วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 25 (ฉบับที่ 2) พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2563
BURAPHA SCIENCE JOURNAL Volume 25 (No.2) May – August 2020 บทความวิจัย

ปริมาณและรูปแบบของฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายจากอาหารสำเร็จรูปสำหรับกุ้งและปลา

Abundance and Form of Phosphorus Leaching from Commercial Shrimp and Fish Feed Pellets

มารุต สุขสมจิตร*, ชนานันท์ ทิมวัฒน์, ณัชชา สุพวานิช และ ไตรเทพ วิชย์โกวิทเทน

Marut Suksomjit*, Chananan Timwat, Natcha Supawanich and Tritep Vichkovitten

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

Department of Environmental Science, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Rangsit Centre

Received : 6 September 2019

Revised : 29 October 2019

Accepted : 17 December 2019

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมการเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นธุรกิจการเกษตรที่สำคัญ แต่กิจการดังกล่าวสามารถก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมและสร้างความกังวลแก่ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องต่อความยั่งยืนของอุตสาหกรรมการดังกล่าว แร่ธาตุที่ถูกชะละลายออกมาจากอาหารสัตว์น้ำถูกระบุว่าเป็นหนึ่งในสาเหตุของปัญหาความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำ การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณและรูปแบบของฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายจากอาหารสำเร็จสำหรับกุ้งและปลา ผลการศึกษาพบว่ามีฟอสฟอรัสถูกชะละลายหลังจากแช่อาหารสำเร็จรูปที่ใช้เลี้ยงกุ้งขาว ปลานิล และปลาดุก เพียง 30 นาที อย่างไรก็ตามปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ถูกชะละลายจากอาหารปลานิลและปลาดุกมีค่าสูงกว่าอาหารกุ้งขาวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) โดยฟอสฟอรัสรูปแบบสำคัญที่ถูกชะละลายออกจากอาหารสัตว์น้ำทั้งสามชนิดอยู่ในรูปฟอสฟอรัสอนินทรีย์ที่อยู่ในรูปสารละลาย ซึ่งเป็นรูปแบบของฟอสฟอรัสที่แพลงก์ตอนพืชสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโต และเมื่อคำนวณปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกน้ำชะละลายออกจากอาหารสัตว์น้ำ พบว่าจะมีฟอสฟอรัสถูกน้ำชะละลายออกจากอาหารที่ใช้เลี้ยงกุ้งขาว ปลานิล และปลาดุก ในหนึ่งวัน มีค่าเท่ากับ 2.48 7.93 และ 9.96 กรัม-ฟอสฟอรัส/สัตว์น้ำ หนัก 1,000 กิโลกรัม ตามลำดับ ฟอสฟอรัสเหล่านี้จะก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิดปรากฏการณ์สาหร่ายสะพรั่ง

คำสำคัญ : การชะละลาย, ฟอสฟอรัส, อาหารสัตว์น้ำสำเร็จรูป

*Corresponding author. E-mail : marut37@yahoo.com

Abstract

Aquaculture industry, one of the important agricultural businesses, can cause an environmental problem and its sustainability public concern. Nutrient leaching from commercial feed pellets have been reported as one of the reasons of a deterioration of water body. We studied the abundance and form of phosphorus leaching from three commercial shrimp and fish feed pellets. After immerse a White shrimp, Nile Tilapia and Walking Catfish feed pellet of 30 minutes, phosphorus was found in all leachates. However the abundance of total phosphorus leaching from Nile Tilapia and Walking Catfish feed pellets were significantly ($p<0.05$) higher than White Shrimp feed pellet. Dissolved Inorganic Phosphorus, a form which is readily available for phytoplankton growth, was the major form of phosphorus in this study. Daily amount of phosphorus leaching from commercial White shrimp, Nile Tilapia and Walking Catfish feed pellets were 2.48 7.93 and 9.96 g-P/ 1,000 kg of shrimp or fish weight. The phosphorus might cause an environmental problem particularly a bloom of algae in water body.

Keyword : leaching, phosphorus, commercial fish feed pellet

บทนำ

อุตสาหกรรมการเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นธุรกิจการเกษตรที่สำคัญของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2559 มีเกษตรกรที่ประกอบอาชีพเลี้ยงสัตว์น้ำมากกว่า 500,000 ราย ผลิตสัตว์น้ำได้คิดเป็นมูลค่ามากกว่า 85,000 ล้านบาท โดยสัตว์น้ำสำคัญที่มีการผลิตได้สามลำดับแรกได้แก่ กุ้งขาว (White shrimp) 321,542 ตัน ปลานิล (Nile tilapia) 200,764 ตัน และปลาดุก (Walking catfish) 100,444 ตัน (Department of Fisheries, 2016) การเลี้ยงสัตว์น้ำแม้ว่าจะสร้างรายได้ให้แก่เกษตรกรจำนวนมาก แต่กิจการดังกล่าวสามารถก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ เช่น ทำให้แหล่งรองรับน้ำทิ้งอยู่ในสภาพอุดมสมบูรณ์ (Eutrophication) ซึ่งมีผลทำให้ปรากฏการณ์สาหร่ายสะพรั่ง (Algae Bloom) มีโอกาสเกิดได้บ่อยมากขึ้น (Anderson *et al.*, 2008; Alonso-Rodriquez & Páez-Osuna, 2003; Nóbrega *et al.*, 2014) ทำให้แหล่งน้ำเกิดการขาดแคลนออกซิเจน (Rixen *et al.*, 2008) เป็นต้น ปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้สร้างความกังวลแก่ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องต่อความยั่งยืนของอุตสาหกรรมการเลี้ยงสัตว์น้ำ

ปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ มีสาเหตุมาจากของเสียที่ถูกระบายออกจากบ่อหรือกระชังที่ใช้เลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นกากของเสียที่สัตว์น้ำขับถ่าย อาหารที่สัตว์น้ำไม่ได้กิน หรืออาหารที่สัตว์น้ำกินเข้าไปแต่ย่อยไม่ได้ (Koydon, 2014) อีกส่วนหนึ่งเป็นแร่ธาตุและสารอินทรีย์ที่ถูกชะละลายออกมาจากอาหารที่เกษตรกรให้แก่สัตว์น้ำ Pasugdee *et al.* (2006) รายงานว่าโปรตีนและไขมันในอาหารกุ้งก้ามกรามจะถูกน้ำชะละลายออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 2.1-10.9 และ 1.2-5.9 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบสารอินทรีย์ แอมโมเนีย และฟอสฟอรัสถูกน้ำชะละลายออกมาเช่นกัน Fernandez-Jover *et al.* (2007) รายงานว่าแอมโมเนียมและสารอินทรีย์คาร์บอนในอาหารสัตว์น้ำจะถูกน้ำชะละลายออกมาถึง 169 ไมโครกรัม/อาหาร 1 กรัม และ 8.9 มิลลิกรัม/อาหาร 1 กรัม ตามลำดับ Watson *et al.* (2015) ศึกษาพบว่าทอรีน (Taurine) ในอาหารปลาช่อนทะเลจะถูกน้ำชะละลายออกมามากถึงร้อยละ 59.5 ในขณะที่ Phillips *et al.* (1993) รายงานว่าฟอสฟอรัสในอาหารปลาแซลมอนจะถูกน้ำชะละลายออกมา โดยมีสัดส่วนคิดเป็นร้อยละ 10 ของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการเลี้ยง Sornsupharp *et al.* (2003) ระบุว่า

