



โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ ปริมาณปรอทตามลำดับชั้นความลึกในดินตะกอนบริเวณดอนหอยหลอด
จังหวัดสมุทรสงคราม

Mercury content in sediment cores from Don Hoi Lot,
Samut Songkram Province

ชื่อนิสิต นายสุริยพงศ์ คำโสภา เลขประจำตัว 6032836323

ภาควิชา วิทยาศาสตร์ทางทะเล
ปีการศึกษา 2563

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริมาณปรอทตามลำดับชั้นความลึกในดินตะกอนบริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม

สุริยพงศ์ คำโสภา

โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Mercury content in sediment cores from Don Hoi Lot, Samut Songkram Province

Suriyapong Kumsopar

A Senior Project in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Bachelor of Science in Marine Science
Department of Marine Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University
Academic Year 2020

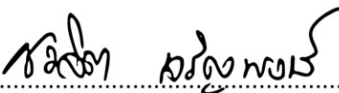
หัวข้อโครงการ ปริมาณปรอทตามลำดับชั้นความลึกในดินตะกอนบริเวณดอนหอยหลอด
จังหวัดสมุทรสงคราม
โดย นายสุริยพงศ์ คำโสภา
ภาควิชา วิทยาศาสตร์ทางทะเล
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก อาจารย์ ดร.ชวลิต เจริญพงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับโครงการฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาบัณฑิต ในรายวิชา 2309499 โครงการวิทยาศาสตร์

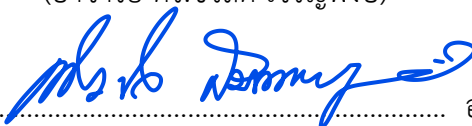


..... หัวหน้าภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล
(ศาสตราจารย์ ดร.วรมพ วิทยาคุณ)

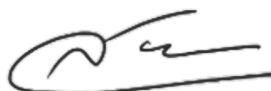
คณะกรรมการสอบโครงการงาน



..... อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก
(อาจารย์ ดร.ชวลิต เจริญพงษ์)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล)



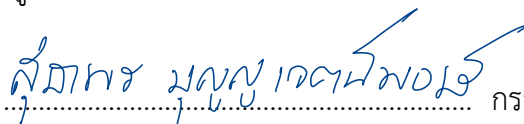
..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชณา ชวนิชย์)



..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมฤดี จิตประไพ)



..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัทมา สิงห์รักษ์)



..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สุธาพร บุญญเจตนพงษ์)

Project Title Mercury content in sediment cores from Don Hoi Lot, Samut Songkram Province
By Suriyapong Kumsopar
Field of Study Marine Science
Advisor Chawalit Charoenpong, Ph.D.
Co-advisor Asst. Prof. Penjai Sompongchaiyakul, Ph.D.

Accepted by the Department of Marine Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment of the Requirement for the Bachelor's Degree.



..... Head of Marine Science Department
(Prof. Voranop Viyakarn, Ph.D.)

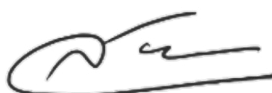
Project committee



..... Project Advisor
(Chawalit Charoenpong, Ph.D.)



..... Project Co-advisor
(Asst. Prof. Penjai Sompongchaiyakul, Ph.D.)



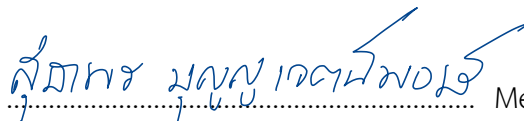
..... Member
(Assoc. Prof. Suchana Chavanich, Ph.D.)



..... Member
(Asst. Prof. Somrudee Jitpraphai, Ph.D.)



..... Member
(Asst. Prof. Patama Singhruck, Ph.D.)



..... Member
(Sutaporn Bunyajetpong, Ph.D.)

ชื่อโครงการ	ปริมาณปรอทตามลำดับชั้นความลึกในดินตะกอนบริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม
ชื่อนิติกร	สุริยพงศ์ คำโสภา
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	อาจารย์ ดร.ชวลิต เจริญพงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล
ปีการศึกษา	2563
ภาควิชา	วิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

ดอนหอยหลอดเป็นสันดอนที่ตั้งอยู่บริเวณปากแม่น้ำแม่กลอง จังหวัดสมุทรสงคราม ซึ่งเป็นพื้นที่รองรับน้ำที่มาจากชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรม ส่งผลให้มลพิษต่าง ๆ รวมถึงปรอทอาจเกิดการตกค้างและสะสมบริเวณสันดอนก่อนไหลลงสู่อ่าวไทยตอนบน การศึกษาในครั้งนี้มุ่งเน้นศึกษาการกระจายตัวของปรอทและประเมินระดับการปนเปื้อนของปรอทตามลำดับความลึกของชั้นดินตะกอน โดยเก็บตัวอย่างในวันที่ 23 สิงหาคม พ.ศ. 2563 จำนวน 9 สถานี ประกอบด้วยสถานีในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ของปากแม่น้ำแม่กลองจำนวน 3 สถานี และในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ของปากแม่น้ำแม่กลองจำนวน 6 สถานี วิเคราะห์ปริมาณรวมของปรอทในดินตะกอน (total mercury, T-Hg) ด้วยเทคนิค thermal decomposition atomic absorption spectrophotometry รวมถึงวิเคราะห์ปัจจัยทางกายภาพดังนี้ ปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรด (simultaneously-extracted mercury, SE-Hg) ด้วยเทคนิค wet-chemical preparation atomic absorption spectrophotometry ปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด (acid volatile sulfide, AVS) ด้วยเทคนิค purge and trap (colorimetry) และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอน (organic carbon, OC) ด้วยเทคนิค Pregl-Dumas ผลการศึกษาพบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณ OC ในทิศ SW และทิศ NE ของปากแม่น้ำแม่กลอง มีค่าร้อยละ 0.31 ± 0.12 และ 0.59 ± 0.22 ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของปริมาณ AVS ในทิศ SW และทิศ NE ของปากแม่น้ำแม่กลอง เท่ากับ 21.90 ± 21.32 และ 10.39 ± 10.78 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ปริมาณ T-Hg ตามลำดับชั้นความลึกในดินตะกอนบริเวณดอนหอยหลอด อยู่ในช่วง 0.013 ถึง 0.11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง โดยมีค่าเฉลี่ยในทิศ SW และทิศ NE ของปากแม่น้ำแม่กลอง เท่ากับ 0.027 ± 0.071 และ 0.047 ± 0.024 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของปริมาณ SE-Hg ในทิศ SW และทิศ NE ของปากแม่น้ำแม่กลอง เท่ากับ 0.0046 ± 0.0029 และ 0.0024 ± 0.0013 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละของปริมาณปรอทรวม เท่ากับร้อยละ 17.0 และ 5.1 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ดัชนีการสะสมเชิงธรณี (Igeo) ของปรอท บ่งชี้ว่าดินตะกอนตามลำดับชั้นความลึกบริเวณดอนหอยหลอด ปากแม่น้ำแม่กลอง จังหวัดสมุทรสงคราม ยังไม่จัดอยู่ในสถานะที่เรียกว่ามีมลพิษของปรอท

คำสำคัญ: ปรอท, ดินตะกอน, ดัชนีการสะสมเชิงธรณี, ดอนหอยหลอด

Project Title	Mercury content in sediment cores from Don Hoi Lot, Samut Songkram Province
Name	Suriyapong Kumsopar
Advisor	Chawalit Charoenpong, Ph.D.
Co-advisor	Asst. Prof. Penjai Sompongchaiyakul, Ph.D.
Academic Year	2020
Department	Marine Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University

Abstract

Don Hoi Lot is a delta situated at the mouth of Mae-Klong River which receives its water from watershed areas with densely populated residential areas, intense agricultural lands and industrial estates. As a result, Don Hoi Lot may act as a conduit and an area of deposition for various pollutants including mercury flowing out into the upper Gulf of Thailand. This study aimed at assessing the mercury distribution in different sediment layers of the intertidal zone of Don Hoi Lot and evaluating the potential ecological risk of mercury contamination therein. Sediment samples were collected on August 23, 2020 at 9 stations. 6 of which were located northeast (NE) of the river mouth whereas the remainder were on the southwest (SW) side. Total mercury (T-Hg) analysis via thermal decomposition atomic absorption spectrophotometry found that overall the T-Hg content was in the range of 0.013 - 0.11 mg/kg dw. The T-Hg values in the SW stations (0.027 ± 0.071 mg/kg dw) were lower than those from the NE stations (0.047 ± 0.024 mg/kg dw). Simultaneously-extracted mercury (SE-Hg) as determined concurrently with acid-volatile sulfide (AVS) and measured by wet-chemical preparation atomic absorption spectrophotometry showed that the values for the SW and NE stations were 0.0046 ± 0.0029 mg/kg dw (17.0% of T-Hg) and 0.0024 ± 0.0013 mg/kg dw (5.1% of T-Hg), respectively. This marked difference in the mercury content from the two stations may be attributed to the different sedimentary characteristics including the amount of organic carbon (OC) content (measured via Pregl-Dumas analysis) and AVS (measured colorimetrically). The percent OC content on the SW side (0.31 ± 0.12) was lower than that on the NE side (0.59 ± 0.22) whereas the AVS showed the opposite trend with the SW side (21.90 ± 21.32 $\mu\text{g/g}$ dw) having the higher value than the NE side (10.39 ± 10.78 $\mu\text{g/g}$ dw). Since Don Hoi Lot is an important harvest area for razor clams and other commercial bivalves, it is imperative to assess whether the amount of mercury found in this study posts any risk to consumers. Geoaccumulation index (I_{geo}) value of <0 indicated sediment samples taken in Don Hoi Lot in this study were still unpolluted with respect to mercury.

Keywords: Mercury, Sediment, Geoaccumulation index, Don Hoi Lot

กิตติกรรมประกาศ

โครงการการเรียนการสอนส่งเสริมประสบการณ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคลากรจากหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์ ดร.ชวลิต เจริญพงษ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำปรึกษา คอยแนะนำ ให้ทุนทรัพย์เพิ่มเติมในการทำงานวิจัย และตรวจสอบแก้ไขโครงการฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนโครงการเรียนการสอนเพื่อส่งเสริมประสบการณ์ จากคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนทรัพย์ในการจัดทำโครงการในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วรรณพ วิทยาภรณ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุชญา ขวณิชย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมฤดี จิตประไพ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัทมา สิงห์รักษ์ อาจารย์ ดร.สุธาพร บุญญเจตน์ พงษ์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้ข้อเสนอแนะแก้ไขข้อบกพร่องของเล่มโครงการให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ นายณัฐกิตติ์ ดุรงค์ธรรมรัตน์ ผู้จัดการมูลนิธิศาลกรมหลวงชุมพรเขตอุดมศักดิ์ ตำบลบางจะเกร็ง อำเภอเมืองสมุทรสงคราม จังหวัดสมุทรสงคราม ที่ให้คำปรึกษาในการลงพื้นที่เก็บตัวอย่างและอนุเคราะห์สถานที่ในการวิเคราะห์ตัวอย่างและปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.ชวลิต เจริญพงษ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล อาจารย์ ดร.สุจารี บุรีกุล นายธนกร อุบลแย้ม นายนเรนทร์ฤทธิ์ ชื่นพิภ นางสาวรัตนศิริรินทร์ ทรัพย์เจริญ นางสาวปิ่นมณีส บุษบา นางสาวอัจฉริยา สัมพันธ์พร นางสาวจริยา กาหยี นางสาววิศรา โรจน์ศิริสถิตย์ นางสาวนันทิตา แก้วนิสัย นางสาววรัทยา จันทร นางสาวธนาภา เนียมสูงเนิน นางสาวปานรวี หัสต์กมลตระกูล นางสาวอัญชิษฐา รอดขวัญ และนางสาวรัชพรรณ มงคลวีระพันธ์ ที่ช่วยในการวางแผนและเก็บตัวอย่างดิน ตะกอนในครั้งนี้

ขอขอบคุณ นายกิติชัย สุวรรณ และนางสาวสุนิษา ศรีเนตร เจ้าหน้าที่บริษัท โคแอกซ์ กรุ๊ป คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการตรวจวัดปริมาณปรอทในดินตะกอน และให้ความอนุเคราะห์และช่วยเหลือตลอดการวิเคราะห์ปรอทในห้องปฏิบัติการ

ขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เป็นกำลังใจให้อย่างเสมอ และท้ายที่สุดขอขอบพระคุณครอบครัวอย่างสุดซึ้งที่ผลักดัน ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาในทุก ๆ เรื่อง ตลอดจนทุนทรัพย์ในการศึกษาเสมอมา

สุริยพงศ์ คำโสภา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	9
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการศึกษา	9
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	10
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	10
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีและการศึกษาที่เกี่ยวข้อง	11
2.1 พื้นที่ศึกษา	11
2.2 พรอทและความเป็นพิษต่อของมนุษย์	12
2.3 การปนเปื้อนและการเปลี่ยนรูปทางเคมีของพรอท.....	14
2.3.1 แหล่งกำเนิดของพรอทที่มาจากดิน	15
2.3.2 การเปลี่ยนรูปแบบทางเคมีของพรอทให้เป็นพรอทอินทรีย์และการสะสมในสิ่งมีชีวิต.....	16
2.4 ปริมาณพรอทในดินตะกอนในประเทศไทยและต่างประเทศ.....	18
2.4.1 ความเข้มข้นพรอทที่ปนเปื้อนในดินตะกอนอ่าวไทย.....	18
2.4.2 ความเข้มข้นพรอทที่ปนเปื้อนในดินตะกอนในต่างประเทศ.....	20
2.4.3 เกณฑ์คุณภาพดินตะกอน ในแต่ละประเทศ	21
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
2.5.1 งานวิจัยเกี่ยวกับซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด	21
2.5.2 งานวิจัยเกี่ยวกับสารอินทรีย์ในดินตะกอน	22
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	23
3.1 การสำรวจพื้นที่ศึกษา.....	23
3.2 การกำหนดสถานีเก็บตัวอย่าง	23
3.3 การเก็บตัวอย่าง	24

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4 การเตรียมวัสดุอุปกรณ์	24
3.5 การเตรียมตัวอย่างดินตะกอน	25
3.6 การวิเคราะห์ดินตะกอนทางกายภาพและเคมี.....	27
3.6.1 การวิเคราะห์ปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด	27
3.6.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ในดินตะกอน	29
3.6.3 การวิเคราะห์ปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรด	30
3.6.4 การวิเคราะห์ปริมาณปรอทรวมในดินตะกอน	31
3.7 การวิเคราะห์ความรุนแรงของการปนเปื้อนปรอท.....	32
บทที่ 4 ผลการศึกษา และวิจารณ์ผล	34
4.1 ลักษณะทางกายภาพ.....	34
4.2 ผลการศึกษาค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล.....	34
4.3 ผลการวิเคราะห์หาค่าเปอร์เซ็นต์น้ำในดินตะกอน	35
4.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด	36
4.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์	38
4.6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรด.....	40
4.7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณปรอทรวม.....	42
4.8 การเปรียบเทียบสัดส่วนระหว่างปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรด และปริมาณรวมของปรอทในดินตะกอน	50
4.9 การกระจายตัวของข้อมูลปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ บริเวณพื้นที่ศึกษา.....	51
4.10 ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ในดินตะกอน.....	52
4.11 การวิเคราะห์ความรุนแรงของการปนเปื้อนปรอทในพื้นที่ศึกษา.....	53
4.11.1 ดัชนีการสะสมเชิงธรณี (geoaccumulation index, I _{geo}).....	53
4.11.2 เกณฑ์แนวทางคุณภาพดินตะกอนทะเลและชายฝั่งในบางประเทศได้กำหนดเกณฑ์แนวทาง คุณภาพดินตะกอนทะเลและชายฝั่ง (coastal and marine sediment quality guidelines).....	54
บทที่ 5 สรุปผลศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	55
5.1 สรุปผลการศึกษา	55
5.2 ข้อเสนอแนะ	56
เอกสารอ้างอิง	57

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนที่ขอบเขตพื้นที่ดอนหอยหลอดระยะรัศมี 5 กิโลเมตร	12
รูปที่ 2.2 แหล่งกำเนิดและเส้นทางของปรอทในสิ่งแวดล้อม	14
รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนรูปแบบทางเคมีของปรอทและการสะสมในสิ่งมีชีวิต	16
รูปที่ 2.4 กระบวนการไบโอแอคคิวมิวเลชัน (Bioaccumulation) ของปรอทในสิ่งมีชีวิต	18
รูปที่ 3.1 จุดเก็บตัวอย่างบริเวณดอนหอยหลอด ปากแม่น้ำแม่กลอง จังหวัดสมุทรสงคราม	23
รูปที่ 3.2 (ก-ข) แสดงอุปกรณ์การเก็บตัวอย่างดินตะกอน (ก) core liner และ (ข) กลุ่มเก็บตัวอย่าง	24
รูปที่ 3.3 (ก-ข) วิธีการทำแห้งเยือกแข็ง (freeze-drying) (ก) เครื่อง freeze drier (ข) การจัดวางตัวอย่าง	25
รูปที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการวิเคราะห์ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมทางกายภาพและเคมีของดินตะกอน	26
รูปที่ 3.5 การวิเคราะห์ปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด (ก) การแยกซัลไฟด์ออกมาอยู่ในรูปไอออนใน สารละลาย และ (ข) สารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีน้ำเงิน	28
รูปที่ 3.6 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ในดินตะกอน (ก) บรรจุดินตะกอนที่บดละเอียดลงหลอดแก้ว (ข) กำจัดสารอินทรีย์ในดินตะกอน (ค) บรรจุดินตะกอนที่กำจัดสารอินทรีย์แล้วในแคปซูลที่ทำด้วยดีบุก (tin cup) และ (ง) เครื่อง CHN/O analyzer รุ่น PE 2400 Series ii	30
รูปที่ 3.7 (ก-ข) การวิเคราะห์ปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรด (ก) การเติม Sodium Borohydride และ (ข) เครื่อง fims 400 flow injection mercury	31
รูปที่ 3.8 (ก-ข) การวิเคราะห์ปริมาณปรอทรวมในดินตะกอน (ก) เครื่องวิเคราะห์ปรอท ยี่ห้อ Nippon Instruments Corporation (NIC) รุ่น MA-3000 และ (ข) กราฟแสดงค่าดูดกลืนแสง	32
รูปที่ 4.1 ค่า redox potential ในดินตะกอนชั้นแรก (0-5 เซนติเมตร) ของทุกสถานี	34
รูปที่ 4.2 (ก-ค) แนวโน้มของเปอร์เซ็นต์น้ำในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึก	45
รูปที่ 4.3 (ก-ค) แนวโน้มของปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรดในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึก	46
รูปที่ 4.4 (ก-ค) แนวโน้มของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึก	47
รูปที่ 4.5 (ก-ค) แนวโน้มของปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรดในตัวอย่าง ดินตะกอนตามระดับความลึก	48
รูปที่ 4.6 (ก-ค) แนวโน้มของปริมาณปรอทรวมในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึก	49

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7 แสดงสัดส่วนระหว่างเปอร์เซ็นต์ของปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรด (simultaneously-extracted mercury) และปริมาณรวมของปรอทในดินตะกอน (total mercury)..50

รูปที่ 4.8 (ก-ง) แสดงการกระจายตัวของปัจจัยต่าง ๆ ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึก (ก) ซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด (ข) คาร์บอนอินทรีย์ (ค) ปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรด และ (ง) ปรอทรวม โดยเปรียบเทียบสถานีในทิศตะวันตกเฉียงใต้ ของปากแม่น้ำแม่กลองจำนวน 3 สถานี และในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ จำนวน 6 สถานี..... 52

รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของปรอทในดินตะกอน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง) กับดัชนีบ่งชี้ความรุนแรง (Igeo) โดยเส้นประเป็นเส้นที่แบ่งขอบเขตระดับของการปนเปื้อนในดินตะกอน..... 55

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ชนิดของปรอทในสิ่งแวดล้อม	13
ตารางที่ 2.1 ความเข้มข้นของปรอทรวมในดินตะกอนในประเทศไทย.....	19
ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นของปรอทรวมในดินตะกอนในต่างประเทศ.....	20
ตารางที่ 2.3 เกณฑ์ค่ามาตรฐานของปรอทในดินตะกอน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง) ของประเทศไทย สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย-นิวซีแลนด์ และฮ่องกง.....	21
ตารางที่ 3.1 วิธีการวิเคราะห์หองค์ประกอบของดินตะกอน.....	27
ตารางที่ 3.2 ระดับการบ่งชี้ความรุนแรงตามค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี (geoaccumulation index).....	33
ตารางที่ 4.1 พิสัย ค่าเฉลี่ย และค่ากลาง ของเปอร์เซ็นต์น้ำในดินตะกอนบริเวณที่ศึกษา.....	35
ตารางที่ 4.2 พิสัย ค่าเฉลี่ย และค่ากลาง ของปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรดในดินตะกอนบริเวณที่ศึกษา	37
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรดในพื้นที่ศึกษากับในอ่าวไทย	37
ตารางที่ 4.4 พิสัย ค่าเฉลี่ย และค่ากลาง ของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอนบริเวณที่ศึกษา.....	39
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในพื้นที่ศึกษากับในอ่าวไทย.....	39
ตารางที่ 4.6 พิสัย ค่าเฉลี่ย และค่ากลาง ของปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะ กรดในดินตะกอนบริเวณที่ศึกษา.....	41
ตารางที่ 4.7 พิสัย ค่าเฉลี่ย และค่ากลาง ของปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนบริเวณที่ศึกษา.....	43
ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรดในพื้นที่ศึกษา กับในอ่าวไทย.....	43
ตารางที่ 4.9 ค่าต่ำสุด ค่ากลาง ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ยของปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ บริเวณพื้นที่ศึกษา.....	51
ตารางที่ 4.10 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความลึก ปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด คาร์บอนอินทรีย์ ปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรด และปริมาณปรอทรวม.....	53

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการศึกษา

ปรอท (mercury, Hg) เป็นโลหะที่มีความเป็นพิษสูง และเป็นโลหะชนิดเดียวที่สามารถระเหยได้ง่าย ดังนั้นปรอทจึงสามารถปนเปื้อนเข้าสู่ชั้นบรรยากาศและสามารถแพร่กระจายได้อย่างรวดเร็วและออกไปใน ระยะไกล รวมทั้งเป็นอันตรายต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม (Pirrone and Mahaffey, 2005) การ ปนเปื้อนของปรอทในสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นอากาศ แห้งน้ำ หรือดินตะกอน เกิดจากกระบวนการทาง ธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ สูดท้ายจะไปสะสมอยู่กับดินตะกอน (sediment) เนื่องจากปรอทเป็นโลหะที่ มีสมบัติในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ และจับกับอนุภาคแขวนลอย ดังนั้นในกระบวนการสร้าง ตะกอน (coagulation) และการรวมตะกอน (flocculation) ที่เกิดขึ้นบริเวณชวาบททะเล (estuary) จึงมีการดึง ปรอทตามมวลน้ำตกตะกอนรวมมาด้วย และสะสมรวมกับดินตะกอนท้องน้ำบริเวณชวาบททะเล (เบญจวรรณ แสนสิทธิสกุลเลิศ, 2557)

เมื่อสภาวะทางกายภาพเคมี (physicochemical state) ของแห้งน้ำเปลี่ยนแปลง ทำให้สมดุลเคมี รอยต่อระหว่างตะกอนผิวหน้า (surface sediment) กับมวลน้ำเหนือผิวตะกอน (overlying water column) เปลี่ยนแปลงไปและทำให้สามารถปลดปล่อยปรอทที่สะสมอยู่ในตะกอนออกสู่มวลน้ำ (Zwolsman et al., 1996) การสะสมของปรอทในดินตะกอน อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตหลายชนิด โดยเฉพาะสิ่งมีชีวิต หน้าดิน (benthos) ซึ่งมีโอกาสได้รับปรอทไปสะสมอยู่ในร่างกาย แม้ระดับความเป็นพิษอาจจะยังไม่ส่งผล เฉียบพลัน แต่ปรอทที่สะสมจะสามารถถ่ายทอดผ่านห่วงโซ่อาหารสู่สิ่งมีชีวิตในลำดับขั้นห่วงโซ่อาหาร (trophic level) ที่สูงขึ้น และท้ายที่สุดอาจจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์ ซึ่งเป็นผู้บริโภคในลำดับขั้นสุดท้ายได้

ดอนหอยหลอดเป็นสันดอนหนึ่งที่ตั้งอยู่ปากแม่น้ำแม่กลอง จังหวัดสมุทรสงคราม เกิดจากการทับถม ของตะกอนจากแม่น้ำและตะกอนจากทะเล เส้นทางไหลของแม่น้ำแม่กลอง มีการใช้ประโยชน์จากแม่น้ำ แม่กลอง ทั้งเพื่อการคมนาคม อุตสาหกรรม การทำการเกษตร ตลอดจนเป็นแหล่งรองรับน้ำทิ้งจากชุมชนและ โรงงานอุตสาหกรรม จึงเป็นพื้นที่รองรับและสะสมของมลพิษต่าง ๆ อีกทั้งยังเป็นแหล่งอาศัยของหอยเศรษฐกิจ ที่เป็นสิ่งมีชีวิตหน้าดินหลายชนิด โดยเฉพาะหอยหลอด ซึ่งทำรายได้ให้แก่ชุมชนในท้องถิ่นอย่างมากการ ประเมินสภาวะปนเปื้อนของปรอทในดินตะกอนจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการสร้างความมั่นใจให้กับ ผู้บริโภคหอยที่เก็บมาจากบริเวณที่ศึกษา ทั้งนี้การหาปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยใน สภาวะกรด (simultaneously extracted mercury) และซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด (acid volatile sulfide) สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดที่เหมาะสมสำหรับประเมินการปนเปื้อนของปรอทในพื้นที่ปากแม่น้ำ ซึ่งได้รับ อิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง และมีการเปลี่ยนแปลงสภาพสลับไปมาระหว่างสภาพรีดิวซ์ และสภาพออกซิไดซ์ ทำให้ปรอทในดินตะกอนมีโอกาสแพร่กลับเข้าสู่มวลน้ำได้มากยิ่งขึ้น

