

การปนเปื้อนเชิงพื้นที่และค่าพื้นฐานของปรอทในดินตะกอนผิวหน้าของอ่าวไทย



นางสาวเบญจวรรณ แสนสิทธิสกุลเลิศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SPATIAL CONTAMINATION AND BASELINE OF MERCURY IN SURFACE SEDIMENT OF THE
GULF OF THAILAND

Miss Benjawan Sansittisakunlird



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science
(Interdisciplinary Program)
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปนเปื้อนเชิงพื้นที่และค่าพื้นฐานของปรอทในดิน ตะกอนผิวหน้าของอ่าวไทย
โดย	นางสาวเบญจวรรณ แสนสิทธิสกุลเลิศ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุนทร ชุตินทรานนท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ ศิรินาวิน)

เบญจวรรณ แสนสิทธิสกุลเลิศ : การปนเปื้อนเชิงพื้นที่และค่าพื้นฐานของปรอทในดินตะกอนผิวหน้าของอ่าวไทย (SPATIAL CONTAMINATION AND BASELINE OF MERCURY IN SURFACE SEDIMENT OF THE GULF OF THAILAND) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล, 119 หน้า.

วิเคราะห์ปรอททั้งหมดในดินตะกอนผิวหน้า 174 สถานี ซึ่งเก็บตัวอย่างในเขตน่านน้ำไทยของอ่าวไทยระหว่างสิงหาคม 2553 ถึง มิถุนายน 2555 โดยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์ปชันแบบไอเย็น วิเคราะห์คุณลักษณะทางตะกอนวิทยา คาร์บอนอินทรีย์ที่ออกซิไดซ์ง่ายและแคลเซียมคาร์บอเนต ผลการศึกษาพบว่าอนุภาคดินตะกอนในอ่าวไทยตอนบนเป็นดินเหนียวปนทรายแป้งและทรายแป้งปนดินเหนียว ขณะที่อ่าวไทยตอนกลางแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีขนาดหยาบ (ทรายปนดินเหนียว ทรายปนทรายแป้ง ทราย) และกลุ่มที่มีขนาดเล็ก (ดินเหนียวปนทรายแป้ง ทั้งสามขนาดพอๆ กัน) เนื้อดินตะกอนในอ่าวไทยตอนล่างส่วนใหญ่จะเป็นดินเหนียวปนทรายแป้งและแบบที่มีทั้งสามขนาดพอๆ กัน ดินตะกอนในอ่าวไทยตอนบนส่วนใหญ่มีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์สูง ค่าเฉลี่ยของคาร์บอนอินทรีย์ในอ่าวไทยตอนบน ตอนกลาง และตอนล่าง มีค่าร้อยละ 1.60 ± 0.60 , 0.93 ± 0.48 และ 0.69 ± 0.34 ตามลำดับ และมีแคลเซียมคาร์บอเนตเฉลี่ยร้อยละ 11.2 ± 4.4 , 14.5 ± 3.9 และ 14.1 ± 5.6 ตามลำดับ ปริมาณปรอททั้งหมดในดินตะกอนอ่าวไทยหลังปรับฐานด้วยคาร์บอนอยู่ในช่วง 7.7 ถึง 110.8 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง โดยมีค่าเฉลี่ยในอ่าวไทยตอนบน ตอนกลาง และตอนล่าง เท่ากับ 28.7 ± 23.0 , 45.1 ± 24.1 และ 24.3 ± 10.9 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย Hierarchical cluster analysis (HCA) จะแบ่งดินตะกอนได้ 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม I มีค่าปรอทต่ำและมีความสัมพันธ์กับสารอินทรีย์ กลุ่ม II มีค่าปรอทต่ำและมีความสัมพันธ์ทั้งกับสารอินทรีย์และปริมาณตะกอนขนาดละเอียด (< 63 ไมโครเมตร) ซึ่งมีนัยยะได้ว่าค่าปรอทในดินตะกอนของกลุ่มนี้น่าจะเป็นค่าพื้นฐานของปรอทในดินตะกอนอ่าวไทย ส่วนกลุ่ม III มีค่าปรอทสูงและไม่มีความสัมพันธ์กับทั้งสารอินทรีย์และปริมาณตะกอนขนาดละเอียด บ่งบอกเป็นนัยว่าปรอทในกลุ่มนี้มีแหล่งกำเนิดการปนเปื้อนจากมนุษย์ สถานีในกลุ่ม I เป็นสถานีที่อยู่ใกล้ฝั่งมากกว่าสถานีในกลุ่ม II ขณะที่สถานีในกลุ่ม III เป็นสถานีนอกปากแม่น้ำเจ้าพระยา สถานีใกล้เกาะสีชัง/แหลมฉบัง สถานีกลางอ่าว และสถานีนอกฝั่งจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งประจวบเหมาะแก่ที่สถานีเหล่านี้ที่อยู่ใกล้กับพื้นที่ที่มีกิจกรรมการสำรวจและผลิตก๊าซและปิโตรเลียมในอ่าวไทย ค่าเฉลี่ย (ต่ำสุด – สูงสุด) ของปรอททั้งหมดในดินตะกอนกลุ่ม I และ II คือ 29.6 ± 11.6 (8.43–61.5) และ 23.9 ± 11.0 (7.67–50.5) ขณะที่ในกลุ่ม III มีค่า 89.1 ± 14.8 (58.3–110.8) ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ดัชนีการสะสมเชิงธรณี (I_{geo}) ของปรอทในอ่าวไทย บ่งชี้ว่าดินตะกอนระดับผิวหน้าของอ่าวไทยยังไม่จัดอยู่ในภาวะที่เรียกว่ามีมลพิษของปรอท

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5487159320 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS: MERCURY CONTAMINATION,GULF OF THAILAND,BASELINE OF MERCURY,SEDIMENT

BENJAWAN SANSITTISAKUNLIRD: SPATIAL CONTAMINATION AND BASELINE OF MERCURY
IN SURFACE SEDIMENT OF THE GULF OF THAILAND. ADVISOR: ASST. PROF.PENJAI
SOMPONGCHAIYAKUL, Ph.D., pp.

Total mercury (T-Hg) in 174 surface sediments collected during August 2010 and June 2012, representing whole Thai waters of the Gulf of Thailand (GoT), were analyzed using cold vapour atomic absorption spectroscopy. Sedimentological characteristics, readily oxidisable organic carbon (OC) and calcium carbonate (CaCO_3) were determined. Textures of sediments in the upper-GoT showed mainly silty clay and clayey silt, while in the central-GoT appeared to distinguish into two groups; coarse (clayey sand, silty sand, sand) and fine (silty clay, sand silt clay) groups. In the lower-GoT's, the texture of sediments were mainly silty clay and sand silt clay. Most sediment in the upper-GoT contained high OC. Average OC in the upper-, central- and lower-GoT were $1.60 \pm 0.60\%$, $0.93 \pm 0.48\%$ and $0.69 \pm 0.34\%$, respectively. Average CaCO_3 contents in the upper-, central- and lower-GoT were $11.2 \pm 4.4\%$, $14.5 \pm 3.9\%$ and $14.1 \pm 5.6\%$, respectively. Concentrations of T-Hg as carbonate free basis in surface sediments of the GoT varied from 7.7 to 110.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$ dry weight, with the average of 28.7 ± 23.0 , 45.1 ± 24.1 and 24.3 ± 10.9 $\mu\text{g}/\text{kg}$ dry weight in the upper-, central- and lower-GoT, respectively. Hierarchical cluster analysis (HCA) indicated three distinguished groups comprising Group I – low T-Hg which related to OC in sediments, Group II – low T-Hg which related to both OC and fine grain ($< 63 \mu\text{m}$) sediments which implied that T-Hg level in this group could be considered to be used as baseline for the GoT's sediments, and Group III – high OC which no relationship with OC and fine grain implying that T-Hg in this group was contaminated from anthropogenic sources. Stations in Group I located closer to shore than those in Group II. Group III contained stations off Chaopraya river mouth, near Koh Sichang/Leam-chabang, in the middle of the GoT and off Prachupkirkhun province. Coincidentally, most of these stations located near oil/gas exploration and production activities in the GoT. Average T-Hg levels (min – max) of sediments in Group I and II were 29.6 ± 11.6 (8.43–61.5) and 23.9 ± 11.0 (7.67–50.5), whereas those of Group III were 89.1 ± 14.8 (58.3–110.8) $\mu\text{g}/\text{kg}$ dry weight, respectively. Enrichment status of T-Hg according to geoaccumulation index (I_{geo}) suggested there is no evidence of mercury pollution in the GoT's sediment.

Field of Study: Environmental Science

Student's Signature

Academic Year: 2014

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ ศิรินาวิน คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ข้อเสนอแนะแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.สมเกียรติ ขอเกียรติวงศ์ ที่ให้ความกรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการตรวจวัดปริมาณปรอทในดินตะกอนและเทคนิคที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ปรอทในห้องปฏิบัติการ ขอขอบคุณนักวิจัยและเจ้าหน้าที่กลุ่มสมุทรศาสตร์ศูนย์วิจัยและพัฒนาทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งทะเลอันดามัน ตลอดจนบุคลากรในศูนย์วิจัยและพัฒนาทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งทะเลอันดามัน ที่ให้ความอนุเคราะห์และช่วยเหลือตลอดการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณปรอทในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณคุณนฤมล กรคณิตนันท์ สำหรับการประสานงานและดูแลโครงการความอ่อนไหวของพื้นที่ชายฝั่ง (Vulnerability of Coastal Zones) ขอขอบคุณนักวิจัยทุกท่านภายใต้โครงการความอ่อนไหวของพื้นที่ชายฝั่ง (Vulnerability of Coastal Zones) ที่ให้ความอนุเคราะห์ เอื้อเฟื้อในการร่วมเก็บตัวอย่าง รวมทั้งเจ้าหน้าที่เรือ SEAFDEC และ SEAFDEC 2 ที่ให้ความร่วมมือและช่วยเหลือในการเก็บตัวอย่างเป็นอย่างดี

ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์และสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เป็นกำลังใจให้อย่างเสมอและท้ายที่สุดขอขอบพระคุณครอบครัวอย่างสุดซึ้งที่ผลักดัน ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาในทุกๆ เรื่อง ตลอดจนทุนทรัพย์ในการศึกษาเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 สํารวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 พรอทและความเป็นพิษต่อมนุษย์.....	7
2.2 การปนเปื้อนและการเปลี่ยนรูปแบบทางเคมีของพรอท.....	9
2.2.1 แหล่งกำเนิดของพรอทที่มาจากบรรยากาศ.....	10
2.2.2 แหล่งกำเนิดของพรอทที่มาจากดิน.....	11
2.2.3 การเปลี่ยนรูปแบบทางเคมีของพรอทและการสะสมในสัตว์น้ำ.....	13
2.3 ดินตะกอน.....	15
2.4 พื้นที่ศึกษา.....	17
2.4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของอ่าวไทย.....	17
2.4.2 การสำรวจและขุดเจาะแก๊สและปิโตรเลียมในอ่าวไทย.....	18
2.5 ปริมาณของพรอทในน้ำและดินตะกอนในประเทศไทยและต่างประเทศ.....	22

2.5.1 ความเข้มข้นปรอทที่ปนเปื้อนในน้ำทะเลอ่าวไทย.....	22
2.5.2 ความเข้มข้นปรอทที่ปนเปื้อนในดินตะกอนอ่าวไทย.....	25
2.5.3 ความเข้มข้นปรอทที่ปนเปื้อนในดินตะกอนในต่างประเทศ.....	28
2.5.4 เกณฑ์คุณภาพดินตะกอน (Sediment Quality Guidelines) ในแต่ละประเทศ.....	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	31
3.1 จุดเก็บตัวอย่าง	31
3.2 วิธีการเก็บตัวอย่างดินตะกอน	31
3.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์.....	34
3.4 การวิเคราะห์ทางกายภาพและเคมี.....	35
3.4.1 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของตะกอนดิน	35
3.4.2 การวิเคราะห์สารอินทรีย์ที่ออกซิไดซ์ง่ายในดินตะกอน	35
3.4.3 การวิเคราะห์อินทรีย์ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต.....	36
3.4.4 การย่อยสกัดตัวอย่างและวิเคราะห์ปริมาณปรอทรวม (Total mercury)	36
3.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	37
3.5.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น.....	37
3.5.2 การวิเคราะห์โดยใช้สถิติแบบหลายตัวแปร	37
3.5.3 การวิเคราะห์ความรุนแรงของการปนเปื้อนปรอท.....	37
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล	39
4.2 คาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอน.....	48
4.3 แคลเซียมคาร์บอเนตในดินตะกอน.....	52
4.4 ปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนผิวหน้าของอ่าวไทย.....	54
4.5 ความสัมพันธ์ทางสถิติของปัจจัยต่างๆ ในดินตะกอน.....	59
4.5.1 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	59

4.5.2 การวิเคราะห์การจัดกลุ่ม	61
4.6 การวิเคราะห์ความรุนแรงของการปนเปื้อนปรอทในอ่าวไทย	69
4.6.1 ดัชนีการการสะสมเชิงธรณี (geoaccumulation index: I _{geo})	69
4.6.2 เกณฑ์แนวทางคุณภาพดินตะกอนทะเลและชายฝั่ง	69
4.6.3 เปรียบเทียบการกระจายของปรอทเชิงพื้นที่กับการศึกษาที่ผ่านมา.....	70
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	72
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	74
รายการอ้างอิง	76
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	119



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 ชนิดของปรอทในสิ่งแวดล้อม	8
ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของปรอทรวมในน้ำทะเล.....	23
ตารางที่ 3 ความเข้มข้นของปรอทรวมในดินตะกอนในอ่าวไทย	26
ตารางที่ 4 ความเข้มข้นของปรอทรวมในดินตะกอนในต่างประเทศ.....	29
ตารางที่ 5 เกณฑ์ค่ามาตรฐานของปรอทในดินตะกอน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง) ของประเทศไทย, สหรัฐอเมริกา, ออสเตรเลีย – นิวซีแลนด์ และฮ่องกง	30
ตารางที่ 6 ระดับการบ่งชี้ความรุนแรงตามค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี (geoaccumulation index: Igeo).....	38
ตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ย ค่ากลาง และพิสัย ของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอนอ่าวไทย	49
ตารางที่ 8 ค่าเฉลี่ย ค่ากลาง และค่าสูงสุด-ต่ำสุด ของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในดินตะกอนอ่าวไทย.....	52
ตารางที่ 9 ความเข้มข้นของปรอทในตะกอนมาตรฐาน MESS-3 เปรียบเทียบกับค่าที่รับรอง	54
ตารางที่ 10 ปริมาณปรอทรวมที่ปรับฐานให้อยู่ในรูป carbonate free basis (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง) ของดินตะกอนผิวหน้าของอ่าวไทย.....	55
ตารางที่ 11 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอท อนุภาคดินตะกอนขนาดละเอียด และคาร์บอนอินทรีย์ของทุกสถานี.....	59
ตารางที่ 12 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอท อนุภาคดินตะกอนขนาดละเอียด และคาร์บอนอินทรีย์บริเวณอ่าวไทยตอนบน	60
ตารางที่ 13 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอท อนุภาคดินตะกอนขนาดละเอียด และคาร์บอนอินทรีย์บริเวณอ่าวไทยตอนกลาง.....	61
ตารางที่ 14 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอท อนุภาคดินตะกอนขนาดละเอียด และคาร์บอนอินทรีย์บริเวณอ่าวไทยตอนล่าง	61
ตารางที่ 15 ค่าเฉลี่ยปริมาณดินตะกอนขนาดละเอียด ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ และปริมาณปรอทของแต่ละกลุ่มที่ได้จากการจัดกลุ่มโดย cluster.....	64

ตารางที่ 16 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอท อนุภาคดินตะกอนขนาดละเอียด และ
คาร์บอนอินทรีย์ของกลุ่ม I 67

ตารางที่ 17 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอท อนุภาคดินตะกอนขนาดละเอียด และ
คาร์บอนอินทรีย์ของกลุ่ม II..... 67

ตารางที่ 18 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอท อนุภาคดินตะกอนขนาดละเอียด และ
คาร์บอนอินทรีย์ของกลุ่ม III..... 67



สารบัญรูป

รูปที่ 1 แหล่งกำเนิด (sources) และเส้นทาง (pathways) ของปรอทในสิ่งแวดล้อม.....	9
รูปที่ 2 คุณสมบัติของสารฮิวมิก (humic substances) ชนิดต่างๆ	12
รูปที่ 3 ไดอะแกรมสามเหลี่ยมหรือไตรแองกูล่าไดอะแกรม (triangle diagram) ที่ใช้เรียกชื่อ เนื้อดินตะกอน (sediment texture) ตามสัดส่วนปริมาณอนุภาคขนาดทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ตาม (Shepard, 1954).....	16
รูปที่ 4 แปลงสัมปทานปิโตรเลียมในอ่าวไทย (กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ, 2554).....	19
รูปที่ 5 แหล่งแก๊สธรรมชาติและปิโตรเลียมในอ่าวไทย (กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ, 2554).....	20
รูปที่ 6 แนวท่อส่งแก๊สธรรมชาติในอ่าวไทย (สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2546).....	21
รูปที่ 7 จุดเก็บตัวอย่างดินตะกอนครั้งที่ 1 ในอ่าวไทยตอนบน กำหนดจุดเก็บตัวอย่างโดย transect line ระยะห่างระหว่างสถานีในแต่ละ transect line ประมาณ 6 กม. เก็บตัวอย่างโดยเรือสำรวจบุญประกอบ ระหว่าง 23-25 สิงหาคม 2553 ได้ตัวอย่างรวม 30 สถานี.....	32
รูปที่ 8 จุดเก็บตัวอย่างดินตะกอนครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ระหว่าง 7-30 พฤศจิกายน 2554 และ 20 พฤษภาคม ถึง 1 มิถุนายน 2555 กำหนดจุดเก็บตัวอย่างด้วยระบบกริด (systematic grid sampling) ขนาด 30 กม. เก็บตัวอย่างโดยใช้เรือสำรวจ SEAFDEC 2 และ SEAFDEC.....	33
รูปที่ 9 แสดงอุปกรณ์เก็บตัวอย่างตะกอนดิน (ก) Petersen grab sampler และ (ข) Box Corer..	34
รูปที่ 10 การทำแห้งเยือกแข็ง (freeze-dry) (ก) เครื่อง freeze drier และ (ข) การจัดวางตัวอย่าง.....	34
รูปที่ 11 การแบ่งพื้นที่ศึกษาเป็น 3 ส่วน คือ อ่าวไทยตอนบน อ่าวไทยตอนกลางและอ่าวไทยตอนล่าง	41
รูปที่ 12 การกระจายขนาดในไตรแองกูล่าไดอะแกรม (triangular diagram) ของดินตะกอนผิวหน้าอ่าวไทย.....	42
รูปที่ 13 สัดส่วนขนาดดินตะกอนบริเวณอ่าวไทยตอนบน ตอนกลาง และตอนล่าง.....	43
รูปที่ 14 การกระจายเชิงพื้นที่ของอนุภาคตะกอน (ก) ขนาดทราย (>63 μm), (ข) ขนาดทรายแป้ง (2–63 μm) และ (ค) ขนาดดินเหนียว (<2 μm) ในดินตะกอนอ่าวไทย	44

รูปที่ 15 การกระจายเชิงพื้นที่ของขนาดอนุภาคดินตะกอนขนาดละเอียดกว่า 63 μm ในอ่าวไทย ..	47
รูปที่ 16 ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอนอ่าวไทย	51
รูปที่ 17 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในดินตะกอนอ่าวไทย	53
รูปที่ 18 การกระจายเชิงพื้นที่ของปรอทที่ปนเปื้อนในผิวหน้าดินตะกอนอ่าวไทย	56
รูปที่ 19 เปรียบเทียบการกระจายเชิงพื้นที่ของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (ซ้าย), ปริมาณอนุภาคขนาดละเอียด (<63 μm) (กลาง) และปริมาณของปรอท (carbonate free basis) (ขวา) ในดินตะกอนอ่าวไทย	58
รูปที่ 20 Hierarchical cluster ของสถานีเก็บตัวอย่างดินตะกอนในอ่าวไทย.....	63
รูปที่ 21 แสดงการจัดกลุ่มของสถานีที่มีความคล้ายคลึงกันโดยใช้วิธีการจัดกลุ่มแบบ Hierarchical cluster analysis ที่ distance cluster combine = 5 (ก) อ่าวไทยตอนบนและ (ข) อ่าวไทยกลางและตอนล่าง.....	65
รูปที่ 22 เปรียบเทียบการกระจายของปรอทในดินตะกอนเชิงพื้นที่ (กลาง) กับแผนที่แหล่งแก๊สและน้ำมัน (ขวา) และท่อส่งแก๊ส (ซ้าย) ในอ่าวไทย	68
รูปที่ 23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของปรอทในดินตะกอน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง) กับดัชนีบ่งชี้ความรุนแรง (Igeo) โดยเส้นประเป็นเส้นที่แบ่งขอบเขตระดับของการปนเปื้อนในดินตะกอน	70
รูปที่ 24 เปรียบเทียบการกระจายของปรอทเชิงพื้นที่ของการศึกษาครั้งนี้ (รูปขวา) กับการศึกษาของ Buakaew (2007) (รูปซ้าย).....	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปรอท (mercury; Hg) เป็นโลหะที่มีความเป็นพิษสูง และเป็นโลหะชนิดเดียวที่อะตอมปรอทในรูป elemental mercury หรือ Hg^0 ซึ่งระเหยเป็นไอได้ที่ความดันบรรยากาศ ดังนั้นปรอทจึงปนเปื้อนเข้าสู่บรรยากาศได้ง่าย แหล่งกำเนิดของปรอทที่ปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อม มีทั้งจากกระบวนการทางธรรมชาติและจากการกระทำของมนุษย์ ปรอทในบรรยากาศมีทั้งที่อยู่ในรูป Hg^0 ซึ่งเป็นไอโลหะ บางส่วนอยู่ในรูป Hg^{2+} ซึ่งเป็นแคตไอออน (cation) และบางส่วนก็จะรวมอยู่กับอนุภาคในบรรยากาศ (Schroeder et al., 1991) ปรอทในบรรยากาศตกลงสู่พื้นดินและแหล่งน้ำได้ทั้งในรูปอนุภาค และถูกชะลงมากับหยาดน้ำฟ้า (Lindquist et al., 1991)

ปรอทที่ปนเปื้อนเข้าสู่ตัวกลางสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นอากาศ ดิน หรือแหล่งน้ำท้ายที่สุดจะไปสะสมอยู่กับดินตะกอน (sediment) เนื่องจากปรอทเป็นโลหะที่มีสมบัติในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ และยังดูดซับกับอนุภาคแขวนลอย แมงกานีสออกไซด์ (manganese oxides; MnO_x) ไอรอนไฮดรอกไซด์ (iron hydrous oxides; FeO_x) หรือลิแกนด์ (ligands) ตัวอื่นๆ ได้ดี ดังนั้นในกระบวนการสร้างตะกอน (coagulation) และการรวมตะกอน (flocculation) ที่เกิดขึ้นบริเวณเอสทูรี (บริเวณที่น้ำแม่น้ำผสมผสานกับน้ำทะเล ทำให้ความสามารถในการละลายของไอออนของเหล็กและแมงกานีสลดลงอย่างมาก) จึงดึงเอาปรอทตกตะกอนร่วมมาด้วย และสะสมรวมกับดินตะกอนท้องน้ำบริเวณเอสทูรี อย่างไรก็ตามปรอทที่ปนเปื้อนอยู่ในดินตะกอนสามารถกลับเข้ามาปนเปื้อนในมวลน้ำได้ เมื่อสภาวะทางกายภาพเคมี (physico-chemical condition) ของแหล่งน้ำเปลี่ยนแปลง ทำให้สมดุลเคมี ณ รอยต่อระหว่างผิวหน้าตะกอนกับมวลน้ำเหนือผิวตะกอนเปลี่ยนแปลงไปและปลดปล่อยปรอทที่สะสมอยู่ในตะกอนกลับสู่มวลน้ำ (Zwolsman et al., 1996)

การสะสมของปรอทในดินตะกอน อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในหรือใกล้กับ ผิวหน้าของตะกอน สัตว์หน้าดินจึงมีโอกาสที่จะสะสมปรอทเข้าสู่ร่างกาย แม้ระดับความเป็นพิษ อาจจะไม่ส่งผลกระทบต่อเหยื่อกลับ แต่ปรอทที่สะสมในสัตว์หน้าดินและสะสมเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ชั้นการกิน (trophic level) จนในที่สุดไปสะสมในผู้บริโภคชั้นสุดท้าย คือ มนุษย์ ดังนั้นการปนเปื้อน ของปรอทในดินตะกอนจึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพทรัพยากรสัตว์น้ำ เศรษฐกิจ และผู้บริโภค

อ่าวไทยเป็นทะเลอาณาเขต ค่อนข้างปิด เป็นส่วนหนึ่งของทะเลจีนใต้ โอบล้อมด้วย ประเทศไทย มาเลเซีย กัมพูชา และเวียดนาม นอกจากนี้จะมีความสำคัญด้านการประมงและการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ บริเวณชายฝั่งยังมีแนวปะการัง ป่าชายเลน และป่าชายหาด การเพิ่มขึ้นของชุมชนและอุตสาหกรรมในพื้นที่ลุ่มน้ำโดยรอบและในอ่าวไทยเองก่อให้เกิดปรอทปนเปื้อนเข้าสู่อ่าวไทย ซึ่งท้ายที่สุดก็ไปสะสมในดินตะกอน ในช่วง 20-30 ปีที่ผ่านมา รัฐบาลได้ให้สัมปทานปิโตรเลียมในอ่าวไทย และเพิ่มขึ้นอย่างมากในปัจจุบัน ทำให้กลางอ่าวมีแท่นสำรวจ ขุดเจาะ และผลิตแก๊สและน้ำมันปิโตรเลียมหลายร้อยแท่น เป็นที่ทราบกันว่าแหล่งแก๊สธรรมชาติในอ่าวไทยมีปรอทปนเปื้อนในปริมาณสูง จากรายงานการวิเคราะห์ปรอทที่ปนเปื้อนในแก๊สธรรมชาติแต่ละแหล่งผลิตที่ทำการตรวจวัด (แหล่งเอราวัณ, แหล่งบงกฏ, แหล่งทานตะวัน, แหล่งไพลิน) ในปี พ.ศ. 2543 และ 2544 พบว่ามีค่าเฉลี่ย 1.63-40.0 และ 3.65-15.18 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ (สำนักนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2545)

ในบทความเรื่อง Mercury Facts: Natural Gas Sector as a Significant Source of Global Mercury Supply and Emissions (NRDC, 2011) กล่าวว่า ในแก๊สธรรมชาติและน้ำมันทั่วโลก มีปรอทปนเปื้อนอยู่ตั้งแต่ระดับต่ำ คือ 0.01 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จนสูงถึง 5,000 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในบางพื้นที่ นอกจากนี้ ในบทความเรื่อง Mercury in SE Asia Produced Fluids - Holistic Approach to Managing Offshore Impacts (Wilhelm et al., 2008) ระบุว่าแหล่งแก๊สธรรมชาติและน้ำมันในเอเชีย มักมีปรอทปนเปื้อนสูงกว่าพื้นที่อื่นของโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอ่าวไทย นอกฝั่งเนเธอร์แลนด์ และยุโรปตะวันออก มีปรอทปนเปื้อนสูง นานกว่า 20 ปีแล้วที่ทราบกันว่าน้ำจากกระบวนการผลิต (produced water) ที่เกิดขึ้นจากการผลิตแก๊สธรรมชาติและน้ำมันในอ่าวไทยมีปรอทปนเปื้อนอยู่สูงถึงประมาณ 30-800 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์

เมตร (สถาบันวิจัยทรัพยากรทางน้ำ, 2541) แม้ว่าปัจจุบันจะใช้เทคโนโลยีกำจัด อนุภาคผลิต และอัด
 พรอทกลับลงสู่หลุมที่เลิกผลิตแล้วก็ตาม แต่การปนเปื้อนของพรอทก็ยังสามารถเกิดขึ้นได้

การวิเคราะห์พรอทในน้ำทะเลซึ่งมีระดับความเข้มข้นเพียงประมาณ 1-2 นาโนกรัมต่อ
 ลิตร มีความยุ่งยาก ต้องการผู้เก็บตัวอย่างและผู้วิเคราะห์ ที่ได้รับการฝึกฝน นอกจากนี้ ในการ
 วิเคราะห์ยังมีค่าใช้จ่ายที่สูง ทั้งในเรื่องภาชนะที่ใช้เก็บตัวอย่างที่ต้องเป็น Teflon[®] ต้องเก็บโดย
 clean-hand technique และต้องทำการ pre-concentration ไอพรอทด้วยวิธี gold
 amalgamation ก่อนส่งเข้าเครื่องตรวจวัด นอกจากนี้ การวิเคราะห์การปนเปื้อนของพรอท
 ครอบคลุมทั้งอ่าวไทยมีน้อยมากส่วนใหญ่เป็นการวิเคราะห์โดยรอบแทนจุดเจาะโดยบริษัทผู้รับ
 สัมปทาน ซึ่งเป็นไปตามกฎหมายกำหนด เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการออกเก็บตัวอย่างแต่ละครั้งสูงมาก
 ดังนั้นการติดตามการปนเปื้อนของพรอทในน้ำทะเลจึงไม่ใช่วิธีการที่จะสามารถทำได้ถึง ยิ่งไปกว่านั้น
 การเก็บตัวอย่างน้ำเป็นการติดตามแบบเฉพาะครั้งเฉพาะคราว (snap-shot) หากการปนเปื้อนไม่ได้
 เป็นไปอย่างต่อเนื่อง การเก็บตัวอย่างแค่เพียงครั้งเดียวนั้น ไม่สามารถเป็นตัวแทนของช่วงเวลาได้
 จากสมบัติของดินตะกอน โดยเฉพาะดินตะกอนที่มีอนุภาคละเอียด จะมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้
 สารอินทรีย์สะสมได้มาก ซึ่งพรอทจะสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ นอกจากนี้ ดินตะกอน
 ละเอียดมีแร่ดินเหนียว (clay minerals) เป็นองค์ประกอบอยู่สูง จึงดูดซับพรอทไว้กับอนุภาค
 แฉวนลอย ดังนั้นดินตะกอนจึงเป็นแหล่งสะสมของพรอทที่ปนเปื้อนเข้ามาในสิ่งแวดล้อม การ
 วิเคราะห์พรอทในดินตะกอนจึงสามารถบ่งชี้สถานการณ์การปนเปื้อนได้ดีกว่าการวิเคราะห์พรอทใน
 น้ำเพียงครั้งเดียว

ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการหาปริมาณพรอทในดินตะกอนบริเวณอ่าว
 ไทย เพื่อประเมินการสะสมของพรอท อีกทั้งการศึกษาพรอทในดินตะกอนโดยบริษัทที่ได้รับสัมปทาน
 จุดเจาะในอ่าวไทย มักจะทำรอบแทนจุดเจาะ แม้ว่าจะพบว่าการกระจายของพรอทในดินตะกอนจะ
 ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อห่างแทนจุดเจาะปิโตรเลียมออกมา แต่กระแสน้ำที่พื้นทะเลอาจพาให้ดิน
 ตะกอนที่มีพรอทปนเปื้อนให้เคลื่อนที่ห่างจากแหล่งกำเนิดอย่างช้าๆ และเจือจางออกไป

รายงานประจำปี พ.ศ. 2554 ของกรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ ระบุว่าอ่าวไทยมีสัมปทานใน
 การสำรวจและผลิตปิโตรเลียม 29 สัมปทาน 36 แปลงสำรวจ มีพื้นที่แปลงสำรวจและผลิตรวมทั้งสิ้น
 104,690 ตารางกิโลเมตร (กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ, 2554) เนื่องจากกิจกรรมด้านปิโตรเลียมในอ่าว

ไทยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงมีความจำเป็นที่จะต้องติดตามและตรวจสอบข้อมูลอย่างต่อเนื่อง และเทียบกับข้อมูลพื้นฐาน (baseline data) แต่เนื่องจากขนาดของพื้นที่อ่าวไทย ทำให้การศึกษาการปนเปื้อนของปรอทในเชิงพื้นที่ครอบคลุมทั้งอ่าวไทยเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเป็นไปได้ยาก เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการเก็บตัวอย่างที่สูงมาก ดังนั้นส่วนใหญ่จึงเป็นการติดตามคุณภาพสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ที่ได้สัมปทาน ซึ่งข้อมูลที่ได้ก็จะเป็นข้อมูลที่ใกล้กับแท่นปิโตรเลียมเท่านั้น ที่ผ่านมการศึกษาปรอทในดินตะกอนระดับผิวหน้า ซึ่งครอบคลุมทั่วทั้งอ่าวไทย เคยมีการศึกษาเพียงครั้งเดียว จากตัวอย่างดินตะกอนที่เก็บในปี พ.ศ. 2546 จำนวน 90 ตัวอย่าง (Buakaew, 2007) การที่กิจกรรมปิโตรเลียมในอ่าวไทยเพิ่มขึ้นอย่างมากในระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมา จึงมีคำถามว่าข้อมูลชุดที่มีอยู่ ยังสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานของดินตะกอนอ่าวไทยได้หรือไม่

ในการศึกษาครั้งนี้ นอกจากจะเป็นการศึกษาปรอทในดินตะกอนทั้งอ่าวเป็นครั้งที่ 2 ในรอบ 10 ปี ยังเป็นครั้งแรกที่มีความถี่เชิงพื้นที่ในการเก็บตัวอย่างจากอ่าวไทยสูงที่สุดเท่าที่เคยมีมา จึงครอบคลุมพื้นที่อ่าวไทยมากกว่าการศึกษาที่ผ่านมา ผลการศึกษาจึงสามารถประเมินการปนเปื้อน ณ ปัจจุบัน และใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานของปรอทในดินตะกอนผิวหน้าของอ่าวไทย

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาปริมาณและการกระจายของปรอทเพื่อประเมินระดับการปนเปื้อนในดินตะกอนผิวหน้าของอ่าวไทย รวมทั้งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปรอทกับคาร์บอนอินทรีย์และขนาดอนุภาคดินตะกอน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

เก็บตัวอย่างดินตะกอนผิวหน้าครอบคลุมพื้นที่น่านน้ำไทยทั้งหมดของอ่าวไทย ระหว่างเส้นรุ้ง (latitude) 06°12' N และ 13°30' N และเส้นแวง (longitude) 99°10' E และ 102°45' E ภายใต้โครงการวิจัยร่วมไทย-จีน (PMBC-FIO-CU) เรื่อง ความอ่อนไหวของพื้นที่ชายฝั่ง (Vulnerability of Coastal Zones) โดยพื้นที่เก็บตัวอย่างมีความลึกที่สุดประมาณ 80 เมตร มีความลึกเฉลี่ยอยู่ที่ 55 เมตร

การกำหนดจุดเก็บตัวอย่าง อ่าวไทยตอนบนเก็บตัวอย่างตามแนว transect line จากปากแม่น้ำเจ้าพระยามาถึงกึ่งกลางอ่าวไทยตอนบน ระยะห่างแต่ละสถานีตามแนว transect line ประมาณ 6 กิโลเมตร และอ่าวไทยตอนกลางและตอนล่าง กำหนดจุดเก็บตัวอย่างด้วยระบบกริด (systematic grid sampling) ระยะห่างแต่ละสถานีประมาณ 30 กิโลเมตร รวมจุดเก็บตัวอย่างทั้งสิ้น 174 สถานี

- อ่าวไทยตอนบน 30 สถานี เก็บตัวอย่าง ระหว่าง 23-25 สิงหาคม 2553
- อ่าวไทยตอนกลาง 54 สถานี เก็บตัวอย่าง ระหว่าง 7-30 พฤศจิกายน 2554
- อ่าวไทยตอนล่าง 90 สถานี เก็บตัวอย่าง ระหว่าง 20 พฤษภาคม ถึง 3 มิถุนายน 2555

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษาครั้งนี้ เป็นการสอบถามข้อมูลชุดแรก และเพิ่มเติมข้อมูลทั้งในเชิงพื้นที่และเวลา และการผนวกข้อมูลทั้งสองชุดด้วยกัน จะสามารถนำมาเป็น baseline value/baseline pattern ของปรอทในดินตะกอนอ่าวไทย สำหรับใช้ในการบริหารจัดการ และสร้างมาตรการป้องกัน และแก้ไขปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นจากกิจกรรมต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับปิโตรเลียมในอ่าวไทย

บทที่ 2

สำรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันปัญหาการปนเปื้อนของมลพิษได้เพิ่มมากขึ้น มลพิษบางประเภทเป็นมลพิษที่คงทนไม่เสื่อมสลาย เช่น โลหะหนัก ปรอท (mercury; Hg) เป็นโลหะหนักที่มีความเป็นพิษสูง ดังกรณีของอ่าวมินามาตะ ในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากบริษัทชิโซะ (ฐานการผลิตอยู่ที่เมืองมินามาตะ) ปล่อยน้ำเสียที่มีปรอทปนเปื้อนลงในอ่าว ในช่วง ค.ศ. 1932-1968 โดยตั้งแต่ปี ค.ศ. 1932 บริษัทมีการผลิตสารเคมีที่ชื่อว่า “acetaldehyde” ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติก ยา และน้ำหอม ในการผลิต acetaldehyde นั้นมีการใช้ปรอทในกระบวนการผลิต บริษัทชิโซะทิ้งน้ำเสียลงในอ่าวมินามาตะโดยตรง ต่อมาในปี ค.ศ. 1959 พบการปนเปื้อนของปรอทในดินตะกอนบริเวณที่ปล่อยน้ำทิ้งของโรงงานสูงถึง 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และค่อยๆ ลดลงเป็น 12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อมีระยะทางที่ไกลออกไปจากจุดกำเนิด นอกจากนี้ยังพบการสะสมปรอทในแพลงก์ตอน หอยสองฝา และปลา ซึ่งมีค่าประมาณ 5, 10–39 และ 10–55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ ซึ่งปรอทที่พบปนเปื้อนในปลานั้นเป็นประเภทเมทิลเมอร์คิวรี (methyl mercury) ซึ่งมีความเป็นพิษสูง (Clark, 1992) หลังจากนั้นเริ่มพบว่ามีโรคเกี่ยวกับระบบประสาทส่วนกลาง ทำให้เสียการควบคุมเกี่ยวกับการเคลื่อนไหวของแขน ขา การพูด และยังทำให้ระบบประสาทรับรู้สึกเสียไป หลังจากบริโภครูปปลาและหอยที่มีการปนเปื้อนปรอท (Ministry of the Environment of Japan and, 2013)

สำหรับประเทศไทย การปนเปื้อนของปรอทในทะเลและพื้นที่ชายฝั่ง มีแหล่งที่มาจากทั้งกิจกรรมบนแผ่นดิน และกิจกรรมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติในอ่าวไทย (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) ปรอทที่มาจากกิจกรรมบนแผ่นดินเหล่านี้ จะถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ และออกสู่ทะเล แต่ส่วนใหญ่จะถูกกักเก็บและหมุนเวียนระหว่างมวลน้ำและดินตะกอนตรงบริเวณปากแม่น้ำ ไม่ได้ถูกส่งออกสู่ทะเลทั้งหมด เนื่องจากปรอทเป็นโลหะที่มีสมบัติในการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ และยังดูดซับกับอนุภาคแขวนลอย แมงกานีสออกไซด์ ไอรอนไฮดรอกไซด์ หรือลิแกนด์ ตัวอื่นๆ (Elder, 1988) ดังนั้นในกระบวนการสร้างตะกอนและการรวมตะกอน ที่เกิดขึ้นบริเวณเอสทูรี จะดึงเอาปรอทตกตะกอนร่วมมาด้วย และสะสมเป็นดินตะกอนท้องน้ำบริเวณเอสทูรี

บริเวณรอยต่อระหว่างแม่น้ำและทะเลที่เรียกว่า เอสทูรีหรือเขตน้ำกร่อย เป็นพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะทางกายภาพเคมีมาก ณ บริเวณนี้โลหะหนักที่ปนเปื้อนมากับมวลน้ำจะถูกกำจัดออกไปสะสมอยู่กับดินตะกอน บางส่วนที่เหลือก็จะถูกพาออกสู่ทะเล (Chester, 1993; Jickells and Rae, 1997; Stumm and Morgan, 1996) การที่ดินตะกอนเป็นแหล่งรองรับและสะสมโลหะหนักที่ปนเปื้อนเข้าสู่แหล่งน้ำ ทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีอยู่ในดินตะกอนสูงกว่าในมวลน้ำถึง 3-5 เท่า (Bryan and Langston, 1992) อย่างไรก็ตาม โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในดินตะกอนอาจจะกลายเป็นแหล่งกำเนิดของมลพิษที่ปนเปื้อนกลับเข้าสู่มวลน้ำได้ เมื่อสมดุลเคมี ณ รอยต่อระหว่างดินตะกอนผิวน้ำ กับมวลน้ำเหนือผิวดินตะกอนเปลี่ยนแปลงไป การตรวจวัดปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนจึงใช้เป็นดัชนีบ่งชี้การปนเปื้อนของโลหะหนักในช่วงเวลาที่ผ่านไป รวมทั้งคาดการณ์ผลกระทบที่อาจจะเกิดจากการปนเปื้อนของโลหะหนักได้ (Guy et al., 1978)