การที่แร่ธาตุในอาหารสัตว์น้ำถูกน้ำชะละลายออกสู่สิ่งแวดล้อมนอกจากจะทำให้คุณค่าของอาหารลดลงแล้ว ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งการชะละลายธาตุไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ออกจากอาหารสัตว์น้ำ Kosutarak (2016) ระบุว่าผู้ผลิตอาหารสัตว์น้ำจะมีการเติมฟอสฟอรัสลงในอาหาร เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ อย่างไรก็ตามกลับพบว่าอาหารสัตว์น้ำสำเร็จรูปที่ขายในท้องตลาดในปัจจุบันมีปริมาณฟอสฟอรัสผสมอยู่สูงเกินกว่าความต้องการของสัตว์น้ำ

ฟอสฟอรัส (Phosphorus, P) เป็นธาตุที่จำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต ในแหล่งน้ำจืดและทะเลชายฝั่งฟอสฟอรัสมีบทบาทสำคัญโดยเป็นปัจจัยจำกัดควบคุมปริมาณผู้ผลิตขั้นต้นในแหล่งน้ำ Somsap *et al.* (2015) และ Lirdwitayaprasit *et al.* (2006) ระบุว่าฟอสฟอรัสเป็นปัจจัยจำกัดหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์สาหร่ายสะพรั่งในทะเลอ่าวไทย นอกจากนี้ฟอสฟอรัสยังมีอิทธิพลต่อวัฏจักรชีวธรณีเคมีของธาตุอื่น ๆ ในแหล่งน้ำ เช่น คาร์บอน ไนโตรเจน เป็นต้น (Lin & Guo, 2016 และ Lin *et al.*, 2016) ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำมีหลายรูปแบบ และฟอสฟอรัสแต่ละรูปแบบมีบทบาทในแหล่งน้ำแตกต่างกัน เช่น ฟอสฟอรัสอนินทรีย์ที่อยู่ในรูปสารละลาย (Dissolved Inorganic Phosphorus; DIP) มีบทบาทสำคัญที่สุดในแหล่งน้ำเนื่องจากแพลงก์ตอนพืชส่วนใหญ่จะใช้ฟอสฟอรัสรูปแบบนี้เพื่อการดำรงชีวิตและเจริญเติบโต ในขณะที่ฟอสฟอรัสอินทรีย์ที่อยู่ในรูปสารละลาย (Dissolved Organic Phosphorus; DOP) จะเป็นแหล่งฟอสฟอรัสให้กับแพลงก์ตอนพืชบางชนิด และเป็นแหล่งฟอสฟอรัสสำรองเมื่อ DIP มีปริมาณไม่เพียงพอ ในส่วนของฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปตะกอนแขวนลอยแม้จะไม่มีบทบาทโดยตรงต่อแพลงก์ตอนพืชในแหล่งน้ำก็ตาม แต่ฟอสฟอรัสในรูปแบบนี้สามารถปลดปล่อย DIP เมื่อแหล่งน้ำมีค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเค็ม หรือออกซิเจนละลายน้ำเปลี่ยนแปลงไป

ปัจจุบันแม้ว่าจะมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจากการเลี้ยงสัตว์น้ำหลายฉบับ แต่การศึกษาเกี่ยวกับปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำในประเทศไทยกลับมีไม่มากนัก และส่วนใหญ่ศึกษาเฉพาะฟอสฟอรัสบางรูปแบบเท่านั้น การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณและรูปแบบของฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำสำเร็จรูปสำคัญที่ขายในท้องตลาดสามชนิด ได้แก่ อาหารกุ้งขาว อาหารปลานิล และอาหารปลาดุก รวมทั้งประเมินปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกปลดปล่อยต่อผลผลิตสัตว์น้ำ ข้อมูลที่ได้จะทำให้ทราบถึงปริมาณและรูปแบบของฟอสฟอรัสที่จะถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำที่นิยมเลี้ยงกันมากในประเทศไทย รวมทั้งความแตกต่างทั้งในเชิงปริมาณและรูปแบบของฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายออกมาจากอาหารแต่ละชนิด ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมควบคุมมลพิษ กรมประมง หรือผู้ที่สนใจ ที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนการจัดการผลกระทบที่เกิดจากกิจการเลี้ยงสัตว์น้ำต่อไป

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลาย

ศึกษาฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำสำเร็จรูปสามชนิดที่ขายในท้องตลาด ได้แก่ อาหารกุ้งขาว (อาหารเม็ดจม มีระดับโปรตีนในอาหารร้อยละ 35) ปลานิล (อาหารเม็ดลอยน้ำ ระดับโปรตีนในอาหารร้อยละ 16) และปลาดุก (อาหารเม็ดลอยน้ำ ระดับโปรตีนในอาหารร้อยละ 30) โดยใช้วิธี Static Water Method และวัดฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายที่อยู่ในน้ำแช่อาหารสัตว์น้ำ (Leachate) ซึ่งดัดแปลงจากวิธีการศึกษาของ Obaldo *et al.* (2002) และ Pasugdee *et al.* (2006) โดยเตรียมขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 12 ขวด เติมน้ำกลั่น (Deionized water, DI) ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ก่อนนำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 30 $\pm$ 0.1 องศาเซลเซียส ชั่งอาหารสัตว์น้ำแต่ละชนิดน้ำหนัก 6.0 $\pm$ 0.01 กรัม ก่อนนำไปใส่ในขวดรูปชมพู่ที่เตรียมไว้ จำนวน 9 ขวด อีก 3 ขวด เป็นชุดควบคุมที่ไม่มีอาหาร

สัตว์น้ำ เก็บตัวอย่างน้ำที่แช่อาหารสัตว์น้ำที่เวลาเริ่มต้น (0 นาที) 30 และ 60 นาที ครั้งละ 3 ขวด เพื่อตรวจวัดปริมาณ DIP DOP รวมทั้งปริมาณฟอสฟอรัสอนินทรีย์ที่อยู่ในรูปตะกอนแขวนลอย (Particulate Inorganic Phosphorus; PIP) และฟอสฟอรัสอินทรีย์ที่อยู่ในรูปตะกอนแขวนลอย (Particulate Organic Phosphorus; POP) โดยนำน้ำตัวอย่างกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Whatman GF/F) ขนาด 47 มิลลิเมตร ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่อาจตกค้างอยู่บนกระดาษกรอง นำตัวอย่างน้ำที่กรองได้ไปใช้ในการตรวจวิเคราะห์ปริมาณ DIP และ DOP ในส่วนของกระดาษกรองที่มีตัวอย่างติดอยู่ ให้หยดสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เข้มข้น 0.17 M ลงบนกระดาษกรองจนชุ่มเพื่อตรึงฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปตะกอนแขวนลอยให้ติดบนกระดาษกรองตามวิธีการของ Suzumura *et al.* (2004) บันทึกปริมาตรน้ำที่กรอง เปลี่ยนกระดาษกรองแผ่นใหม่และทำซ้ำอีกครั้ง นำกระดาษกรองไปใช้ในการตรวจวิเคราะห์ปริมาณ PIP และ POP

2. การวิเคราะห์ปริมาณ DIP และ DOP

วิเคราะห์หาปริมาณ DIP ตามวิธีการของ Murphy & Riley (1962); Parson *et al.* (1984) โดยตวงน้ำตัวอย่างปริมาตร 10 มิลลิลิตร เติม Combined Reagent ในอัตราส่วน 10:1 ทิ้งไว้ 6-8 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer คำนวณหาปริมาณ DIP โดยเปรียบเทียบกับสารละลายเข้มข้นมาตรฐาน ในส่วนของการวิเคราะห์หาปริมาณ DOP ใช้วิธีการย่อยด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตที่อุณหภูมิต่ำตามวิธีที่ดัดแปลงจาก Huang & Zhang (2009) โดยตวงน้ำตัวอย่างปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดพลาสติก PPCO (Nalgene) แบบมีฝาปิด ขนาด 30 มิลลิลิตร เติมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (5%) 1 มิลลิลิตร ปิดฝาให้แน่นก่อนนำไปย่อยในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 16 ชั่วโมง ทิ้งให้ตัวอย่างเย็นก่อนนำไปเติม Combined Reagent ในอัตราส่วน 10:1 ทิ้งไว้ 6-8 นาที และดำเนินการตามวิธีการดังกล่าวข้างต้น ค่าที่คำนวณได้จะเป็นปริมาณฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปสารละลายทั้งหมด (Total Dissolved Phosphorus; TDP) (ภาพที่ 1) คำนวณหาปริมาณ DOP จากผลต่างระหว่างปริมาณ TDP และ DIP

3. การวิเคราะห์ปริมาณ PIP และ POP

วิเคราะห์หาปริมาณ PIP และ POP โดยนำตัวอย่างกระดาษกรองใส่ในขวดแก้วทนความร้อนสูง นำขวดแก้วที่มีกระดาษกรองแผ่นแรกบรรจุอยู่ไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เพื่อเปลี่ยนสารฟอสฟอรัสอินทรีย์ให้เป็นสารฟอสฟอรัสอนินทรีย์ ทิ้งตัวอย่างให้เย็น ก่อนนำขวดแก้วที่มีกระดาษกรองบรรจุอยู่ทั้งสองขวดไปสกัดโดยเติมกรด HCl เข้มข้น 1 N ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ทิ้งไว้นาน 12 ชั่วโมง ตามวิธีการของ Aspila *et al.* (1976); Loh & Bauer (2000); Suzumura *et al.* (2004); Asahi *et al.* (2014) นำสารละลายที่สกัดได้ไปปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้เท่ากับ 7 จากนั้นนำไปวัดตามวิธีการของ Murphy & Riley (1962); Parson *et al.* (1984) ค่าที่คำนวณได้จากตัวอย่างกระดาษกรองแผ่นแรกที่ผ่านการเผาจะเป็นปริมาณฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปสารแขวนลอยทั้งหมด (Total Particulate Phosphorus; TPP) (ภาพที่ 1) ส่วนค่าที่คำนวณได้จากตัวอย่างกระดาษกรองแผ่นที่สองที่ไม่ผ่านการเผาจะเป็นปริมาณ PIP คำนวณหาปริมาณ POP จากผลต่างระหว่างปริมาณ TPP และ PIP

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ความแตกต่างของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus; TP = TDP+TPP) และฟอสฟอรัสรูปแบบต่าง ๆ ที่ถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำแต่ละชนิด โดยใช้วิธี Analysis of Variance (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และทดสอบหลังการวิเคราะห์ (Post hoc test) โดยวิธีการเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple comparison) แบบ Bonferroni โดยใช้โปรแกรม Microsoft excel

คำนวณปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกปลดปล่อยต่อผลผลิตสัตว์น้ำในหนึ่งวัน โดยคำนวณจากผลคูณระหว่างปริมาณอาหารที่เกษตรกรให้แก่สัตว์น้ำที่เลี้ยงไว้ในหนึ่งวัน และปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำตามสมการดังต่อไปนี้

$$L = (F \times P) \times 1{,}000 \quad (1)$$

L = ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกปลดปล่อยต่อผลผลิตสัตว์น้ำ (กรัม-ฟอสฟอรัส/สัตว์น้ำ หนัก 1,000 กิโลกรัม)

