Responsible Fisheries Aquaculture Development – 5. Rome: Food and Agriculture Organization of the united nations, 1997

Finke, M. D. (2002). Complete nutrient composition of commercially raised invertebrates used as food for insectivores. Zoo Biology: Published in affiliation with the American Zoo and Aquarium Association, 21(3), 269-285.

Food and Agriculture Organisation (FAO). Report highlights on growing sole of fish in feeding the World. FAO technical conference on aquaculture annual publication Rome, Italy, 2014. Internet: retrieved from http://www.fao.org.docrep/fao. Date accessed: 30-06-2015.

Grazziotin, A., Pimentel, F. A., De Jong, E. V., & Brandelli, A. (2006). Nutritional improvement of feather protein by treatment with microbial keratinase. Animal feed science and technology, 126(1-2), 135-144.

Hendriks, W. H., Butts, C. A., Thomas, D. V., James, K. A. C., Morel, P. C. A., & Verstegen, M. W. A. (2002). Nutritional quality and variation of meat and bone meal. Asian-Australasian journal of animal sciences, 15(10), 1507-1516.

Henry, M. A., Gasco, L., Chatzifotis, S., & Piccolo, G. (2018). Does dietary insect meal affect the fish immune system? The case of mealworm, Tenebrio molitor on European sea bass, *Dicentrarchus labrax*. Developmental & Comparative Immunology, 81, 204-209.

Hu, Y., Tan, B., Mai, K., Ai, Q., Zheng, S., & Cheng, K. (2008). Growth and body composition of juvenile white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, fed different ratios of dietary protein to energy. Aquaculture Nutrition, 14(6), 499-506.

Huh, J. H., & Seo, K. (2017). An indoor location-based control system using bluetooth beacons for IoT systems. Sensors, 17(12), 2917.

Iotbymukund.(2018). How to Calculate Distance from the RSSI value of the BLE Beacon. Wordpress. https://iotandelectronics.wordpress.com/2016/10/07/how-to-calculate-distance-from-the-rssi-value-of-the-ble-beacon.

Ji, H., Zhang, J. L., Huang, J. Q., Cheng, X. F., & Liu, C. (2015). Effect of replacement of dietary fish meal with silkworm pupae meal on growth performance, body composition, intestinal protease activity and health status in juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian). Aquaculture Research, 46(5), 1209-1221.

Khawaja, T., Khan, S. H., & Ansari, N. N. (2007). Effect of different levels of blood meal on broiler performance during two phases of growth. International Journal of poultry science, 6(12), 860-865.

Khoda Bakhsh, H., & Chopin, T. (2011). Water Quality and Nutrient Aspects in Recirculating Aquaponic Production of the Freshwater Prawn, *Macrobrachium rosenbergii* and the Lettuce, Lactuca sativa.

Kroeckel, S., Harjes, A. G., Roth, I., Katz, H., Wuertz, S., Susenbeth, A., & Schulz, C. (2012). When a turbot catches a fly: Evaluation of a pre-pupae meal of the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as fish meal substitute— Growth performance and chitin degradation in juvenile turbot (*Psetta maxima*). Aquaculture, 364, 345-352.

Li, X., Rezaei, R., Li, P., & Wu, G. (2011). Composition of amino acids in feed ingredients for animal diets. Amino acids, 40(4), 1159-1168.

Liu, X. H., Ye, J. D., Wang, K., Kong, J. H., Yang, W., & Zhou, L. (2012). Partial replacement of fish meal with peanut meal in practical diets for the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. Aquaculture Research, 43(5), 745-755.

Longvah, T., Mangthya, K., & Ramulu, P. (2011). Nutrient composition and protein quality evaluation of eri silkworm (*Samia ricinii*) prepupae and pupae. Food Chemistry, 128(2), 400-403.

Lucy Towers. (2010). How to Farm Giant River Prawn. Retrived: 29/8/2019. Form: https://thefishsite.com/articles/cultured-aquaculture-species-giant-river-prawn

Marques, H. D. A., Lombardi, J. V., & Boock, M. V. (2000). Stocking densities for nursery phase culture of the freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* in cages. Aquaculture, 187(1-2), 127-132.

Martínez-Alvarez, O., López-Caballero, M. E., Gómez-Guillén, M. D. C., & Montero, P. (2009). The effect of several cooking treatments on subsequent chilled storage of thawed deepwater pink shrimp (*Parapenaeus longirostris*) treated with different melanosis-inhibiting formulas. LWT-Food Science and Technology, 42(8), 1335-1344.

