



## ปริมาณและรูปแบบของฟอสฟอรัสในดินตะกอนทะเลผิวหน้าในอ่าวไทยตอนใน Abundance and Chemical Speciation of Phosphorus in Marine Surface Sediment of the Inner Gulf of Thailand

มารุต สุขสมจิตร<sup>1\*</sup>, ไตรเทพ วิชย์โกวิทเทน<sup>1</sup>, ภาณุวัฒน์ ชาติยาภา<sup>2</sup>, พัชชา ลีละกุล<sup>3</sup> และ สราวุธ ศรีทองอุทัย<sup>3</sup>  
Marut Suksomjit<sup>1\*</sup>, Tritep Vichkovitten<sup>1</sup>, Panuwat Chatyapa<sup>2</sup>, Patcha Leelakul<sup>3</sup> and Sarawut Srithongouthai<sup>3</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

<sup>2</sup>สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดสมุทรสาคร

<sup>3</sup>ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<sup>1</sup>Department of Environmental Science, Faculty of Science and Technology, Thammasat University

<sup>2</sup>Provincial Office of Natural Resources and Environment Samut Sakhon

<sup>3</sup>Department of Environmental Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University

Received : 27 April 2022

Revised : 6 June 2022

Accepted : 2 August 2022

### บทคัดย่อ

ดินตะกอนทะเลถูกระบุว่าเป็นแหล่งปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่สำคัญ ซึ่งการปลดปล่อยขึ้นกับรูปแบบของฟอสฟอรัสที่มีในดินตะกอนทะเล การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทราบปริมาณ รูปแบบของฟอสฟอรัสในดินตะกอนทะเลผิวหน้าในอ่าวไทยตอนใน ดำเนินการโดยเก็บตัวอย่างดินตะกอนทะเลผิวหน้าจาก 10 สถานี ในเดือนกรกฎาคม (ช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้) และธันวาคม (ช่วงลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ) พ.ศ. 2560 ผลการศึกษาพบว่าปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในดินตะกอนทะเลผิวหน้าในเดือนกรกฎาคม และธันวาคม มีค่าอยู่ในช่วง 4.41 - 17.84 และ 2.74 - 16.28  $\mu\text{mol g}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งแปรผกผันกับความลึกน้ำ ฟอสฟอรัสในดินตะกอนทะเลส่วนใหญ่อยู่ในรูปฟอสฟอรัสอินทรีย์ ค่าเฉลี่ยของปริมาณฟอสฟอรัสอินทรีย์เปรียบเทียบกับปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด มีค่าเท่ากับร้อยละ  $67.0 \pm 0.13$  และ  $59.5 \pm 0.12$  และอาจถูกปลดปล่อยกลับคืนสู่แหล่งน้ำและมีบทบาทต่อผู้ผลิตขั้นต้นในบริเวณอ่าวไทยตอนใน นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสัดส่วน โมลาร์ระหว่างปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดและฟอสฟอรัสอินทรีย์ส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วง 106 - 800 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 781.5 และ 768.2 แสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์ที่พบในดินตะกอนทะเลผิวหน้าที่สำรวจพบในครั้งนี้มีแหล่งที่มาผสมกันระหว่างแหล่งที่มาจากแผ่นดินและจากแพลงก์ตอนพืชที่เกิดขึ้นในทะเล

**คำสำคัญ :** รูปแบบของฟอสฟอรัส ; ดินตะกอนทะเล ; อ่าวไทยตอนใน



### Abstract

Marine sediment is an important source of phosphorus (P). The fate of P in sediments is mostly controlled by the reactivity of different forms of P. The purpose of this study was to quantify the abundance and form of this element in surface marine sediment of the inner Gulf of Thailand. Surface sediment samples were collected from 10 stations in July (SW monsoon) and December (NE monsoon) 2017. The results showed that total P concentration in surface marine sediments ranged from 4.41 to 17.84 and 2.74 to 16.28  $\mu\text{mol g}^{-1}$  respectively which varied inversely to water depth. Inorganic P was the dominant P form in surface marine sediment with a mean value of  $67.0 \pm 0.13\%$  and  $59.5 \pm 0.12\%$  of total P and might be released to water and consequently influence the primary producer in the inner Gulf of Thailand. Molar ratio of TOC/organic P ranged from 1061 to 800 with a mean value of 781.5 and 768.2. Based on these ratios, organic matter obtained from the sediment samples suggested a mixing between terrestrial origin and phytoplankton in the sea.

**Keywords :** phosphorus form ; marine sediment ; Inner Gulf of Thailand



## บทนำ

อ่าวไทยตอนใน เป็นทะเลชายฝั่งน้ำตื้น ที่มีลักษณะเป็นอ่าวกึ่งปิด (Semi-enclosed) ครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่ชายฝั่งอำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี จนถึงแหลมช่องแสมสาร อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี ด้านทิศเหนือของอ่าวไทยตอนใน มีแม่น้ำขนาดใหญ่ 4 สายได้แก่ แม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำแม่กลอง แม่น้ำท่าจีน และแม่น้ำบางปะกง ซึ่งไหลผ่านพื้นที่ราบลุ่มที่เป็นแหล่งที่อยู่อาศัย ชุมชน และธุรกิจ รวมทั้งแหล่งทำการเกษตรและเลี้ยงสัตว์ ระบายน้ำลงสู่ทะเล น้ำจืดที่ระบายจากแม่น้ำเหล่านี้จะมีธาตุอาหารรวมทั้งดินตะกอนปะปนอยู่เป็นจำนวนมาก ส่งผลทำให้อ่าวไทยตอนในเป็นทะเลชายฝั่งที่มีความอุดมสมบูรณ์สูงแห่งหนึ่ง (Cheevaporn & Menasveta, 2003)