2.1 ปรอทและความเป็นพิษต่อมนุษย์

ปรอทเป็นโลหะชนิดเดียวที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ มีสีขาวคล้ายเงินจึงมีชื่อเรียกว่า “Liquid Silver” หรือ “Quick Silver” เป็นธาตุลำดับที่ 80 ในตารางธาตุ มีมวลอะตอม 200.59 มีจุดเดือด 356.9 องศาเซลเซียส และมีจุดหลอมเหลว -38.9 องศาเซลเซียส ดังนั้นปรอทจึงมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นเท่ากับ 13.546 กรัมต่อมิลลิลิตร ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 13.545 และค่าความดันไอเท่ากับ 0.16 Pa (0.0012 มิลลิเมตรปรอท) ปรอทสะท้อนแสงได้ดี เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จากค่าความดันไอของไอปรอทที่ต่ำมาก ปรอทจึงระเหยได้ที่อุณหภูมิห้อง ปรอทมีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายที่เป็นน้ำต่ำ (Emsley, 2011)

ปรอทเป็นโลหะที่พบอยู่ตามธรรมชาติ มีอยู่หลายรูปแบบ (ตารางที่ 1) อาจอยู่ในรูปของแร่อิสระ (elemental mercury) หรือในรูปของเมอร์คิวไรต์ (mercury sulfide; HgS) ปะปนอยู่ในเนื้อหินประเภทต่างๆ เช่น หินปูนหรือหินทราย หรืออาจปะปนออกมากับแก๊สภูเขาไฟและระเหยจากมหาสมุทร เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วปรอทจำแนกออกได้เป็นหลายรูปแบบ คือ ในรูปของโลหะ (metallic form) ในรูปของสารประกอบอนินทรีย์ (inorganic mercury compounds) และในรูปของสารประกอบอินทรีย์ (organic mercury compounds) ปรอทที่อยู่ในรูปของโลหะจะเป็นธาตุบริสุทธิ์ไม่ผสมกับสารอื่น ส่วนที่อยู่ในรูปของสารประกอบอนินทรีย์ ได้แก่ เมอร์คิวรัสคลอไรด์

(mercurous chloride (calomel); Hg_2Cl_2) และเมอร์คิวริกคลอไรด์ (mercuric chloride; HgCl_2) และปรอทในรูปของสารประกอบอินทรีย์ คือ อนุพันธ์ alkyl, alkoxy และ aryl ของปรอท (สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2528)

ตารางที่ 1 ชนิดของปรอทในสิ่งแวดล้อม

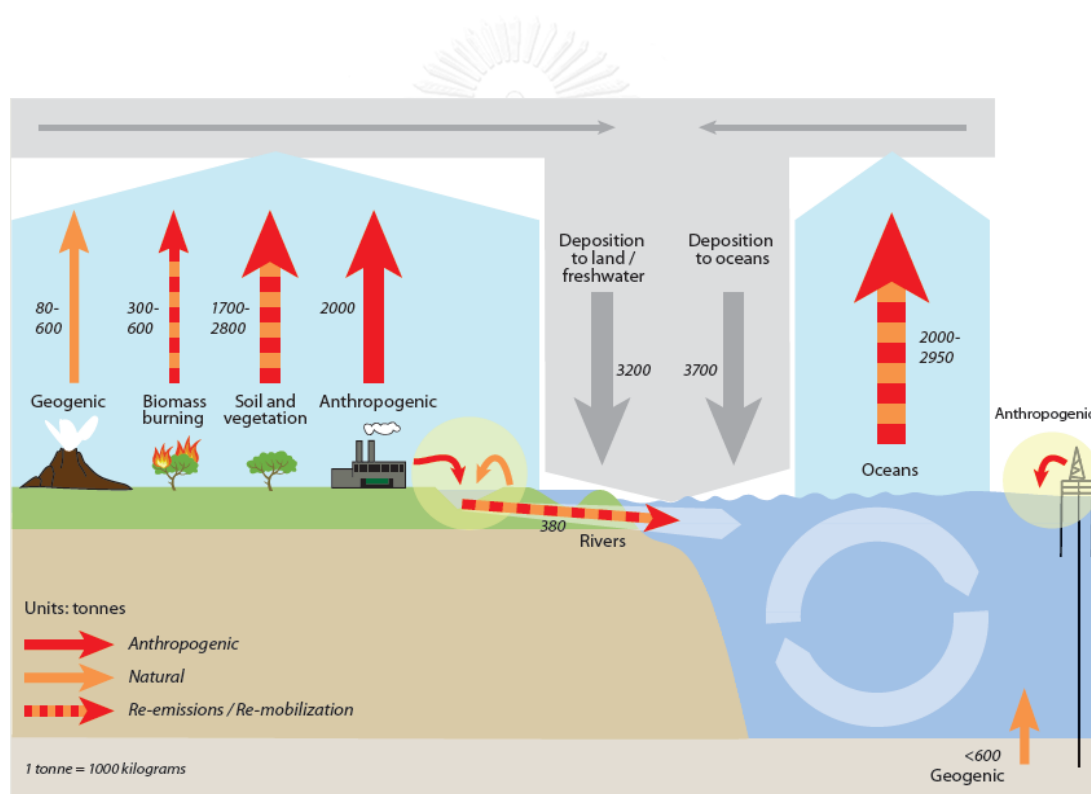
ชนิดของปรอท	ชื่อวิทยาศาสตร์	สูตรเคมี
Elemental mercury	Mercury	Hg^0
Inorganic mercury species	Mercuric ion	Hg^{2+}
	Mercurous ion	Hg^+
	Mercury sulfide	HgS
Organic mercury species	Methylmercury	CH_3Hg^+
	Ethylmercury	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Hg}^+$
	Phenylmercury	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}^+$
	Dimethylmercury	$(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$

ที่มา: (Morita et al., 1998)

ความเป็นพิษของปรอทขึ้นอยู่กับเส้นทางที่พิษเข้าสู่ร่างกาย (เช่น ทางผิวหนัง ระบบหายใจ หรือระบบย่อยอาหาร) ปริมาณที่ได้รับเข้าสู่ร่างกาย และชนิดของปรอท (ปรอทอินทรีย์จะมีความเป็นพิษมากที่สุด) พิษจากปรอทมีทั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง พิษเฉียบพลันมักเกิดจากอุบัติเหตุโดยการกลืนกินสารปรอทเข้าสู่ร่างกาย หากได้รับปรอทเข้าสู่ร่างกายเพียงประมาณ 0.02 กรัม อาจทำให้ตายได้ สำหรับพิษเรื้อรัง ปรอทที่สะสมในร่างกายจะทำอันตรายต่อระบบประสาทส่วนกลาง ได้แก่ สมองและไขสันหลัง ทำให้เสียการควบคุมเกี่ยวกับการเคลื่อนไหวของแขน ขา การพูด และยังทำให้ระบบประสาทรับความรู้สึกเสียไป (เช่น การได้ยิน การมองเห็น) (จิราภรณ์ อ่ำพันธ์, 2543)

2.2 การปนเปื้อนและการเปลี่ยนรูปแบบทางเคมีของปรอท

ปรอทเข้าสู่สิ่งแวดล้อมโดยกระบวนการทางธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ กระบวนการธรรมชาติที่นำปรอทเข้าสู่สิ่งแวดล้อมมีหลายรูปแบบ (รูปที่ 1) เช่น การผุพังของหินต้นกำเนิด การระเบิดของภูเขาไฟ เป็นต้น ส่วนการปนเปื้อนของปรอทที่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ มีทั้งโดยตรงและทางอ้อม ซึ่งส่งผลให้ปริมาณปรอทสูงขึ้น ทั้งในอากาศ ดิน และน้ำ นอกจากนี้ปรอทยังมีการถ่ายเท ส่งผ่าน และสะสมระหว่างตัวกลางสิ่งแวดล้อม เช่น จากอากาศสู่ดิน และจากดินสู่แหล่งน้ำ เป็นต้น (Pacyna and Munch, 1991) ปรอทที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมจะถ่ายทอดและสะสมเพิ่มขึ้นในสิ่งมีชีวิตตามลำดับขั้นของการบริโภคในห่วงโซ่อาหาร (Hudson et al., 1994)



ที่มา: (UNEP, 2013)

รูปที่ 1 แหล่งกำเนิด (sources) และเส้นทาง (pathways) ของปรอทในสิ่งแวดล้อม

กิจกรรมของมนุษย์ที่เป็นแหล่งกำเนิดหลักของปรอท ได้แก่ โรงงานโซดาไฟ น้ำเสียจากอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการต่างๆ การเผาขยะและของเสีย การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล (เช่น ถ่านหินและน้ำมันปิโตรเลียม) โรงถลุงโลหะ เหมืองสินแร่ที่มีปรอทปนเปื้อน (Mitra, 1986)

การใช้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีสารปรอทผสม เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ ถ่านไฟฉาย เทอร์โมมิเตอร์ อุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สีบางชนิด วัสดุอุดฟัน ยาฆ่าเชื้อรา สารเคมี เป็นต้น (US-EPA, 1997)

แหล่งกำเนิดของปรอท ส่วนใหญ่จะมาจากการระเหยหรือจากการเผาไหม้ และปลดปล่อยสู่บรรยากาศ (รูปที่ 1) ปรอทที่อยู่ในบรรยากาศส่วนใหญ่อยู่ในรูป Hg^0 ซึ่งเป็นไอปรอท มีบางส่วนที่อยู่ในรูปของ Hg^{2+} ซึ่งเป็นแคตไอออน (cation) และบางส่วนจะรวมอยู่กับอนุภาค ปรอทในรูป Hg^0 จะถูกออกซิไดซ์โดยโอโซนในสภาวะที่มีน้ำกลายเป็นไอออนของปรอท นอกจากนี้ปรอทในรูปของ Hg^0 สามารถทำปฏิกิริยากับสารออกซิเดนต์ (oxidant) อื่นๆ ในบรรยากาศ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และคลอรีน เป็นต้น (Schroeder et al., 1991)

2.2.1 แหล่งกำเนิดของปรอทที่มาจากบรรยากาศ

ปรอทที่ปนเปื้อนของในแหล่งน้ำ ส่วนใหญ่มักจะมีแหล่งกำเนิดที่ชัดเจน แต่ในบางพื้นที่ แม้ไม่มีการระบายสิ่งปนเปื้อนปรอทลงสู่แม่น้ำ ทะเลสาบ หรือปากแม่น้ำโดยตรง แต่อาจจะพบการสะสมของปรอท ซึ่งมีแหล่งกำเนิดมาจากบรรยากาศ (Lindquist et al., 1991) กระแสลมในบรรยากาศจะพัดพาไอปรอทไปได้ไกลจากแหล่งกำเนิด ส่วนปรอทในรูปแคตไอออนและอนุภาค ส่วนใหญ่จะตกสะสมไม่ไกลจากแหล่งกำเนิดนัก ดังนั้นการปนเปื้อนของปรอทในบางพื้นที่ อาจไม่ได้มาจากแหล่งกำเนิดที่อยู่ใกล้เสมอไป

ปรอทในบรรยากาศตกลงสู่พื้นดินและแหล่งน้ำได้ด้วย 2 กระบวนการหลัก คือ การตกสะสมแบบแห้ง (dry deposition) และการตกสะสมแบบเปียก (wet deposition) การตกสะสมแบบแห้ง ได้แก่ ปรอทที่เกาะอยู่กับอนุภาคเขม่า จะตกลงสู่พื้นโลกได้ด้วยแรงโน้มถ่วง ขณะที่การตกสะสมแบบเปียก ปรอทจะถูกชะลงมารวมกับหยาดน้ำฟ้า เช่น ฝน หิมะ หรือลูกเห็บ ปรอทในรูป Hg^0 ซึ่งเป็นไอปรอท อาจถูกกระแสลมพาไปได้ไกลจากแหล่งกำเนิด อย่างไรก็ตามในสภาวะที่มีน้ำ Hg^0 ยังถูกออกซิไดซ์ได้โดยโอโซน (ozone; O_3) กลายเป็นไอออนของปรอท ซึ่งในที่สุดจะถูกชะมากับหยาดน้ำฟ้าในบรรยากาศและตกลงสู่พื้นโลก (Lindquist et al., 1991)

ปรอทจากบรรยากาศที่ตกสะสมในดิน โดยเฉพาะในชั้นดินระดับผิว จะถูกน้ำชะล้างพาเข้าสู่แหล่งน้ำได้ง่าย และในที่สุดจะไปสะสมรวมอยู่กับตะกอนในแหล่งน้ำนั้น ปริมาณปรอทที่ลงสู่แหล่งน้ำ (ทะเลสาบหรือปากแม่น้ำ) จะสัมพันธ์กับปริมาณน้ำท่า อัตราการไหล และระยะเวลาที่เก็บ

ของน้ำ จากการวิจัย พบว่าน้ำทำเป็นตัวการหลักในการพาปรอทไปสะสมอยู่ในทะเลสาบหรือปากแม่น้ำ แต่ที่มาจากบรรยากาศโดยตรงจะมีสัดส่วนน้อยกว่ามาก (Aastrup et al., 1991; Johansson et al., 1991; Lindquist et al., 1991; Meili, 1991b) แต่ในน้ำแล้งหรือไม่มีแหล่งน้ำผิวดิน การสะสมปรอทโดยตรงจากบรรยากาศจะกลายเป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญ (Meili, 1991b)

2.2.2 แหล่งกำเนิดของปรอทที่มาจากดิน

การปนเปื้อนของปรอทในดินมักจะอยู่ในรูปสารประกอบร่วมกับสารอื่นในดิน กลายเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ (Schuster, 1991) เมื่อมีการเปิดหน้าดินเพื่อการเกษตรกรรม การพัฒนาที่ดินเพื่ออยู่อาศัย การทำเหมือง การทำถนน ฯลฯ จะทำให้สารประกอบปรอทที่อยู่ในดินเปลี่ยนรูปแบบทางเคมี เนื่องจากการเปิดหน้าดินทำให้ปรอทถูกชะกร่อนและถูกออกซิไดซ์ง่าย ส่งผลให้ปรอทเปลี่ยนรูปแบบทางเคมีมาอยู่ในรูปแบบที่ละลายน้ำได้มากขึ้น และเคลื่อนย้ายจากดินเข้าสู่แหล่งน้ำ (Blake, 1980)

ปรอทที่สะสมอยู่ในดินมีอยู่หลายรูปแบบ ได้แก่ (ก) สารประกอบที่ละลายน้ำ เช่น เมอร์คิวรีคลอไรด์ (mercury chloride); (ข) ดูดซับอยู่บนพื้นผิวของสารอื่น เช่น แร่ดินเหนียว (clay minerals); (ค) เกิดพันธะเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ เช่น ฟัลวิกแอซิด (fulvic acids); (ง) เป็นสารประกอบในตะกอน เช่น ในรูปซัลไฟด์ (sulfide), คาร์บอเนต (carbonate) และไฮดรอกไซด์ (hydroxide); และ (จ) ปรอทอินทรีย์ เช่น เมทิลเมอร์คิวรี (methyl mercury)

รูปแบบทางเคมีของปรอทที่แตกต่างกัน จะมีความเป็นพิษแตกต่างกันไป รูปแบบทางเคมีนี้เปลี่ยนแปลงไปมาได้โดยกระบวนการทางชีวธรณีเคมี (biogeochemical processes) นอกจากนี้แล้วการสะสมของปรอทในดินยังขึ้นอยู่กับลักษณะของกายภาพของเนื้อดิน เนื่องจากดินประกอบไปด้วยทั้งอนินทรีย์สารและอินทรีย์สาร อนินทรีย์สารหรือเนื้อดินเป็นส่วนประกอบหลักประกอบด้วยอนุภาคขนาดทราย (sand) ทรายแป้ง (silt) และดินเหนียว (clay) ส่วนที่เป็นอินทรีย์สารประกอบด้วยซากสิ่งมีชีวิตทั้งที่ยังไม่ย่อยสลายและที่ย่อยสลายแล้ว ส่วนที่ย่อยสลายแล้วก็คือฮิวมัส ซึ่งประกอบด้วย สารฮิวมิก (humic substances) และส่วนที่ไม่ใช่สารฮิวมิก ได้แก่ ไนโตรเจน คาร์โบไฮเดรต สารฮิวมิกเป็นอินทรีย์สารที่เกิดจากการย่อยสลายเศษซากพืชและซากสัตว์ที่ทับถมบนดินจนโมเลกุลเล็กลงและกลับมาโพลีเมอไรซ์ (polymerise) กันจนเป็นโมเลกุลสายยาวที่ซับซ้อน สารฮิวมิกนั้นเป็นตัวสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการจับโลหะหนักในดิน สารฮิวมิกมีอยู่ 3 ชนิด คือ กรดฮิว

มิก (humic acid) กรดฟัลวิก (fulvic acid) และฮิวมิน (humic) ซึ่งจำแนกความแตกต่างจากจำนวนหมู่ฟังก์ชันนอล (functional group) ขนาดโมเลกุล และสมบัติการละลาย (รูปที่ 2) กรดฟัลวิกมีน้ำหนักโมเลกุลและเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนในโมเลกุล น้อยกว่ากรดฮิวมิก แต่จะมีออกซิเจนในเปอร์เซ็นต์ที่สูงกว่า (Stevenson, 1982)

ทั้งกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก มีหมู่ฟังก์ชันนอลของคาร์บอกซิล (carboxyl) ฟีนอลิก (phenolic) และคาร์บอนิล (carbonyl) จึงทำให้มีสมบัติในการจับหรือแลกเปลี่ยนไอออนโลหะหนักได้ดี โปรทที่ลงสู่ดินจึงถูกตรึงโดยอินทรีย์สารในดิน (Aastrup et al., 1991) เมื่อน้ำไหลหลากมาชะล้างผิวดิน ก็จะละลายอินทรีย์สารที่มีโปรทตรึงอยู่ และพัดพาให้ละลายไปตามน้ำ อินทรีย์สารที่ไปกับน้ำนี้จะไหลลงสู่ลำน้ำ และในที่สุดจะไปสะสมอยู่กับดินตะกอนในแหล่งน้ำ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรทที่ลงสู่แหล่งน้ำ จึงขึ้นกับความสามารถของพื้นที่ในการกักเก็บอินทรีย์สารพวกกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิกให้อยู่ในดินได้ดีเพียงใด ทั้งยังขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำท่า และลักษณะทางกายภาพของดินในพื้นที่นั้นๆ (Meili et al., 1991; Mierle and Ingram, 1991) (Meili et al., 1991) ถึงแม้โดยทั่วไปเนื้อดินจะดูดซับโปรทได้ระดับหนึ่ง แต่ดินที่มีอินทรีย์สารสูงจะปลดปล่อยโปรทง่ายกว่าดินที่มีอินทรีย์สารสูง (Engstrom et al., 1994)

Humic substances (pigmented polymers)				
Fulvic acid		Humic acid		Humin
Light yellow	Yellow brown	Dark brown	Grey-black	Black
<p>————— increase in intensity of colour —————></p> <p>————— increase in degree of polymerization —————></p> <p>2 000 ————— increase in molecular weight —————> 300 000 ?</p> <p>45% ————— increase in carbon content —————> 62%</p> <p>48% ————— decrease in oxygen content —————> 30%</p> <p>1 400 ————— decrease in exchange acidity —————> 500</p> <p>————— decrease in degree of solubility —————></p>				
Chemical properties of humic substances. (Stevenson 1982)				

ที่มา: (Stevenson, 1982)

รูปที่ 2 คุณสมบัติของสารฮิวมิก (humic substances) ชนิดต่างๆ

2.2.3 การเปลี่ยนรูปแบบทางเคมีของปรอทและการสะสมในสัตว์น้ำ

ปรอทอินทรีย์ในน้ำทะเลอาจเปลี่ยนรูปไปเป็นโมโนเมทิลเมอร์คิวรี (monomethylmercury; CH_3Hg^+ หรือ MMHg) ที่มีพิษมากกว่าได้ โดยกระบวนการเมทิลเลชัน (methylation) ขณะเดียวกัน แสงอาทิตย์จะเปลี่ยนรูป MMHg ไปเป็นตัวที่มีพิษน้อยกว่า โดยกระบวนการเคมีเชิงแสง (photochemical reaction) หาก MMHg สร้างพันธะกับคลอไรด์ในน้ำทะเล ก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปโดยกระบวนการเคมีเชิงแสง ทำให้ MMHg คงรูปอยู่ในน้ำทะเลได้นานขึ้น อย่างไรก็ตาม คาร์บอนอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (dissolved organic carbon; DOC) ที่มีอยู่ในน้ำทะเล จะเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยทำลายพันธะในโมเลกุลของ MMHg (Zhang and Hsu-Kim, 2010) เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ชนกับโมเลกุลของน้ำจะทำให้เกิดรีแอกทีฟออกซิเจน (reactive oxygen) ที่มีพลังงานสูง ได้แก่ อนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ (superoxide radical; $\cdot\text{O}_2^-$) จากโมเลกุลของน้ำ (Sompongchaiyakul, 1999) ซึ่ง $\cdot\text{O}_2^-$ ที่มีพลังงานสูงนี้จะไปทำลายพันธะของสารอินทรีย์กับปรอท ดังนั้นหาก MMHg สร้างพันธะกับ DOC แทนที่จะเป็นคลอไรด์ กระบวนการแตกทำลาย MMHg ก็เกิดขึ้นง่าย ในทะเลเปิดพบว่าปรอทที่ละลายในน้ำลึกจะอยู่ในรูป elemental mercury (Hg^0) ไดเมทิลเมอร์คิวรี (dimethylmercury; $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ หรือ DMHg) และ MMHg ซึ่งรูปที่เป็น MMHg จะอยู่ในปริมาณน้อยกว่า Hg^0 และ DMHg ในน้ำทะเลระดับผิวหน้าจะพบ DMHg น้อยมาก อาจจะมีเนื่องจาก MMHg ส่วนหนึ่งจะถูกสลายโดยแสงอาทิตย์ ได้ Hg^0 ซึ่งจะระเหยออกสู่บรรยากาศ (R. P. Mason and Fitzgerald, 1996; R.P. Mason and Fitzgerald, 1997)

แม้ว่าปรอทจะไม่ถูกทำลายหรือหายไปจากระบบ แต่รูปแบบทางเคมีของปรอทในน้ำทะเลจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นรูปแบบที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำไปใช้ได้ (non-bioavailable) หรือเป็นรูปแบบที่ไม่ละลายน้ำ (non-water soluble) เช่น mercuric sulfide (HgS) และ mercuric oxide (HgO) ดังนั้น ปรอทจึงถูกตรึงและกำจัดออกจากน้ำทะเลไปสะสมในดินตะกอน อย่างไรก็ตาม ปรอทที่สะสมในดินตะกอนอาจจะถูกรบกวนให้กลับออกสู่มวลน้ำได้อีก (UNEP, 2002) ทั้งนี้ ระยะเวลาพำนัก (residence time) ของปรอทในมหาสมุทรอยู่ที่ 3,200 ปี ขณะที่ระยะเวลาพำนักเฉลี่ยของปรอทในดินตะกอนในมหาสมุทรมีเวลานานมากกว่า 250 ล้านปี (NRC, 1979)

ปรอทเมื่ออยู่ในดินตะกอนจะมีระยะเวลาพำนักที่นาน จึงมีเวลามากพอที่จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบทางเคมีโดยจุลินทรีย์ในดินตะกอน โดยเฉพาะเมื่อสร้างพันธะอยู่กับอินทรีย์สาร ซึ่งเป็นทั้งตัวพาปรอทและเป็นแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ (Meili, 1991a) กระบวนการเปลี่ยนรูปแบบทางเคมีที่สำคัญที่เกิดขึ้นและเพิ่มความเข้มข้นของปรอท คือ การเกิดปรอทอินทรีย์ โดยกระบวนการเมทิลเลชัน สารอินทรีย์ในดินตะกอนมีส่วนช่วยในการเกิดกระบวนการนี้โดยเป็นตัวปลดปล่อยกลุ่มเมทิล (methyl group) ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับปรอท กระบวนการเมทิลเลชันเกิดจากแบคทีเรียพวกที่ใช้ซัลเฟต (sulfate reducing bacteria) และเปลี่ยนรูปปรอทอนินทรีย์ไปเป็น MMHg กระบวนการย้อนกลับที่เรียกว่าดีเมทิลเลชัน (demethylation) ก็เกิดขึ้นเช่นกัน สำหรับในดินตะกอนอัตราการเกิดเมทิลเลชันและดีเมทิลเลชันขึ้นกับสภาวะทางกายภาพเคมีและสมบัติทางเคมีของน้ำเหนือดินตะกอนหรือน้ำระหว่างตะกอน ได้แก่ พีเอช ออกซิเจน อินทรีย์คาร์บอน และปริมาณซัลเฟต (Hudson et al., 1994)

สิ่งมีชีวิตที่อาศัยในบริเวณที่มีปรอทปนเปื้อน จะสะสมปรอทจากน้ำ ดินตะกอน และอาหารที่กินเข้าไป เนื่องจากการหายใจของสัตว์น้ำจำเป็นต้องให้น้ำผ่านเหงือกเพื่อแลกเปลี่ยนออกซิเจน สัตว์น้ำจะรับปรอทจากน้ำเข้าไปสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อได้โดยตรง เมื่อสัตว์ใหญ่กินสิ่งมีชีวิตเล็ก ปรอทก็จะถ่ายทอดเข้าสู่สัตว์น้ำนั้นได้ เรียกกระบวนการนี้ว่าไบโอแอคคิวมูเลชัน (bioaccumulation) และจะถ่ายทอดเป็นทอดๆ ตามระดับชั้นการกิน (trophic level) ที่สูงขึ้น ดังนั้น ปรอทพิษจะสะสมในตัวสัตว์มากขึ้นตามลำดับห่วงโซ่อาหาร กระบวนการนี้ เรียกว่า ไบโอมกนิฟิเคชัน (biomagnification) กระบวนการนี้มีบทบาทสำคัญในการส่งผ่านปรอทจากสิ่งแวดล้อมสู่มนุษย์ (Hudson et al., 1994)

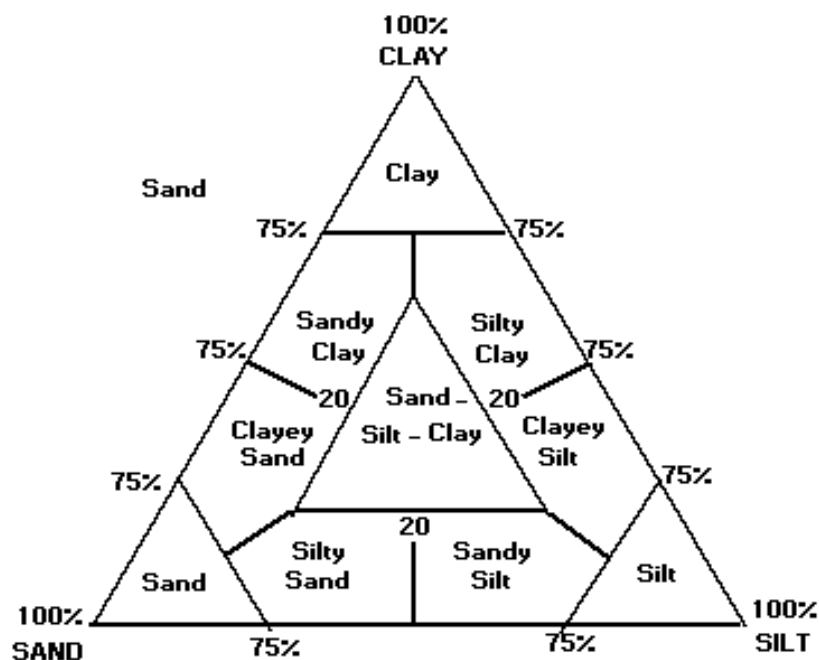
ปรอทที่สะสมในเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป MMHg โดยปรอทที่สะสมในเนื้อเยื่อปลาที่จับในอ่าวไทยอยู่ในรูป MMHg ซึ่งเป็นปรอทอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษสูง (Windom and Cranmer, 1998) การที่ MMHg สะสมมากขึ้นในสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในระดับชั้นการกินที่สูงขึ้น เนื่องจาก MMHg ซึ่งได้จากกระบวนการโดยจุลินทรีย์ (microbial processes) จะสร้างพันธะที่เสถียร (stable bond) กับหมู่ซัลไฮดริล (sulfhydryl groups) ในสิ่งมีชีวิต ส่งผลให้ปรอทในรูปนี้คงอยู่ในร่างกายสิ่งมีชีวิตได้นานกว่าปรอทในรูปอนินทรีย์ ดังนั้น สิ่งมีชีวิตที่อยู่ในระดับชั้นการกินที่สูงขึ้นในห่วงโซ่อาหาร ก็จะมีสัดส่วนของ MMHg ต่อปรอททั้งหมดที่มีในสิ่งมีชีวิตสูงขึ้นด้วย (Windom

andCranmer, 1998) นอกจากนี้การสะสมปรอทของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำนั้น ยังสัมพันธ์กับอุณหภูมิด้วย เมื่อแหล่งน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น จะเร่งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และเร่งกระบวนการเมทิลเลชัน ทำให้เกิด MMHg มากขึ้น และยิ่งเร่งปฏิกิริยารีดอกซ์ทำให้เกิดเมอร์คิวริกไอออน (mercuric (II) ion; Hg^{2+}) ซึ่ง Hg^{2+} นี้จะถูกดึงเข้าสู่ร่างกายสิ่งมีชีวิตได้ง่าย (U.S. Department of the Interior, 1987)

2.3 ดินตะกอน

ดินตะกอน (sediment) หมายถึง สสารจากแผ่นดินที่ถูกน้ำกัดกร่อนจนแตกสลายเป็นอนุภาคเล็กๆ รวมตัวกับสารอินทรีย์และแร่ธาตุต่างๆ ที่ถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ ตลอดจนอนุภาคต่างๆ ที่เกิดขึ้นในแหล่งน้ำเอง เช่น แพลงก์ตอน และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ดินตะกอนที่ตกสะสมอยู่บริเวณพื้นที่ตื้นน้ำมีความสำคัญทั้งในดานนิเวศวิทยาและสิ่งแวดล้อม เป็นทั้งที่อยู่อาศัยและแหล่งอาหารของสัตว์หน้าดิน คุณลักษณะของดินตะกอนบ่งชี้ถึงความเสื่อมโทรม และการปนเปื้อนของมลสารทั้งประเภทอินทรีย์และอนินทรีย์ได้ดีกว่าการใช้คุณภาพน้ำ เนื่องจากตะกอนเป็นแหล่งกักเก็บมลสารในลำดับท้ายสุด และคุณลักษณะของดินตะกอนท้องน้ำจะผันแปรตามเวลาอันยาวนานกว่าน้ำ อย่างไรก็ตามแม้ว่าดินตะกอนเป็นแหล่งกักเก็บและสะสม แต่ขณะเดียวกันดินตะกอนก็อาจจะเป็นแหล่งกำเนิดของมลสารซึ่งอาจเป็นธาตุอาหารพืชหรือโลหะหนักในแหล่งน้ำได้ (Kim et al., 2003)

ดินตะกอนที่มีองค์ประกอบขนาดต่างๆ จะเรียกชื่อต่างกัน มาตรฐานการเรียกชื่อดินตะกอนตามขนาดมีอยู่หลายแบบ โดยทุกแบบเป็นการกำหนดชื่อโดยใช้สัดส่วนของขนาดอนุภาค ซึ่งจำแนกออกเป็น 3 กลุ่ม คือ ทราย (sand > 63 ไมครอน), ทรายแป้ง (silt 2-63 ไมครอน) และดินเหนียว (clay < 2 ไมครอน) ในตะกอนแหล่งน้ำ นิยมใช้ไดอะแกรมสามเหลี่ยมหรือไตรแองกูล่าไดอะแกรม (triangular diagrams) และเรียกชื่อดินตะกอนตาม (Shepard, 1954) เมื่อพล็อตสัดส่วนการกระจายของอนุภาคดินตะกอนขนาดต่างๆ ลงในไดอะแกรมสามเหลี่ยมในรูปที่ 3 แล้ว ตกลงที่ตำแหน่งใดในไดอะแกรม ก็ให้เรียกชื่อดินตะกอนตามที่ระบุไว้ในไดอะแกรม ซึ่งชื่อที่เรียกจะบ่งบอกลักษณะของเนื้อดินตะกอน



รูปที่ 3 ไดอะแกรมสามเหลี่ยมหรือไตรแองกูลาร์ไดอะแกรม (triangle diagram) ที่ใช้เรียกชื่อเนื้อดินตะกอน (sediment texture) ตามสัดส่วนปริมาณอนุภาคขนาดทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ตาม (Shepard, 1954)

การสะสมโลหะในดินตะกอนขึ้นกับคุณลักษณะและสมบัติของดินตะกอน องค์ประกอบของขนาด และแร่ธาตุในดินตะกอน เช่น ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน และปริมาณของสารอินทรีย์ เป็นต้น (Buccolieri et al., 2006; Macleod et al., 1999) โลหะที่อยู่ในดินตะกอนแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่อยู่ในโครงสร้างของดินตะกอน ซึ่งมีมาตั้งแต่ต้นกำเนิด เรียกว่า “lattice-held metals” อีกส่วนหนึ่งเป็นโลหะที่เข้ามาสะสมภายหลังเมื่อดินตะกอนเข้าสู่สิ่งแวดล้อม และมีการขนส่งมายังแหล่งสะสม เรียกว่า “non-lattice held metals” โลหะส่วนนี้จะยึดเกาะกับสารอินทรีย์ หรือดูดซับกับดินตะกอนที่มีขนาดอนุภาคละเอียด ได้แก่ อนุภาคขนาดดินเหนียวและขนาดทรายแป้ง เนื่องจากดินตะกอนอนุภาคละเอียดจะมีโครงสร้างเป็นอลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) หรือที่เรียกว่า แร่ดินเหนียว โครงสร้างดังกล่าวมีช่องว่าง ทำให้มีพื้นที่ผิวมาก อีกทั้งยังมีประจุลบ ทำให้สามารถสร้างพันธะกับสารอินทรีย์และโลหะได้มาก ขณะที่องค์ประกอบแร่ของอนุภาคขนาดใหญ่จะเป็นซิลิเกต (silicate) หรือที่เรียกว่า ควอร์ตซ (quartz) ซึ่งเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี ประกอบกับอนุภาคขนาดใหญ่มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาน้อย นอกจากนี้โลหะยังถูกดูดซับอยู่บน

ผิวอนุภาคเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (manganese and iron oxyhydroxide) ทั้งที่มีอยู่ในอนุภาคดินตะกอนที่แยกตัวออกจากมวลน้ำและตกตะกอนลงมา (Sompongchaiyakul, 1989)

2.4 พื้นที่ศึกษา

2.4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของอ่าวไทย

อ่าวไทยเป็นทะเลมีลักษณะที่กึ่งปิด (semi-enclosed sea) ด้านตะวันออกล้อมรอบด้วยชายฝั่งของประเทศเวียดนาม กัมพูชา และไทย ด้านเหนือและด้านตะวันตก โอบล้อมด้วยที่ราบภาคกลางและแนวชายฝั่งภาคใต้ของประเทศไทย อ่าวไทยติดต่อกับทะเลจีนใต้ผ่านทางช่องเปิดหรือปากอ่าวระหว่างปลายแหลมคาเมา (camao) ประเทศเวียดนาม และเมืองโกตาบารู (Kota Bharu) ประเทศมาเลเซีย การไหลเวียนของน้ำในอ่าวเกิดจากอิทธิพลของลมเป็นหลัก โดยลมและกระแสน้ำทำให้น้ำท่าผสมผสานกับน้ำทะเล เกิดเป็นชั้นแอกมาน (Ekman layer) หนา 30–50 เมตร ลอยเหนือน้ำทะเลที่มีความเค็มมากกว่า (อนุกุล บุรณะประทีปรัตน์, 2551)

ช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (พฤษภาคม ถึง กันยายน) ลมจะพัดพาน้ำชั้นบนออกไปจากอ่าวไทย ทำให้ระดับน้ำทะเลทั่วทั้งอ่าวต่ำลง เกิดน้ำผุด (upwelling) ของน้ำชั้นล่างในบางพื้นที่ทางชายฝั่งอ่าวไทยฝั่งตะวันตก และด้านในสุดของอ่าวไทยตอนล่าง กระแสน้ำแยกตัวออกจากกันทำให้เกิด น้ำผุด บริเวณกลางอ่าวเช่นกัน น้ำจากทะเลจีนใต้ไหลเข้าอ่าวไทยทางฝั่งตะวันออกของปากอ่าวไทยทุกระดับความลึก โดยน้ำไหลเข้ามาได้ระยะทางหนึ่งแล้ววนออกทะเลจีนใต้ ทางฝั่งตะวันตกของปากอ่าวเป็นลักษณะน้ำไหลแบบทวนเข็มนาฬิกา และมีน้ำไหลเป็นวงแบบตามเข็มนาฬิกาที่ด้านในสุดของอ่าวไทยตอนล่าง ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้เป็นการเปลี่ยนถ่ายน้ำชั้นล่างของอ่าวไทยจากการเกิดน้ำผุด และการได้รับน้ำใหม่จากทะเลจีนใต้ทางฝั่งตะวันออกของปากอ่าวไทย (อนุกุล บุรณะประทีปรัตน์, 2551)

ช่วงเปลี่ยนฤดูมรสุมในเดือนตุลาคม สถานการณ์ยังคงคล้ายกับช่วงฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ความเร็วลดลงทำให้ขบวนการน้ำผุดลดน้อยลง น้ำชั้นบนมีการไหลเวียนแบบทวนเข็มนาฬิกาทั้งอ่าว ในขณะที่น้ำระดับล่างลงไปยังมีการไหลเวียนเป็นวงแบบตามเข็มนาฬิกาที่ด้านในของอ่าวไทย ช่วงฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (พฤศจิกายน ถึง กุมภาพันธ์) มีน้ำจากทะเลจีนใต้พัดเข้าสู่อ่าวไทยรวมทั้งน้ำท่าจากแม่น้ำโขงด้วย หากน้ำท่าออกมาล่าช้ากว่าปกติ มวลน้ำที่ลมหัดเข้ามาทำให้ระดับน้ำ

ในอ่าวเพิ่มสูงขึ้น เกิดน้ำทะเลหนุนที่ปากแม่น้ำที่กั้นอ่าวไทยตอนบน การเกิดน้ำผุดจะลดน้อยลง ช่วงเปลี่ยนฤดูมรสุมในเดือนมีนาคม ถึง เมษายน สถานการณ์ยังคงคล้ายกับลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ความเร็วลมลดลงทำให้ระดับน้ำทะเลลดลง (ปราโมทย์ ไชยศิริกร et al., 2546)

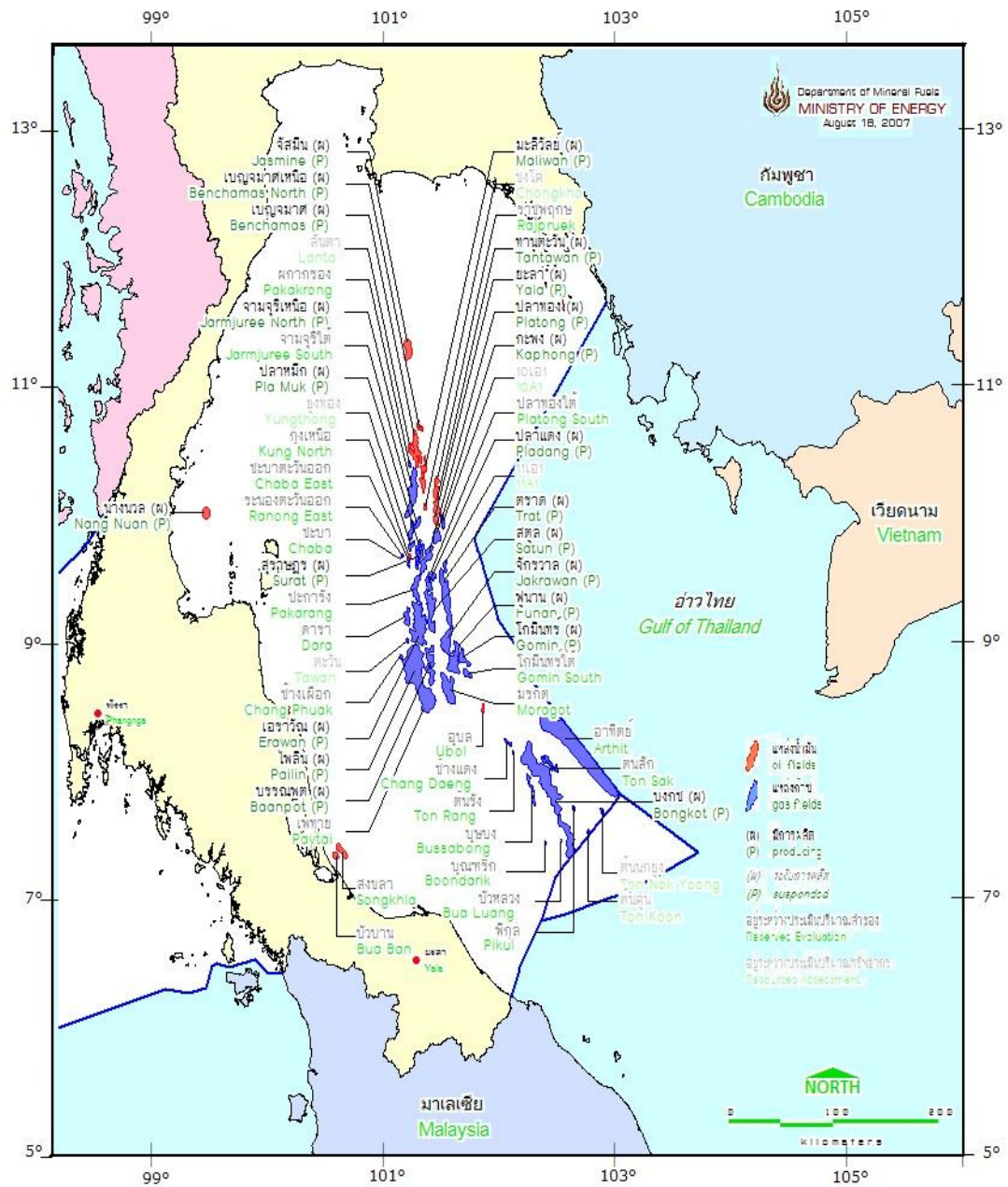
2.4.2 การสำรวจและขุดเจาะแก๊สและปิโตรเลียมในอ่าวไทย