Megahed, M. E., Elmesiry, G., Ellithy, A., & Mohamed, K. (2018). Genetic, nutritional and pathological investigations on the effect of feeding low protein diet and biofloc on

growth performance, survival and disease prevention of Indian white shrimp *Fenneropenaeus indicus*. Aquaculture international, 26(2), 589-615.

Melexis Microelectronic Integradted Systems, MLX90614 family Single and Dual Zone Infrared Thermometer**.** https://cdnshop.adafruit.com/datasheets/MLX90614.pdf. (Accessed 1 May 2019)

Molina-Poveda, C., & Morales, M. E. (2004). Use of a mixture of barley-based fermented grains and wheat gluten as an alternative protein source in practical diets for *Litopenaeus vannamei* (Boone). Aquaculture research, 35(12), 1158-1165.

Molina-Poveda, C., Lucas, M., & Jover, M. (2015). Utilization of corn gluten meal as a protein source in the diet of white shrimp *Litopenaeus vannamei*. Aquaculture nutrition, 21(6), 824-834.

Negrini, C., Castro, C. S. D., Bittencourt-Guimarães, A. T., Frozza, A., Ortiz-Kracizy, R., & Cupertino-Ballester, E. L. (2017). Stocking density for freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* (Decapoda, *Palaemonidae*) in biofloc system. Latin american journal of aquatic research, 45(5), 891-899.

Niamnuy, C., Devahastin, S., Soponronnarit, S., & Raghavan, G. V. (2008). Kinetics of astaxanthin degradation and color changes of dried shrimp during storage. Journal of Food Engineering, 87(4), 591-600.

Nieto-López, M., Tapia-Salazar, M., Ricque-Marie, D., Villarreal-Cavazos, D., Lemme, A., & Cruz-Suárez, L. E. (2011). Digestibility of different wheat products in white shrimp *Litopenaeus vannamei* juveniles. Aquaculture, 319(3-4), 369-376.

Nograles, A. H. H., & Caluyo, F. S. (2013). Wireless system for pregnancy detection in cows by monitoring temperature changes in body. In 2013 IEEE 9th International Colloquium on Signal Processing and its Applications (pp. 11-16). IEEE.

Ogunji, J., Schulz, C., & Kloas, W. (2008). Growth performance, nutrient utilization of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* fed housefly maggot meal (magmeal) diets. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 8(1), 141-147.

Oweis, T., Rodrigues, P. N., & Pereira, L. S. (2003). Simulation of supplemental irrigation strategies for wheat in Near East to cope with water scarcity. In Tools for drought mitigation in Mediterranean regions (pp. 259-272). Springer, Dordrecht.

Palafox, J. P., Uriostegui, F. L., Reynoso, F. L., Chávez, M. C., Villa, I. G., Mendoza, J. M., & Leal, H. E. (2018). Influence of density on growth and survival of freshwater prawn *Macrobrachium americanum* (Bate, 1868) (Caridea: *Palaemonidae*) cultured in a cage-pond system. Spanish journal of agricultural research, 16(4), 7.

Paripatananont, T., Boonyaratpalin, M., Pengseng, P., & Chotipuntu, P. (2001). Substitution of soy protein concentrate for fishmeal in diets of tiger shrimp *Penaeus monodon*. Aquaculture research, 32, 369-374.

Pereira, T. G., & Oliva-Teles, A. (2003). Evaluation of corn gluten meal as a protein source in diets for gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) juveniles. Aquaculture Research, 34(13), 1111-1117.

Ranjeet, K., & KURUP, B. M. (2011). Standardising stocking density for freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* (De Man, 1879) farming in coconut garden channels. Asian Fisheries Science, 24(4), 354-366.

Ruiz-Velazco, J.M.J., Hernandez-Llamas, A., Gomez-Munoz, V.M. 2010. Management of stocking density, pond size, starting time of aeration, and duration of cultivation for intensive commercial production of shrimp *Litopenaeus vannamei*. Aquaculture Engineering 43: 114-119.

Shao, J., Zhao, W., Han, S., Chen, Y., Wang, B., & Wang, L. (2019). Partial replacement of fishmeal by fermented soybean meal in diets for juvenile white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). Aquaculture nutrition, 25(1), 145-153.

Sookying, D., Silva, F.S.D., Davis, A., Hanson, T.R. 2011. Effects of stocking density on the performance of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* cultured under pond and outdoor tank conditions using a high soybean meal diet. Aquaculture 319: 232-239.