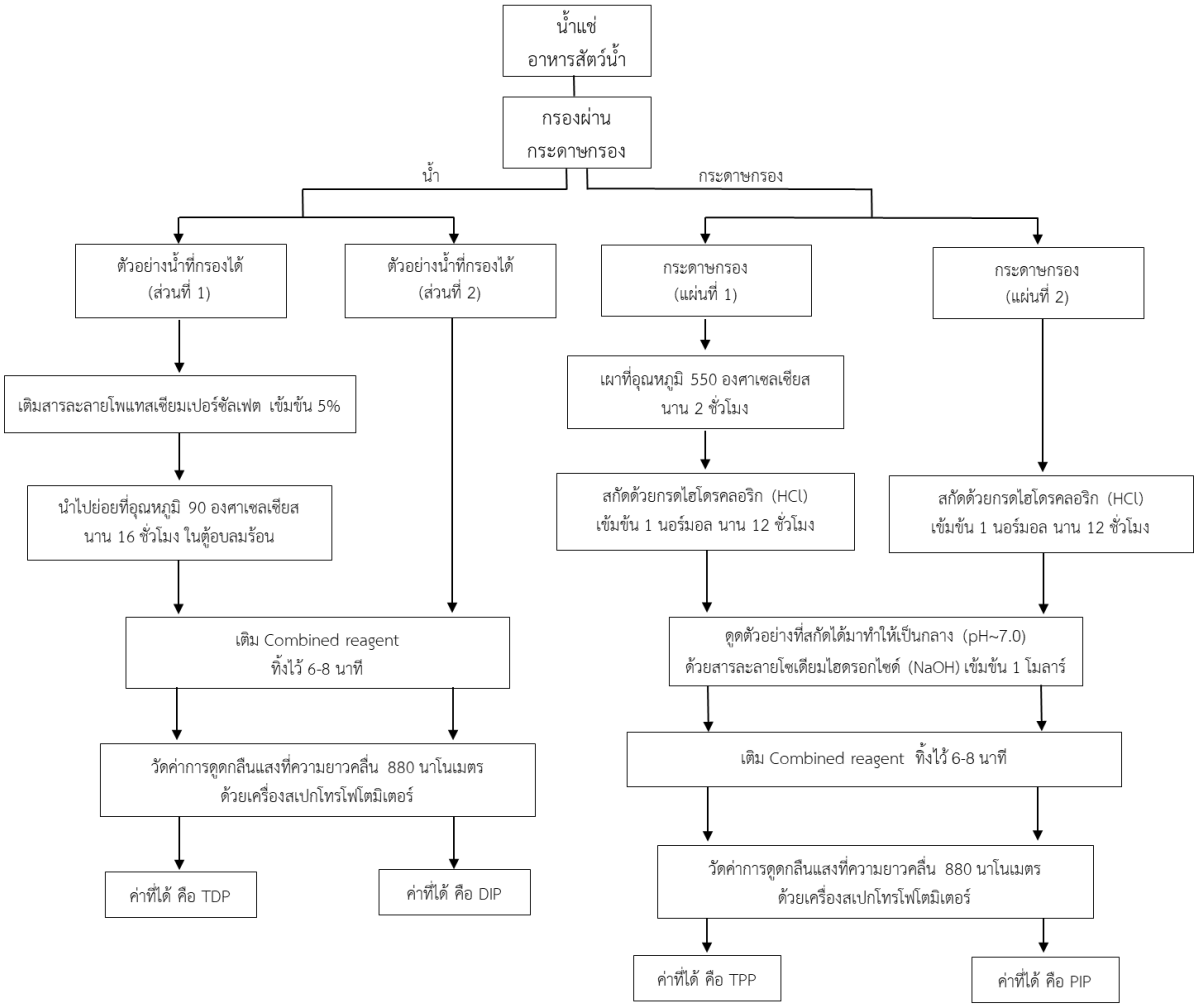
P = ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำ (กรัม-ฟอสฟอรัส/อาหาร 1 กิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง))

F = ปริมาณอาหารที่เกษตรกรให้แก่สัตว์น้ำ (กิโลกรัม/สัตว์น้ำ หนัก 1 กิโลกรัม) คำนวณจาก

$$F = W \times f \quad (2)$$

W = น้ำหนักสัตว์น้ำ (กิโลกรัม)

f = ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณปริมาณอาหาร โดยใช้ค่าอัตราการกินอาหารของสัตว์น้ำจะเท่ากับร้อยละ 3 ของน้ำหนักตัวต่อวัน (Chuapoehuk, 2000)



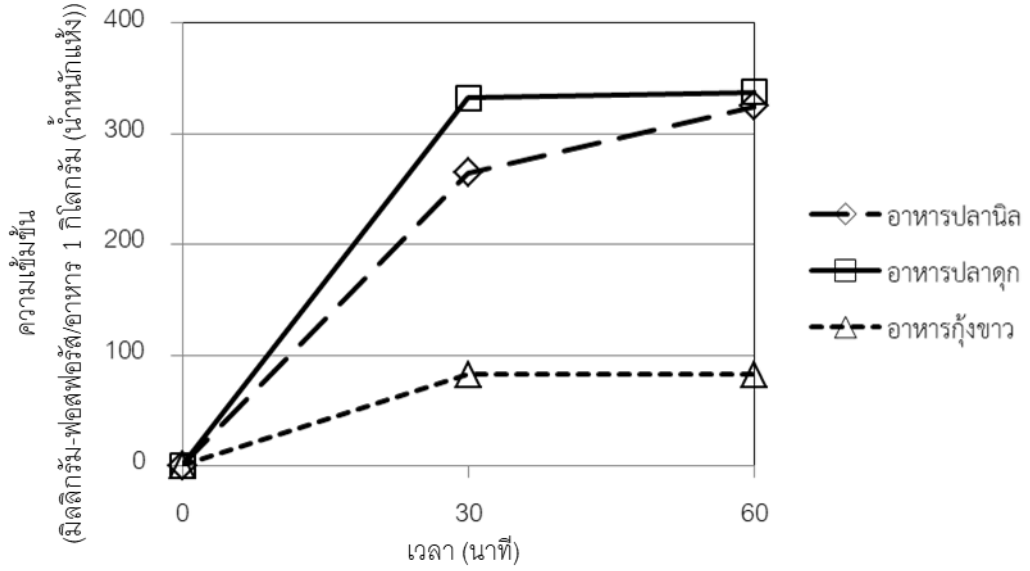
ภาพที่ 1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปแบบต่าง ๆ

ผลการวิจัย

1. ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลาย

ผลการศึกษาพบว่ามีฟอสฟอรัสถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำสำเร็จรูปทั้งสามชนิด และปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำสำเร็จรูปทั้งสามชนิดมีความแตกต่างกัน ภาพที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ที่ถูกชะละลายจากอาหารกุ้งขาว ปลานิล และปลาดุก ที่เวลา 30 และ 60 นาที โดยค่าเฉลี่ยของปริมาณ TP ที่ถูกชะละลายจากอาหารปลานิลที่เวลา 30 และ 60 นาที มีค่าเท่ากับ 264.3 และ 325.0 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัส/อาหาร 1 กิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ ในขณะที่ค่าเฉลี่ยของปริมาณ TP ที่ถูกชะละลายจากอาหารปลาดุกมีค่าเท่ากับ 332.0 และ 337.5 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัส/อาหาร 1 กิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งปริมาณ TP ที่ถูกชะละลายจากอาหารปลานิลและปลาดุกมีค่าสูงกว่าอาหารกุ้งขาวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ทั้งที่เวลา 30 และ 60 นาที โดยปริมาณ TP ที่ถูกชะละลายจากอาหารกุ้งขาวที่เวลา 30 และ 60 นาที มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 82.5 และ 82.5 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัส/อาหาร 1 กิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ และเมื่อพิจารณารูปแบบของการชะละลายพบว่าฟอสฟอรัสในอาหารสัตว์น้ำสำเร็จรูปทุกชนิดจะถูกชะละลายออกมาอย่างรวดเร็วภายในเวลา 30 นาที หลังจากอาหารสัมผัสกับน้ำ อย่างไรก็ตามจะมี

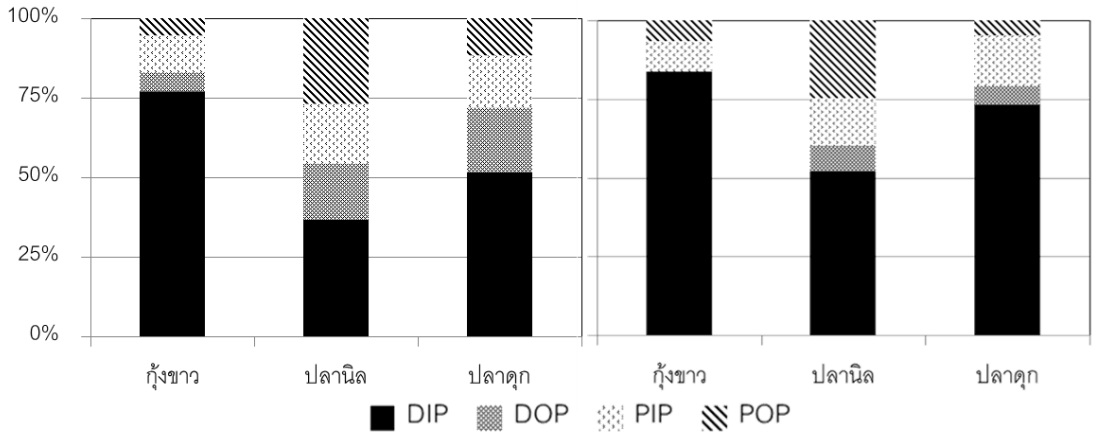
ฟอสฟอรัสในอาหารถูกชะละลายออกมาเพิ่มเติมเพียงเล็กน้อยหลังช่วงเวลา 30 ถึง 60 นาที ยกเว้นอาหารปลานิลที่ยังมีการชะละลายฟอสฟอรัสออกมาอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดระยะเวลาการทดลอง 60 นาที



ภาพที่ 2 ค่าเฉลี่ยของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ที่ถูกชะละลายจากอาหารกุ้งขาว ปลานิล และปลาดุก ที่เวลาเริ่มต้น (0 นาที) 30 และ 60 นาที

2. รูปแบบของฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลาย

เมื่อทิ้งให้อาหารสัตว์น้ำสำเร็จรูปแต่ละชนิดแช่ในน้ำนาน 30 และ 60 นาที และทำการตรวจวัดหารูปแบบของฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลาย ผลการศึกษาพบว่าฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายมีทั้งที่อยู่ในรูปสารละลาย (Dissolved Form) ได้แก่ DIP และ DOP และรูปตะกอนแขวนลอย (Particulate Form) ได้แก่ PIP และ POP โดยฟอสฟอรัสในรูป DIP เป็นรูปแบบฟอสฟอรัสสำคัญที่ถูกชะละลายจากอาหารกุ้งขาว ปลานิล และปลาดุกที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ภาพที่ 3 แสดงค่าร้อยละของปริมาณฟอสฟอรัสรูปแบบต่าง ๆ เทียบกับปริมาณ TP ที่ถูกชะละลายจากอาหารกุ้งขาว ปลานิล และปลาดุกที่เวลา 30 และ 60 นาที โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าร้อยละของปริมาณ DIP เทียบกับปริมาณ TP ที่ถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำทั้งสามชนิด พบว่าค่าจากอาหารปลานิลจะมีค่าน้อยที่สุด โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 36.9 – 52.0 ในขณะที่อาหารกุ้งขาว และปลาดุก มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 77.0 – 83.6 และ 51.8 – 73.1 ตามลำดับ ในขณะที่ฟอสฟอรัสรูปแบบอื่นที่ถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำแต่ละชนิดมีสัดส่วนเรียงลำดับดังนี้ อาหารกุ้งขาว PIP>POP>DOP อาหารปลานิล POP>PIP>DOP อาหารปลาดุก DOP>PIP>POP (30 นาที) และ PIP>DOP>POP (60 นาที)



ภาพที่ 3 ค่าเฉลี่ยร้อยละของปริมาณฟอสฟอรัสแต่ละรูปแบบที่ถูกชะละลายจากอาหารกุ้งขาว ปลานิล และปลาดุกที่เวลา 30 (ซ้าย) และ 60 นาที (ขวา)

เมื่อพิจารณาเฉพาะปริมาณฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูป DIP ที่ถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำ ซึ่งมีบทบาทสำคัญที่สุดในแหล่งน้ำ ผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่าปริมาณ DIP ที่ถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำสำเร็จรูปแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) โดยปริมาณ DIP ที่ถูกชะละลายจากอาหารอาหารปลาดุกมีค่าสูงสุด รองลงมาได้แก่ อาหารปลานิลและกุ้งขาว ตามลำดับ โดยปริมาณ DIP ที่ถูกชะละลายจากอาหารอาหารปลาดุกเมื่อแช่อาหารในน้ำนาน 30 และ 60 นาที มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 172.2 และ 246.8 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัส/อาหาร 1 กิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) อาหารปลานิลมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 97.5 และ 169.0 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัส/อาหาร 1 กิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) ในขณะที่ปริมาณ DIP ที่ถูกชะละลายจากอาหารกุ้งขาวมีเพียง 63.6 และ 69.0 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัส/อาหาร 1 กิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ สำหรับปริมาณฟอสฟอรัสรูปแบบอื่นที่ถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำทั้งสามชนิดแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยของปริมาณฟอสฟอรัสรูปแบบต่าง ๆ ที่ถูกชะละลายจากอาหารกุ้งขาว ปลานิล และปลาดุก ที่เวลา 30 และ 60 นาที (หน่วย : มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัส/อาหาร 1 กิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง))

ชนิด	30 นาที					60 นาที				
	DIP	DOP	PIP	POP	TP	DIP	DOP	PIP	POP	TP
อาหารกุ้งขาว	63.6_{c}	4.8_{b}	9.7_{b}	4.4_{b}	82.5	69.0_{c}	n.d.	8.0_{b}	5.5_{c}	82.5
อาหารปลานิล	97.5_{b}	46.4_{a}	49.7_{a}	70.7_{a}	264.3	169.0_{b}	26.5_{a}	49.0_{a}	80.5_{a}	325.0
อาหารปลาดุก	172.2_{a}	66.4_{a}	54.9_{a}	38.5_{a}	332.0	246.8_{a}	20.0_{a}	54.5_{a}	16.3_{b}	337.6

หมายเหตุ : ตัวอักษรต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) n.d. = non detected

3. ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกปลดปล่อยต่อผลผลิตสัตว์น้ำ

ผลการคำนวณพบว่าปริมาณฟอสฟอรัสรวมที่ถูกน้ำชะละลายออกจากอาหารที่ใช้เลี้ยงกุ้งขาว ปลานิล และปลาดุก ต่อวัน มีค่าเท่ากับ 2.48 7.93 และ 9.96 กรัม-ฟอสฟอรัส/สัตว์น้ำ หนัก 1,000 กิโลกรัม ตามลำดับ โดยในจำนวนนี้

เป็นฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูป DIP มีปริมาณเท่ากับ 1.91 2.93 และ 5.17 กรัม-ฟอสฟอรัส/สัตว์น้ำ หนัก 1,000 กิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับปริมาณฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปแบบอื่น แสดงรายละเอียดในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกน้ำชะละลายออกจากอาหารสัตว์น้ำออกสู่สิ่งแวดล้อมต่อวัน
(หน่วย : กรัม-ฟอสฟอรัส/สัตว์น้ำ หนัก 1,000 กิโลกรัม)

ชนิด	DIP	DOP	PIP	POP	TP
อาหารกุ้งขาว	1.91	0.14	0.29	0.13	2.48
อาหารปลานิล	2.93	1.39	1.49	2.12	7.93
อาหารปลาดุก	5.17	1.99	1.65	1.16	9.96

หมายเหตุ : ใช้ค่าปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำที่เวลา 30 นาที ในการคำนวณ

วิจารณ์ผลการวิจัย

ผลการศึกษาในครั้งนี้ที่พบฟอสฟอรัสถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำสำเร็จรูปที่ใช้ในการทดลอง สอดคล้องกับผลการศึกษาในอดีต เช่น Wu *et al.* (2012) รายงานการพบฟอสฟอรัสถูกน้ำชะละลายออกจากอาหารสำเร็จรูปที่ใช้เลี้ยงสัตว์น้ำ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Sales *et al.* (2003) ที่รายงานปริมาณ TP ที่ถูกน้ำชะละลายออกมาจากอาหารสำเร็จรูปที่ใช้เลี้ยงหอยเป๋าฮื้อ โดยมีค่าสูงถึงร้อยละ 43.5-50.0 ของปริมาณฟอสฟอรัสที่เติมลงไปในอาหาร อย่างไรก็ตาม ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำสำเร็จรูปทั้งสามชนิด มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) โดยปริมาณ TP ที่ถูกชะละลายจากอาหารปลานิลและปลาดุกมีค่าสูงกว่าอาหารกุ้งขาว ซึ่งความแตกต่างของปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำสำเร็จรูปที่พบในการศึกษาครั้งนี้ ส่วนหนึ่งอาจเป็นผลมาจากความแตกต่างของรูปแบบอาหาร โดย Garcia-Ruiz & Hall (1996) พบว่าความแตกต่างของรูปแบบอาหารมีผลต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายออกมา โดยปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำที่คงสภาพเป็นเม็ดสมบูรณ์มีค่าต่ำกว่าอาหารชนิดเดียวกันที่ถูกทำให้แตกหักเสียหาย ซึ่งอาหารกุ้งขาวที่ขายในท้องตลาดและใช้ในการทดลองครั้งนี้เป็นอาหารเม็ดจมที่มีลักษณะเป็นเม็ดแน่นและแข็ง เพื่อให้อาหารมีความคงตัวในน้ำได้นานไม่น้อยกว่า 1-2 ชั่วโมง ตามลักษณะการกินของกุ้งขาวที่จะกัดแทะอาหาร ในขณะที่อาหารปลานิลและปลาดุกที่ขายในท้องตลาดเป็นอาหารเม็ดลอยน้ำ โดยเม็ดอาหารจะมีลักษณะเป็นรูพรุนเพื่อให้อาหารสามารถลอยอยู่บนน้ำได้ ซึ่งอาจส่งผลทำให้น้ำสามารถชะละลายฟอสฟอรัสออกจากอาหารปลาทั้งสองชนิดได้มากกว่าอาหารกุ้งขาว อีกส่วนหนึ่งอาจเป็นผลมาจากความแตกต่างของวัตถุดิบที่เป็นแหล่งฟอสฟอรัสที่ผสมลงในอาหารสัตว์น้ำ โดย Morales *et al.* (2018) รายงานว่าแหล่งฟอสฟอรัสที่ใช้ในการผลิตอาหารสำเร็จรูปปลาเทร้าท์มีผลต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายจากอาหารที่ใช้ฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูป Mono-calcium phosphate ผสมในอาหารจะมีค่าต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับอาหารที่ใช้ฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูป Mono-sodium phosphate และ Mono-ammonium phosphate ผสมในอาหาร เช่นเดียวกับรายงานการศึกษาของ Davis & Arnold (1994) ที่พบว่าปริมาณ DIP ที่ถูกชะละลายออกมาจากอาหารกุ้งขาว มีค่าผันแปรอยู่ในช่วง 81.8-2,316.7 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัส/อาหาร 1 กิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งความผันแปรที่พบนี้เป็นผลมาจากความแตกต่างของวัตถุดิบที่เป็นแหล่งฟอสฟอรัสที่ผสมลงในอาหาร โดยฟอสฟอรัสที่ผสมในอาหารที่อยู่ในรูป Sodium phosphate monobasic จะถูกชะละลายออกมาได้มากที่สุด ในขณะที่ฟอสฟอรัสที่ผสมในอาหารที่อยู่ในรูป Calcium phosphate tribasic จะถูกชะละลายออกมาได้น้อยที่สุด อย่างไร

ก็ตามการศึกษาในครั้งนี้ไม่ได้ศึกษาความแตกต่างของวัตถุดิบที่เป็นแหล่งฟอสฟอรัสที่ผสมลงในอาหารสัตว์น้ำที่ใช้ในการทดลอง

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพบว่ารูปแบบของฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำสำเร็จรูปที่ใช้ในการทดลองมีทั้งที่อยู่ในรูปสารละลาย (Dissolved Form) และรูปตะกอนแขวนลอย (Particulate Form) โดยฟอสฟอรัสในรูป DIP เป็นรูปแบบฟอสฟอรัสสำคัญที่ถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Pasugdee *et al.* (2006) ที่พบว่าฟอสฟอรัสในรูป DIP เป็นรูปแบบของฟอสฟอรัสสำคัญที่ถูกชะละลายจากอาหารกุ้งก้ามกราม โดยปริมาณ DIP ที่ถูกชะละลายออกมาเทียบกับปริมาณ TP เมื่อแช่อาหารในน้ำนาน 30 และ 60 นาที มีค่าเท่ากับร้อยละ 91.2 และ 93.1 ตามลำดับ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Yenmak *et al.* (2003) ที่รายงานว่าเมื่อนำอาหารปลาช่อนแช่ในน้ำนาน 30 นาที จะทำให้ฟอสฟอรัสในรูป DIP ถูกชะละลายออกมามีความเข้มข้นเท่ากับ 0.14 มิลลิกรัม/ลิตร หรือคิดเป็นร้อยละ 70 ในขณะที่ฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปอื่นมีความเข้มข้นเพียง 0.06 มิลลิกรัม/ลิตร หรือเท่ากับร้อยละ 30 อย่างไรก็ตามผลการศึกษาในครั้งนี้แตกต่างจากผลการศึกษาของ Garcia-Ruiz & Hall (1996) ที่พบว่าฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปตะกอนแขวนลอยเป็นรูปแบบฟอสฟอรัสสำคัญที่ถูกชะละลายจากอาหารสำเร็จรูปที่ใช้เลี้ยงปลาเทร้าท์ (*Onchorhynchus mykiss*) โดยฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปตะกอนแขวนลอยที่ถูกชะละลายออกมามีค่าประมาณร้อยละ 70 ในขณะที่ฟอสฟอรัสในรูป DIP และ DOP ถูกชะละลายออกมามีสัดส่วนเพียงร้อยละ 26 และ 1.7 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณ DIP ที่ถูกชะละลายกับรายงานการศึกษาในอดีต พบว่าปริมาณ DIP ที่ถูกชะละลายจากอาหารกุ้งขาวมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับผลการศึกษาของ Davis & Arnold (1994) ที่พบว่าปริมาณ DIP ที่ถูกชะละลายจากอาหารกุ้งขาวที่ใช้ Calcium phosphate tribasic เป็นแหล่งฟอสฟอรัส มีค่าอยู่ในช่วง 81.8 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัส/อาหาร 1 กิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) อย่างไรก็ตามไม่มีข้อมูลสำหรับใช้ในการเปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสในรูปแบบอื่นที่ถูกชะละลายที่พบในการศึกษานี้

Sornsupharp (2003) ศึกษาการขับถ่ายฟอสฟอรัสรวมจากการเลี้ยงปลานิลแดง โดยทำการทดลองกับปลานิลแดง 3 ขนาด ผลการศึกษาพบว่าปริมาณฟอสฟอรัสรวมที่ปลานิลแดงขับถ่ายออกสู่สิ่งแวดล้อมต่อวัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 24,000 – 144,000 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัส/สัตว์น้ำ หนัก 1,000๐ กิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าปริมาณฟอสฟอรัสรวมที่ถูกน้ำชะละลายออกจากอาหารที่ใช้ในการทดลองที่คำนวณได้ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 2,475-9,960 มิลลิกรัม-ฟอสฟอรัส/สัตว์น้ำหนัก 1,000 กิโลกรัม ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ Phillips *et al.* (1993) ที่ระบุว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการเลี้ยงจะมีสัดส่วนมากกว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายออกจากอาหารสัตว์น้ำ อย่างไรก็ตามผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถระบุว่าฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำส่วนใหญ่เป็นฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูป DIP ซึ่งเป็นรูปแบบของฟอสฟอรัสที่แพลงก์ตอนพืชสามารถนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต และเพิ่มจำนวน นอกจากนี้ยังมีฟอสฟอรัสรูปแบบอื่นที่แม้ว่าจะไม่มีบทบาทโดยตรงต่อแพลงก์ตอนพืช แต่ฟอสฟอรัสเหล่านี้จะมีหน้าที่เป็นแหล่งฟอสฟอรัสสำรอง และกลับมามีบทบาทเป็นแหล่งให้ฟอสฟอรัสแก่แพลงก์ตอนพืชในแหล่งน้ำได้ เมื่อปริมาณ DIP ในแหล่งน้ำมีไม่เพียงพอ หรือแหล่งน้ำมีสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป

สรุปผลการวิจัย

แม้ว่าอุตสาหกรรมการเลี้ยงสัตว์น้ำจะเป็นธุรกิจการเกษตรที่สำคัญของประเทศไทย แต่กิจการดังกล่าวสามารถก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นความท้าทายให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องต้องหาแนวทางในการทำให้กิจการดังกล่าวเกิดความยั่งยืนทั้งด้านธุรกิจและสิ่งแวดล้อมควบคู่กันไป ผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่ามีฟอสฟอรัสถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำสำเร็จรูปที่ใช้ทำการทดลองทั้งสามชนิด โดยปริมาณ TP ที่ถูกชะละลายจากอาหารปลานิลและปลาดุกมีค่าสูงกว่าอาหาร

กุ้งขาวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) ทั้งที่เวลา 30 และ 60 นาที นอกจากนี้ยังพบว่าฟอสฟอรัสในรูป DIP เป็นรูปแบบฟอสฟอรัสสำคัญที่ถูกชะละลายจากอาหารสัตว์น้ำทั้งสามชนิด และเมื่อนำผลการศึกษามาคำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกน้ำชะละลายออกจากอาหารสัตว์น้ำ พบว่าจะมีฟอสฟอรัสถูกน้ำชะละลายออกจากอาหารที่ใช้เลี้ยงกุ้งขาว ปลานิล และปลาดุก ในหนึ่งวัน มีค่าเท่ากับ 2.48 7.93 และ 9.96 กรัม-ฟอสฟอรัส/สัตว์น้ำ หนัก 1,000 กิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งฟอสฟอรัสที่ถูกน้ำชะละลายเหล่านี้จะสะสมอยู่ในบ่อเลี้ยงและรวมกับฟอสฟอรัสที่จะเกิดขึ้นในวันถัดไป และถูกระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมเมื่อเกษตรกรมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ แต่หากเป็นการเลี้ยงสัตว์น้ำในกระชังฟอสฟอรัสเหล่านี้จะออกสู่สิ่งแวดล้อมทันทีที่เกษตรกรให้อาหารแก่สัตว์น้ำ และสามารถก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิดปรากฏการณ์สาหร่ายสะพรั่ง เนื่องจากส่วนใหญ่เป็นฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูป DIP ซึ่งเป็นฟอสฟอรัสที่แพลงก์ตอนพืชสามารถนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย สำหรับนักวิจัยรุ่นใหม่ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

เอกสารอ้างอิง

Alonso-Rodriquez, R. & Páez-Osuna F. (2003). Nutrients, phytoplankton and harmful algal blooms in shrimp ponds: a review with special reference to the situation in the Gulf of California. *Aquaculture, 219,* 317-336.

Anderson, D. M., Burkholder, J. M., Cochlan, W. P., Glibert, P. M., Gobler, C. J., Heil, C. A., Kudela, R. M., Parsons, M. L., Rensel, J. E. J., Townsend, D. W., Trainer, V. L., & Vargo G. A. (2008). Harmful algal blooms and eutrophication: Examining linkages from selected coastal regions of the United States. *Harmful Algae, 8,* 39–53.