การสำรวจปิโตรเลียมในอ่าวไทยเริ่มมีขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2511 ภายใต้เงื่อนไขพิเศษตามพระราชบัญญัติแร่ พ.ศ. 2510 ต่อมาเมื่อประกาศใช้พระราชบัญญัติปิโตรเลียม พ.ศ. 2514 จึงได้อินสิทธิมาสำรวจภายใต้กฎหมายปิโตรเลียม พื้นที่ทะเลอ่าวไทยมีความลาดชันน้อย โดยค่อยๆ ลาดเอียงลงมาทางฝั่งตะวันออกและตะวันตก จนถึงจุดลึกสุดตรงกลางอ่าว ความลึกประมาณ 83 เมตรจากระดับทะเลปานกลาง (mean sea level) ก่อนเปิดออกสู่ทะเลจีนใต้ อ่าวไทยถูกขนาบด้วยชายฝั่งของประเทศต่างๆ จึงมีพื้นที่ทับซ้อนกันหลายประเทศ คือ พื้นที่ทับซ้อนไทย-กัมพูชา พื้นที่ทับซ้อนไทย-เวียดนาม และพื้นที่ทับซ้อนไทย-มาเลเซีย (กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ, 2555)

กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ รายงานว่าในอ่าวไทยมีสัมปทานปิโตรเลียมอยู่ 29 สัมปทาน 36 แปลงสำรวจ พื้นที่ 104,690 ตารางกิโลเมตร (กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ, 2554) ดังรูปที่ 4 ส่วนรูปที่ 5 และรูปที่ 6 แสดงแหล่งแก๊สธรรมชาติและปิโตรเลียมในอ่าวไทย และแนวท่อส่งแก๊สธรรมชาติในอ่าวไทย ตามลำดับ



รูปที่ 4 แปลงสัมปทานปิโตรเลียมในอ่าวไทย (กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ, 2554)



รูปที่ 5 แหล่งแก๊สธรรมชาติและปิโตรเลียมในอ่าวไทย (กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ, 2554)



รูปที่ 6 แนวท่อส่งแก๊สธรรมชาติในอ่าวไทย (สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2546)

2.5 ปริมาณของปรอทในน้ำและดินตะกอนในประเทศไทยและต่างประเทศ

2.5.1 ความเข้มข้นปรอทที่ปนเปื้อนในน้ำทะเลอ่าวไทย

รายงานการสำรวจและวิเคราะห์การปนเปื้อนปรอทในน้ำของอ่าวไทยครั้งแรกเกิดขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2517 ผลการวิเคราะห์ปรอทในน้ำชายฝั่งในอดีตมีค่าความเข้มข้นสูงกว่าค่าที่ได้ในปัจจุบันมาก โดยเฉพาะช่วง พ.ศ. 2522–2529 โดย รัชนิกร บำรุงราชหิรัณย์, วรรณภา จำราช และชันธังพงศ์ จริงจิต (2527) รายงานความเข้มข้นปรอทสูงสุดในบริเวณปากแม่น้ำบางปะกงถึงบางพระในปี พ.ศ. 2524 เท่ากับ 386 ไมโครกรัมต่อลิตร และ อำไพ อธิธิเกษม และคณะ (2524) รายงานความเข้มข้นปรอทในน้ำทะเลอ่าวไทยตอนบนในปี พ.ศ. 2522 เท่ากับ 342 ไมโครกรัมต่อลิตร (อำไพ อธิธิเกษม et al., 2524) ต่อมาในปี พ.ศ. 2526–2529 วรรณภา จำราช (2530) รายงานความเข้มข้นปรอทในน้ำทะเลอ่าวไทยที่ 203 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งการที่พบปรอทปนเปื้อนในน้ำสูงในอดีตนั้น อาจมาจากความผิดพลาดของวิธีวิเคราะห์ การตรวจวัด และการเก็บตัวอย่างได้ (W. Thongra-ar and Parkpian, 2002) เนื่องจาก วิไลวรรณ อุทุมพุกษ์พร และคณะ (วิไลวรรณ อุทุมพุกษ์พร et al., 2530) พิสูจน์ให้เห็นว่าหากใช้เทคนิคสะอาดซึ่งพัฒนาขึ้นเพื่อป้องกันการปนเปื้อนในการโลหะหนักในน้ำทะเล (ซึ่งมีปริมาณที่น้อยมาก) ตั้งแต่ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างจนกระทั่งถึงการวิเคราะห์ ค่าความเข้มข้นของโลหะในน้ำทะเลที่วิเคราะห์ได้ ลดลงมากเกือบ 500 เท่า เมื่อเทียบกับค่าที่เคยมีรายงานในช่วงปี พ.ศ. 2522–2528 ปัจจุบันประเทศไทยเผชิญกับการปนเปื้อนปรอทที่เพิ่มมากขึ้นในพื้นที่ชายฝั่ง ซึ่งเกิดการอุตสาหกรรมต่างๆ อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของกิจกรรมการสำรวจและขุดเจาะแก๊สและปิโตรเลียมในอ่าวไทย Chongprasith and Wilairatanadilok (1999) รายงานค่าความเข้มข้นปรอทในโครงการการเฝ้าติดตามปรอทปนเปื้อนในน้ำตลอดแนวชายฝั่งของกรมควบคุมมลพิษตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540–2541 จากตัวอย่างน้ำทั้งสิ้น 218 สถานี ซึ่งรวมพื้นที่อุตสาหกรรม เช่น มาบตาพุดและแหลมฉบัง ซึ่งเป็นบริเวณที่พบความเข้มข้นปรอทสูงกว่าพื้นที่ศึกษาอื่น สำหรับผลการศึกษาในครั้งนั้นพบค่าปรอทอยู่ในช่วง <math><0.01 - 0.54</math> ไมโครกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ยที่ 0.032 ไมโครกรัมต่อลิตร ส่วนค่าความเข้มข้นปรอทในน้ำทะเลอ่าวไทยตอนบนและบริเวณรอบแท่นขุดเจาะแก๊สและปิโตรเลียมในอ่าวในช่วงปี พ.ศ. 2538–2541 มีค่าปรอทอยู่ในช่วง <math><0.01 - 0.51</math> ไมโครกรัมต่อลิตร โดยค่าสูงสุดพบในปี พ.ศ. 2538 ซึ่งอาจเกิดการปนเปื้อนจากน้ำจากกระบวนการผลิตแก๊สและปิโตรเลียม (produced water) จากการศึกษาของ EVS Environment Consultants (1999) ในพื้นที่อ่าวไทยและนิคมอุตสาหกรรมทางฝั่งตะวันออกพบว่าค่าปรอทในน้ำทะเลบริเวณดังกล่าวมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งซึ่งกรมควบคุมมลพิษกำหนดไว้ที่ 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 27, 2550)

เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล และ ปรีชา เสนสิทธิ์ (2556) (ข้อมูลยังไม่ตีพิมพ์) ตรวจวัดปรอทที่ปนเปื้อนในน้ำทะเลที่เก็บตัวอย่างจาก 45 สถานี ในอ่าวไทย ระหว่าง มีนาคม ถึง เมษายน พ.ศ. 2556 ผลการศึกษาพบว่าปรอทในน้ำทะเลระดับผิวและระดับเหนือดินตะกอน มีค่าอยู่ในช่วง 0.0002 – 0.033 และ 0.0001 – 0.048 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และมีค่ากลางอยู่ที่ 0.002 และ 0.021 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีบางสถานีกลางอ่าวและนอกชายฝั่งทะเลตะวันออกที่มีค่าความเข้มข้นปรอทสูงมาก จากข้อมูลส่วนใหญ่ น้ำทะเลอ่าวไทยน่าจะมีค่าพื้นฐานของปรอทอยู่ในระดับที่ไม่เกิน 0.002 ไมโครกรัมต่อลิตร แม้ว่าค่าสูงสุดที่ตรวจวัดได้ในการศึกษาครั้งนั้น คือ 0.048 ไมโครกรัมต่อลิตรก็ยังไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลของไทย ค่าความเข้มข้นของปรอทในน้ำทะเลที่กล่าวไปข้างต้นได้สรุปไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของปรอทรวมในน้ำทะเล

ช่วงเวลาที่ตรวจวัด (พ.ศ.)	พื้นที่ศึกษา	ปริมาณปรอทในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร)	อ้างอิง
2518–2519	อ่าวไทยตอนบน	0.01 – 0.11	(1)
2520	อ่าวไทยตอนบน	0.02 – 2.00	(1)
2518–2519	อ่าวไทยตอนบน	0.47*	(2)
2522	อ่าวไทยตอนบน	1.54 – 12.0	(3)
2524	อ่าวไทยตอนบน	ND – 1.58	(4)
2525	อ่าวไทยตอนบน	ND – 0.40	(5)
2521	อ่าวไทยตอนบน	0.01 – 0.29	
2522	อ่าวไทยตอนบน	0.27 – 342	
2523	อ่าวไทยตอนบน	0.20 – 1.00	
2524	อ่าวไทยตอนบน	0.25 – 4.25	
2526–2529	อ่าวไทยตอนบน	0.20 – 203	(6)
2538–2541	อ่าวไทย (รอบแท่นขุดเจาะและอ่าวไทยตอนบน)	<0.01 – 0.51 (0.046*)	(7)
2541	อ่าวไทยตอนบน	ND – 3.00	(8)
2556	อ่าวไทยระดับผิวน้ำ	0.0002 – 0.033	(9)
	อ่าวไทยระดับเหนือดินตะกอน	0.0001 – 0.048	
2517	ปากแม่น้ำบางพระ	0.015 – 0.019	(10)
2519	ปากแม่น้ำเจ้าพระยา	0.22 ± 0.28*	(11)
2521–2522	ปากแม่น้ำ - แม่กลอง	0.12 – 10.10	(3)
	- ท่าจีน	0.12 – 6.40	
	- เจ้าพระยา	0.94 – 8.20	
	- บางปะกง	0.55 – 12.96	
2523	ปากแม่น้ำ - แม่กลอง	0.03*	(12)
	- ท่าจีน	0.25*	
	- เจ้าพระยา	0.74*	
	- บางปะกง	0.30*	

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ช่วงเวลาที่ตรวจวัด (พ.ศ.)	พื้นที่ศึกษา	ปริมาณปรอทในน้ำ (ไมโครกรัมต่อลิตร)	อ้างอิง
2524	ปากแม่น้ำบางปะกงถึงบางพระ	ND – 386	(4)
2517–2524	ปากแม่น้ำบางปะกง	4.60*	(13)
	อ่างศิลา	6.50*	
	บางแสน	16.30*	
	บางพระ	2.10*	
	ศรีราชา	1.30 ± 6.20*	
	พัทยา	0.35 ± 0.54*	
2522–2523	ปากแม่น้ำ - บางปะกง	0.10 – 1.22	(14)
	- แม่งลอง	0.08 – 1.25	
	- ท่าจีน	0.10 – 0.50	
	- เพชรบุรี	0.08 – 0.88	
	- ปรามบุรี	0.08 – 0.82	
2535–2536	แม่น้ำบางปะกง	0.10 – 0.12	(15)
2526–2527	ชายฝั่งตะวันออกของอ่าวไทยตอนบน	ND – 85	(4)
2530–2533	พื้นที่เพาะเลี้ยง		(16)
	- ปากแม่น้ำบางปะกงถึงอ่างศิลา	<0.2 – 0.6	
	- จันทบุรีถึงตราด	<0.2 – 0.5	
2533	อ่าวบ้านเพ ระยอง	0.0006 – 0.0024	(17)
2535–2536	พื้นที่เพาะเลี้ยง ปากแม่น้ำบางปะกงถึงอ่างศิลา	ND – 0.48	(18)
2535	ชายฝั่งจังหวัดตราด	0.0006 – 0.0448	(19)
2536	ชายฝั่งจังหวัดจันทบุรีถึงตราด	0.02*	(20)
2537	ชายฝั่งจังหวัดจันทบุรีถึงตราด	ND – 0.09	(21)
2538	ชายฝั่งจังหวัดจันทบุรีถึงตราด	<0.001 – 0.10	(22)
มิ.ย. 2540–ก.ค. 2541	ชายฝั่งอ่าวไทยและทะเลอันดามัน	<0.01 – 0.54	(7)
2520–2524	มาบตาพุด	0.60* ± 0.20	(13)
2535–2536	แหลมฉบัง	ND – 0.26	(18)
	มาบตาพุด	ND – 0.76	
2538–2541	มาบตาพุด	0.01 – 0.48	(7)
2538–2539	แหลมฉบัง	<0.01 – 0.16	
เม.ย. 2541	มาบตาพุด	0.01 – 0.02	(8)
มิ.ย.– ก.ค. 2541	แหลมฉบัง	0.01 – 0.02	
	มาบตาพุด	0.01 – 0.03	

* คือ ค่าเฉลี่ย

ND คือ ไม่สามารถตรวจวัดได้

(1) (อ่ำโพ อธิเกษม, 2521); (2) (ทวีศักดิ์ ปิยะกาญจน์ et al., 2520); (3) (Polprasert et al., 1979); (4) (รัชนิกร บำรุงราชหิรัณย์ et al., 2527); (5) (อ่ำโพ อธิเกษม et al., 2524); (6) (วรรณภา จำราช, 2530); (7) (Chongprasith and Wilairatanadilok, 1999); (8) (EVS Environment Consultants, 1999); (9) (เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล และ ปรีชา เสนสิทธิ์ (2556) (ข้อมูลยังไม่ตีพิมพ์); (10) (P. Menasveta, 1976); (11) (P. Menasveta, 1978); (12) (กรมอนามัย, 2524); (13) (เจริญ วัชรรังษี et al., 2524); (14) (สุธรรม สิทธิชัยเกษม and สุวรรณณี เฉินบำรุง, 2527); (15) (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537); (16) (กรมควบคุมมลพิษ, 2540); (17) (Petpiroon and Abe, 1991); (18) (Institute of Marine Science, 1994); (19) (S. Kan-atireklap, 1994); (20) (Terai et al., 1995); (21) (Suwanagosoom et al., 1998); (22) (S. Kan-atireklap et al., 1998)

2.5.2 ความเข้มข้นปรอทที่ปนเปื้อนในดินตะกอนอ่าวไทย

จากการสำรวจการปนเปื้อนปรอทในดินตะกอน ในอดีตนั้นพบพื้นที่ที่มีความเข้มข้นปรอทสูง (>1,000 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง) บริเวณแม่น้ำเจ้าพระยา ในปี พ.ศ. 2521–2523, 2541 (P. Menasveta and Cheevaparanapiwat, 1981; Polprasert et al., 1979) การศึกษาหลังจากนั้นพบว่าความเข้มข้นปรอทในดินตะกอนลดลงเมื่อเทียบกับการศึกษาครั้งก่อนๆ โดยเฉพาะพื้นที่ใกล้นิคมอุตสาหกรรมทางฝั่งตะวันออกของอ่าวไทย (Chongprasith and Wilairatanadilok, 1999; EVS Environment Consultants, 1999) อย่างไรก็ตาม มีตัวอย่างบางสถานที่ที่ยังคงมีค่าความเข้มข้นปรอทในดินตะกอนเกินค่าขั้นต่ำที่ส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตของปรอทในดินตะกอนที่ถูกเสนอไว้ของประเทศไทย (Effect Range Low (ERL) = 150 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง)

รายงาน “Mercury Assessment in Thailand” (Pollution Control Department, 2001) กล่าวว่าความเข้มข้นปรอทในดินตะกอนนอกฝั่งอ่าวไทยของการเก็บตัวอย่างเมื่อปี พ.ศ. 2539 ถึง 2541 มีค่า 10 – 120 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง นอกจากนี้ จากการศึกษาดินตะกอนในพื้นที่รอบแท่นเอร์ราวัลด์ ซึ่งเป็นแท่นขุดเจาะแก๊สและปิโตรเลียมของบริษัทยูโนแคล ประเทศไทย โดย (Tetra Tech Inc, 1998) เมื่อปี พ.ศ. 2540, 2541 พบความเข้มข้นปรอทในดินตะกอนมีค่าเฉลี่ย $1,404 \times 10^3$ และ 863×10^3 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และพื้นที่ที่ห่างออกไปโดยรอบมีความเข้มข้น 206×10^3 – 292×10^3 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง นอกจากนี้ มีการศึกษาปริมาณปรอทในดินตะกอนอ่าวไทยของ (Buakaew, 2007) จากการเก็บตัวอย่างเมื่อ พ.ศ. 2546 พบว่ามีค่าปริมาณปรอททั้งหมดในดินตะกอนอ่าวไทยตอนบนอยู่ในช่วง $< 2 - 92.4$ เฉลี่ย 33.9 ± 27.4 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ปริมาณปรอทในดินตะกอนอ่าวไทยตอนล่างมีค่าน้อยกว่าอ่าวไทยตอนบน โดยพบอยู่ในช่วง 6.5 – 50.1 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 24.4 ± 9.0 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ค่าความเข้มข้นของปรอทในดินตะกอนที่กล่าวไปข้างต้นได้สรุปไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความเข้มข้นของปรอทรวมในดินตะกอนในอ่าวไทย

ช่วงเวลาการศึกษา (พ.ศ.)	พื้นที่ศึกษา	ปริมาณปรอทในดิน ตะกอน (ไมโครกรัมต่อ กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง)	อ้างอิง
2522	อ่าวไทยตอนบน	49 – 268	(1)
2524	อ่าวไทยตอนบน	ND – 280	(2)
2525	อ่าวไทยตอนบน	10 – 260	(3)
2521	อ่าวไทยตอนบน	100 – 130	
2522	อ่าวไทยตอนบน	0 – 240	
2523	อ่าวไทยตอนบน	0 – 1,200	
2524	อ่าวไทยตอนบน	10 – 1,400	
2538 – 2541	อ่าวไทย (รอบแท่นขุดเจาะและอ่าวไทยตอนบน)	6 – 1,210	(4)
2541	อ่าวไทยตอนบน	50 – 2,800	(5)
2546	อ่าวไทยตอนบน	< 2 – 92.4	(6)
	อ่าวไทยตอนล่าง	6.5 – 50.1	
2517	ปากแม่น้ำบางพระ	3 – 69 (น้ำหนักเปียก)	(7)
2519	ปากแม่น้ำเจ้าพระยา	12 – 264	(8)
2521 – 2522	ปากแม่น้ำ	- แม่กลอง - ท่าจีน - เจ้าพระยา - บางปะกง	(1)
		36 – 885 71 – 746 79 – 1,860 69 – 299	
2523	ปากแม่น้ำ	- แม่กลอง - ท่าจีน - เจ้าพระยา - บางปะกง	(9)
		230 ± 0.1* 670 ± 0.1* 2,800 ± 0.4* 520 ± 0.2*	
2524	ปากแม่น้ำบางปะกงถึงบางพระ	ND – 800	(2)
2522 – 2523	ปากแม่น้ำ	- บางปะกง - แม่กลอง - ท่าจีน - เพชรบุรี - ปรากฏบุรี	(10)
		0 – 38 6 – 46 6 – 38 4 – 15 6 – 38	
2526 – 2527	ชายฝั่งตะวันออกของอ่าวไทยตอนบน	10 – 140	(11)

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ช่วงเวลาการศึกษา (พ.ศ.)	พื้นที่ศึกษา	ปริมาณปรอทในดิน ตะกอน (ไมโครกรัมต่อ กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง)	อ้างอิง
มี.ค.- เม.ย. 2541	ชายฝั่งอ่าวไทยและอันดามัน	47 – 2,135	(4)
มี.ค. 2542	ปากแม่น้ำบางปะกง	120 – 480	(12)
2548	ทะเลสาบสงขลา - ทะเลน้อย	63 – 113	(13)
	- ทะเลสาบตอนใน-กลาง	24 – 49	
	- ทะเลสาบตอนนอก	27 – 63	
2550	อ่าวปากพนัง - ฤดูแล้ง	1 – 55	(14)
	- ฤดูฝน	6 – 37	
	ทะเลสาบตอนใน - ฤดูแล้ง	21 – 140	
	- ฤดูฝน	30 – 111	
	นอกปากทะเลสาบสงขลา - ฤดูแล้ง	8 – 90	
	- ฤดูฝน	5 – 55	
2538 – 2541	มาบตาพุด	5 – 134	(4)
2539 – 2541	แหลมฉบัง	< 5 – 32	
2540 - 2541	อ่างศิลา - ฤดูแล้ง	13.6 – 37.5	(15)
	- ฤดูฝน	4.88 – 13.83	
	ศรีราชา - ฤดูแล้ง	24.4 – 33.9	
	- ฤดูฝน	18.4 – 29.1	
	แหลมฉบัง - ฤดูแล้ง	10.0 – 28.1	
	- ฤดูฝน	13.1 – 20.6	
	พัทลุง - ฤดูแล้ง	12.8 – 33.1	
	- ฤดูฝน	4.9 – 10.6	
	มาบตาพุด - ฤดูแล้ง	10.3 – 23.0	
	- ฤดูฝน	4.8 – 10.8	
เม.ย. 2541	แหลมฉบัง	< 5 – 139	(5)
	มาบตาพุด	< 5 – 37	
มี.ย. – ก.ค. 2541	แหลมฉบัง	24 – 37	(5)
	มาบตาพุด	< 5 – 156	

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ช่วงเวลาการศึกษา (พ.ศ.)	พื้นที่ศึกษา	ปริมาณปรอทในดิน ตะกอน (ไมโครกรัมต่อ กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง)	อ้างอิง
2540	แท่นขุดเจาะเอราวัณ	$1,404 \times 10^3$ *	(16)
2541	แท่นขุดเจาะเอราวัณ	863×10^3 *	(16)

* คือ ค่าเฉลี่ย

ND คือ ไม่สามารถตรวจวัดได้

(1) (Polprasert et al., 1979); (2) (รัชนิกร บำรุงราชหิรัณย์ et al., 2527); (3) (อำไพ อธิธิเกษม et al., 2524); (4) (Chongprasith and Wilairatanadilok, 1999); (5) (EVS Environment Consultants, 1999); (6) (Buakaew, 2007); (7) (P. Menasveta, 1976); (8) (P. Menasveta, 1978); (9) (P. Menasveta and Cheevaparanapiwat, 1981); (10) (สุธรรม สิทธิชัยเกษม and สุวรรณณี เฉินบำรุง, 2527); (11) (รัชนิกร บำรุงราชหิรัณย์ et al., 2530); (12) (W. Thongra-ar, 2001); (13) (Sompongchaiyakul and Sirinawin, 2006); (14) (ธัญชนก จันทร์คง, 2552); (15) (วรวิทย์ ชีวาพร et al., 2542); (16) (Tetra Tech Inc, 1998)

2.5.3 ความเข้มข้นปรอทที่ปนเปื้อนในดินตะกอนในต่างประเทศ

ระดับความเข้มข้นของปรอทที่ปนเปื้อนในดินตะกอนแต่ละพื้นที่นั้นมีความเข้มข้นมากน้อยแตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนกิจกรรมที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อน สภาพพื้นที่ และสภาพแวดล้อมในพื้นที่นั้นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4

2.5.4 เกณฑ์คุณภาพดินตะกอน (Sediment Quality Guidelines) ในแต่ละประเทศ

ระดับของปรอทที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมในแต่ละพื้นที่มีค่าน้อยต่างกัน ขึ้นกับปัจจัยทางธรณีเคมีของแต่ละลุ่มน้ำ รวมถึงแหล่งกำเนิดมลพิษทั้งจากธรรมชาติและจากกิจกรรมของมนุษย์ ดังนั้นการที่จะประเมินในแต่ละพื้นที่ว่ามีการปนเปื้อนของปรอทในดินตะกอน จัดอยู่ในระดับที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตหรือไม่นั้น จำเป็นต้องมีการกำหนดค่ามาตรฐานของแต่ละพื้นที่ซึ่งเป็นเรื่องยาก อย่างไรก็ตามเพื่อให้สามารถดูแลรักษาคุณภาพดินตะกอน จึงมีการกำหนดเกณฑ์คุณภาพของตะกอนดิน ซึ่งแต่ละประเทศก็กำหนดแตกต่างกันไป เพราะขึ้นกับค่าความเข้มข้นพื้นฐาน (background level) ของแต่ละพื้นที่ด้วย ดังตัวอย่างบางประเทศในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ความเข้มข้นของปรอทรวมในดินตะกอนในต่างประเทศ

ช่วงเวลา ที่ศึกษา (ค.ศ.)	พื้นที่ศึกษา	ปริมาณปรอทในดิน ตะกอน (ไม่โครกรั่มต่อ กิโลกรั่ม น้ำหนักแห้ง)	อ้างอิง
Pristine marine environments			
1999	Arctic ocean	50 – 100	(Gobeil et al., 1999)
2000	Greenland	6 – 257	(Asmund andNielsen, 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 andChen, 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)
2001	Gulf of Trieste, Northern Adriatic Sea	$0.1 \times 10^3 - 23 \times 10^3$	(Covelli et al., 2001)
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)

ตารางที่ 5 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

ERL = Effect Range Low

ERM = Effect Range Median

ISQV = Interim Sediment Quality Values

* จากข้อเสนอเกณฑ์ค่ามาตรฐานของปรอทในดินตะกอนของกรมควบคุมมลพิษ (Utoomprukporn, 2006)



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

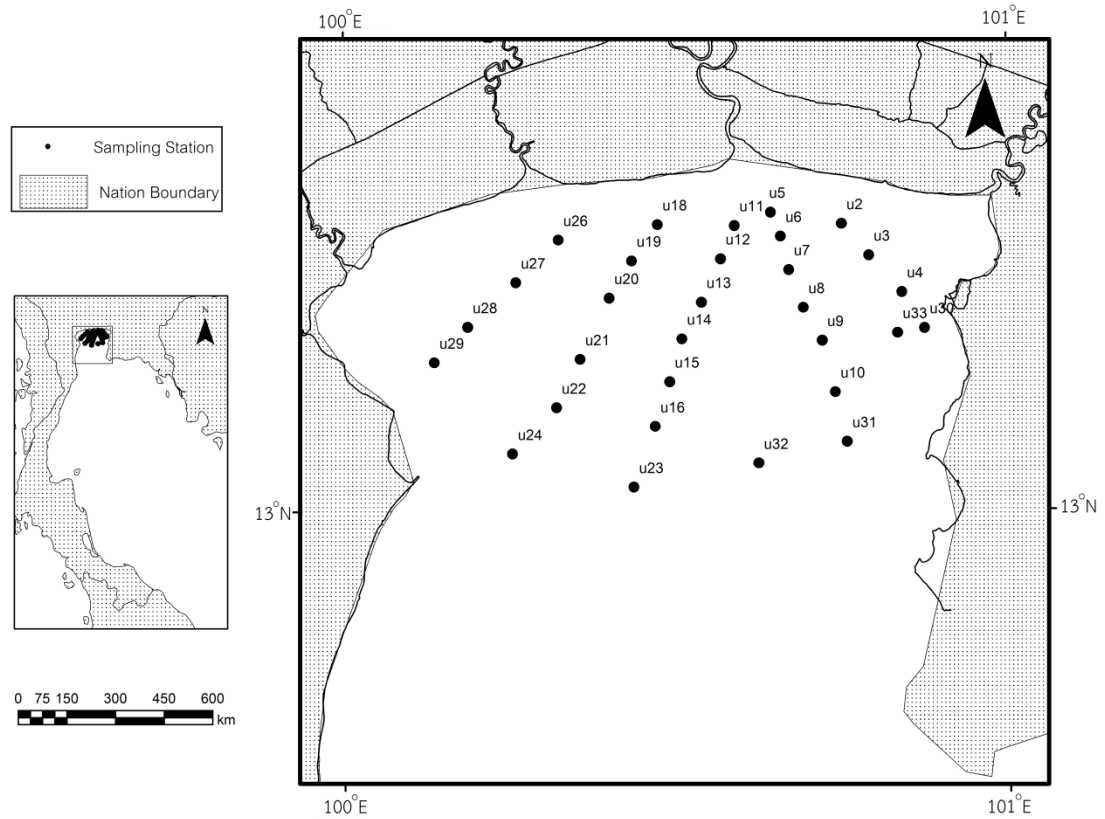
3.1 จุดเก็บตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างดินตะกอนผิวหน้าครอบคลุมพื้นที่น่านน้ำไทยทั้งหมดของอ่าวไทย ระหว่างเส้นรุ้ง 06°12' และ 13°30' เหนือ และเส้นแวง 99°10' และ 102°45' ตะวันออก ภายใต้โครงการวิจัยร่วมไทย-จีน ระหว่างศูนย์วิจัยและพัฒนาทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งทะเลอันดามัน กับ First Institute of Oceanography (FIO) ประเทศจีน และภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในเรื่องความอ่อนไหวของพื้นที่ชายฝั่ง (Vulnerability of Coastal Zones)

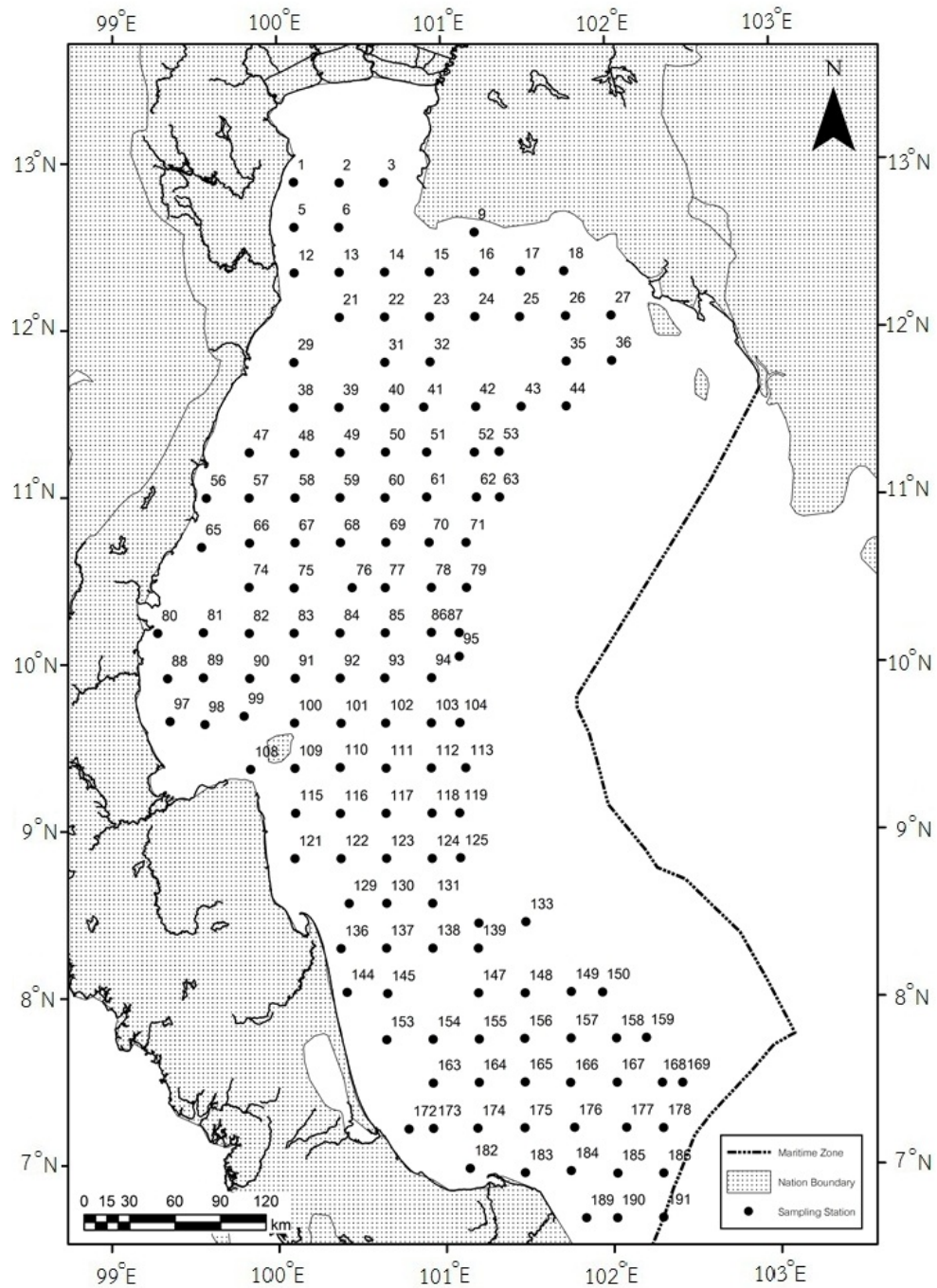
การเก็บตัวอย่างทั้งหมดดำเนินการในการสำรวจ 3 เที้ยวเรือ คือ ครั้งที่ 1 เก็บตัวอย่างสถานี U2 ถึง U33 ในอ่าวไทยตอนบน โดยเรือสำรวจบุญประกอบ จุดเก็บตัวอย่างกำหนดตามแนว transect line จากปากแม่น้ำเจ้าพระยาถึงกึ่งกลางอ่าวไทยตอนบน ระยะห่างจากสถานีตามแนว transect line ประมาณ 6 กม. เมื่อวันที่ 23-25 สิงหาคม 2553 (รูปที่ 7) ในการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 2 และ 3 กำหนดจุดเก็บตัวอย่างด้วยระบบกริด (systematic grid sampling) ขนาด 30 กม. สถานี 1 ถึง 71 และสถานี 78 และ 79 เก็บตัวอย่างโดยเรือสำรวจ SEAFDEC 2 ในการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 2 เมื่อวันที่ 7-30 พฤศจิกายน 2554 ส่วนสถานี 74 ถึง 77 และสถานี 84 ถึง 191 เก็บตัวอย่างโดยเรือสำรวจ SEAFDEC ในการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 3 เมื่อวันที่ 20 พฤษภาคม ถึง 1 มิถุนายน 2555 (รูปที่ 8) ได้ตัวอย่างรวมทั้งสิ้น 174 ตัวอย่าง พิกัดตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างแสดงในภาคผนวก ก

3.2 วิธีการเก็บตัวอย่างดินตะกอน

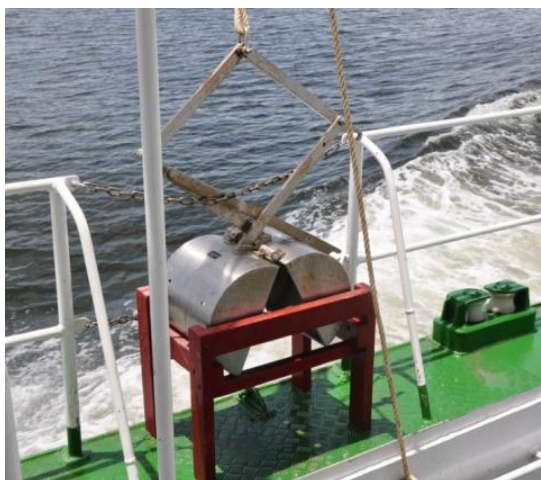
เก็บตัวอย่างด้วยเครื่องมือเก็บดินตะกอนผิวหน้าแบบ Petersen grab sampler สำหรับการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 และเก็บตัวอย่างด้วยเครื่องมือเก็บดินตะกอนแบบ Box Corer สำหรับการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 2 และ 3 (รูปที่ 9) จากนั้นบรรจุตัวอย่างดินตะกอนลงในถุงพลาสติกสะอาด ปิดผนึกให้แน่น และสวมทับด้วยถุงพลาสติกอีกชั้นหนึ่ง เก็บรักษาตัวอย่างในห้องแช่แข็ง (-20°C) และนำกลับมายังห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 7 จุดเก็บตัวอย่างดินตะกอนครั้งที่ 1 ในอ่าวไทยตอนบน กำหนดจุดเก็บตัวอย่างโดย transect line ระยะห่างระหว่างสถานีในแต่ละ transect line ประมาณ 6 กม. เก็บตัวอย่างโดยเรือสำรวจบุญประกอบ ระหว่าง 23-25 สิงหาคม 2553 ได้ตัวอย่างรวม 30 สถานี



รูปที่ 8 จุดเก็บตัวอย่างดินตะกอนครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ระหว่าง 7-30 พฤศจิกายน 2554 และ 20 พฤษภาคม ถึง 1 มิถุนายน 2555 กำหนดจุดเก็บตัวอย่างด้วยระบบกริด (systematic grid sampling) ขนาด 30 กม. เก็บตัวอย่างโดยใช้เรือสำรวจ SEAFDEC 2 และ SEAFDEC



(ก) Petersen Grab Sampler



(ข) Box Corer

รูปที่ 9 แสดงอุปกรณ์เก็บตัวอย่างตะกอนดิน (ก) Petersen grab sampler และ (ข) Box Corer

3.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์

นำตัวอย่างดินตะกอนไปทำให้แห้งด้วยวิธีการทำแห้งเยือกแข็ง (freeze-dry) ด้วยเครื่อง Freeze drier ยี่ห้อ Heto รุ่น LyoPro6000 (รูปที่ 10) โดยไม่ต้องถ่ายดินตะกอนออกจากถุงพลาสติก เพื่อลดการปนเปื้อน เมื่อตัวอย่างดินตะกอนแห้งแล้ว แบ่งดินตะกอนออกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งไม่ต้องบด ใช้สำหรับวิเคราะห์หองค์ประกอบขนาดอนุภาค อีกส่วนหนึ่งบดให้ละเอียดด้วย agate mortar ใช้สำหรับวิเคราะห์ทางเคมี



(ก) เครื่อง freeze drier



(ข) การจัดวางตัวอย่าง

รูปที่ 10 การทำแห้งเยือกแข็ง (freeze-dry) (ก) เครื่อง freeze drier และ (ข) การจัดวางตัวอย่าง

3.4 การวิเคราะห์ทางกายภาพและเคมี

3.4.1 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของตะกอนดิน

วิเคราะห์ขนาดอนุภาค โดยใช้เทคนิคการร่อนเปียกหลังกำจัดสารอินทรีย์แล้ว โดยร่อนผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 63 ไมโครเมตร อนุภาคขนาดทราย (ใหญ่กว่า 63 ไมโครเมตร) จะค้างอยู่บนตะแกรง ส่วนอนุภาคขนาดทรายแป้ง (2–63 ไมโครเมตร) และขนาดดินเหนียว (เล็กกว่า 2 ไมโครเมตร) ซึ่งอยู่ในน้ำที่ผ่านตะแกรง นำมาแยกด้วยวิธีการตกตะกอนตาม Stroke's Law โดยวิธีใน (Sompongchaiyakul, 1989) ดังรายละเอียดในภาคผนวก ข-1

ควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์ โดยวิเคราะห์ซ้ำร้อยละ 10 ของตัวอย่างทั้งหมด เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของการวิเคราะห์ซ้ำ (% reproducibility; %RPD) ต้องอยู่ในช่วงไม่เกินร้อยละ 20

3.4.2 การวิเคราะห์สารอินทรีย์ที่ออกซิไดซ์ง่ายในดินตะกอน

วิเคราะห์สารอินทรีย์ที่ออกซิไดซ์ง่ายในดินตะกอน โดยใช้วิธีวอลกี-แบล็ค (Walkley-Black Method) ซึ่งพัฒนาและปรับปรุงโดย (Loring and Rantala, 1995) ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นนี้จะไม่ทำปฏิกริยากับคาร์บอนอินทรีย์ประเภทที่ออกซิไดซ์ได้ยาก ได้แก่ แกรไฟท์ (graphite) ถ่านหิน (coal) และคาร์บอนอินทรีย์ที่เฉื่อยต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมี คาร์บอนอินทรีย์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะเป็นคาร์บอนอินทรีย์จำเพาะชนิดที่ออกซิไดซ์ได้ง่าย (readily oxidizable organic matter) เท่านั้น ซึ่งเป็นรูปแบบที่สิ่งมีชีวิตย่อยสลายและนำไปใช้

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีวอลกี-แบล็ค ใช้ $K_2Cr_2O_7$ (potassium dichromate) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างแรงทำปฏิกริยากับอินทรีย์คาร์บอนในกรดซัลฟูริกเข้มข้น แล้วไตเตรทหา $K_2Cr_2O_7$ ที่เหลือกับ $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2$ (ammonium iron(II) sulfate) รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ข-2

ควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์ โดยวิเคราะห์น้ำตาลเดกซ์โทรส ค่าคาร์บอนที่วิเคราะห์ได้จะต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 5 ของค่าจริง และทำซ้ำร้อยละ 10 ของตัวอย่างทั้งหมด เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของการวิเคราะห์ซ้ำ (% reproducibility; %RPD) ต้องอยู่ในช่วงไม่เกินร้อยละ 10