ฟอสฟอรัส เป็นหนึ่งในธาตุอาหารที่สำคัญในระบบนิเวศ Lin & Guo (2016) และ Lin *et al.* (2016) ระบุว่าฟอสฟอรัสเป็นปัจจัยจำกัดควบคุมปริมาณผู้ผลิตขั้นต้น (Primary producer) ในแหล่งน้ำ Somsap *et al.* (2015) ศึกษาปัจจัยทางกายภาพและเคมีที่มีผลต่อการเจริญของแพลงก์ตอนพืชกลุ่มไดอะตอม ได้แก่ *Chaetoceros* spp. และ *Ceratium furca* บริเวณเกาะสีชัง และพบว่าปริมาณ *Chaetoceros* spp. และ *C. furca* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณฟอสเฟตในน้ำ เพิ่มขึ้น Lirdwitayaprasit *et al.* (2006) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของประชากร *Noctiluca scintillans* บริเวณอ่าวไทยตอนใน ตั้งแต่ปากแม่น้ำบางปะกง ถึงอ่างศิลา จังหวัดชลบุรี และพบว่าประชากรของ *N. scintillans* มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำทะเล โดยฟอสฟอรัสที่พบในน้ำทะเลส่วนหนึ่งจะมีแหล่งที่มาจากน้ำจืดที่ระบายจากแม่น้ำ หรือแหล่งน้ำผิวดิน อีกส่วนหนึ่งจะเป็นฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากดินตะกอนทะเล

ดินตะกอนทะเล หมายถึงอนุภาคที่อาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่สะสมอยู่บริเวณพื้นท้องทะเล ดินตะกอนในทะเลส่วนหนึ่งมีที่มาจากดินหรือหินที่พังทลายรวมทั้งซากพืชซากสัตว์ และถูกพัดพาลงทะเล อีกส่วนหนึ่งจะเป็นซากของสิ่งมีชีวิตที่เกิดขึ้นภายในแหล่งน้ำแล้วตกตะกอนทับถมลงบนพื้นท้องน้ำ เช่น ซากแพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ ปะการัง (Meksumpun, 2005) ดินตะกอนทะเลนอกจากจะเป็นแหล่งที่อยู่อาศัย แหล่งอาหาร แหล่งสืบพันธุ์วางไข่ และที่หลบภัย ของสัตว์หน้าดินแล้ว ยังเป็นแหล่งสะสมเก็บกักตลอดจนเป็นแหล่งปลดปล่อยแร่ธาตุกลับคืนสู่แหล่งน้ำ Fisher *et al.* (1982) ระบุว่าฟอสฟอรัสที่จำเป็นต่อกระบวนการสร้างผลผลิตขั้นต้นในทะเลส่วนหนึ่งมีแหล่งกำเนิดจากดินตะกอนทะเล โดยมีสัดส่วนอยู่ในช่วงร้อยละ 28-35 Maneepong & Rakkhiaw (1998) ระบุว่าแหล่งที่มาของฟอสฟอรัสในน้ำทะเลในทะเลสาบสงขลาส่วนหนึ่งมีแหล่งที่มาจากดินตะกอนทะเล Srithongouthai *et al.* (2002) ระบุว่าดินตะกอนทะเลเป็นแหล่งเก็บกักและปลดปล่อยทั้งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสกลับคืนสู่แหล่งน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณทะเลชายฝั่งน้ำตื้น Srithongouthai & Tada (2015) รายงานว่าดินตะกอนทะเลเป็นแหล่งปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่สำคัญใน Seto Inland Sea ประเทศญี่ปุ่นโดยฟอสเฟตที่ถูกปลดปล่อยจากดินตะกอนทะเลกลับสู่น้ำผิวดิน (overlying water) มีค่าอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.08 mmol m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> โดย Koomklang *et al.* (2017) ระบุว่าอัตราการปลดปล่อยฟอสเฟตกลับสู่แหล่งน้ำจะขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ปริมาณสารอินทรีย์ กิจกรรมของสัตว์หน้าดินและแบคทีเรีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูปแบบของฟอสฟอรัสในดินตะกอน Labry *et al.* (2013) ระบุว่าในการอธิบายพลวัตของผู้ผลิตขั้นต้นในแหล่งน้ำใด ข้อมูลรูปแบบของฟอสฟอรัสมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในส่วนของประเทศไทยมีการศึกษารูปแบบของฟอสฟอรัสในดินตะกอนทะเลไม่มากนัก เช่น Thongra-ar *et al.* (2003) ศึกษาารูปแบบของฟอสฟอรัสในดินตะกอนทะเลบริเวณปากแม่น้ำและชายฝั่งทะเลตะวันออก ตั้งแต่ปากแม่น้ำบางปะกง ถึงจังหวัดตราด ในเดือนเมษายน และกรกฎาคม พ.ศ. 2544



การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทราบปริมาณและรูปแบบของฟอสฟอรัสในดินตะกอนทะเลบริเวณหน้าในอ่าวไทยตอนใน 2 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และช่วงลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ข้อมูลเหล่านี้จะทำให้ทราบถึงศักยภาพของดินตะกอนทะเลที่จะเป็นแหล่งปลดปล่อยฟอสฟอรัสกลับคืนสู่แหล่งน้ำ

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. การเก็บตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างดินตะกอนทะเลในอ่าวไทยตอนในจากสถานีต่างๆ 10 สถานี (ภาพที่ 1) ซึ่งกำหนดตามลักษณะสภาพของพื้นที่ท้องทะเลของอ่าวไทยตอนในที่มีความลาดมากในบริเวณฝั่งทะเลตะวันออก แบ่งเป็นสถานีเก็บตัวอย่างที่มีความลึกน้ำ 15 เมตร 4 สถานี (สถานี A1 - A4) สถานีเก็บตัวอย่างที่มีความลึกน้ำ 20 เมตร 3 สถานี (สถานี B1 - B3) และสถานีเก็บตัวอย่างที่มีความลึกน้ำ 25 เมตร 3 สถานี (สถานี C1 - C3) เก็บตัวอย่าง 2 ช่วงเวลา ในเดือนกรกฎาคม (ช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้) และ ธันวาคม (ช่วงลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ) พ.ศ. 2560 ด้วยเรือสำรวจเกษตรศาสตร์ 1 เก็บตัวอย่างดินตะกอนทะเลด้วยเครื่องตักหน้าดิน (Smith-McIntyre grab sampler) ขนาด 50 X 50 เซนติเมตร และใช้ชั้นพลาสติกตักตัวอย่างดินตะกอนทะเลที่ระดับผิว (ความลึก 0-1 เซนติเมตร) ทั้งหมด เก็บใส่ในถุงพลาสติกก่อนใส่อากาศออกจนหมด แห่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาขนส่งไปยังห้องปฏิบัติการ ก่อนนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อรอการตรวจวิเคราะห์