Suantika, G., Situmorang, M. L., Nurfathurahmi, A., Taufik, I., Aditiawati, P., Yusuf, N., & Aulia, R. (2018). Application of Indoor Recirculation Aquaculture System for White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) Growout Super-Intensive Culture at Low Salinity Condition. J Aquac Res Development, 9(530), 2.

Suárez, J. A., Gaxiola, G., Mendoza, R., Cadavid, S., Garcia, G., Alanis, G., ... & Cuzon, G. (2009). Substitution of fish meal with plant protein sources and energy budget for white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931). Aquaculture, 289(1-2), 118-123.

Sundaravadivel, C., Sethuramalingam, T. A., & Juliet, K. (2015). Studies on the Optimum Dietary Protein Requirement of Three Size Groups of Fresh Water Prawn *Macrobrachium idae* (Heller). Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology, 9, 38-43.

Suresh Neethirajan. (2017). Recent advances in wearable sensors for animal health management. Sensing and Bio-Sensing Research, 12, 15–29.

Tapparangsee, S., Pimolbutra, S. and Kansong, W. (2013). Optimum density for nursing giant freshwater prawn postlavae (*Macrobrachium rosenbergii*) in recirculating aquaculture system in earthen ponds. RMUTSB Academic Journal (Humanities and Social Sciences). 1(1) : 51-60.

Taufek, N. M., Aspani, F., Muin, H., Raji, A. A., Razak, S. A., & Alias, Z. (2016). The effect of dietary cricket meal (*Gryllus bimaculatus*) on growth performance, antioxidant enzyme activities, and haematological response of African catfish (*Clarias gariepinus*). Fish physiology and biochemistry, 42(4), 1143-1155.

Van Huis, A., Van Itterbeeck, J., Klunder, H., Mertens, E., Halloran, A., Muir, G., & Vantomme, P. (2013). Edible insects: future prospects for food and feed security (No. 171). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Van Nguyen, N., Hoang, L., Van Khanh, T., Duy Hai, P., & Hung, L. T. (2018). Utilization of fermented soybean meal for fishmeal substitution in diets of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). Aquaculture nutrition, 24(3), 1092-1100.

Xu, Y., Chen, Y., Cao, Y., Huang, W., Zhang, S., Xia, W., & Jiang, Q. (2016). Effect of steam cooking on textural properties and taste compounds of shrimp (*Metapenaeus ensis*). Food Science and Technology Research, 22(1), 75-81.

Yue, Y. R., Liu, Y. J., Tian, L. X., Gan, L., Yang, H. J., & Liang, G. Y. (2012). Effects of replacing fish meal with soybean meal and peanut meal on growth, feed utilization and haemolymph indexes for juvenile white shrimp *Litopenaeus vannamei*, Boone. Aquaculture research, 43(11), 1687-1696.

Yun, H., Lee, J., Park, G., Jang, I.K., Katya, K., Shahkar, E., Bai, S.C. 2015. Reevaluation of optimum dietary protein level in juvenile whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1991). Animal Nutrition and Feed Technology. 15: 385-394.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัตินักวิจัย

1. ชื่อ (ภาษาไทย) นางสาวสุรินทร บุญอนันธนสาร

(ภาษาอังกฤษ) Ms. Surintorn Boonanuntanasarn

2. เลขหมายประจำตัวประชาชน 3 2097 00017 95 1

3. ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

4. หน่วยงานที่อยู่ที่ติดต่อ

สาขาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์

สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อ. เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทรศัพท์ 044-224371, 224378

โทรสาร 044-224150

Email : surinton@sut.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	ชื่อปริญญา	สาขาวิชา	สถาบันการศึกษา
ปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต	วาริชศาสตร์	มหาวิทยาลัยบูรพา
ปริญญาโท	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	เทคโนโลยีชีวภาพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปริญญาเอก	Ph.D.	Aquatic Biosciences	Tokyo University of Fisheries

6. ผลงานตีพิมพ์

Boonanuntanasarn, S., Yoshizaki,G., Takeuchi, Y., Morita, T. and Takeuchi T. 2002. Gene knock-down in rainbow trout embryos using antisense morpholino phosphorodiamidate oligonucleotides. *Mar. Biotechnol.* 4: 256-266

Boonanuntanasarn, S., Yoshizaki,G. and Takeuchi T. 2003. Specific gene silencing using small interfering RNAs in fish embryos. *Biochem. Biophys. Res. Com.* 310: 1089-1095

Boonanuntanasarn, S., Yoshizaki,G., Iwai, K. and Takeuchi T. 2004. Molecular cloning, expression in albino mutants, and gene knockdown studies of two types of tyrosinase mRNA in rainbow trout embryos. *Pigment Cell Res.* 17: 413-421

Boonanuntanasarn, S., Takeuchi, T., Yoshizaki, G. 2005. High-efficiency gene knockdown using chimeric ribozymes in fish embryos. *Biochem. Biophys. Res. Com.* 336: 438.443

Boonanuntanasarn, S. 2008. Gene knockdown: a powerful tool for gene function study in fish. *J. World Aquac. Soc.* 39: 311-323.