Asahi, T., Ichimi, K., Yamaguchi, H., & Tada, K. (2014). Horizontal distribution of particulate matter and its characterization using phosphorus as an indicator in surface coastal water, Harima-Nada, the Seto Inland Sea, Japan. *Journal of Oceanography, 70,* 277-287.

Aspila, K.I., Agemian, H., & Chau, A.S.Y. (1976). A semi-automated method for the determination of inorganic, organic and total phosphate in sediments. *Analyst, 101,*187-197.

Chuapoehuk, W. (2000). *Aquatic Nutrition and Aquatic Feeding*. (2nd edition). Bangkok: Kasetsart University. (in Thai)

Davis, D.A., & Arnold, C.R. (1994). Estimation of apparent phosphorus availability from inorganic phosphorus sources for *Penaeus vannamei*. *Aquaculture, 127,* 245-254.

Department of Fisheries. (2016). *Fisheries Statistics of Thailand 2016*. Bangkok: Department of Fisheries. (in Thai)

Fernandez-Jover, D., Sanchez-Jerez, P., Bayle-Sempere, J., Carratala, A., & Leon V.M. (2007). Addition of dissolved nitrogen and dissolved organic carbon from fish faeces and food around Mediterranian fish farms: Implications for waste-dispersal models. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 340,* 160-168.

Garcia-Ruiz, R., & Hall, G.H. (1996). Phosphorus fractionation and mobility in the food and faeces of hatchery reared rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture, 145,* 183-193.

Huang, X.L., & Zhang, J.Z. (2009). Neutral persulfate digestion at sub-boiling temperature in an oven for total Dissolved phosphorus determination in natural waters. *Talanta, 78,* 1129-1135.

Kosutarak, P. (2016). *Assessment of Commercial Aquafeed Quality According to the Animal Feed Quality Control Act*. Bangkok: Department of Fisheries. (in Thai)

Koydon, S. (2014). Nitrogen elimination in zero waste aquaculture system. *RMUTSB Academic Journal, 2,* 66-80. (in Thai)

Lin, P., & Guo, L. (2016). Dynamic changes in the abundance and chemical speciation of dissolved and particulate phosphorus across the river-lake interface in southwest Lake Michigan. *Limnology and Oceanography, 61*, 771-789.

Lin, P., Klump, V.J., & Guo, L. (2016). Dynamics of dissolved and particulate phosphorus influenced by seasonal hypoxia in Green Bay, Lake Michigan. *Science of the Total Environment, 541,* 1070-1082.

Lirdwitayaprasit, T., Meksumpun, S., Rungsupa S., & Furuya, K. (2006). Seasonal variations in cell abundance of *Noctiluca scintillans* in the coastal waters off Chonburi Province, the upper Gulf of Thailand. *Coastal Marine Science, 30,* 80–84.

Loh, A.N., & Bauer, J.E. (2000). Distribution, partitioning and fluxes of dissolved and particulate organic C, N and P in the eastern North Pacific and Southern Oceans. Deep Sea Research Part I. *Oceanographic Research Papers, 47,* 2287-2316.

Morales, G., Azcuy, R.L., Casaretto, M.E., Márquez, L., Hernández, A.J., Gómez, F., Koppe, W., & Mereu, A. (2018). Effect of different inorganic phosphorus sources on growth performance, digestibility, retention efficiency and discharge of nutrients in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture, 495,* 568-574.

Murphy, J., & Riley J.P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta, 27,* 31-36.

Nóbrega, G.N., Otero, X.L., Macías, F., & Ferreira, T.O. (2014). Phosphorus geochemistry in a Brazilian semiarid mangrove soil affected by shrimp farm effluents. *Environmental Monitoring Assessment, 186,* 5749-5762.

Obaldo, L.G., Divakaran, S., & Tacon, A.G. (2002). Method for determining the physical stability of shrimp feed in water. *Aquaculture Research, 33,* 369-377.

Parson, T.R., Maita, Y., & Lalli, C.M. (1984). *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Oxford: Pergamon Press.

Pasugdee, S., Tarptipwan, P., Jintasathaporn, O. & Na-nakorn, U. (2006). Waste output and loading in prawn (*Macrobrachium rosenbergii* De Man) culture at different sizes and feeding frequency. *Kasetsart Journal, 40,* 269-275.

Phillips, M.J., Clarke, R., & Mowat, A. (1993). Phosphorus leaching from Atlantic salmon diets. *Aquaculture Engineering, 12(1),* 47-54.

Rixen, T., Baum, A., Pohlmann, T., Balzer, W., Samiaji, J., & Jose, C. (2008). The Siak, a tropical black water river in central Sumatra on the verge of anoxia. *Biogeochemistry, 90,* 129–140.

Sales, J., Britz, P.J., & Viljoen, J. (2003). Dietary phosphorus leaching and apparent phosphorus digestibility from different inorganic phosphorus sources for South African abalone (*Haliotis midae* L.). *Aquaculture Nutrition, 9,* 169-174.

Somsap, N., Gajaseni, N., & Piumsomboon, A. (2015). Physico-Chemical Factors Influencing Blooms of *Chaetoceros* spp. and *Ceratium furca* in the Inner Gulf of Thailand. *Kasetsart Journal (Nat. Sci.), 49,* 200 – 210.

Sornsupharp, B., Tabthipwan, P., Jintasathaporn, O., Mahasawat, S., & Ingthamjitr, S. (2003). Utilization and Excretion of Dietary Nitrogen and Phosphorus in Red Tilapia (*Oreochromis* spp.). In *Proceeding of the 41st Kasetsart University Annual Conference*. (pp. 69-77). Kasetsart University. (in Thai)

Sornsupharp, B. (2003). *Utilization and Excretion of Dietary Nitrogen and Phosphorus in Red Tilapia (Oreochromis spp.)*. Master's Thesis, Kasetsart University. (in Thai)

Suzumura, M., Kokubun, H. & Arata, N. (2004). Distribution and characteristics of suspended particulate matter in a heavily eutrophic estuary, Tokyo Bay, Japan, *Marine Pollution Bulletin, 49,* 496-503.

Watson, A.M., Barrows, F.T., & Place, A.R. (2015). Leaching of taurine from commercial type aquaculture feeds. *Aquaculture Research, 46,* 1510-1517.

Wu, M., Huang, S., Zang, C., Du, S., & Scholz, M. (2012). Release of nutrient from fish food and effects on *Microcystis aeruginosa* growth. *Aquaculture Research, 43,* 1460-1470.

Yenmak, S., Jintasataporn, O., & Tabthipwon, P. (2005). Efficiency of nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) for treated wastes from snakehead fish (*Channa striata*) diet. In *Proceeding of the 43th Kasetsart University Annual Conference*. (pp. 108-119) Kasetsart University. (in Thai)