### 2. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

วิเคราะห์หาปริมาณและรูปแบบของฟอสฟอรัสในดินตะกอนทะเลในแต่ละสถานีโดยใช้เทคนิคการสกัดด้วยกรด (Acid Extraction Technique) ด้วยวิธี Combustion และ colorimetric ตามวิธีการของ Aspila *et al.* (1976) Loh & Bauer (2000) และ Suzumura *et al.* (2004) โดยสุ่มตักตัวอย่างดินตะกอนทะเลที่ผ่านการอบแห้ง และบดละเอียดจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว นำหนักประมาณ 1 กรัม นำดินใส่ในขวดแก้วทนความร้อนและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ก่อนนำไปสกัดด้วยสารละลายกรด HCl เข้มข้น 1 N นาน 12-16 ชั่วโมง นำสารละลายที่สกัดได้ไปตรวจวัดหาปริมาณฟอสเฟตตามวิธีการของ Murphy & Riley (1962) และ Strickland & Parsons (1972) ค่าที่ตรวจวัดได้จะเท่ากับปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus, TP) ทำการสุ่มตักตัวอย่างดินตะกอนทะเลอีกครั้ง นำดินส่วนที่สองใส่ในขวดแก้วทนความร้อนและนำไปสกัดด้วยสารละลายกรด HCl เข้มข้น 1 N นาน 12-16 ชั่วโมง นำสารละลายที่สกัดได้ไปตรวจวัดหาปริมาณฟอสเฟตตามวิธีการดังกล่าวข้างต้น ค่าที่ตรวจวัดได้จะเท่ากับปริมาณฟอสฟอรัสอนินทรีย์ (Inorganic Phosphorus, IP) คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสอินทรีย์ (Organic Phosphorus, OP) โดยคิดจากผลต่างระหว่าง TP และ IP

วิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total Organic Carbon, TOC) ในดินตะกอนทะเล ด้วยเครื่อง TOC analyzer (Analytik Jena, Multi N/C® 3100, Germany) โดยใช้เทคนิคการวัดแบบเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงเพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยดินตะกอนทะเลตัวอย่างจะต้องถูกนำไปกำจัดคาร์บอนเนตออกก่อนด้วยสารละลายกรด HCl เข้มข้น 1.2 N นาน 24 ชั่วโมง

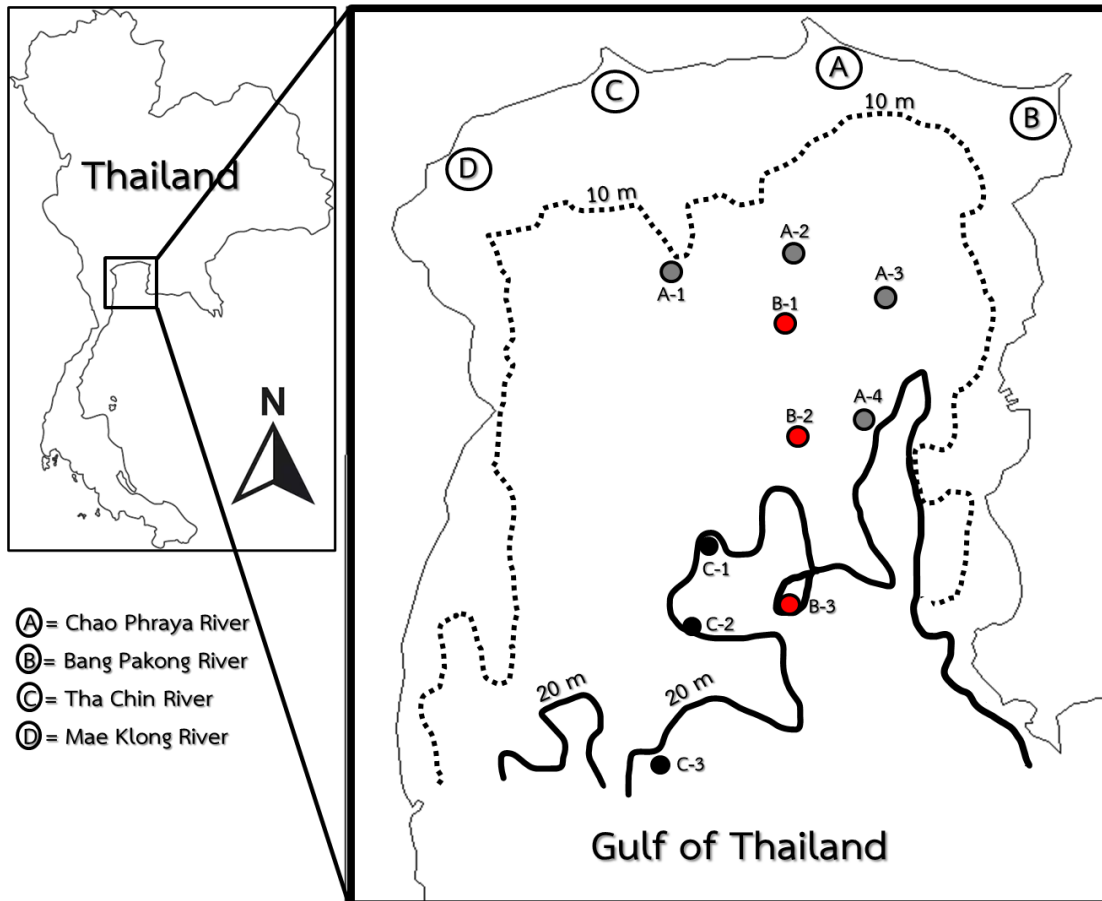


Figure 1 A map showing the sampling locations of marine surface sediment of the Inner Gulf of Thailand during July and December 2017, A = 15 m B = 20 m and C = 25 m of water depth

### 3. การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ความแตกต่างของปริมาณ TP เชิงเวลา โดยทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของประชากรสองกลุ่ม ด้วยวิธี T-test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel 2016 ตามวิธีการของ Yeanthanakul (2007) คำนวณค่าสัดส่วนระหว่าง IP และ OP และคำนวณค่าสัดส่วนโมลาร์ (Molar Ratio) ระหว่าง TOC และ OP หรือ TOC/OP ของดินตะกอนทะเล แต่ละตัวอย่างเพื่อระบุแหล่งที่มาของสารอินทรีย์ในดินตะกอนทะเลผิวน้ำ