Boonanuntanasarn, S., Panyim, S., Yoshizaki, G. 2008. Characterization and organization of the U6 snRNA gene in zebrafish and usage of their promoters to express short hairpin RNA. *Marine Genomics*, doi:10.1016/j.margen.2008.10.001 (available online)

Boonanuntanasarn, B., Panyim, S., Yoshizaki, G. 2009. Usage of putative zebrafish U6 promoters to express shRNA in Nile tilapia and shrimp cell extracts. *Transgenic Res.* In press

Jangprai, A., Boonanuntanasarn, S., Yoshizaki, G. 2011. Characterization of melanocortin 4 receptor in snakeskin gourami and its expression in relation to daily feed intake and short-term fasting. Gen. Comp. Endocrinol. 173:27-37.

Vechklang, K., Boonanuntanasarn, S. Ponchunchoovong, S., Pirarat, N., and Wanapu, C. 2011. The potential for rice wine residual as an alternative protein source in a practical diet for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus)* at the juvenile stage. Aquac Nutri. 17:385-694.

Pitaksong, T. Kuppitayanan, P., Boonanuntanasarn, S. 2013 Effects of vitamins C and E on growth, tissue accumulation, and prophylactic response upon thermal and acidic stress in hybrid catfish. Aquac. Nutri. 19: 148-162.

Phymyu, N., Boonanuntanasarn, S., Jangprai, A. Yoshizaki, G. Na-Nakorn, U. 2012. Pubertal effects of 17α-methyltestosterone on GH-IGF-related genes of the hypothalamic-pituitary-liver-gonadal axis and other biological parameters in male, female and sex reversed Nile tilapia. Gen. Comp. Endocrinol. 177: 278-292.

Boonanuntanasarn, S., Jangprai, A., Yoshizaki, G. 2012. Characterization of neuropeptide Y in snakeskin gourami and the change in its expression due to feeding status and melanocortin 4 receptor expression. Gen. Comp. Endocrinol. 179: 184-195.

Boonanantanasarn, K., Janebodin, K., Suppakpatana, P., Arayapisit, T., Rodsutthi, J., Chunabundit, P., Boonanuntanasarn, S., Sripairojthikoon, W. 2012. *Morinda citrifolia* leaf enhances osteogenic differentiation and mineralzation by human periodontal ligament cells. Dental material Journal. 31(5): 1-9

Vechklang, K., Lim, C., Boonanuntanasarn, S., Welker, T., Ponchunchoovong, S., Klesius, P.H., Wanapu, C. 2012. Growth performance and resistance to *Streptococcus iniae* of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus)* fed diets supplemented with GroBiotic-A and brewtech dried brewers yeast. Journal of Applied Aquaculture. 24:183-198.

Tanomman, S., Ketudat-Cairns, K., Jangprai, A., Boonanuntanasarn, S. 2013. Characterization of fatty acid delta-6 desaturase gene in Nile tilapia and heterogenous expression in *Saccharomyces cerevisiae.* Comparative Biochemistry and Physiology, Part B. 166: 148-156.

Boonanuntanasarn, S., Khaomek, P., Pitaksong, T., Hua, Y. 2014. The effects of the supplementation of activated charcoal on the growth, health status and fillet composition-odor of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) before harvesting. Aquaculture Internation. 22:1417-1436.

Booanuntanasarn, S., Jangprai, A., Yoshizaki, G. 2014. Characterization of proopiomelanocortin in the snakeskin gourami (*Trichopodus pectoralis*) and its expression in relation to feeding status. Domestic Animal Endocrinology. Accepted

Wongsasak, U., Chaijamrus, S., Kumkhong, S., Boonanuntanasarn, S. 2015. Effects of dietary supplementation with β-glucan and synbiotics on immune gene expression and immune parameters under ammonia stress in Pacific white shrimp. Aquaculture 436:179-187.

Boonanuntanasarn, S., Wongsasak, U., Pitaksong, T., Chaijamrus, S. 2015. Effects of dietary supplementation with β-glucan and synbiotics on growth, haemolymph chemistry, and intestinal microbiota and morphology in the Pacific white shrimp. Aquaculture Nutrition doi: 10.111/anu.12302.