การศึกษาคั้งนี้มุ่งเน้นศึกษาการปนเปื้อนปรอทในดินตะกอนตามระดับความลึก บริเวณดอนหอยหลอดจังหวัดสมุทรสงคราม รวมทั้งศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างซัลไฟด์และปรอทในดินตะกอน อีกทั้งเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนของปรอทในดินตะกอนตามระดับความลึกในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 ศึกษาการกระจายตัวของปรอทตามลำดับความลึกของชั้นดินตะกอนบริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม
- 1.2.2 เปรียบเทียบการกระจายตัวของปรอทตามลำดับความลึกของชั้นดินตะกอนในทิศ ตะวันออกเฉียงเหนือและทิศตะวันตกเฉียงใต้ของปากแม่น้ำแม่กลอง จังหวัดสมุทรสงคราม
- 1.2.3 ประเมินระดับการปนเปื้อนของปรอทตามลำดับความลึกของชั้นดินตะกอน
- 1.2.4 หาความสัมพันธ์ระหว่างปรอทกับปัจจัยสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด และ คาร์บอนอินทรีย์ บริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 พื้นที่ที่ทำการศึกษาได้แก่ ดอนหอยหลอด ปากแม่น้ำแม่กลอง จังหวัดสมุทรสงคราม
- 1.3.2 ทำการเก็บตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึก จำนวน 9 สถานี ตัด section ทุก 5 เซนติเมตร
- 1.3.3 วิเคราะห์ตัวอย่างดินตะกอน โดย
 - ปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด (acid volatile sulfide) ด้วยเทคนิค colorimetry
 - ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอน ด้วยเทคนิค Pregl-Dumas
 - ปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรด (simultaneously extracted mercury) ด้วยเทคนิค wet-Chemical preparation atomic absorption spectrophotometry
 - ปริมาณรวมของปรอทดินตะกอน ด้วยเทคนิค thermal decomposition atomic absorption spectrophotometry

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบการกระจายตัวของปรอทตามลำดับความลึกของชั้นดินตะกอนบริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม
- 1.4.2 ทราบระดับการปนเปื้อนของปรอทตามลำดับความลึกของชั้นดินตะกอนบริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม
- 1.4.3 การศึกษาในครั้งนี้สามารถเป็นแนวทางในการวางมาตรการการจัดการแก้ไขปัญหามลพิษ เกี่ยวกับปรอทในพื้นที่ดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม ในอนาคต

บทที่ 2 ทฤษฎีและการศึกษาที่เกี่ยวข้อง

การปนเปื้อนของปรอทในพื้นที่ชายฝั่งและทะเล มีแหล่งที่มาทั้งธรรมชาติ (เช่น การระเบิดของภูเขาไฟ การผุพังของหิน เป็นต้น) และกิจกรรมของมนุษย์ (เช่น การทำโรงงานอุตสาหกรรม การทำเหมืองแร่ และการขุดเจาะน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ) สำหรับในบริเวณอ่าวไทยนั้นกิจกรรมการขุดเจาะก๊าซธรรมชาติเป็นแหล่งของปรอทด้วยเช่นกัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) จากกิจกรรมดังกล่าวส่งผลให้ปรอทสามารถปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อมรวมถึงถูกชะล้างสู่แหล่งน้ำและไหลสู่ทะเล ทั้งนี้บริเวณเอสตูรี (estuary) เป็นบริเวณที่มีกระบวนการสร้างตะกอน (coagulation) และการรวมตะกอน (flocculation) เกิดขึ้น จึงเป็นบริเวณที่ปรอทสามารถสะสมและปนเปื้อนลงสู่ดินตะกอนที่พื้นท้องน้ำได้ เนื่องจากปรอทเป็นโลหะที่มีสมบัติในการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ได้ และยังสามารถดูดซับกับอนุภาคแขวนลอย แมงกานีสออกไซด์ ไอรอนไฮดรอกไซด์ หรือลิแกนด์ตัวอื่น ๆ (Elder, 1988) ส่งผลให้ความเข้มข้นของปรอทที่มีอยู่ในดินตะกอนอาจมีค่าสูงกว่าที่พบในมวลน้ำได้ถึง 3-5 เท่า (Bryan and Langston, 1992) ส่วนปรอทที่ไม่ได้ตกตะกอนจะถูกพาออกสู่ทะเล (Stumm and Morgan, 1996) จึงสามารถกล่าวได้ว่าบริเวณเอสตูรีเป็นบริเวณรองรับและเป็นตัวกรองปรอทก่อนไหลออกสู่ทะเล

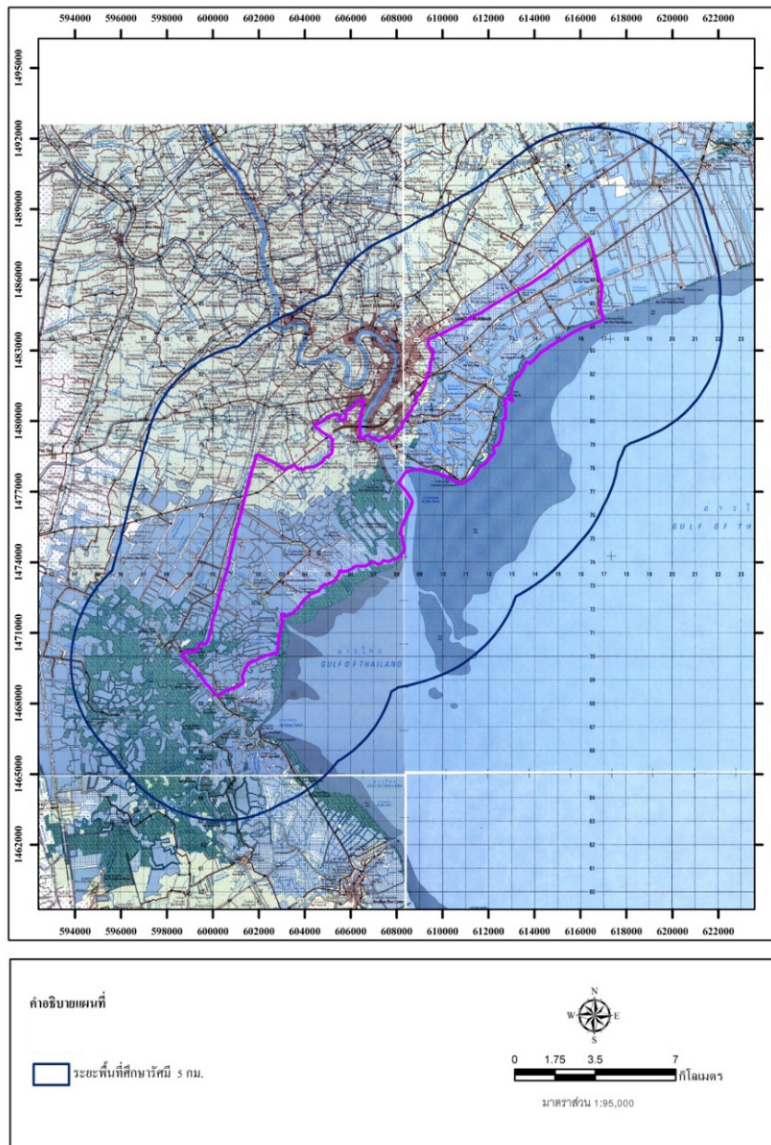
เนื่องจากเอสตูรีเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะทางกายภาพและเคมีอย่างมาก ทำให้ปรอทที่สะสมอยู่ในดินตะกอนสามารถปนเปื้อนกลับเข้าสู่มวลน้ำได้เมื่อสมดุลเคมีที่รอยต่อระหว่างดินตะกอนผิวหน้ากับมวลน้ำเหนือผิวตะกอนเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ตะกอนที่ทับถมกันอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาที่ยังทำให้ปรอทจากช่วงเวลาต่างกันสะสมอยู่ในแต่ละชั้นของตะกอน ดังนั้นการตรวจวัดปริมาณปรอทในดินตะกอนจึงสามารถใช้เป็นดัชนีบ่งชี้การปนเปื้อนของปรอทในช่วงเวลาที่ผ่านมา รวมทั้งคาดการณ์ผลกระทบที่อาจจะเกิดจากการปนเปื้อนของโลหะหนักได้ (Guy et al., 1978)

2.1 พื้นที่ศึกษา

ดอนหอยหลอดเป็นสันดอนตั้งอยู่ปากแม่น้ำแม่กลอง มีอาณาบริเวณกว้างประมาณ 3 กิโลเมตร ยาว 5 กิโลเมตร (รูปที่ 2.1) ตั้งอยู่ในตำบลบางจะเกร็ง ตำบลแหลมใหญ่ และตำบลบางแก้ว อำเภอเมืองสมุทรสงคราม จังหวัดสมุทรสงคราม ดอนหอยหลอดเกิดจากการทับถมของตะกอนจากแม่น้ำและตะกอนจากทะเลบริเวณปากแม่น้ำแม่กลอง เกิดเป็นสันดอนยื่นออกไปในทะเลราว 5 กิโลเมตร ลักษณะของพื้นที่เป็นชายฝั่งราบเรียบที่พื้นเป็นทรายและตะกอน เวลานั้นน้ำจะปรากฏพื้นโคลนเลนกว้างราว 4 กิโลเมตร ซึ่งมีพื้นเป็นตะกอนนุ่มและอุดมไปด้วยแร่ธาตุ ในพื้นที่จะเกิดน้ำขึ้นวันละ 2 ครั้ง เวลานั้นน้ำขึ้นกระแสน้ำจะไหลขึ้นทางทิศเหนือ แต่เวลาน้ำลงจะไหลลงทิศใต้ อย่างไรก็ตามบางเวลาทิศทางของกระแสน้ำอาจเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยโดยกระแสนม

ดอนหอยหลอดได้รับการจัดลำดับความสำคัญเป็นพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีความสำคัญระหว่างประเทศ (Ramsar site) เป็นพื้นที่ช่วยดักและกักเก็บตะกอนและรองรับน้ำทิ้งจากชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรม ส่งผลให้มลพิษต่าง ๆ รวมถึงปรอทอาจเกิดการตกค้างและสะสมบริเวณสันดอน ก่อนไหลลงสู่อ่าวไทยตอนบน อีกทั้ง

เป็นแหล่งผลิตทางการประมงหลายชนิด เช่น หอยหลอด หอยลาย หอยปุก หอยปากเปิด หอยแครง เป็นต้น แต่พบว่าหอยหลอดเป็นหอยที่มีจำนวน มากที่สุด ซึ่งเป็นสัตว์ที่สำคัญทางเศรษฐกิจ



รูปที่ 2.1 แผนที่ขอบเขตพื้นที่ดอนหอยหลอดระยะรัศมี 5 กิโลเมตร แหล่งที่มา: (<http://chm-thai.onep.go.th/ramsarsite60/project/03/>)

2.2 พรอทและความเป็นพิษต่อของมนุษย์

ปรอท (mercury) เป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งอยู่ในกลุ่มธาตุทรานซิชัน สัญลักษณ์ของธาตุคือ Hg ลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวสีเงิน จึงมีเรียกว่า “liquid silver” หรือ “quick silver” มีมวลอะตอม 200.589 กรัมต่อโมล จุดหลอมเหลว -38.83 องศาเซลเซียส จุดเดือด 356.73 องศาเซลเซียส ดังนั้นปรอทจึงมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 13.546 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากเมื่อเทียบกับน้ำที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความดันไอ

เท่ากับ 0.16 Pa (0.0012 มิลลิเมตรปรอท) จากค่าความดันไอของปรอทที่มีค่าต่ำมากจึงทำให้ปรอทสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิห้อง ปรอทเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี สามารถสะท้อนแสงได้ และมีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายที่เป็นน้ำ (Emsley, 2011)

ปรอทเป็นโลหะที่สามารถพบได้ตามธรรมชาติมีหลายชนิด (ตารางที่ 2.1) รวมถึงในรูปของธาตุ (elemental mercury) หรือในรูปของแร่ที่อยู่ในรูปสารประกอบของซัลไฟด์ นั่นคือ เมอร์คิวไรด์ซัลไฟด์ (mercury sulfide, HgS) ซึ่งสามารถพบได้ในเนื้อหินประเภทต่าง ๆ เช่น หินทราย หินปูน หรืออาจปะปนออกมาจากแก๊สภูเขาไฟ เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วเราสามารถจำแนกปรอทออกมาได้หลายรูปแบบ ดังนี้ (1) รูปของสารประกอบอนินทรีย์ (inorganic mercury compounds) เช่น เมอร์คิวริกคลอไรด์ (mercuric chloride, HgCl₂) และเมอร์คิวริสคลอไรด์ (mercurous chloride, Hg₂Cl₂) (2) รูปของสารประกอบอินทรีย์ (organic mercury compounds) เช่น สารประกอบ alkyl, alkoxy และ aryl ของปรอท และ (3) รูปของโลหะ (metallic form) นั่นคือ Hg⁰ โดยปรอทที่อยู่ในรูปของโลหะนี้จะเป็นธาตุบริสุทธิ์ไม่ผสมกับสารอื่น (สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2528)

ตารางที่ 2.1 ชนิดของปรอทในสิ่งแวดล้อม

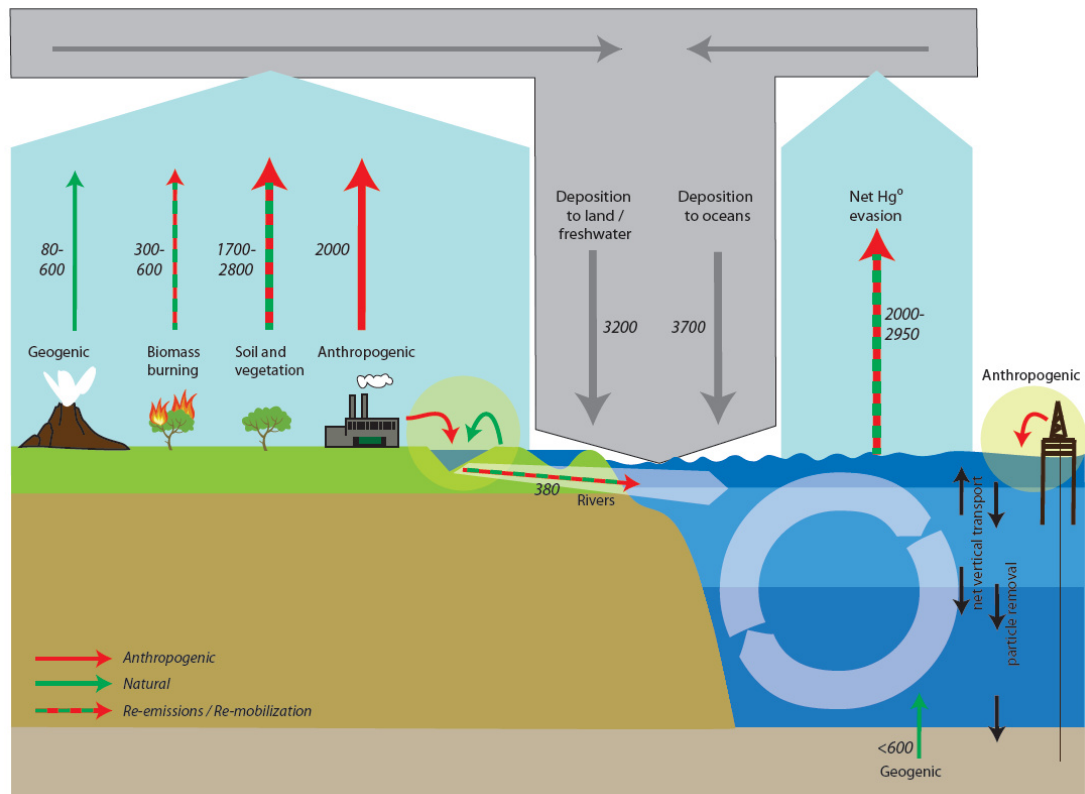
ชนิดของปรอท	ชื่อวิทยาศาสตร์	สูตรเคมี
Elemental mercury	Mercury	Hg ⁰
Inorganic mercury species	Mercuric ion	Hg ²⁺
	Mercurous ion	Hg ⁺
	Mercury sulfide	HgS
Organic mercury species	Methylmercury	CH ₃ Hg ⁺
	Ethylmercury	C ₂ H ₅ Hg ⁺
	Phenylmercury	C ₆ H ₅ Hg ⁺
	Dimethylmercury	(CH ₃) ₂ Hg

แหล่งที่มา : Morita et al. (1998)

ความเป็นพิษของปรอทต่อสิ่งมีชีวิตขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับ ชนิดของปรอท และช่องทางที่รับปรอทเข้าสู่ร่างกาย เช่น ทางผิวหนัง ระบบหายใจ ระบบย่อยอาหาร เป็นต้น โดยพิษจากปรอทมีทั้งแบบเรื้อรังและแบบเฉียบพลัน สำหรับพิษเฉียบพลันมักเกิดจากการกินสารปรอทเข้าสู่ร่างกาย หากมนุษย์ได้รับปรอทเข้าสู่ร่างกายเพียงประมาณ 0.002 กรัม อาจทำให้ตายได้ ในขณะที่พิษเรื้อรังจะเกิดจากการสะสมปรอทในร่างกายอย่างต่อเนื่องซึ่งจะทำอันตรายต่อระบบประสาทส่วนกลาง ได้แก่ สมองและไขสันหลัง ทำให้เสียการควบคุมเกี่ยวกับการเคลื่อนไหวของแขน ขา การพูด และยังทำให้ระบบประสาทรับรู้สึกเสียวไป (จิราภรณ์ อ่ำพันธ์, 2543)

2.3 การปนเปื้อนและการเปลี่ยนรูปทางเคมีของปรอท

ปรอทเข้าสู่สิ่งแวดล้อมทั้งจากกระบวนการทางธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ กระบวนการทางธรรมชาติที่นำปรอทเข้าสู่สิ่งแวดล้อมมีหลายรูปแบบ (รูปที่ 2.2) เช่น การระเบิดของภูเขาไฟ การผุพังของหิน เป็นต้น การปนเปื้อนของปรอทที่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ มีทั้งทางตรงและทางอ้อม ส่งผลให้ปริมาณปรอทในสิ่งแวดล้อมมีความเข้มข้นสูงขึ้น ทั้งในดินตะกอน น้ำ และอากาศ โดยปรอทที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมสามารถถ่ายทอดและสะสมเพิ่มขึ้นในสิ่งมีชีวิตตามลำดับขั้นตามห่วงโซ่อาหาร (Hunson et al., 1994)



รูปที่ 2.2 แหล่งกำเนิดและเส้นทางของปรอทในสิ่งแวดล้อม

แหล่งที่มา: UNEP (2013)

กิจกรรมของมนุษย์ที่เป็นแหล่งกำเนิดหลักของปรอท ได้แก่ โรงถลุงโลหะ การเผาไหม้ขยะและของเสีย การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล (เช่น ถ่านหิน น้ำมันปิโตรเลียม) การทำเหมืองแร่ที่มีการปนเปื้อนของปรอท โรงงานโซดาไฟ น้ำเสียจากอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการต่าง ๆ (Mitra, 1986) การใช้ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่มีสารปรอทผสม เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ ถ่านไฟฉาย เทอร์โมมิเตอร์ อุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สีบางชนิด วัสดุอุดฟัน ยาฆ่าเชื้อรา สารเคมี เป็นต้น (US-EPA, 1997)

การกระจายของปรอทจากแหล่งกำเนิดไปสู่สิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่จะมาจากการระเหยหรือจากการเผาไหม้ และปลดปล่อยสู่บรรยากาศ (รูปที่ 2.2) ปรอทที่อยู่ในบรรยากาศส่วนใหญ่อยู่ในรูป Hg⁰ ซึ่งเป็นไอปรอท แต่ปรอทในรูป Hg⁰ ก็สามารถถูกออกซิไดซ์ให้เป็นรูป Hg²⁺ ซึ่งเป็นแคตไอออน (cation) โดยบางส่วนจะถูก

รวมอยู่กับอนุภาค หรือละลายในไอน้ำและตกลงมากับฝน ปฏิกริยาออกซิเดชันของปรอทในอากาศ อาจเกิดโดยโอโซน หรือสารออกซิเดนต์ (oxidant) อื่น ๆ ในบรรยากาศ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และคลอรีน เป็นต้น (Schroeder et al., 1991)

2.3.1 แหล่งกำเนิดของปรอทที่มาจากดิน

การปนเปื้อนของปรอทในดินมักจะอยู่ในรูปสารประกอบร่วมกับสารอื่นในดิน กลายเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ (Schuster, 1991) เมื่อมีการเปิดหน้าดินเพื่อการเกษตรกรรม การพัฒนาที่ดินเพื่ออยู่อาศัย การทำเหมือง การทำถนน ฯลฯ จะทำให้สารประกอบปรอทที่อยู่ในดินเปลี่ยนรูปแบบทางเคมี เนื่องจากการเปิดหน้าดินทำให้ปรอทถูกชะกร่อน (weathering) และถูกออกซิไดซ์ง่าย ส่งผลให้ปรอทเปลี่ยนรูปแบบทางเคมีมาอยู่ในรูปแบบที่ละลายน้ำได้มากขึ้น และเคลื่อนย้ายจากดินเข้าสู่แหล่งน้ำ (Blake, 1980) ปรอทที่สะสมอยู่ในดินมีอยู่หลายรูปแบบ ได้แก่ (1) สารประกอบที่ละลายน้ำเช่นเมอร์คิวรีคลอไรด์ (mercury chloride) (2) ดูดซับอยู่บนพื้นผิวของสารอื่นเช่นแร่ดินเหนียว (clay minerals) (3) เกิดพันธะเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ เช่น ฟัลวิกแอซิด (fulvic acids) (4) เป็นสารประกอบในตะกอนเช่น ในรูปซัลไฟด์ (sulfide) คาร์บอเนต (carbonate) และไฮดรอกไซด์ (hydroxide) และ (5) ปรอทอินทรีย์ เช่นเมทิลเมอร์คิวรี (methyl mercury)

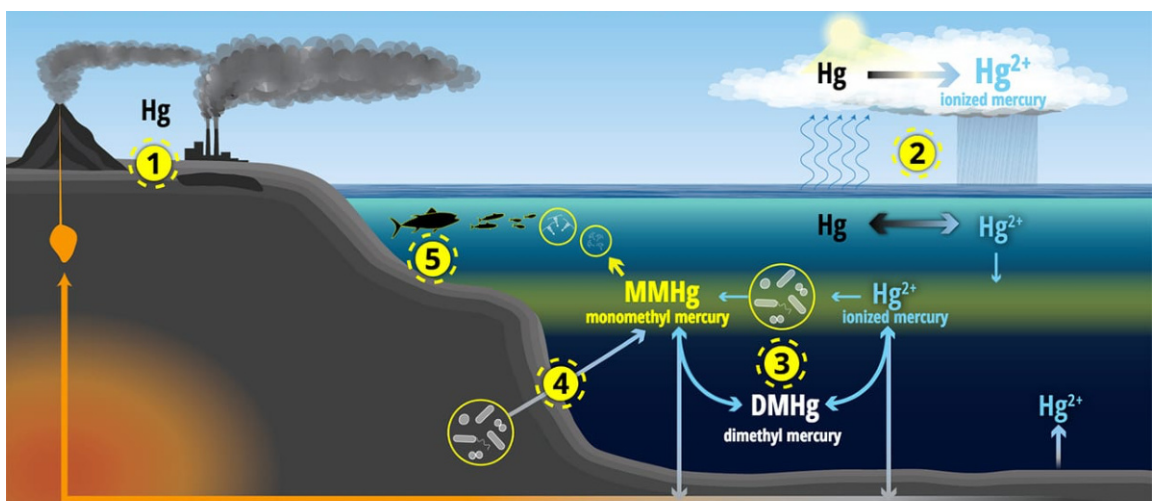
รูปแบบทางเคมีของปรอทที่แตกต่างกันจะมีความเป็นพิษแตกต่างกันไป ซึ่งรูปแบบทางเคมีนี้เปลี่ยนแปลงได้โดยกระบวนการทางชีวธรณีเคมี (biogeochemical processes) นอกจากนี้แล้ว การสะสมของปรอทในดินยังขึ้นอยู่กับลักษณะของกายภาพของเนื้อดิน เนื่องจากดินมีองค์ประกอบทั้งที่เป็นสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ ในส่วนสารอนินทรีย์สารหรือเนื้อดินเป็นส่วนประกอบหลัก ประกอบด้วยอนุภาคขนาดทราย (sand) ทรายแป้ง (silt) และดินเหนียว (clay) ส่วนที่เป็นอินทรีย์สารประกอบด้วยซากสิ่งมีชีวิตทั้งที่ยังไม่ย่อยสลายและที่ย่อยสลายแล้ว ส่วนที่ย่อยสลายแล้วก็คือ ฮิวมัส ซึ่งประกอบด้วยสารฮิวมิก (humic substances) และส่วนที่ไม่ใช่สารฮิวมิก ได้แก่ ไชมันคาร์โบไฮเดรต สารฮิวมิกเป็นอินทรีย์สารที่เกิดจากการย่อยสลายเศษซากพืชและซากสัตว์ที่ทับถมบนดินจนโมเลกุลเล็กลงและกลับมาโพลีเมอไรซ์ (polymerise) กันจนเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ซับซ้อน สารฮิวมิกนั้นเป็นตัวสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการจับโลหะหนักในดิน สารฮิวมิกมีอยู่ 3 ชนิดคือ กรดฮิวมิก (humic acid) กรดฟัลวิก (fulvic acid) และฮิวมิน (humic) ซึ่งจำแนกความแตกต่างจากจำนวนหมู่ฟังก์ชันนอล (functional group) ขนาดโมเลกุลและสมบัติการละลาย กรดฟัลวิกมีน้ำหนักโมเลกุลและเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนในโมเลกุลน้อยกว่ากรดฮิวมิก แต่จะมีออกซิเจนในเปอร์เซ็นต์ที่สูงกว่า (Stevenson, 1982)

ทั้งกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก มีหมู่ฟังก์ชันนอลของคาร์บอกซิล (carboxy) ฟีนอลิก (phenolic) และคาร์บอนิล (carbonyl) จึงทำให้มีสมบัติในการจับหรือแลกเปลี่ยนไอออนโลหะหนักได้ดี ปรอทที่ลงสู่ดินจึงถูกตรึงโดยอินทรีย์สารในดินเหล่านี้ได้มาก (Aastrup et al., 1991) เมื่อน้ำชะล้างผิวดินก็จะละลายอินทรีย์สารที่มีปรอทตรึงอยู่ และพัดพาให้ละลายไปตามน้ำ และในที่สุดจะไปสะสมอยู่กับดินตะกอนในแหล่งน้ำ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณปรอทที่ลงสู่แหล่งน้ำจึงขึ้นกับความสามารถของพื้นที่ในการกักเก็บอินทรีย์สารโดยเฉพาะ

พวกกรดฮิวมิก หรือกรดฟัลวิกให้อยู่ในดินได้ดีเพียงใด ทั้งยังขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำท่า และลักษณะทางกายภาพของดินในพื้นที่นั้น ๆ (Meili et al., 1991) ถึงแม้โดยทั่วไปเนื้อดินจะดูดซับปรอทได้ระดับหนึ่ง แต่ดินที่มีอินทรียสารสูงจะมีแนวโน้มที่จะปลดปล่อยปรอทห่างกว่าดินที่มีอินทรียสารสูง (Engstrom et al., 1994)