3.4.3 การวิเคราะห์นิตรีนในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต

วิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนนิตรีนในรูปแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธี acid-base titration ตามวิธีการทดสอบที่ใช้ใน (Sompongchaiyakul, 1989) ซึ่งเป็นกระบวนการวิเคราะห์หาปริมาณของกรดหรือเบส โดยให้สารละลายกรดหรือเบส ทำปฏิกิริยาพอดีกับสารละลายมาตรฐาน และใช้อินดิเคเตอร์เป็นสารบอกรจุดยุติ ขณะไทเทรต pH จะเปลี่ยนไป หากเลือกใช้อินดิเคเตอร์ที่เหมาะสม จุดยุติจะใกล้เคียงกับจุดสมมูล รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ข-3

ควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์ โดยวิเคราะห์ซ้ำร้อยละ 10 ของตัวอย่างทั้งหมด เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของการวิเคราะห์ซ้ำ (% reproducibility; %RPD) ต้องอยู่ในช่วงไม่เกินร้อยละ 10

3.4.4 การย่อยสกัดตัวอย่างและวิเคราะห์ปริมาณปรอทรวม (Total mercury)

วิเคราะห์ปรอทรวม โดยสกัดตัวอย่างตะกอนดินที่บดละเอียดประมาณ 0.1-0.3 กรัม (ซึ่งน้ำหนักแน่นอน ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ตามวิธีที่ดัดแปลงจาก (Bloom and Crecelius, 1987) และ US-EPA METHOD 1631 (US-EPA, 2001) Appendix to Method 1631 Total Mercury in Tissue, Sludge, Sediment, and Soil by Acid Digestion and BrCl Oxidation รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ข-4

ควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์ โดยวิเคราะห์ซ้ำร้อยละ 10 ของตัวอย่างทั้งหมด เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของการวิเคราะห์ซ้ำ (% reproducibility; %RPD) ต้องอยู่ในช่วงไม่เกินร้อยละ 10

ตลอดการวิเคราะห์ ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์โดยการใช้ Certified Reference Material (CRM) ทำการย่อยและตรวจวัดไปด้วย CRM ที่ใช้คือ MESS-3 ซึ่งเป็น CRM ที่ผลิตโดย National Research Council of Canada

3.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

3.5.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

วิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นด้วยสถิติเชิงพรรณนา (descriptive statistics) โดยหาค่าเฉลี่ย (mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) และค่ามัธยฐาน (median) ของข้อมูล

3.5.2 การวิเคราะห์โดยใช้สถิติแบบหลายตัวแปร

วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติแบบหลายตัวแปร Hierarchical Cluster Analysis (HCA) เลือกใช้ Square Euclidean Distance วัดระยะห่างระหว่าง case แต่ละคู่ และเลือกใช้ Ward's method เป็นหลักเกณฑ์ในการแบ่งกลุ่ม วิธีการนี้จะทำการแบ่งกลุ่มที่ทำให้ค่า sum of square within – cluster distance เพิ่มขึ้นน้อยที่สุด โดยค่า square within – cluster distance คือ ค่า square Euclidean distance ของแต่ละ case กับ cluster mean (กัลยา วาณิชยปัญญา, 2544) จากนั้นแสดงผลการแบ่งกลุ่มของสถานีด้วยกราฟ Dendrogram และทำการจำแนกการแบ่งกลุ่มโดยเลือกจากการรวมกลุ่ม

3.5.3 การวิเคราะห์ความรุนแรงของการปนเปื้อนปรอท

การบ่งชี้ความรุนแรงของการปนเปื้อนปรอทในดินตะกอนอ่าวไทย โดยการประมาณค่าของการปนเปื้อนปรอทที่สะสมในดินตะกอน คำนวณได้จากค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี (geoaccumulation index: I_{geo}) (Müller, 1969) จากสูตร

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5 B_n} \right]$$

เมื่อ C_n คือ ความเข้มข้นของโลหะในดินตะกอนตัวอย่าง

B_n คือ ความเข้มข้นพื้นฐาน (background concentration) ของปรอทเฉลี่ยในดินตะกอนทั่วไป มีค่าเท่ากับ 0.4 ppm (Turekian and Wedepohl, 1961)

การใช้ค่า I_{geo} ในการประเมินการปนเปื้อนนั้น จะมีการแยกระดับความรุนแรงของการปนเปื้อนออกเป็น 7 ระดับ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ระดับการบ่งชี้ความรุนแรงตามค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี (geoaccumulation index: Igeo)

Igeo	Igeo Class	ความรุนแรงของการปนเปื้อน
>5	6	ปนเปื้อนรุนแรงมาก (Extremely polluted)
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	ไม่ปนเปื้อนถึงปนเปื้อนไม่รุนแรง (Unpolluted to moderately polluted)
<0	0	ไม่ปนเปื้อน (Unpolluted)



บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพเคมี องค์ประกอบขนาด และปริมาณปรอทรวม ในดินตะกอนผิวหน้าบริเวณอ่าวไทย 174 ตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ และวิจารณ์ผลการศึกษามีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

ในการวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยได้แบ่งพื้นที่การศึกษาออกเป็นสามเขต คือ อ่าวไทยตอนบน 35 สถานี (สถานีในการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 และสถานี 1 ถึง 6 ในการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 2) อ่าวไทยตอนกลาง 71 สถานี (สถานี 9 ถึง 95) และอ่าวไทยตอนล่าง 68 สถานี (สถานี 97 ถึง 191) ดังรูปที่ 11

4.1 ขนาดอนุภาคของผิวหน้าดินตะกอนอ่าวไทย

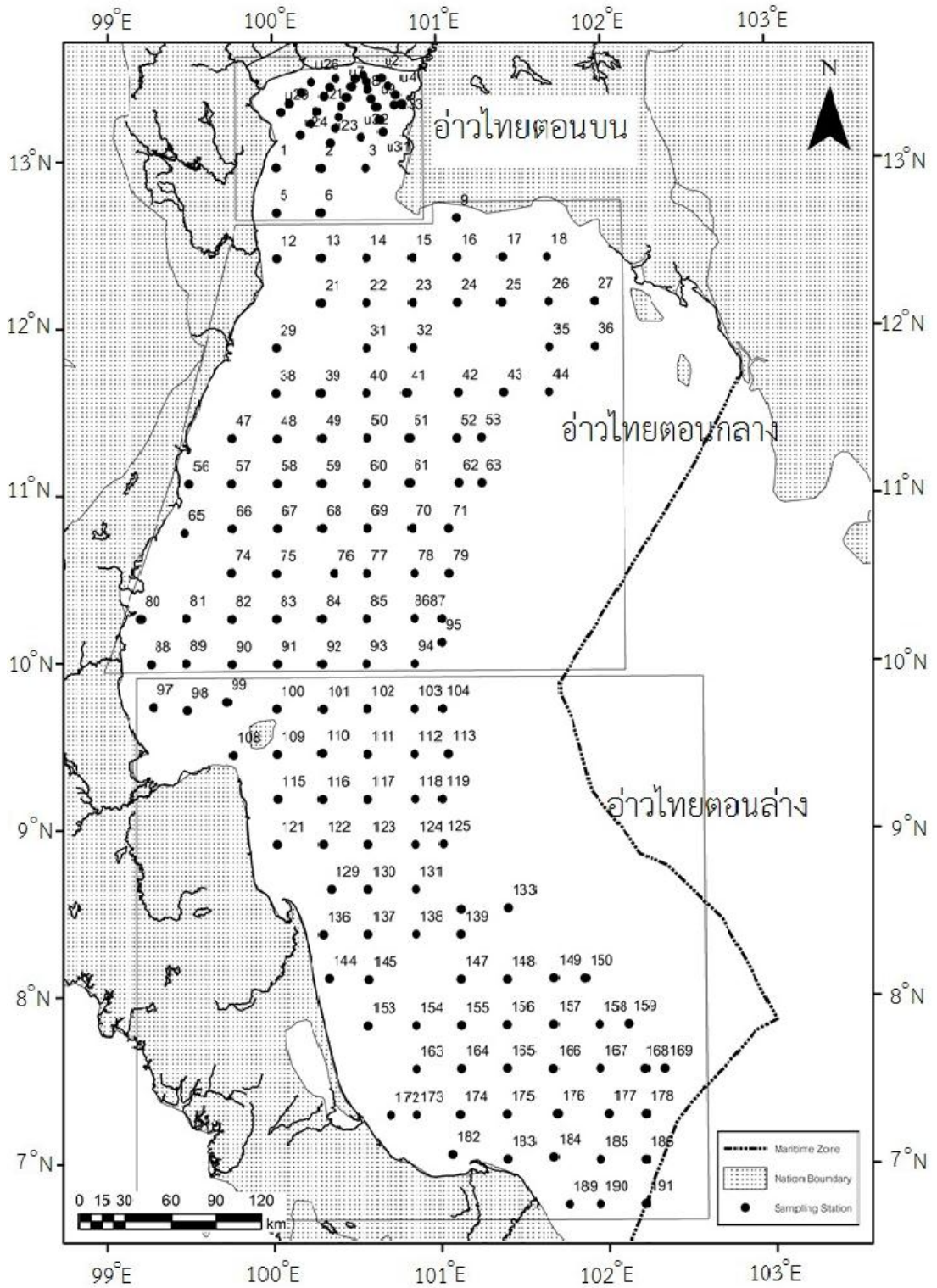
การประกันคุณภาพผลวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของผิวหน้าดินตะกอนอ่าวไทยจากการวิเคราะห์ซ้ำไม่น้อยกว่าร้อยละ 10 ของตัวอย่าง พบว่าค่า repeatability percent difference (%RPD) ของการวิเคราะห์มีค่าเท่ากับร้อยละ 13.1, 9.70 และ 13.1 สำหรับตะกอนขนาดทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (ไม่เกินร้อยละ 20) สำหรับการวิเคราะห์สารที่มีความ เป็นเนื้อเดียวกันน้อย (heterogeneous) ค่า %RPD ของการตรวจซ้ำบางครั้งมีค่ามากกว่าร้อยละ 10-20 โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีค่าต่ำ สำหรับผลการวิเคราะห์สัดส่วนขนาดและชื่อตะกอนของแต่ละสถานีในอ่าวไทย รายงานไว้ในตารางที่ ค-1 ภาคผนวก ค

จากการพล็อต (plot) สัดส่วนขนาดอนุภาคทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ที่กระจาย ในดินตะกอนโดยใช้ไตรแองกูล่าไดอะแกรม (triangular diagrams) และเรียกชื่อดินตะกอนตาม (Shepard, 1954) พบว่าลักษณะเนื้อดินตะกอนในอ่าวไทยตอนบน ตอนกลาง และตอนล่าง มีความคล้ายคลึงกัน (รูปที่ 12) องค์ประกอบขนาดของดินตะกอนในอ่าวไทยตอนบนมีขนาดอนุภาคละเอียดกว่าในอ่าวไทยตอนกลางและตอนล่าง ส่วนใหญ่จะเป็นดินเหนียวปนทรายแป้ง (silty clay) และ ทรายแป้งปนดินเหนียว (clayey silt) องค์ประกอบขนาดของดินตะกอนอ่าวไทยตอนกลางแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มที่มีขนาดค่อนข้างหยาบ (clayey sand, silty sand, sand) และกลุ่มที่มีขนาด

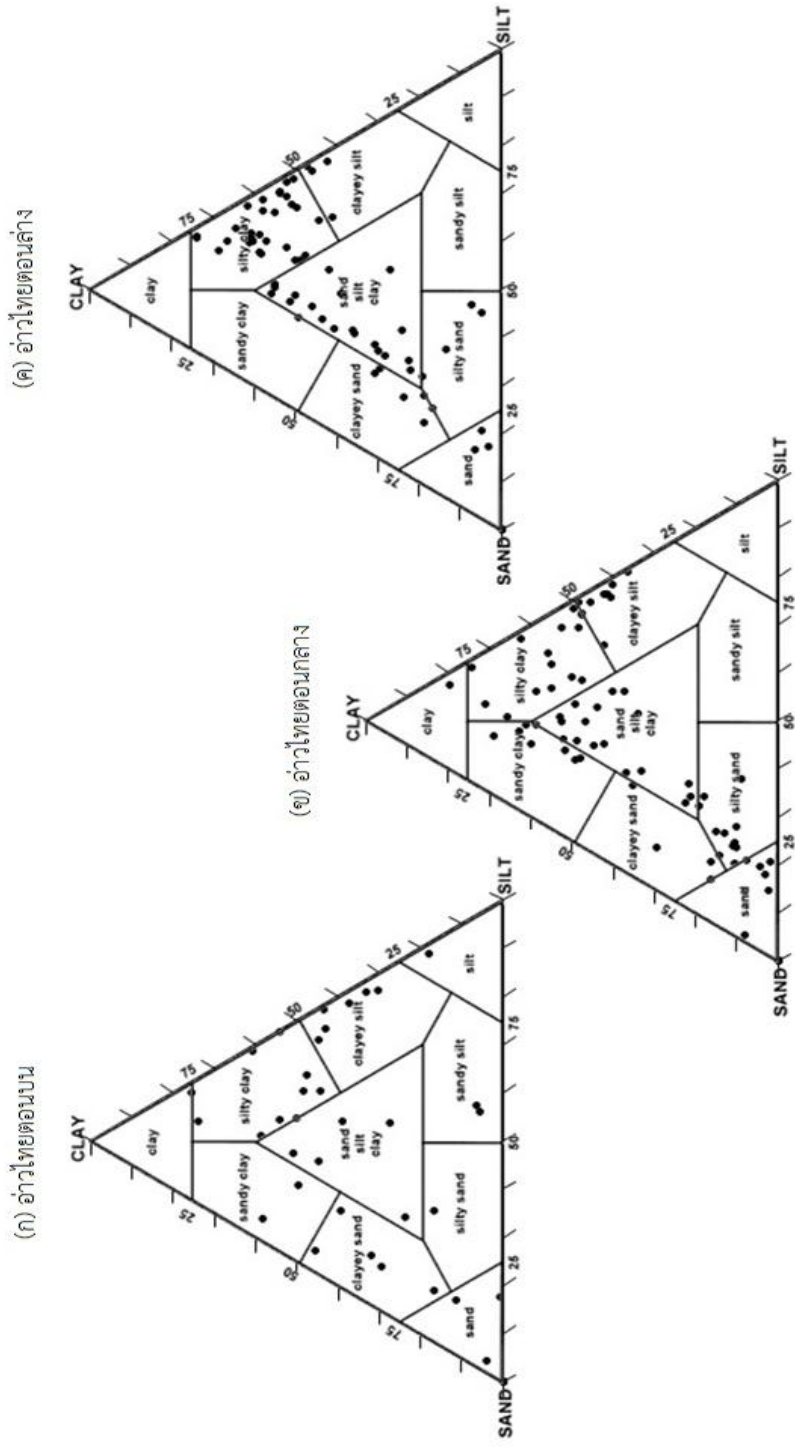
เล็ก (silty clay, sand silt clay) ส่วนดินตะกอนอ่าวไทยตอนล่างมีขนาดอนุภาคค่อนข้างเล็ก โดยจะเป็นดินเหนียวปนทรายแป้ง (silty clay) และทั้งสามขนาดพอๆ กัน (sand silt clay) (รูปที่ 12) รูปที่ 13 แสดงสัดส่วนสถานีที่มีเนื้อตะกอนแต่ละประเภทในอ่าวไทยทั้ง 3 ตอน

การกระจายเชิงพื้นที่ของอนุภาคตะกอนขนาดทราย (>63 ไมโครเมตร) ขนาดทรายแป้ง (2-63 ไมโครเมตร) และขนาดดินเหนียว (<2 ไมโครเมตร) ในอ่าวไทย แสดงในรูปที่ 14 รูปที่ 15 แสดงการกระจายเชิงพื้นที่ของอนุภาคตะกอนขนาดละเอียดกว่า 63 ไมโครเมตร (ขนาดทรายแป้ง + ขนาดดินเหนียว)

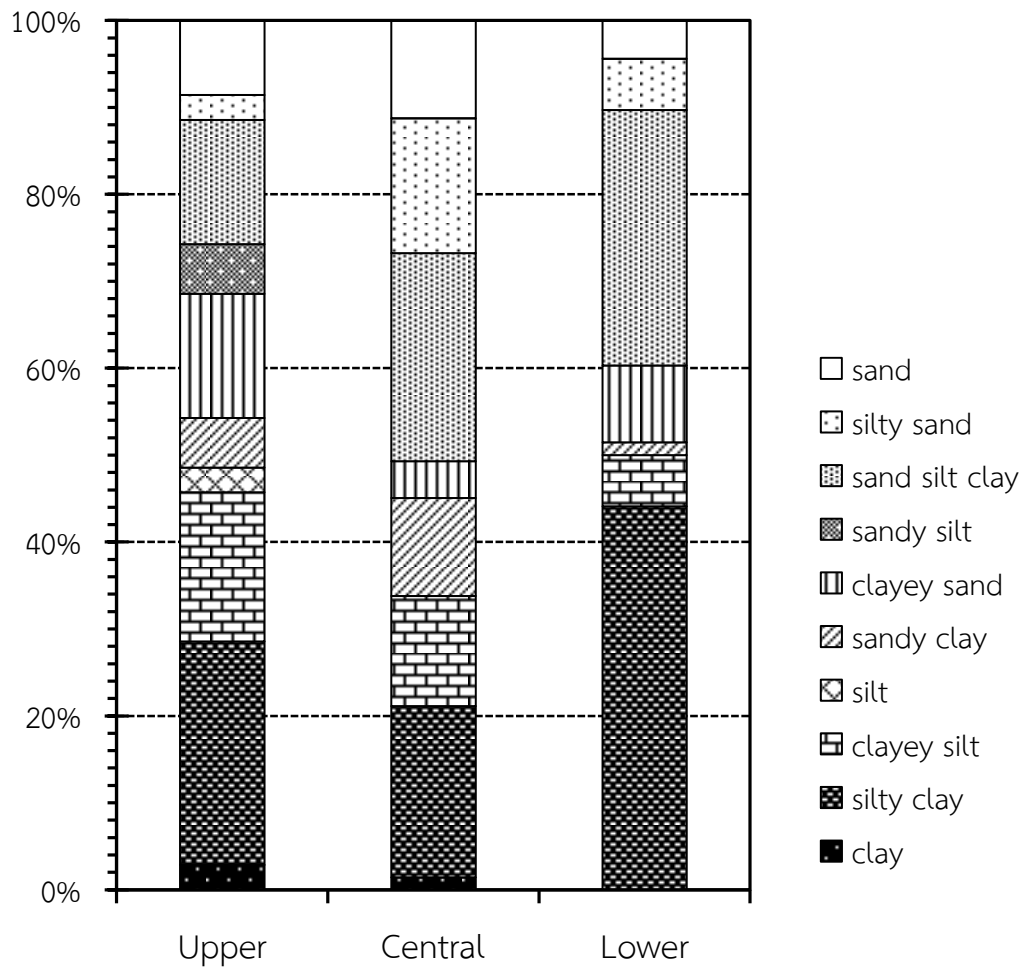
จากรูปที่ 14 และ 15 จะเห็นว่าบริเวณปากแม่น้ำในอ่าวไทยตอนบนมีดินตะกอนละเอียด ซึ่งเกิดจากการนำพาตะกอนของน้ำท่าลงสู่อ่าว เช่นเดียวกับในอ่าวไทยตอนกลางและตอนล่างช่วงจังหวัดชุมพร สุราษฎร์ธานี และนครศรีธรรมราช ดินตะกอนที่มีขนาดละเอียดจะอยู่ใกล้ชายฝั่งและปากแม่น้ำ นอกจากนี้ทางด้านนอกชายฝั่งของอ่าวมีดินตะกอนละเอียด อาจเป็นเพราะมีการถ่ายเทตะกอนมาจากทะเลจีนใต้ตามฤดูกาลมรสุมทั้งสองฤดู



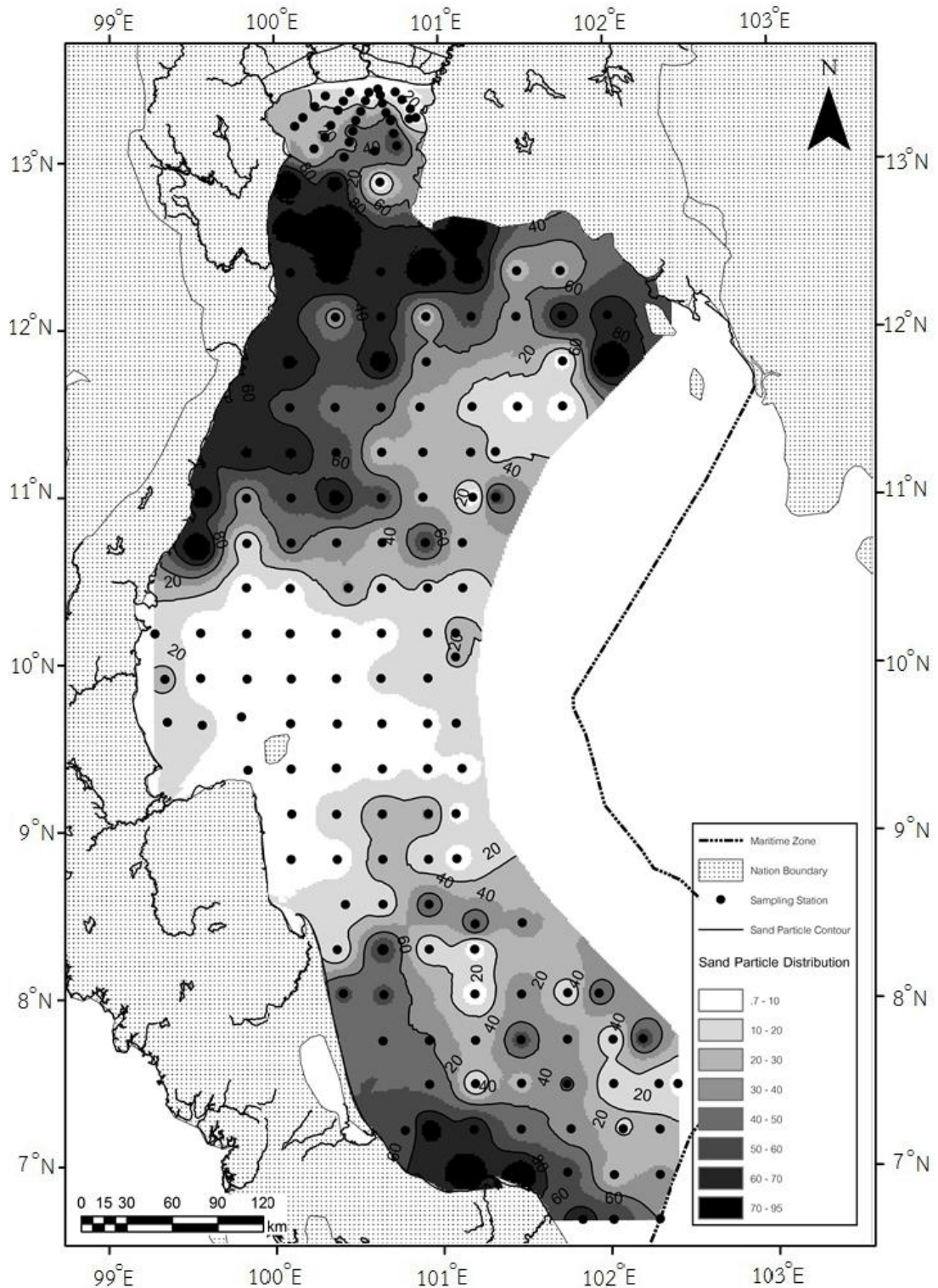
รูปที่ 11 การแบ่งพื้นที่ศึกษาเป็น 3 ส่วน คือ อ่าวไทยตอนบน อ่าวไทยตอนกลางและอ่าวไทยตอนล่าง



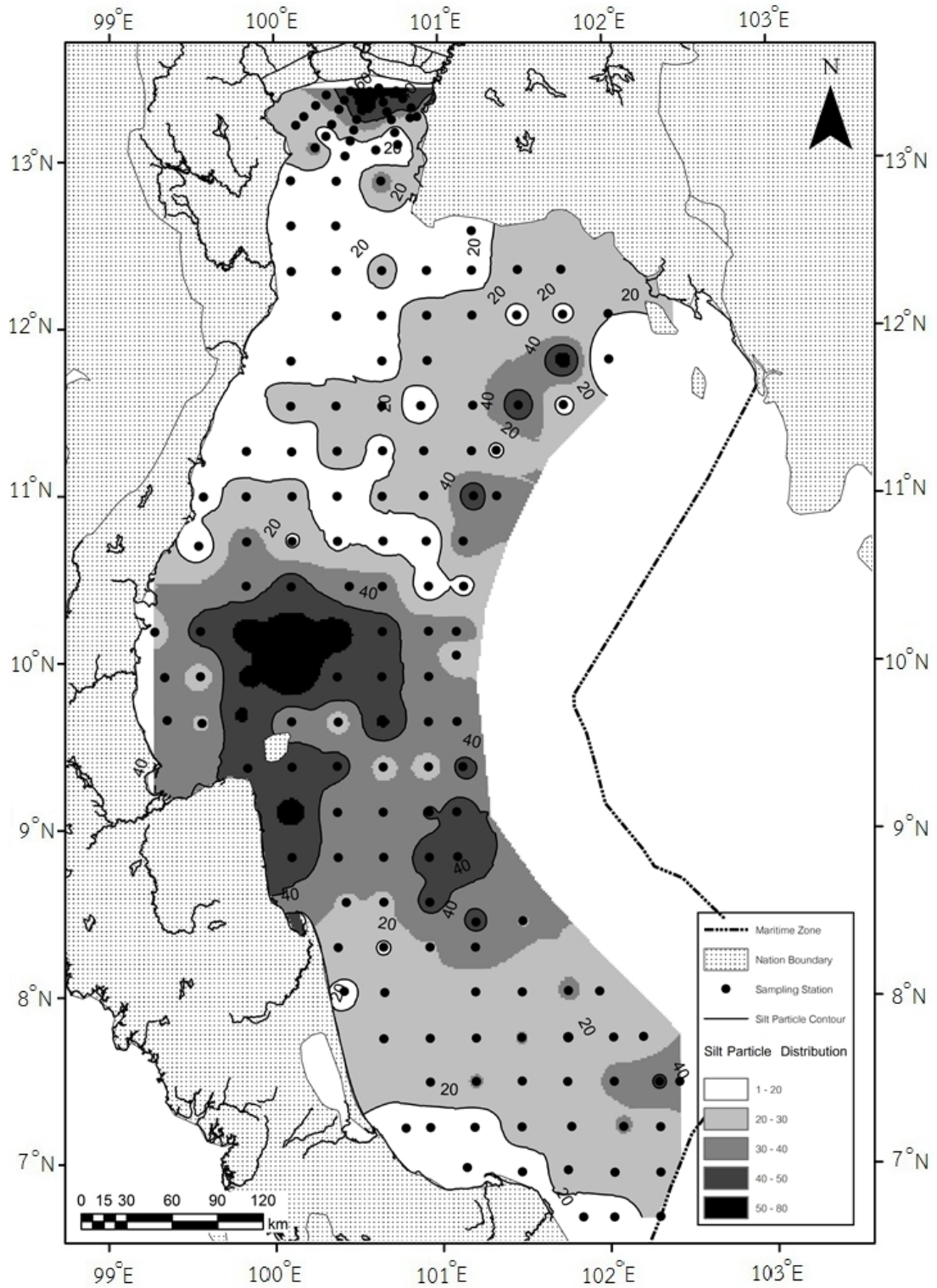
รูปที่ 12 การกระจายขนาดในไตรแองเกิล (triangular diagram) ของดินตะกอนผิวหน้าอำเภอไทย



รูปที่ 13 สัดส่วนขนาดดินตะกอนบริเวณอ่าวไทยตอนบน ตอนกลาง และตอนล่าง

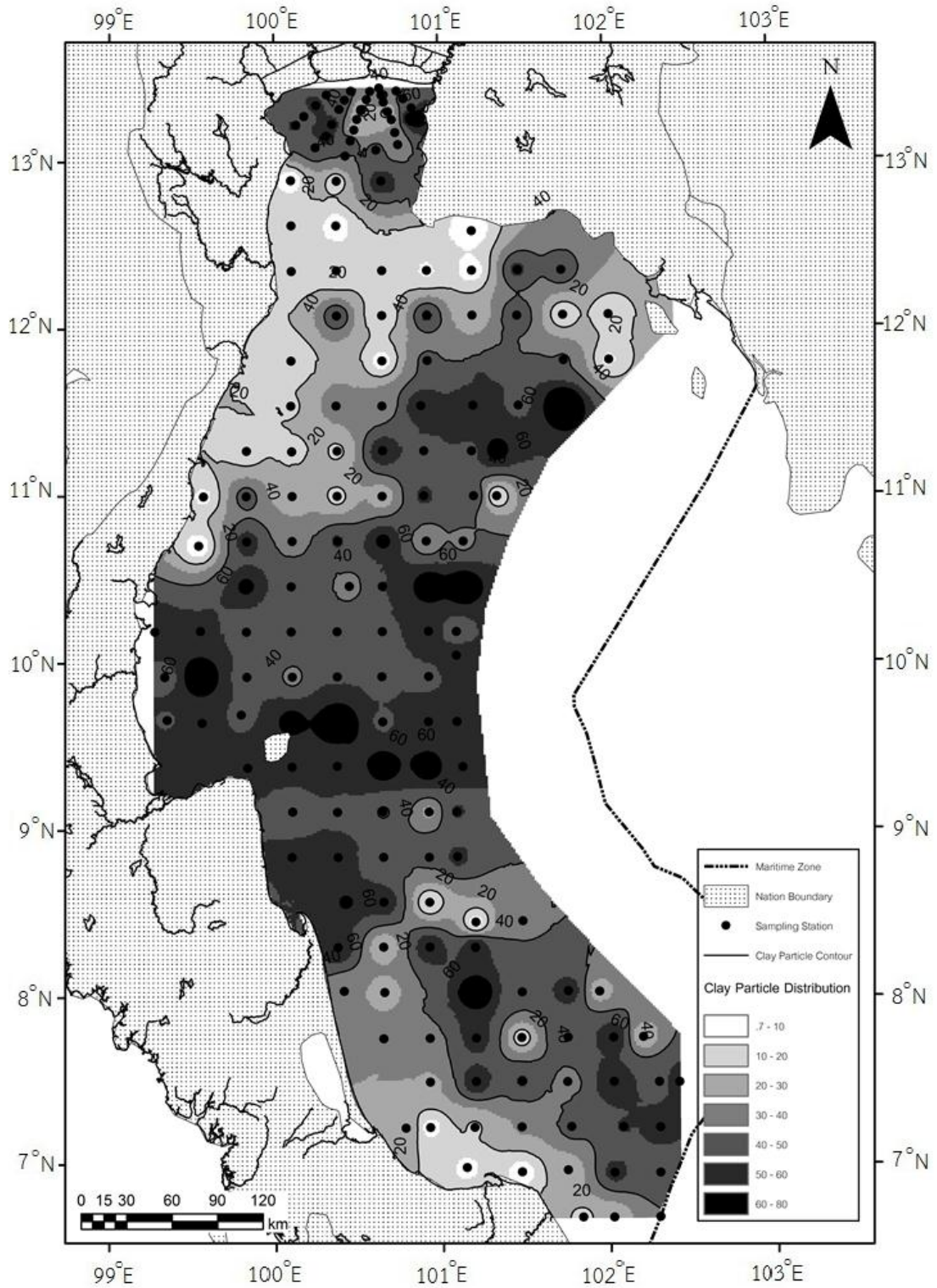
(ก) ทราย (>63 μm)

รูปที่ 14 การกระจายเชิงพื้นที่ของอนุภาคตะกอน (ก) ขนาดทราย (>63 μm), (ข) ขนาดทรายแป้ง (2–63 μm) และ (ค) ขนาดดินเหนียว (<2 μm) ในดินตะกอนอ่าวไทย



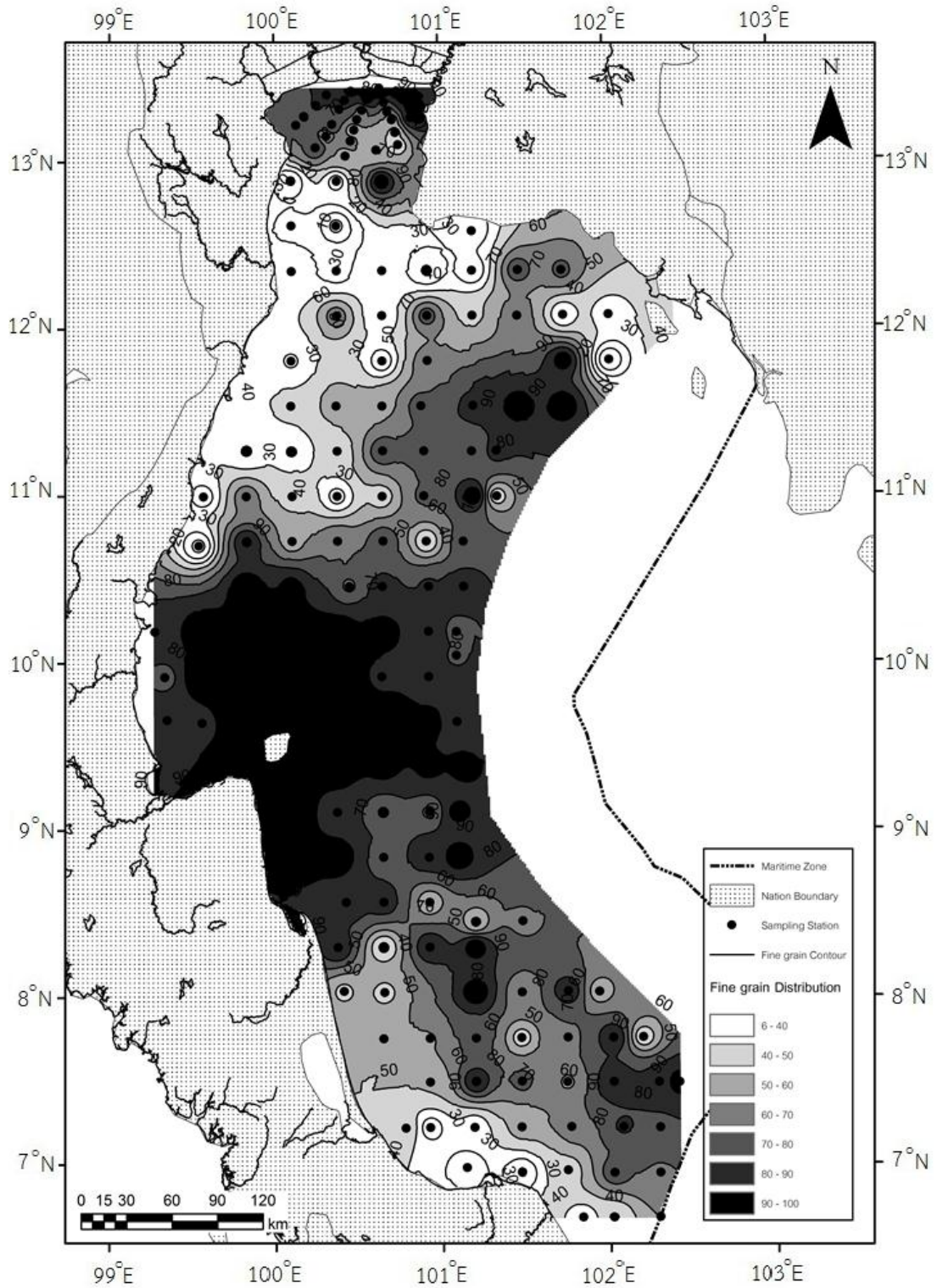
(ข) ทรายแป้ง (2-63 μm)

รูปที่ 14 (ต่อ)



(ค) ขนาดดินเหนียว (<math><2\ \mu\text{m}</math>)

รูปที่ 14 (ต่อ)



รูปที่ 15 การกระจายเชิงพื้นที่ของขนาดอนุภาคดินตะกอนขนาดเล็กกว่า $63 \mu m$ ในอ่าวไทย

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอ่าวไทยที่ผ่านมา ข้อมูลการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของอนุภาคดินตะกอนในการศึกษาครั้งนี้มีความคล้ายคลึงกับในอดีต ซึ่งพบว่าขนาดอนุภาคดินตะกอนในอ่าวไทยตอนบนมีขนาดละเอียด โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณปากแม่น้ำ (Dharmvanij, 1987) ตะกอนจะละเอียดบริเวณใกล้ปากแม่น้ำในอ่าวไทยตอนบน ถูกพามาโดยแม่น้ำสายหลักทั้ง 5 สาย คือ บางปะกง เจ้าพระยา ท่าจีน แม่กลอง และเพชรบุรี ขณะที่อ่าวไทยตอนล่างได้รับอิทธิพลจากทะเลจีนใต้ ซึ่งกระแสน้ำพัดพาตะกอนขนาดเล็กเข้ามาในอ่าว (Dharmvanij, 1987; Sompongchaiyakul, 1989) แต่บริเวณรอยต่อระหว่างอ่าวไทยตอนบนและตอนล่างส่วนบนจะมีตะกอนที่หยาบ และตะกอนจะละเอียดขึ้นในบริเวณที่ใกล้ปากอ่าวไทย แต่บริเวณปากทะเลสาบสงขลาและแม่น้ำตาปีจะมีสัดส่วนของอนุภาคหยาบมากกว่าพื้นที่อื่นของอ่าวไทยตอนล่าง นอกจากนี้บริเวณที่พบขนาดอนุภาคดินตะกอนละเอียดในปริมาณสูงเนื่องจากมีแม่น้ำที่นำพาตะกอนลงสู่ทะเลด้วยเช่นกัน คือ ชายฝั่งของจังหวัดชุมพรและนครศรีธรรมราช (Buakaew, 2007; Sompongchaiyakul, 1989)

4.2 คาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอน

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างซ้ำไม่น้อยกว่าร้อยละ 10 พบว่าค่า %RPD ของผลการวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอน มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.03 ± 0.97 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (ไม่เกิน ร้อยละ 10) แสดงว่าผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำ และจากการวิเคราะห์ความถูกต้องของการวิเคราะห์สารอินทรีย์ โดยใช้เดกซ์โทรสพบว่าเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในเดกซ์โทรส (dextrose) 0.100 กรัม มีค่าเท่ากับร้อยละ 39.9 ± 1.20 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในเดกซ์โทรสตามทฤษฎีซึ่งเท่ากับร้อยละ 39.99 แสดงว่าผลการวิเคราะห์มีความถูกต้อง

ผลการวิเคราะห์คาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอนผิวหน้าของอ่าวไทย รายงานในตาราง ง-1 ในภาคผนวก ง ค่าเฉลี่ย ค่ากลาง และพิสัยของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายในดินตะกอนผิวหน้าของอ่าวไทย สรุปไว้ในตารางที่ 7 จากผลการศึกษา พบว่าดินตะกอนในอ่าวไทยตอนบนมีคาร์บอนอินทรีย์สูงกว่าอ่าวไทยตอนกลางและตอนล่าง โดยมีคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอนอ่าวไทยตอนบน ตอนกลาง และตอนล่างเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 1.60, 0.93 และ 0.69 และมีค่ากลาง (median) เท่ากับร้อยละ 1.54, 0.79 และ 0.62 ตามลำดับ การที่ดินตะกอนอ่าวไทยตอนบนมีคาร์บอนอินทรีย์คาร์บอนสูงกว่าอ่าวไทยบริเวณอื่นเป็นเพราะพื้นที่ส่วนนี้ถูกปิดล้อมด้วยแผ่นดินทั้งสามด้าน

โดยรอบและมีแม่น้ำใหญ่ไหลลงบริเวณนี้ 5 สาย ได้แก่ แม่น้ำบางปะกง แม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำท่าจีน แม่น้ำแม่กลอง และแม่น้ำเพชรบุรี ซึ่งนำสารอินทรีย์จากแผ่นดินที่ปนเปื้อนมากับน้ำท่าในปริมาณสูงลงสู่อ่าวไทยตอนบน อีกทั้งการไหลเวียนของกระแสน้ำในบริเวณนี้มีการถ่ายเทออกสู่อ่าวในตอนล่างน้อย ประกอบกับทิศทางของกระแสน้ำช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ กระแสน้ำจะหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา และช่วงฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือกระแสน้ำจะไหลตามเข็มนาฬิกา (อนุกุล บุรณะประทีปรัตน์, 2551) ทำให้ดินตะกอนในอ่าวไทยตอนบนถ่ายเทออกสู่อ่าวตอนล่างได้น้อย จึงมีแนวโน้มที่จะตกสะสมกันอยู่บริเวณนี้ มากกว่าจะถ่ายเทออกไปจากอ่าวไทยตอนบน

ตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ย ค่ากลาง และพิสัย ของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอนอ่าวไทย

พื้นที่ศึกษา	จำนวน	ค่าเฉลี่ย \pm SD	พิสัย	ค่ากลาง	อ้างอิง
อ่าวไทยตอนบน	35	1.60 \pm 0.60	0.55 – 2.77	1.54	
อ่าวไทยตอนกลาง	71	0.93 \pm 0.48	0.22 – 2.19	0.79	การศึกษาครั้งนี้
อ่าวไทยตอนล่าง	68	0.69 \pm 0.34	0.11 – 1.76	0.62	
อ่าวไทยตอนบน	39	0.93 \pm 0.61	0.07 – 2.20	0.77	(Buakaew, 2007)
อ่าวไทยตอนล่าง	50	0.68 \pm 0.37	0.10 – 1.35	0.56	
อ่าวไทยตอนบน	19	0.68 \pm 0.56	0.09 – 1.89	0.39	(Sompongchaiyakul
อ่าวไทยตอนล่าง	52	0.59 \pm 0.37	0.12 – 1.70	0.48	, 1989)

SD = standard deviation (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

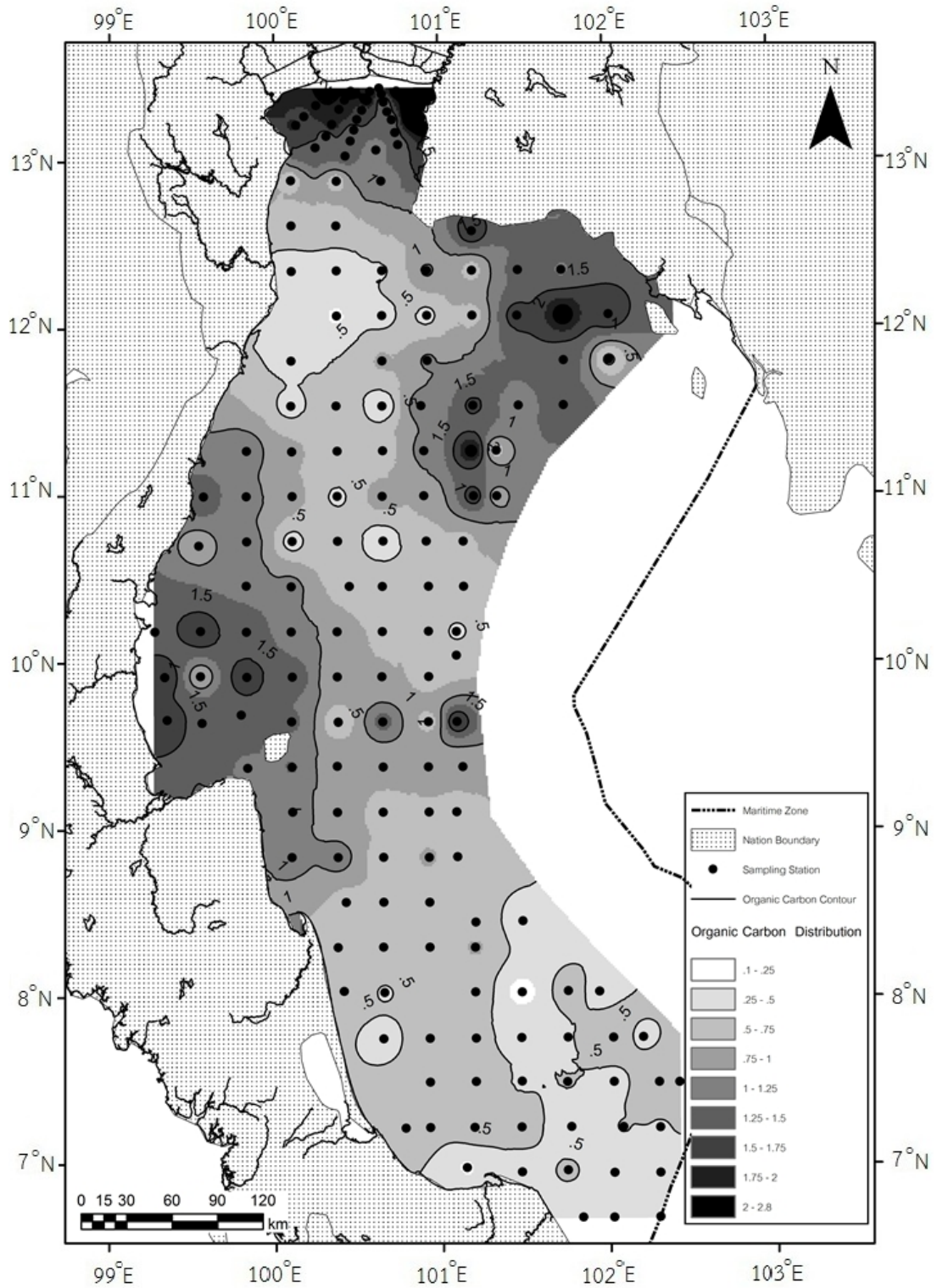
เมื่อเปรียบเทียบค่าของการศึกษาของ (Sompongchaiyakul, 1989) และ (Buakaew, 2007) ซึ่งทำการศึกษา ณ เวลาที่ต่างกัน (ตารางที่ 7) จะเห็นว่าทั้งสามงานวิจัยสอดคล้องกัน คือ คาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอนอ่าวไทยตอนบนมีค่ามากกว่าส่วนอื่นของอ่าวไทย รูปที่ 16 แสดงการกระจายเชิงพื้นที่ของคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอนผิวหน้าของอ่าวไทยจากการศึกษาครั้งนี้

เมื่อเปรียบเทียบ รูปที่ 15 และ 16 จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคดินตะกอนละเอียดบริเวณปากแม่น้ำอ่าวไทยตอนบนและบริเวณนอกชายฝั่งของจังหวัดชุมพรและนครศรีธรรมราช มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์กันอย่างชัดเจน เนื่องจากบริเวณนี้มีอนุภาคดินตะกอนละเอียดในปริมาณสูง ซึ่งขนาดอนุภาคดินตะกอนละเอียดจะมีพื้นที่ผิวและมีแร่ดินเหนียว (aluminosilicate) มาก จึงทำให้สามารถดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ได้มากกว่าขนาดอนุภาคตะกอนที่หยาบกว่าซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นแร่ควอตซ์ (quartz) ที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาต่างๆ (Sompongchaiyakul, 1989) อีกทั้งดินตะกอนบริเวณใกล้ฝั่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งป่าชายเลนและปากแม่น้ำ อาจมีคาร์บอน

อินทรีย์ใหม่ในปริมาณสูง แต่ในทะเลลึกที่ตะกอนสะสมอย่างช้าๆ คาร์บอนอินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกย่อยสลายไปโดยกระบวนการจุลินทรีย์ในเวลาไม่นานหลังจากการตกตะกอน การแพร่กระจายของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอนมีการผันแปรตามสภาพแวดล้อม โดยทั่วไปพบว่าปริมาณของคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอนมีค่าสูงเมื่ออยู่ใกล้ฝั่งและมีค่าลดลงเมื่ออยู่ห่างฝั่งออกไปเรื่อย (Tam and Wong, 1998; จารุมาศ เมฆสัมพันธ์, 2548)

สำหรับอ่าวไทยบริเวณอื่นนั้น ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์กับขนาดอนุภาคละเอียด (<63 μm) มีความสัมพันธ์กันน้อยมาก จากตารางที่ 7 พบว่าปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในอ่าวไทยตอนล่างมีค่าไม่ค่อยแตกต่างจากงานวิจัยในอดีต แต่ในอ่าวไทยตอนบนมีการสะสมคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอนเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการพัฒนาอย่างต่อเนื่องของอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมอาจส่งผลให้มีการนำพาสารอินทรีย์เข้าสู่แหล่งน้ำและท้ายที่สุดก็ลงสู่ทะเลบริเวณปากแม่น้ำทำให้ดินตะกอนในอ่าวไทยตอนบนสะสมคาร์บอนอินทรีย์จนมีปริมาณสูงกว่าในอดีต

ดังนั้น หากไม่มีการควบคุมแหล่งกำเนิด ก็จะทำให้สารอินทรีย์สะสมในดินตะกอนมากเกินไปจนเป็นเหตุให้เกิดการพร่องออกซิเจน (hypoxia) ในมวลน้ำผิวหน้าดินตะกอน เพราะการย่อยสลายสารอินทรีย์จะใช้ออกซิเจนไปจนแหล่งน้ำขาดออกซิเจนจนไม่พอต่อการหายใจของสิ่งมีชีวิต ซึ่งปัจจุบัน จากการสำรวจโดย พบว่ามีการพร่องออกซิเจนในมวลน้ำเหนือดินตะกอนของอ่าวไทยตอนบนเป็นบริเวณกว้าง และมีความหนาของชั้นน้ำพร่องออกซิเจนประมาณ 4-5 เมตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเปลี่ยนฤดูลมมรสุมในเดือนตุลาคม (Sompongchaiyakul et al., 2014) นอกจากนี้ สารอินทรีย์ยังเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเคลื่อนย้าย ทับถม และเก็บกักโลหะหนักในตะกอน (Loring and Rantala, 1995) หากดินตะกอนมีคาร์บอนอินทรีย์สูงก็จะตรึงโลหะหนักเอาไว้กับตะกอนได้มากกว่าดินตะกอนที่มีคาร์บอนอินทรีย์ต่ำ



รูปที่ 16 ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอนอ่าวไทย

4.3 แคลเซียมคาร์บอเนตในดินตะกอน

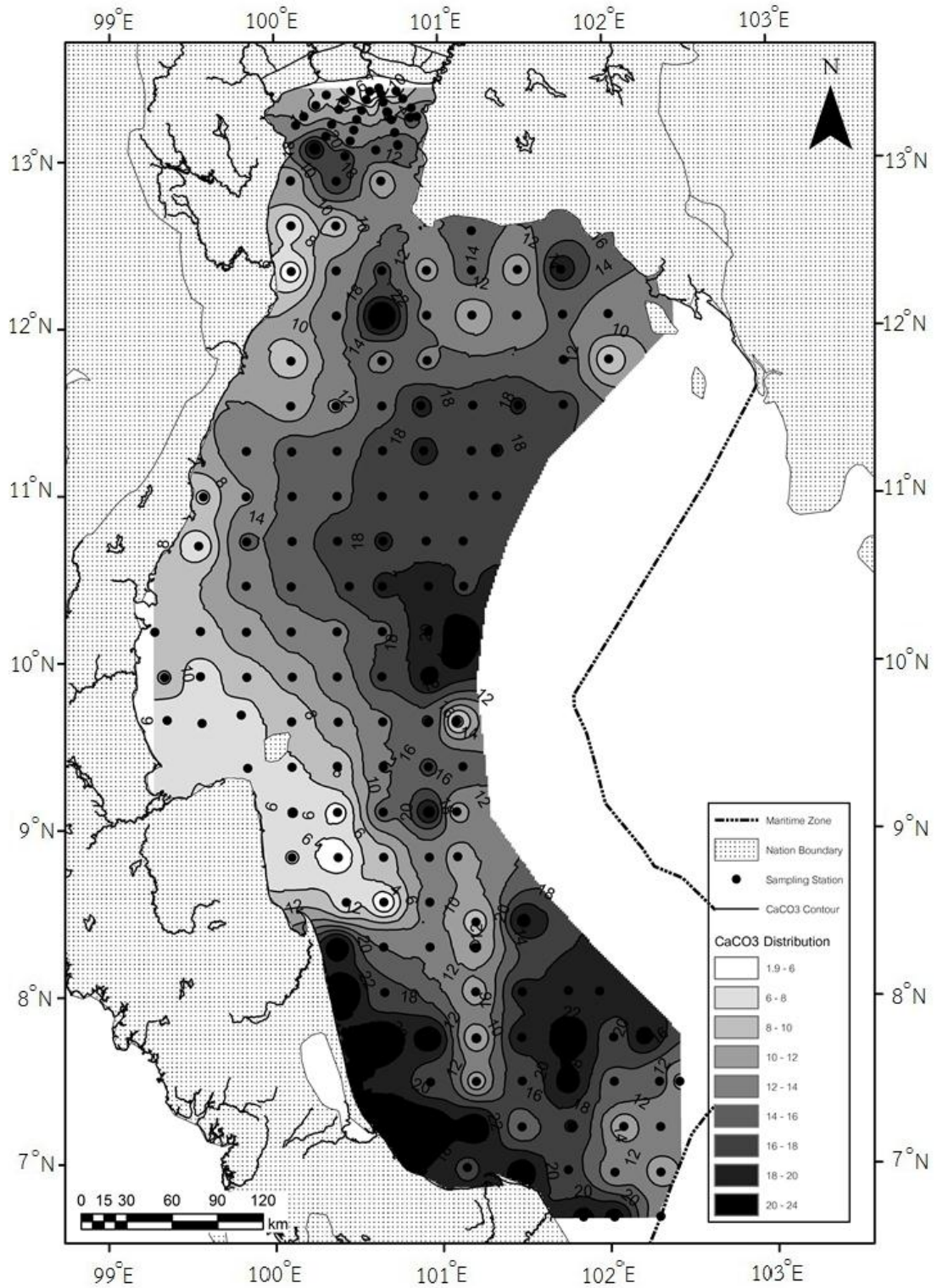
จากการวิเคราะห์ตัวอย่างซ้ำไม่น้อยกว่าร้อยละ 10 พบว่าค่า %RPD ของผลการวิเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตในดินตะกอน มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.22 ± 0.94 ซึ่งอยู่ในมาตรฐานที่ยอมรับได้ แสดงว่าผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำ ส่วนความถูกต้องของการวิเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตควบคุมโดยการไตเตรทความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid; HCl) ที่ใช้กับสารมาตรฐานปฐมภูมิโซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate; Na_2CO_3) ผลการวิเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตในดินตะกอนผิวหน้าของอ่าวไทย รายงานในตาราง ง-1 ในภาคผนวก ง ส่วนค่าเฉลี่ย ค่ากลาง และพิสัย ของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในดินตะกอนอ่าวไทย สรุปไว้ในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่าเฉลี่ย ค่ากลาง และค่าสูงสุด-ต่ำสุด ของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในดินตะกอนอ่าวไทย

พื้นที่ศึกษา	จำนวน	ค่าเฉลี่ย \pm SD	พิสัย	ค่ากลาง	อ้างอิง
อ่าวไทยตอนบน	35	11.2 ± 4.42	1.80 - 21.9	11.6	
อ่าวไทยตอนกลาง	71	14.5 ± 3.90	4.77 - 23.9	15.1	การศึกษาครั้งนี้
อ่าวไทยตอนล่าง	68	14.1 ± 5.56	3.89 - 23.9	14.0	
อ่าวไทยตอนบน	39	15.1 ± 7.90	5.70 - 36.9	14.7	(Buakaew, 2007)
อ่าวไทยตอนล่าง	50	16.3 ± 8.60	1.70 - 39.3	15.3	
อ่าวไทยตอนล่าง	51	14.5	-	-	(กฤษฎา หน่อเนื้อ, 2541)
อ่าวไทยตอนบน	19	14.4 ± 4.50	8.40 - 27.1	13.3	(Sompongchaiyakul, 1989)
อ่าวไทยตอนล่าง	52	12.2 ± 4.20	4.80 - 21.4	12.7	

SD = standard deviation (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

อ่าวไทยตอนบน ตอนกลาง และตอนล่าง มีค่าเฉลี่ยแคลเซียมคาร์บอเนตในดินตะกอนอยู่ที่ร้อยละ 11.2, 14.5 และ 14.1 และมีค่ากลางเท่ากับร้อยละ 11.6, 15.1 และ 14.0 ตามลำดับ รูปแบบการแพร่กระจายเชิงพื้นที่ของแคลเซียมคาร์บอเนตแสดงไว้ในรูปที่ 17 โดยจะเห็นว่าดินตะกอนอ่าวไทยตอนกลางและตอนล่าง ซึ่งห่างไกลอิทธิพลน้ำจืดกว่าอ่าวไทยตอนบน มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบในดินตะกอนสูงกว่าอ่าวไทยตอนบน จากเปรียบเทียบปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในดินตะกอนจากการศึกษาครั้งก่อนของ (Sompongchaiyakul, 1989), (กฤษฎา หน่อเนื้อ, 2541) และ (Buakaew, 2007) พบว่ามีความสอดคล้องกันในทุกงานวิจัย (ตารางที่ 8)



รูปที่ 17 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในดินตะกอนอ่าวไทย

4.4 ปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนผิวหน้าของอ่าวไทย

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างซ้ำไม่น้อยกว่าร้อยละ 10 พบว่าค่า %RPD ของผลการวิเคราะห์ปรอทรวมในดินตะกอน มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.11 ± 1.58 ซึ่งอยู่ในมาตรฐานที่ยอมรับได้ แสดงว่าผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำ และจากการวิเคราะห์ความถูกต้องของการวิเคราะห์ปรอทรวมโดยการย่อยสกัดและวิเคราะห์ NRCC-CRM MESS-3 ซึ่งเป็นดินตะกอนอ้างอิงที่ได้รับการรับรองค่า (certified reference material; CRM) จาก National Research Council of Canada (NRCC) ด้วยวิธีการเดียวกับดินตะกอนตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 9 ซึ่งค่าปรอท (Hg) ที่วิเคราะห์ได้อยู่ในช่วงค่าที่รับรอง แสดงว่าวิธีการที่เลือกใช้ในการย่อยและวิเคราะห์ตัวอย่างดินตะกอนนี้ในการศึกษาครั้งนี้ ให้ผลที่มีความน่าเชื่อถือ

ตารางที่ 9 ความเข้มข้นของปรอทในตะกอนมาตรฐาน MESS-3 เปรียบเทียบกับค่าที่รับรอง

โลหะ	Total Hg ใน NRCC-CRM MESS-3 (mg/kg)						Mean \pm SD	Certified Value
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6		
Hg	0.103	0.096	0.095	0.105	0.105	0.103	0.101 \pm 0.004	0.091 \pm 0.009

SD = standard deviation (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

ค่าปรอทรวมในตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้ จะต้องนำมาปรับฐาน (normalization) กับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในดินตะกอนให้เป็น carbonate free basis concentration ก่อนจะทำการแปลผลและหาความสัมพันธ์กับปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมต่างๆ เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นปัจจัยที่เจือจางความเข้มข้นของโลหะและสารมลพิษที่ปนเปื้อนในดินตะกอน

ผลการวิเคราะห์ปริมาณปรอทรวม (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง) ในดินตะกอนผิวหน้าของอ่าวไทย ที่ปรับฐานให้อยู่ในรูป carbonate free basis แล้ว รายงานไว้ในตาราง ง-1 ในภาคผนวก ง และสรุปไว้ในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ปริมาณปรอทรวมที่ปรับฐานให้อยู่ในรูป carbonate free basis (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง) ของดินตะกอนผิวหน้าของอ่าวไทย

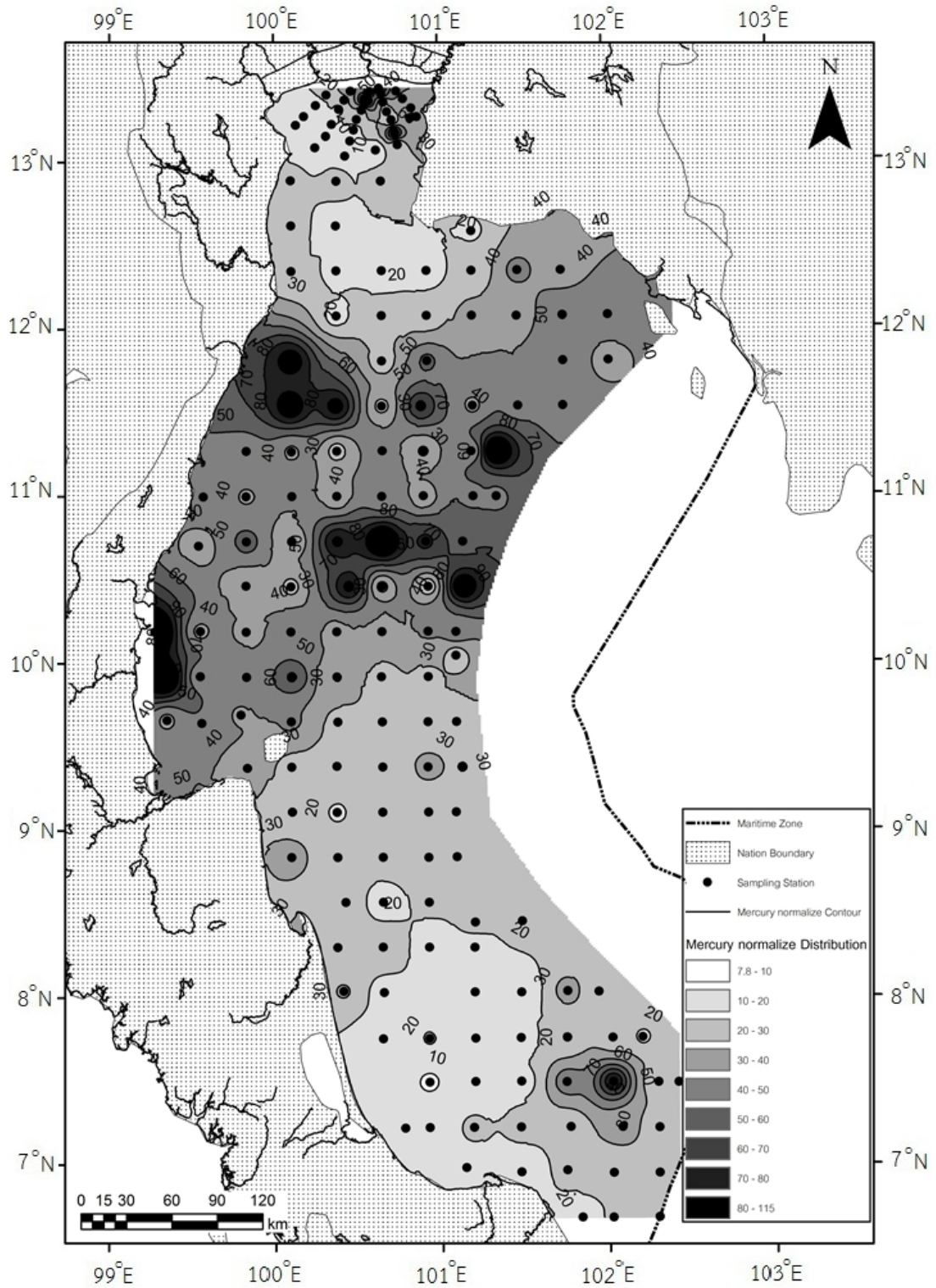
พื้นที่ศึกษา	จำนวน	ค่าเฉลี่ย \pm SD	พิสัย	ค่ากลาง	อ้างอิง
อ่าวไทยตอนบน	35	28.7 \pm 23.0	7.67 – 102.4	21.6	การศึกษาครั้งนี้
อ่าวไทยตอนกลาง	71	45.1 \pm 24.1	11.7 – 110.8	39.3	
อ่าวไทยตอนล่าง	68	24.3 \pm 10.9	8.53 – 81.2	10.9	
อ่าวไทยตอนกลาง และตอนล่าง	139	34.9 \pm 21.5	8.50 – 110.8	27.9	
อ่าวไทยตอนบน	39	33.9 \pm 27.4	<2.00 – 92.4	23.5	(Buakaew, 2007)
อ่าวไทยตอนล่าง	50	24.4 \pm 9.00	6.50 – 50.1	23.4	

SD = standard deviation (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

จากตารางที่ 10 พบว่าการศึกษาครั้งนี้ มีค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่ากลาง ของปริมาณปรอทในดินตะกอนจากอ่าวไทยตอนกลาง สูงกว่าอ่าวไทยส่วนอื่น เมื่อเทียบกับการศึกษาของ (Buakaew, 2007) ซึ่งเก็บตัวอย่างเมื่อเดือนตุลาคม พ.ศ. 2546 และแบ่งพื้นที่การศึกษาเป็น 2 ส่วน เท่านั้น คือ อ่าวไทยตอนบนและอ่าวไทยตอนล่าง โดยพื้นที่รวมของอ่าวไทยตอนกลางและอ่าวไทยตอนล่างในการศึกษานี้เป็นพื้นที่เดียวกับอ่าวไทยตอนล่างของ (Buakaew, 2007) แต่จำนวนสถานีในพื้นที่ของการศึกษานี้มีมากกว่าเกือบ 3 เท่า นอกจากนี้หลังจากปี 2546 กิจกรรมสำรวจและผลิตปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในอ่าวไทยเพิ่มจำนวนขึ้นมาก (กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ, 2554)

ในการศึกษาครั้งนี้ทั้งค่าเฉลี่ยและค่ากลางของปรอทในอ่าวไทยตอนบนมีค่าต่ำลง ขณะที่อ่าวไทยส่วนที่เหลือที่มีค่าสูงขึ้น เมื่อพิจารณาแยกอ่าวไทยตอนล่างออกเป็น 2 ส่วน เป็นอ่าวไทยตอนกลางและตอนล่าง จะเห็นว่าการสะสมของปรอทส่วนใหญ่เกิดขึ้นในอ่าวไทยตอนกลาง ส่วนปรอทในอ่าวไทยตอนบนที่ลดลงนั้น อาจเนื่องมาจากมีการควบคุมมลพิษจากแผ่นดินได้ดีขึ้น และปรอทที่สะสมอยู่ในดินตะกอนถูกเปลี่ยนรูปไป

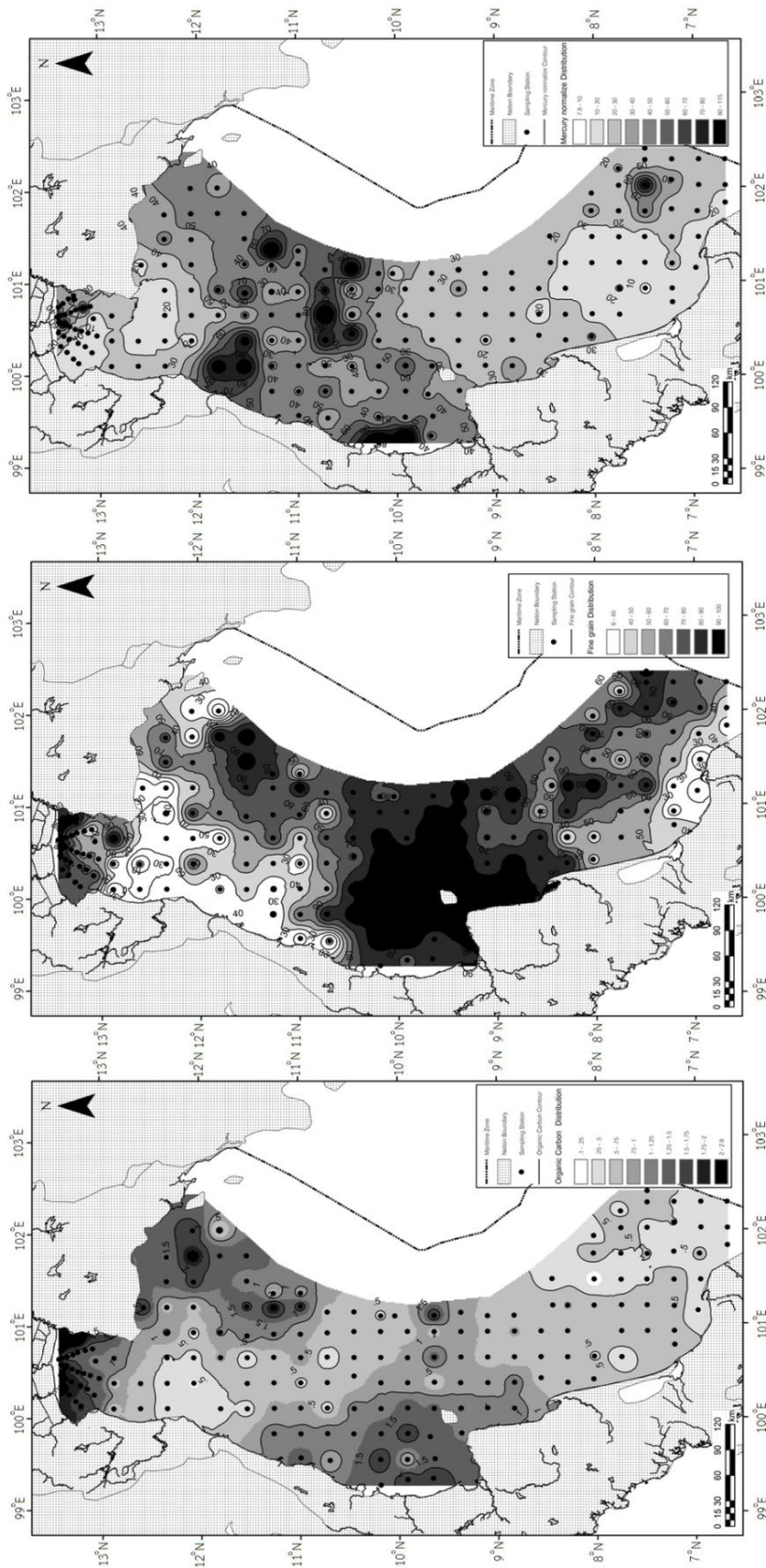
รูปที่ 18 แสดงการปนเปื้อนเชิงพื้นที่ของปรอท (carbonate free basis) ในดินตะกอนอ่าวไทย เมื่อพิจารณาร่วมกับ รูป 7 ในบทที่ 3 และตาราง ง-1 ในภาคผนวก ง จะเห็นได้ว่าสถานีที่มีค่าสูงอยู่ใกล้ปากแม่น้ำเจ้าพระยา (สถานี U5 และ U12) และใกล้เกาะสีชัง (สถานี U10)



รูปที่ 18 การกระจายเชิงพื้นที่ของปรอทที่ปนเปื้อนในผิวน้ำดินตะกอนอ่าวไทย

จากรูป 19 ซึ่งเปรียบเทียบการกระจายเชิงพื้นที่ของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ ปริมาณอนุภาคขนาดละเอียด (<63 μm) และปริมาณของปรอท (carbonate free basis) ในดินตะกอนอ่าวไทย จะเห็นว่าพื้นที่ที่ดินตะกอนมีปรอทสูงบริเวณปากแม่น้ำในอ่าวไทยตอนบนสอดคล้องกับบริเวณที่มีสารอินทรีย์และปริมาณอนุภาคตะกอนละเอียดสูง ทั้งนี้เพราะแหล่งที่มาของปรอทใน

อ่าวไทยตอนบนส่วนใหญ่มาจากแผ่นดิน เช่นเดียวกับสารอินทรีย์ ปรอทจะสร้างสารประกอบเชิงซ้อนที่แข็งแกร่งกับสารอินทรีย์ (Calmano et al., 1993) ดังนั้นปรอทจึงถูกคาร์บอนอินทรีย์ตรึงไว้ในดินตะกอนบริเวณนั้น นอกจากนี้ ขนาดดินตะกอนที่ละเอียดมีองค์ประกอบที่เป็นแร่ดินเหนียว (clay minerals) สูง ซึ่งแร่ดินเหนียวมีโครงสร้างเป็นอะลูมิเนียมซิลิเกต (aluminosilicate) ที่สามารถดูดซับโลหะหนักซึ่งรวมถึงปรอทได้ดี และตะกอนที่ละเอียดมีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะสูง จึงพบว่าความเข้มข้นของโลหะจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยของดินตะกอนลดลง (Bentivegna et al., 2004; Loring and Rantala, 1995) แต่พื้นที่ส่วนอื่นของอ่าวไทยมีแหล่งที่มาของปรอทหลากหลายกว่าและยังมีปัจจัยอื่น เช่น กระแสน้ำ จึงอธิบายปัจจัยและแหล่งที่มาของปรอทที่สะสมในดินตะกอนได้ยาก การใช้สถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ร่วมของแต่ละปัจจัยจะช่วยให้วิเคราะห์และแปลผลได้ชัดเจนมากขึ้น



รูปที่ 19 เปรียบเทียบการกระจายเชิงพื้นที่ของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (ซ้าย), ปริมาณอนุภาคละเอียด (<63 μm) (กลาง) และปริมาณของปรอท (carbonate free basis) (ขวา) ในดินตะกอนอ่าวไทย

4.5 ความสัมพันธ์ทางสถิติของปัจจัยต่างๆ ในดินตะกอน

จากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ตามหัวข้อ 4.1 ถึง 4.4 จะเห็นว่าหลายปัจจัยดูเหมือนจะมีความสัมพันธ์กัน เพื่อเป็นการยืนยัน จึงนำข้อมูลทั้งหมดมาหาความสัมพันธ์ทางสถิติ โดยหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ละคู่ด้วยการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficients) จากนั้นทำการจัดกลุ่มด้วย Hierarchical cluster analysis

4.5.1 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

จากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพื่อหาความสัมพันธ์ร่วมของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ ความเข้มข้นของปรอท และสัดส่วนอนุภาคละเอียด (< 63 ไมโครเมตร) ในดินตะกอน ทุกสถานีในอ่าวไทย ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 11 ผลที่ได้พบว่าในภาพรวมทั้งอ่าวไทย ปริมาณปรอท อนุภาคดินตะกอนขนาดละเอียด และคาร์บอนอินทรีย์ มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกันทุกตัวแปร โดยที่คาร์บอนอินทรีย์มีความสัมพันธ์กับอนุภาคดินตะกอนขนาดละเอียดมากที่สุด รองลงมาเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทกับอนุภาคดินตะกอนขนาดละเอียดและความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทกับคาร์บอนอินทรีย์ ตามลำดับ

ตารางที่ 11 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอท อนุภาคดินตะกอนขนาดละเอียด และคาร์บอนอินทรีย์ของทุกสถานี

		Mercury	Fine grain particle	Organic Carbon
Mercury	Pearson Correlation	1	0.163 *	0.153 *
	Sig. (2-tailed)		0.031	0.043
	N	174	174	174
Fine grain particle	Pearson Correlation	0.163 *	1	0.341 **
	Sig. (2-tailed)	0.031		0.000
	N	174	174	174
Organic Carbon	Pearson Correlation	0.153 *	0.341 **	1
	Sig. (2-tailed)	0.043	0.000	
	N	174	174	174

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

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

จากการวิเคราะห์ทั้งอ่าวพร้อมกันทุกสถานี พบว่าแม้ว่าจะมีความสัมพันธ์กันระหว่างปัจจัย แต่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าต่ำ เนื่องจากอาจจะมีปัจจัยอื่น เช่น แหล่งกำเนิดที่ต่างกัน

ดังนั้น จึงแบ่งพื้นที่อ่าวไทยออกเป็น 3 ตอน คือ อ่าวไทยตอนบน ตอนกลาง และตอนล่าง เมื่อหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แยกตามพื้นที่แต่ละตอน พบว่า

ก) อ่าวไทยตอนบน

ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์กับอนุภาคขนาดละเอียดในอ่าวไทยตอนบน มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญสูงมาก ที่ระดับ 0.01 ส่วนปรอทมีความสัมพันธ์กับอนุภาคขนาดละเอียดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ซึ่งมากกว่าที่มีกับคาร์บอนอินทรีย์ (ตารางที่ 12)

ข) อ่าวไทยตอนกลาง

ในอ่าวไทยตอนกลาง ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอท กับทั้งอนุภาคขนาดละเอียด และปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (ตารางที่ 13) บ่งชี้ว่าอ่าวไทยส่วนนี้น่าจะมีแหล่งกำเนิดของปรอทที่แตกต่างกันในแต่ละสถานี

ค) อ่าวไทยตอนล่าง

ทุกปัจจัยในอ่าวไทยตอนล่าง มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01 โดยที่คาร์บอนอินทรีย์มีความสัมพันธ์กับอนุภาคขนาดละเอียดมากที่สุด รองลงมาเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปรอทกับอนุภาคขนาดละเอียด และความสัมพันธ์ระหว่างปรอทกับคาร์บอนอินทรีย์ตามลำดับ (ตารางที่ 14)

ตารางที่ 12 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอท อนุภาคดินตะกอนขนาดละเอียด และคาร์บอนอินทรีย์บริเวณอ่าวไทยตอนบน

		Mercury	Fine grain particle	Organic Carbon
Mercury	Pearson Correlation	1	0.341 *	0.307
	Sig. (2-tailed)		0.045	0.073
	N	35	35	35
Fine grain particle	Pearson Correlation	0.341 *	1	0.812 **
	Sig. (2-tailed)	0.045		0.000
	N	35	35	35
Organic Carbon	Pearson Correlation	0.307	0.812 **	1
	Sig. (2-tailed)	0.073	0.000	
	N	35	35	35

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

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

ตารางที่ 13 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอท อนุภาคดินตะกอนขนาดเล็ก และ คาร์บอนอินทรีย์บริเวณอ่าวไทยตอนกลาง

		Mercury	Fine grain particle	Organic Carbon
Mercury	Pearson Correlation	1	0.189	0.079
	Sig. (2-tailed)		0.114	0.513
	N	71	71	71
Fine grain particle	Pearson Correlation	0.189	1	0.215
	Sig. (2-tailed)	0.114		0.071
	N	71	71	71
Organic Carbon	Pearson Correlation	0.079	0.215	1
	Sig. (2-tailed)	0.513	0.071	
	N	71	71	71

ตารางที่ 14 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอท อนุภาคดินตะกอนขนาดเล็ก และ คาร์บอนอินทรีย์บริเวณอ่าวไทยตอนล่าง

		Mercury	Fine grain particle	Organic Carbon
Mercury	Pearson Correlation	1	0.363 **	0.353 **
	Sig. (2-tailed)		0.002	0.003
	N	68	68	68
Fine grain particle	Pearson Correlation	0.363 **	1	0.510 **
	Sig. (2-tailed)	0.002		0.000
	N	68	68	35
Organic Carbon	Pearson Correlation	0.353 **	0.510 **	1
	Sig. (2-tailed)	0.003	0.000	
	N	68	68	68

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

4.5.2 การวิเคราะห์การจัดกลุ่ม

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ตรึงปรอทไว้กับดินตะกอน กับปริมาณปรอทที่สะสมในดินตะกอน ในหัวข้อ 4.5.1 ก็ยังไม่สามารถระบุสาเหตุที่ทำให้ปริมาณปรอทที่สะสมในดินตะกอนแต่ละสถานีแตกต่างกัน ดังนั้น จึงได้ทำการจัดกลุ่มสถานีด้วยวิธี Hierarchical cluster analysis โดยใช้ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ ความเข้มข้นของปรอท และสัดส่วนอนุภาคละเอียด (< 63 ไมโครเมตร) เป็นตัวแปรในการแบ่งกลุ่ม เมื่อใช้ distance cluster combine เท่ากับ 5 จะ

แบ่งกลุ่มสถานีได้เป็น 3 กลุ่ม (รูปที่ 20 และตารางที่ 15) รูปที่ 21 แสดงกลุ่มของสถานีตาม Hierarchical cluster ในเชิงพื้นที่

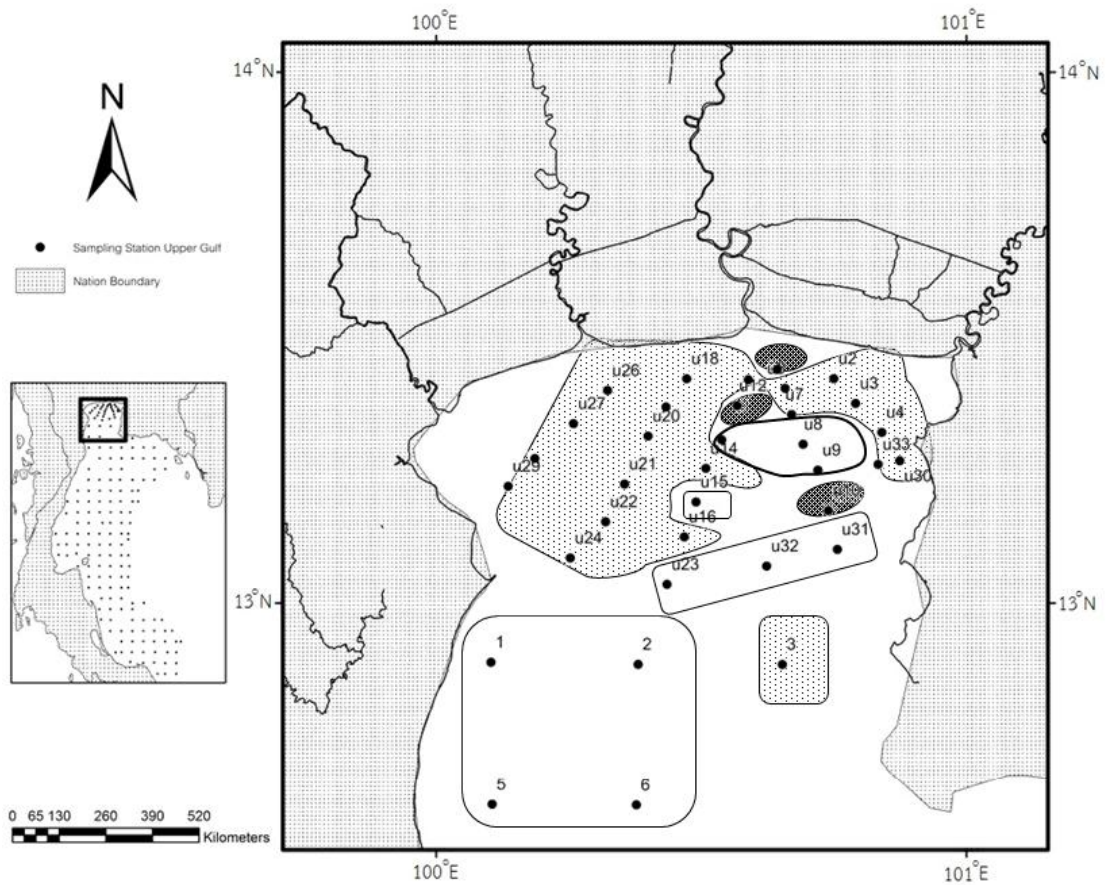
เมื่อวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในแต่ละกลุ่ม พบว่า แต่ละกลุ่มประกอบด้วยสถานีต่างๆ และขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ก) กลุ่ม I มี 54 สถานี กลุ่มนี้มีค่าปรอทต่ำ เฉลี่ยเท่ากับ 23.9 ± 11.0 ไมโครกรัมต่อ กิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอนมีความสัมพันธ์กับ ปริมาณตะกอนละเอียด แต่ปรอทในดินตะกอนมีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์เท่านั้น ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (ตารางที่ 16) ดินตะกอนในกลุ่มนี้มีขนาดอนุภาคหยาบกว่าและมีสารอินทรีย์น้อยกว่าอีก 2 กลุ่ม
- ข) กลุ่ม II มี 103 สถานี ครอบคลุมพื้นที่มากที่สุดในอ่าวไทย กลุ่มนี้มีค่าปรอทต่ำ เช่นกัน เฉลี่ยเท่ากับ 29.6 ± 11.7 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอนกลุ่มนี้มีความสัมพันธ์กับปริมาณอนุภาคขนาดละเอียด และปรอทในดินตะกอนก็มีความสัมพันธ์ทั้งกับคาร์บอนอินทรีย์และอนุภาคขนาดละเอียด ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 (ตารางที่ 17)
- ค) กลุ่ม III มี 17 สถานี กลุ่มนี้มีค่าเฉลี่ยของปรอทสูงสุด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 89.1 ± 14.8 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัย ไม่พบความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันในแต่ละปัจจัย (ตารางที่ 18)

อาจกล่าวได้ว่าค่าปรอทในกลุ่ม II น่าจะเป็นค่าพื้นฐานของอ่าวไทย เมื่อยังไม่มีอุตสาหกรรมการขุดเจาะ สํารวจและผลิตปิโตรเลียมในอ่าวไทยมากนัก ค่าปรอทที่สูงในกลุ่ม III น่าจะ มาจากการปนเปื้อนจากแหล่งที่มาจำเพาะในพื้นที่ ซึ่งเมื่อพิจารณารูปที่ 22 พบว่าพื้นที่นอกชายฝั่ง จังหวัดชุมพร (สถานี 53, 68, 69, 70, 71, 76, และ 79) และนอกฝั่งจังหวัดปัตตานี (สถานี 167) จะเป็นพื้นที่ใกล้เคียงกับแหล่งแก๊สและน้ำมันปิโตรเลียมในอ่าวไทย บริเวณชายฝั่งชุมพร (สถานี 80 และ 88) เป็นพื้นที่ใกล้เคียงกับแท่นขุดเจาะน้ำมันนางนวล ส่วนนอกชายฝั่งอำเภอทับสะแก จังหวัด ประจวบคีรีขันธ์ (สถานี 29, 38, และ 39) อาจมีความสัมพันธ์กับแนวท่อส่งแก๊สในบริเวณนี้

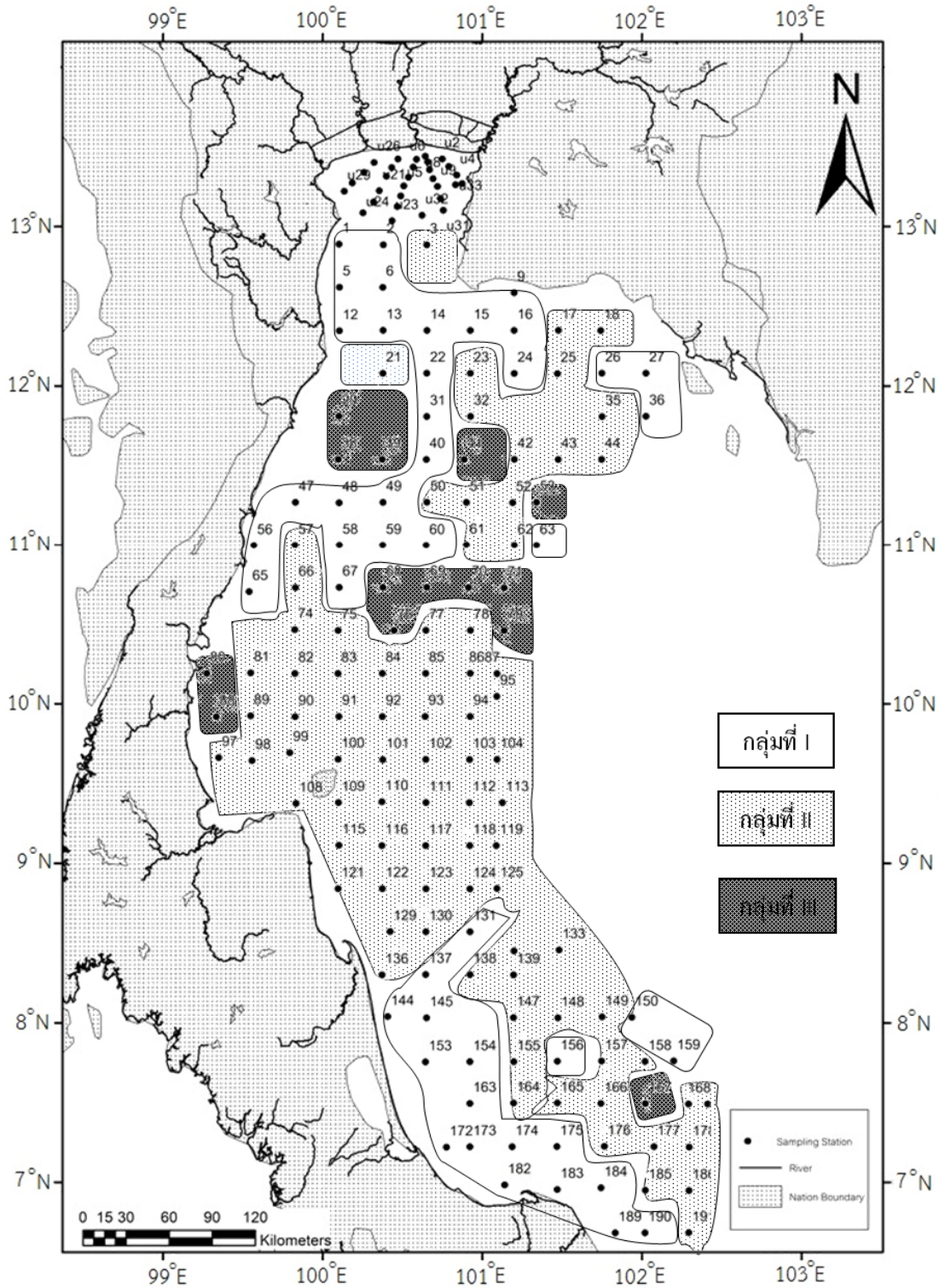
ตารางที่ 15 ค่าเฉลี่ยปริมาณดินตะกอนขนาดละเอียด ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ และปริมาณปรอท
ของแต่ละกลุ่มที่ได้จากการจัดกลุ่มโดย cluster

กลุ่ม I	อ่าวไทยตอนบน	U8, U9, U13, U15, U23, U31, U32, 1, 2, 5 และ 6		
	อ่าวไทยตอนกลาง	9, 12, 13, 14, 15, 16, 22, 24, 26, 27, 31, 36, 40, 47, 48, 49, 56, 58, 59, 60, 63, 65 และ 67		
	อ่าวไทยตอนล่าง	131, 132, 137, 144, 145, 150, 153, 154, 156, 159, 163, 172, 173, 174, 175, 182, 183, 184, 189 และ 190		
	ตะกอนขนาด < 63 ไมโครเมตร (ร้อยละ)	เฉลี่ย 37.1 ± 14.0	พิสัย 58.5 – 99.6	
คาร์บอนอินทรีย์ (ร้อยละ)	เฉลี่ย 0.76 ± 0.42	พิสัย 0.11 – 2.77		
ปรอท (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง)	เฉลี่ย 23.9 ± 11.0	พิสัย 8.43 – 61.5		
กลุ่ม II	อ่าวไทยตอนบน	U2, U3, U4, U6, U7, U11, U14, U16, U18, U19, U20, U21, U22, U24, U26, U27, U28, U29, U30, U33 และ 3		
	อ่าวไทยตอนกลาง	17, 18, 21, 23, 25, 32, 35, 42, 43, 44, 50, 51, 52, 57, 61, 62, 66, 74, 75, 77, 78, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 89, 90, 91, 92, 93, 94 และ 95		
	อ่าวไทยตอนล่าง	97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 115, 116, 117, 118, 119, 121, 122, 123, 124, 125, 129, 130, 133, 136, 138, 139, 147, 148, 149, 155, 157, 158, 164, 165, 166, 168, 169, 176, 177, 178, 185, 186 และ 191		
	ตะกอนขนาด < 63 ไมโครเมตร (ร้อยละ)	เฉลี่ย 85.6 ± 11.6	พิสัย 6.28 – 60.6	
คาร์บอนอินทรีย์ (ร้อยละ)	เฉลี่ย 1.19 ± 0.60	พิสัย 0.22 – 2.19		
ปรอท (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง)	เฉลี่ย 29.6 ± 11.7	พิสัย 7.67 – 50.5		
กลุ่ม III	อ่าวไทยตอนบน	U5, U10 และ U12		
	อ่าวไทยตอนกลาง	29, 38, 39, 41, 53, 68, 69, 70, 71, 76, 79, 80 และ 88		
	อ่าวไทยตอนล่าง	167		
	ตะกอนขนาด < 63 ไมโครเมตร (ร้อยละ)	เฉลี่ย 70.2 ± 21.3	พิสัย 28.8 – 97.9	
คาร์บอนอินทรีย์ (ร้อยละ)	เฉลี่ย 0.91 ± 0.58	พิสัย 0.31 – 2.37		
ปรอท (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง)	เฉลี่ย 89.1 ± 14.8	พิสัย 58.3 – 110.8		



(ก) อ่าวไทยตอนบน

รูปที่ 21 แสดงการจัดกลุ่มของสถานีที่มีความคล้ายคลึงกันโดยใช้วิธีการจัดกลุ่มแบบ Hierarchical cluster analysis ที่ distance cluster combine = 5 (ก) อ่าวไทยตอนบนและ (ข) อ่าวไทยกลางและตอนล่าง



(ก) อ่าวไทยตอนกลางและตอนล่าง

รูปที่ 21 (ต่อ)

ตารางที่ 16 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอท อนุภาคดินตะกอนขนาดเล็ก และ คาร์บอนอินทรีย์ของกลุ่ม I

		Mercury	Fine grain particle	Organic Carbon
Mercury	Pearson Correlation	1	-0.161	0.344 *
	Sig. (2-tailed)		0.245	0.011
	N	54	54	54
Fine grain particle	Pearson Correlation	-0.161	1	0.039
	Sig. (2-tailed)	0.245		0.780
	N	54	54	54
Organic Carbon	Pearson Correlation	0.344 *	0.039	1
	Sig. (2-tailed)	0.011	0.780	
	N	54	54	54

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

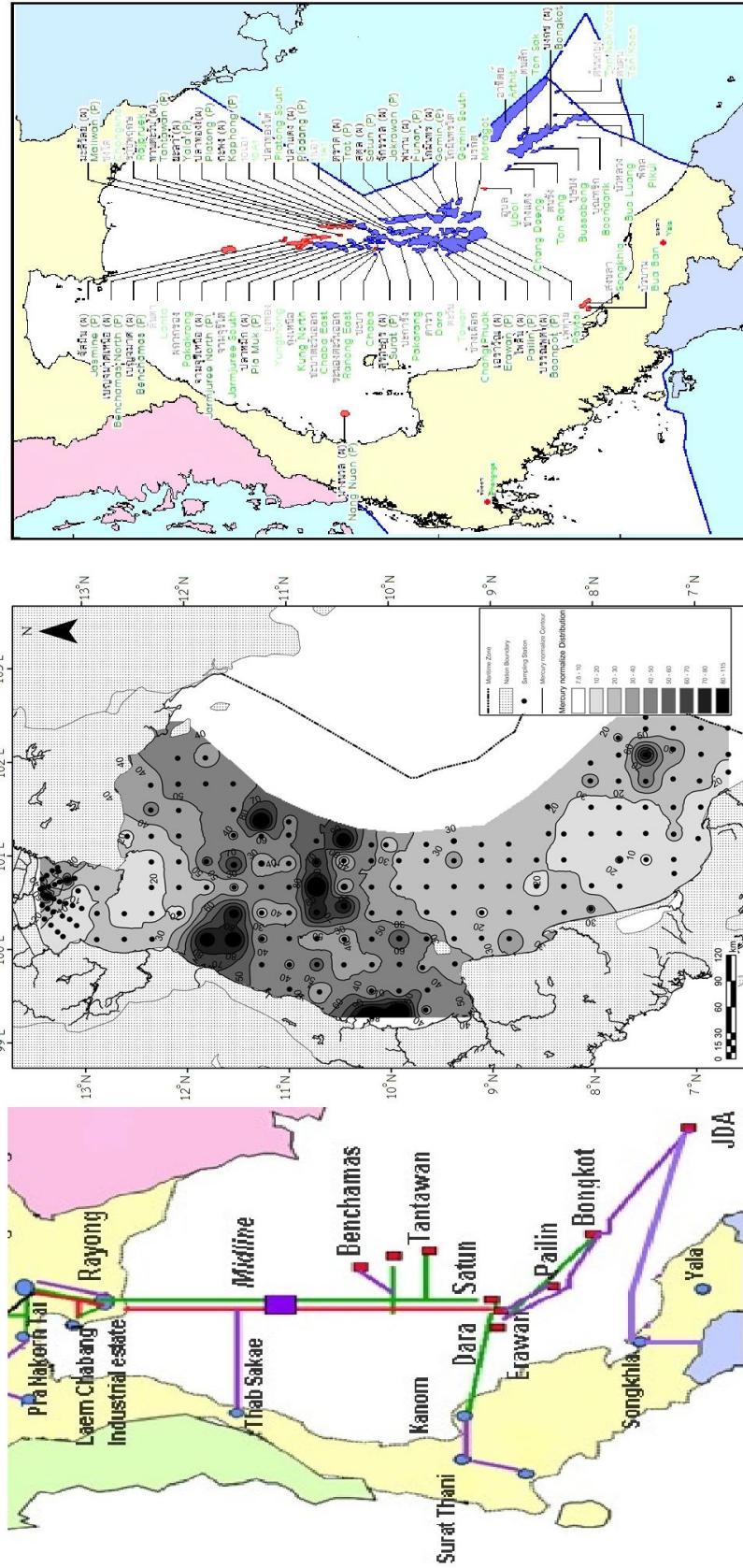
ตารางที่ 17 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอท อนุภาคดินตะกอนขนาดเล็ก และ คาร์บอนอินทรีย์ของกลุ่ม II

		Mercury	Fine grain particle	Organic Carbon
Mercury	Pearson Correlation	1	0.296 **	0.273 **
	Sig. (2-tailed)		0.002	0.005
	N	103	103	103
Fine grain particle	Pearson Correlation	0.296 **	1	0.269 **
	Sig. (2-tailed)	0.002		0.006
	N	103	103	103
Organic Carbon	Pearson Correlation	0.273 **	0.269 **	1
	Sig. (2-tailed)	0.005	0.006	
	N	103	103	103

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

ตารางที่ 18 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอท อนุภาคดินตะกอนขนาดเล็ก และ คาร์บอนอินทรีย์ของกลุ่ม III

		Mercury	Fine grain particle	Organic Carbon
Mercury	Pearson Correlation	1	0.405	0.345
	Sig. (2-tailed)		0.107	0.176
	N	17	17	17
Fine grain particle	Pearson Correlation	0.405	1	0.393
	Sig. (2-tailed)	0.107		0.119
	N	17	17	54
Organic Carbon	Pearson Correlation	0.345	0.393	1
	Sig. (2-tailed)	0.176	0.119	
	N	17	54	17



รูปที่ 22 เปรียบเทียบการกระจายของปรอทในดินตะกอนเชิงพื้นที่ (กลาง) กับแผนที่แหล่งแก๊สและน้ำมัน (ขวา) และท่อส่งแก๊ส (ซ้าย) ในอ่าวไทย

4.6 การวิเคราะห์ความรุนแรงของการปนเปื้อนปรอทในอ่าวไทย

ความรุนแรงของการปนเปื้อนปรอทในดินตะกอนอ่าวไทย อาจจะพิจารณาได้หลายวิธี ได้แก่ การหาค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี (geoaccumulation index: Igeo) (Müller, 1969) หรือ พิจารณาร่วมกับระดับความเข้มข้นที่เสนอไว้ในข้อเสนอแนวทางคุณภาพดินตะกอนทะเลและชายฝั่งที่มีกำหนดไว้ในหลายประเทศ

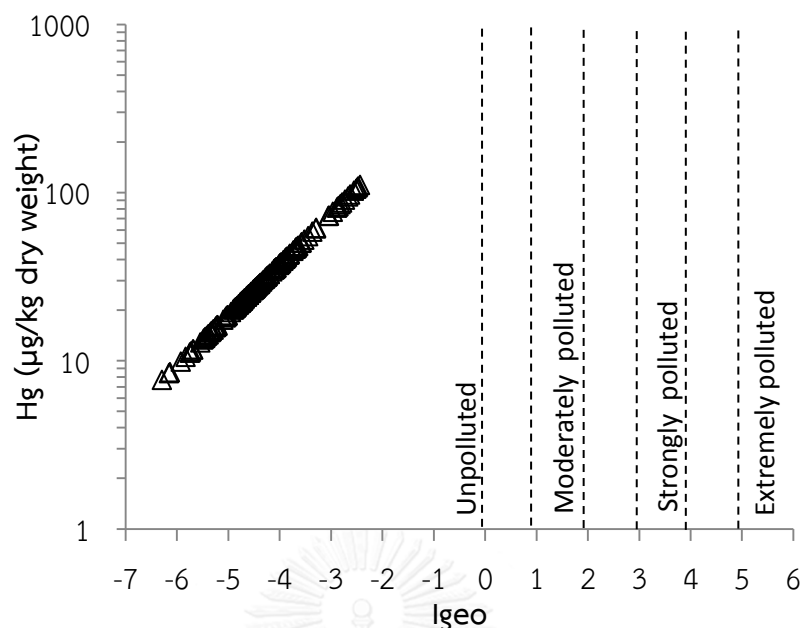
4.6.1 ดัชนีการการสะสมเชิงธรณี (geoaccumulation index: Igeo)

ค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี หรือ Igeo (Müller, 1969) แยกระดับความรุนแรงของการปนเปื้อนออกเป็น 7 ระดับ ดังตารางที่ 6 ในบทที่ 3 จากการคำนวณค่า Igeo คำนวณโดยใช้สมการในหัวข้อ 3.5.3 พบว่า ดินตะกอนอ่าวไทยแต่ละสถานีมีค่า Igeo ของปรอทในตั้งแต่ (-6.3) ถึง (-2.4) ซึ่งมีย่านน้อยกว่า 0 ทุกสถานี ค่า Igeo ของการปนเปื้อนปรอทที่สะสมในดินตะกอนแต่ละสถานี รายงานไว้ในตาราง จ-1 ในภาคผนวก จ

เมื่อเทียบกับเกณฑ์ในตารางที่ 6 ในบทที่ 3 สามารถสรุปได้ว่า ดินตะกอนในอ่าวไทยทุกสถานี จัดอยู่ในระดับที่ไม่มีการปนเปื้อน (รูปที่ 23)

4.6.2 เกณฑ์แนวทางคุณภาพดินตะกอนทะเลและชายฝั่ง

ในบางประเทศได้กำหนดเกณฑ์แนวทางคุณภาพดินตะกอนทะเลและชายฝั่ง (Coastal and Marine Sediment Quality Guidelines) เมื่อพิจารณาระดับปรอทที่สะสมในแต่ละสถานี โดยเทียบกับค่าเกณฑ์ที่ส่งผล (Effect Range) ที่ใช้ในสหรัฐอเมริกา และค่า Interim Sediment Quality Values (ISQV) ที่ใช้ในออสเตรเลีย-นิวซีแลนด์ และฮ่องกง (ตารางที่ 5 บทที่ 2) พบว่า ปริมาณปรอทสูงสุดในดินตะกอนอ่าวไทยของการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 110.8 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ค่าปรอทในดินตะกอนอ่าวไทยจากการศึกษาครั้งนี้ ยังมีค่าไม่เกินค่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่ส่งผล (Effect Range Low; ERL) ของสหรัฐอเมริกา (150 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง) และค่า ISQV-Low ของออสเตรเลีย-นิวซีแลนด์ และฮ่องกง (150 และ 280 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ)

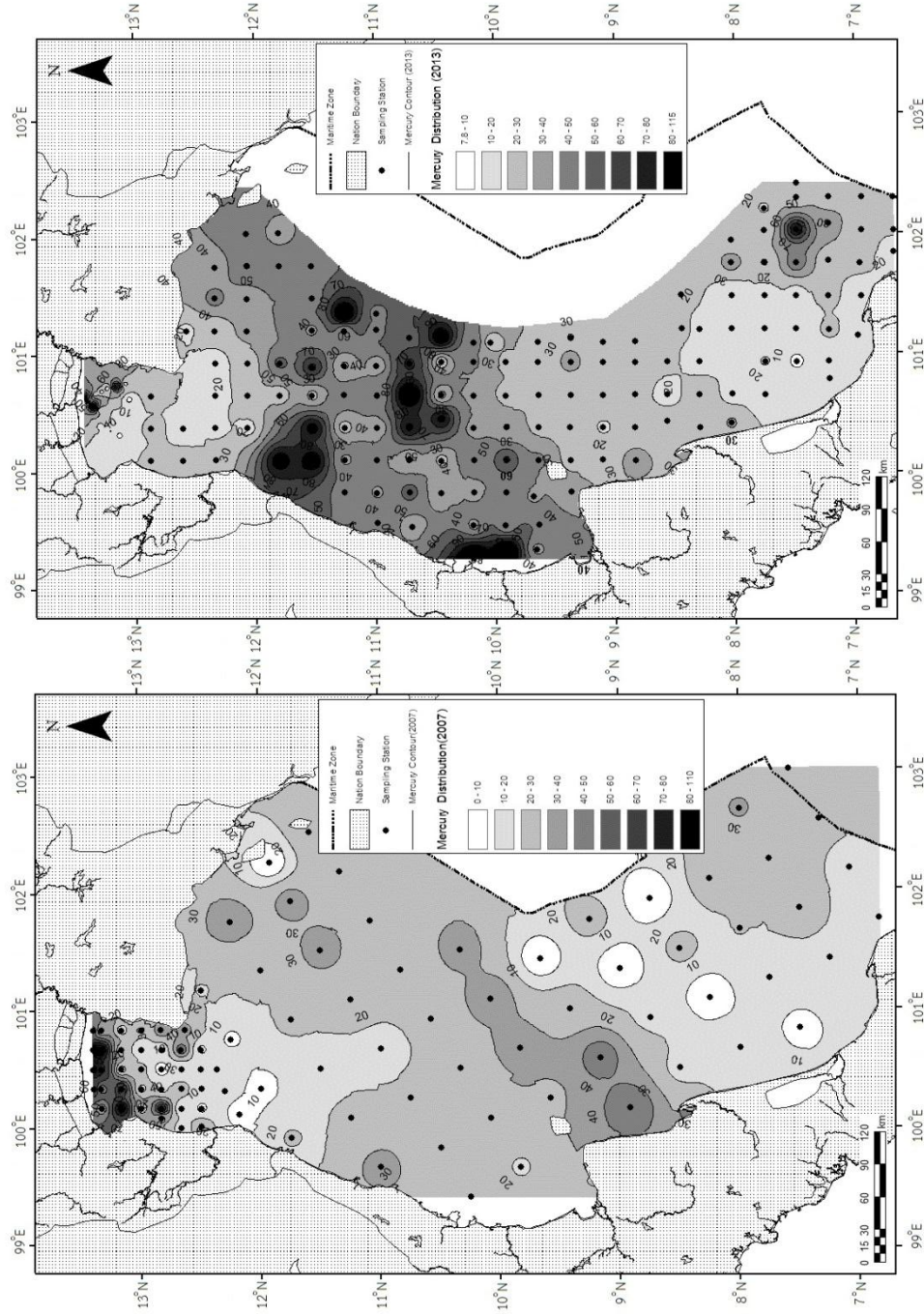


รูปที่ 23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของปรอทในดินตะกอน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง) กับดัชนีบ่งชี้ความรุนแรง (Igeo) โดยเส้นประเป็นเส้นที่แบ่งขอบเขตระดับของการปนเปื้อนในดินตะกอน

4.6.3 เปรียบเทียบการกระจายของปรอทเชิงพื้นที่กับการศึกษาที่ผ่านมา

แม้ว่าค่าดัชนีบ่งชี้ความรุนแรงของปรอทในดินตะกอนอ่าวไทยบ่งบอกว่าเป็นระดับที่ไม่ปนเปื้อน แต่เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 24 ที่เปรียบเทียบการกระจายของปรอทเชิงพื้นที่จากการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งเก็บตัวอย่างในปี พ.ศ. 2553 – 2555 กับการศึกษาของ (Buakaew, 2007) ซึ่งเก็บตัวอย่างในปี พ.ศ. 2546 จะเห็นว่า การปนเปื้อนของปรอทในดินตะกอนอ่าวไทยในระยะเวลาที่ห่างกันเกือบ 10 ปี มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะบริเวณกลางอ่าว ปริมาณปรอทที่สูงขึ้นนี้ จึงพึงระวังว่า หากละเลยการกำกับดูแลกิจกรรมที่เกิดขึ้นในอ่าวไทย ปริมาณปรอทในดินตะกอน อาจสูงจนถึงเกณฑ์ที่จัดว่าปนเปื้อนได้

เมื่อเปรียบเทียบการปนเปื้อนปรอทในดินตะกอนจากการศึกษาครั้งนี้ กับรายงานที่ทำการศึกษาในต่างประเทศ ซึ่งได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4 ในบทที่ 2 ดินตะกอนอ่าวไทยจัดอยู่ในกลุ่มสิ่งแวดล้อมที่ถูกรบกวน (disturbed marine environments)



รูปที่ 24 เปรียบเทียบการกระจายของปรอทเชิงพื้นที่ของการศึกษาคั้งนี้ (รูปขวา) กับการศึกษาของ Buakaew (2007) (รูปซ้าย)

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

ดินตะกอนในอ่าวไทยตอนบน ตอนกลาง และตอนล่าง มีองค์ประกอบขนาดอนุภาค คล้ายคลึงกัน แต่ดินตะกอนในอ่าวไทยตอนบนจะมีขนาดอนุภาคละเอียดมากกว่าตอนกลางและตอนล่าง โดยส่วนใหญ่จะเป็นดินเหนียวปนทรายแป้ง (silty clay) และทรายแป้งปนดินเหนียว (clayey silt) ซึ่งบริเวณใกล้ปากแม่น้ำจะมีอนุภาคดินตะกอนขนาดละเอียดกว่า 63 ไมโครเมตร ในปริมาณที่สูงกว่าที่อื่น สำหรับอ่าวไทยตอนกลางแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มที่ดินตะกอนมีขนาดค่อนข้างหยาบ (clayey sand, silty sand และ sand) และกลุ่มที่ดินตะกอนมีขนาดเล็ก (silty clay และ sand silt clay) ส่วนอ่าวไทยตอนล่างเป็นดินเหนียวปนทรายแป้ง (silty clay) และประเภทที่มีทั้งสามขนาดพอๆ กัน (sand silt clay) เป็นส่วนใหญ่

ค่าเฉลี่ยของคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอนจากอ่าวไทยตอนบน ตอนกลาง และตอนล่าง มีค่าร้อยละ 1.60 ± 0.60 , 0.93 ± 0.48 และ 0.69 ± 0.34 ตามลำดับ ดินตะกอนในอ่าวไทยตอนบนมีคาร์บอนอินทรีย์สูงกว่าพื้นที่ศึกษาอื่น เนื่องจากบริเวณนี้อยู่ใกล้แม่น้ำสายหลักทั้ง 5 สาย นั่นคือ บางปะกง เจ้าพระยา ท่าจีน แม่กลอง และเพชรบุรี นอกจากนี้บริเวณที่พบคาร์บอนอินทรีย์สูง ได้แก่ นอกชายฝั่งจังหวัดจันทบุรีถึงตราด และนอกชายฝั่งจังหวัดชุมพรถึงสุราษฎร์ธานี จะมีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์สูงเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณอนุภาคดินตะกอนขนาดละเอียด เมื่อเทียบกับข้อมูลการศึกษาก่อนหน้านี้ จะเห็นว่าปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สำหรับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต อ่าวไทยตอนบน ตอนกลาง และตอนล่าง มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 11.2 ± 4.4 , 14.5 ± 3.9 และ 14.1 ± 5.6 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาครั้งก่อนหน้า โดยในทะเลที่อยู่ด้านนอกออกไปจะมีค่าสูงเนื่องจากห่างไกลจากอิทธิพลของน้ำจืดกว่าพื้นที่ใกล้ชายฝั่ง ในขณะที่นอกชายฝั่งจังหวัดสงขลาพบปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตมาก และเป็นพื้นที่ที่ดินตะกอนมีองค์ประกอบขนาดอนุภาคทรายเป็นหลัก

ปรอทในดินตะกอนอ่าวไทยหลังปรับฐานด้วยคาร์บอนัต อยู่ในช่วง 7.7 ถึง 110.8 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง โดยมีค่าเฉลี่ยในอ่าวไทยตอนบน ตอนกลาง และตอนล่าง เท่ากับ 28.7 ± 23.0 , 45.1 ± 24.1 และ 24.3 ± 10.9 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ มีการกระจายตัวเชิงพื้นที่ที่หลากหลาย โดยพบว่าอ่าวไทยตอนบนบางสถานี และชายฝั่งจังหวัด ประจวบคีรีขันธ์และชุมพร มีปรอทในดินตะกอนสูงกว่าที่อื่น นอกจากนี้บริเวณกลางอ่าวนอกฝั่ง จังหวัดชุมพรและสงขลา จะมีปริมาณปรอทในดินตะกอนสูง แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับทั้งปริมาณ คาร์บอนอินทรีย์และอนุภาคดินตะกอนขนาดละเอียด ขณะที่พื้นที่อื่นๆ นอกเหนือจากที่กล่าวไปข้างต้น จะพบความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ซึ่งดินตะกอนที่มีขนาดละเอียดที่มืองค์ประกอบขนาดดินเหนียวและทรายแป้ง จะมีผลต่อการสะสมปรอทในดินตะกอน ทั้งนี้เพราะในองค์ประกอบขนาดละเอียด โดยเฉพาะที่มีขนาดเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร จะเป็นพวกแร่ดินเหนียว (clay minerals) มีโครงสร้างทางเคมีเป็นอะลูมิเนียมซิลิเกต (aluminosilicate) ที่สามารถดูดซับปรอทได้ดี อีกทั้งตะกอนที่ละเอียดจะมีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะสูง จึงมักพบว่าความเข้มข้นของปรอทจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยของดินตะกอนลดลง คาร์บอนอินทรีย์ยังมีอิทธิพลต่อการสะสมตัวของปรอทในดินตะกอนโดยที่คาร์บอนอินทรีย์จะคีเลต (chelate) กับสารฮิวมิก (humic substance) ในดินตะกอนซึ่งจะสร้างพันธะเชิงซ้อนกับปรอท

จากการจัดกลุ่มข้อมูลโดยใช้เทคนิค hierarchy cluster analysis ซึ่งแบ่งที่ distance cluster combine เท่ากับ 5 สามารถแบ่งกลุ่มได้ 3 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ I เป็นสถานีในพื้นที่ตั้งแต่จังหวัดเพชรบุรีถึงประจวบคีรีขันธ์ และชายฝั่งจังหวัดสงขลาถึงปัตตานี ซึ่งปริมาณปรอทในดินตะกอนมีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ สถานีส่วนใหญ่จะอยู่ในกลุ่มที่ II ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่อ่าวไทยตอนกลางถึงตอนล่าง ตั้งแต่จังหวัดชุมพรถึงนอกชายฝั่งปัตตานี โดยเป็นกลุ่มที่ปริมาณปรอทมีความสัมพันธ์กับอนุภาคดินตะกอนขนาดละเอียดและคาร์บอนอินทรีย์ และดินตะกอนขนาดละเอียดกับคาร์บอนอินทรีย์มีความสัมพันธ์กัน อาจกล่าวได้ว่าการสะสมปรอทในดินตะกอนของกลุ่มนี้เป็นการสะสมตามธรรมชาติ โดยขึ้นกับปริมาณอนุภาคละเอียดและปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินตะกอน ซึ่งค่าปรอทในกลุ่มนี้อาจใช้เป็นค่าพื้นฐานของดินตะกอนอ่าวไทยได้

ส่วนกลุ่มที่ III เป็นกลุ่มที่มีค่าเฉลี่ยของปริมาณปรอทสูงที่สุด แต่ไม่พบความสัมพันธ์กับปัจจัยใด ปริมาณปรอทในดินตะกอนที่สูงมาจากการปนเปื้อนจากแหล่งกำเนิดภายนอก โดยสถานีในกลุ่มที่ III ประกอบด้วย สถานี U5 และ U12 ซึ่งอยู่นอกปากแม่น้ำเจ้าพระยา สถานี U10 ซึ่งอยู่ใกล้เกาะสีชังและแหลมฉบัง สถานี 29, 38, 39 และ 41 นอกชายฝั่งจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ สถานี 80 และ 88 นอกชายฝั่งจังหวัดชุมพร สถานี 53, 70, 71, 76 และ 79 ซึ่งอยู่บริเวณกลางอ่าว และ สถานี 167 นอกฝั่งจังหวัดสงขลา

พื้นที่ในกลุ่ม III ข้างต้นตั้งอยู่ใกล้กับแหล่งที่มีกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับแก๊สและปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน ซึ่งดูเหมือนจะเป็นสาเหตุหลักของการปนเปื้อนปรอทในดินตะกอน นอกจากนี้สถานี U5, U10 และ U12 เป็นพื้นที่ที่ใกล้เกาะสีชังและแหลมฉบังซึ่งบริเวณนี้มีเรือสินค้าเข้า-ออก เพื่อการส่งสินค้าจำนวนมาก ต้องมีกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับน้ำมัน เช่น การเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเรือ เป็นต้น ซึ่งอาจเกิดการรั่วไหลของน้ำมันทำให้เกิดการปนเปื้อนของปรอทในดินตะกอนในพื้นที่นี้ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในระยะเวลากว่า 10 ปีที่ผ่านมา จากปี พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2555 มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณปรอทที่สะสมในดินตะกอน โดยเฉพาะในอ่าวไทยตอนกลาง สถานีที่พบค่าปรอทในดินตะกอนสูง ตั้งอยู่ใกล้กับแหล่งผลิตแก๊สและปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน โดยแนวโน้มของปรอทที่สะสมในดินตะกอนมีเกณฑ์สูงขึ้น หากการกำกับดูแลหรือการควบคุมขั้นตอนการผลิตขาดประสิทธิภาพ ประกอบกับการละเลยมาตรการดูแลเรื่องการใช้น้ำมันหรือการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันในกิจกรรมการขนส่งสินค้าโดยใช้เรือ อาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนปรอทในดินตะกอน จนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สุขภาพ และการดำรงชีวิตได้

ดังนั้น การติดตามการปนเปื้อนปรอทในดินตะกอนผิวน้ำทั่วทั้งอ่าวไทยเป็นระยะๆ เช่น ทุก 3 ปี หรือ 5 ปี จะทำให้ติดตามตรวจสอบการปนเปื้อนได้อย่างทันที และควบคุมสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ การปนเปื้อนของปรอทในอ่าวไทยตอนบน ส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมบนฝั่ง (land-based sources) จึงต้องอาศัยความช่วยเหลือจากภาครัฐเข้ามาดูแลและออกมาตรการหรือแผนแม่บทในการควบคุมการรั่วไหลของปรอทของกิจกรรมบนแผ่นดิน ไม่ว่าจะมาจากชุมชน จากอุตสาหกรรม หรือจากเกษตรกรรม ที่ท้ายที่สุดก็จะไหลลงสู่อ่าวไทย

ในการศึกษาในอนาคต ควรจะต้องมีการศึกษาสัดส่วนของเมทิลเมอร์คิวรี (methyl mercury) ในดินตะกอนด้วย เนื่องจากเป็นรูทางเคมีของปรอทที่มีความเป็นพิษสูงที่สุด



รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ. (2554). รายงานประจำปี 2554. Retrieved 5 มีนาคม, 2557, from <http://www.dmf.go.th/resources/annualReport/annual/th/PDFMinistry2011th.pdf>.
- กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ. (2555). งาม - ตบยอดอดีตจากการสำรวจและผลิตปิโตรเลียมในประเทศไทย. Retrieved 5 มีนาคม, 2557, from http://www.dmf.go.th/file/QA_EPThai.pdf.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2540). เกณฑ์ระดับคุณภาพน้ำและมาตรฐานคุณภาพน้ำประเทศไทย. กรุงเทพฯ: กองจัดการคุณภาพน้ำ.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2541). รายงานการศึกษาปริมาณสารปรอทในสิ่งแวดล้อมทางทะเลของประเทศ ไทย: ฝ่ายมลพิษทางทะเล กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.
- กรมอนามัย. (2524). การสำรวจคุณภาพน้ำในย่านน้ำกร่อย. Paper presented at the การสัมมนา ครั้งที่ 2 การวิจัยคุณภาพน้ำและคุณภาพทรัพยากรมีชีวิตรในน่านน้ำไทย.
- กฤษดา หน่อเนื้อ. (2541). องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีบางประการของดินตะกอนในอ่าวไทย. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กัลยา วานิชย์บัญชา. (2544). การวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัวด้วย *SPSS for Windows*. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จารุมาศ เมฆสัมพันธ์. (2548). ดินตะกอน. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จิราภรณ์ อ่ำพันธ์. (2543). อันตรายจากปรอท ความรู้สิ่งเป็นพิษ ตอนที่ 14 (pp. 9-13). นนทบุรี: กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข.
- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2537). โครงการติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำในแม่น้ำสายหลัก พ.ศ. 2535-2536 : แม่น้ำบางปะกง. In คณะวิทยาศาสตร์ (Ed.): จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เจริญ วัชรรังษี, วิจิตร โทตรภวานนท์, ชัยวุฒิ เลาวเลิศ, สุนาฏ มลิณทะเลข, รจิต หยกอุบล, ธิดา เกิดกำไร, พัชรียา ฉัตรเท, นิพนธ์ พัฒนางกูร, and สมบูรณ์ ปัญญาภรณ์. (2524). แหล่งความสกปรกตามชายฝั่งทะเลด้านตะวันออกของอ่าวไทย. Paper presented at the การสัมมนาครั้งที่ 2 การวิจัยคุณภาพน้ำและคุณภาพทรัพยากรมีชีวิตรในน่านน้ำไทย.

- ทวีศักดิ์ ปิยะกาญจน์, อำไพ อธิธิเกษม, and รวิวรรณ วัชรพงศ์กุล. (2520). การเปลี่ยนแปลงของปริมาณตะกั่ว โปรท และแคดเมียมในน้ำและดินตะกอนในอ่าวไทยตอนบน. Paper presented at the การสัมมนาวิชาการ เรื่องปัญหามลภาวะของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมประเทศไทย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธัญชนก จันทร์คง. (2552). ปัจจัยที่มีผลต่อระดับของปรอทและสารหนูในตะกอนดินผิวน้ำบริเวณอ่าวปากพนัง ทะเลสาบสงขลาตอนใน และนอกปากทะเลสาบสงขลา. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 27. (2550). กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลราชกิจจานุเบกษา (Vol. 124, pp. 123).
- ปราโมทย์ ไศจิสุภร, ศุภิชัย ตั้งใจ, and สมมาตร เนียมนิล. (2546). หน่วยการเรียนรู้ที่ 1: พิสิกส์ในทะเล. In สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (Ed.), *Eye on the ocean* (pp. 119 - 120). กรุงเทพมหานคร.
- รัชนิกร บำรุงราชหิรัณย์, วรณภา จำราช, and ชันธ์พงศ์ จริงจิต. (2527). โลหะในน้ำทะเลและดินตะกอน. Paper presented at the การสัมมนาครั้งที่ 3 การวิจัยคุณภาพน้ำและคุณภาพทรัพยากรมีชีวิตในน่านน้ำไทย.
- รัชนิกร บำรุงราชหิรัณย์, วรณภา จำราช, and ชันธ์พงศ์ จริงจิต. (2530). โลหะในน้ำทะเลและดินตะกอนบริเวณชายฝั่งตะวันออกของอ่าวไทยตอนบน. Paper presented at the การสัมมนาครั้งที่ 3 การวิจัยคุณภาพน้ำและคุณภาพทรัพยากรมีชีวิตในน่านน้ำไทย.
- วรณภา จำราช. (2530). ปริมาณโลหะหนักในน้ำทะเลบริเวณอ่าวไทยตอนบน. Paper presented at the การสัมมนาครั้งที่ 4 การวิจัยคุณภาพน้ำและคุณภาพทรัพยากรมีชีวิตในน่านน้ำไทย.
- วรวิทย์ ชีวาพร, พวงกมล นวลสุทธิ, สายทิพย์ สวัสดิกุล, and เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต. (2542). การแพร่กระจายและสะสมของสารปรอทในสิ่งแวดล้อมทางทะเลบริเวณชายฝั่งภาคตะวันออก รายงานการวิจัยงบประมาณประจำปี 2541 (pp. 108). ชลบุรี: ภาควิชาวาริชศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
- วิไลวรรณ อุทุมพุกษ์พร, มนุดี หังสพุกษ์, ศิริชัย ธรรมวานิช, and ไชยยง ยวงทอง. (2530). การพัฒนาปรับปรุงการวิเคราะห์โลหะปริมาณน้อยในน้ำทะเลและน้ำแม่น้ำในรอบ 10 ปี. Paper presented at the การสัมมนาครั้งที่ 4 การวิจัยคุณภาพน้ำและคุณภาพทรัพยากรมีชีวิตในน่านน้ำไทย.
- สถาบันวิจัยทรัพยากรทางน้ำ. (2541). โครงการตรวจเฝ้าระวังปริมาณสารปรอทในอ่าวไทย ปี2541: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. (2528). ปรอท. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ.
- สำนักนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2545). รายงานฉบับสมบูรณ์เรื่องการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม โครงการโรงแยกก๊าซธรรมชาติ หน่วยที่ 5 จังหวัดระยอง. Retrieved 5 กันยายน, 2557, from <http://eia.onep.go.th/eialibrary/cd-001275.pdf/RT1020>
- สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2546). ส่วนที่ 5 นโยบายและมาตรการพลังงาน ปี 2546. Retrieved 15 มิถุนายน, 2557, from <http://www.eppo.go.th/doc/report-2546/5-policy-measure.html>
- สุธรรม สิทธิชัยเกษม, and สุวรรณิ เฉินบำรุง. (2527). การปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมบริเวณปากแม่น้ำของอ่าวไทยตอนใน. Paper presented at the การวิจัยคุณภาพน้ำและคุณภาพทรัพยากรมีชีวิตในน่านน้ำไทยครั้งที่ 3, กรุงเทพฯ.
- อนุกุล บุรณะประทีปรัตน์. (2551). การไหลเวียนของกระแสน้ำในอ่าวไทยตอนบน: การทบทวนงานวิจัย. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 13, 75 - 83.
- อำไพ อิทธิเกษม. (2521). ผลการวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อยในน้ำทะเลและดินตะกอน. Paper presented at the การสัมมนาการสำรวจและวิจัยสภาวะน้ำเสียในน่านน้ำไทย.
- อำไพ อิทธิเกษม, รัชนิกร บำรุงราชหิรัณย์, วรธนา แก้วภักดี, and ชันธ์พงศ์ จริงจิต. (2524). ผลการวิเคราะห์โลหะปริมาณน้อยในน้ำทะเลและดินตะกอน. Paper presented at the สัมมนาการวิจัยคุณภาพทรัพยากรมีชีวิตในน่านน้ำไทย ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ.