## ผลการวิจัย

ผลการวิจัยพบว่าปริมาณ TP ในดินตะกอนทะเลผิวหน้าในอ่าวไทยตอนใน ที่เก็บตัวอย่างจากสถานีต่างๆ ในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2560 ซึ่งเป็นช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่เก็บในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2560 ซึ่งเป็นช่วงลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (ยกเว้นสถานี C-3) ดังรายละเอียดในตารางที่ 1 อย่างไรก็ตามเมื่อทดสอบความแตกต่างทางสถิติพบว่าปริมาณ TP ในดินตะกอนทะเลผิวหน้าในอ่าวไทยตอนในทั้งสองช่วงเวลาไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p = 0.36$ ) โดยค่าเฉลี่ยของปริมาณ TP ในดินตะกอนทะเลผิวหน้าที่เก็บตัวอย่างจากทั้งสองช่วงเวลามีค่าเท่ากับ  $8.81 \pm 4.33$  และ  $7.00 \pm 4.33 \mu\text{mol g}^{-1}$  ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาปริมาณ TP ในดินตะกอนทะเลผิวหน้าที่เก็บจากสถานีที่มีความลึกน้ำแตกต่างกัน (ภาพที่ 2) พบว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณ TP ในดินตะกอนทะเลผิวหน้าที่เก็บจากสถานีที่มีความลึกน้ำ 15 เมตร มีค่าสูงกว่าดินตะกอนทะเลผิวหน้าที่เก็บจากสถานีที่มีความลึกน้ำ 20 และ 25 เมตร โดยค่าเฉลี่ยของปริมาณ TP ที่เก็บจากสถานีที่มีความลึกน้ำ 15 เมตร ทั้งสองช่วงเวลา มีค่าเท่ากับ 11.72 และ 9.11  $\mu\text{mol g}^{-1}$  ในขณะที่ค่าเฉลี่ยของปริมาณ TP ที่เก็บจากสถานีที่มีความลึกน้ำ 20 และ 25 เมตร ทั้งสองช่วงเวลา มีค่าเท่ากับ 8.24, 6.06 และ 5.48, 5.11  $\mu\text{mol g}^{-1}$  ตามลำดับ

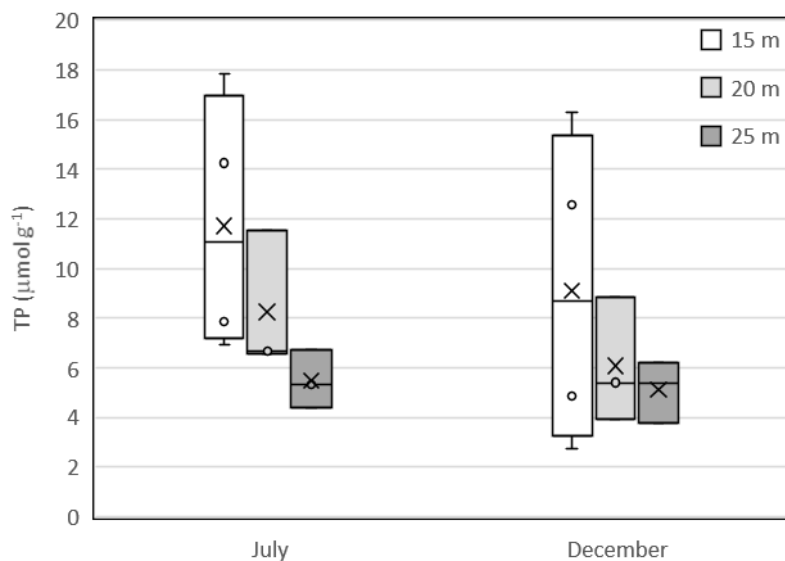
ในส่วนของคุณสมบัติของฟอสฟอรัสในดินตะกอนทะเลผิวหน้าในอ่าวไทยตอนใน ผลการวิจัยพบว่าปริมาณ IP และ OP ในดินตะกอนทะเลผิวหน้าที่เก็บตัวอย่างในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2560 มีค่าอยู่ในช่วง 2.58 – 11.10 และ 0.34-6.75  $\mu\text{mol g}^{-1}$  ตามลำดับ ในขณะที่ดินตะกอนทะเลผิวหน้าที่เก็บตัวอย่างในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2560 มีค่า IP และ OP อยู่ในช่วง 1.29 – 8.25 และ 0.65 – 8.03  $\mu\text{mol g}^{-1}$  ตามลำดับ สำหรับปริมาณ TOC ในดินตะกอนทะเลผิวหน้าที่เก็บตัวอย่างในเดือนกรกฎาคม และธันวาคม พ.ศ. 2560 ผลการวิจัยพบว่าค่าอยู่ในช่วง 943.8 – 1,725.1 และ 305.8 – 1,561.7  $\mu\text{mol g}^{-1}$  ตามลำดับ

ภาพที่ 3 แสดงค่าสัดส่วนระหว่าง IP และ OP ในดินตะกอนทะเลผิวหน้าในอ่าวไทยตอนใน ที่เก็บจากสถานีต่างๆ ในเดือนกรกฎาคม และธันวาคม พ.ศ. 2560 โดยรูปแบบของฟอสฟอรัสที่พบในดินตะกอนทะเลผิวหน้าที่เก็บตัวอย่างในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2560 อยู่ในรูป IP มากกว่าร้อยละ 50 ยกเว้นสถานี B-2 โดยค่าเฉลี่ยของปริมาณ IP เปรียบเทียบกับปริมาณ TP มีค่าเท่ากับร้อยละ  $67.0 \pm 0.13$  (46.7-95.1) ในขณะที่รูปแบบของฟอสฟอรัสที่พบในดินตะกอนทะเลผิวหน้าที่เก็บตัวอย่างในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2560 อยู่ในรูป IP มากกว่าร้อยละ 50 เช่นเดียวกัน ยกเว้นสถานี A-4 และ B-2 อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ยของปริมาณ IP เปรียบเทียบกับปริมาณ TP มีค่าต่ำกว่าผลการสำรวจในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2560 โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ  $59.5 \pm 0.12$  (47.1-87.9)

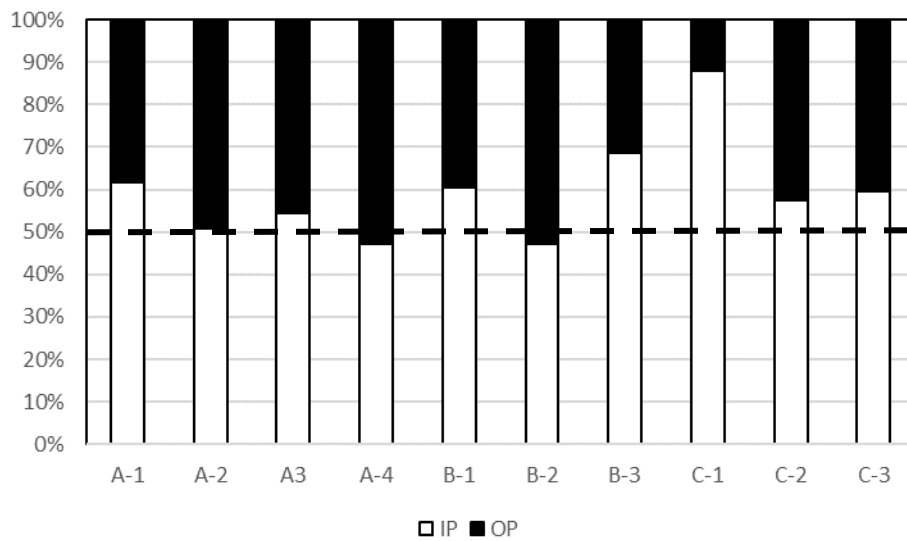
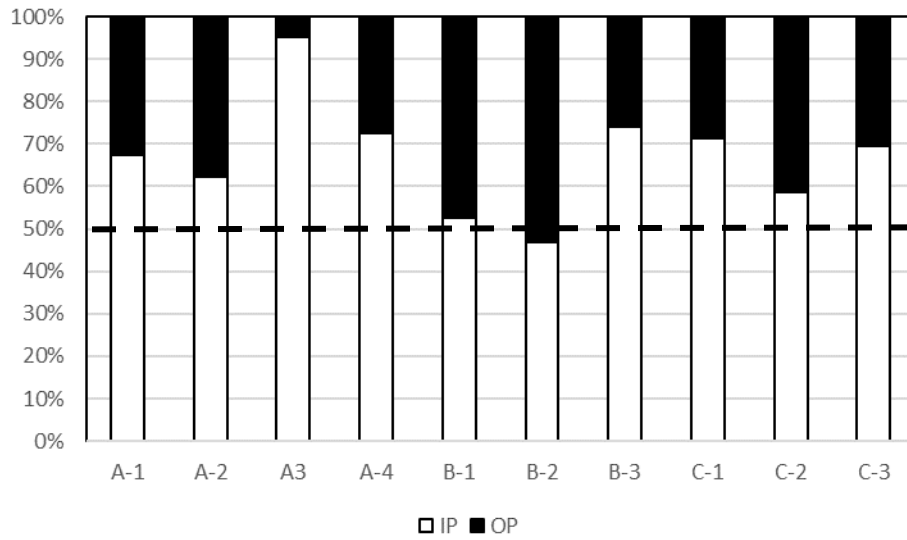
ในส่วนของคุณสมบัติของค่า TOC/OP ของดินตะกอนทะเลผิวหน้าที่เก็บตัวอย่างทั้งในเดือนกรกฎาคม และธันวาคม พ.ศ. 2560 ซึ่งใช้สำหรับระบุแหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ในดินตะกอนทะเลที่สำรวจ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 222.1 – 2,751.4 (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 781.5) และ 186.6 – 2,670.1 (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 768.2) ตามลำดับ โดยค่า TOC/OP ของสถานี A-2 ที่เก็บตัวอย่างทั้งในเดือนกรกฎาคม และธันวาคม มีค่าต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ 221.1 และ 186.6 ตามลำดับ สำหรับรายละเอียดของค่า TOC/OP ที่เก็บจากสถานีต่างๆ แสดงรายละเอียดในตารางที่ 2

**Table 1** The concentrations of TP IP OP and TOC of marine surface sediment of the Inner Gulf of Thailand during July and December 2017

Station	TP ( $\mu\text{mol g}^{-1}$ )		IP ( $\mu\text{mol g}^{-1}$ )		OP ( $\mu\text{mol g}^{-1}$ )		TOC ( $\mu\text{mol g}^{-1}$ )	
	Jul	Dec	Jul	Dec	Jul	Dec	Jul	Dec
A-1	14.25	12.57	9.60	7.76	4.65	4.80	1,474.5	1,166.7
A-2	17.84	16.28	11.10	8.25	6.75	8.03	1,498.9	1,561.7
A-3	6.94	4.86	6.60	2.65	0.34	2.21	943.8	660.8
A-4	7.86	2.74	5.69	1.29	2.17	1.45	1,253.3	387.5
B-1	11.51	8.85	6.06	5.35	5.44	3.50	1,340.2	1,142.5
B-2	6.55	3.95	3.06	1.86	3.49	2.09	1,268.4	800.0
B-3	6.66	5.40	4.93	3.70	1.73	1.70	1,207.7	305.8
C-1	6.71	5.36	4.78	4.71	1.93	0.65	1,725.1	598.3
C-2	4.41	3.79	2.58	2.18	1.83	1.61	1,470.4	1,086.7
C-3	5.33	6.19	3.70	3.68	1.63	2.51	1,538.8	1,111.7



**Figure 2** Box & whisker plot time variations of TP concentrations of marine surface sediment of the Inner Gulf of Thailand during July and December 2017, X = Average concentration



**Figure 3** Partitioning of IP and OP of marine surface sediment of the Inner Gulf of Thailand during July (upper) and December (below) 2017, Dash lines represent the partitioning which is 50% for IP and OP



**Table 2** TOC/OP ratios of marine surface sediment of the Inner Gulf of Thailand during July and December 2017

Station	TOC/OP	
	Jul	Dec
A-1	316.8	306.9
A-2	222.1	186.6
A-3	2,751.4	426.9
A-4	576.9	866.1
B-1	246.2	382.7
B-2	363.5	606.5
B-3	697.1	708.5
C-1	894.2	2,670.1
C-2	803.6	914.4
C-3	943.9	613.3

### วิจารณ์ผลการวิจัย

ปริมาณ TP ในดินตะกอนทะเลผิวหน้าในอ่าวไทยตอนในที่สำรวจ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 4.41-17.84  $\mu\text{mol g}^{-1}$  ในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2560 และ 2.74-16.28  $\mu\text{mol g}^{-1}$  ในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2560 โดยค่าที่พบอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าผลการศึกษาของ Thongra-ar *et al.* (2003) ที่ศึกษาในดินตะกอนทะเลบริเวณปากแม่น้ำและแนวชายฝั่งทะเลตะวันออก ตั้งแต่ปากแม่น้ำบางปะกง ถึงจังหวัดตราด ในเดือนเมษายน และกรกฎาคม พ.ศ. 2544 โดยปริมาณ TP ในดินตะกอนทะเลมีค่าผันแปรอยู่ในช่วง 7.80-83.36 และ 0.97-86.48  $\mu\text{mol g}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างของปริมาณ TP ในดินตะกอนทะเลส่วนหนึ่งอาจเป็นผลมาจากอิทธิพลจากแผ่นดินที่มีต่อทะเลในบริเวณนั้น บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากแผ่นดินผ่านการระบายน้ำจืดจากแม่น้ำลงสู่ทะเลมากก็จะมีปริมาณ TP สะสมในดินตะกอนมาก ซึ่งการศึกษาของ Thongra-ar *et al.* (2003) ศึกษาในบริเวณปากแม่น้ำและตามแนวชายฝั่ง แตกต่างจากการศึกษาในครั้งนี้ที่ศึกษาในบริเวณนอกแนวชายฝั่งทะเลซึ่งอยู่ไกลอิทธิพลจากแผ่นดินมากกว่า นอกจากนี้การพบปริมาณ TP ในดินตะกอนทะเลผิวหน้าลดลงตามความลึกน้ำของสถานีเก็บตัวอย่างจาก 15 ถึง 25 เมตร แสดงให้เห็นว่าสภาพของพื้นที่ท้องทะเล มีบทบาทต่อปริมาณ TP ที่สะสมในดินตะกอนทะเลผิวหน้า

ปริมาณ TP ในดินตะกอนทะเลผิวหน้าในอ่าวไทยตอนในที่ศึกษาได้ในครั้งนี้มีค่าใกล้เคียงกับทะเลชายฝั่งหลายพื้นที่ เช่น Zhuang *et al.* (2014) รายงานปริมาณ TP ที่พบในดินตะกอนทะเลในอ่าว Laizhou และทะเลชายฝั่งใกล้เกาะ Zhangzi ทางทิศ



เหนือของทะเลเหลือง ประเทศจีน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 10.19-18.79 และ 2.62-12.94  $\mu\text{mol g}^{-1}$  ตามลำดับ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Kang *et al.* (2017) ที่รายงานผลการศึกษาปริมาณ TP ในดินตะกอนทะเลในอ่าว Jiaozhou ประเทศจีน และพบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 6.22-15.36  $\mu\text{mol g}^{-1}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณ TP ในดินตะกอนทะเลในอ่าว Daya ประเทศจีน และอ่าว ฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา หรือ Yang *et al.* (2018) ศึกษาปริมาณ TP ในดินตะกอนทะเลทางตอนเหนือของทะเลจีนใต้ และพบว่าปริมาณ TP ที่สำรวจพบมีค่าอยู่ในช่วง 5.10-18-79  $\mu\text{mol g}^{-1}$  โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $13.32 \pm 3.67 \mu\text{mol g}^{-1}$  อย่างไรก็ตาม ปริมาณ TP ที่ในดินตะกอนทะเลผิวหน้าในอ่าวไทยตอนในที่ศึกษาได้ในครั้งนี้มีค่าต่ำกว่าทะเลชายฝั่งบางพื้นที่ เช่น Yamada & Kayama (1987) รายงานว่าปริมาณ TP ที่พบในดินตะกอนทะเลในทะเล Seto ประเทศญี่ปุ่น มีค่าอยู่ในช่วง 24.83-32.41  $\mu\text{mol g}^{-1}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณ TP ที่พบในดินตะกอนทะเลบริเวณอ่าว Beppu ที่มีค่าอยู่ในช่วง 20.77-22.70  $\mu\text{mol g}^{-1}$  หรือบริเวณ Hiuchi Nada และ Suo Nada ที่มีค่าอยู่ในช่วง 16.93-22.87  $\mu\text{mol g}^{-1}$  เช่นเดียวกับการศึกษาของ Zhou *et al.* (2016) ที่ระบุว่าปริมาณ TP ในดินตะกอนทะเลที่พบในทะเลจีนตะวันออกมีค่าอยู่ในช่วง 10.45-26.14  $\mu\text{mol g}^{-1}$

ในส่วนของรูปแบบของฟอสฟอรัส ผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่ารูปแบบสำคัญของฟอสฟอรัสในดินตะกอนทะเลผิวหน้าในอ่าวไทยตอนในส่วนใหญ่อยู่ในรูป IP ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Thongra-ar *et al.* (2003) ที่ระบุว่ารูปแบบของฟอสฟอรัสของดินตะกอนทะเลที่สำรวจบริเวณปากแม่น้ำและแนวชายฝั่งทะเลตะวันออก ตั้งแต่ปากแม่น้ำบางปะกง ถึงจังหวัดตราด ส่วนใหญ่อยู่ในรูป IP นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Kang *et al.* (2017) ที่รายงานว่า IP เป็นรูปแบบสำคัญของฟอสฟอรัสที่พบในดินตะกอนทะเลบริเวณอ่าว Jiaozhou ประเทศจีน โดยค่าสัดส่วนของ IP เมื่อเปรียบเทียบกับ TP มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 72.1-92.9 รวมทั้งผลการศึกษาของ Bastami *et al.* (2018) ที่พบว่าสัดส่วนของ IP เมื่อเปรียบเทียบกับ TP ในดินตะกอนทะเลบริเวณตอนใต้ของทะเลแคสเปียน โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 81.9-88.5

เมื่อพิจารณาสัดส่วนของ IP ที่สำรวจพบในดินตะกอนทะเลผิวหน้าในอ่าวไทยตอนในกลับพบว่า มีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาในพื้นที่อื่น โดยสัดส่วนของ IP เปรียบเทียบกับ TP ที่พบมีค่าเฉลี่ยเพียงร้อยละ  $67.0 \pm 0.13$  ในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2560 และลดลงเหลือเพียงร้อยละ  $59.5 \pm 0.12$  ในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2560 ซึ่ง Yamada & Kayama (1987) ระบุว่าสาเหตุส่วนหนึ่งอาจเป็นผลมาจากต้นกำเนิดของดินตะกอนในทะเล Meksumpun (2005) ระบุว่าต้นกำเนิดของดินตะกอนทะเลส่วนหนึ่งมีที่มาจากดินหรือหินที่พังทลายรวมทั้งซากพืชซากสัตว์และถูกพัดพาจากแผ่นดินลงสู่ทะเล อีกส่วนหนึ่งจะเป็นซากของสิ่งมีชีวิตที่เกิดขึ้นภายในแหล่งน้ำแล้วตกตะกอนทับถมลงบนพื้นท้องน้ำ ดังนั้นการที่พบสัดส่วนของ IP ในดินตะกอนทะเลผิวหน้าในอ่าวไทยตอนในมีค่าต่ำ แสดงว่าในบริเวณดังกล่าวมีการสะสมของซากของสิ่งมีชีวิตทั้งที่ถูกพัดพาจากแผ่นดินและซากแพลงก์ตอนพืชแพลงก์ตอนสัตว์ ที่เกิดขึ้นภายในแหล่งน้ำ ส่งผลทำให้ปริมาณ OP ในดินตะกอนทะเลผิวหน้ามีค่าสูง นอกจากนี้การลดลงของสัดส่วนของ IP เปรียบเทียบกับ TP ในเดือนธันวาคม ยังสอดคล้องกับรายงานการเกิดปรากฏการณ์สาหร่ายสีเขียวอย่างรุนแรงในหลายพื้นที่ของอ่าวไทยตอนใน สะท้อนถึงอิทธิพลจากปรากฏการณ์สาหร่ายสีเขียวต่อรูปแบบของฟอสฟอรัสในดินตะกอนทะเลผิวหน้า

ข้อมูลรูปแบบของฟอสฟอรัสที่ได้จากการศึกษานี้ สามารถระบุว่าดินตะกอนทะเลผิวหน้าในอ่าวไทยตอนในมีศักยภาพที่จะเป็นแหล่งปลดปล่อยฟอสฟอรัสกลับคืนสู่แหล่งน้ำที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่ง เนื่องจากรูปแบบของฟอสฟอรัสมากกว่าร้อยละ 50



อยู่ในรูป IP ซึ่ง Labry *et al.* (2013) ระบุว่าปริมาณ IP ที่ตรวจวัดได้จะแสดงถึงปริมาณของหินแร่ที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบร่วมกับฟอสฟอรัสที่เกาะอยู่กับอนุภาค หรือเกาะอยู่บริเวณผิวของสารอินทรีย์ เช่น สิ่งมีชีวิต เศษซากของสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจถูกปลดปล่อยกลับคืนสู่แหล่งน้ำได้ อย่างไรก็ตามการปลดปล่อยฟอสเฟตกลับคืนสู่แหล่งน้ำจะขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อมต่างๆ เช่น pH ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Wu *et al.*, 2014) อุณหภูมิ ปริมาณสารอินทรีย์ กิจกรรมของสัตว์หน้าดินและแบคทีเรีย (Koomklang *et al.*, 2017)

เมื่อพิจารณาค่า TOC/OP ของดินตะกอนทะเลบริเวณน้ำที่เก็บตัวอย่างในบริเวณอ่าวไทยตอนในทั้งในเดือนกรกฎาคม และ ธันวาคม ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2 พบว่ามีค่า TOC/OP ผันแปรอยู่ในช่วง 222.1 – 2,751.4 และ 186.6 – 2,670.1 ตามลำดับ ซึ่ง Ruttenberg & Goñi (1997) ได้ศึกษาสัดส่วนของคาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ในสารอินทรีย์ในดินตะกอนทะเลปากแม่น้ำอะเมซอน และระบุว่าค่า TOC/OP ของดินตะกอนทะเลสามารถชี้ให้เห็นแหล่งกำเนิดของดินตะกอนนั้นได้ โดยดินตะกอนทะเลที่มีค่า TOC/OP มากกว่า 800 แสดงว่าสารอินทรีย์ในดินตะกอนเหล่านั้นมีแหล่งที่มาจากซากพืชที่ถูกพัดพาจากแผ่นดินลงสู่ทะเล แต่สารอินทรีย์ในดินตะกอนทะเลที่มีต้นกำเนิดมาจากซากของแพลงก์ตอนพืชที่เกิดขึ้นภายในทะเลก่อนที่จะตายและตกตะกอนที่บดลงบนพื้นท้องน้ำ จะมีค่า TOC/OP เท่ากับ 106 (Redfield *et al.* 1963) อย่างไรก็ตามหากดินตะกอนทะเลมีค่า TOC/OP อยู่ในช่วง 106 ถึง 800 แสดงว่าสารอินทรีย์ในดินตะกอนเหล่านั้นจะมีต้นกำเนิดผสมผสานกันระหว่างแหล่งที่มาจากแผ่นดินและจากซากของแพลงก์ตอนพืชที่เกิดขึ้นภายในทะเล ซึ่งผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าสารอินทรีย์ในดินตะกอนทะเลบริเวณน้ำในอ่าวไทยตอนในส่วนใหญ่มีแหล่งที่มาผสมผสานกันระหว่างแหล่งที่มาจากแผ่นดินและจากซากของแพลงก์ตอนพืชที่เกิดขึ้นภายในทะเล เนื่องจากค่า TOC/OP อยู่ในช่วง 106 ถึง 800

### สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษารูปแบบและปริมาณของฟอสฟอรัสในดินตะกอนทะเลบริเวณน้ำในอ่าวไทยตอนใน พบว่าปริมาณ TP ในดินตะกอนทะเลบริเวณน้ำในอ่าวไทยตอนใน เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2560 ซึ่งเป็นช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ มีค่าอยู่ในช่วง 4.41-17.84  $\mu\text{mol g}^{-1}$  และมีค่าอยู่ในช่วง 2.74-16.28  $\mu\text{mol g}^{-1}$  ในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2560 ซึ่งเป็นช่วงลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ โดยปริมาณ TP ที่พบจะแปรผันกับความลึกน้ำ ในส่วนของรูปแบบของฟอสฟอรัสในดินตะกอนทะเลบริเวณน้ำในอ่าวไทยตอนในส่วนใหญ่อยู่ในรูป IP โดยสัดส่วนของ IP เปรียบเทียบกับ TP มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ  $67.0 \pm 0.13$  และ  $59.5 \pm 0.12$  นอกจากนี้ยังพบว่าค่า TOC/OP ของดินตะกอนทะเลบริเวณน้ำส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วง 106-800 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 781.5 และ 768.2 การพบว่าดินตะกอนทะเลบริเวณน้ำในอ่าวไทยตอนในส่วนใหญ่อยู่ในรูป IP แสดงให้เห็นว่าดินตะกอนทะเลบริเวณน้ำที่สำรวจพบในครั้งนี้มีศักยภาพที่จะเป็นแหล่งปลดปล่อยฟอสฟอรัสกลับคืนสู่แหล่งน้ำที่สำคัญ แต่การปลดปล่อยฟอสเฟตจากดินตะกอนทะเลบริเวณน้ำกลับคืนสู่แหล่งน้ำยังขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อมต่างๆ เช่น pH ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ อุณหภูมิ ปริมาณสารอินทรีย์ กิจกรรมของสัตว์หน้าดินและแบคทีเรีย เป็นต้น อย่างไรก็ตามรูปแบบของฟอสฟอรัสในดินตะกอนทะเลบริเวณน้ำในอ่าวไทยตอนในได้รับอิทธิพลจากการสะสมของซากแพลงก์ตอนพืชภายในทะเล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิดปรากฏการณ์สาหร่ายสะพรั่ง



### กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) โครงการ “การพัฒนานโยบายการจัดการประมงอย่างมีประสิทธิภาพบนพื้นฐานนิเวศ-สังคม ภายใต้ธรรมาภิบาลที่ดีเพื่อความยั่งยืนทางการประมงในพื้นที่อ่าวไทยตอนใน”

### เอกสารอ้างอิง

- 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. *The Analyst*, 101(1200), 187-97.
- Bastami, K.D., Neyestani, M.R., Raeisi, H., Shafeian, E., Baniamam, M., Shirzadi, A., Esmaeilzadeh, M., Mozaffari, S., & Shahrokhi, B. (2018). Bioavailability and geochemical speciation of phosphorus in surface sediments of the Southern Caspian Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 126, 51-57.
- Cheevaporn, .V, & Menasveta, P. (2003). Water pollution and habitat degradation in the Gulf of Thailand. *Marine Pollution Bulletin*, 47, 43–51.
- Fisher, T.R., Carlson, P.R., & Barber, R.T. (1982). Sediment nutrient regeneration in three North Carolina estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 14, 101-116.
- Kang, X., Song, J., Yuan, H., Shi, X., Yang, W., Li, X., Li, N., & Dian, L. (2017). Phosphorus speciation and its bioavailability in sediments of the Jiaozhou Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 188, 127-136.
- Koomklang, J., Yamaguchi, H., Ichimi, K., & Tada, K. (2018). A role for a superficial sediment layer in upward nutrient fluxes across the overlying water-sediment interface. *Journal of Oceanography*, 74, 13-21.
- Labry, C., Youenou, A., Delmas, D., & Michelon, P. (2013). Addressing the measurement of particulate organic and organic phosphorus in estuarine and coastal waters. *Continental Shelf Research*, 60, 28-37.
- 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, J.V., & 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 of 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(12), 2287-2316.
- Maneepong, S. & Rakkhiaw, S. (1998). *Study of chemical properties of sediments from Thale Noi and Thale Luang*. Songkhla: Faculty of Natural Resources Prince of Songkla University. (in Thai)
- Meksumpun, C. (2005). *Sediment*. Bangkok: Department of Fisheries Biology Faculty of Fisheries Kasetsart University. (in Thai)
- Murphy, J. & Riley, J.P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural water. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31-36.
- Redfield, A.C., Ketchum, B.H., & Richards, F.A. (1963). The influence of organisms on the composition of sea-water. *The Sea*, 2, 26–77.
- Ruttenberg, K., & Goñi, M. (1997). Depth trends in phosphorus distribution and C:N:P ratios of organic matter in Amazon Fan sediments: Indices of organic matter source and burial history. *Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific Results*, 155, 505-517.



- 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 (Natural Science)*, 49, 200-210.
- Srithonguthai, S., Sonoyama, Y., Tada, K., & Montani, S. (2002). Annual cycle of ammonium and phosphate fluxes across the sediment-water interface in coastal marine environment (the Seto Inland Sea). *Fisheries science*, 68(1), 600-603.
- Srithonguthai, S., & Tada, K. (2015). Diffusive fluxes across sediment-water interface in the Seto Inland Sea, Japan. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 2(11), 71-75.
- Strickland, J.D.H., & Parson, T.R. (1972). A practical hand book of seawater analysis. (2<sup>nd</sup> Ed'n). *Fisheries Research Board Canada Bulletin*, 167.
- Suzumura, M., Kokubun, H., & Arata, N. (2004). Distribution and characteristics of suspended particle matter in a heavily eutrophic estuary, Tokyo Bay, Japan. *Marine Pollution Bulletin*, 49, 496-503.
- Thongra-ar, W., Musika, C., Moksongpai, P., Wongsudawan, W. & Munhapol, A. (2003). *Distribution of various forms of phosphorus in coastal marine sediments of the Eastern coast of Thailand*. Chon Buri: Institute of Marine Science Burapha University.
- Wu, Y., Wen, Y., Zhou, J., & Wu, Y. (2014). Phosphorus release from lake sediments: Effects of pH, temperature and dissolved oxygen. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(1), 323-329.
- Yamada, H., & Kayama, M. (1987). Distribution and dissolution of several forms of phosphorus in coastal marine sediments. *Oceanologica Acta*, 10(3), 311-321.
- Yang, B., Liu, S., & Zhang, G. (2018). Geochemical characteristics of phosphorus in surface sediments from the continental shelf region of the northern South China Sea. *Marine Chemistry*, 198, 44-55.



Yeanthanakul, P. (2007). Data analysis using Microsoft Excel. *Thaksin Journal*, 10(2), 12-20. (in Thai)

Zhou, F., Gao, X., Yuan, H., Song, J., Chen, C.A., Lui, H., & Zhang, Y. (2016). Geochemical forms and seasonal variations of phosphorus in surface sediments of the East China Sea shelf. *Journal of Marine Systems*, 159, 41-54.

Zhuang, W., Gao, X., Zhang, Y., Xing, Q., Tosi, L., & Qin, S. (2014). Geochemical characteristics of phosphorus in surface sediments of two major Chinese mariculture areas: The Laizhou Bay and the coastal waters of the Zhangzi Island. *Marine Pollution Bulletin*, 83, 343-351.