2.3.2 การเปลี่ยนรูปแบบทางเคมีของปรอทให้เป็นปรอทอินทรีย์และการสะสมในสิ่งมีชีวิต

ปรอทอินทรีย์ในน้ำทะเลอาจเปลี่ยนรูปไปเป็นโมโนเมทิลเมอร์คิวรี (monomethyl mercury, CH_3Hg^+ หรือ MMHg) ที่มีพิษมากกว่าได้ โดยกระบวนการเมทิลเลชัน (methylation) ขณะเดียวกันแสงอาทิตย์จะเปลี่ยนรูป MMHg ไปเป็นตัวที่มีพิษน้อยกว่าโดยกระบวนการเคมีเชิงแสง (photochemical reaction) หาก MMHg สร้างพันธะกับคลอไรด์ในน้ำทะเล จะหน่วงการเปลี่ยนรูปโดยกระบวนการเคมีเชิงแสง ทำให้ MMHg คงรูปอยู่ในน้ำทะเลได้นานยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม คาร์บอนอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (dissolved organic carbon, DOC) ที่มีอยู่ในน้ำทะเล จะเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยทำลายพันธะในโมเลกุลของ MMHg (Zhang and Hsu-Kim, 2010) เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เข้ามาปะทะกับโมเลกุลของน้ำ จะทำให้เกิดรีแอกทีฟออกซิเจน (reactive oxygen species) ที่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยาสูง ได้แก่ อนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ (superoxide radical, O_2^-) (Sompongchaiyakul, 1999) ซึ่ง O_2^- ที่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยาสูงนี้จะไปทำลายพันธะของสารอินทรีย์กับปรอท ดังนั้นหาก MMHg สร้างพันธะกับ DOC แทนที่จะเป็นคลอไรด์ กระบวนการแตกทำลาย MMHg ก็เกิดขึ้นง่ายและส่วนใหญ่พบได้ในทะเลเปิด อีกทั้งพบว่าปรอทที่ละลายในน้ำลึกจะอยู่ในรูป (1) elemental mercury (Hg^0) (2) ไดเมทิลเมอร์คิวรี (dimethylmercury, $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ หรือ DMHg) และ (3) MMHg ซึ่งโดยทั่วไปปรอทรูปที่เป็น MMHg นั้นจะมีในปริมาณน้อยกว่า Hg^0 และ DMHg ส่วนในน้ำทะเลระดับผิวน้ำจะพบ DMHg น้อยมาก อาจเนื่องมาจาก MMHg ส่วนหนึ่งจะถูกสลายโดยแสงอาทิตย์ทำให้เกิด Hg^0 ซึ่งจะระเหยออกสู่บรรยากาศ (Mason and Fitzgerald, 1997) แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนรูปแบบทางเคมีของปรอทและการสะสมในสิ่งมีชีวิต

แหล่งที่มา: <https://www.whoi.edu/multimedia/mercury-cycle/>

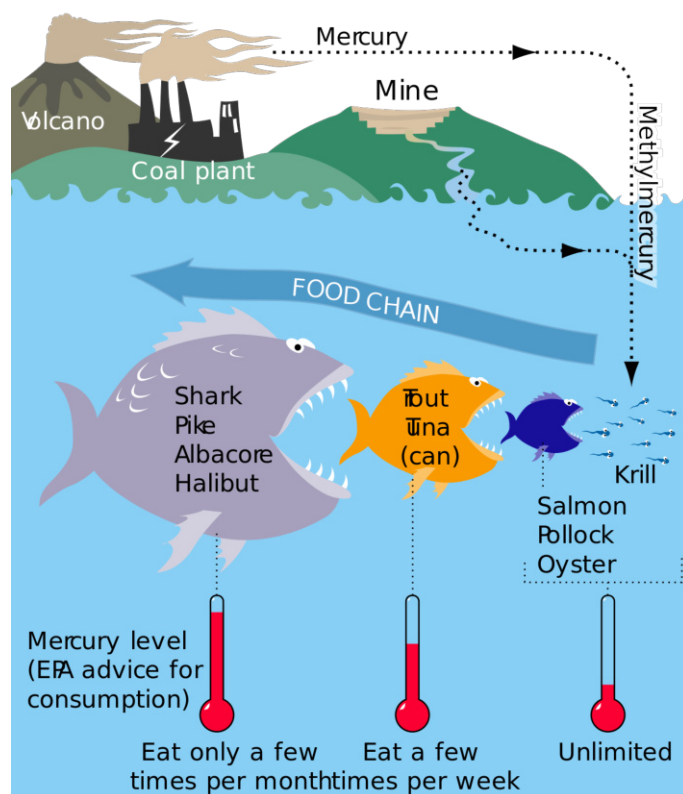
แม้ว่าปรอทจะไม่ถูกทำลายหรือหายไปจากระบบ แต่รูปแบบทางเคมีของปรอทในน้ำทะเลจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นรูปแบบที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำไปใช้ได้ (non-bioavailable) หรือเป็นรูปแบบที่ไม่ละลายน้ำ (non-water soluble) เช่น mercuric sulfide (HgS) และ mercuric oxide (HgO) ดังนั้นปรอทจึงสามารถถูกตรึงและกำจัดออกจากน้ำทะเลแล้วไปสะสมในดินตะกอนได้ อย่างไรก็ตามปรอทที่สะสมในดินตะกอนอาจถูกปล่อยให้กลับออกมาสู่มวลน้ำได้อีก (UNEP, 2002) ทั้งนี้มีการประมาณระยะเวลาพำนัก (residence time) ของปรอทในมหาสมุทรอยู่ที่ 3,200 ปี ขณะที่ระยะเวลาพำนักเฉลี่ยของปรอทในดินตะกอนในมหาสมุทรนั้นอาจจะนานมากกว่า 250 ล้านปี (NRC, 1979)

ปรอทเมื่ออยู่ในดินตะกอนจะมีระยะเวลาพำนักที่นานมาก จึงทำให้มีเวลามากพอที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยจุลินทรีย์ในดินตะกอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสร้างพันธะอยู่กับอินทรีย์สาร ซึ่งทำหน้าที่เป็นทั้งตัวนำพาปรอทและเป็นแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ (Meili, 1991) กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่สำคัญที่เกิดขึ้นและเพิ่มความเข้มข้นของปรอท คือ การเกิดปรอทอินทรีย์ โดยกระบวนการเมทิลเลชัน สารชีวโมเลกุลในดินตะกอนมีส่วนช่วยในการเกิดกระบวนการนี้ โดยเป็นตัวปลดปล่อยกลุ่มเมทิล (methyl group) ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับปรอท กระบวนการเมทิลเลชัน เกิดจากแบคทีเรียพวกที่ใช้ซัลเฟต (sulfate reducing bacteria) และเปลี่ยนรูปปรอทอนินทรีย์ไปเป็น MMHg กระบวนการย้อนกลับที่เรียกว่าดีเมทิลเลชัน (demethylation) ก็เกิดขึ้นเช่นกัน (เบญจวรรณ แสนสิทธิสกุลเลิศ, 2557) สำหรับในดินตะกอนอัตราการเกิดเมทิลเลชันและดีเมทิลเลชันขึ้นกับสภาวะทางกายภาพเคมีและสมบัติทางเคมีของน้ำเหนือดินตะกอนหรือน้ำระหว่างตะกอน ได้แก่ พีเอช ออกซิเจน คาร์บอนอินทรีย์ และปริมาณซัลเฟต (Hudson et al., 1994)

สิ่งมีชีวิตที่อาศัยในบริเวณที่มีปรอทปนเปื้อนจะสะสมปรอทจากน้ำ ดินตะกอน และอาหารที่กินเข้าไป เนื่องจากการหายใจของสัตว์น้ำจำเป็นต้องให้น้ำผ่านเหงือกเพื่อแลกเปลี่ยนออกซิเจน สัตว์น้ำจะรับปรอทจากน้ำเข้าไปสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อได้โดยตรง เมื่อสัตว์ใหญ่กินสิ่งมีชีวิตเล็กปรอทก็จะถ่ายทอดเข้าสู่สัตว์น้ำนั้นได้เรียกกระบวนการนี้ว่าไบโอแอคคิวมูเลชัน (bioaccumulation) และจะถ่ายทอดเป็นทอด ๆ ตามระดับขั้นการกิน (trophic level) ที่สูงขึ้น ดังนั้น พืชปรอทจะสะสมในตัวสัตว์มากขึ้นตามลำดับห่วงโซ่อาหาร กระบวนการนี้เรียกว่าไบโอแมกนิฟิเคชัน (biomagnification) (รูปที่ 2.4) กระบวนการนี้มีบทบาทสำคัญในการส่งผ่านปรอทจากสิ่งแวดล้อมสู่มนุษย์ (Hudson et al., 1994)

ปรอทที่สะสมในเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป MMHg ซึ่งเป็นปรอทอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษสูง (Windom and Cranmer, 1998) การที่ MMHg สะสมมากขึ้นในสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในระดับขั้นการกินที่สูงขึ้น เนื่องจาก MMHg ที่ได้จากกระบวนการโดยจุลินทรีย์ (microbial processes) จะสร้างพันธะที่เสถียร (stable bond) กับหมู่ซัลไฮไดรล (Sulphydryl groups) ในสิ่งมีชีวิตส่งผลให้ปรอทในรูปนี้คงอยู่ในร่างกายสิ่งมีชีวิตได้นานกว่าปรอทในรูปอนินทรีย์ ดังนั้นสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในระดับขั้นการกินที่สูงขึ้นในห่วงโซ่อาหารก็จะมีสัดส่วนของ MMHg ต่อปรอททั้งหมดที่มีในสิ่งมีชีวิตสูงขึ้นด้วย (Windom and Cranmer, 1998) นอกจากนี้การสะสมปรอทของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำนั้นยังสัมพันธ์กับอุณหภูมิด้วย เมื่อแหล่งน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะเร่งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และเร่งกระบวนการเมทิลเลชัน ทำให้เกิด MMHg มากขึ้น และยิ่งเร่งปฏิกิริยารีดอกซ์

ทำให้เกิดเมอร์คิวริกไอออน (mercuric ion; Hg^{2+}) ซึ่ง Hg^{2+} นี้จะถูกดึงเข้าสู่ร่างกายสิ่งมีชีวิตได้ง่าย (U.S. Department of the Interior, 1987)



รูปที่ 2.4 กระบวนการไบโอแอคคิวเมชัน (bioaccumulation) ของปรอทในสิ่งมีชีวิต
แหล่งที่มา: <http://www.groundtruthtrekking.org/Graphics/MercuryFoodChain.html>

2.4 ปริมาณปรอทในดินตะกอนในประเทศไทยและต่างประเทศ

2.4.1 ความเข้มข้นปรอทที่ปนเปื้อนในดินตะกอนอ่าวไทย

จากการสำรวจการปนเปื้อนในดินตะกอนในอดีต พบว่า ความเข้มข้นของปรอทในอ่าวไทยตอนบนมีแนวโน้มสะสมมากขึ้นจากอดีต การศึกษาความเข้มข้นของปรอทในดินตะกอนพื้นที่ปากแม่น้ำแม่กลอง โดย (1) เมื่อปี พ.ศ. 2521 ถึง 2522 พบว่ามีความเข้มข้นของปรอทในดินตะกอนอยู่ในช่วง 36–885 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง (Polprasert et al., 1979) และ (2) ในระหว่างปี พ.ศ. 2522 ถึง 2523 พบว่ามีความเข้มข้นของปรอทในดินตะกอนอยู่ในช่วง 6–46 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง (สุธรรม สิริชัยเกษม และ สุวรรณิ เฉินบำรุง, 2527)

อย่างไรก็ตาม มีตัวอย่างจากบางสถานีที่ยังคงมีค่าความเข้มข้นปรอทในดินตะกอนเกินค่าขั้นต่ำที่ส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตของปรอทในดินตะกอนที่ถูกเสนอไว้ของประเทศไทย (Effects Range Low, ERL) เท่ากับ 150 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ค่าความเข้มข้นของปรอทในดินตะกอนสรุปไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความเข้มข้นของปรอทรวมในดินตะกอนในประเทศไทย

ช่วงเวลา ศึกษา (พ.ศ.)	พื้นที่ศึกษา	ปริมาณปรอทในดิน ตะกอน ($\mu\text{g}/\text{kg dw}$)	อ้างอิง
2522	อ่าวไทยตอนบน	49–268	Polprasert et al. (1979)
2525	อ่าวไทยตอนบน	10–260	อำไพ อธิธิเกษม (2521)
2541	อ่าวไทยตอนบน	50 – 2,800	EVS Environment Consultants, (1999)
2542	อ่าวไทยตอนบน	ND–280	รัชนีกร บำรุงราชหิรัช และคณะ (2527)
2538 – 2541	อ่าวไทย (รอบแท่นขุดเจาะ และอ่าวไทยตอนบน)	6 – 1,210	Chongprasith and Wilairatanadilok (1999)
2521 – 2522	ปากแม่น้ำแม่กลอง	36–885	Polprasert et al. (1979)
2523	ปากแม่น้ำแม่กลอง	$230 \pm 0.1^*$	Menasveta and Cheevaparanapiwat (1981)
2522 – 2523	ปากแม่น้ำแม่กลอง	6–46	สุธรรม สิทธิชัยเกษม และ สุวรรณณี เฉินบำรุง (2527)
2541	ชายฝั่งอ่าวไทย และอันดามัน	47 – 2,135	Chongprasith and Wilairatanadilok (1999)
เม.ย. 2541	แหลมฉบัง	<5–139	EVS Environment Consultants (1999)
	มาบตาพุด	<5–37	
มิ.ย. – ก.ค. 2541	แหลมฉบัง	24–37	EVS Environment Consultants (1999)
	มาบตาพุด	<5–156	
2555	อ่าวไทยตอนบน	7.67 – 102.4	เบญจวรรณ แสนสิทธิสกุลเลิศ (2557)
	อ่าวไทยตอนกลาง	11.70 – 11.08	
	อ่าวไทยตอนล่าง	8.53 – 81.2	

หมายเหตุ * คือ ค่าเฉลี่ย และ ND คือ ไม่สามารถตรวจวัดได้

2.4.2 ความเข้มข้นปรอทที่ปนเปื้อนในดินตะกอนในต่างประเทศ

ความเข้มข้นของปรอทที่ปนเปื้อนในดินตะกอนแต่ละพื้นที่นั้นมีความเข้มข้นมากน้อยแตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนกิจกรรมที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อน สภาพพื้นที่ และสภาพแวดล้อมในพื้นที่นั้น ๆ แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นของปรอทรวมในดินตะกอนในต่างประเทศ

ช่วงเวลา การศึกษา (ค.ศ.)	พื้นที่ศึกษา	ปริมาณปรอท ในดินตะกอน ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	อ้างอิง
Pristine marine environments			
1999	Arctic ocean	50–100	Gobeil et al. (1999)
2000	Greenland	6–257	Asmund and Nielsen (2000)
2006	Guaratuba Bay, Brazil	15.1 – 44	Sanders et al. (2006)
2007	Eastern basin, the Mediterranean Sea	8.0 – 40.1	Ogrinc et al. (2007)
Disturbed marine environments			
1998	Gulf of Finland	50–320	Leivuori (1998)
1998	Southern Baltic Sea	2–342	Pempkowiak et al. (1998)
1999	Levaca Bay, Texas	5–783	Bloom et al. (1999)
2005	Strait of Georgia, Canada	60–420	Johannessen et al. (2005)
2007	Western basin, the Mediterranean Sea	78.2 – 90.3	Ogrinc et al. (2007)
2010	The East China Sea		Fang and Chen (2010)
	- Inner shelf	26.5 – 47.6	
	- Middle shelf	4.1 – 13.9	
Polluted marine environments			
2000	Cartagena Bay, Columbia	$0.094 \times 10^3 - 10 \times 10^3$	Alonso et al. (2000)
2002	Kastela Bay, Croatia	$14 \times 10^3 - 30 \times 10^3$	Kwokal et al. (2002)
2006	Minamata Bay, Japan	$1.4 \times 10^3 - 4.3 \times 10^3$	Tomiyasu et al. (2006)
2012	Narragansett Bay, Massachusetts	$0.035 \times 10^3 - 2.6 \times 10^3$	Taylor et al. (2012)

แหล่งที่มา : เบนจววรรณ แสนสิทธิสกุลเลิศ (2557)

2.4.3 เกณฑ์คุณภาพดินตะกอน (Sediment Quality Guidelines)

ในแต่ละประเทศได้มีการกำหนดเกณฑ์คุณภาพดินตะกอนโดยแนะนำไม่ให้มีมลพิษ รวมถึงปรอทไม่ให้เกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ (ตารางที่ 2.3)

ตารางที่ 2.3 เกณฑ์ค่ามาตรฐานของปรอทในดินตะกอน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง) ของประเทศไทย สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย-นิวซีแลนด์ และฮ่องกง

โลหะ	ไทย*		สหรัฐอเมริกา		ออสเตรเลีย-นิวซีแลนด์		ฮ่องกง	
	ERL	ERM	ERL	ERM	ISQV-Low	ISQV-High	ISQV-Low	ISQV-High
Hg	150	710	150	710	150	1000	280	1000

แหล่งที่มา : เบญจวรรณ แสนสิทธิสกุลเลิศ (2557)

ERL = Effects Range Low

ERM = Effects Range Median

ISQV = Interim Sediment Quality Values

* จากข้อเสนอเกณฑ์ค่ามาตรฐานของปรอทในดินตะกอนของกรมควบคุมมลพิษ Utoomprukporn (2006)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 งานวิจัยเกี่ยวกับซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด

Sirirat (2011) ศึกษาปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด โดยวิธี purge and trap ตามด้วยการวิเคราะห์แบบ colorimetry ในดินตะกอนผิวหน้าจากอ่าวไทยตอนบน จำนวน 30 สถานี และปากแม่น้ำเจ้าพระยา จำนวน 16 สถานี สํารวจในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2553 และ เดือนมีนาคม พ.ศ. 2554 ตามลำดับ พบว่าปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรดในดินตะกอนอ่าวไทยตอนบน อยู่ในช่วง 0.008-1.367 $\mu\text{mol/g}$ และมีค่าเฉลี่ย 0.188 \pm 0.303 $\mu\text{mol/g}$ ส่วนปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรดในดินตะกอนปากแม่น้ำเจ้าพระยา อยู่ในช่วง 0.011-3.339 $\mu\text{mol/g}$ และมีค่าเฉลี่ย 1.753 \pm 1.070 $\mu\text{mol/g}$

Jiwarungrueangkul et al. (2015) ศึกษาปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด โดยวิธี purge and trap ตามด้วยการวิเคราะห์แบบ colorimetry ในดินตะกอนตามระดับความลึก (0-25 cm) จำนวน 5 สถานี บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา เก็บตัวอย่างในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2554 พบว่าปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรดในดินตะกอนตามระดับความลึกบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยาอยู่ในช่วง 0.03 – 2.21 $\mu\text{mol/g}$ และมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 0.99 \pm 0.56 $\mu\text{mol/g}$

Wattanapongsakul (2018) ศึกษาปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด โดยวิธี purge and trap ตามด้วยการวิเคราะห์แบบ colorimetry ในดินตะกอนบริเวณอ่าวไทยตอนใน ครอบคลุมละติจูดที่ 12.74 – 13.40 องศาเหนือ และลองจิจูดที่ 100.16 – 100.83 องศาตะวันออก เก็บตัวอย่าง 2 ครั้ง ในช่วงเปลี่ยนฤดู

มรสุม (inter-monsoon seasons) เดือนตุลาคม พ.ศ. 2560 และเดือนเมษายน พ.ศ. 2561 พบว่าปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรดในเดือนตุลาคมมีค่าอยู่ในช่วง $<0.0004 - 3.801 \mu\text{mol/g}$ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1.547 \pm 1.3225 \mu\text{mol/g}$ สำหรับเดือนเมษายน มีค่าซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรดอยู่ในช่วง $0.008 - 7.896 \mu\text{mol/g}$ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1.844 \pm 1.920 \mu\text{mol/g}$

Chaikaew and Sompongchaiyakul (2018) ได้รายงานปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรดในดินตะกอนบริเวณตะวันออกเฉียงของอ่าวไทยตอนบน โดยวิธี purge and trap ตามด้วยการวิเคราะห์แบบ colorimetry พบว่าปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรดมีค่าอยู่ในช่วง $0.003 - 0.349 \text{ mg/g}$

2.5.2 งานวิจัยเกี่ยวกับสารอินทรีย์ในดินตะกอน

Sirirat (2011) ศึกษาปริมาณสารอินทรีย์ ใช้เทคนิค chromic acid ในดินตะกอนจากอ่าวไทยตอนบน 30 สถานี และปากแม่น้ำเจ้าพระยา 16 สถานี สำรวจในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2553 และ เดือน มีนาคม พ.ศ. 2554 ตามลำดับ พบว่าปริมาณสารอินทรีย์ในดินตะกอนอ่าวไทยตอนบน อยู่ในช่วงร้อยละ $1.62 - 4.76$ และมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 3.02 ± 0.49 ปริมาณปริมาณสารอินทรีย์ในดินตะกอนปากแม่น้ำเจ้าพระยา อยู่ในช่วงร้อยละ $1.37 - 4.65$ และมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 3.09 ± 0.53

เบญจวรรณ แสนสิทธิสกุลเลิศ (2557) ศึกษาปริมาณปรอท ใช้เทคนิค acid-base titration ตามวิธีทดสอบที่ใช้ใน Sompongchaiyakul (1989) ในดินตะกอนผิวหน้าของอ่าวไทย แบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ อ่าวไทยตอนบน อ่าวไทยตอนกลาง และอ่าวไทยตอนล่าง พบว่าปริมาณคาร์บอนอินทรีย์อยู่ในช่วงร้อยละ $0.55 - 2.77$ $0.22 - 2.19$ และ $0.11 - 1.76$ ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ มีค่าร้อยละ 1.60 ± 0.60 0.93 ± 0.48 และ 0.69 ± 0.34 ตามลำดับ

Wattanapongsakul (2018) ศึกษาปริมาณสารอินทรีย์ ใช้เทคนิค acid-base titration ตามวิธีทดสอบที่ใช้ใน Sompongchaiyakul (1989) ในดินตะกอนบริเวณอ่าวไทยตอนใน ครอบคลุมละติจูดที่ $12.74 - 13.40$ องศาเหนือ และลองจิจูดที่ $100.16 - 100.83$ องศาตะวันออก เก็บตัวอย่าง 2 ครั้ง ในช่วงเปลี่ยนฤดูมรสุม (inter-monsoon seasons) เดือนตุลาคม พ.ศ. 2560 และเดือนเมษายน พ.ศ. 2561 พบว่าปริมาณสารอินทรีย์ในเดือนตุลาคมมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ $0.41 - 2.44$ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 1.14 ± 0.56 สำหรับเดือนเมษายน มีค่าสารอินทรีย์อยู่ในช่วงร้อยละ $0.22 - 1.98$ ค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 0.93 ± 0.48

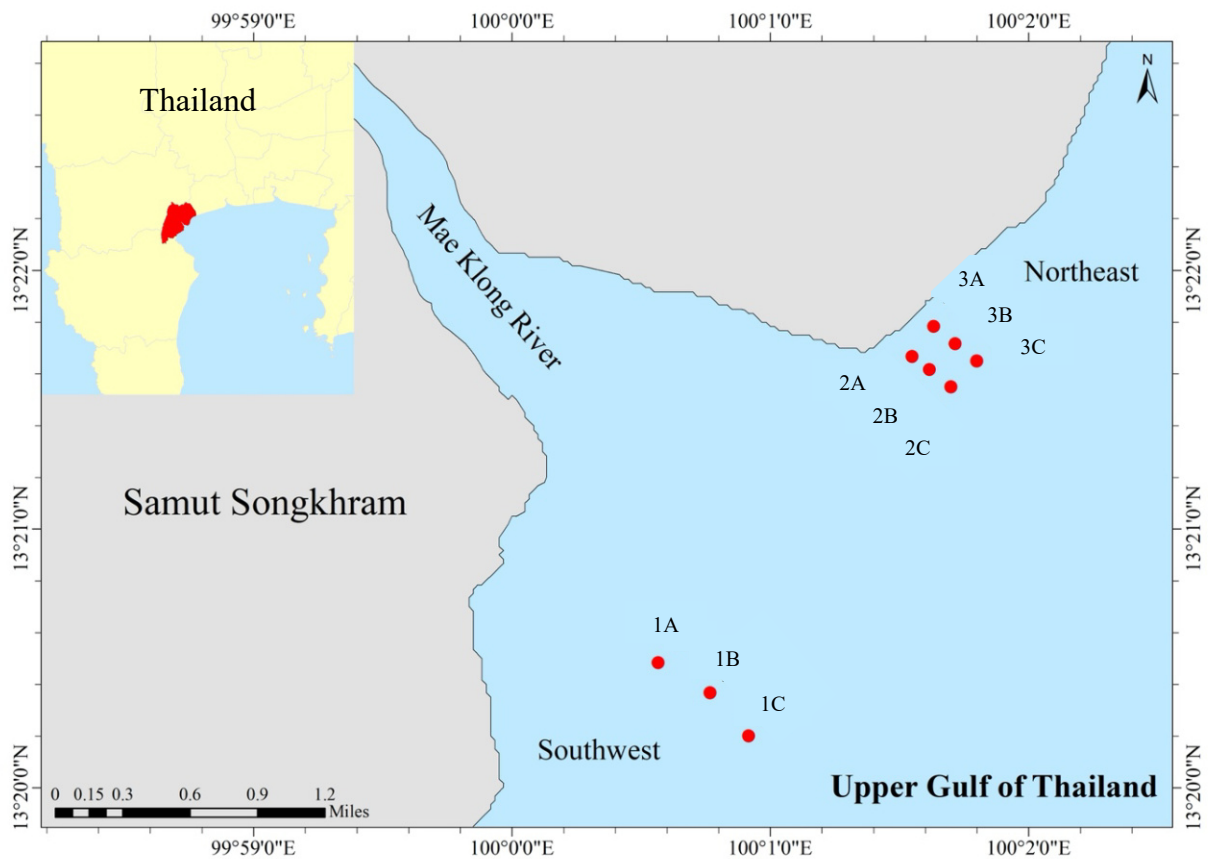
บทที่ 3 วิธีการศึกษา

3.1 การสำรวจพื้นที่ศึกษา

การสำรวจพื้นที่ศึกษาเพื่อกำหนดจุดเก็บตัวอย่างกระทำโดยการสำรวจพื้นที่ศึกษาด้วยรถยนต์ บริเวณดอนหอยหลอด ผ่านลานร้านค้าชุมชนดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม ควบคุมไปกับการศึกษาพื้นที่โดยใช้แผนที่อัตราส่วน 1 : 50,000 อีกทั้งยังสอบถามชาวประมงท้องถิ่นและเจ้าหน้าที่ของมูลนิธิศาลกรมหลวงชุมพรเขตอุดมศักดิ์ จังหวัดสมุทรสงคราม เพื่อวางแผนการเก็บตัวอย่าง

3.2 การกำหนดสถานีเก็บตัวอย่าง

กำหนดสถานีเก็บตัวอย่างโดยให้ครอบคลุมพื้นที่ดอนหอยหลอด ปากแม่น้ำแม่กลอง จังหวัดสมุทรสงคราม โดยกำหนดจุดเก็บตัวอย่างให้เป็นแถวตั้งฉากกับชายฝั่ง แถวละ 3 สถานี บริเวณทิศตะวันตกเฉียงใต้ จำนวน 1 แถว 3 สถานี เป็นเส้นการศึกษาที่ 1 ประกอบไปด้วยสถานี 1A 1B และ 1C ตามลำดับ บริเวณทิศตะวันออกเฉียงเหนือ จำนวน 2 แถว 6 สถานี เป็นเส้นการศึกษาที่ 2 และ 3 ประกอบไปด้วยสถานี 2A 2B 2C 3A 3B และ 3C ตามลำดับ รวมทั้งสิ้น 9 สถานี ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 จุดเก็บตัวอย่างบริเวณดอนหอยหลอด ปากแม่น้ำแม่กลอง จังหวัดสมุทรสงคราม

3.3 การเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างในงานวิจัยครั้งนี้ ดำเนินการในวันที่ 23 สิงหาคม พ.ศ. 2563 โดยเก็บตัวอย่างดินตะกอนตามความลึกด้วย core liner ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 60 เซนติเมตร ตัดแบ่งดินตะกอนที่ได้ออกเป็นชั้น หนาชั้นละ 5 เซนติเมตร วัดค่า redox potential (Eh) ของดินตะกอนในชั้นแรก (0-5 เซนติเมตร) ของทุกสถานี จากนั้นนำดินตะกอนใส่ถุงซิปล็อคที่ปิดสนิท และไล่อากาศออกจากถุงซิปล็อค เก็บรักษาไว้ในตู้แช่แข็ง (freezer) ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อนำมาวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการ



(ก) core liner



(ข) กลุ่มเก็บตัวอย่าง

รูปที่ 3.2 (ก-ข) แสดงอุปกรณ์การเก็บตัวอย่างดินตะกอน (ก) core liner และ (ข) กลุ่มเก็บตัวอย่าง

3.4 การเตรียมวัสดุอุปกรณ์

ในการวิเคราะห์ตัวอย่างดินตะกอน มีการวิเคราะห์พร้อมด้วยซึ่งเป็นโลหะปริมาณน้อย ต้องระมัดระวังการปนเปื้อน (contamination) ที่อาจเกิดขึ้นได้ในทุกขั้นตอนของการดำเนินการ เพื่อลดการปนเปื้อนจึงควรต้องเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. ห้องปฏิบัติการ ต้องสะอาดไม่มีฝุ่นละออง เนื่องจากในฝุ่นละอองประกอบไปด้วยโลหะหนักหลายชนิด อาจรวมไปถึงปรอท ซึ่งอาจจะทำให้ตัวอย่างปนเปื้อนได้
2. ทำความสะอาดภาชนะที่ใช้ด้วยน้ำยาล้างเครื่องแก้ว ล้างด้วยน้ำสะอาด ภาชนะที่เป็นแก้วแช่ในกรดไฮโดรคลอริก 10 เปอร์เซ็นต์ ส่วนภาชนะพลาสติกแช่ในกรดไนตริก 10 เปอร์เซ็นต์ อย่างน้อย 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาล้างด้วย น้ำกลั่น ผึ่งให้แห้งแล้วเก็บไว้ในถุงซิปล็อคที่สะอาดจนกว่าจะนำมาใช้งาน
3. น้ำกลั่นที่ใช้เป็นน้ำกลั่นสองครั้ง (double distilled water) และนำไปผ่านระบบกำจัดไอออน (deionization) ชนิด Nanopure 4 column
4. สารเคมีที่ใช้ควรเป็นสารเคมีที่มีปริมาณโลหะหนักอยู่น้อยที่สุด เช่น เลือกใช้กรดชนิด Ultrapure หรือ กรดชนิด reagent grade ที่ผ่านการกลั่นก่อนนำมาใช้งาน

3.5 การเตรียมตัวอย่างดินตะกอน

นำตัวอย่างดินตะกอนส่วนหนึ่งมาวิเคราะห์หาค่าเปอร์เซ็นต์น้ำ อีกส่วนหนึ่งนำไปวิเคราะห์ปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด จากนั้นนำดินตะกอนที่เหลือไปทำให้แห้งด้วยวิธีการทำแห้งเยือกแข็ง (freeze-drying) ด้วยเครื่อง freeze drier ยี่ห้อ Heto รุ่น LyoPro6000 โดยไม่ต้องถ่ายดินตะกอนออกจากถุงพลาสติกเพื่อลดการปนเปื้อน แสดงดังรูปที่ 3.3 เมื่อตัวอย่างดินตะกอนแห้งแล้วร่อนตัวอย่างด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร บดให้ละเอียดด้วยโกร่งโมรา (agate mortar and pestle) จนเนื้อดินตะกอนละเอียดและเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณรวมปรอท และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดินตะกอนเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม แสดงดังรูปที่ 3.4

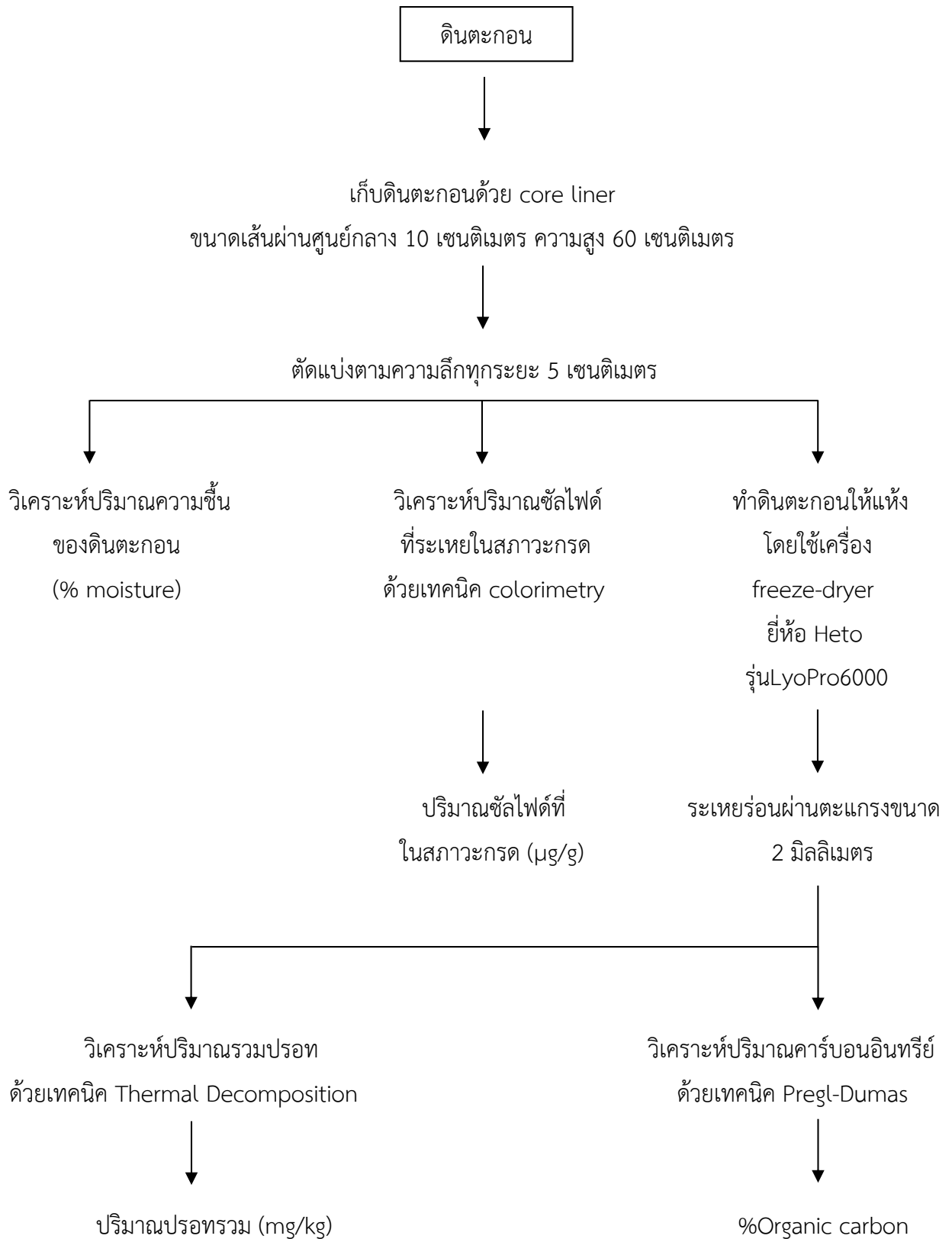


(ก) เครื่อง freeze drier



(ข) การจัดวางตัวอย่าง

รูปที่ 3.3 (ก-ข) วิธีการทำแห้งเยือกแข็ง (freeze-drying) (ก) เครื่อง freeze drier (ข) การจัดวางตัวอย่าง



รูปที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการวิเคราะห์ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมทางกายภาพและเคมีของดินตะกอน

3.6 การวิเคราะห์ดินตะกอนทางกายภาพและเคมี

ตารางที่ 3.1 วิธีการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของดินตะกอน

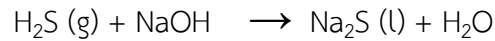
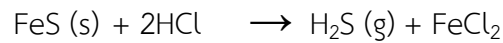
พารามิเตอร์	เทคนิค	เอกสารอ้างอิง
เปอร์เซ็นต์น้ำในดินตะกอน (% moisture)	อบที่ 100 องศาเซลเซียส	Loring and Rantala (1990)
ปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด (acid volatile sulfide, AVS)	purge and trap (colorimetry)	Allen and Fu (1991)
ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (organic carbon, OC)	Pregl-Dumas	Ramamoorthi and Meena (2018)
ปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการ สกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรด (simultaneously-extracted mercury, SE-Hg)	Wet-chemical preparation cold vapor atomic absorption spectrophotometry	Guo and Baasner (1996)
ปริมาณปรอทรวม (total mercury, T-Hg)	Thermal decomposition cold vapor atomic absorption spectrophotometry	Bunnaranurak and Tangtreamjitmun (2018)

3.6.1 การวิเคราะห์ปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด (acid volatile sulfide, AVS)

การวิเคราะห์ซัลไฟด์ที่ระเหยง่ายในสภาวะกรดในดินตะกอน ใช้หลักการสกัดในสภาวะที่เป็นกรด (acid extracted) เพื่อแยกซัลไฟด์ที่อยู่ในรูปสารประกอบโลหะซัลไฟด์ในดินตะกอนออกมาอยู่ในรูปไอออนในสารละลาย จากนั้นทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสี เพื่อนำไปวัดความเข้มข้นของสารด้วยเครื่อง spectrophotometer ในระบบการทดลองนี้ทำภายใต้สภาวะที่ไร้ออกซิเจนโดยผ่านก๊าซไนโตรเจนอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ทดลองเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของตัวอย่างและให้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวพา ก๊าซไนโตรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่เกิดขึ้นไปยังสารละลายที่ดักจับซัลไฟด์ (Allen and Fu, 1991)

ก่อนเริ่มวิเคราะห์ผ่านก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ระบบก่อนเพื่อให้ระบบอยู่ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน ในขั้นตอนแรกก๊าซที่ถูกเป่าออกมาแล้วต้องผ่านสารละลาย 0.1M vanadous sulphate ซึ่งเป็นสารละลายที่ใช้ดักจับออกซิเจน (oxygen scrubbing solution) ก่อนที่จะส่งไปยัง flask ที่มีตัวอย่างดินตะกอนเปียกอยู่ประมาณ 10 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นที่ปราศจากออกซิเจน หลังจากนั้นฉีดกรดไฮโดรคลอริก (6M HCl) ด้วยหลอดฉีดยาลงใน reaction flask 20 มิลลิลิตร เพื่อให้ซัลไฟด์ที่ถูกตรึงไว้อยู่ในดินตะกอนระเหยออกมาในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ แล้วถูกก๊าซไนโตรเจนพาไปสู่ขวด flask ที่มีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (0.5M

NaOH) ปริมาตร 80 มิลลิลิตรซึ่งเป็นสารละลายที่ใช้ในการดักจับซัลไฟด์ จำนวน 1 ขวด โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้ Allen and Fu (1991)



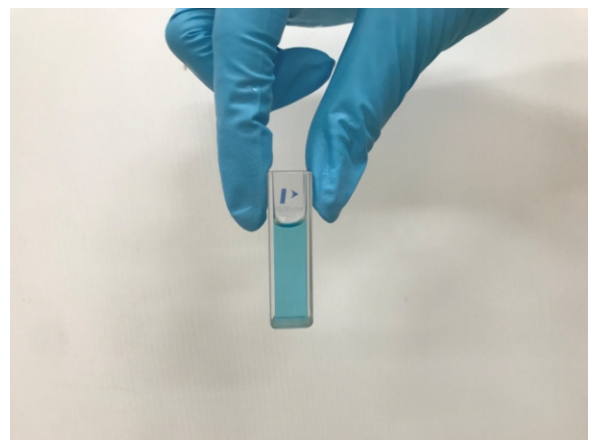
สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับสาร mixed diamine reagent (MDR) ซึ่งเป็นสารผสมของ N-N-dimethyl-p-phenylenediamine oxalate ในกรดซัลฟูริกเข้มข้น กับ ferric chloride ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีน้ำเงิน แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง spectrophotometer ค่าดูดกลืนแสงที่ตรวจวัดได้จะคำนวณเป็นความเข้มข้นในหน่วยไมโครเมตรต่อมิลลิลิตร ($\mu\text{mol/mL}$) เทียบกับ standard calibration curve แล้วจึงนำไปคำนวณปริมาณซัลไฟด์ในดินตะกอนที่ระเหยได้เมื่อเติมกรด ดังสมการ Allen and Fu (1991)

$$\text{AVS (mg/g)} = ([C] \times V_s \times 32.06) / (W_s \times 1000)$$

โดยที่	AVS	คือ	ปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยได้เมื่อเติมกรด (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	[C]	คือ	ความเข้มข้นของซัลไฟด์ในดินตะกอน (ไมโครลิตรต่อมิลลิลิตร)
	V_s	คือ	ปริมาตรสุดท้ายของสารละลายตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
	W_s	คือ	น้ำหนักเปียกของตัวอย่างดินตะกอน (กรัม)
	32.06	คือ	น้ำหนักโมเลกุลซัลไฟด์



(ก) การแยกซัลไฟด์ออกมาอยู่ในรูปไอออนในสารละลาย



(ข) สารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีน้ำเงิน

รูปที่ 3.5 การวิเคราะห์ปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด (ก) การแยกซัลไฟด์ออกมาอยู่ในรูปไอออนในสารละลาย และ (ข) สารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีน้ำเงิน

ควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์ โดยวิเคราะห์ซ้ำร้อยละ 10 ของตัวอย่างทั้งหมด เพอร์เซ็นต์ความแตกต่างของการวิเคราะห์ซ้ำ (percent reproducibility หรือ %RPD) ต้องอยู่ในช่วงไม่เกินร้อยละ 10

3.6.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ในดินตะกอน (organic carbon, OC)

การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ในดินตะกอน อาศัยหลักการตาม Pregl-Dumas เริ่มจากนำดินตะกอนแห้งมาบดให้ละเอียดด้วย agate mortar จากนั้นนำดินตะกอนที่บดละเอียดแล้ว 5 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลองแก้ว เติมสารละลาย 10% HCl เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ ในหลอดทดลองจะมีฟองแก๊สเกิดขึ้น ให้เติมสารละลาย 10% HCl เพิ่มจนกว่าจะไม่มีฟองแก๊สเกิดขึ้น จากนั้นล้างดินตะกอนจากสภาวะกรดด้วยน้ำกลั่น ปรับค่า pH ให้มีค่าเท่ากับ 6 และนำดินตะกอนไปทำให้แห้งด้วยวิธีการทำแห้งเยือกแข็ง (freeze-dryer) ด้วยเครื่อง Freeze drier ยี่ห้อ Heto รุ่น LyoPro6000 บรรจุดินตะกอนที่แห้งแล้วในแคปซูลที่ทำด้วยดีบุก (tin cup) ชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่อง Autobalance Controller ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น AD 6 ให้น้ำหนักที่แน่นอนของตัวอย่าง นำตัวอย่างมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง CHN/O Analyzer รุ่น PE 2400 Series II ในการวิเคราะห์ดินตะกอนตัวอย่างจะถูกเผา แก๊สที่เกิดขึ้นจะผ่าน Combustion tube และ Reduction tube จากนั้น คาร์บอน และไนโตรเจน จะถูกวัดโดย Thermal Conductivity Detector (TCD) ได้ออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์

ควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์ โดยวิเคราะห์ซ้ำร้อยละ 10 ของตัวอย่างทั้งหมดเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของการวิเคราะห์ซ้ำ (percent reproducibility หรือ %RPD) ต้องอยู่ในช่วงไม่เกินร้อยละ 10

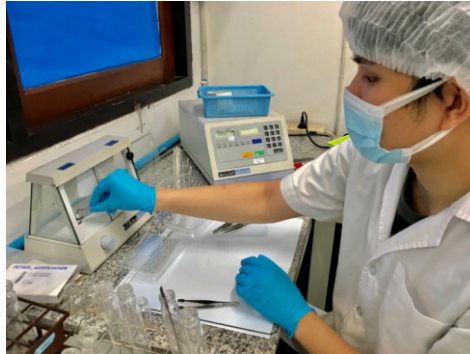
ตลอดการวิเคราะห์ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์โดยใช้ Certified Reference Material (CRM) ตรวจวัดไปด้วย ซึ่ง CRM ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้คือ New ISO 17034 acetanilide ผลิตโดย Elemental Microanalysis



(ก) บรรจุดินตะกอนที่บดละเอียดลงหลอดแก้ว



(ข) กำจัดสารอินทรีย์ในดินตะกอน

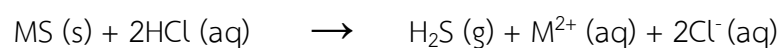


(ค) บรรจุดินตะกอนที่กำจัดสารอินทรีย์แล้ว (ง) เครื่อง CHN/O Analyzer รุ่น PE 2400 Series II
ในแคปซูลที่ทำด้วยดีบุก (tin cup)

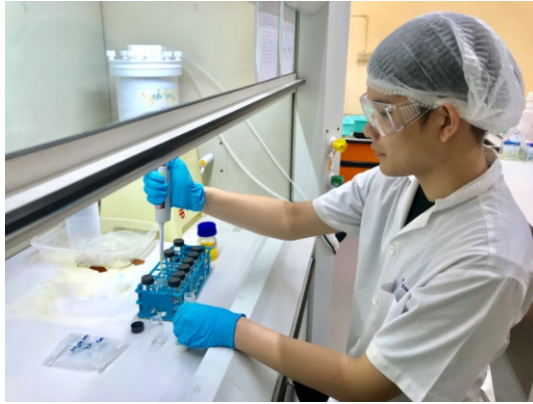
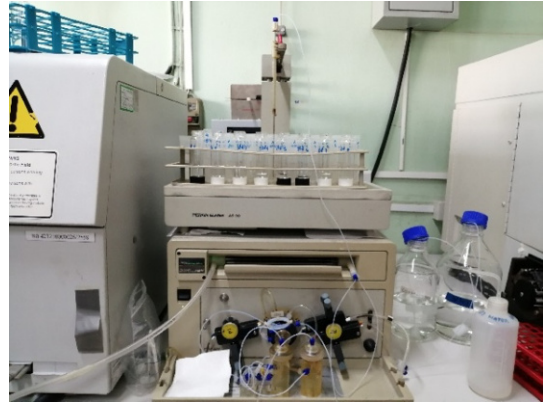
รูปที่ 3.6 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ในดินตะกอน (ก) บรรจุดินตะกอนที่บดละเอียดลงหลอดแก้ว
(ข) กำจัดสารอินทรีย์ในดินตะกอน (ค) บรรจุดินตะกอนที่กำจัดสารอินทรีย์แล้วในแคปซูลที่ทำด้วยดีบุก
(tin cup) และ (ง) เครื่อง CHN/O Analyzer รุ่น PE 2400 Series II

3.6.3 การวิเคราะห์ปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรด (simultaneously-extracted mercury, SE-Hg)

การวิเคราะห์ปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรดในดินตะกอน ใช้หลักการ Wet-chemical preparation cold vapor atomic absorption spectrophotometry ที่สัมพันธ์กันกับการวิเคราะห์ปริมาณซัลไฟด์ในดินตะกอน กล่าวคือ การวิเคราะห์ซัลไฟด์เมื่อฉีดกรดไฮโดรคลอริก (6M HCl) ซัลไฟด์ที่ถูกตรึงไว้อยู่ในดินตะกอนระเหยออกมาในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ แล้วถูกก๊าซไนโตรเจนพาไปสู่ขวด flask ที่มีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (0.5M NaOH) ซึ่งเป็นสารละลายที่ใช้ในการดักจับซัลไฟด์ โดยที่ flask ตัวอย่างที่ใส่ดินตะกอนจากเดิมมีองค์ประกอบเป็นของแข็งที่เกิดจากการจับตัวกันของโลหะหนักและซัลไฟด์ (MS) เมื่อฉีดกรดไฮโดรคลอริก (6M HCl) ทำให้ flask ตัวอย่างดังกล่าวเหลือเพียงโลหะหนักที่เป็นของเหลว (M^{2+}) โดยนำของเหลวที่เหลืออยู่มาวิเคราะห์หาปริมาณปรอท ขั้นตอนแรกคือ นำสารละลายใน flask ตัวอย่างหลังจากวิเคราะห์ปริมาณซัลไฟด์แล้ว มากรองด้วยกระดาษกรอง GF/C จากนั้นนำสารละลายที่กรองแล้วไปวิเคราะห์หาปริมาณปรอทโดยใช้เครื่อง FIMS 400 Flow Injection Mercury System ยี่ห้อ PerkinElmer ในการวิเคราะห์ ซึ่งปรอททุกรูปในสารละลายจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นไอปรอทด้วย sodium borohydride ($NaBH_4$) จากนั้นไอปรอทนี้จะถูกนำเข้าสู่เครื่องตรวจวัดด้วยแก๊สอาร์กอน เพื่อวัดปริมาณการดูดกลืนแสงที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณปรอทที่มีอยู่ในสารละลาย



ควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์ โดยวิเคราะห์ซ้ำร้อยละ 10 ของตัวอย่างทั้งหมด เพอร์เซ็นต์ความแตกต่างของการวิเคราะห์ซ้ำ (percent reproducibility หรือ %RPD) ต้องอยู่ในช่วงไม่เกินร้อยละ 10

(ก) การเติม sodium borohydride (NaBH_4)

(ข) เครื่อง FIMS 400 Flow Injection Mercury System ยี่ห้อ PerkinElmer

รูปที่ 3.7 (ก-ข) การวิเคราะห์ปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรด (ก) การเติม sodium borohydride (NaBH_4) และ (ข) เครื่อง FIMS 400 Flow Injection Mercury

3.6.4 การวิเคราะห์ปริมาณปรอทรวมในดินตะกอน (total mercury, T-Hg)

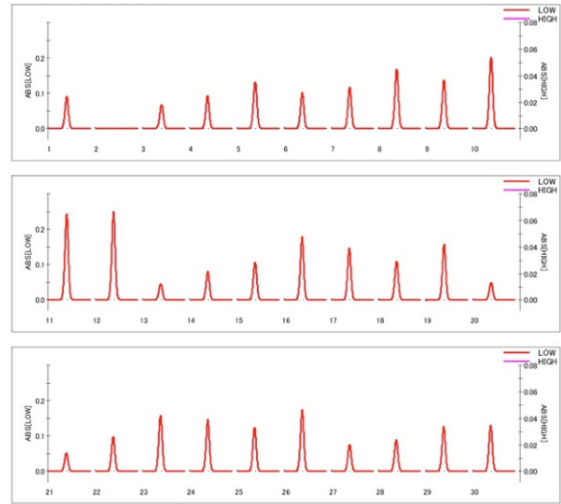
การวิเคราะห์ปริมาณปรอทรวมในดินตะกอน อาศัยหลักการ Thermal decomposition cold-vapor atomic absorption spectrophotometry เริ่มจากชั่งดินตะกอนที่บดละเอียด 0.1 กรัม ทราบน้ำหนักที่แน่นอนอนทศนิยม 4 ตำแหน่ง นำเข้าเครื่องวิเคราะห์ปรอท ยี่ห้อ Nippon Instruments Corporation (NIC) รุ่น MA-3000 ตัวอย่างดินตะกอนจะถูกเผาด้วยอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นออกจากดินตะกอนตัวอย่าง ปรอทจะถูกรีดิวซ์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา คืออุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ให้แตกตัวกลายเป็นไอของปรอทอิสระ (Hg^0) โดยมีตัวพา คือ แก๊สออกซิเจน อัตราการไหล 0.2 L/min จากนั้นไอปรอทจะถูกดูดซับด้วยทรายที่เคลือบด้วยทอง (gold-coated san) ในอะมัลกัมเมเตอร์ (amalgamator) เกิดเป็นโลหะผสมที่เรียกว่า อะมัลกัม (Amalgam) ของปรอทและทอง ส่วนแก๊สอื่นที่เกิดขึ้นจะไม่ถูกดูดซับด้วยทอง แต่ถูกแก๊สออกซิเจนพาไปที่ตัวกรองดักจับของเสีย ให้ความร้อนกับอะมัลกัมเมเตอร์ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ไอปรอทจะถูกปลดปล่อยและถูกพาไปตรวจวัดค่าดูดกลืนแสงที่แอบซอร์พชันเซลล์ (absorption cell) ที่ความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร บันทึกค่าในหน่วยพื้นที่ นำค่าพื้นที่ที่ได้ไปคำนวณน้ำหนักปรอทจากกราฟมาตรฐาน ผลการวิเคราะห์ปริมาณปรอทที่ได้จะรายงานในหน่วยน้ำหนักปรอทต่อน้ำหนักดินตะกอนที่ตรวจวัด (mg/kg) Bunnaranurak and Tangreamjitmun (2018)

ควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์ โดยวิเคราะห์ซ้ำร้อยละ 10 ของตัวอย่างทั้งหมดเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของการวิเคราะห์ซ้ำ (percent reproducibility หรือ %RPD) ต้องอยู่ในช่วงไม่เกินร้อยละ 10

ตลอดการวิเคราะห์ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์โดยใช้ Certified Reference Material (CRM) ตรวจวัดไปด้วย ซึ่ง CRM ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้คือ BCR-277R estuarine sediment (trace elements) ผลิตโดย Institute for Reference Materials and Measurements (IRMM)



(ก) เครื่องวิเคราะห์ปรอท ยี่ห้อ Nippon Instruments Corporation (NIC) รุ่น MA-3000



(ข) กราฟแสดงค่าดูดกลืนแสง

รูปที่ 3.8 (ก-ข) การวิเคราะห์ปริมาณปรอทรวมในดินตะกอน (ก) เครื่องวิเคราะห์ปรอท ยี่ห้อ Nippon Instruments Corporation (NIC) รุ่น MA-3000 และ (ข) กราฟแสดงค่าดูดกลืนแสง

3.7 การวิเคราะห์ความรุนแรงของการปนเปื้อนปรอท

การบ่งชี้ความรุนแรงของการปนเปื้อนปรอทในดินตะกอนบริเวณดอนหอยหลอด ปากแม่น้ำแม่กลอง จังหวัดสมุทรสงคราม โดยประมาณค่าของการปนเปื้อนปรอทที่สะสมในดินตะกอน คำนวณได้จากค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี (geoaccumulation index : I_{geo}) Müller (1969) จากสูตร

$$I_{geo} = \log_2 (C_n / 1.5B_n)$$

โดยที่ C_n คือ ความเข้มข้นของปรอทในดินตะกอน
 B_n คือ ความเข้มข้นพื้นฐาน (background concentration) ของปรอทเฉลี่ยในดินตะกอนทั่วไปเท่ากับ 0.4 ppm (Turekian and Wedepohl, 1961)

การใช้ค่า I_{geo} ในการประเมินการปนเปื้อนนั้น จะมีการแยกระดับความรุนแรงของการปนเปื้อนออกเป็น 7 ระดับ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ระดับการบ่งชี้ความรุนแรงตามค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี (geoaccumulation index : I_{geo})
Müller (1969)

I_{geo}	I_{geo} Class	ความรุนแรงของการปนเปื้อน
>5	6	ปนเปื้อนรุนแรงมาก (Extremely pollution)
4-5	5	ปนเปื้อนรุนแรงถึงปนเปื้อนรุนแรงมาก (Strongly to extremely polluted)
3-4	4	ปนเปื้อนรุนแรง (Strongly polluted)
2-3	3	ปนเปื้อนไม่รุนแรงถึงปนเปื้อนรุนแรง (Moderately to Strongly polluted)
1-2	2	ปนเปื้อนไม่รุนแรง (Moderately polluted)
0-1	1	ไม่ปนเปื้อนถึงไม่ปนเปื้อนรุนแรง (Unpolluted to Moderately polluted)
<1	0	ไม่ปนเปื้อน (Unpolluted)

บทที่ 4 ผลการศึกษา และวิจารณ์ผล

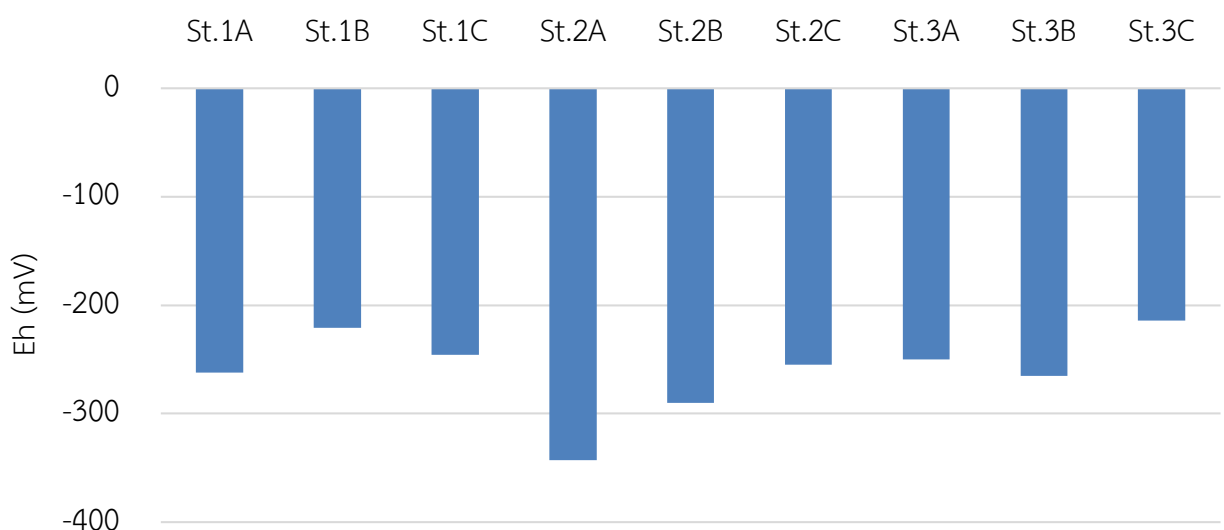
ผลการวิเคราะห์ปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนตามระดับความลึก และสมบัติทางกายภาพเคมีของดินตะกอน บริเวณดอนหอยหลอด ปากแม่น้ำแม่กลอง จังหวัดสมุทรสงคราม จำนวน 9 สถานี ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ และวิจารณ์ผลการศึกษา มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

4.1 ลักษณะทางกายภาพ

จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพ พบว่า ดินตะกอนฝั่งทิศตะวันตกเฉียงใต้ (Southwest, SW) ของปากแม่น้ำแม่กลอง ส่วนใหญ่เป็นทราย (sand) เนื้อค่อนข้างละเอียด มีเศษเปลือกหอยค้อยข้างมาก ส่วนดินตะกอนฝั่งทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (Northeast, NE) ของปากแม่น้ำแม่กลอง ส่วนใหญ่เป็นทรายแป้งปนดินเหนียว (clayey silt) เนื้อค่อนข้างละเอียด มีสีน้ำตาลเข้มปนดำ มีกลิ่นเหม็น มีเศษเปลือกหอยปะปนในบางชั้น

4.2 ผลการศึกษาค่า redox potential (Eh)

ผลการวัดค่า Eh ในดินตะกอนชั้นแรก (0-5 เซนติเมตร) ของทุกสถานี มีค่าอยู่ในช่วง -343 ถึง -214 mV ค่าเฉลี่ยเท่ากับ -264 mV ดินตะกอนชั้นแรก ในทิศ SW ของปากแม่น้ำแม่กลอง มีค่าอยู่ในช่วง -262 ถึง -221 mV ค่าเฉลี่ยเท่ากับ -243 mV ดินตะกอนชั้นแรก ในทิศ NE ของปากแม่น้ำแม่กลอง มีค่าอยู่ในช่วง -343 ถึง -214 mV ค่าเฉลี่ยเท่ากับ -270 mV กราฟแสดงค่า Eh อยู่ในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่า redox potential (Eh) ในดินตะกอนชั้นแรก (0-5 เซนติเมตร) ของทุกสถานี

4.3 ผลการวิเคราะห์หาค่าเปอร์เซ็นต์น้ำในดินตะกอน (% moisture)

จากการควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์ โดยวิเคราะห์ซ้ำร้อยละ 10 ของตัวอย่างทั้งหมด (percent reproducibility หรือ %RPD) ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์น้ำในดินตะกอน มีค่าเท่ากับร้อยละ 6.72 ± 4.40 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (ไม่เกินร้อยละ 10) แสดงว่าผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำ

จากการศึกษา พบว่าตัวอย่างดินตะกอนประกอบด้วยน้ำน้อยกว่าร้อยละ 35 รายงานในตาราง ข-1 ในภาคผนวก ข พิสัย ค่าเฉลี่ย และค่ากลาง ของเปอร์เซ็นต์น้ำในดินตะกอนบริเวณที่ศึกษา สรุปลงในตารางที่ 4.1 โดยค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์น้ำในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกทั้งหมด มีค่าเท่ากับร้อยละ 27.30 ± 3.79 ส่วนทิศ SW ของปากแม่น้ำแม่กลอง เส้นการศึกษาที่ 1 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์น้ำในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกมีค่าร้อยละ 25.60 ± 2.97 สำหรับทิศ NE ของปากแม่น้ำแม่กลอง เส้นการศึกษาที่ 2 และ 3 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์น้ำในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกมีค่าร้อยละ 28.17 ± 3.87

แนวโน้มของเปอร์เซ็นต์น้ำในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึก แสดงดังรูปที่ 4.2 (ก-ค) เส้นการศึกษาที่ 1 มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ มีเปอร์เซ็นต์น้ำในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกอยู่ในช่วงร้อยละ 23.65 - 32.04 เส้นการศึกษาที่ 2 มีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน มีเปอร์เซ็นต์น้ำในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกอยู่ในช่วงร้อยละ 19.15 - 33.82 เส้นการศึกษาที่ 3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความลึก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะช่วงเวลาในการเก็บตัวอย่างดินตะกอน ซึ่งอาจมีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำในดินตะกอน เนื่องจากเวลาที่ทำการเก็บตัวอย่างเป็นเวลาที่มีน้ำลงต่ำสุด จึงทำให้บริเวณชั้นบนของดินตะกอนมีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำที่น้อยกว่าชั้นล่างของดินตะกอน มีเปอร์เซ็นต์น้ำในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกอยู่ในช่วงร้อยละ 22.97 - 32.60

ตารางที่ 4.1 พิสัย ค่าเฉลี่ย และค่ากลาง ของเปอร์เซ็นต์น้ำในดินตะกอนบริเวณที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา	เส้นการศึกษา	สถานี	พิสัย	ค่าเฉลี่ย \pm SD	ค่ากลาง
ทิศตะวันตก	1	1A	23.65 – 27.28	24.61 \pm 1.44	24.18
		1B	21.69 – 32.04	28.12 \pm 2.95	29.12
		1C	21.70 – 25.22	24.61 \pm 1.09	23.44
ทิศตะวันออก	2	2A	26.15 – 33.82	30.01 \pm 2.13	29.72
		2B	19.15 – 30.40	30.16 \pm 6.57	30.94
		2C	21.09 – 28.12	26.17 \pm 2.04	26.80
ปากแม่น้ำแม่กลอง	3	3A	25.43 – 32.60	27.57 \pm 2.20	26.69
		3B	22.97 – 31.04	27.87 \pm 3.05	29.85
		3C	23.95 – 29.95	26.48 \pm 2.24	26.35

4.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด (acid volatile sulfide, AVS)

จากการวิเคราะห์ความถูกต้องของการวิเคราะห์ปริมาณ AVS มีค่าเท่ากับร้อยละ 95.3 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (อยู่ในช่วงร้อยละ 90 ถึง 110) แสดงว่าผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำ

ผลการวิเคราะห์ AVS ด้วยเทคนิค colorimetry รายงานในตาราง ข-1 ในภาคผนวก ข พิสัย ค่าเฉลี่ย และค่ากลาง ของปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรดในดินตะกอนบริเวณที่ศึกษา สรุปไว้ในตารางที่ 4.2 พบว่าค่าเฉลี่ย AVS ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 14.28 ± 16.12 $\mu\text{g/g}$ ส่วนในทิศ SW ของปากแม่น้ำแม่กลอง เส้นการศึกษาที่ 1 ค่าเฉลี่ย AVS ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกมีค่า 21.90 ± 21.32 $\mu\text{g/g}$ สำหรับทิศ NE ของปากแม่น้ำแม่กลอง เส้นการศึกษาที่ 2 และ 3 ค่าเฉลี่ย AVS ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกมีค่า 10.39 ± 10.78 $\mu\text{g/g}$

ทั้งนี้ เมื่อนำปริมาณ AVS ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.24 - 102.40 $\mu\text{g/g}$ มาเปรียบเทียบกับการศึกษาก่อนหน้านี้ในพื้นที่บริเวณต่าง ๆ ของอ่าวไทย พบว่าปริมาณ AVS จากผลการศึกษาที่ได้อยู่ในช่วง $<0.01 - 128.49$ $\mu\text{g/g}$ ของ Wattanapongsakul (2018) ซึ่งทำการศึกษาในพื้นที่อ่าวไทยตอนใน ปี ค.ศ. 2017 และใกล้เคียงกับช่วง 0.37 - 113.80 ของ Sirirat (2011) ที่ทำการศึกษาในพื้นที่ปากแม่น้ำเจ้าพระยา ส่วนการศึกษาของ Chaikaew and Sompongchaiyakul (2018) ที่ศึกษาในพื้นที่ทิศตะวันออกของอ่าวไทย มีค่าสูงสุดคือ 349.00 $\mu\text{g/g}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าสูงสุดของการศึกษาในครั้งนี้ คือ 102.40 $\mu\text{g/g}$ ถึง 3 เท่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความต่างของพื้นที่ศึกษา และความต่างของปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม เช่น ความต้องการออกซิเจนของดินตะกอน (sediment oxygen demand, SOD) และปริมาณสารอินทรีย์ในดินตะกอน เป็นต้น แสดงดังตารางที่ 4.3

แนวโน้มของ AVS ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึก แสดงดังรูปที่ 4.3 (ก-ค) เส้นการศึกษาที่ 1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความลึก มีความเข้มข้นของ AVS ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.24 - 102.40 $\mu\text{g/g}$ เส้นการศึกษาที่ 2 และ 3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความลึกในช่วง 0 - 15 cm และจะค่อย ๆ ลดลงตามความลึก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในช่วงความลึก 0 - 15 cm มีการสะสมของ OC จำนวนมากทำให้มีกระบวนการย่อยสลายเกิดขึ้น โดยแบคทีเรียพวกที่ใช้ซัลเฟต (SO_4^{2-}) (sulfate reducing bacteria) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในกระบวนการย่อยสลายแล้วเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เป็นผลิตภัณฑ์ ส่วนในช่วงที่ลึกถัดจาก 15 cm ลงไปนั้น อาจเกิดกระบวนการย่อยสลาย OC แล้ว จึงทำให้ปริมาณ AVS ค่อย ๆ ลดลงตามระดับความลึก รวมทั้งอาจจะมีกระบวนการที่ใช้ H_2S ด้วยทำให้มีความเข้มข้นของ AVS ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกลดลงกว่าที่ผิวหน้าและอยู่ในช่วง 0.41 - 48.43 $\mu\text{g/g}$

ตารางที่ 4.2 พิสัย ค่าเฉลี่ย และค่ากลาง ของปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรดในดินตะกอนบริเวณที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา	เส้นการศึกษา	สถานี	พิสัย	ค่าเฉลี่ย±SD	ค่ากลาง
ทิศตะวันตก		1A	0.24 – 55.78	14.93±18.95	9.25
เฉียงใต้ของ	1	1B	6.59 – 102.40	29.13±25.92	20.66
ปากแม่น้ำแม่กลอง		1C	2.62 – 39.60	18.51±13.23	19.90
		2A	2.35 – 48.43	15.25±16.66	6.27
ทิศตะวันออก	2	2B	0.71 – 14.08	5.83±4.59	4.67
เฉียงเหนือของ		2C	1.21 – 33.03	13.21±10.53	10.64
ปากแม่น้ำแม่กลอง		3A	1.86 – 17.35	8.00±6.19	7.62
	3	3B	0.41 – 24.68	12.35±8.12	12.04
		3C	0.94 – 12.11	4.90±4.43	2.49

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรดในพื้นที่ศึกษากับในอ่าวไทย

ช่วงเวลา การศึกษา (ค.ศ.)	พื้นที่ศึกษา	AVS (µg/g)	อ้างอิง
2011	The upper Gulf of Thailand	0.27 – 46.60	Sirirat (2011).
2011	The Chao Phraya River	0.37 – 113.80	Sirirat (2011).
2015	The Chao Phraya estuary	1.02 – 75.32	Jiwarungruengkul et al. (2015)
2017	The inner Gulf of Thailand	<0.01 – 128.49	Wattanapongsakul (2018)
2018	The eastern upper Gulf of Thailand	3.00 – 349.00	Chaikaew and Sompongchaiyakul (2018)
2018	The inner Gulf of Thailand	0.27 – 269.11	Wattanapongsakul (2018)
2020	Don Hoi Lot, Thailand	0.24 - 102.40	This study

4.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (organic carbon, OC)

จากการควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์ โดยวิเคราะห์ซ้ำร้อยละ 10 ของตัวอย่างทั้งหมด (percent reproducibility หรือ %RPD) ผลการวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอน มีค่าเท่ากับร้อยละ 3.69 ± 2.55 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (ไม่เกินร้อยละ 10) แสดงว่าผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำ

ผลการวิเคราะห์ปริมาณ OC ด้วยเทคนิค Pregl-Dumas รายงานในตาราง ข-1 ในภาคผนวก ข พิสัยค่าเฉลี่ย และค่ากลาง ของปริมาณ OC ในดินตะกอนบริเวณที่ศึกษา สรุปไว้ในตารางที่ 4.4 จากผลการศึกษา พบว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณ OC ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกทั้งหมด มีค่าร้อยละ 0.49 ± 0.23 ในทิศ SW ของปากแม่น้ำแม่กลอง เส้นการศึกษาที่ 1 ค่าเฉลี่ยของปริมาณ OC มีค่าร้อยละ 0.31 ± 0.12 สำหรับทิศ NE ของปากแม่น้ำแม่กลอง เส้นการศึกษาที่ 2 และ 3 ค่าเฉลี่ย OC ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกทั้งหมด มีค่าร้อยละ 0.59 ± 0.22

ทั้งนี้ เมื่อนำปริมาณ OC ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.12 - 0.96 มีความใกล้เคียงกับการศึกษาก่อนหน้าในพื้นที่บริเวณต่าง ๆ ของอ่าวไทย โดยพบว่าปริมาณ OC จากผลการศึกษาที่ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 0.11 - 1.76 ของ เบญจวรรณ แสนสิทธิสกุลเลิศ (2557) ซึ่งทำการศึกษาในพื้นที่อ่าวไทยตอนล่าง และ Buakaew (2007) ที่มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.07 - 2.20 ซึ่งทำการศึกษาในพื้นที่อ่าวไทยตอนบน อีกทั้งมีค่าผลการศึกษาใกล้เคียงของ Wattanapongsakul (2018) อยู่ในช่วงร้อยละ 0.22 - 1.98 ในพื้นที่อ่าวไทยตอนใน ส่วนค่าสูงสุดของ Sirirat (2011) ทำการศึกษาในพื้นที่อ่าวไทยตอนบน มีค่าร้อยละ 4.76 ซึ่งมีความมากกว่าค่าสูงสุดที่วิเคราะห์ได้ 0.96 ถึง 5 เท่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะได้รับอิทธิพลการแม่น้ำที่ไหลลงสู่อ่าวไทยตอนบนทั้ง 4 สาย ได้แก่ แม่น้ำแม่กลอง แม่น้ำบางปะกง แม่น้ำเจ้าพระยา และแม่น้ำท่าจีน จึงส่งผลให้มีปริมาณ OC มาก แสดงดังตารางที่ 4.5

แนวโน้มของ OC ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกเส้นการศึกษาที่ 1 มีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน อาจเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การให้คราดเก็บหอย การเดินเรือ เป็นต้น หรือกิจกรรมของสิ่งมีชีวิต (bioturbation) ที่อาศัยอยู่ในดินตะกอน ทำให้ดินตะกอนตามระดับความลึกโดนรบกวน มีความเข้มข้นของ OC ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกอยู่ในช่วงร้อยละ 0.12 - 0.54 สำหรับเส้นการศึกษาที่ 2 มีแนวโน้มของ OC เพิ่มขึ้นตามความลึก มีความเข้มข้นของปริมาณ OC ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกอยู่ในช่วงร้อยละ 0.21 - 0.92 ส่วนเส้นการศึกษาที่ 3 มีแนวโน้มของ OC เพิ่มขึ้นตามความลึก ในช่วง 0 - 15 cm และจะค่อย ๆ ลดลงตามความลึก มีความเข้มข้นของ OC ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกอยู่ในช่วงร้อยละ 0.15 - 0.96 แสดงดังตารางที่ 4.4 รูปที่ 4.4 (ก-ค) ทั้งนี้การที่เส้นการศึกษาที่ 2 และ 3 ที่มีแนวโน้มของปริมาณ OC เพิ่มขึ้นตามความลึกนั้น อาจเป็นเพราะมีการแปรปรวนของพื้นที่ อิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลง สภาวะออกซิไดซ์และรีดิวซ์ของดินตะกอนที่ไม่คงที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ส่งผลให้มีการสะสม OC ในระดับความลึกช่วงบนมากกว่าช่วงล่าง จึงมีแนวโน้มของ

ปริมาณ OC เพิ่มขึ้นตามความลึกนั้น รวมทั้งปริมาณ OC ที่ตกลงมาสู่พื้นท้องน้ำในแต่ละช่วงเวลาและสะสมในตะกอนในแต่ละชั้นนั้นก็อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาด้วย

ตารางที่ 4.4 พิสัย ค่าเฉลี่ย และค่ากลาง ของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอนบริเวณที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา	เส้นการศึกษา	สถานี	พิสัย	ค่าเฉลี่ย±SD	ค่ากลาง
ทิศตะวันตก	1	1A	0.15 – 0.31	0.29±0.06	0.21
		1B	0.12 – 0.54	0.40±0.14	0.39
		1C	0.20 – 0.39	0.29±0.06	0.29
ทิศตะวันออก	2	2A	0.30 – 0.85	0.66±0.19	0.77
		2B	0.30 – 0.92	0.67±0.20	0.66
		2C	0.21 – 0.90	0.62±0.17	0.66
ปากแม่น้ำแม่กลอง	3	3A	0.15 – 0.96	0.44±0.25	0.34
		3B	0.16 – 0.90	0.50±0.27	0.53
		3C	0.30 – 0.67	0.57±0.13	0.61

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในพื้นที่ศึกษากับในอ่าวไทย

ช่วงเวลา ศึกษา (ค.ศ.)	พื้นที่ศึกษา	OC (%)	อ้างอิง
2007	The upper Gulf of Thailand	0.07 – 2.20	Buakaew (2007)
	The lower Gulf of Thailand	0.10 – 1.35	
2011	The upper Gulf of Thailand	1.62 – 4.76	Sirirat (2011)
2011	The Chao Phraya River	1.37 – 4.65	Sirirat (2011)
2012	The upper Gulf of Thailand	0.55 – 2.77	เบญจวรรณ แสนสิทธิสกุลเลิศ (2557)

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

ช่วงเวลา การศึกษา (ค.ศ.)	พื้นที่ศึกษา	OC (%)	อ้างอิง
2012	The central Gulf of Thailand	0.22 – 2.19	เบญจวรรณ แสนสิทธิสกุลเลิศ (2557)
	The lower Gulf of Thailand	0.11 – 1.76	
2015	The Chao Phraya River	0.36 – 1.66	Jiwarungrueangkul (2015)
2017	The inner Gulf of Thailand	0.41 – 2.44	Wattanapongsakul (2018)
2018	The inner Gulf of Thailand	0.22 – 1.98	Wattanapongsakul (2018)
2020	Don Hoi Lot, Thailand	0.12 - 0.96	This study

4.6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสถานะกรด (simultaneously-extracted mercury, SE-Hg)

จากการควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์ โดยวิเคราะห์ซ้ำร้อยละ 10 ของตัวอย่างทั้งหมด (percent reproducibility หรือ %RPD) ผลการวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอน มีค่าเท่ากับร้อยละ 5.91 ± 1.3 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (ไม่เกินร้อยละ 10) แสดงว่าผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำ

ผลการวิเคราะห์ ปริมาณ SE-Hg ด้วยเทคนิค wet-chemical preparation atomic absorption spectrophotometry รายงานในตาราง ข-1 ในภาคผนวก ข พิสัย ค่าเฉลี่ย และค่ากลาง ของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอนบริเวณที่ศึกษา สรุปไว้ในตารางที่ 4.6 จากผลการศึกษา พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณ SE-Hg ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 0.0032 ± 0.0013 mg/kg ในทิศ SW ของปากแม่น้ำแม่กลอง เส้นการศึกษาที่ 1 ค่าเฉลี่ยของปริมาณ SE-Hg ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกมีค่าเท่ากับ 0.0046 ± 0.0029 mg/kg สำหรับทิศ NE ของปากแม่น้ำแม่กลอง เส้นการศึกษาที่ 2 และ 3 ค่าเฉลี่ยของปริมาณ SE-Hg ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกมีค่าเท่ากับ 0.0024 ± 0.0013 mg/kg

แนวโน้มของปริมาณ SE-Hg ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึก เส้นการศึกษาที่ 1 มีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน มีความเข้มข้นของปริมาณ SE-Hg ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.0015 – 0.0145

mg/kg โดยที่เส้นการศึกษาที่ 1 สถานี 1C ที่ช่วงความลึก 10 - 15 cm มีค่าความเข้มข้นของปริมาณ SE-Hg สูง โดดขึ้นมาจากกลุ่ม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0145 mg/kg เส้นการศึกษาที่ 2 มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ มีความเข้มข้นของ ปริมาณ SE-Hg ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.0013 – 0.0063 mg/kg โดยที่เส้นการศึกษา ที่ 2 สถานี 2A และ 2B ที่ช่วงความลึก 25 - 30 และ 0 - 5 cm มีค่าความเข้มข้นของปริมาณ SE-Hg สูงโดดขึ้นมา จากกลุ่ม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0053 และ 0.0063 mg/kg ตามลำดับ เส้นการศึกษาที่ 3 มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่เช่นกัน มีความเข้มข้นของปริมาณ SE-Hg ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.0011 – 0.0082 mg/kg โดยที่เส้นการศึกษาที่ 3 สถานี 3C ที่ช่วงความลึก 0 - 5 cm มีค่าความเข้มข้นของปริมาณ SE-Hg สูงขึ้นมาจาก ตัวอย่างอื่นจากสถานีเดียวกัน โดยมีค่าเท่ากับ 0.0082 mg/kg แสดงดังตารางที่ 4.6 รูปที่ 4.5 (ก-ค) สอดคล้องกับ ค่า T-Hg ที่สูงขึ้นมาในตัวอย่างเดียวกันนี้

ตารางที่ 4.6 พิสัย ค่าเฉลี่ย และค่ากลาง ของปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซิลิเฟอไรต์ระเหยในสภาวะกรด ในดินตะกอนบริเวณที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา	เส้นการศึกษา	สถานี	พิสัย	ค่าเฉลี่ย±SD	ค่ากลาง
ทิศตะวันตก	1	1A	0.0015 – 0.0029	0.0022±0.0005	0.0023
		1B	0.0025 – 0.0088	0.0052±0.0021	0.0043
		1C	0.0025 – 0.0145	0.0057±0.0035	0.0050
ทิศตะวันออก	2	2A	0.0013 – 0.0053	0.0021±0.0011	0.0018
		2B	0.0019 – 0.0063	0.0029±0.0013	0.0026
		2C	0.0013 – 0.0034	0.0023±0.0008	0.0021
ปากแม่น้ำแม่กลอง	3	3A	0.0015 – 0.0041	0.0024±0.0008	0.0021
		3B	0.0011 – 0.0027	0.0017±0.0005	0.0018
		3C	0.0015 – 0.0082	0.0031±0.0023	0.0022

ทั้งนี้ยังไม่พบการศึกษาใด ๆ ในเขตน่านน้ำประเทศไทยที่มีการรายงานปริมาณ SE-Hg ในดินตะกอน

4.7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณปรอทรวม (total mercury, T-Hg)

จากการควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์ โดยวิเคราะห์ซ้ำร้อยละ 10 ของตัวอย่างทั้งหมด (percent reproducibility หรือ %RPD) ผลการวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอน มีค่าเท่ากับร้อยละ 3.71 ± 2.48 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (ไม่เกินร้อยละ 10) แสดงว่าผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำ และจากการวิเคราะห์ความถูกต้องของการวิเคราะห์ปรอทรวม โดยใช้ BCR-277R estuarine sediment (trace elements) ผลิตโดย Institute for Reference Materials and Measurements (IRMM) มีค่าเท่ากับร้อยละ 98.7 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (อยู่ในช่วงร้อยละ 90 ถึง 110) แสดงว่าผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำ

ผลการวิเคราะห์ ปริมาณ T-Hg ด้วยเทคนิค thermal decomposition atomic absorption spectrophotometry รายงานในตาราง ข-1 ในภาคผนวก ข พิสัย ค่าเฉลี่ย และค่ากลาง ของปริมาณ T-Hg ในดินตะกอนบริเวณที่ศึกษา สรุปไว้ในตารางที่ 4.7 จากผลการศึกษา พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณ T-Hg ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 0.04021 ± 0.02194 mg/kg สำหรับในทิศ SW ของปากแม่น้ำแม่กลอง เส้นการศึกษาที่ 1 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณ T-Hg ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกเท่ากับ 0.02721 ± 0.00710 mg/kg ส่วนทิศ NE ของปากแม่น้ำแม่กลอง เส้นการศึกษาที่ 2 และ 3 ค่าเฉลี่ยของปริมาณปรอทรวมในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกเท่ากับ 0.04685 ± 0.02389 mg/kg

ทั้งนี้ เมื่อนำปริมาณ T-Hg ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.01345 - 0.11483 mg/kg มาเปรียบเทียบกับการศึกษาก่อนหน้านี้ในพื้นที่บริเวณต่าง ๆ ของอ่าวไทย พบว่าปริมาณ T-Hg จากผลการศึกษาที่ได้อยู่ในช่วง 0.00767 - 0.1108 ของ เบญจวรรณ แสนสิทธิสกุลเลิศ (2557) ซึ่งทำการศึกษาในพื้นที่อ่าวไทย แสดงดังตารางที่ 4.8

แนวโน้มของของปริมาณ T-Hg ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึก เส้นการศึกษาที่ 1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความลึก ในช่วง 0 - 25 cm จากนั้นมีแนวโน้มค่อย ๆ ลดลงตามความลึก ค่าความเข้มข้นของปริมาณ T-Hg ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.01614 - 0.04257 mg/kg เส้นการศึกษาที่ 2 มีแนวโน้มของปริมาณ T-Hg เพิ่มขึ้นตามความลึก มีความเข้มข้นของปริมาณ T-Hg ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.02034 - 0.11483 mg/kg เส้นการศึกษาที่ 3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความลึกเช่นกัน มีความเข้มข้นของปริมาณ T-Hg ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึกอยู่ในช่วง 0.01345 - 0.06486 mg/kg แสดงดังตารางที่ 4.7 รูปที่ 4.6 (ก-ค) ทั้งนี้ค่าในแต่ละสถานีมีความเข้มข้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ตามเกณฑ์ค่ามาตรฐานของปรอทในดินตะกอนของกรมควบคุมมลพิษ ที่ควรจะมีค่าต่ำกว่า 0.15 mg/kg Utoomprukporn (2006)

ตารางที่ 4.7 พิสัย ค่าเฉลี่ย และค่ากลาง ของปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนบริเวณที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา	เส้นการศึกษา	สถานี	พิสัย	ค่าเฉลี่ย±SD	ค่ากลาง
ทิศตะวันตก		1A	0.01821 – 0.03921	0.02698±0.00771	0.02421
เฉียงใต้ของ	1	1B	0.01614 – 0.04257	0.02901±0.00694	0.02902
ปากแม่น้ำแม่กลอง		1C	0.01784 – 0.03844	0.02537±0.00632	0.02482
		2A	0.02092 – 0.11483	0.06640±0.03414	0.06421
ทิศตะวันออก	2	2B	0.02286 – 0.08313	0.05537±0.01916	0.05983
เฉียงเหนือของ		2C	0.02034 – 0.07912	0.04416±0.01572	0.04303
ปากแม่น้ำแม่กลอง		3A	0.01345 – 0.04559	0.03112±0.00983	0.03561
	3	3B	0.01356 – 0.04280	0.03066±0.01130	0.03570
		3C	0.02842 – 0.06486	0.04312±0.01144	0.04229

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรดในพื้นที่ศึกษากับในอ่าวไทย

ช่วงเวลา การศึกษา (ค.ศ.)	พื้นที่ศึกษา	T-Hg (mg/kg)	อ้างอิง
1978– 1979	ปากแม่น้ำแม่กลอง	0.0360 – 0.8850	Polprasert et al. (1979)
1979 – 1980	ปากแม่น้ำแม่กลอง	0.0060 – 0.0460	สุธรรม สิทธิชัยเกษม และ สุวรรณิ เฉินบำรุง (2527)
1980	ปากแม่น้ำแม่กลอง	0.2300 ± 0.0001*	Menasveta and Cheevaparanapiwat (1981)
2007	The upper Gulf of Thailand	0.00200 – 0.0924	Buakaew (2007)
	The lower Gulf of Thailand	0.00650 – 0.05010	
2012	The upper Gulf of Thailand	0.00767 – 0.1024	เบญจวรรณ แสนสิทธิสกุลเลิศ (2557)
	The central Gulf of Thailand	0.01170 – 0.1108	

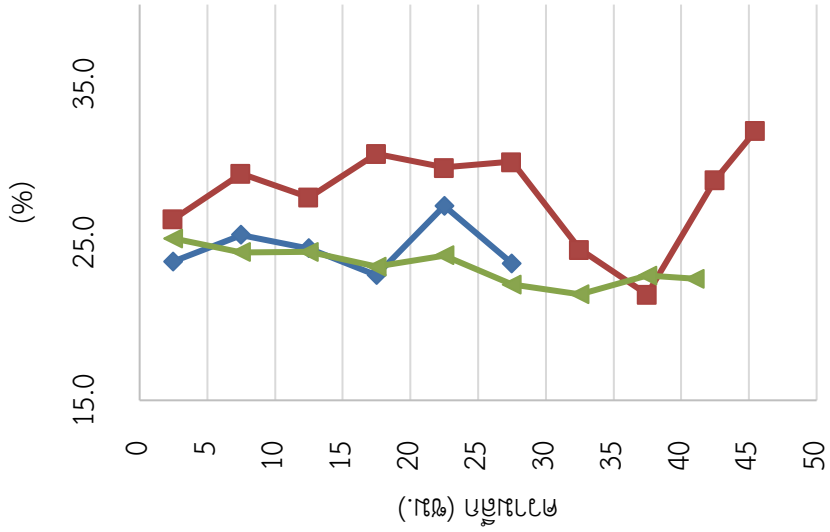
หมายเหตุ * คือ ค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

ช่วงเวลา ศึกษา (ค.ศ.)	พื้นที่ศึกษา	T-Hg (mg/kg)	อ้างอิง
2012	The lower Gulf of Thailand	0.00853 – 0.0812	เบญจวรรณ แสนสิทธิสกุลเลิศ (2557)
2020	Don Hoi Lot, Thailand	0.01345 - 0.11483	This study

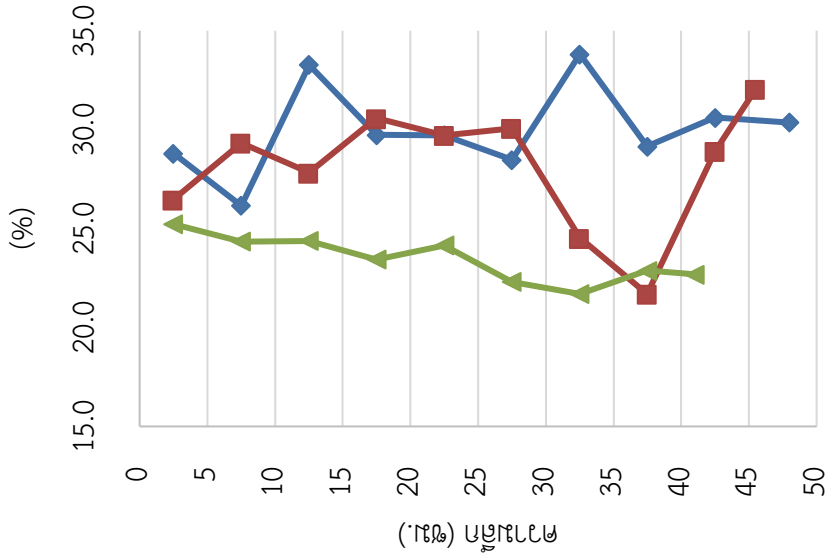
(ก)

เปอร์เซ็นต์น้ำในดินตะกอน
ตามระดับความลึก ของเส้นตึกษาที่ 1



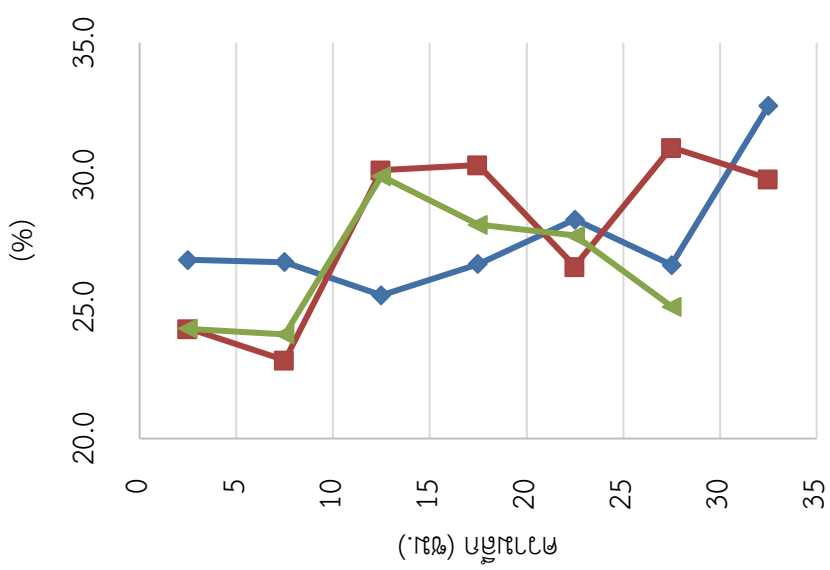
(ข)

เปอร์เซ็นต์น้ำในดินตะกอน
ตามระดับความลึก ของเส้นตึกษาที่ 2



(ค)

เปอร์เซ็นต์น้ำในดินตะกอน
ตามระดับความลึก ของเส้นตึกษาที่ 3



— St.1A — St.1B — St.1C

— St.2A — St.2B — St.2C

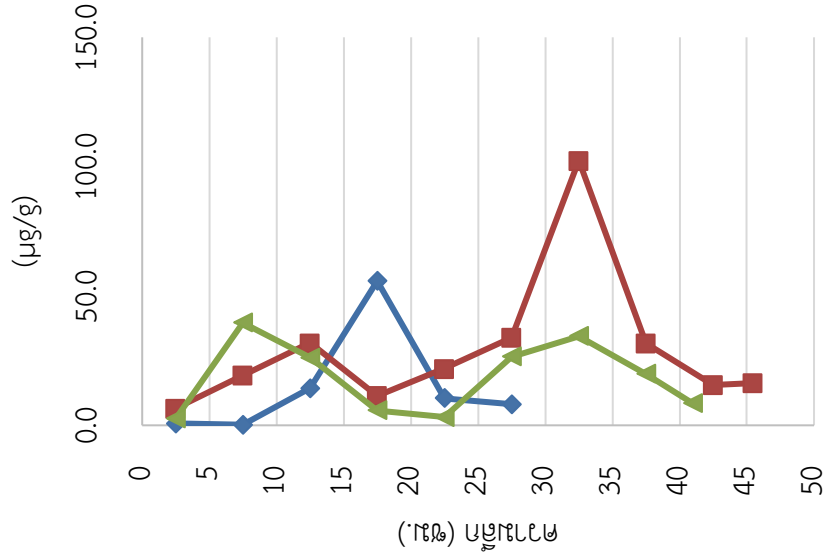
— St.3A — St.3B — St.3C

รูปที่ 4.2 (ก-ค) แสดงแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์น้ำในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึก

(ก)

ปริมาณ AVS ในดินตะกอน

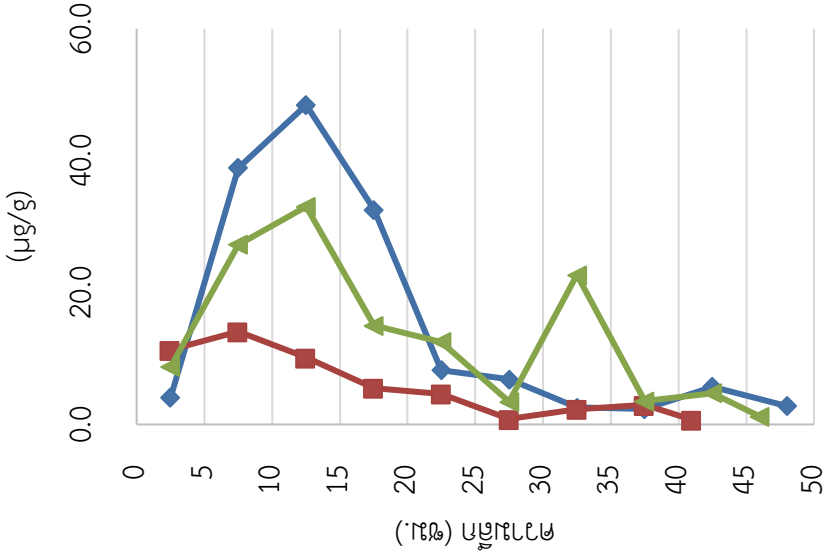
ตามระดับความลึก ของเส้นตึกษาที่ 1



(ข)

ปริมาณ AVS ในดินตะกอน

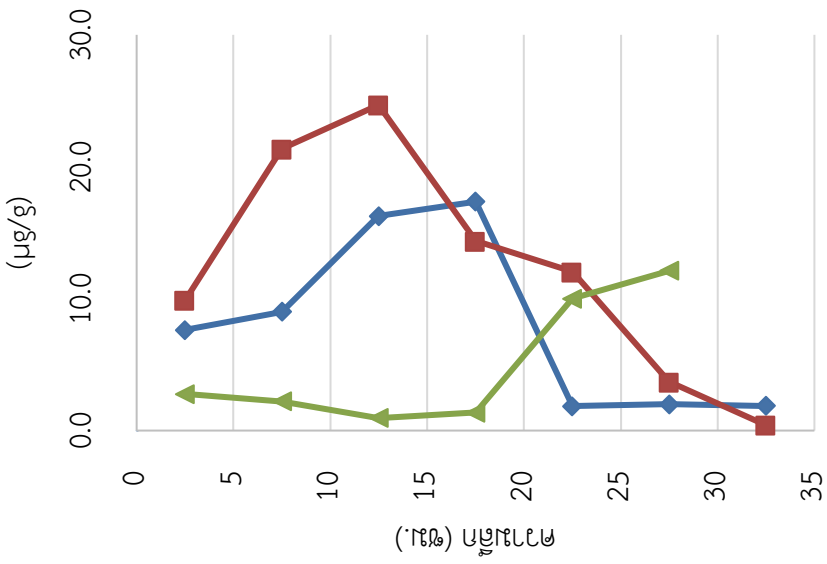
ตามระดับความลึก ของเส้นตึกษาที่ 2



(ค)

ปริมาณ AVS ในดินตะกอน

ตามระดับความลึก ของเส้นตึกษาที่ 3



— St.1.A — St.1.B — St.1.C

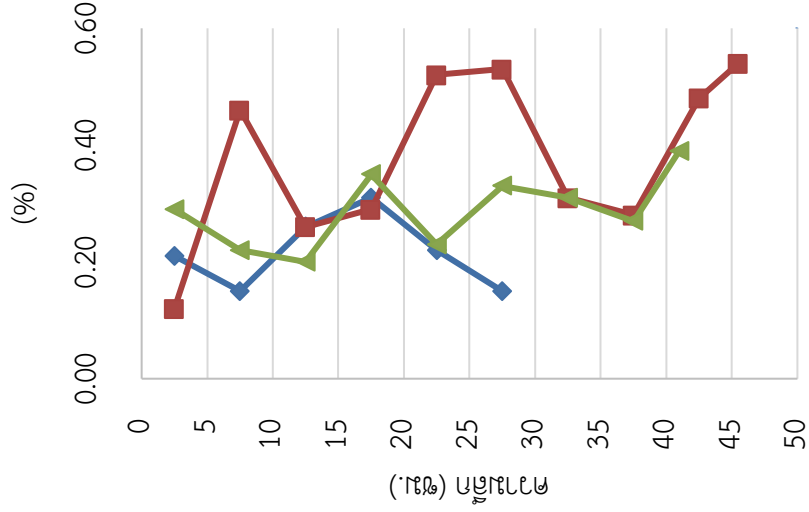
— St.2.A — St.2.B — St.2.C

— St.3.A — St.3.B — St.3.C

รูปที่ 4.3 (ก-ค) แสดงแนวโน้มของปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสถานะกรดในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึก

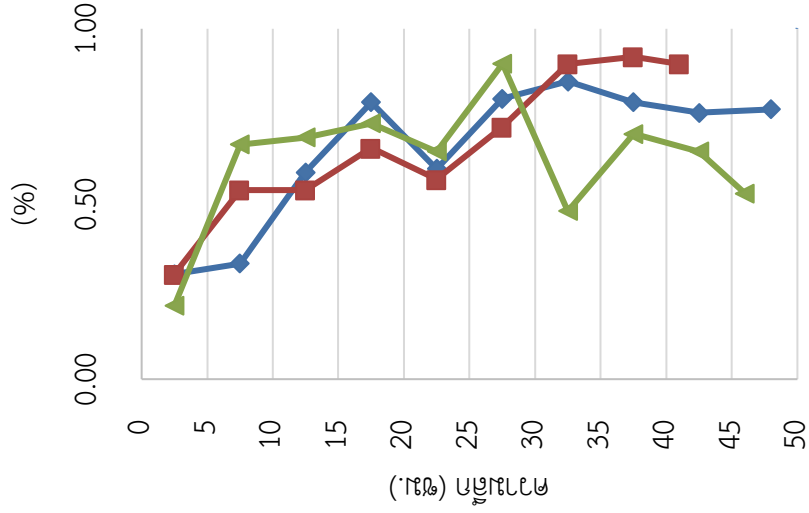
(ก)

ปริมาณ OC ในดินตะกอน
ตามระดับความลึก ของเส้นตึกษาที่ 1



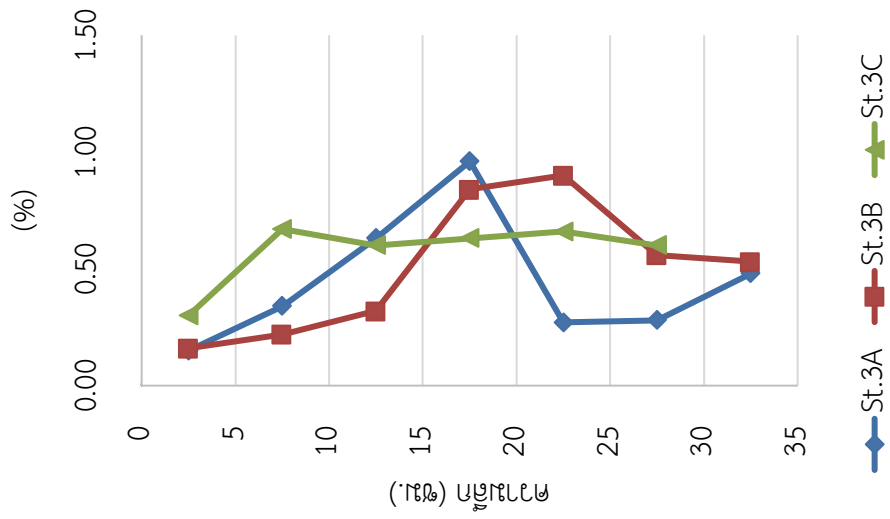
(ข)

ปริมาณ OC ในดินตะกอน
ตามระดับความลึก ของเส้นตึกษาที่ 2

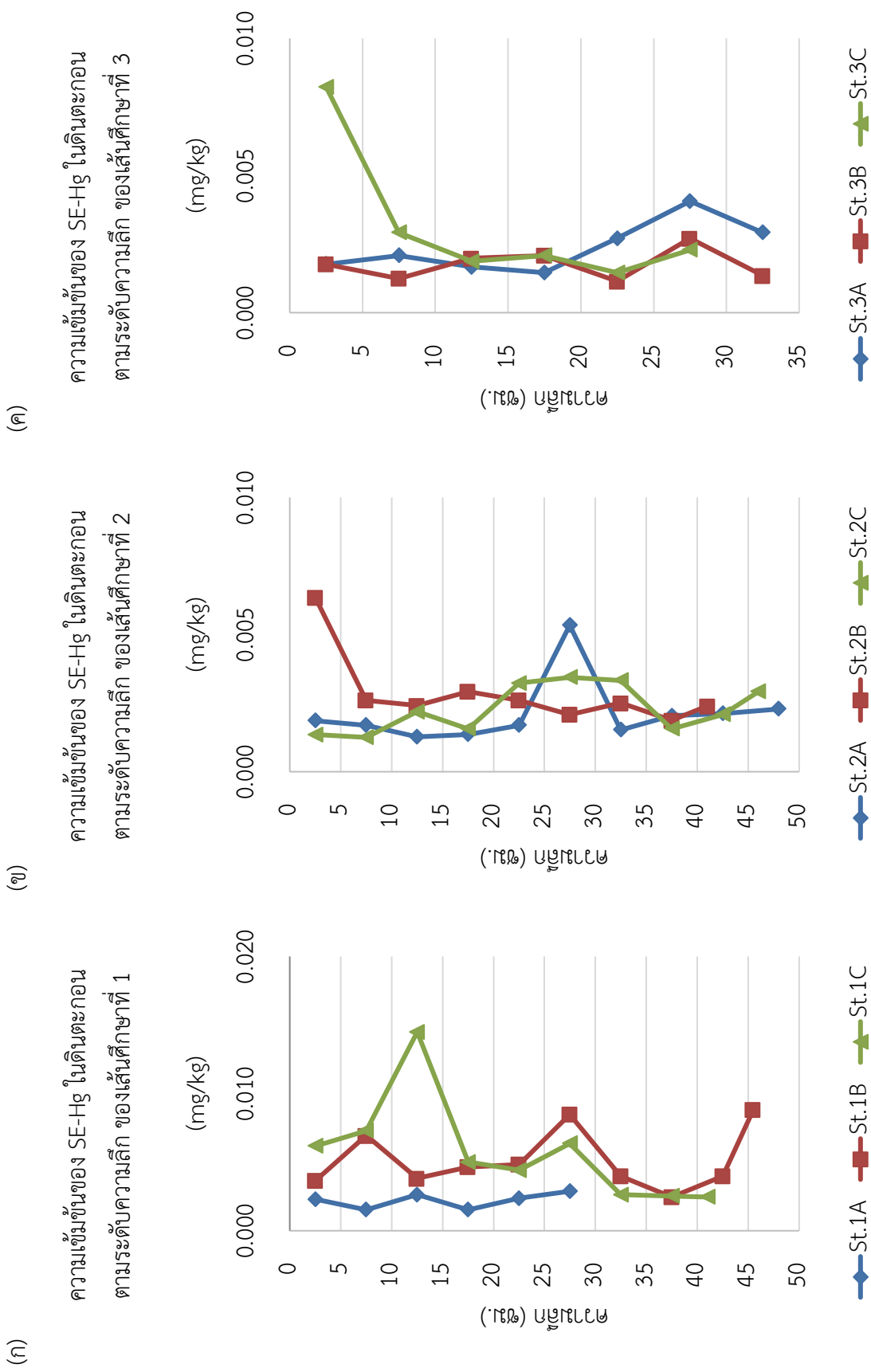


(ค)

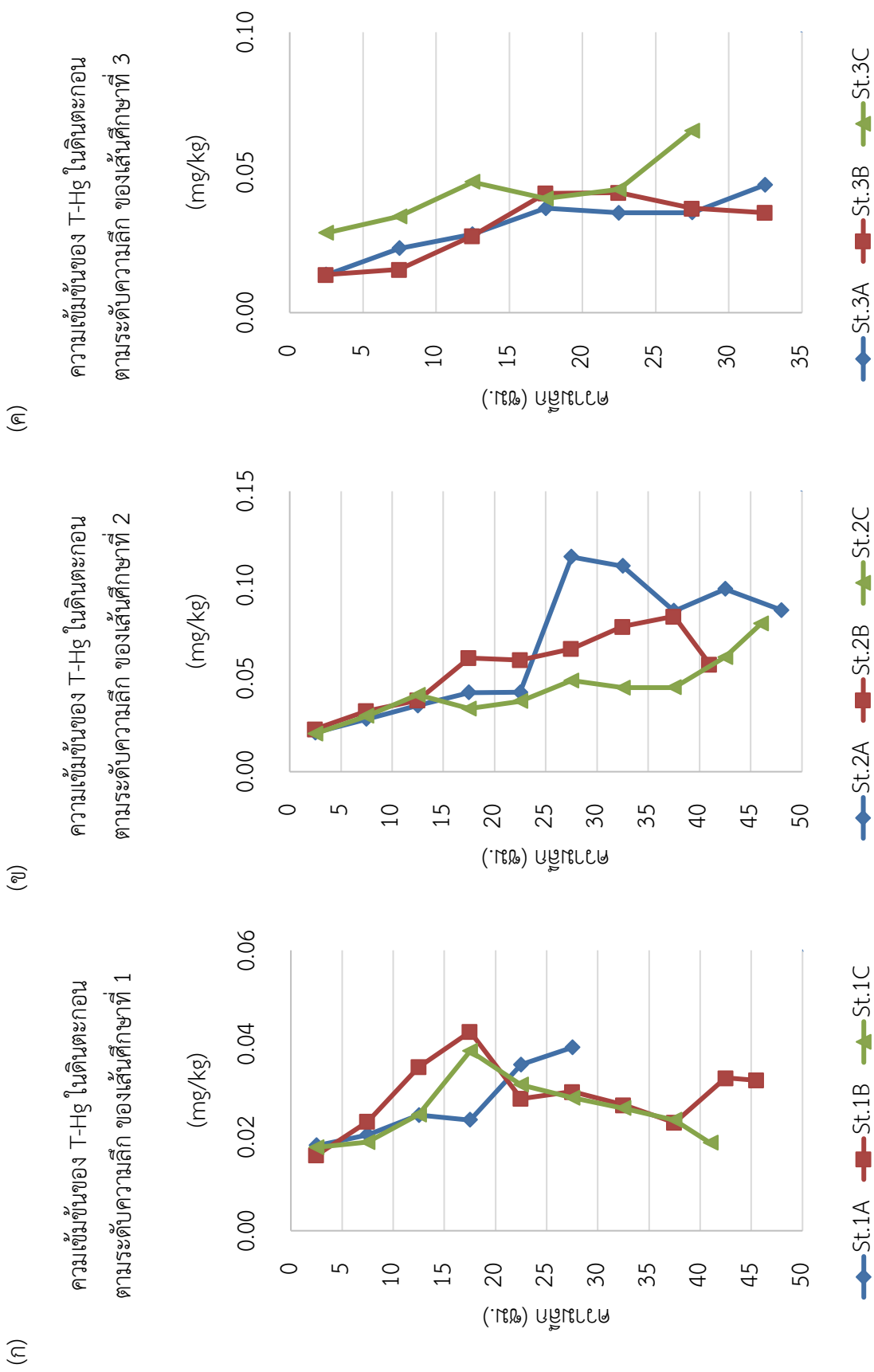
ปริมาณ OC ในดินตะกอน
ตามระดับความลึก ของเส้นตึกษาที่ 3



รูปที่ 4.4 (ก-ค) แสดงแนวโน้มของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึก



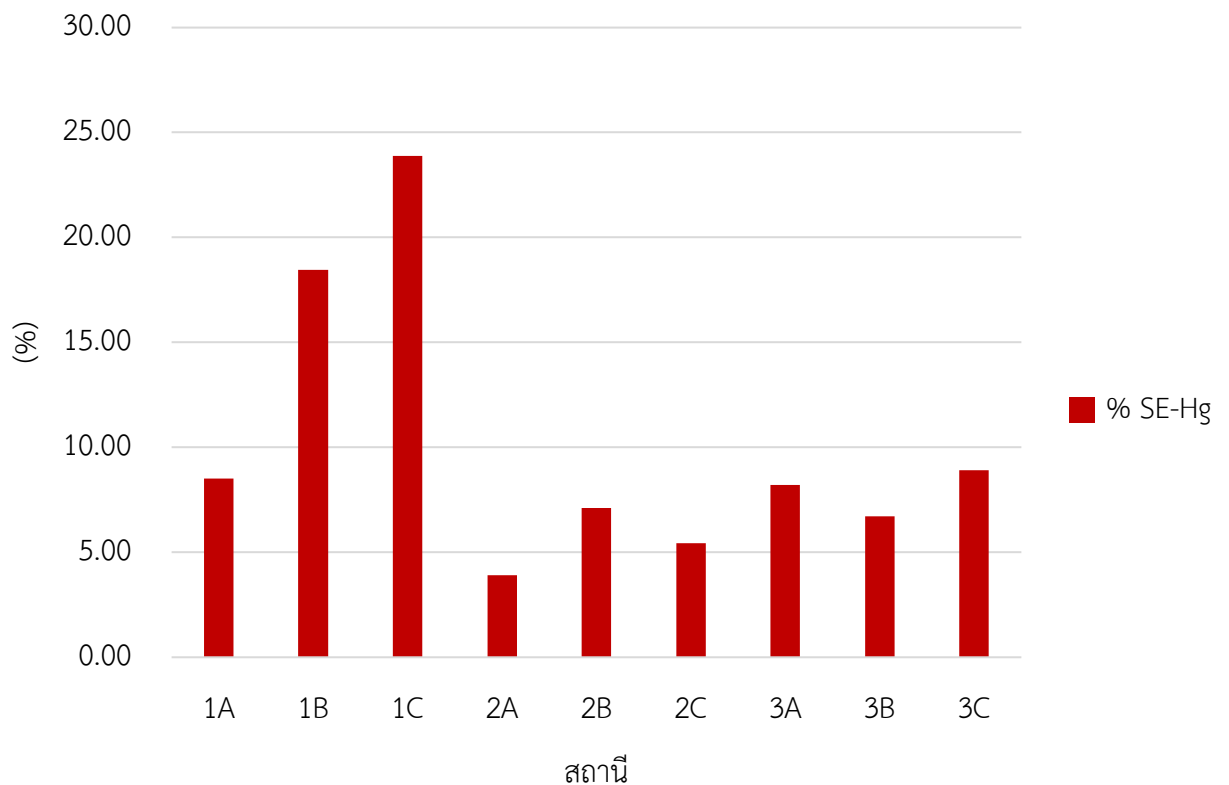
รูปที่ 4.5 (ก-ค) แสดงแนวโน้มของปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซีลไฟแต่ละหน่วยในสถานะการตักในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึก



รูปที่ 4.6 (ก-ค) แสดงแนวโน้มของปริมาณปรอทรวมในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึก

4.8 การเปรียบเทียบสัดส่วนระหว่างปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรด (simultaneously - extracted mercury, SE-Hg) และปริมาณรวมของปรอทในดินตะกอน (total mercury, T-Hg)

เมื่อนำปริมาณ SE-Hg มาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ของ T-Hg ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และนำมาเปรียบเทียบสัดส่วน ทำให้ทราบว่า ในทิศ SW ของปากแม่น้ำแม่กลอง เส้นการศึกษาที่ 1 ประกอบด้วยสถานี 1A 1B และ 1C มีเปอร์เซ็นต์ของ SE-Hg เท่ากับร้อยละ 8.51 18.47 และ 23.87 ตามลำดับ สำหรับทิศ NW ของปากแม่น้ำแม่กลอง เส้นการศึกษาที่ 2 ประกอบด้วยสถานี 2A 2B และ 2C มีเปอร์เซ็นต์ของ SE-Hg เท่ากับร้อยละ 3.89 7.12 และ 5.44 ตามลำดับ สำหรับเส้นการศึกษาที่ 3 ประกอบด้วย 3A 3B และ 3C มีเปอร์เซ็นต์ของ SE-Hg เท่ากับร้อยละ 8.22 6.72 และ 8.91 ตามลำดับ ซึ่งในเส้นการศึกษาที่ 2 และ 3 มีเปอร์เซ็นต์ของ SE-Hg ไม่เกินร้อยละ 10



รูปที่ 4.7 แสดงสัดส่วนระหว่างเปอร์เซ็นต์ของปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรด (simultaneously-extracted mercury, SE-Hg) และปริมาณรวมของปรอทในดินตะกอน (total mercury, T-Hg)

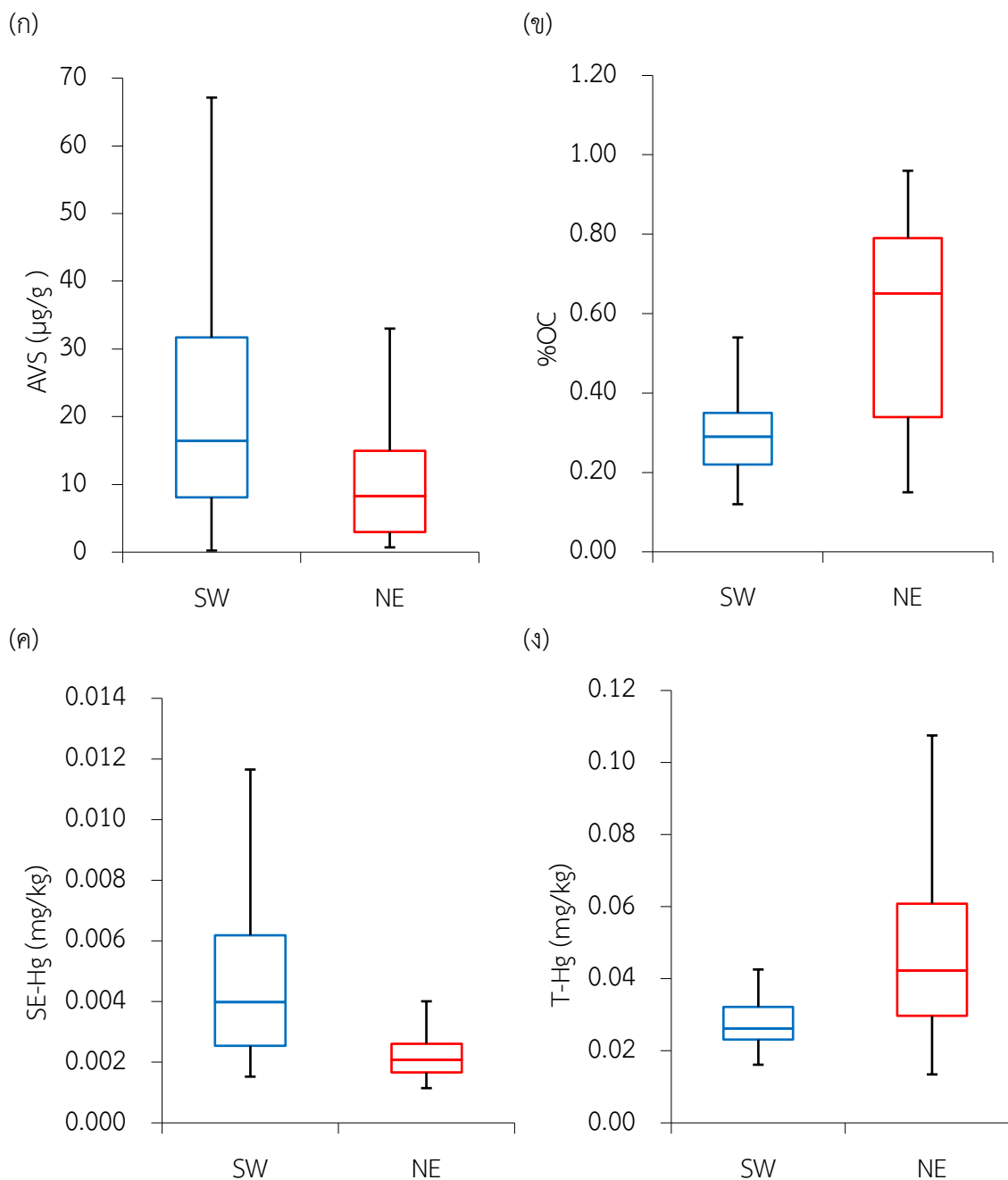
4.9 การกระจายตัวของข้อมูลปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ บริเวณพื้นที่ศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด (acid volatile sulfide, AVS) ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอน (organic carbon, OC) ปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด (simultaneously-extracted mercury, SE-Hg) และปริมาณรวมของปรอทในดินตะกอน (total mercury, T-Hg) ตามลำดับชั้นความลึกในดินตะกอนบริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม ทั้งในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ของปากแม่น้ำแม่กลองจำนวน 3 สถานี และในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ของปากแม่น้ำแม่กลองจำนวน 6 สถานี แสดงดังตารางที่ 4.9

ทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของปัจจัยสิ่งแวดล้อมดังกล่าว ในทิศ SW และทิศ NE ของปากแม่น้ำแม่กลอง ค่าต่ำสุด ค่ากลาง ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ยของปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ บริเวณพื้นที่ศึกษา สรุปดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.8 (ก-ง) ทำให้ทราบการกระจายตัวของข้อมูล AVS และ SE-Hg มีการกระจายตัวในทิศ SW มากกว่าทิศ NE ซึ่งแปลผลผกผันกับการกระจายตัวของ OC และ T-Hg ที่มีการกระจายตัวในทิศ NE มากกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะ AVS และ SE-Hg มีความสัมพันธ์กัน กล่าวคือ AVS สามารถสร้างพันธะกับ SE-Hg ได้ในอัตราส่วน 1:1 เป็นรูปแบบที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (bioavailable) จึงเป็นรูปของปรอทที่มีความเสี่ยงที่จะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ดังนั้นแนวโน้มการกระจายตัวของทั้ง AVS และ SE-Hg จึงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ส่วน OC และ T-Hg มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน เนื่องจาก OC สามารถเกิดสารประกอบกับ T-Hg ได้ รูปของสารประกอบอินทรีย์ ดังนั้นแนวโน้มการกระจายตัวของทั้ง OC และ T-Hg จึงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ทำให้ทราบว่าปัจจัยสิ่งแวดล้อมทั้ง 4 ปัจจัยของทิศ SW และ NW มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางที่ 4.9 ค่าต่ำสุด ค่ากลาง ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ยของปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ บริเวณพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา	ปัจจัยสิ่งแวดล้อม	หน่วย	ค่าต่ำสุด	ค่ากลาง	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย±SD
ทิศตะวันตก เฉียงใต้ของ	AVS	µg/g	0.2368	16.4300	102.404	21.8996±21.3205
	OC	%	0.12	0.29	0.54	0.31±0.12
ปากแม่น้ำแม่กลอง (SW)	SE-Hg	mg/kg	0.0015	0.0040	0.0145	0.0046±0.0029
	T-Hg	mg/kg	0.01614	0.02619	0.04257	0.0272±0.0071
ทิศตะวันออกเฉียง เหนือของ	AVS	µg/g	0.7088	8.252	48.4319	10.3870±10.7592
	OC	%	0.15	0.65	0.96	0.59±0.22
ปากแม่น้ำแม่กลอง (NE)	SE-Hg	mg/kg	0.0011	0.0021	0.0064	0.0024±0.0013
	T-Hg	mg/kg	0.01345	0.04226	0.11483	0.0468±0.0239



รูปที่ 4.8 (ก-ง) แสดงการกระจายตัวของปัจจัยต่าง ๆ ในตัวอย่างดินตะกอนตามระดับความลึก (ก) ซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด (ข) คาร์บอนอินทรีย์ (ค) โปรทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรด และ (ง) โปรทรวม โดยเปรียบเทียบสถานีในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ของปากแม่น้ำแม่กลองจำนวน 3 สถานี และในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) จำนวน 6 สถานี

4.10 ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ในดินตะกอน

ความสัมพันธ์ของปัจจัยภายในข้อมูลจากการวิเคราะห์ ANOVA เพื่อวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficients) ของปัจจัยแต่ละคู่ (ตารางที่ 4.10) พบว่าความลึกกับ OC ความลึกกับ

T-Hg และ OC กับ T-Hg มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ในขณะที่ AVS กับ T-Hg และ OC กับ SE-Hg มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.10 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความลึก ปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด คาร์บอนอินทรีย์ ปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรด และปริมาณปรอทรวม

	Depth	AVS	OC	SE-Hg	T-Hg
Depth	1				
AVS	-0.064	1			
OC	0.425**	-0.195	1		
SE-Hg	-0.057	0.135	-0.281*	1	
T-Hg	0.572**	-0.314*	0.685**	-0.163	1

**Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

*Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

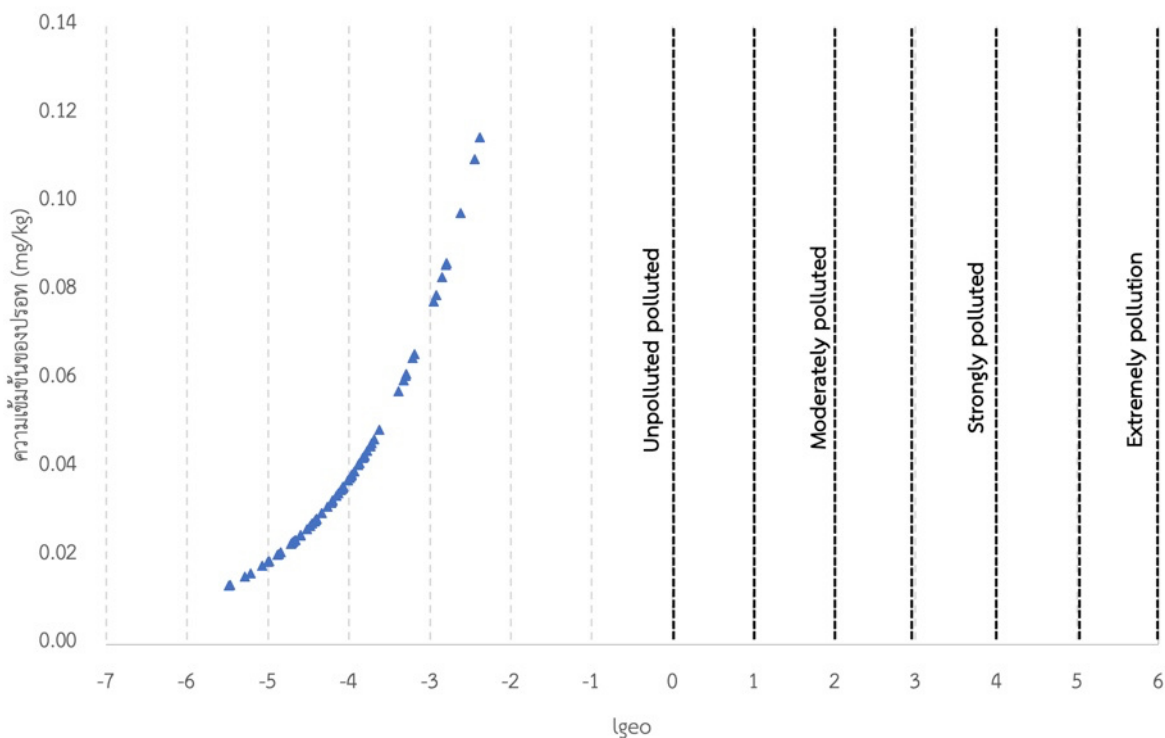
สาเหตุที่ OC กับ T-Hg มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% เนื่องจากปรอทสามารถสร้างพันธะกับสารอินทรีย์ได้ ทั้งกรดอิมิกและกรดฟัลวิก จึงทำให้มีสมบัติในการจับหรือแลกเปลี่ยนไอออนของปรอทที่เป็นโลหะหนักได้ดี ปรอทจึงอาจถูกตรึงโดยอินทรีย์สารได้เป็นจำนวนมาก

4.11 การวิเคราะห์ความรุนแรงของการปนเปื้อนปรอทในพื้นที่ศึกษา

การวิเคราะห์ความรุนแรงของการปนเปื้อนปรอทในอ่าวไทยความรุนแรงของการปนเปื้อนปรอทในดินตะกอนบริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม จะพิจารณาได้หลายวิธี ได้แก่ การหาดัชนีการสะสมเชิงธรณี (geoaccumulation index, I_{geo}) (Muller, 1969) หรือพิจารณาร่วมกับระดับความเข้มข้นที่เสนอไว้ในข้อเสนอแนวทางคุณภาพดินตะกอนทะเลและชายฝั่งที่มีกำหนดไว้ในหลายประเทศ

4.11.1 ดัชนีการการสะสมเชิงธรณี (geoaccumulation index, I_{geo})

ค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณีหรือ I_{geo} (Muller, 1969) แยกระดับความรุนแรงของการปนเปื้อนออกเป็น 7 ระดับดังตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3 จากการคำนวณค่า I_{geo} คำนวณโดยใช้สมการในหัวข้อ 3.7 พบว่าดินตะกอนบริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม แต่ละสถานีมีค่า I_{geo} ของปรอทในตั้งแต่ -5.5 ถึง -2.4 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0 ทุกสถานี ค่า I_{geo} ของการปนเปื้อนปรอทที่สะสมในดินตะกอนแต่ละสถานีรายงานไว้ในตาราง ค-1 ในภาคผนวก ค เมื่อเทียบกับเกณฑ์ในตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3 สามารถสรุปได้ว่าดินตะกอนบริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงครามทุกสถานีจัดอยู่ในระดับที่ไม่มีการปนเปื้อน (รูปที่ 4.9)



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของปรอทในดินตะกอน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง) กับดัชนีบ่งชี้ความรุนแรง (lgeo) โดยเส้นประเป็นเส้นที่แบ่งขอบเขตระดับของการปนเปื้อนในดินตะกอน

4.11.2 เกณฑ์แนวทางคุณภาพดินตะกอนทะเลและชายฝั่งในบางประเทศได้กำหนดเกณฑ์แนวทางคุณภาพดินตะกอนทะเลและชายฝั่ง (Coastal and Marine Sediment Quality Guidelines)

เมื่อพิจารณาระดับปรอทที่สะสมในแต่ละสถานีโดยเทียบกับค่าเกณฑ์ที่ส่งผล (Effects Range) ที่ใช้ในสหรัฐอเมริกาและค่า Interim Sediment Quality Values (ISQV) ที่ใช้ในออสเตรเลีย-นิวซีแลนด์และฮ่องกง (ตารางที่ 3.2 บทที่ 3) พบว่าปริมาณปรอทสูงสุดในดินตะกอนบริเวณดอนหอยหลอดจากการศึกษาครั้งนี้มีค่าเท่ากับ 114.83 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ซึ่งยังมีค่าไม่เกินค่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่ส่งผล (Effects Range-Low, ERL) ของสหรัฐอเมริกา (150 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง) และค่า ISQV-Low ของออสเตรเลีย - นิวซีแลนด์และฮ่องกง (150 และ 280 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ)

บทที่ 5 สรุปผลศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

ปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด (acid volatile sulfide, AVS) ตามลำดับชั้นความลึกในดินตะกอนในพื้นที่ศึกษา อยู่ในช่วง 0.24 ถึง 1056.45 ไมโครกรัมต่อกรัม มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 14.28 ± 16.12 ไมโครกรัมต่อกรัม สำหรับทิศตะวันตกเฉียงใต้มีปริมาณ AVS ที่สูงกว่าทิศตะวันออกเฉียงของปากแม่น้ำแม่กลอง ซึ่งค่าเฉลี่ยเท่ากับ 21.90 ± 21.32 และ 10.39 ± 10.78 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (organic carbon, OC) ตามลำดับชั้นความลึกในดินตะกอนในพื้นที่ศึกษา อยู่ในช่วงร้อยละ 0.12 ถึง 0.96 มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 0.49 ± 0.23 สำหรับทิศตะวันตกเฉียงใต้มีปริมาณ OC ต่ำกว่าทิศตะวันออกเฉียงเหนือของปากแม่น้ำแม่กลอง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 0.31 ± 0.12 และ 0.59 ± 0.22 ตามลำดับ

ปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ระเหยในสภาวะกรด (simultaneously-extracted mercury, SE-Hg) ตามลำดับชั้นความลึกในดินตะกอนในพื้นที่ศึกษา อยู่ในช่วง 0.0011 ถึง 0.1177 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 0.0032 ± 0.0013 ไมโครกรัมต่อกรัม สำหรับทิศตะวันตกเฉียงใต้มีปริมาณ SE-Hg ที่สูงกว่าทิศตะวันออกเฉียงของปากแม่น้ำแม่กลอง ซึ่งค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0046 ± 0.0029 และ 0.0024 ± 0.0013 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

ปริมาณปรอทรวม (total mercury, T-Hg) ตามลำดับชั้นความลึกในดินตะกอนบริเวณดอนหอยหลอด อยู่ในช่วง 0.013 ถึง 0.11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนัก สำหรับทิศตะวันตกเฉียงใต้มีปริมาณ T-Hg ต่ำกว่าทิศตะวันออกเฉียงเหนือของปากแม่น้ำแม่กลอง ซึ่งมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 0.027 ± 0.071 และ 0.047 ± 0.024 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เมื่อนำปริมาณ SE-Hg ในทิศตะวันตกเฉียงใต้และในทิศตะวันออกเฉียงเหนือของปากแม่น้ำแม่กลอง มาคำนวณร้อยละ ได้ค่าร้อยละ 17.0 และ 5.1 ตามลำดับ ของปรอททั้งหมดในดินตะกอน

จากการวิเคราะห์ดัชนีการสะสมเชิงธรณี (Igeo) ของปรอท บ่งชี้ว่าดินตะกอนตามลำดับชั้นความลึกบริเวณดอนหอยหลอด ปากแม่น้ำแม่กลอง จังหวัดสมุทรสงคราม อยู่ในช่วง -5.4793 ถึง -2.3855 ซึ่งถือว่ายังไม่จัดอยู่ในสภาวะที่เรียกว่ามีมลพิษของปรอท และปริมาณปรอททั้งหมดที่วิเคราะห์ได้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ตามเกณฑ์ค่ามาตรฐานของปรอทในดินตะกอนของกรมควบคุมมลพิษ ที่ควรจะมีค่าต่ำกว่า 0.15 mg/kg จัดอยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาในครั้งนี้ถึงแม้ว่าค่าปรอททั้งหมดยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เมื่อพิจารณาตามเกณฑ์ค่ามาตรฐานของปรอทในดินตะกอนของกรมควบคุมมลพิษแต่ในอนาคตอาจเกิดการปนเปื้อนของปรอทจนส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตหน้าดิน (เช่น หอยหลอด หอยแครง หอยตลับ เป็นต้น) รวมทั้งสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ได้ จึงควรติดตามการปนเปื้อนปรอทในดินตะกอนบริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม เป็นระยะ ๆ เช่น ทุก 2 ปี หรือ 5 ปี จะทำให้ติดตามตรวจสอบการปนเปื้อนและควบคุมผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมได้ทันทั่วถึงและมีประสิทธิภาพได้มากขึ้น

ในการศึกษาในอนาคต (1) ควรต้องศึกษาสัดส่วนของของเมทิลเมอร์คิวรี (methyl mercury) ในดินตะกอนด้วย เนื่องจากเป็นรูปทางเคมีของปรอทที่มีความเป็นพิษสูงที่สุดและเป็นอันตรายต่อทั้งสิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศ (2) ควรศึกษาอายุของดินตะกอน เพื่อให้ทราบถึงอัตราการทับถมของดินตะกอนและสามารถนำมาคำนวณหาอัตราการทับถมของดินตะกอนและการเปลี่ยนแปลงของการสะสมปรอทในอดีตได้ (3) ศึกษาปรอทในสิ่งมีชีวิตบริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม เช่น หอยหลอด หอยแครง หอยตลับ เป็นต้น เพื่อศึกษาการสะสมของปรอทในสิ่งมีชีวิต และ (4) ควรเพิ่มพื้นที่ในการศึกษา เนื่องจากจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการประเมินการปนเปื้อนปรอทให้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมควบคุมมลพิษ. (2541). รายงานการศึกษาปริมาณสารปรอทในสิ่งแวดล้อมทางทะเลของประเทศไทย: ฝ่ายมลพิษทางทะเล กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม.
- จิราภรณ์ อ่ำพันธ์. (2543). อันตรายจากปรอท ความรู้สิ่งเป็นพิษ ตอนที่ 14 (pp. 9-13). นนทบุรี: กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข.
- เบญจวรรณ แสนสิทธิสกุลเลิศ. (2557). การปนเปื้อนเชิงพื้นที่ และค่าพื้นฐานของปรอทในดินตะกอนผิวหน้าของอ่าวไทย (Doctoral dissertation, จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย).
- เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล, เบญจวรรณ แสนสิทธิสกุลเลิศ และ พิสุทธิ เทศสวัสดิ์. (2556). ลักษณะทางตะกอนวิทยา และการปนเปื้อนของปรอท และสารหนูในดินตะกอนอ่าวไทย (Sedimentological Characteristics and Contamination of Mercury and Arsenic in Sediment of the Gulf of Thailand). ในการสัมมนาวิชาการ เรื่อง " ผลการสำรวจทรัพยากรประมงและสิ่งแวดล้อมทางทะเลในบริเวณอ่าวไทยตอนกลาง โดยเรือสำรวจซีฟเดค ปี 2556" (pp. 64-71). สำนักงานฝ่ายฝึกอบรมศูนย์พัฒนาการประมงแห่งเอเชียตะวันออกเฉียงใต้.
- รัชนิกร บำรุงราชหิรัณย์, วรรณภา จำราช และ ชันธ์พงศ์ จริงจิต. (2527). โลหะในน้ำทะเลและดินตะกอน. งานวิจัยนำเสนอในการสัมมนาครั้งที่ 3 การวิจัยคุณภาพน้ำและคุณภาพทรัพยากรมีชีวิตน่านน้ำไทย.
- สุธรรม สิทธิชัยเกษม และ สุวรรณิ์ เฉินบำรุง. (2527). การปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม บริเวณปากแม่น้ำของอ่าวไทยตอนใน. ในงานสัมมนา การวิจัยคุณภาพน้ำและคุณภาพทรัพยากรสิ่งมีชีวิตในน่านน้ำไทยครั้งที่ 3, กรุงเทพมหานคร.
- สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (2528). ปรอท. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ.
- อำไพ อิทธิเกษม. (2521). ผลการวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อยในน้ำทะเลและดินตะกอน. งานวิจัยนำเสนอในการสัมมนาการสำรวจและวิจัยสภาวะน้ำเสียในน่านน้ำไทย.

ภาษาอังกฤษ

- Aastrup, M., Johnson, J., Bringmark, E., Bringmark, I., & Iverfeldt, Å. (1991). Occurrence and transport of mercury within a small catchment area. *Water Air & Soil Pollution*, 56(1), 155-167.
- Allen, H. E. and Fu, G. (1991). Determination of acid volatile sulfide and selected simultaneously extractable metals in sediment (Vol. EPA-821-R-91-100). United States: Environmental Protection Agency.

- Alonso, D., Pineda, P., Olivero, J., González, H., & Campos, N. (2000). Mercury levels in muscle of two fish species and sediments from the Cartagena Bay and the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Environmental Pollution*, 109(1), 157-163.
- Asmund, G., & Nielsen, S. P. (2000). Mercury in dated Greenland marine sediments. *Science of the Total Environment*, 245(1-3), 61-72.
- Blake, N. (1980). *Land into Water - Water into Land*. USA: University Presses of Florida.
- Bloom, N. S., Gill, G. A., Cappellino, S., Dobbs, C., McShea, L., Driscoll, C., & Rudd, J. (1999). Speciation and cycling of mercury in Lavaca Bay, Texas, sediments. *Environmental Science & Technology*, 33(1), 7-13.
- Bryan, G. W., & Langston, W. J. (1992). Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review. *Environmental pollution*, 76(2), 89-131.
- Bunnaranurak, N., & Tangtreamjitmun, N. (2018). Direct Determination of Mercury in Rice Samples by Thermal Decomposition Amalgamation and Atomic Absorption Spectrophotometric Technique. *Srinakharinwirot Science Journal*, 34(2), 15-30.
- Chaikaew, P., & Sompongchaiyakul, P. (2018). Acid volatile sulphide estimation using spatial sediment covariates in the Eastern Upper Gulf of Thailand: Multiple geostatistical approaches. *Oceanologia*, 60(4), 478-487.
- Chongprasith, P., & Wilairatanadilok, W. (1999). Are Thai waters really contaminated with mercury. *ASEAN Marine Environmental Management: Towards Sustainable Development and Integrated Management of the Marine Environment in ASEAN*.
- Eisler, R. (1987). Mercury hazards to fish, wildlife, and invertebrates: a synoptic review (No. 10). Fish and Wildlife Service, US Department of the Interior.
- Emsley, J. (2011). *Nature's building blocks: an AZ guide to the elements*. Oxford University Press.
- Engstrom, D. R., Swain, E. B., Henning, T. A., Brigham, M. E., & Brezonik, P. L. (1994). Atmospheric mercury deposition to lakes and watersheds: a quantitative reconstruction from multiple sediment cores.
- Elder, J. F. (1988). *Metal biogeochemistry in surface-water systems: a review of principles and concepts*. U.S. Geological Survey: United States government printing office.
- Fang, T. H., & Chen, R. Y. (2010). Mercury contamination and accumulation in sediments of the East China Sea. *Journal of Environmental Sciences*, 22(8), 1164-1170.
- EVS Environment Consultants. (1999). *Heavy Metals and Petroleum Hydrocarbon*

- Contamination in Industrial Areas Final report. Prepared for Pollution Control Department. Bangkok. Thailand.
- Gobeil, C., Macdonald, R. W., & Smith, J. N. (1999). Mercury profiles in sediments of the Arctic Ocean basins. *Environmental science & technology*, 33(23), 4194-4198.
- Guo, T., Baasner, J., Gradl, M., & Kistner, A. (1996). Determination of mercury in saliva with a flow-injection system. *Analytica chimica acta*, 320(2-3), 171-176.
- Guy, R. D., Chakrabarti, C. L., and McBain, D. C. (1978). An Evaluation of Extraction Techniques for the Fraction of Copper and Lead in Model Sediment System. *Water Resource*, 12, 21-24.
- Hudson, R. J., Gherini, S. A., Watras, C. J., & Porcella, D. B. (1994). Modeling the biogeochemical cycle of mercury in lakes: The mercury cycling model (MCM) and its application to the MTL study lakes. In *Mercury pollution intergration and synthesis* (pp. 473-522).
- Jiwarungrueangkul, T., Dharmavanij, S., Sompongchaiyakul, P., & Kornkanitnan, N. (2015). Equilibrium partitioning approach to define sediment quality guideline of some metals in Chao Phraya Estuary, Thailand. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 12(3), 23-31.
- Johannessen, S. C., Macdonald, R. W., & Eek, K. M. (2005). Historical trends in mercury sedimentation and mixing in the Strait of Georgia, Canada. *Environmental science & technology*, 39(12), 4361-4368.
- Kwokal, Ž., Francišković-Bilinski, S., Bilinski, H., & Branica, M. (2002). A comparison of anthropogenic mercury pollution in Kaštela Bay (Croatia) with pristine estuaries in Öre (Sweden) and Krka (Croatia). *Marine Pollution Bulletin*, 44(10), 1152-1157.
- Leivuori, M. (1998). Heavy metal contamination in surface sediments in the Gulf of Finland and comparison with the Gulf of Bothnia. *Chemosphere*, 36(1), 43-59.
- Loring, D. H., & Rantala, R. T. T. (1990). Sediments and suspended particulate matter: Total and partial methods of digestion.
- Mason, R. P., & Fitzgerald, W. F. (1997). Biogeochemical cycling of mercury in the marine environment. *Metal ions in biological systems*, 34, 53-112.
- Meili, M. (1991). The coupling of mercury and organic matter in the biogeochemical cycle—towards a mechanistic model for the boreal forest zone. *Water Air & Soil Pollution*, 56(1), 333-347.
- Menasveta, P., & Cheevaparanapiwat, V. (1981). Heavy metals, organochlorine pesticides and

- PCBs in green mussels, mullets and sediments of river mouths in Thailand. *Marine Pollution Bulletin*, 12(1), 19-25.
- Mitra, S. (1986). *Mercury in the Ecosystem : its dispersion and pollution today*. Aedermannsdorf, Switzerland: Trans Tech Publications.
- Morita, M., Yoshinaga, J., & Edmonds, J. S. (1998). The determination of mercury species in environmental and biological samples (Technical report). *Pure and Applied chemistry*, 70(8), 1585-1615.
- Muller, G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2, 108-118.
- NRC. (1979). *An Assessment of Mercury in the Environment*. Washington D.C.
- Ogrinc, N., Monperrus, M., Kotnik, J., Fajon, V., Vidimova, K., Amouroux, D., ... & Horvat, M. (2007). Distribution of mercury and methylmercury in deep-sea surficial sediments of the Mediterranean Sea. *Marine Chemistry*, 107(1), 31-48.
- Pempkowiak, J., Cossa, D., Sikora, A., & Sanjuan, J. (1998). Mercury in water and sediments of the southern Baltic Sea. *Science of the Total Environment*, 213(1-3), 185-192.
- Pirrone, N., & Mahaffey, K. R. (Eds.). (2005). *Dynamics of mercury pollution on regional and global scales: atmospheric processes and human exposures around the world*. Springer Science & Business Media.
- Polprasert, C., Vongvisessomjai, S., Lohani, B. N., Muttamara, S., Arbhabhirama, A., Traichaiyaporn, S., and Wangsuphachart, S. (1979). Heavy metals, DDT and PCB in the Upper Gulf of Thailand. Environmental Engineering Division and Water Resources Engineering Division. AIT Research Report, 105.
- Ramamoorthi, V., & Meena, S. (2018). Quantification of Soil Organic Carbon-Comparison of Wet Oxidation and Dry Combustion Methods. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7, 146-154.
- Sanders, C. J., Santos, I. R., Silva-Filho, E. V., & Patchineelam, S. R. (2006). Mercury flux to estuarine sediments, derived from Pb-210 and Cs-137 geochronologies (Guaratuba Bay, Brazil). *Marine Pollution Bulletin*, 52(9), 1085-1089.
- Schuster, E. (1991). The behavior of mercury in the soil with special emphasis on complexation and adsorption processes-a review of the literature. *Water Air & Soil Pollution*, 56(1), 667-680.
- Schroeder, W. H., Yarwood, G., & Niki, H. (1991). Transformation processes involving mercury species in the atmosphere—results from a literature survey. *Water Air & Soil Pollution*,

56(1), 653-666.

- Sirirat, J. (2011). Using acid volatile sulfide–simultaneous extracted metals as an assessment tool for metal pollution risk in the upper gulf of Thailand (Doctoral dissertation, Chulalongkorn University).
- Sompongchaiyakul, P. (1989). Analysis of chemical species for trace metals in nearshore sediment by sequential leaching method. Degree of Master of Science, Department of Marine Science, Graduate School, Chulalongkorn University.
- Sompongchaiyakul, P. (1999). Photo-mediated iron transformations in marine waters. (Ph.D.), The University of New South Wales, Australia.
- Stevenson, F. J. (1982). Humus chemistry: Genesis, Composition, Reactions (2 ed.). USA.: John Wiley and Sons, Inc.
- Stumm, W., & Morgan, J. J. (1996). Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters.
- Taylor, D. L., Linehan, J. C., Murray, D. W., & Prell, W. L. (2012). Indicators of sediment and biotic mercury contamination in a southern New England estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 64(4), 807-819.
- Tomiyasu, T., Matsuyama, A., Eguchi, T., Fuchigami, Y., Oki, K., Horvat, M., & Akagi, H. (2006). Spatial variations of mercury in sediment of Minamata Bay, Japan. *Science of the total environment*, 368(1), 283-290.
- UNEP. (2002). Global Mercury Assessment 2002.
- U.S. Department of the Interior. (1987) Mercury Hazards to fish wildlife and invertebrates: a synoptic review Contaminant Hazard Reviews (pp. 9-11).
- UNEP. (2013). Global Mercury Assessment 2013, Sources, Emissions, Releases and Environment Transport. Geneva, Switzerland: UNEP Chemicals Branch.
- US–EPA. (1997). An Inventory of Anthropogenic Mercury Emissions in the United States Mercury Study Report to Congress Volume II: Office of Air Quality Planning and Standards and Office of Research and Development.
- Utoomprukporn, W. (2006). Final Report proposed Marine and Coastal Sediment Quality Guidelines, Submitted to Pollution Control Department; under the UNEP GEF Project Reversing Environmental Degradation Trends in the South China Sea and Gulf of Thailand.
- Wattanapongsakul, S. (2018). Nutrient release and sediment oxygen demand in the Inner Gulf of Thailand. Department of Marine Science, Graduate School, Chulalongkorn University.
- Windom, H. L., & Cranmer, G. (1998). Lack of observed impacts of gas production of Bongkot

- Field, Thailand on marine biota. *Marine pollution bulletin*, 36(10), 799-807.
- Zhang, T., & Hsu-Kim, H. (2010). Photolytic degradation of methylmercury enhanced by binding to natural organic ligands. *Nature geoscience*, 3(7), 473-476.
- Zwolsman, J. J. G., van Eck, G. T. M., & Burger, G. (1996). Spatial and temporal distribution of trace metals in sediments from the Scheldt estuary, south-west Netherlands. *Estuarine, coastal and shelf Science*, 43(1), 55-79.

ภาคผนวก ก
พิกัดจุดเก็บตัวอย่าง

ตาราง ก-1 วันที่ในการเก็บตัวอย่าง จำนวนตัวอย่าง ช่วงความลึก และพิกัดสถานีเก็บตัวอย่างของดินตะกอน บริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม

วันที่	สถานี	จำนวนตัวอย่าง	ช่วงความลึก (cm)	Latitude (°N)	Longitude (°E)
23 สิงหาคม พ.ศ. 2563	1A	6	0-30	13°20'29.0"	100°00'34.0"
	1B	10	0-50	13°20'22.0"	100°00'46.0"
	1C	9	0-42	13°20'12.0"	100°00'55.0"
	2A	10	0-50	13°21'40.0"	100°01'33.0"
	2B	9	0-43	13°21'37.0"	100°01'37.0"
	2C	10	0-46	13°21'33.0"	100°01'42.0"
	3A	7	0-35	13°21'47.0"	100°01'38.0"
	3B	7	0-35	13°21'43.0"	100°01'43.0"
	3C	6	0-30	13°21'39.0"	100°01'48.0"

ภาคผนวก ข

องค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนผิวหน้าบริเวณดอนหอยหลอด จังหวัดสมุทรสงคราม

ตาราง ข-1 เปรอร์เซ็นต์น้ำ ปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด (acid volatile sulfide, AVS) คาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอน (organic carbon, OC) ปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด (simultaneously-extracted mercury, SE-Hg) และปริมาณรวมของปรอทในดินตะกอน (total mercury, T-Hg)

สถานี	ช่วงความลึก (cm)	%moisture	AVS ($\mu\text{g/g dw}$)	OC (%)	SE-Hg (mg/kg dw)	T-Hg (mg/kg dw)
1A	0-5	23.77	0.73	0.21	0.002288	0.01821
	5-10	25.45	0.24	0.15	0.001525	0.02052
	10-15	24.59	14.32	0.26	0.002627	0.02473
	15-20	22.90	55.78	0.31	0.001525	0.02369
	20-25	27.28	10.41	0.22	0.002373	0.03551
	25-30	23.65	8.09	0.15	0.002881	0.03921
1B	0-5	26.46	6.59	0.12	0.003644	0.01614
	5-10	29.33	19.34	0.46	0.006949	0.02339
	10-15	27.83	31.86	0.26	0.003814	0.03506
	15-20	30.58	11.39	0.29	0.004661	0.04257
	20-25	29.71	21.99	0.52	0.004831	0.02827
	25-30	30.07	33.91	0.53	0.008475	0.02977
	30-35	24.53	102.40	0.31	0.003983	0.02693
	35-40	21.69	31.71	0.28	0.002458	0.02313
	40-45	28.91	15.65	0.48	0.003983	0.03267
	45-50	32.04	16.43	0.54	0.008814	0.03218
1C	0-5	25.22	2.62	0.29	0.006186	0.01784
	5-10	24.35	39.60	0.22	0.007288	0.01895
	10-15	24.38	26.22	0.20	0.014492	0.02482
	15-20	23.44	5.81	0.35	0.00500	0.03844
	20-25	24.15	3.15	0.23	0.004407	0.03123
	25-30	22.31	26.54	0.33	0.006356	0.02843

ตาราง ข-1 (ต่อ)

สถานี	ช่วงความลึก (cm)	%moisture	AVS ($\mu\text{g/g dw}$)	OC (%)	SE-Hg (mg/kg dw)	T-Hg (mg/kg dw)
1C	30-35	21.70	34.40	0.31	0.002627	0.02619
	35-40	22.87	19.90	0.27	0.002542	0.02367
	40-42	22.67	8.42	0.39	0.002458	0.01876
2A	0-5	28.79	4.0812	0.30	0.001864	0.02092
	5-10	26.15	38.9024	0.33	0.001695	0.02816
	10-15	33.28	48.4319	0.59	0.001271	0.03534
	15-20	29.73	32.5363	0.79	0.001356	0.04226
	20-25	29.71	8.2520	0.60	0.001695	0.04249
	25-30	28.48	6.8147	0.80	0.005339	0.11483
	30-35	33.82	2.5851	0.85	0.001525	0.10997
	35-40	29.15	2.3493	0.79	0.002034	0.08592
	40-45	30.61	5.7326	0.76	0.002119	0.09766
	45-50	30.36	2.8254	0.77	0.002288	0.08641
2B	0-5	22.32	11.2763	0.30	0.006354	0.02286
	5-10	19.15	14.0848	0.54	0.002604	0.03248
	10-15	24.62	10.1268	0.54	0.002408	0.03825
	15-20	30.94	5.5409	0.66	0.002917	0.06085
	20-25	28.39	4.6710	0.57	0.002604	0.05983
	25-30	33.87	0.8375	0.72	0.002083	0.06584
	30-35	36.67	2.3137	0.90	0.0025	0.07764
	35-40	38.40	2.9607	0.92	0.001875	0.08313
	40-43	37.08	0.7088	0.90	0.002396	0.05743
2C	0-5	27.42	8.75	0.21	0.001354	0.02034
	5-10	28.12	27.27	0.67	0.00125	0.02974
	10-15	27.50	33.03	0.69	0.002188	0.04110
	15-20	25.98	14.98	0.73	0.001563	0.03369
	20-25	27.84	12.53	0.65	0.003229	0.03772
	25-30	26.44	3.42	0.90	0.003438	0.04869

ตาราง ข-1 (ต่อ)

สถานี	ช่วงความลึก (cm)	%moisture	AVS ($\mu\text{g/g dw}$)	OC (%)	SE-Hg (mg/kg dw)	T-Hg (mg/kg dw)
2C	30-35	23.95	22.67	0.48	0.003333	0.04496
	35-40	21.09	3.53	0.70	0.001563	0.04501
	40-45	26.25	4.73	0.65	0.002083	0.06122
	45-50	27.16	1.21	0.53	0.002917	0.07912
3A	0-5	26.78	7.62	0.15	0.001771	0.01345
	5-10	26.69	9.02	0.34	0.002083	0.02292
	10-15	25.43	16.27	0.63	0.001667	0.02793
	15-20	26.61	17.35	0.96	0.001458	0.03720
	20-25	28.30	1.86	0.27	0.002708	0.03561
	25-30	26.58	1.99	0.28	0.004063	0.03568
	30-35	32.60	1.86	0.48	0.002917	0.04559
3B	0-5	24.18	9.88	0.16	0.001771	0.01356
	5-10	22.97	21.37	0.22	0.00125	0.01538
	10-15	30.18	24.68	0.32	0.001979	0.02741
	15-20	30.38	14.37	0.84	0.002083	0.04257
	20-25	26.53	12.04	0.90	0.001146	0.04280
	25-30	31.04	3.69	0.56	0.002708	0.03722
	30-35	29.85	0.41	0.53	0.001354	0.03570
3C	0-5	24.16	2.76	0.30	0.008229	0.02842
	5-10	23.95	2.21	0.67	0.002917	0.03430
	10-15	29.95	0.94	0.60	0.001875	0.04654
	15-20	28.11	1.36	0.63	0.002083	0.04064
	20-25	27.69	10.01	0.66	0.001458	0.04393
	25-30	25.00	12.11	0.60	0.002292	0.06486

ภาคผนวก ค
ค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี (geoaccumulation index: I_{geo})
ของการปนเปื้อนปรอทที่สะสมในดินตะกอน

ตาราง ค-1 ค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี (geoaccumulation index: I_{geo})

สถานี	ความลึก (cm)	I _{geo}	สถานี	ความลึก (cm)	I _{geo}	สถานี	ความลึก (cm)	I _{geo}
1A	0-5	-5.0422	2A	0-5	-4.8420	2C	25-30	-3.6233
	5-10	-4.8699		5-10	-4.4132		30-35	-3.7382
	10-15	-4.6006		10-15	-4.0856		35-40	-3.7366
	15-20	-4.6626		15-20	-3.8276		40-45	-3.2929
	20-25	-4.0787		20-25	-3.8198		45-50	-2.9228
	25-30	-3.9357		25-30	-2.3855	3A	0-5	-5.4793
1B	0-5	-5.2163	30-35	-2.4479	5-10		-4.7103	
	5-10	-4.6810	35-40	-2.8039	10-15		-4.4251	
	10-15	-4.0971	40-45	-2.6191	15-20		-4.0116	
	15-20	-3.8171	45-50	-2.7957	20-25		-4.0746	
	20-25	-4.4076	2B	0-5	-4.7141	25-30	-4.0718	
	25-30	-4.3330		5-10	-4.2073	30-35	-3.7182	
	30-35	-4.4777		10-15	-3.9714	3B	0-5	-5.4675
	35-40	-4.6971		15-20	-3.3016		5-10	-5.2858
	40-45	-4.1989		20-25	-3.3260		10-15	-4.4522
45-50	-4.2207	25-30	-3.1879	15-20	-3.8171			
1C	0-5	-5.0718	30-35	-2.9501	20-25		-3.8093	
	5-10	-4.9847	35-40	-2.8515	25-30	-4.0108		
	10-15	-4.5954	40-43	-3.3851	30-35	-4.0710		
	15-20	-3.9643	2C	0-5	-4.8826	3C	0-5	-4.4000
	20-25	-4.2640		5-10	-4.3345		5-10	-4.1287
	25-30	-4.3995		10-15	-3.8678		10-15	-3.6884
	30-35	-4.5179		15-20	-4.1546		15-20	-3.8840
	35-40	-4.6638		15-20	-4.1546		20-25	-3.7717
	40-42	-4.9992		20-25	-3.9916		25-30	-3.2096

ภาคผนวก ง
ผลการทดสอบ F-test และ t-test สำหรับการเก็บตัวอย่างในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW)
และในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ของปากแม่น้ำแม่กลอง

ตารางที่ ง-1 ปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด (acid volatile sulfide, AVS) และผลการทดสอบ F-test เพื่อเปรียบเทียบตัวอย่างในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) และในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ของปากแม่น้ำแม่กลอง

	AVS	SW	NW
Mean		21.899552	10.3870286
Variance		473.504566	118.171325
Observations		25	49
df		24	48
F		4.00693286	
P(F<=f) one-tail		2.123E-05	
F Critical one-tail		2.20070535	

ตารางที่ ง-2 ปริมาณซัลไฟด์ที่ระเหยในสภาวะกรด (acid volatile sulfide, AVS) และผลการทดสอบ t-test เพื่อเปรียบเทียบตัวอย่างในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) และในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ของปากแม่น้ำแม่กลอง

	AVS	SW	NW
Mean		21.899552	10.3870286
Variance		473.504566	118.171325
Observations		25	49
Hypothesized Mean Difference		0	
df		30	
t Stat		2.49145387	
P(T<=t) one-tail		0.00923943	
t Critical one-tail		2.45726154	
P(T<=t) two-tail		0.01847887	
t Critical two-tail		2.74999565	

ตารางที่ ง-3 ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอน (organic carbon, OC) และผลการทดสอบ F-test เพื่อเปรียบเทียบตัวอย่างในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) และในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ของปากแม่น้ำแม่กลอง

	OC	SW	NW
Mean		0.59061224	0.3072
Variance		0.04976837	0.01438767
Observations		49	25
df		48	24
F		3.45909928	
P(F<=f) one-tail		0.00081762	
F Critical one-tail		1.86751077	

ตารางที่ ง-4 ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอน (organic carbon, OC) และผลการทดสอบ t-test เพื่อเปรียบเทียบตัวอย่างในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) และในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ของปากแม่น้ำแม่กลอง

	OC	SW	NW
Mean		0.3072	0.59061224
Variance		0.01438767	0.04976837
Observations		25	49
Hypothesized Mean Difference		0	
df		72	
t Stat		-7.1048991	
P(T<=t) one-tail		3.5389E-10	
t Critical one-tail		1.6662937	
P(T<=t) two-tail		7.0779E-10	
t Critical two-tail		1.99346357	

ตารางที่ ง-5 ปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซิลไฟด์ระเหยในสภาวะกรด (simultaneously-extracted mercury, SE-Hg) และผลการทดสอบ F-test เพื่อเปรียบเทียบตัวอย่างในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) และในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ของปากแม่น้ำแม่กลอง

	SE-Hg	SW	NW
Mean		0.00464748	0.00240116
Variance		8.5344E-06	1.7049E-06
Observations		25	49
df		24	48
F		5.00573719	
P(F<=f) one-tail		1.0716E-06	
F Critical one-tail		2.20070535	

ตารางที่ ง-6 ปริมาณปรอทที่สกัดได้พร้อมกับการสกัดซิลไฟด์ระเหยในสภาวะกรด (simultaneously-extracted mercury, SE-Hg) และผลการทดสอบ t-test เพื่อเปรียบเทียบตัวอย่างในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) และในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ของปากแม่น้ำแม่กลอง

	SE-Hg	SW	NW
Mean		0.00464748	0.00240116
Variance		8.5344E-06	1.7049E-06
Observations		25	49
Hypothesized Mean Difference		0	
df		29	
t Stat		3.66250119	
P(T<=t) one-tail		0.0004959	
t Critical one-tail		2.46202136	
P(T<=t) two-tail		0.00099179	
t Critical two-tail		2.7563859	

ตารางที่ ง-7 ปริมาณรวมของปรอทในดินตะกอน (total mercury, T-Hg) และผลการทดสอบ F-test เพื่อเปรียบเทียบตัวอย่างในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) และในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ของปากแม่น้ำแม่กลอง

	T-Hg	SW	NW
Mean		0.0272124	0.04684837
Variance		5.2553E-05	0.00058255
Observations		25	49
df		24	48
F		0.09021153	
P(F<=f) one-tail		1.372E-08	
F Critical one-tail		0.40842734	

ตารางที่ ง-8 ปริมาณรวมของปรอทในดินตะกอน (total mercury, T-Hg) และผลการทดสอบ t-test เพื่อเปรียบเทียบตัวอย่างในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) และในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ของปากแม่น้ำแม่กลอง

	T-Hg	SW	NW
Mean		0.0272124	0.04684837
Variance		5.2553E-05	0.00058255
Observations		25	49
Hypothesized Mean Difference		0	
df		63	
t Stat		-5.2496465	
P(T<=t) one-tail		9.5414E-07	
t Critical one-tail		2.38700786	
P(T<=t) two-tail		1.9083E-06	
t Critical two-tail		2.65614503	