ภาษาอังกฤษ

- Aastrup, M., Johansson, K., Bringmark, L., and Iverfeldt, A. (1991). Occurance and Transport of Mercury within a small catchment area. *Water, Air and Soil Pollution*, 56, 162 – 165.
- Alonso, D., Pineda, P., Olivero, J., Gonzalez, H., and Compos, N. (2000). Mercury levels in muscel of two fish species and sediments from the Cartagena bay and Cienaga Grande de Santa Marta, Columbia. *Environmental Pollution*, 109, 157 – 163.
- Asmund, G., and Nielsen, S. (2000). Mercury in dated Greenland marine sediments. *Science of the Total Environment*, 245, 61 - 72.

- Bentivegna, C. S., Alfano, J., Bugal, S. M., and Czechowicz, K. (2004). Influence of sediment characteristics on heavy metal toxicity in an urban marsh. *Urban Habitats*, 2(1), 91-111
- Blake, N. (1980). *Land into Water - Water into Land*. USA: University Presses of Florida.
- Bloom, N. S., and Crecelius, E. A. (1987). Distribution of silver, mercury, lead, copper and cadmium in central Puget Sound sediments. *Marine Chemistry*, 21, 377-347.
- Bloom, N. S., Gill, G. A., Cappellino, S., Dobbs, C., Mcshea, L., Driscoll, C., Mason, R., and Rudd, J. (1999). Speciation and cycling of mercury in Levaca Bay, Texas, sediments. . *Environmental Science and Technology*., 33, 7 - 13.
- Bryan, G. W., and 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, 89 - 131.
- Buakaew, S. (2007). *Contamination of mercury in surface sediment in the Gulf of Thailand*. (master), Chulalongkorn University, bangkok.
- Buccolieri, A., Buccolieri, G., Cardellicchio, N., Dell'Atti, A., Di Leo, A., and Maci, A. (2006). Heavy metals in marine sediments of Taranto gulf (Ionian Sea, Southern Italy). *Marine Chemistry*, 99 227-235.
- Calmano, W., Hong, J., and Förstner, U. (1993). Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments affected by pH and redox potential. *Water Science and Technology*, 28, 22-235.
- Chester, R. (1993). *Marine Geochemistry*. London: Chapman & Hall.
- Chongprasith, P., and Wilairatanadilok, W. (1999). *Are Thai Waters Really Contaminated with Mercury?* . Paper presented at the Fourth ASEAN-Canada Technical Conference on Marine Science, 26-30 October 1998, , Langkawi, Malaysia.
- Clark, R. B. (1992). *Marine Pollution-Third Edition*. . New York: Oxford University Press.
- Covelli, S., Faganeli, J., Horvat, M., and Brambati, A. (2001). Mercury contamination of coastal sediments as the result of long-term cinnabar mining activity (Gulf of Trieste, northern Adriatic Sea). *Applied Geochemistry*, 16, 541 - 558.

- Dharmvanij, S. (1987) Sediment distribution in the Gulf of Thailand. *Rajchadapiseksompoj Research Report* (pp. 80). Bangkok: Chulalongkorn University.
- 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.
- Emsley, J. (2011). *Nature's Building Blocks: An A-Z Guide to the Elements*. Oxford UK: Oxford University Press.
- Engstrom, D., Swain, E., Henning, T., and Brigham, M. (1994). Atmospheric Mercury Deposition to Lakes and Watersheds. *American Chemical Society Advances in Chemistry, 237*, 33-66.
- EVS Environment Consultants. (1999). Heavy Metal and Petroleum Hydrocarbon Contamination in Industrial Areas *Final report. Prepared for Pollution Control Department*. Bangkok, Thailand.
- Fang, T. H., and Chen, R. Y. (2010). Mercury contamination and accumulation in sediments of East China Sea. *Journal of Environmental Sciences, 22(8)*, 1164-1170.
- Gobeil, C., MacDonald, R., and Smith, J. (1999). Mercury profiles in sediments of the Arctic Ocean basin. *Environmental Science and Technology., 33*, 4194 - 4198.
- 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. M., Gherini, S. A., Wastras, C. J., and Porcella, D. P. (1994). *Modeling the biogeochemical cycle of Mercury in lakes* (C. J. Watras & J. W. Huckabee Eds.): Lewis Publishers.
- Institute of Marine Science. (1994). *A study on Water Quality in the East Coast of Thailand*. Chonburi: Burapha University.
- Jickells, T. D., and Rae, J. E. (1997). *Biogeochemistry of intertidal sediments*: Cambridge University press.

- Johannessen, K., MacDonald, R., and Eek, K. (2005). Historical trends in mercury sedimentation and mixing in the Strait of Georgia, Canada. *Environmental Science and Technology*, 39, 4361 - 4368.
- Johansson, K., Aastrup, M., Andersson, A., Bringmark, L., and Iverfeldt, A. (1991). Mercury in the Swedish forest soil and waters - Assessment of critical load. *Water, Air and Soil Pollution*, 56, 267 - 279.
- Kan-atireklap, S. (1994). Mercury in the coastal seawater off Trat Province, Thailand. *Thai Marine Fisheries Research Bulletin*, 5(), 67 - 72.
- Kan-atireklap, S., Suwanagosoom, S., Buntivivutkul, S., and Sanguansin, J. (1998). Status of mercury contamination in seawater along Eastern Coast of the Gulf of Thailand between 1994 - 1996. *Thai Marine Fisheries Research Bulletin*, 6, 37 - 46.
- Kim, L. H., Choi, E., and Stenstrom, M. K. (2003). Sediment characteristic, phosphorus type and phosphorus release rates between river and lake sediment. *Chemosphere*, 50, 53-61.
- Kwokal, Z., Franciskovic-Bilinski, S., Bilinski, H., and Branica, M. (2002). A comparison of anthropogenic mercury pollution in Kastela Bay (Croatia) with pristine estuaries in ore (Sweden) and Krka (Croatia). *Marine Pollution Bulletin*, 44, 1152 - 1169.
- Leivuori, M. (1998). Heavy metal contamination in surface sediments in the Gulf of Finland and comparison with Gulf of Bothnia. *Chemosphere*, 36, 43 - 59.
- Lindquist, O., Johansson, K., Aastrup, M., Andersson A., Bringmark, L., Hovsenius, G., and Timm, B. (1991). Mercury in the Swedish environment-recent research on causes consequences and corrective methods. *Water, Air and Soil Pollution*, 55, 7-17.
- Loring, D. H., and Rantala, R. T. T. (1995). *Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter* (Vol. 63). Monaco IAEA - UNEP.
- Macleod, C. L., Scrimshaw, M. D., Emmerson, R. H. C., Chang Y.H., and Lester, J. N. (1999). Geochemical changes in metal and nutrient loading at Orland farm managed retreat site, Essex. *Marine Pollution Bulletin*, 38, 1115-1125.

- Mason, R. P., and Fitzgerald, W. F. (1996). Sources, Sinks and Biogeochemical Cycling of Mercury in the Ocean. In W. Baeyens, R. Ebinghaus & O. Vasiliev (Eds.), *Global and Regional Mercury Cycles: Sources, Fluxes and Mass Balances* (Vol. 21, pp. 249-272): Springer Netherlands.
- Mason, R. P., and Fitzgerald, W. F. (1997). Biogeochemical cycling of mercury in the marine environment. In A. Sigel & H. Sigel (Eds.), *Metal ions in biological systems* (Vol. 34, pp. 53-111): Marcel Dekker, Inc. .
- Meili, M. (1991a). 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. doi: 10.1007/BF00342281
- Meili, M. (1991b). Fluxes, pools, and turnover of mercury in Swedish forest lakes. *Water Air & Soil Pollution*, 56(1), 719-727. doi: 10.1007/BF00342312
- Meili, M., Iverfeldt, A., and Håkanson, L. (1991). Mercury in the surface water of Swedish forest lakes — concentrations, speciation and controlling factors. *Water Air & Soil Pollution*, 56(1), 439-453. doi: 10.1007/BF00342290
- Menasveta, P. (1976). Total mercury in the food chain of Bang Pra coastal area, Chon Buri. *Journal of the Science Society of Thailand*, 2, 117 - 126.
- Menasveta, P. (1978). *Distribution of heavy metals in Chao Praya River estuary*. Paper presented at the International Conference on Water Pollution control in Developing Countries.
- Menasveta, P., and Cheevaparanapiwat, V. (1981). Heavy metals, organochlorine pesticides and PCBs in green mussels, mullets and sediments of river mouths of Thailand. *Marine Pollution Bulletin*, 12, 19- 25.
- Mierle, G., and Ingram, R. (1991). The role of humic substances in the mobilization of mercury from watersheds. *Water Air & Soil Pollution*, 56(1), 349-357. doi: 10.1007/BF00342282
- Ministry of the Environment of Japan, and (2013). *Lessons from Minamata Disease and Mercury Management in Japan* (pp. 58). Tokyo, Japan
- Mitra, S. (1986). *Mercury in the ecosystem : its dispersion and pollution today*. Aedermannsdorf, Switzerland: Trans Tech Publications.

- Morita, M., Yoshinaga, J., and Edmondst, J. S. (1998). The Determination of Mercury Species in Environmental and Biological Sample. *Pure and Applied Chemistry*, 70, 1585-1615.
- Müller, G. (1969). Index of geo - accumulation in sediment of Rhine river. *Geochemical Journal*, 2, 109 - 118.
- NRC. (1979). *An Assessment of Mercury in the Environment*. Washington D.C.
- NRDC. (2011). Mercury Facts: Natural Gas Sector as a Significant Source of Global Mercury Supply and Emissions. Retrieved march 5, 2014, from http://www.unep.org/chemicalsandwaste/Portals/9/Mercury/Documents/INC2/INC2_NRDC_Natural
- Ogrinc, N., Monperrus, M., Kotnik, J., Fajon, V., Vidimova, K., Amouroux, D., Kocman, D., Tessier, E., Zizek, S., and Horvat, M. (2007). Distribution of mercury and methylmercury in deep-sea surficial sediments of the Merditerranean Sea. *Marine Chemistry*, 107, 31 - 48.
- Pacyna, J. M., and Munch, J. (1991). Anthropogenic Mercury Emission in Europe. *Water, Air and Soil Pollution*, 56, 51 - 60.
- Pempkowiak, J., Cossa, D., Sikora, A., and Sangjuan, J. (1998). Mercury in water and sediments of the southern Baltic sea. *Science of Total Environment*, 213, 185 - 192.
- Petpiroon, P., and Abe, K. (1991). Preliminary study on mercury concentration in water off the East Coast of the Gulf of Thailand. *Thai Marine Fisheries Research Bulletin*, 2, 69 - 73.
- Pollution Control Department. (2001). Mercury Assessment in Thailand. In P. C. Department (Ed.). Bangkok.
- Polprasert, C., Vongvisessomjai, S., Lohani, B., Muttamara, S., Arbhahirama, A., Traichaiyaporn, S., Khan, P., and Wangsuphachart, S. (1979). Heavy Metals, DDT and PCBs in the Upper Gulf of Thailand. *Environmental Engineering Division and water Resources Engineering Division*. Bangkok: AIT Research
- Sanders, C., Rantos, I., Silva – Filho, E., and Patchineelam, S. (2006). Mercury flux to estuarine sediment, derived from Pb-210 and Cs-137 geochronologies (Guaratuba Bay, Brazil). *Marine Pollution Bulletin*, 52, 1085 - 1089.

- Schroeder, H. W., Yarwood, C., and Niki, H. (1991). Transformation Processes involving mercury species in the atmosphere. *Water, Air and Soil Pollution*, 56, 653 - 665.
- 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 and Soil Pollution*, 56, 667-680.
- Shepard, F. P. (1954). Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, 24, 151-158.
- Sompongchaiyakul, P. (1989). *Analysis of chemical species for trace metals in Near-Shore sediment by Sequential Leaching Method*. (master), Chulalongkorn University.
- Sompongchaiyakul, P. (1999). *Photo-mediated Iron Transformations in Marine Waters*. (Ph.D.), The University of New South Wales, Australia.
- Sompongchaiyakul, P., Singhruck, P., Lirdwitayaprasit, T., and Thongcomdee, I. (2014, 22-25 April 2014). *An occurrence and spatial scale of hypoxia phenomena in the upper Gulf of Thailand*. Paper presented at the A Healthy Ocean for Prosperity in the Western Pacific: Scientific Challenges and Possible Solutions, Nha Trang, Vietnam.
- Sompongchaiyakul, P., and Sirinawin, W. (2006). Arsenic, Chromium and Mercury in Surface Sediment of Songkhla Lake System, Thailand. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 4, 17 - 24.
- Stevenson, F. J. (1982). *Humus chemistry: Genesis, Composition, Reactions* (2 ed.). USA.: John Wiley and Sons, Inc.
- Stumm, W., and Morgan, J. J. (1996). *Aquatic Chemistry*. New York: John Wiley and Son, Inc.
- Suwanagosoom, S., Sanguansin, J., Kan-atireklap, S., and Buntivivutkul, S. (1998). Concentrations of mercury, cadmium and lead in seawater along the Eastern Coast of the Gulf of Thailand in 1994. *Thai Marine Fisheries Research Bulletin*, 6, 47 - 52.

- Tam, N. F. Y., and Wong, Y. S. (1998). Variation of soil nutrient and organic matter content in a subtropical mangrove ecosystem. *Water, Air and Soil Pollution*, 103, 245 - 261.
- Taylor, D. L., Linehan, J. C., Murray, D. W., and Prell, W. L. (2012). Indicators of sediment and biotic mercury contamination in southern New England estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 64, 807 - 819.
- Terai, A., Sanguansin, J., Kan-atireklap, S., and Suwanagosoom, S. (1995, 9 - 10 of March 1995). *Marine environmental monitoring on heavy metal in the Eastern Gulf of Thailand*. Paper presented at the international Seminar on Marine Fisheries Environment, Rayong, Thailand.
- Tetra Tech Inc. (1998). Environmental Studies in the Central Gulf of Thailand *Report for Unocal Thailand, Ltd.*
- Thongra-ar, W. (2001). *Fate of Mercury in Sediments of the Bangpakong River Estuary and Its Toxicity as influenced by Salinity*. (master), Asian Institute of Technology
- Thongra-ar, W., and Parkpian, P. (2002). Total Mercury Concentrations in Coastal Areas in Thailand: A Review. *ScienceAsia*, 28, 301 - 312.
- Tomiyasu, T., Matsuyama, A., Eguchi, T., Fuchigami, Y., Oki, K., Horvat, M., Rajar, R., and Akagi, H. (2006). Spatial variations of mercury in sediment of Minamata Bay, Japan. *Science of the Total Environment*, 368, 283 - 290.
- Turekian, K. K., and Wedepohl, K. H. (1961). Distribution of elements in some major units of the Earth's crust. *Geological society of America bulletin*, 72, 175 - 192.
- U.S. Department of the Interior. (1987). Mercury Hazards to fish wildlife and invertebrates: a synoptic review *Contaminant Hazard Reviews* (pp. 9 -11).
- UNEP. (2002). Global Mercury Assessment 2002. Geneva, Switzerland: UNEP Chemicals Branch.
- UNEP. (2013). Global Mercury Assessment 2013, Sources, Emissions, Releases and Environment Transport. Geneva, Switzerland: UNEP Chemicals Branch.

- US-EPA. (2001). *Appendix to Method 1631 Total Mercury in Tissue, Sludge, Sediment, and Soil by Acid Digestion and BrCl Oxidation Based on a standard operating procedure*. USA.: Frontier Geosciences, Inc.
- 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*.
- Wilhelm, S. M., Isa, A. A. M., and Safri, S. (2008, 3-5 of December 2008). *Mercury in SE Asia Produced Fluids - Holistic Approach to Managing Offshore Impacts*. Paper presented at the the International Petroleum Technology Conference, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Windom, H. L., and Cranmer, G. (1998). Lack of Observed Impacts of Gas Production of Bongkot Field, Thailand on Marine Biota. *Marine Pollution Bulletin*, 36, 799-807.
- Zhang, T., and 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., and Burger, G. (1996). Spatial and Temporal Distribution of Trace Metals in Sediment from the Scheldt Estuary, South-west Netherlands. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 43, 55-79.



ภาคผนวก ก

พิกัดจุดเก็บตัวอย่าง

ตาราง ก-1 พิกัดสถานีเก็บตัวอย่าง ความลึก วันที่ในการเก็บตัวอย่าง ความเป็นกรด-ด่าง และค่าต่างศักย์-ไฟฟ้าของดินตะกอนผิวหน้าบริเวณอ่าวไทย

Stations	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Bottom Depth (m)	Sampling date	pH	Eh (mV)
U2	13° 25' 20.460"	100° 45' 02.088"	9.80	25-Aug-10	-	-
U3	13° 22' 32.520"	100° 47' 29.220"	13.1	25-Aug-10	-	-
U4	13° 19' 15.888"	100° 50' 27.672"	12.2	25-Aug-10	-	-
U5	13° 26' 23.028"	100° 38' 38.472"	4.80	24-Aug-10	-	-
U6	13° 24' 14.832"	100° 39' 31.068"	11.8	24-Aug-10	-	-
U7	13° 21' 17.136"	100° 40' 15.312"	16.5	24-Aug-10	-	-
U8	13° 17' 55.284"	100° 41' 33.324"	20.0	24-Aug-10	-	-
U9	13° 14' 59.856"	100° 43' 13.872"	18.9	24-Aug-10	-	-
U10	13° 10' 25.356"	100° 44' 24.072"	21.9	24-Aug-10	-	-
U11	13° 25' 13.188"	100° 35' 21.480"	6.70	24-Aug-10	-	-
U12	13° 22' 16.536"	100° 34' 05.844"	9.80	24-Aug-10	-	-
U13	13° 18' 26.460"	100° 32' 20.256"	13.5	24-Aug-10	-	-
U14	13° 15' 11.772"	100° 30' 33.264"	14.3	24-Aug-10	-	-
U15	13° 11' 24.324"	100° 29' 26.124"	15.4	24-Aug-10	-	-
U16	13° 07' 27.120"	100° 28' 06.600"	16.9	24-Aug-10	-	-
U18	13° 25' 19.812"	100° 28' 23.412"	8.20	24-Aug-10	-	-
U19	13° 22' 07.788"	100° 26' 02.688"	10.2	24-Aug-10	-	-
U20	13° 18' 50.400"	100° 24' 00.612"	12.2	24-Aug-10	-	-
U21	13° 13' 25.212"	100° 21' 20.988"	14.7	24-Aug-10	-	-
U22	13° 09' 09.720"	100° 19' 12.072"	18.1	24-Aug-10	-	-
U23	13° 02' 05.100"	100° 26' 09.456"	20.1	24-Aug-10	-	-
U24	13° 05' 04.560"	100° 15' 12.528"	17.6	24-Aug-10	-	-
U26	13° 24' 00.360"	100° 19' 26.004"	6.00	23-Aug-10	-	-
U27	13° 20' 15.360"	100° 15' 34.632"	8.10	23-Aug-10	-	-
U28	13° 16' 18.840"	100° 11' 12.012"	11.1	23-Aug-10	-	-
U29	13° 13' 10.812"	100° 08' 10.428"	13.3	23-Aug-10	-	-
U30	13° 16' 03.828"	100° 52' 29.532"	9.50	25-Aug-10	-	-
U31	13° 06' 02.412"	100° 45' 25.992"	27.5	24-Aug-10	-	-
U32	13° 04' 09.552"	100° 37' 26.040"	18.9	24-Aug-10	-	-
U33	13° 15' 39.204"	100° 50' 02.796"	11.9	25-Aug-10	-	-

ตาราง ก-1 (ต่อ)

Stations	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Bottom Depth (m)	Sampling date	pH	Eh (mV)
1	12° 53' 16.80"	100° 06' 13.68"	12.0	8-Nov-11	6.79	-228
2	12° 53' 2.40"	100° 22' 53.04"	24.3	8-Nov-11	6.69	-86
3	12° 53' 2.04"	100° 39' 12.24"	22.8	7-Nov-11	7.22	-94
5	12° 37' 5.52"	100° 06' 21.96"	17.0	8-Nov-11	7.02	-278
6	12° 37' 1.92"	100° 22' 41.16"	26.2	8-Nov-11	7.60	-217
9	12° 34' 59.88"	101° 12' 01.80"	18.7	9-Nov-11	7.44	-116
12	12° 20' 41.28"	100° 06' 21.60"	21.0	9-Nov-11	7.58	-204
13	12° 20' 51.36"	100° 22' 46.56"	28.5	9-Nov-11	6.85	-8
14	12° 20' 49.92"	100° 39' 18.00"	34.7	9-Nov-11	7.53	-18
15	12° 20' 49.20"	100° 55' 34.68"	30.9	9-Nov-11	7.14	-142
16	12° 20' 49.20"	101° 12' 01.80"	31.0	10-Nov-11	7.58	-105
17	12° 20' 52.80"	101° 28' 41.88"	32.5	10-Nov-11	7.35	-137
18	12° 20' 48.12"	101° 44' 34.80"	27.0	10-Nov-11	7.55	-228
21	12° 04' 41.52"	100° 22' 41.88"	35.3	11-Nov-11	7.54	-126
22	12° 04' 43.32"	100° 39' 12.60"	34.3	11-Nov-11	7.58	-178
23	12° 04' 40.80"	100° 55' 34.68"	34.9	11-Nov-11	7.56	-133
24	12° 04' 40.08"	101° 12' 04.68"	42.4	11-Nov-11	7.30	-172
25	12° 04' 34.32"	101° 28' 18.48"	45.1	11-Nov-11	7.58	-204
26	12° 04' 44.40"	101° 45' 02.88"	39.7	10-Nov-11	7.55	-293
27	12° 04' 45.12"	102° 01' 36.12"	29.3	10-Nov-11	7.11	-282
29	11° 48' 33.48"	100° 06' 9.72"	35.3	12-Nov-11	7.54	-312
31	11° 48' 26.28"	100° 39' 13.32"	42.8	12-Nov-11	7.54	-298
32	11° 48' 28.80"	100° 55' 40.08"	49.0	16-Nov-11	7.47	-285
35	11° 48' 24.48"	101° 45' 07.20"	54.5	16-Nov-11	7.46	-126
36	11° 48' 31.32"	102° 01' 36.48"	49.7	16-Nov-11	7.38	-138
38	11° 32' 18.24"	100° 05' 57.48"	44.1	18-Nov-11	7.40	-100
39	11° 32' 18.60"	100° 22' 27.12"	48.3	18-Nov-11	7.36	-92
40	11° 32' 16.80"	100° 39' 02.88"	50.0	18-Nov-11	7.43	-75
41	11° 32' 17.88"	100° 53' 15.72"	50.4	17-Nov-11	7.37	-182
42	11° 32' 20.40"	101° 12' 07.92"	57.4	17-Nov-11	7.39	-208
43	11° 32' 17.52"	101° 28' 36.48"	61.1	17-Nov-11	7.45	-158
44	11° 32' 17.52"	101° 44' 55.68"	61.3	17-Nov-11	7.47	-112
47	11° 16' 09.48"	99° 49' 51.60"	44.1	18-Nov-11	7.37	-98
48	11° 15' 58.68"	100° 06' 14.40"	48.3	18-Nov-11	7.34	-62
49	11° 16' 09.12"	100° 22' 44.40"	52.0	19-Nov-11	7.44	-104

ตาราง ก-1 (ต่อ)

Stations	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Bottom Depth (m)	Sampling date	pH	Eh (mV)
50	11° 16' 10.92"	100° 39' 15.12"	54.1	19-Nov-11	7.32	-70
51	11° 16' 06.60"	100° 54' 09.00"	60.1	19-Nov-11	7.45	-105
52	11° 16' 01.20"	101° 11' 30.12"	59.4	19-Nov-11	7.41	-53
53	11° 16' 09.12"	101° 20' 27.60"	61.4	19-Nov-11	7.40	-108
56	10° 59' 49.56"	99° 34' 13.08"	24.8	21-Nov-11	7.15	-312
57	10° 59' 54.60"	99° 49' 40.44"	50.2	20-Nov-11	7.39	-72
58	10° 59' 56.04"	100° 06' 19.80"	52.4	20-Nov-11	7.36	-74
59	10° 59' 55.32"	100° 22' 38.28"	55.7	20-Nov-11	7.35	-102
60	10° 59' 51.00"	100° 38' 57.48"	59.9	20-Nov-11	7.50	-88
61	11° 00' 01.08"	100° 54' 05.40"	60.9	20-Nov-11	7.37	-94
62	10° 59' 54.60"	101° 12' 07.92"	61.8	20-Nov-11	7.38	-103
63	10° 59' 51.36"	101° 20' 28.32"	67.8	19-Nov-11	7.40	-88
65	10° 42' 11.52"	99° 32' 26.88"	40.6	27-Nov-11	7.50	-260
66	10° 43' 42.60"	99° 49' 49.80"	52.5	28-Nov-11	7.54	-252
67	10° 43' 46.92"	100° 06' 18.00"	58.7	28-Nov-11	7.49	-90
68	10° 43' 46.92"	100° 22' 43.68"	59.3	28-Nov-11	7.48	-140
69	10° 43' 48.72"	100° 39' 12.60"	62.3	28-Nov-11	7.59	-125
70	10° 43' 43.68"	100° 54' 53.28"	63.2	28-Nov-11	7.57	-156
71	10° 43' 36.48"	101° 08' 16.80"	63.2	29-Nov-11	7.54	-103
74	10° 27' 51.12"	99° 49' 35.04"	51.0	21-May-12	7.72	-186
75	10° 27' 34.92"	100° 05' 53.88"	63.0	21-May-12	7.76	-103
76	10° 27' 37.80"	100° 26' 55.32"	62.0	21-May-12	7.56	-75
77	10° 27' 36.00"	100° 38' 53.88"	64.0	21-May-12	7.60	-95
78	10° 27' 36.00"	100° 55' 37.92"	63.3	29-Nov-11	7.54	-95
79	10° 27' 31.32"	101° 08' 16.80"	65.0	29-Nov-11	7.54	-95
80	10° 11' 24.00"	99° 16' 30.00"	17.1	21-May-12	7.31	-379
81	10° 11' 36.60"	99° 33' 01.80"	40.0	21-May-12	7.35	-388
82	10° 11' 21.12"	99° 49' 38.28"	45.0	21-May-12	7.33	-356
83	10° 11' 20.76"	100° 05' 51.36"	52.0	22-May-12	7.50	-260
84	10° 11' 24.72"	100° 22' 29.28"	60.0	22-May-12	7.40	-140
85	10° 11' 23.28"	100° 38' 46.68"	65.0	22-May-12	7.44	-105
86	10° 11' 26.52"	100° 55' 31.80"	69.0	22-May-12	7.48	-155
87	10° 11' 18.96"	101° 05' 37.32"	64.0	22-May-12	7.56	-52
88	09° 55' 06.24"	99° 20' 04.92"	23.0	23-May-12	7.27	-350

ตาราง ก-1 (ต่อ)

Stations	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Bottom Depth (m)	Sampling date	pH	Eh (mV)
89	9° 55' 25.68"	99° 33' 00.36"	29.0	23-May-12	7.59	-220
90	9° 55' 07.32"	99° 49' 43.68"	35.0	23-May-12	7.51	-140
91	9° 55' 11.28"	100° 06' 09.72"	43.0	23-May-12	7.54	-65
92	9° 55' 10.20"	100° 22' 30.00"	55.0	23-May-12	7.56	-110
93	9° 55' 12.00"	100° 38' 35.88"	60.0	22-May-12	7.58	-116
94	9° 55' 12.00"	100° 55' 30.00"	67.0	22-May-12	7.54	-120
95	9° 55' 36.12"	101° 05' 33.00"	68.0	22-May-12	7.46	-139
97	9° 39' 42.84"	99° 20' 59.64"	15.0	23-May-12	7.35	-328
98	9° 38' 36.60"	99° 33' 31.32"	15.0	23-May-12	7.29	-369
99	9° 41' 34.80"	99° 47' 43.08"	14.0	23-May-12	7.26	-353
100	9° 39' 06.48"	100° 05' 52.80"	14.0	24-May-12	7.34	-186
101	9° 38' 57.12"	100° 22' 41.52"	30.0	24-May-12	7.50	-56
102	9° 39' 01.80"	100° 38' 49.20"	49.0	24-May-12	7.45	-95
103	9° 39' 00.00"	100° 55' 17.40"	56.0	24-May-12	7.45	-30
104	9° 39' 01.08"	101° 05' 36.96"	59.0	24-May-12	7.43	-37
108	9° 22' 28.20"	99° 50' 10.68"	14.0	25-May-12	7.44	-379
109	9° 22' 48.00"	100° 05' 59.28"	16.0	25-May-12	7.20	-233
110	9° 23' 07.08"	100° 22' 20.28"	33.0	25-May-12	7.61	-52
111	9° 22' 48.00"	100° 38' 54.60"	39.0	24-May-12	7.29	-66
112	9° 22' 45.48"	100° 55' 13.80"	59.0	24-May-12	7.39	-64
113	9° 22' 47.64"	101° 07' 39.36"	63.0	24-May-12	7.64	-26
115	9° 06' 43.56"	100° 06' 11.16"	22.0	25-May-12	7.09	-86
116	9° 06' 36.00"	100° 22' 20.28"	28.0	25-May-12	7.29	-60
117	9° 06' 35.28"	100° 38' 48.48"	30.0	25-May-12	7.40	-76
118	9° 06' 36.72"	100° 55' 21.72"	40.0	25-May-12	7.44	-70
119	9° 06' 37.08"	101° 05' 21.12"	53.0	26-May-12	7.41	-45
121	8° 50' 24.72"	100° 05' 52.80"	15.0	26-May-12	7.38	-375
122	8° 50' 24.00"	100° 22' 31.08"	24.0	26-May-12	7.34	-74
123	8° 50' 21.12"	100° 38' 56.40"	30.0	26-May-12	7.38	-53
124	8° 50' 17.88"	100° 55' 23.88"	38.0	26-May-12	7.37	-56
125	8° 50' 28.68"	101° 05' 34.80"	51.0	26-May-12	7.82	-20
129	8° 34' 15.60"	100° 25' 25.32"	21.0	26-May-12	7.31	-34
130	8° 34' 12.72"	100° 38' 53.52"	25.0	26-May-12	7.48	-30
131	8° 34' 12.00"	100° 55' 27.12"	33.0	26-May-12	7.60	-20

ตาราง ก-1 (ต่อ)

Stations	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Bottom Depth (m)	Sampling date	pH	Eh (mV)
132	8° 35' 04.92"	101° 11' 58.92"	53.0	26-May-12	7.45	-80
133	8° 35' 22.20"	101° 28' 57.72"	56.0	27-May-12	7.64	-21
136	8° 18' 00.00"	100° 22' 23.88"	9.0	27-May-12	7.38	-195
137	8° 18' 6.12"	100° 38' 48.12"	24.0	27-May-12	7.29	-74
138	8° 18' 4.32"	100° 55' 26.40"	31.0	27-May-12	7.53	-218
139	8° 18' 00.00"	101° 11' 49.20"	50.0	27-May-12	7.47	-11
144	8° 02' 17.52"	100° 24' 31.32"	10.0	28-May-12	7.33	-113
145	8° 01' 49.80"	100° 39' 07.92"	22.0	28-May-12	7.34	-120
147	8° 01' 54.12"	101° 11' 48.12"	48.0	28-May-12	7.48	-123
148	8° 01' 48.00"	101° 28' 30.00"	47.0	28-May-12	7.51	-35
149	8° 02' 10.32"	101° 45' 06.48"	60.0	28-May-12	7.50	-118
150	8° 02' 00.60"	101° 56' 18.60"	69.0	28-May-12	7.56	-125
153	7° 45' 14.40"	100° 38' 42.72"	21.0	29-May-12	7.49	-91
154	7° 45' 18.00"	100° 55' 23.88"	28.0	29-May-12	7.42	-130
155	7° 45' 18.00"	101° 11' 53.88"	44.0	29-May-12	7.67	-109
156	7° 45' 28.08"	101° 28' 16.68"	46.0	29-May-12	7.59	-107
157	7° 45' 33.12"	101° 44' 53.88"	49.0	29-May-12	7.54	-130
158	7° 45' 24.48"	102° 01' 15.60"	67.0	28-May-12	7.52	-140
159	7° 45' 36.00"	102° 12' 00.00"	67.0	28-May-12	7.72	-98
163	7° 29' 37.32"	100° 55' 25.32"	25.0	29-May-12	7.40	-107
164	7° 29' 46.32"	101° 11' 49.92"	40.0	29-May-12	7.46	-105
165	7° 29' 48.12"	101° 28' 18.12"	45.0	29-May-12	7.46	-80
166	7° 29' 35.52"	101° 44' 40.92"	44.0	30-May-12	7.45	-140
167	7° 29' 34.80"	102° 01' 22.80"	50.0	30-May-12	7.52	-70
168	7° 29' 24.00"	102° 17' 35.88"	59.0	30-May-12	7.46	-20
169	7° 29' 24.00"	102° 24' 47.88"	60.0	30-May-12	7.44	-114
172	7° 13' 08.40"	100° 46' 36.12"	16.0	31-May-12	7.56	-110
173	7° 13' 18.12"	100° 55' 23.88"	18.0	30-May-12	7.68	-99
174	7° 13' 19.92"	101° 11' 17.88"	25.0	30-May-12	7.46	-158
175	7° 13' 23.88"	101° 28' 07.68"	42.0	30-May-12	7.49	-30
176	7° 13' 27.48"	101° 45' 59.40"	49.0	30-May-12	7.65	-15
177	7° 13' 20.28"	102° 04' 37.20"	47.0	30-May-12	7.48	-30
178	7° 13' 12.00"	102° 17' 52.80"	46.0	30-May-12	7.56	-110
182	6° 58' 56.28"	101° 08' 29.40"	9.0	31-May-12	7.48	-135

ตาราง ก-1 (ต่อ)

Stations	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Bottom Depth (m)	Sampling date	pH	Eh (mV)
183	6° 57' 14.40"	101° 28' 15.60"	18.0	31-May-12	7.60	-2
184	6° 57' 54.00"	101° 44' 42.00"	40.0	31-May-12	7.50	-80
185	6° 56' 57.12"	102° 01' 21.00"	38.0	31-May-12	7.58	-83
186	6° 56' 52.08"	102° 17' 46.68"	43.0	31-May-12	7.43	-60
189	6° 40' 56.28"	101° 50' 03.48"	33.0	1-Jun-12	7.47	-60
190	6° 40' 55.20"	102° 01' 13.80"	38.0	31-May-12	7.65	-95
191	6° 40' 59.88"	102° 17' 40.92"	44.0	31-May-12	7.69	-24



ภาคผนวก ข

หลักการและวิธีการวิเคราะห์

ภาคผนวก ข-1 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคตะกอน

1) หลักการวิเคราะห์

ซั่งดินตะกอนแห้ง 10-20 กรัม กำจัดสารอินทรีย์ด้วย 10% (v/v) H_2O_2 และกำจัดแคลเซียมคาร์บอเนตด้วย 50% (v/v) HCl จากนั้นอบแห้งซั่งน้ำหนักแน่นอน (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) แยกขนาดอนุภาคตะกอนโดยใช้วิธีการร่อนเปียกผ่านตะแกรงร่อนขนาดรูเปิด 63 ไมโครเมตร ส่วนที่ค้างอยู่บนตะแกรง คือ อนุภาคขนาดทราย ส่วนที่ลอดผ่านตะแกรงนำไปหาสัดส่วนของขนาดอนุภาคทรายแป้ง (2 - 63 ไมโครเมตร) และขนาดอนุภาคดินเหนียว (เล็กกว่า 2 ไมโครเมตร) โดยการตกตะกอนอย่างอิสระในน้ำ (sedimentation method) ตามกฎของสโตรก (Stroke's Law) หาปริมาณอนุภาคขนาดเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร ที่เหลือล่องลอยอยู่ในมวลน้ำเหนือระยะที่กำหนดโดยการปิเปตสารละลายที่ระดับที่กำหนดในปริมาตรที่แน่นอนมาอบแห้งและซั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาปริมาณของแข็งที่ล่องลอยอยู่

เวลาอนุภาคขนาดใหญ่กว่าขนาดที่กำหนดทั้งหมด ตกตะกอนลงต่ำกว่าระยะทางที่กำหนด คำนวณได้จากกฎของสโตรก ดังสมการที่ ผ-1

$$k = 175 \sqrt{\frac{\eta h}{t(\rho_k \rho_f)}} \quad \text{สมการ ผ-1}$$

เมื่อ	k	คือ	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค (ไมครอน)
	η	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของตัวกลาง (น้ำ) (poises)
	h	คือ	ระยะทางจากผิวหน้าของตัวกลาง (น้ำ) ถึงระดับที่ต้องการ (เซนติเมตร)
	t	คือ	ระยะเวลาจากที่เริ่มตกตะกอนจนถึงตอนที่จุดสารละลายออก (นาที)
	ρ_k	คือ	ความถ่วงจำเพาะของอนุภาคตะกอน
	ρ_f	คือ	ความถ่วงจำเพาะ (ความหนาแน่นสัมพัทธ์) ของตัวกลาง (น้ำ)

ในการทดลองนี้ อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 2 ไมโครเมตร มีองค์ประกอบเป็นควอตซ์ (quartz) กระจายตัวในน้ำที่อุณหภูมิ 20°C ความถ่วงจำเพาะของควอตซ์ในน้ำ (ρ_k) มีค่าเท่ากับ

2.65 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของน้ำ (ρ_f) มีค่าเท่ากับ 0.998 และค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของน้ำ (η) มีค่าเท่ากับ 0.0100

ดังนั้น หากต้องการให้อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (k) ใหญ่กว่า 2 ไมโครเมตร ตกตะกอนลงต่ำกว่าระดับผิวน้ำ (h) 5 เซนติเมตร เมื่อคำนวณจากสมการ ผ-1 จะต้องใช้เวลา (t) เท่ากับ 231.727 นาที หรือ 3 ชั่วโมง 52 นาที

2) วิธีการวิเคราะห์

1. แยกเอาสิ่งที่ไม่ใช่เนื้อตะกอน เช่น กิ่งไม้ เปลือกหอย ออกจากตะกอน
2. อบตะกอนให้แห้งที่อุณหภูมิ $105 \pm 5^\circ\text{C}$ มั่นกวนตะกอนขณะยังหมาดอยู่ เพื่อป้องกันตะกอนกอดตัวกันแน่นจนน้ำภายในไม่สามารถระเหยออกได้
3. ชั่งตะกอนแห้งประมาณ 10-20 กรัม
4. เท 10% (v/v) H_2O_2 ให้ท่วมตะกอน แกว่งให้สารละลายสัมผัสตะกอนจนทั่ว ทิ้งไว้ข้ามคืน
5. หากอนุภาคดินตะกอนยังแยกจากกันไม่หมด ให้เติม 10% (v/v) H_2O_2 เพิ่มอีกประมาณ 10 มิลลิลิตร ทิ้งไว้อีก 1 คืน
6. กำจัด H_2O_2 ที่เหลือโดยการให้ความร้อนจนเกือบเดือด
7. ตั้งให้ตกตะกอน เหน้ส่วนใสออกจนเหลือเพียงท่วมดินตะกอน
8. เติม 50% (v/v) HCl ประมาณ 10 มิลลิลิตร คนจนไม่เห็นฟองก๊าซเกิดขึ้นอีก
9. รินน้ำส่วนใสทิ้ง
10. อบตะกอนให้แห้งที่อุณหภูมิ $105 \pm 5^\circ\text{C}$
11. ชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งละเอียด บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน (ตำแหน่ง 4 ทศนิยม)
12. ร้อนตะกอนแห้ง โดยชะด้วยน้ำผ่านตะแกรงร่อนขนาดรูเปิด 63 ไมครอน
13. นำตะกอนที่ค้างบนตะแกรงมาอบแห้งที่อุณหภูมิ $105 \pm 5^\circ\text{C}$ ชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งละเอียด บันทึกน้ำหนักตะกอนที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 63 ไมโครเมตร
14. เทตะกอนส่วนที่ผ่านตะแกรง ใส่ลงในกระบอกตกตะกอน ขนาดปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร นำไปทำการตกตะกอนที่อุณหภูมิคงที่ 20°C

15. เติม 10% (w/v) (NaPO_3)₆ (sodiumhexametaphosphate) 10 มิลลิลิตร เพื่อทำให้เม็ดดินกระจายตัวอย่างอิสระ
16. เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ของกระบอกตวงตะกอน
17. ตั้งกระบอกตวงตะกอนลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งตั้งไว้ที่ 20°C
18. ใช้แท่งคนตะกอน กวนภายในกระบอกตวงตะกอน จนอนุภาคภายในกระบอกตวงตะกอนฟุ้งกระจายทั่ว
19. เริ่มจับเวลาทันทีหลังจากหยุดกวน
20. เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง 52 นาที ใช้ไมโครปิเปต ขนาด 5 มิลลิลิตร จุ่มปลายลงที่ระดับต่ำจากผิวน้ำ 5 เซนติเมตร ดูดน้ำที่ระดับความลึก 5 มิลลิลิตร
21. อบอุ่นที่ ได้ให้แห้งที่อุณหภูมิ $105 \pm 5^\circ\text{C}$ และชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งละเอียด บันทึกน้ำหนักตะกอนที่มีอยู่ในน้ำ 5 มิลลิลิตร เพื่อนำคำนวณน้ำหนักตะกอนที่มีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน ที่มีอยู่ทั้งหมดในน้ำ (ขนาดดินเหนียว) 1,000 มิลลิลิตร
22. คำนวณสัดส่วนของอนุภาคขนาดทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยถือว่าน้ำหนักรวมของทุกขนาดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์

ภาคผนวก ข-2 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ที่ออกซิไดซ์ง่าย

1) หลักการวิเคราะห์

การวิเคราะห์อินทรีย์คาร์บอนใช้วิธีวอลกี - แบล็ค (Walkey - Black Method) ซึ่งพัฒนาปรับปรุงโดย Loring and Rantala (1992) วิธีนี้เป็นวิธีที่แยกสารอินทรีย์ออกจากอินทรีย์คาร์บอนอื่นๆ เช่น แกรไฟท์ ถ่านหิน และอินทรีย์คาร์บอนที่เฉื่อยต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมี สารอินทรีย์ที่วิเคราะห์โดยวิธีนี้ เป็นสารอินทรีย์ที่ออกซิไดซ์ได้ทางเคมี ซึ่งถือเป็นสารอินทรีย์ในรูปที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ง่ายในสิ่งแวดล้อม

หลักการของวิธีการนี้ คือ อินทรีย์คาร์บอนในดินตะกอนจะถูกออกซิไดซ์ด้วยไดโครเมต (dichromate) ในสถานะที่เป็นกรด โดยเติมไดโครเมตให้มีปริมาณที่มากเกินไป หลังจากอินทรีย์คาร์บอนถูกออกซิไดซ์ไปหมดแล้ว หาปริมาณไดโครเมตที่เหลือโดยการรีดิวซ์ด้วยสารละลายเฟอร์รัส (ferrous solution) และใช้ไดฟีนิลามีน (diphenylamine) เป็นอินดิเคเตอร์ เติมกรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) ลงไปเพื่อให้สังเกตจุดยุติได้ง่ายขึ้น แต่เนื่องจากไดโครเมตจะทำปฏิกิริยากับคลอ

ไรต์ไอออน (Cl^-) จึงป้องกันการสูญเสียโคโครเมตไปในปฏิกิริยานี้โดยเติมซิลเวอร์ซัลเฟต (silver sulfate)

2) การเตรียมรีเอเจนต์

1. สารละลาย Ag_2SO_4 ใน conc. H_2SO_4
ละลาย Ag_2SO_4 2.5 กรัม ใน conc. H_2SO_4 1 ลิตร
2. สารละลายมาตรฐาน 1 N $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$
ละลาย $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 49.04 กรัม ในน้ำกลั่น และเจือจางเป็น 1 ลิตร โดยใช้ขวดปรับปริมาตร
3. สารละลาย 0.5 N ammonium ferrous sulfate solution ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
ละลาย $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 196.1 กรัม ในน้ำกลั่น 800 มิลลิลิตร ซึ่งมี conc. H_2SO_4 อยู่ 20 มิลลิลิตร จากนั้นเจือจางให้เป็น 1 ลิตร
4. ไดฟีนิลลามีนอินดิเคเตอร์
ละลาย diphenylamine ($(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{NH}$) ประมาณ 0.5 กรัม ในน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร และกรด H_2SO_4 เข้มข้น 100 มิลลิลิตร

3) วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างดินตะกอนแห้งที่บดละเอียดแล้ว ปริมาณ 0.5 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลาย 1 N $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 10 มิลลิลิตร
3. เติมสารละลาย Ag_2SO_4 ใน conc. H_2SO_4 20 มิลลิลิตร
4. แกว่งเบาๆ และให้ความร้อนประมาณ 90°C ประมาณ นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา 30 สมบูรณ์
5. เติมน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร โดยประมาณ ตามด้วย conc. H_3PO_4 10 มิลลิลิตร และ NaF 0.2 กรัม
6. เติมไดฟีนิลลามีนอินดิเคเตอร์ 3-4 หยด
7. ไทเทรตด้วย 0.5 N ferrous solution จนถึงจุดยุติ ซึ่งจะเป็นสารละลายสีเขียวใส (brilliant green) บันทึกปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการไทเทรต

4) การ Standardization

1. ดำเนินตามวิธีการเดียวกับการวิเคราะห์ตามหัวข้อ 2 โดยไม่มีดินตะกอน
2. บันทึกลับปริมาตรสารละลาย 0.5N ferrous solution ที่ใช้ในการไตเตรต 1 N $K_2Cr_2O_7$ 10 มิลลิลิตร
3. ทำซ้ำอย่างน้อย 3 ซ้ำ

5) การคำนวณผล

เปอร์เซ็นต์คาร์บอนอินทรีย์ในตัวอย่างตะกอน หาได้จากสมการ ผ-2 และเทียบเป็นปริมาณสารอินทรีย์ โดยคูณด้วย 1.72 ตามสมการ ผ-3

$$\text{ร้อยละคาร์บอนอินทรีย์} = 10 \times (1-T/S) \times F \quad \text{สมการ ผ-2}$$

$$\text{ร้อยละสารอินทรีย์} = \text{ร้อยละคาร์บอนอินทรีย์} \times 1.72 \quad \text{สมการ ผ-3}$$

เมื่อ 1.72 = ค่า factor สำหรับคูณปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ให้เป็นปริมาณสารอินทรีย์

$$S = \begin{array}{l} \text{ปริมาณสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเข้มข้น} \\ \text{0.5 นอร์มอล ที่ใช้ไปในการไทเทรตแบลงค์ (มิลลิลิตร)} \end{array}$$

$$T = \begin{array}{l} \text{ปริมาณสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเข้มข้น} \\ \text{0.5 นอร์มอล ที่ใช้ไปในการไทเทรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)} \end{array}$$

$$F = \begin{array}{l} \text{ค่าที่ได้จากการคำนวณ (12/4000 คือ milli-} \\ \text{equivalent weight ของ คาร์บอน)} \end{array}$$

6) การหาความถูกต้องของการวิเคราะห์สารอินทรีย์

ใช้เดกซ์โทรส (dextrose; $C_6H_{12}O_6$) เป็นสารมาตรฐาน ตามทฤษฎีเดกซ์โทรส 1 กรัม จะมีคาร์บอนอยู่ร้อยละ 39.99 ซึ่งเดกซ์โทรส 0.01 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนด้วยวิธีการเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ตัวอย่างดินตะกอน

คำนวณหาเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในเดกซ์โทรส ตามสมการ ผ-4 หากวิธีการวิเคราะห์ถูกต้อง ค่าคาร์บอนที่ได้ควรมีค่าใกล้เคียงกับร้อยละ 39.99

$$\text{ร้อยละคาร์บอนในเดกซ์โทรส} = 10 \times (1-T/S) \times F \quad \text{สมการ ผ-4}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } F &= (1.0 \text{ N}) \times 12/4000 \times (100/\text{น้ำหนักเดกซ์โทรส}) \\ &= 30 \text{ เมื่อเดกซ์โทรส น้ำหนัก } 0.01 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ภาคผนวก ข-3 การวิเคราะห์อินทรีย์ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต

1) หลักการวิเคราะห์

วิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยวิธี acid – base titration ตามวิธีการทดสอบที่ใช้ใน Sompongchaiyakul (1989) ซึ่งใช้หลักการวิเคราะห์หาปริมาณของกรดหรือเบส โดยให้สารละลายกรดหรือเบส ทำปฏิกิริยาพอดีกับสารละลายมาตรฐาน และใช้อินดิเคเตอร์เป็นสารบอกจุดยุติ ขณะไทเทรต pH จะเปลี่ยนไป หากเลือกใช้อินดิเคเตอร์ที่เหมาะสม จุดยุติจะใกล้เคียงกับจุดสมมูล

2) รีเอเจนต์

1. สารละลาย 0.5 N HCl

ละลาย HCl 20.83 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่น และเจือจางเป็น 500 มิลลิลิตร โดยใช้ขวดปรับปริมาตร

2. สารละลาย 0.25 N NaOH

ละลาย NaOH 5.0 กรัม ในน้ำกลั่น และเจือจางเป็น 500 มิลลิลิตร โดยใช้ขวดปรับปริมาตร

3. สารละลายอินดิเคเตอร์ Phenolphthalien

ละลาย Phenolphthalien 100 มิลลิกรัม ใน 80% (v/v) ethyl alcohol (เตรียมโดยเจือจาง absolute ethanol 80 มิลลิลิตร ให้เป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร)

4. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)

5. โพแทสเซียม ไฮโดรเจนพทาเลต (Potassium hydrogen phthalate; $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$)

6. สารละลายอินดิเคเตอร์ Bromocresal green

ละลาย Bromocresal green 100 มิลลิกรัม ใน 1.45 N NaOH (เตรียมโดยละลาย NaOH 5.8 กรัมในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร และเจือจางด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร)

3) วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างดินตะกอนแห้งที่บดละเอียดแล้ว 1 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลาย 0.5 N HCl 10 มิลลิลิตร โดยใช้ปิเปต
3. ให้ความร้อนโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 90°C เป็นเวลา 20 นาที
4. ทดสอบ pH โดยใช้กระดาษลิตมัส ถ้า pH มากกว่า 2 ให้เติม 0.5 N HCl อีก 10 มิลลิลิตร และให้ความร้อนต่ออีกเป็นเวลา 20 นาที
5. เมื่อ pH น้อยกว่า 2 เจือจางสารละลายโดยใช้น้ำกลั่นเป็น 120 มิลลิลิตร
6. เติมฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ 3-4 หยด
7. ไทเทรตด้วย 0.25 N NaOH จนถึงจุดยุติ ซึ่งสารละลายจะเปลี่ยนจากใสเป็นสีชมพู บันทึกปริมาตรสารละลาย 0.25 N NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต

4) Standardization สารละลาย NaOH

1. อบ $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในเดสิเคเตอร์
2. ชั่ง $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ 0.9-1.0 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน 4 ตำแหน่ง ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. ละลาย $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร โดยใช้ขวดปรับปริมาตร
4. เติม Phenolphthalien indicator 3-4 หยด
5. ไทเทรตด้วยสารละลาย 0.25 N NaOH solution จนถึงจุดยุติ ซึ่งสารละลายจะเปลี่ยนจากใสเป็นสีชมพู บันทึกปริมาตรสารละลาย 0.25 N NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต
6. ทำอย่างน้อย 3 ซ้ำ

5) Standardization สารละลาย HCl

1. อบ Na_2CO_3 ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในเดสิเคเตอร์
2. ชั่ง Na_2CO_3 0.6 – 0.7 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน 4 ตำแหน่ง ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. ละลาย Na_2CO_3 ในน้ำกลั่นประมาณ 50 มิลลิลิตร
4. เติม Bromocresal green 3-4 หยด
5. ไทเทรตด้วย 0.5 N HCl จนถึงจุดยุติ ซึ่งสารละลายจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียว
6. ทำซ้ำอย่างน้อย 3 ซ้ำ

6) การคำนวณผล

$$\% \text{CO}_3\text{-C} = [(100) (0.006) (\text{ml HCl}) (N \text{ HCl})] - [(\text{ml NaOH}) (N \text{ NaOH})] \quad \text{สมการ ผ-5}$$

$$\% \text{CaCO}_3 = [(100) (0.05) (\text{ml HCl}) (N \text{ HCl})] - [(\text{ml NaOH}) (N \text{ NaOH})] \quad \text{สมการ ผ-6}$$

เมื่อ

$$N = (A \times B) / (MW \times C)$$

A = น้ำหนักของสารที่ใช้ในการทำ Standardize (กรัม)

B = ปริมาตรน้ำกลั่นที่เติม (มิลลิลิตร)

C = ปริมาตรกรดและเบสที่ใช้ในการไทเทรต

MW = น้ำหนักโมเลกุลของสาร

ภาคผนวก ข-4 การย่อยสกัดตัวอย่างและวิเคราะห์ปริมาณปรอทรวม (Total mercury)

1) หลักการวิเคราะห์

วิธีสกัดตัวอย่างและวิเคราะห์ปริมาณปรอทรวม ใช้วิธีการที่ดัดแปลงจาก Bloom and Crecelius (1987) และ US-EPA METHOD 1631 Appendix to Method 1631 Total Mercury in Tissue, Sludge, Sediment, and Soil by Acid Digestion and BrCl Oxidation (US-EPA, 2001)

2) รีเอเจนต์ (Reagent)

1. conc. H_2SO_4
2. conc. HNO_3
3. สารละลาย 5% (w/v) $KMnO_4$
ละลาย $KMnO_4$ 5 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน ($> 18 M\Omega\text{-cm}$) 100 มิลลิลิตร
4. สารละลาย 5% (w/v) $K_2S_2O_8$
ละลาย $K_2S_2O_8$ 5 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน ($> 18 M\Omega\text{-cm}$) มิลลิลิตร 100
5. สารละลาย 10% $NH_2OH\cdot HCl$
ละลาย $NH_2OH\cdot HCl$ 10 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน ($> 18 M\Omega\text{-cm}$) มิลลิลิตร 100
6. สารละลาย 0.05% (w/v) $NaOH$
ละลาย $NaOH$ 0.5 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน ($> 18 M\Omega\text{-cm}$) 1000 มิลลิลิตร
7. สารละลาย 0.4% $NaBH_4$
ละลาย $NaBH_4$ 4 กรัม ใน 0.05% (w/v) $NaOH$ (จากข้อ 6) 1 ลิตร
8. สารละลาย 3% (v/v) HCl
เจือจาง conc. HCl 3 มิลลิลิตร ในน้ำปราศจากไอออน ($> 18 M\Omega\text{-cm}$) 100 มิลลิลิตร
9. สารละลาย 10% (v/v) HCl
เจือจาง conc. HCl 10 มิลลิลิตร ในน้ำปราศจากไอออน ($> 18 M\Omega\text{-cm}$) 100 มิลลิลิตร

3) การเตรียมสารละลายมาตรฐานปรอท

1. ชั่งสาร mercury chloride (HgCl_2) 0.0135 กรัม ละลายใน 3% (v/v) HCl ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร ความเข้มข้นของสารละลาย Hg ที่ได้มีค่าเท่ากับ 100 $\mu\text{g/ml}$ สารละลายมาตรฐานนี้เก็บได้ไม่เกิน 6 เดือน
2. นำสารละลายที่ได้จากข้อ 1 มาทำการเจือจางเป็น 100 $\mu\text{g/L}$ โดยดูดสารละลายในข้อ 1 ปริมาตร 100 ไมโครลิตร เจือจางเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วย 3% (v/v) HCl โดยใช้ขวดปรับปริมาตร สารละลายมาตรฐานนี้เก็บได้ไม่เกิน 6 เดือน
3. นำสารละลายที่ได้จากข้อ 2 มาทำการเจือจางให้เป็นสารละลาย Hg ความเข้มข้นระดับต่างๆ ได้แก่ 0.3, 0.5, 1.0 และ 1.5 $\mu\text{g/L}$

4) วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างดินตะกอนแห้งที่บดละเอียดด้วย agate mortar 0.150 – 0.300 กรัม บันทึกรน้ำหนักที่แน่นอน ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใส่ลงในหลอด centrifuge (polypropylene) ขนาด 15 มิลลิลิตร
2. เติม conc. H_2SO_4 1 มิลลิลิตร และ conc. HNO_3 0.5 มิลลิลิตร
3. เขย่าหลอดทดลองด้วยเครื่องเขย่าแบบ Vortex mixer
4. นำหลอดตัวอย่างไปอุ่นด้วยเตาให้ความร้อนแบบ heating block ที่อุณหภูมิ 90 – 95°C นาน 30 นาที ทิ้งตัวอย่างให้เย็น ขณะที่เริ่มอุ่นตัวอย่างอาจจะเกิดฟองก๊าซ หากเกิดฟองมากให้นำหลอดออกจากเตามาตั้งให้เย็นและอุ่นใหม่จะช่วยลดปัญหาเรื่องฟองก๊าซได้
5. นำหลอดออกจาก heating block ตั้งทิ้งให้สารละลายเย็นลง
6. เติมน้ำปราศจากไอออน ($> 18 \text{ M}\Omega\text{-cm}$) 2.5 มิลลิลิตร 5% KMnO_4 2.5 มิลลิลิตร และ 5% $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 1.7 มิลลิลิตร ลงในตัวอย่าง แล้วอุ่นตัวอย่างที่อุณหภูมิ 90 - 95°C นาน 30 นาที แล้วทิ้งให้เย็น
7. ก่อนทำการวัดปริมาณปรอทในสารละลายที่สกัดได้ เติม 10% $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 1 มิลลิลิตร เพื่อไปขจัด KMnO_4 ส่วนเกิน แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 10 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน ($> 18 \text{ M}\Omega\text{-cm}$) ในขั้นตอนนี้ตะกอนสีม่วงเข้มจะละลายหายไป
8. นำหลอดตัวอย่างไป centrifuge ที่ 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

9. รินสารละลายใส มาเจือจางด้วย 3% HCl อัตราส่วนของตัวอย่างต่อกรดเกลือขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวอย่าง (ตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของปรอทน้อยกว่า 1 ppm ควรใช้อัตราส่วน 1:1)
10. วัดความเข้มข้นของปรอทในสารละลาย โดยใช้สารละลาย 0.4% NaBH₄ เป็นตัวรีดิวซ์ปรอททุกรูปให้เป็นไอปรอท (Hg⁰) โดยใช้ 10% HCl เป็น carrier solution และใช้ก๊าซอาร์กอน (argon gas) เป็นตัวพาไอปรอทเข้าเครื่อง Flow – Injection Mercury Analyzer ยี่ห้อPerkin Elmer รุ่น FIMS 400 (Mercury Analyzer)
11. ตรวจวัดปริมาณไอปรอทเทียบกับสารละลายมาตรฐานปรอท



ภาคผนวก ค
สัดส่วนและประเภทของตะกอน

ตาราง ค-1 สัดส่วนขนาดตะกอนของตะกอนดินผิวหน้าอ่าวไทยและประเภทของตะกอน

Stations	Proportion (%)			Sediment name
	Clay	Silt	Sand	
U2	37.4	59.9	2.7	clayey silt
U3	44.9	48.6	6.4	clayey silt
U4	43.6	55.5	1.00	clayey silt
U5	17.9	80.0	2.10	silt
U6	54.2	45.4	0.40	silty clay
U7	39.2	34.3	26.5	sand silt clay
U8	5.50	53.3	41.2	sandy silt
U9	23.6	22.5	53.9	sand silt clay
U10	32.1	10.3	57.6	clayey sand
U11	33.3	64.1	2.60	clayey silt
U12	30.5	66.1	3.40	clayey silt
U13	6.60	54.0	39.4	sandy silt
U14	27.6	39.9	32.5	sand silt clay
U15	16.8	27.2	55.9	silty sand
U16	49.8	15.8	34.5	sandy clay
U18	43.3	51.5	5.20	clayey silt
U19	47.7	39.8	12.6	silty clay
U20	50.2	29.7	20.2	silty clay
U21	58.8	21.6	19.6	silty clay
U22	58.2	4.7	37.1	sandy clay
U23	39.6	15.8	44.6	clayey sand
U24	44.3	38.2	17.5	silty clay
U26	48.3	36.1	15.6	silty clay
U27	54.3	27.3	18.5	silty clay
U28	44.9	23.2	31.8	sand silt clay
U29	51.0	22.0	27.0	sand silt clay
U30	75.8	22.0	2.30	clay
U31	29.4	9.30	61.3	clayey sand
U32	45.8	4.40	49.8	clayey sand
U33	74.1	16.9	9.00	silty clay
1	0.70	17.1	82.2	sand

ตาราง ค-1 (ต่อ)

Stations	Proportion (%)			Sediment name
	Clay	Silt	Sand	
2	11.3	11.3	77.4	sand
3	60.9	38.1	0.96	silty clay
5	16.7	10.4	72.9	clayey sand
6	3.88	2.40	93.7	sand
9	1.91	19.7	78.4	sand
12	15.0	19.4	65.6	silty sand
13	10.7	15.0	74.3	silty sand
14	10.2	22.9	66.9	silty sand
15	8.29	10.1	81.6	sand
16	3.25	16.4	80.4	sand
17	52.9	24.4	22.6	sand silt clay
18	47.0	26.1	26.9	sand silt clay
21	49.2	17.2	33.7	sandy clay
22	10.4	19.2	70.2	silty sand
23	52.5	23.6	23.9	sand silt clay
24	21.7	26.0	52.3	sand silt clay
25	48.1	17.9	33.9	sandy clay
26	11.2	18.2	70.7	silty sand
27	12.9	19.9	67.1	silty sand
29	10.3	18.6	71.2	silty sand
31	4.41	17.4	78.2	sand
32	42.2	23.9	33.9	sand silt clay
35	40.6	55.4	4.01	clayey silt
36	8.22	1.20	90.6	sand
38	19.1	22.6	58.4	silty sand
39	36.9	20.7	42.4	sand silt clay
40	33.1	23.1	43.9	sand silt clay
41	60.1	14.9	24.9	sandy clay
42	55.1	29.2	15.7	silty clay
43	47.7	48.3	3.9	silty clay
44	79.7	17.6	2.8	clay
47	14.2	14.9	70.9	silty sand
48	16.3	12.6	71.1	clayey sand
49	17.9	25.3	56.8	silty sand

ตาราง ค-1 (ต่อ)

Stations	Proportion (%)			Sediment name
	Clay	Silt	Sand	
50	61.2	18.4	20.5	sandy clay
51	49.1	28.8	22.1	sand silt clay
52	48.9	21.2	29.9	sand silt clay
53	65.8	17.9	16.3	silty clay
56	7.6	17.2	75.3	sand
57	44.9	22.3	32.8	sand silt clay
58	21.2	23.6	55.3	sand silt clay
59	16.2	8.78	75.1	sand
60	22.4	21.5	56.2	sand silt clay
61	52.1	19.9	27.9	sand silt clay
62	48.3	50.6	1.15	clayey silt
63	9.06	33.4	57.6	silty sand
65	2.42	13.5	84.1	sand
66	56.0	35.9	8.14	silty clay
67	35.4	18.8	45.8	clayey sand
68	51.7	17.9	30.4	sandy clay
69	62.8	16.3	20.9	sandy clay
70	29.6	8.69	61.7	clayey sand
71	37.4	37.4	25.2	sand silt clay
74	62.6	35.6	1.77	silty clay
75	48.4	45.2	6.37	silty clay
76	34.1	34.4	31.6	sand silt clay
77	50.1	33.9	16.0	silty clay
78	69.0	12.2	18.8	sandy clay
79	71.0	17.8	11.2	silty clay
80	58.7	26.6	14.6	silty clay
81	52.8	42.9	4.34	silty clay
82	42.2	55.0	2.76	clayey silt
83	40.2	58.1	1.69	clayey silt
84	41.5	55.4	3.11	clayey silt
85	47.6	48.1	4.33	clayey silt
86	55.0	34.2	10.8	silty clay
87	40.3	35.8	23.9	sand silt clay
88	43.9	30.6	25.5	sand silt clay

ตาราง ค-1 (ต่อ)

Stations	Proportion (%)			Sediment name
	Clay	Silt	Sand	
89	74.6	23.8	1.68	silty clay
90	45.5	51.8	2.74	clayey silt
91	36.7	62.6	0.75	clayey silt
92	49.7	48.4	1.89	silty clay
93	42.4	44.3	13.3	clayey silt
94	47.6	34.7	17.8	silty clay
95	58.8	19.5	21.7	sandy clay
97	49.0	31.4	19.6	silty clay
98	58.4	28.3	13.3	silty clay
99	45.8	51.6	2.53	clayey silt
100	64.5	30.3	5.16	silty clay
101	74.1	24.0	1.91	silty clay
102	47.1	51.9	0.96	clayey silt
103	55.1	38.4	6.43	silty clay
104	52.0	32.8	15.2	silty clay
108	52.3	43.1	4.59	silty clay
109	50.5	47.8	1.72	silty clay
110	53.8	43.1	3.13	silty clay
111	66.8	26.5	6.73	silty clay
112	68.6	23.7	7.66	silty clay
113	49.9	41.9	8.20	silty clay
115	42.2	55.3	2.45	clayey silt
116	47.6	33.2	19.2	silty clay
117	38.9	29.7	31.3	sand silt clay
118	27.1	40.5	32.5	sand silt clay
119	51.1	42.1	6.88	silty clay
121	52.3	45.9	1.71	silty clay
122	58.1	39.5	2.47	silty clay
123	41.8	33.1	25.1	sand silt clay
124	41.1	44.4	14.5	clayey silt
125	54.0	43.2	2.83	silty clay
129	61.4	28.9	9.74	silty clay
130	58.7	28.3	13.0	silty clay
131	7.26	42.9	49.8	silty sand

ตาราง ค-1 (ต่อ)

Stations	Proportion (%)			Sediment name
	Clay	Silt	Sand	
132	4.81	42.5	52.7	silty sand
133	38.7	29.7	31.5	sand silt clay
136	60.6	29.8	9.58	silty clay
137	18.9	18.5	62.6	clayey sand
138	60.6	29.6	9.79	silty clay
139	61.7	36.4	1.96	silty clay
144	30.6	17.1	52.3	clayey sand
145	22.4	24.0	53.6	sand silt clay
147	73.9	23.8	2.22	silty clay
148	40.6	21.4	38.0	sand silt clay
149	56.9	31.4	11.6	silty clay
150	23.9	29.4	46.6	sand silt clay
153	30.0	21.9	48.0	sand silt clay
154	36.2	23.5	40.4	sand silt clay
155	55.8	20.9	23.2	sand silt clay
156	13.4	30.8	55.8	silty sand
157	49.4	19.5	31.1	sandy clay
158	60.9	30.1	9.00	silty clay
159	19.1	22.1	58.8	silty sand
163	28.1	22.1	49.8	sand silt clay
164	60.7	31.5	7.84	silty clay
165	51.2	21.9	26.8	sand silt clay
166	35.6	22.9	41.5	sand silt clay
167	58.6	32.1	9.30	silty clay
168	44.4	42.0	13.6	silty clay
169	58.1	37.2	4.69	silty clay
172	29.4	18.7	51.9	clayey sand
173	4.69	18.1	77.2	sand
174	18.8	12.9	68.2	clayey sand
175	30.7	23.1	46.2	sand silt clay
176	43.6	21.9	34.5	sand silt clay
177	50.3	30.8	18.9	silty clay
178	54.9	23.6	21.5	sand silt clay
182	6.62	13.2	80.2	sand

ตาราง ค-1 (ต่อ)

Stations	Proportion (%)			Sediment name
	Clay	Silt	Sand	
183	3.18	15.7	81.1	sand
184	21.9	22.2	55.8	sand silt clay
185	54.9	22.9	22.2	sand silt clay
186	45.9	23.4	30.8	sand silt clay
189	16.8	16.9	66.3	clayey sand
190	23.7	15.6	60.7	clayey sand
191	50.1	23.8	26.2	sand silt clay



ภาคผนวก ง
องค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนผิวหน้าอ่าวไทย

ตาราง ง-1 ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ แคลเซียมคาร์บอเนต และปริมาณปรอทรวมของตะกอนดิน

Stations	Organic carbon (%)	Calcium carbonate (%)	Mercury ($\mu\text{g}/\text{kg}$) dry weight (CaCO_3 free basis)
U2	2.49	5.80	46.6
U3	2.05	9.90	31.8
U4	2.62	12.1	38.1
U5	1.48	1.80	97.2
U6	1.87	4.30	61.2
U7	0.94	13.0	22.9
U8	1.28	13.1	15.9
U9	1.16	11.5	15.3
U10	1.38	13.9	76.9
U11	1.84	3.00	14.9
U12	2.37	4.20	102.4
U13	1.54	11.6	20.4
U14	1.70	12.1	24.6
U15	1.24	13.2	13.8
U16	1.27	12.7	13.4
U18	2.26	6.20	37.2
U19	1.95	9.50	25.6
U20	1.94	9.80	16.2
U21	1.97	12.5	20.1
U22	1.28	15.9	8.40
U23	1.34	17.8	15.0
U24	1.50	21.9	12.8
U26	2.26	9.70	21.6
U27	1.95	9.10	16.0
U28	1.61	10.0	11.2
U29	1.79	12.9	13.6
U30	2.77	14.2	34.0
U31	1.27	16.6	17.5
U32	1.04	15.1	7.70

ตาราง ง-1 (ต่อ)

Stations	Organic carbon (%)	Calcium carbonate (%)	Mercury ($\mu\text{g}/\text{kg}$) dry weight (CaCO_3 free basis)
U33	2.50	15.9	35.8
1	0.61	9.80	27.6
2	0.59	18.2	28.8
3	1.07	9.80	24.0
5	0.55	6.40	24.8
6	0.60	9.10	11.2
9	1.72	15.7	18.1
12	0.39	4.80	22.4
13	0.30	12.5	18.3
14	0.49	16.4	13.7
15	1.03	11.0	11.7
16	0.65	15.1	22.2
17	1.29	10.5	43.2
18	1.23	19.7	34.8
21	0.22	13.6	16.0
22	0.43	23.9	24.6
23	0.43	13.5	24.8
24	0.65	10.0	32.8
25	1.62	12.7	35.8
26	2.19	14.2	50.5
27	1.67	13.1	47.4
29	0.47	8.30	87.2
31	0.79	13.2	23.4
32	1.03	13.5	52.4
35	1.40	14.9	46.9
36	0.44	8.20	34.9
38	0.41	10.7	90.6
39	0.64	11.7	85.1
40	0.23	15.4	26.9
41	1.14	18.7	72.4
42	1.56	16.3	37.9
43	1.09	18.3	45.1
44	1.44	16.6	42.7
47	1.19	13.0	46.4

ตาราง ง-1 (ต่อ)

Stations	Organic carbon (%)	Calcium carbonate (%)	Mercury ($\mu\text{g}/\text{kg}$) dry weight (CaCO_3 free basis)
48	0.81	15.4	38.4
49	0.52	15.4	25.3
50	0.63	17.1	44.9
51	1.04	18.6	28.6
52	2.14	16.5	40.3
53	0.64	18.1	105.3
56	1.51	7.60	46.4
57	1.13	11.8	39.3
58	0.81	14.5	40.4
59	0.46	15.3	31.5
60	0.92	17.4	39.6
61	0.75	16.9	31.5
62	1.66	17.7	47.2
63	0.90	17.6	47.2
65	0.82	6.30	35.5
66	1.13	14.4	55.1
67	0.39	15.7	28.9
68	0.53	17.3	82.1
69	0.31	18.2	107.1
70	0.58	17.4	72.8
71	0.68	16.9	58.3
74	1.21	12.9	32.8
75	1.06	14.7	26.9
76	0.58	16.3	83.0
77	0.59	18.5	26.6
78	0.55	19.2	22.7
79	0.64	17.6	94.7
80	1.48	8.40	110.8
81	1.71	9.30	37.2
82	1.47	11.1	35.4
83	1.11	13.3	47.9
84	0.94	13.4	36.0
85	0.68	15.4	37.6
86	0.61	18.3	41.0

ตาราง ง-1 (ต่อ)

Stations	Organic carbon (%)	Calcium carbonate (%)	Mercury ($\mu\text{g}/\text{kg}$) dry weight (CaCO_3 free basis)
87	0.46	21.9	47.2
88	1.69	10.3	108.3
89	0.70	6.10	41.0
90	1.71	9.50	48.2
91	1.48	10.3	61.5
92	0.76	13.5	29.6
93	0.79	16.7	26.9
94	0.62	20.8	28.2
95	0.54	21.3	24.0
97	1.67	5.85	37.1
98	1.45	6.90	50.1
99	1.42	6.70	38.0
100	1.29	7.90	41.5
101	0.47	11.1	27.3
102	1.37	13.9	28.5
103	0.63	16.2	27.1
104	1.76	7.00	27.7
108	1.23	7.90	30.8
109	1.27	7.80	27.1
110	0.85	8.60	21.1
111	0.83	14.1	25.6
112	0.88	16.4	32.0
113	0.77	14.8	30.1
115	1.12	5.90	26.3
116	0.83	5.10	18.6
117	0.59	14.9	28.7
118	0.72	20.9	25.4
119	0.63	10.8	27.9
121	1.10	5.90	35.5
122	1.16	4.00	20.8
123	0.62	9.30	21.6
124	0.78	14.1	26.3
125	0.56	10.7	22.7
129	0.67	6.60	24.3

ตาราง ง-1 (ต่อ)

Stations	Organic carbon (%)	Calcium carbonate (%)	Mercury ($\mu\text{g}/\text{kg}$) dry weight (CaCO_3 free basis)
130	0.71	3.90	14.3
131	0.75	13.2	20.7
132	0.55	8.7	23.1
133	0.32	20.5	24.7
136	0.60	22.0	26.4
137	0.53	14.0	26.8
138	0.72	14.0	16.1
139	0.79	9.80	15.7
144	0.68	23.1	31.0
145	0.48	16.0	16.1
147	0.59	10.9	15.3
148	0.11	19.0	11.3
149	0.61	19.3	35.1
150	0.43	3.32	20.1
153	0.37	22.2	10.5
154	0.68	21.7	20.7
155	0.53	9.60	14.8
156	0.40	19.7	16.1
157	0.50	22.7	19.5
158	0.68	16.4	22.3
159	0.44	20.8	18.5
163	0.61	16.4	8.50
164	0.64	10.6	14.1
165	0.49	16.5	14.4
166	0.50	21.3	46.7
167	0.43	15.0	81.2
168	0.72	14.6	20.5
169	0.66	11.3	23.5
172	0.63	23.9	11.7
173	0.51	22.4	13.7
174	0.63	22.3	22.7
175	0.61	13.9	22.3
176	0.33	18.2	22.0
177	0.50	10.3	35.0

ตาราง ง-1 (ต่อ)

Stations	Organic carbon (%)	Calcium carbonate (%)	Mercury ($\mu\text{g}/\text{kg}$) dry weight (CaCO_3 free basis)
178	0.49	12.9	21.0
182	0.22	17.5	18.4
183	0.42	21.4	9.90
184	0.53	16.1	22.0
185	0.35	12.2	22.4
186	0.38	10.7	24.1
189	0.41	20.7	13.5
190	0.43	20.9	20.5
191	0.39	12.9	22.1



ภาคผนวก จ

ค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี (geoaccumulation index : I_{geo})

ของการปนเปื้อนปรอทที่สะสมในดินตะกอน

ตาราง จ-1 ดัชนีการสะสมเชิงธรณี (geoaccumulation index : I_{geo})

Stations	I _{geo}	Stations	I _{geo}	Stations	I _{geo}
U2	-3.70	1	-4.40	43	-3.70
U3	-4.20	2	-4.40	44	-3.80
U4	-4.00	3	-4.60	47	-3.70
U5	-2.60	5	-4.60	48	-4.00
U6	-3.30	6	-5.70	49	-4.60
U7	-4.70	9	-5.10	50	-3.70
U8	-5.20	12	-4.70	51	-4.40
U9	-5.30	13	-5.00	52	-3.90
U10	-3.00	14	-5.50	53	-2.50
U11	-5.30	15	-5.70	56	-3.70
U12	-2.60	16	-4.80	57	-3.90
U13	-4.90	17	-3.80	58	-3.90
U14	-4.60	18	-4.10	59	-4.30
U15	-5.40	21	-5.20	60	-3.90
U16	-5.50	22	-4.60	61	-4.30
U18	-4.00	23	-4.60	62	-3.70
U19	-4.60	24	-4.20	63	-3.70
U20	-5.20	25	-4.10	65	-4.10
U21	-4.90	26	-3.60	66	-3.40
U22	-6.20	27	-3.70	67	-4.40
U23	-5.30	29	-2.80	68	-2.90
U24	-5.50	31	-4.70	69	-2.50
U26	-4.80	32	-3.50	70	-3.00
U27	-5.20	35	-3.70	71	-3.40
U28	-5.70	36	-4.10	74	-4.20
U29	-5.50	38	-2.70	75	-4.50
U30	-4.10	39	-2.80	76	-2.90
U31	-5.10	40	-4.50	77	-4.50
U32	-6.30	41	-3.10	78	-4.70
U33	-4.10	42	-4.00	79	-2.70

ตาราง จ-1 (ต่อ)

Stations	I_{geo}	Stations	I_{geo}	Stations	I_{geo}
80	-2.40	121	-4.10	173	-5.50
81	-4.00	122	-4.90	174	-4.70
82	-4.10	123	-4.80	175	-4.80
83	-3.60	124	-4.50	176	-4.80
84	-4.10	125	-4.70	177	-4.10
85	-4.00	129	-4.60	178	-4.80
86	-3.90	130	-5.40	182	-5.00
87	-3.70	131	-4.90	183	-5.90
88	-2.50	132	-4.70	184	-4.80
89	-3.90	133	-4.60	185	-4.70
90	-3.60	136	-4.50	186	-4.60
91	-3.30	137	-4.50	189	-5.50
92	-4.30	138	-5.20	190	-4.90
93	-4.50	139	-5.30	191	-4.80
94	-4.40	144	-4.30		
95	-4.60	145	-5.20		
97	-4.00	147	-5.30		
98	-3.60	148	-5.70		
99	-4.00	149	-4.10		
100	-3.90	150	-4.90		
101	-4.50	153	-5.80		
102	-4.40	154	-4.90		
103	-4.50	155	-5.30		
104	-4.40	156	-5.20		
108	-4.30	157	-4.90		
109	-4.50	158	-4.70		
110	-4.80	159	-5.00		
111	-4.60	163	-6.10		
112	-4.20	164	-5.40		
113	-4.30	165	-5.40		
115	-4.50	166	-3.70		
116	-5.00	167	-2.90		
117	-4.40	168	-4.90		
118	-4.60	169	-4.70		
119	-4.40	172	-5.70		

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

วุฒิการศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วิทยาศาสตร์ทางทะเล) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2554

การนำเสนอและตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Sansittisakumlird, B., Sompongchaiyakul, P., Khokiattiwong, S. and Xuefa Shi. 2014. Spatial Patterns of Mercury Contamination in the Gulf of Thailand's Sediments. Paper presented at the 9th WESTPAC International Scientific Symposium: A Healthy Ocean for Prosperity in the Western Pacific: scientific challenges and possible solutions, 22–25 April 2014, Nha Trang, Vietnam. (Oral presentation)

เบญจวรรณ แสนสิทธิสกุลเลิศ, เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล, สมเกียรติ ขอเกียรติวงศ์ และเสวียฝ้า สือ. 2557. รูปแบบการปนเปื้อนเชิงพื้นที่ของปรอทในดินตะกอนผิวหน้าของอ่าวไทย. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 13, 26-28 มีนาคม 2557, โรงแรมเดอะทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ.

Sansittisakumlird, B., Sompongchaiyakul, P., Khokiattiwong, S. and Xuefa Shi. 2013. Contamination of mercury in surface sediment of the gulf of Thailand. Paper presented at the NRCT – JSPS Joint International Seminar, 15-17 November 2013, 2013, Chiangmai, Thailand. (Poster presentation)

Sansittisakumlird, B., Sompongchaiyakul, P., Khokiattiwong, S. and Xuefa Shi. 2013. Contamination of mercury in surface sediment of the gulf of thailand. Paper presented at the 6th IOC/WESTPAC International Workshop on the Fluvial Sediment Supply to the South China Sea, 24–26 November 2013, Universiti Kebangsaan Malaysia, Selangor, Malaysia. (Oral presentation)