Tiengtam, N., Paengkum, P., Khampaka, S., Booanuntanasarn, S. 2015. Effects of inulin and Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*) as prebiotic ingredients in the diet of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Animal Feed Science and Technology. 207: 120-129.

Tiengtam, N., Paengkum, P., Sirivoharn, S., Phonsiri, K., **Booanuntanasarn, S.** 2017. The effects of dietary inulin and Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*) tuber on the growth performance, haematological, blood chemical and immune parameters of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings. Aquaculture research. 1-9.

Boonanuntanasarn S, Tiengtam N, Pitaksong T, Piromyou P, Teaumroong N. Effects of dietary inulin and Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*) on intestinal microbiota community and morphology of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings. Aquacult Nutr. 2017;00:1–11. https://doi.org/10.1111/anu.12600

Boonanuntanasarn, S., Kumkhong, S., Yoohat, K., Plagnes-Juan, E., Burel, C., Marandel, L., & Panserat, S. (2018). Molecular responses of Nile tilapia (Oreochromis niloticus) to different levels of dietary carbohydrates. *Aquaculture, 482*, 117-123. doi:https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.09.032

Boonanuntanasarn, S., Ditthab, K., Jangprai, A., Nakharuthai, C. 2018. Effects of microencapsulated *Saccharomyces cerevisiae* on growth, hematological indices, blood chemical, and immune parameters and intestinal morphology in Striped catfish, *Pangasianodon hypophthalamus*. Probiotics and Antimicrobial Proteins https://doi.org/10.1007/s12602-018-9404-0

Boonanuntanasarn, S., Jangprai, A., Kumkhong, S., Plagnes-Juan, E., Veron, V., Burel, C., . . . Panserat, S. (2018). Adaptation of Nile tilapia (Oreochromis niloticus) to different levels of dietary carbohydrates: New insights from a long term nutritional study. *Aquaculture, 496*, 58-65. doi:https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.07.011

Boonanuntanasarn, S., Nakharuthai, C., Schrama, D., Duangkaew, R., & Rodrigues, P. M. (2018). Effects of dietary lipid sources on hepatic nutritive contents, fatty acid composition and proteome of Nile tilapia (Oreochromis niloticus). *Journal of Proteomics*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jprot.2018.09.003

Duangkaew, R., Jangprai, A., Ichida, K., Yoshizaki, G., & Boonanuntanasarn, S. (2019). Characterization and expression of a vasa homolog in the gonads and primordial germ cells of the striped catfish (*Pangasianodon hypophthalmus*). *Theriogenology, 131*, 61-71. doi:https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2019.01.022

Jangprai, A., Boonanuntanasarn, S. (2018). Ubiquitous promoters direct the exspression of fatty acid delta-6 desaturase from Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in *Saccharomyces cerevisia*e. *Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology*. 28(6): 281-292.

Ichida K, Hayashi M, Miwa M, Kitada R, Takahashi M, Fujihara R, Boonanuntanasarn S, Yoshizaki G: (2019) Enrichment of transplantable germ cells in salmonids using a novel monoclonal antibody by magnetic‐activated cell sorting. *Molecular Reproduction and Development*.

Boonanuntanasarn, S., Jangprai, A., & Na-Nakorn, U. (2020). Transcriptomic analysis of female and male gonads in juvenile snakeskin gourami (*Trichopodus pectoralis*). *Scientific Reports, 10*. doi:10.1038/s41598-020-61738-0

Kumkhong, S., Marandel, L., Plagnes-Juan, E., Veron, V., Boonanuntanasarn, S., & Panserat, S. (2020). Glucose Injection Into Yolk Positively Modulates Intermediary Metabolism and Growth Performance in Juvenile Nile Tilapia (Oreochromis niloticus). *Frontiers in Physiology, 11*, 286. doi:10.3389/fphys.2020.00286

Kumkhong, S., Marandel, L., Plagnes-Juan, E., Veron, V., Panserat, S., & Boonanuntanasarn, S. (2020). Early feeding with hyperglucidic diet during fry stage exerts long-term positive effects on nutrient

metabolism and growth performance in adult tilapia (Oreochromis niloticus). Journal of Nutritional Science, 9, E41. doi:10.1017/jns.2020.34

Nakharuthai C, Rodrigues PM, Schrama D, Kumkhong S, Boonanuntanasarn S: Effects of Different Dietary Vegetable Lipid Sources on Health Status in Nile Tilapia (Oreochromis niloticus): Haematological Indices, Immune Response Parameters and Plasma Proteome. *Animals* 2020, 10(8):1377.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี