



รายงานการวิจัย

การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสารปรอทในดินตะกอนและน้ำ บริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด

แหวตา ทองระอา
ฉลวย มุสิกะ
วันชัย วงศ์ดาวรรณ
อาวุธ หมั่นหาผล

22 ส.ค. 2552
249052

BK 0086953

เริ่มบริการ

23 ส.ค. 2552

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2546 - 2547

สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา

พ.ศ. 2548

ISBN 974-384-200-4

งานส่งเสริมการวิจัย
กองบริการการศึกษา

การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสารปรอทในดินตะกอนและน้ำบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด

แววตา ทองระอา ฉลวย มุสิกะ วันชัย วงศ์ดาวรรณ และ อาวุธ หมั่นหาผล
สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี 20131

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดความรู้และความเข้าใจที่ลึกซึ้งเกี่ยวกับ พฤติกรรม และเส้นทางการเคลื่อนที่ของสารปรอทในดินตะกอนและน้ำบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง โดยศึกษาการกระจายของสารปรอทในน้ำและดินตะกอน ศึกษารูปแบบทางธรรมชาติเคมีของสารปรอทในดินตะกอน และปริมาณปรอทที่สามารถเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ กระบวนการดูดซับและการปลดปล่อยสารปรอทโดยดินตะกอน รวมทั้งปริมาณปรอทที่สะสมอยู่ในสัตว์ทะเล

ผลการศึกษาปริมาณปรอทรวมในน้ำทะเลจำนวน 8 สถานี พบว่ามีค่าน้อยมากทั้งในฤดูแล้ง (มีนาคม 2546) และฤดูฝน (ตุลาคม 2546) และต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งของไทยหลายเท่า กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยที่พบในฤดูแล้งและฤดูฝนอยู่ระหว่าง 2.42 - 5.67 และ 1.52 - 11.77 ng L⁻¹ ตามลำดับ ปริมาณปรอทรวมในน้ำมีความสัมพันธ์ทางบวกกับสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำซึ่งวัดในรูปของ Fluorescence unit สำหรับปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนในฤดูแล้ง พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.006 - 0.130 µg g⁻¹ น้ำหนักแห้ง และฤดูฝนมีค่าอยู่ระหว่าง <0.0023 - 0.224 µg g⁻¹ น้ำหนักแห้ง ซึ่งค่าสูงสุดที่ตรวจพบมีค่าสูงกว่ามาตรฐานของสารปรอทในดินตะกอนของบางประเทศ นอกจากนี้ยังพบว่าปรอทรวมในดินตะกอนมีความสัมพันธ์ทางบวกค่อนข้างสูงมากกับออกไซด์ของเหล็ก แสดงว่าออกไซด์ของเหล็กทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับหลักที่อยู่ในดินตะกอนบริเวณนี้ และจากการศึกษาปริมาณปรอทที่สามารถเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ พบว่าส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่า 10 % ของปริมาณปรอทรวม และค่าสูงสุดซึ่งพบในฤดูฝนมีค่าไม่เกิน 22 % โดยสอดคล้องกับผลการศึกษารูปแบบทางธรรมชาติเคมีของสารปรอทส่วนใหญ่ในดินตะกอน ซึ่งพบว่ามีอยู่สองรูปแบบที่สำคัญ คือ รูปที่จับรวมตัวกับสารอินทรีย์และซัลไฟด์ และรูปแบบที่อยู่ในโครงสร้างของแร่ธาตุในดิน ซึ่งเป็นรูปแบบที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตหรือมีแต่น้อยมาก ส่วนการสะสมสารปรอทในสัตว์ทะเลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ยังคงอยู่ในระดับที่ปลอดภัยสำหรับการบริโภค

การศึกษาระบวนการดูดซับและปลดปล่อยสารปรอทโดยดินตะกอนที่ความเค็ม 4 ระดับ คือ 0 15 30 และ 45 psu โดยใช้เทคนิค batch equilibration ผลการศึกษา พบว่าการดูดซับจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารปรอทสูงขึ้นโดยขึ้นอยู่กับลักษณะของเนื้อดินตะกอนด้วย ความเค็มไม่มีผลต่อการดูดซับยกเว้นที่ความเค็ม 45 psu มีแนวโน้มทำให้การดูดซับสารปรอทที่ความเข้มข้นสูงๆลดลงจากความเค็มระดับอื่นๆ และปรอทที่ถูกดูดซับไว้ไม่สามารถปลดปล่อยออกจากดินตะกอนได้ทั้งหมด นอกจากนี้พบว่าความเค็มไม่มีผลต่อการปล่อยสารปรอทออกจากดินตะกอนด้วย

Transformation of Mercury in the Sediment-Water System of the Map Ta Phut Industrial Estate

Waewtaa Thongra-ar, Chaluay Musika, Wanchai Wongsudawan and Arvut Munhapol
Institute of Marine Science, Burapha University, Chon Buri 20131

Abstract

This study attempts to provide a better understanding of the behavior and fate of mercury (Hg) in the sediment-water system of the Map Ta Phut industrial estate, Rayong Province. It was designed to include Hg distribution in the water and sediments, its geochemical and bioavailable forms of the sediments and adsorption-desorption phenomena by the sediments as well as the accumulation of Hg in marine animals.

The samples of water and sediments collected from 8 stations in the dry (March 2003) and wet (October 2003) seasons were analyzed for total Hg. The average concentrations of water Hg ranged from 2.42 - 5.67 and 1.52 - 11.77 ng L⁻¹ for the dry and wet seasons, respectively. Those were still within Thai coastal water quality standard. The water Hg showed a positive correlation with DOC fluorescence. Total Hg in the sediments ranged from 0.006 - 0.130 and <0.0023 - 0.224 µg g⁻¹ dry weight for the dry and wet seasons, respectively. The highest concentrations obtained exceeded the acceptable levels of sediment Hg set in some countries. Also, the sediment Hg showed a strongly positive correlation with Fe oxides suggesting that Fe oxides was a major adsorbent in the sediments studied. Fractionation of Hg in the sediments indicated that the major geochemical forms were 1) bound to organic matter and sulfide and 2) residual fractions which were unlikely to be bioavailable. This result agreed with a direct analysis of bioavailable Hg which mostly gave very low concentrations (<10% of total Hg) and the maximum concentrations found in the wet season were not more than 22 % of total Hg. In addition, total Hg in tissue of marine animals collected from the surrounding area of the industrial estate was found to be within Thai national standard for food consumption.

In order to understand Hg adsorption capacity and its remobilization in the sediments, Hg adsorption and desorption experiments were conducted at 4 salinities of 0, 15, 30 and 45 psu using a batch equilibration technique. The adsorption of Hg decreased with increasing the initial Hg concentrations, but also depended on the sediment texture. Salinity had no effect on the adsorption and desorption, except a slight decrease of Hg adsorption at high initial Hg concentrations was observed at 45 psu salinity. Adsorption and desorption characteristics of the sediments indicated Hg was irreversible adsorbed.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน หมวดเงินอุดหนุนมหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ 2546-2547 คณะผู้ทำการวิจัยใคร่ขอขอบคุณเป็นอย่างมากไว้ ณ โอกาสนี้ ขอขอบคุณสำนักงานนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยองที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าเก็บตัวอย่างในบริเวณนิคมอุตสาหกรรม และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของสถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเลทุกท่านที่มีส่วนช่วยทำให้งานวิจัยเรื่องนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

[

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
บทนำ	1
การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง	5
อุปกรณ์และวิธีการ	8
ผลและวิจารณ์ผล	18
1. การกระจายของสารปรอทในน้ำ	18
2. การกระจายของสารปรอทในดินตะกอนและความสัมพันธ์กับคุณสมบัติดินตะกอน	26
3. การศึกษารูปแบบทางธรณีเคมีของสารปรอทในดินตะกอน	39
4. การศึกษาการดูดซับและการปลดปล่อยสารปรอทโดยดินตะกอนและอิทธิพลของความเค็ม	42
สรุปผลการศึกษา	65
เอกสารอ้างอิง	66

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตำแหน่งสถานีเก็บตัวอย่างน้ำทะเลและดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรม มาบตาพุดและบริเวณใกล้เคียง จังหวัดระยอง	8
2	% Recovery ของการวิเคราะห์ปริมาณปรอทในน้ำทะเล	11
3	ผลการวิเคราะห์ดินตะกอนทะเลมาตรฐาน (MESS-3)	12
4	ผลการวิเคราะห์เนื้อเยื่อปลาทะเลมาตรฐาน (DORM-2)	12
5	การสกัดหารูปแบบทางเคมีของสารปรอทในดินตะกอน โดยวิธี sequential extraction	13
6	Sequential extraction ของดินตะกอนทะเลมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น (MESS-3)	13
7	คุณสมบัติของดินตะกอนบางประการที่ทำกรวิเคราะห์และวิธีวิเคราะห์	14
8	ปริมาณปรอทรวมในน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัด ระยอง ในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546) และฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546) รวม ทั้งค่าเฉลี่ยตลอดปี (หน่วยเป็น ng L^{-1})	18
9	ปริมาณปรอทรวมในคลองระบายน้ำทั้ง/จุดที่ระบายลงสู่ทะเล และคุณภาพน้ำ อื่นๆ ในฤดูแล้ง (12 พฤษภาคม 2546) และ ฤดูฝน (30 กันยายน 2546)	21
10	ข้อมูลทางกายภาพและเคมีของน้ำทะเลโดยทั่วไปบริเวณชายฝั่ง นิคมอุตสาหกรรม มาบตาพุด จังหวัดระยอง ในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546)	22
11	ข้อมูลทางกายภาพและเคมีของน้ำทะเลโดยทั่วไปบริเวณชายฝั่ง นิคมอุตสาหกรรม มาบตาพุด จังหวัดระยอง ในฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546)	23
12	ค่าเฉลี่ยปริมาณปรอทรวม ($\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน; $n = 6$) ในดิน ตะกอนบริเวณชายฝั่งทะเล นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง และ ปริมาณปรอทที่สามารถเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ ในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546) และฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546)	26
13	เกณฑ์มาตรฐานของสารปรอทในน้ำทะเลและดินตะกอน	27
14	เปรียบเทียบปริมาณปรอทรวมในน้ำทะเลและดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรม มาบตาพุดจากการศึกษาครั้งนี้กับรายงานฉบับอื่น	29

ตารางที่		หน้า
15	คุณสมบัติของดินตะกอนบางประการในบริเวณชายฝั่งทะเล นิคมอุตสาหกรรม มาบตาพุด จังหวัดระยอง ในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546)	32
16	คุณสมบัติของดินตะกอนบางประการในบริเวณชายฝั่งทะเล นิคมอุตสาหกรรม มาบตาพุด จังหวัดระยอง ในฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546)	33
17	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนและคุณสมบัติ ของดินตะกอนบางประการในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546)	35
18	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนและคุณสมบัติ ของดินตะกอนบางประการในฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546)	36
19	Freundlich adsorption parameters ของการดูดซับสารปรอทที่ความเค็มต่างๆ กับ Freundlich adsorption parameters ของการดูดซับสารปรอทที่ความเค็ม ต่างๆกัน	46
20	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Freundlich adsorption parameters และคุณ สมบัติของดินตะกอน ที่ความเค็มต่างๆ ($n = 8$)	48
21	Freundlich desorption parameters ของการปลดปล่อยสารปรอท และปริมาณ สารปรอทที่ปลดปล่อยออกจากดินตะกอนที่ความเค็มต่างๆ กัน	56
22	ปริมาณการสะสมของสารปรอทในสัตว์ทะเลบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตา พุด จังหวัดระยอง	62

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ที่ตั้งของอุตสาหกรรมที่สำคัญในบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง	3
2	รูปแบบทางเคมีของโลหะที่อยู่ในดินตะกอน	5
3	สถานีเก็บตัวอย่างน้ำทะเลและดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด และบริเวณใกล้เคียง จังหวัดระยอง	9
4	แผนผังแสดงการทดลองเพื่อศึกษาการดูดซับและการปลดปล่อยสารปรอทโดยดินตะกอน	17
5	การกระจายของสารปรอท (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน, $n = 6$) ที่ผิวน้ำและเหนือพื้นดินในบริเวณชายฝั่งทะเลนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดใน (a) ฤดูแล้ง และ (b) ฤดูฝน	19
6	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของปรอทรวมในน้ำที่พบในคลองระบายน้ำทิ้ง/จุดที่ระบายลงสู่ทะเลและความเข้มข้นเฉลี่ยของปรอทรวมในน้ำทะเลบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ในฤดูแล้ง และฤดูฝน และค่าเฉลี่ยตลอดปี	20
7	ความสัมพันธ์ระหว่างสารปรอทในน้ำกับ (a) สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำในรูปของ Humic acid (b) ความเค็ม และ (c) ความเป็นกรด-ด่าง	25
8	ค่าเฉลี่ยปริมาณปรอทรวม ($\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน, $n = 6$) ในดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546) และฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546)	28
9	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตลอดปีของปริมาณปรอทในน้ำและดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดในปี 2546	9
10	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนกับ (a) ออกไซด์ของเหล็ก (b) ออกไซด์ของแมงกานีส (c) สารอินทรีย์ (d) ดินเหนียว (e) ทรายแป้ง และ (f) ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน ในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546)	37
11	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนกับ (a) ออกไซด์ของเหล็ก (b) ออกไซด์ของแมงกานีส (c) สารอินทรีย์ (d) ดินเหนียว (e) ทรายแป้ง และ (f) ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน ในฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546)	38

ภาพที่		หน้า
12	รูปแบบทางธรณีเคมีของสารปรอทในดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง (a) ฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546) และ (b) ฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546)	41
13	เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารปรอทในแต่ละระดับความเข้มข้นเริ่มต้นที่เติมลงไป ในดินตะกอนสถานีต่างๆ (a) สถานีใกล้ฝั่ง (b) สถานีห่างฝั่ง และที่ความเค็ม ต่างๆกัน	44
14	Freundlich isotherms ของการดูดซับสารปรอทโดยดินตะกอนมาบตาพุดสถานี ต่างๆ (a) สถานีใกล้ฝั่ง (b) สถานีห่างฝั่ง และที่ความเค็มต่างๆกัน	45
15	เปรียบเทียบค่า Freundlich adsorption parameters (a) K_{ads} และ (b) $1/n_{ads}$ ของ ดินตะกอนแต่ละสถานีในการดูดซับสารปรอทที่ความเค็มต่างๆ	47
16	ชนิดของปรอท (Hg species) ที่ระดับความเป็นกรด- ด่างและคลอไรด์ไอออน ต่างๆกัน	51
17	ปริมาณ (a) เหล็ก และ (b) แมงกานีสในสารละลายทดลองศึกษาการดูดซับสาร ปรอทโดยดินตะกอนสถานีต่างๆที่ความเค็ม 0 และ 45 psu	53
18	ปริมาณ (a) เหล็ก และ (b) แมงกานีสในสารละลายทดลองศึกษาการปลดปล่อย สารปรอทโดยดินตะกอนสถานีต่างๆที่ความเค็ม 0 และ 45 psu	59
19	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทรวมกับน้ำหนักของปลาทุแร	61

การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสารปรอทในดินตะกอนและน้ำ บริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด

บทนำ

ปรอท เป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่มีความเป็นพิษสูงสุดต่อสิ่งมีชีวิตถึงแม้ในระดับความเข้มข้นที่ต่ำ มีความคงตัวสูงในสภาพแวดล้อม สามารถสะสมและเพิ่มขยายทางชีวภาพในห่วงโซ่อาหาร (biomagnification) ได้ ตลอดจนทำให้เกิดอันตรายร้ายแรงต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์จากการบริโภคอาหารทะเลที่มีการปนเปื้อนสารปรอท ดังจะเห็นได้จากมหันตภัยร้ายแรงของโรคมินามาตะที่เกิดในประเทศญี่ปุ่น เป็นต้น

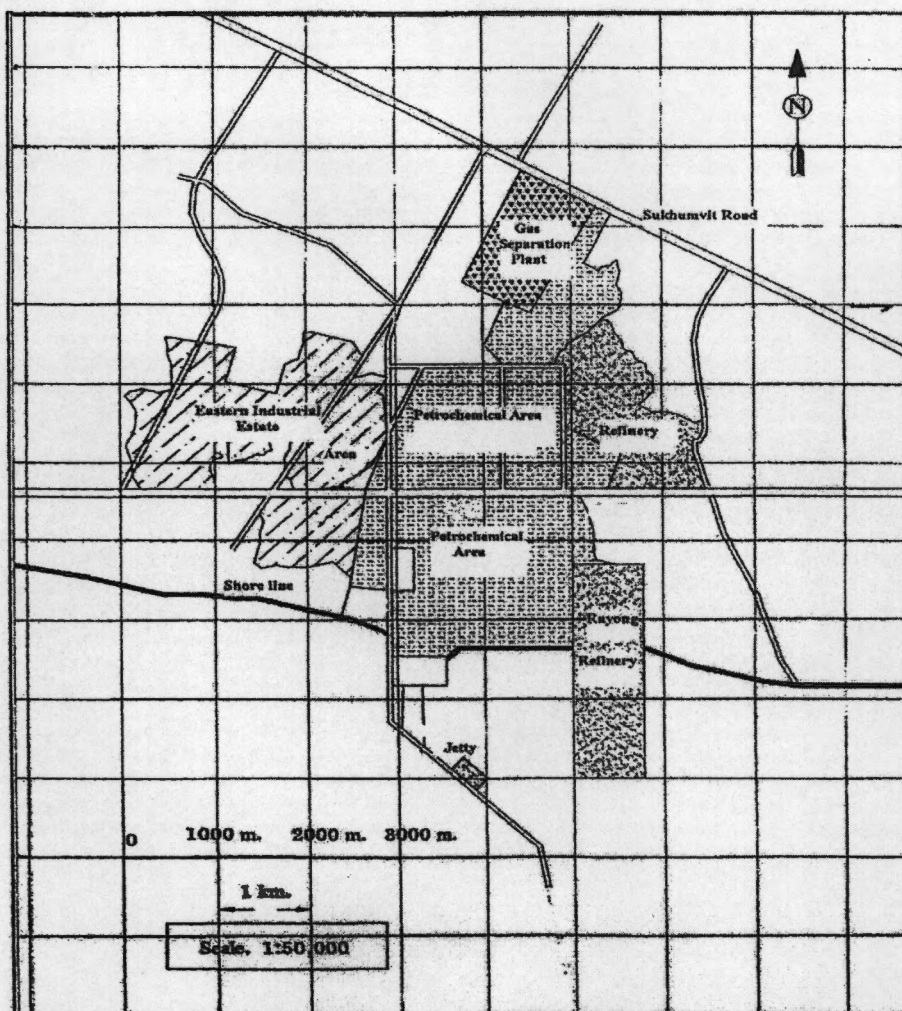
ปรอทสามารถเข้าสู่แหล่งน้ำได้ทั้งจากกระบวนการทางธรรมชาติและจากกิจกรรมของมนุษย์ และเกิดได้ในหลายรูปแบบ (chemical forms) กระบวนการอันซับซ้อนทางด้านฟิสิกส์ เคมี และชีววิทยา ส่งผลสุดท้ายให้สารปรอทส่วนใหญ่เข้าไปสะสมอยู่ในดินตะกอน อย่างไรก็ตาม สารปรอทในดินตะกอนสามารถถูกปลดปล่อยกลับสู่แหล่งน้ำได้อีกโดยกระบวนการต่างๆ สารปรอทที่ถูกปลดปล่อยออกจากดินตะกอนสามารถทำอันตรายต่อสัตว์น้ำ และสะสมได้ในห่วงโซ่อาหาร ดังนั้น ดินตะกอนจึงเปรียบเสมือนเป็นทั้งแหล่งเก็บ (sink) และแหล่งปล่อย (source) ของสารปรอทในแหล่งน้ำ ด้วยเหตุนี้ พฤติกรรมและการเปลี่ยนแปลงของสารปรอทในดินตะกอนจึงได้รับความสนใจในการศึกษาเพิ่มมากขึ้นในช่วงเวลาที่ผ่านมา

ข้อมูลของสารปรอทในน้ำและดินตะกอนทั้งในอดีตและปัจจุบัน พบว่าส่วนใหญ่ รายงานไว้ในรูปของปริมาณปรอทรวม (total Hg) ซึ่งจะไม่ค่อยมีประโยชน์มากนักในแง่ของการประเมินผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากปริมาณปรอทรวมไม่ใช่เป็นปริมาณปรอทที่สิ่งมีชีวิตสามารถรับเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งหมด สารปรอทบางรูปแบบเท่านั้นที่สามารถเข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้ หรือเรียกว่า "bioavailable form" ซึ่งจะสามารถบ่งบอกได้ถึงระดับความเป็นพิษ (toxicity) หากรับเข้าสู่ร่างกายมากเกินไป ดังนั้น ข้อมูลของปริมาณปรอทรวมแต่เพียงอย่างเดียว ไม่สามารถบ่งชี้ถึง bioavailability และความเป็นพิษที่มีต่อสิ่งมีชีวิตใดๆ ได้เลย เนื่องจากทั้ง bioavailability และความเป็นพิษของปรอท หรือโลหะชนิดอื่นๆ ขึ้นอยู่กับรูปแบบทางเคมี (chemical speciation) ของโลหะชนิดนั้นๆ (Luoma, 1983; Bryan and Langston, 1992) สำหรับในน้ำทะเลนั้น ปรอทในรูปละลาย (dissolved Hg) จัดว่าเป็น bioavailable form ส่วนในดินตะกอนนั้น ปรอทในรูปที่สามารถละลายออกจากดินตะกอนได้ง่าย (more soluble fractions) เท่านั้น ที่จะจัดเป็น bioavailable form ด้วยเหตุนี้ สารปรอทในรูปดังกล่าวจึงมีความสำคัญควรแก่การศึกษาทั้งในน้ำและดินตะกอน

โดยทั่วไปปริมาณโลหะหนักในน้ำทะเล ยังถูกควบคุมโดยกระบวนการที่สำคัญ ได้แก่ กระบวนการดูดซับ (adsorption) และกระบวนการปลดปล่อยหรือการคาย (desorption) กระบวนการทั้งสองดังกล่าวมีบทบาทที่สำคัญมากต่อการกระจาย และการเคลื่อนย้ายกลับไปกลับมา (remobilization) ของสารปรอทในน้ำ และดินตะกอน นอกจากนี้ยังพบว่า มีปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ มีอิทธิพลต่อกระบวนการทั้งสองด้วย ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของความเค็ม ความเป็นกรด-ด่าง ค่าศักย์ไฟฟ้า (redox potential; Eh) ปริมาณสารอินทรีย์ และ chelating agents บางชนิด เป็นต้น

เนื่องจากประเทศไทยได้ประสบปัญหาการเพิ่มขึ้นของสารปรอทในบริเวณชายฝั่งทะเลอันเนื่องมาจากการพัฒนาอุตสาหกรรม และการขุดเจาะก๊าซธรรมชาติในอ่าวไทย (Chongprasith and Wilairatanadilok, 1999) ดังนั้น ความรู้และความเข้าใจในเรื่องราวของสารปรอทในน้ำและดินตะกอนดังกล่าวข้างต้น จะช่วยให้เราเข้าใจดียิ่งขึ้นเกี่ยวกับการนำพา (transport) และเส้นทางเดิน (fate) ของสารปรอท หลังจากถูกปล่อยออกมาจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่ทะเล รวมถึง bioavailability และความเป็นพิษของสารปรอทที่อาจมีต่อสัตว์น้ำหรือสิ่งมีชีวิตอื่น ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีอยู่จำกัด หรือน้อยมากในประเทศไทย

นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง มีเนื้อที่ประมาณ 8,000 ไร่ เป็นที่ตั้งของอุตสาหกรรมหนักที่สำคัญบริเวณชายฝั่งทะเลภาคตะวันออก ประกอบด้วยอุตสาหกรรมที่สำคัญ ได้แก่ โรงแยกก๊าซธรรมชาติ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมปุ๋ยเคมี อุตสาหกรรมโรงกลั่นน้ำมัน เป็นต้น และชายฝั่งยังมีท่าเรือน้ำลึกเพื่อใช้ในขนถ่ายสินค้าอีกด้วย (ภาพที่ 1) บริเวณนิคมอุตสาหกรรมนี้มีการตรวจพบว่ามีสารปรอทสูงเกินกว่ามาตรฐานที่กำหนดในบางสถานีและบางปี ทั้งนี้ได้มีรายงานการตรวจพบสารปรอทในน้ำทะเลบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ในระหว่างปี 2538-2541 มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง $0.01 - 0.48 \mu\text{g L}^{-1}$ ซึ่งสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานของปรอทในน้ำทะเลชายฝั่งของประเทศไทยที่กำหนดไว้ให้มีค่าไม่เกิน $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ โดยปริมาณสารปรอทที่ตรวจพบสูงอยู่ในระหว่างปี 2538 - 2539 (Chongprasith and Wilairatanadilok, 1999) นอกจากนี้ยังตรวจพบปริมาณสารปรอทค่อนข้างสูงในดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดอีกด้วย (Chongprasith and Wilairatanadilok, 1999) ปริมาณสารปรอทที่ตรวจพบสูงทั้งในน้ำทะเลและดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด เป็นข้อเตือนใจให้หน่วยงานของรัฐที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะกรมควบคุมมลพิษได้ตระหนักถึงปัญหาการปนเปื้อนของสารปรอทในบริเวณนิคมอุตสาหกรรมและกำหนดไว้เป็นปัญหาในระดับชาติที่จะต้องดำเนินการป้องกันและแก้ไข รวมถึงการติดตามตรวจสอบการปนเปื้อนของสารปรอทในน้ำ และดินตะกอน ตลอดจนสิ่งมีชีวิตอย่างสม่ำเสมอ



ภาพที่ 1 ที่ตั้งของอุตสาหกรรมที่สำคัญในบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง
(ดัดแปลงภาพจาก Pimpisut et al., 2005)

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

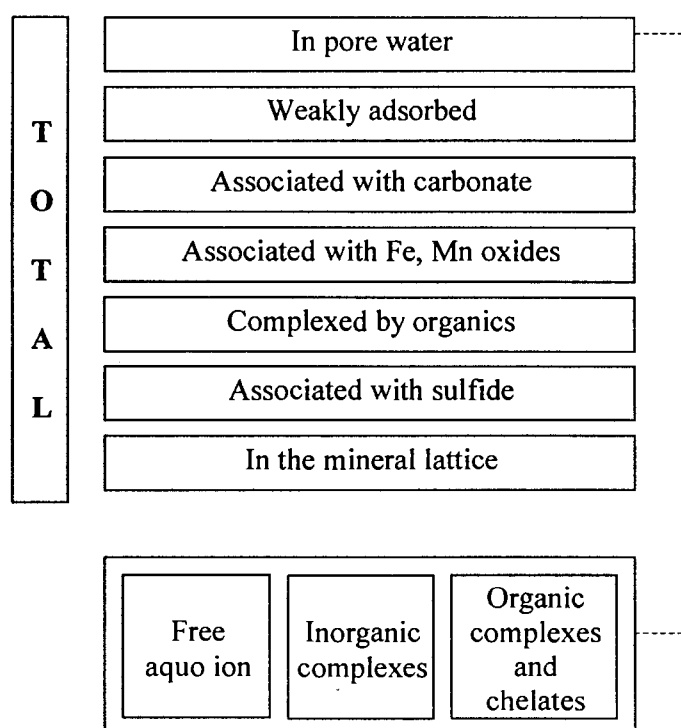
วัตถุประสงค์ของการศึกษาโดยทั่วไป เพื่อให้เกิดความรู้ ความเข้าใจ ที่ดีขึ้นเกี่ยวกับพฤติกรรม และการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสารปรอทเมื่อเข้าสู่และดินตะกอนในบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ปริมาณปรอทในน้ำ และดินตะกอนที่สามารถเข้าสู่ร่างกายสัตว์น้ำได้ (bioavailable form) ปรากฏการณ์การดูดซับ และการปลดปล่อยของสารปรอทที่เกิดขึ้นในดินตะกอน รวมทั้งปัจจัยแวดล้อมที่มีอิทธิพล ตลอดจนปริมาณปรอทที่สะสมอยู่ในสัตว์ทะเล สำหรับวัตถุประสงค์จำเพาะสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. ศึกษาการกระจายของสารปรอท ในน้ำทะเลบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด
2. ศึกษาการกระจายของสารปรอทในดินตะกอน และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทรวม และคุณสมบัติของดินตะกอนบางประการ
3. ศึกษารูปแบบทางธรณีเคมี (geochemical forms) ของสารปรอทในดินตะกอน และประเมินค่า bioavailable form ของสารปรอทในดินตะกอน
4. ศึกษากระบวนการดูดซับและการปลดปล่อยของสารปรอท และประเมินค่าความจุหรือความสามารถ (capacity) ของดินตะกอนที่จะดูดซับและปลดปล่อยสารปรอทออกมาสู่แหล่งน้ำ ตลอดจนความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินตะกอนบางประการที่มีต่อกระบวนการทั้งสอง
5. ศึกษาอิทธิพลของความเค็มที่มีต่อกระบวนการดูดซับและการปลดปล่อยสารปรอท เนื่องจากความเค็มมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบทางเคมีของปรอท (Hg species) จากขบวนการ chloride complexation ซึ่งจะส่งผลต่อการดูดซับสารปรอทเข้าสู่ดินตะกอน
6. ศึกษาปริมาณการสะสมของสารปรอทในสัตว์ทะเลที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจบริเวณดังกล่าว และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทกับขนาดหรือน้ำหนักของสัตว์ทะเล

การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ปริมาณโลหะรวม ไม่สามารถบ่งบอกถึงผลกระทบของโลหะหนักที่มีต่อสิ่งมีชีวิตได้ โลหะในรูปของ "bioavailable form" เท่านั้น ที่สิ่งมีชีวิตสามารถรับเข้าสู่ร่างกาย และทำให้เกิดพิษ หรือสะสมในร่างกายของสิ่งมีชีวิตนั้นๆ ได้ (Waldichuk, 1985) รูปแบบของโลหะหนักดังกล่าว โดยปกติจะหมายถึงรูปแบบที่ละลายได้ (dissolved) หรือเป็นไอออน (ionic species) อยู่ในน้ำทะเล หรือละลายอยู่ในสารละลายดิน (soil solution) และละลายอยู่ในน้ำระหว่างเม็ดดิน (pore water) หรือโลหะที่จับรวมตัวกับดินตะกอน โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (cation exchange) มีการทดลองหลายเรื่องที่แสดงให้เห็นว่าปริมาณโลหะหนักในสัตว์หน้าดิน (benthic organisms) ไม่มีความสัมพันธ์ใดๆ กับปริมาณโลหะหนักรวมในดินตะกอน แต่จะมีความสัมพันธ์กับส่วนของโลหะที่จับตัวกับดินตะกอนและสกัดออกมาได้โดยง่าย (easily extracted fractions) เช่น การทดลองของ Luoma and Bryan (1978), Langston (1980) และ Tessier et al (1984) เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วรูปแบบทางเคมีของโลหะที่อยู่ในดินตะกอนสามารถแบ่งออกได้ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 รูปแบบทางเคมีของโลหะที่อยู่ในดินตะกอน (Gunn et al., 1988)

ถ้าไม่นับรวมโลหะที่ละลายอยู่ในน้ำระหว่างเม็ดดิน (pore water) แล้วโลหะที่อยู่ในสามรูปแบบแรกในภาพที่ 2 จัดว่าเป็น "potentially bioavailable forms" เนื่องจากสามารถถูกปลดปล่อยออกจากดินตะกอนได้โดยง่าย ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง เช่น ความเป็นกรด-ด่าง สภาวะการมีออกซิเจนหรือไร้ออกซิเจน เป็นต้น สำหรับรูปแบบสุดท้าย จัดว่าเป็นรูปแบบที่ไม่มีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต (unavailable form) เนื่องจากโลหะจะฝังตัว หรือรวมตัวกับโครงสร้างของแร่ธาตุที่อยู่ในดิน (lattice structure of minerals)

ดังนั้น การศึกษา หรือวิเคราะห์หาปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนแต่เพียงอย่างเดียว จึงไม่สามารถบ่งชี้ถึงอันตรายที่จะมีต่อสิ่งมีชีวิตในบริเวณนี้ได้ และอาจทำให้ตีความหมายของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมผิดพลาดไป ตัวอย่างของการศึกษาในเรื่องนี้ ได้แก่ การศึกษาของ Thongra-ar (2001) พบว่าปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนลึก 0-2 เซนติเมตร บริเวณปากแม่น้ำบางปะกง ที่สถานีหน้าวัดบนมีค่าสูงถึง 0.94 $\mu\text{g/g}$ น้ำหนักแห้ง ซึ่งมีค่าสูงเกินกว่ามาตรฐานของปรอทในดินตะกอนที่กำหนดไว้ในบางประเทศ หากตีความไปตามข้อมูลของปริมาณปรอทรวมที่ตรวจพบในบริเวณดังกล่าวก็แสดงว่าบริเวณนั้นมีปัญหามลพิษของปรอทในดินตะกอนเกิดขึ้น แต่จากการศึกษาอีกในรายละเอียดถึงรูปแบบทางเคมีของปรอทในดินตะกอน พบว่า มากกว่า 90% ของปรอทในบริเวณนั้น อยู่ในส่วนของโครงสร้างของแร่ธาตุ อันเกิดจากกระบวนการธรรมชาติมากกว่ามาจากกิจกรรมของมนุษย์ หรือจากโรงงานอุตสาหกรรม

การศึกษารูปแบบทางเคมีของโลหะหนักในดินตะกอน ที่นิยมทำกันมักใช้เทคนิคการสกัดอย่างต่อเนื่องตามลำดับ ที่เรียกว่า "sequential extraction" (Tessier et al., 1979) ซึ่งเทคนิคการสกัดดังกล่าวยังมีปัญหา หรือข้อจำกัดอยู่บ้าง และใช้เวลามากในการสกัด แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้อาจมีประโยชน์มากกว่าการวิเคราะห์หาปริมาณปรอทรวมแต่เพียงอย่างเดียว

นอกจากในเรื่องของรูปแบบทางเคมีของโลหะหนักที่ใช้เป็นกรอบแนวความคิดของงานวิจัยเรื่องนี้แล้ว กระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างบริเวณรอยต่อของผิวดินและน้ำ (sediment-water interface) โดยเฉพาะกระบวนการดูดซับ และกระบวนการปลดปล่อย มีความสำคัญในแง่ของการควบคุมปริมาณโลหะที่อยู่ในน้ำ ควบคุมการเคลื่อนย้ายโลหะจากน้ำเข้าสู่ดิน หรือเคลื่อนย้ายโลหะออกจากดินไปสู่ น้ำ ซึ่งหากพบว่าดินบริเวณนั้นๆ มีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะได้ดี และถ้าสามารถจับแน่นกับโลหะนั้น ไม่ยอมปลดปล่อยกลับคืนสู่แหล่งน้ำโดยง่าย ดินบริเวณดังกล่าวก็จะเป็นแหล่งฝังตัวแน่นอย่างถาวร (permanent sink) ของโลหะหนักชนิดนั้นๆ

การศึกษาในเรื่องดังกล่าวสำหรับประเทศไทยมีการศึกษาไว้ในบริเวณแม่น้ำบางปะกง (Thongra-ar, 2001; Parkpoin et al, 2001) พบว่าดินบริเวณนี้มีศักยภาพสูงในการดูดซับสารปรอทในปริมาณสูง (good sink) หลังจากดูดซับไว้แล้ว โอกาสที่จะปลดปล่อยกลับคืนสู่น้ำอีกเป็นไปได้ยากมาก เป็นปรากฏการณ์ที่ เรียกว่าเกิด strong irreversibility หรือ hysteresis ดังนั้นหากศึกษาแล้วพบว่าดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดมีศักยภาพสูงในการดูดซับสารปรอท ก็จะเป็นประโยชน์ต่อสัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้น ตลอดจนประชาชนที่นำสัตว์น้ำมาบริโภค

นอกจากนี้ในบริเวณชายฝั่งทะเล ยังมีปัญหาในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงความเค็มของน้ำทะเล ซึ่งความเค็มเป็นปัจจัยแวดล้อมหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการดูดซับและการปลดปล่อยสารปรอท โดยดินตะกอน ความเค็ม หรือคลอไรด์ไอออน จัดว่าเป็น complexing agent ตัวหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญต่อการละลายและการเคลื่อนที่ของสารปรอทในสิ่งแวดล้อม ทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการดูดซับสารปรอท (Hahne and Kroontje, 1973a) ทั้งนี้คุณสมบัติของดินตะกอนบางประการยังมีอิทธิพลต่อกระบวนการดูดซับอีกด้วย โดยเฉพาะปริมาณสารอินทรีย์ และเนื้อดินเหนียว (clay)

ด้วยเหตุนี้จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจอย่างยิ่ง หากมีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสารปรอท ในน้ำและดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ตลอดจนกลไกและกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งความรู้ ความเข้าใจในเรื่องของพฤติกรรมของสารปรอททั้งในน้ำ และดินตะกอน จะช่วยในการวางแผน และจัดการปัญหาสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากการพัฒนาอุตสาหกรรมในบริเวณดังกล่าวได้เป็นอย่างดี และจะเป็นนวัตกรรมใหม่ของการศึกษาปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ไม่ใช่เป็นแต่เพียงการติดตามตรวจสอบแต่เพียงอย่างเดียว

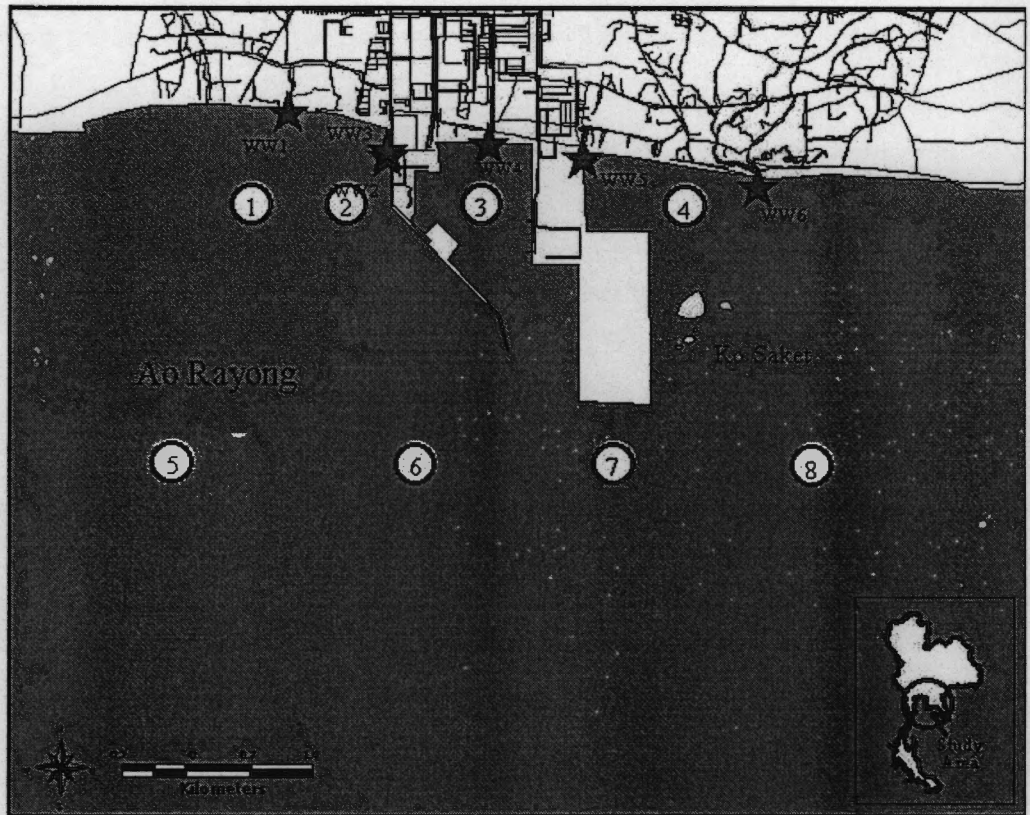
อุปกรณ์และวิธีการ

1. การสำรวจพื้นที่ และกำหนดสถานีเก็บตัวอย่าง

ทำการสำรวจพื้นที่โดยประสานงานกับสำนักงานนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง เพื่อกำหนดสถานีเก็บตัวอย่างในบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ให้ครอบคลุมพื้นที่ของการนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด และพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลจากน้ำทิ้งของนิคมอุตสาหกรรมผาแดงและนิคมอุตสาหกรรมตะวันออก โดยมีจุดเก็บตัวอย่างทั้งหมดรวม 8 สถานี ทั้งนี้ได้แบ่งจุดเก็บตัวอย่างออกเป็น 2 แนว คือ ระยะใกล้ฝั่ง 500-1000 เมตร (สถานี 1-4) และระยะไกลฝั่งไม่เกิน 5 กิโลเมตร (สถานี 5-8) เพื่อศึกษาการกระจายของสารปรอท นอกจากนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งบนฝั่งบริเวณคลองระบายน้ำ และจุดที่ระบายลงสู่ทะเลเพิ่มอีก 6 สถานีด้วย (สถานี WW1 – WW6) รายละเอียดสถานีเก็บตัวอย่างแสดงไว้ในตารางที่ 1 และภาพที่ 3

ตารางที่ 1 ตำแหน่งสถานีเก็บตัวอย่างน้ำทะเลและดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดและบริเวณใกล้เคียง จังหวัดระยอง

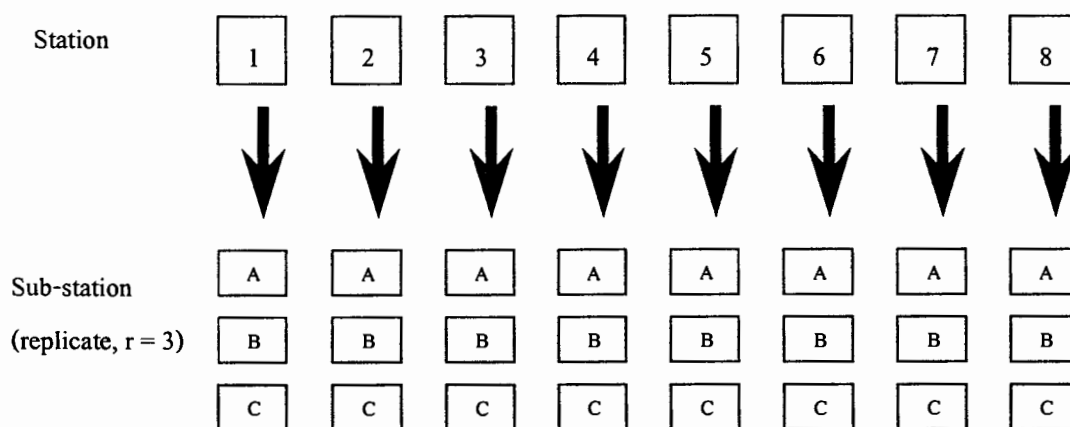
Station No.	Latitude	Longitude	Remark
1	N 12° 39' 57.8"	E 101° 07' 13.9"	
2	N 12° 39' 29.9"	E 101° 08' 04.2"	
3	N 12° 39' 39.4"	E 101° 08' 49.3"	
4	N 12° 39' 21.3"	E 101° 10' 36.7"	
5	N 12° 37' 30.8"	E 101° 06' 25.2"	
6	N 12° 37' 38.6"	E 101° 07' 41.9"	
7	N 12° 37' 38.8"	E 101° 09' 55.8"	
8	N 12° 37' 56.1"	E 101° 11' 25.9"	
WW1	N 12° 40' 14.1"	E 101° 07' 25.0"	wastewater sampling station
WW2	N 12° 40' 08.9"	E 101° 08' 09.0"	wastewater sampling station
WW3	N 12° 40' 09.9"	E 101° 08' 09.7"	wastewater sampling station
WW4	N 12° 40' 0.3"	E 101° 08' 55.8"	wastewater sampling station
WW5	N 12° 40' 17.5"	E 101° 09' 38.8"	wastewater sampling station
WW6	N 12° 39' 44.6"	E 101° 10' 59.6"	wastewater sampling station



ภาพที่ 3 สถานีเก็บตัวอย่างน้ำทะเลและดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด และบริเวณใกล้เคียง จังหวัดระยอง

2. การเก็บตัวอย่างน้ำทะเล ดินตะกอน และสัตว์ทะเล

เก็บตัวอย่างน้ำทะเลและดินตะกอน รวม 2 ครั้ง คือในฤดูน้ำน้อยหรือฤดูแล้งในวันที่ 31 มีนาคม 2546 และฤดูน้ำมากหรือฤดูฝนในวันที่ 2 ตุลาคม 2546 สำหรับตัวอย่างน้ำทิ้งเก็บในวันที่ 12 พฤษภาคม 2546 และวันที่ 30 กันยายน 2546 เพื่อศึกษาอิทธิพลของฤดูกาลที่มีต่อการสะสมสารปรอทในน้ำและดินตะกอน ในแต่ละสถานีได้แบ่งออกเป็น 3 sub-stations โดยมีระยะห่างกันประมาณ 5-20 เมตร เพื่อให้มีจำนวนซ้ำของการเก็บตัวอย่างสถานีละ 3 ซ้ำ รวมทั้งหมด 24 sub-stations หรือ 24 ซ้ำ ดังรายละเอียดในแผนผัง



$n = 24$ replicates (sub-stations)

ตัวอย่างน้ำทะเลเก็บโดยใช้เครื่องมือเก็บตัวอย่างน้ำที่ไม่ได้ทำด้วยโลหะ (Niskin non-metallic convertible water sampler) ที่ความลึก 2 ระดับ คือ ผิวน้ำ และเหนือพื้นดิน ตัวอย่างน้ำที่ได้จะเก็บในขวดแก้วไพเร็กซ์ที่มีฝารองในเป็น Teflon พร้อมทั้งเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น เพื่อให้ pH ของน้ำต่ำกว่าหรือเท่ากับ 2 ($\text{pH} \leq 2$) หุ้มด้วยถุงพลาสติก 2 ชั้น และเก็บในถังแช่เย็น นอกจากนี้ได้ทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำขั้นพื้นฐาน ได้แก่ อุณหภูมิ ความเค็ม ความเป็นกรด-ด่าง ความโปร่งแสง ออกซิเจนละลายน้ำ และสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำในรูปของ Fluorescence intensity unit (DOC Fluorescence) ตามวิธีของ Hayase and Tsubota (1985) ของแต่ละสถานีไว้ด้วย

ดินตะกอน เก็บโดยใช้เครื่องเก็บตัวอย่างดินที่ดัดแปลงมาจากแบบของ Petersen grab หลังจากนั้นนำมาเก็บไว้ในตู้แช่แข็ง และทำให้แห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งด้วยความเย็น (Freeze dryer)

สำหรับสัตว์ทะเล เก็บตัวอย่างโดยซื้อจากชาวประมงที่อยู่บริเวณนิคมอุตสาหกรรม และตกเบ็ดเอง หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาล้างด้วยน้ำทะเลให้สะอาด จำแนกชนิด ชั่งน้ำหนักและ/หรือวัดความยาว แต่เอาเฉพาะส่วนเนื้อที่ใช้บริโภค และบดให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำมาเก็บไว้ในตู้แช่แข็ง และทำให้แห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งด้วยความเย็น

3. การวิเคราะห์หาปริมาณปรอท (Mercury Analysis)

ปริมาณปรอทในน้ำทะเลทำการสกัดและเตรียมตัวอย่างโดยใช้วิธี BrCl oxidation วิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Cold Vapour Atomic Fluorescence Spectrometry (CVAFS) และวัดความเข้มข้นด้วยเครื่อง Atomic Fluorescence Spectrophotometer Model Merlin (P.S. Analytical Ltd.)

ดินตะกอนทำการสกัดด้วยส่วนผสมของ 9:1 HNO_3/HCl ตามวิธีของ Randlesome and Aston (1980) วิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Cold Vapour Atomic Absorption Spectrometry (CVAAS) ด้วยระบบ Flow Injection Mercury Hydried System (FI-MHS) Model FIAS 100 ใช้ 0.2 % NaBH_4 in 0.05 % NaOH เป็น reducing agent และ 3% (v/v) HCl เป็น carrier solution และวัดความเข้มข้นด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer Model 4110ZL (Perkin-Elmer, Connecticut, USA)

สำหรับสัตว์ทะเล ทำการสกัดด้วยส่วนผสมของกรด $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HCl}$ ตามวิธีของ Louie (1983) และวิเคราะห์โดยใช้ระบบ Flow Injection Mercury Hydried System เช่นเดียวกับดินตะกอน

ตัวอย่างแต่ละชนิดดังกล่าวข้างต้นทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 2 ซ้ำ ความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ สำหรับตัวอย่างน้ำทะเลตรวจสอบโดยการหาค่า % recovery หลังจากที่ได้มีการละลายมาตรฐานของปรอทที่ทราบความเข้มข้นลงในตัวอย่างน้ำทะเล พบว่า % recovery มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 88.44-102.49 % (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 % Recovery ของการวิเคราะห์ปริมาณปรอทในน้ำทะเล

Sample	Hg Added ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Hg Found ($\mu\text{g L}^{-1}$)	% Recovery
A	0	0.0042	
A	0.01	0.0130	88.44
B	0	0.0042	
B	0.01	0.0135	93.64
C	0	0.0026	
C	0.01	0.0114	88.44
D	0	0.0083	
D	0.01	0.0182	98.85
E	0	0.0026	
E	0.1	0.0999	97.28
F	0	0.0068	
F	0.1	0.1046	97.80
G	0	0.0078	
G	0.1	0.1056	97.80
H	0	0.0036	
H	0.1	0.1061	102.49

ส่วนตัวอย่างดินตะกอนและสัตว์ทะเลตรวจสอบกับดินตะกอนทะเลมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น (Marine Sediment Reference Material: MESS-3) และเนื้อเยื่อปลาทะเลมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น (Dogfish muscle: DORM-2) ตามลำดับ ของ National Research Council of Canada นอกจากนี้ตรวจสอบความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ (precision) โดยคำนวณหาค่า % RSD (Relative Standard Deviation) ดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ดินตะกอนทะเลมาตรฐาน (MESS-3)

Heavy Metal	Certified Value ($\mu\text{g g}^{-1}$ dry weight)	Measured Value ($\mu\text{g g}^{-1}$ dry weight) (n = 9)	% Recovery	% RSD
Hg	0.091 ± 0.009	0.087 ± 0.008	81.32 - 109.89	9.2

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์เนื้อเยื่อปลาทะเลมาตรฐาน (DORM-2)

Heavy Metal	Certified Value ($\mu\text{g g}^{-1}$ dry weight)	Measured Value ($\mu\text{g g}^{-1}$ dry weight) (n = 6)	% Recovery	% RSD
Hg	4.64 ± 0.26	4.28 ± 0.19	85.28 - 97.76	4.4

4. การศึกษารูปแบบทางธรณีเคมีของสารปรอทในดินตะกอน (Fractionation of Mercury in Sediments)

รูปแบบทางธรณีเคมีของสารปรอทในดินตะกอนทำการศึกษาโดยใช้เทคนิค sequential extraction ตามวิธีของ Tessier et al. (1979) ซึ่งได้แบ่งรูปแบบทางเคมีของโลหะในดินตะกอนไว้ 5 รูป ได้แก่

F1 exchangeable

F2 bound to carbonates

F3 bound to Fe and Mn oxides

F4 bound to organic matter and sulfide

F5 residual

การศึกษาดำเนินการโดยนำตัวอย่างดินตะกอนของแต่ละสถานที่ทำให้แห้งแล้ว มาทำการสกัดอย่างต่อเนื่องตามลำดับ ตามวิธีที่ได้อธิบายไว้ใน Tessier et al (1979) ดังแสดงในตารางที่ 5 ทำการสกัดตัวอย่างละ 2 กรัม และวิเคราะห์หาปริมาณปรอทในสารละลายโดยใช้วิธี BrCl oxidation ข้อมูลที่ได้ นอกจากจะทำให้ทราบถึงรูปแบบทางธรณีเคมีของสารปรอทในดินตะกอนแล้ว ยังสามารถใช้ในการทำนาย หรือประเมินค่า bioavailability และการเคลื่อนที่ (mobility) ของสารปรอทในดินตะกอนได้อีกด้วย

ตารางที่ 5 การสกัดหารูปแบบทางเคมีของสารปรอทในดินตะกอน โดยวิธี sequential extraction

Fraction	Extracted Component	Extractant	Process
F1	Exchangeable	8 mL of 1 M MgCl_2 , pH 7.0	Shake for 1 h
F2	Bound to Carbonates	8 mL of 1 M NaOAc , (pH 5.0 with HOAc)	Shake for 5 h
F3	Bound to Fe-Mn Oxides	20 mL of 0.04 M $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ in 25% (V/V) HOAc	$96 \pm 3^\circ\text{C}$ for 6 h, Occasional shaking
F4	Bound to Organic Matter and Sulfide	(a) 3 mL of 0.02 M HNO_3 + 5 mL of 30% H_2O_2 (pH 2.0 with HNO_3) (b) 3 mL of 30% H_2O_2 (pH 2.0 with HNO_3) (c) 5 mL of 3.2 M NH_4OAc in 20% (V/V) HNO_3 And dilute to 20 mL	(a) Heat to $85 \pm 2^\circ\text{C}$ for 2 h with occasional shaking (b) Heat to $85 \pm 2^\circ\text{C}$ for 3 h with intermittent shaking, then cool (c) shake for 30 min
F5	Residual	9:1 HNO_3 / HCl mixture	1 h digestion at 50°C

สำหรับความถูกต้องของวิธี sequential extraction ตรวจสอบโดยนำดินตะกอนทะเลมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น (Marine Sediment Reference Material; MESS-3) มาทำการสกัดพร้อมกับตัวอย่าง แล้วนำผลรวมของทั้ง 5 fraction มาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นของปรอท (certified value) ในดินตะกอนทะเลมาตรฐาน ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 Sequential extraction ของดินตะกอนทะเลมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น (MESS-3)

Fraction	MESS-3 ($\mu\text{g g}^{-1}$ dry weight)				Mean $\pm$ SD (n = 4)
	1	2	3	4	
F1	0.0023	0.0007	nd	nd	
F2	nd	nd	nd	nd	
F3	0.0028	0.0037	0.0033	0.0029	
F4	0.0076	0.0059	0.0029	0.0020	
F5	0.1077	0.0916	0.1012	0.1074	
Sum	0.120	0.102	0.107	0.112	0.111 ± 0.008
Certified value	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091
% Recovery	132.31	111.98	118.02	123.41	121.43 ± 8.63

หมายเหตุ: nd = $0.0003 \mu\text{g g}^{-1}$ dry weight สำหรับ F1 และ F2

5. การสกัดหาปริมาณปรอทในดินตะกอนที่สามารถเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ (Extraction of Bioavailable Form of Mercury in Sediments)

ปรอทในรูปของ bioavailable form ในดินตะกอน ทำการศึกษาโดยใช้ selective dissolution technique ซึ่งสกัดตัวอย่างด้วย 0.5 N HCl ตามวิธีของ Chester and Voutsinou (1981) ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 2 ซ้ำ

6. การวิเคราะห์คุณสมบัติของดินตะกอน (Sediment Characterization)

วิเคราะห์คุณสมบัติของดินตะกอนบางประการดังแสดงในตารางที่ 7 ตัวอย่างละ 2 ซ้ำ เพื่อใช้ในการหาความสัมพันธ์กับปริมาณปรอทรวมที่อยู่ในดินตะกอน โดยการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficient, r) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

ตารางที่ 7 คุณสมบัติของดินตะกอนบางประการที่ทำการวิเคราะห์และวิธีวิเคราะห์

Parameter	Method of Analysis	Reference
pH	pH meter (1:2.5 sediment: water)	
Cation exchange capacity (CEC)	Ammonium acetate saturation *	
Organic matter	Acid-dichromate oxidation	Nelson and Sommers (1982)
Calcium carbonate	Gravimetric method for loss of carbon dioxide	Goh et al.(1993)
Total Fe and Mn oxides	Dithionite-citrate method	Ross and Wang (1993)
Amorphous Fe and Mn oxides	Acid ammonium oxalate	Ross and Wang (1993)
Particle size distribution	Hydrometer method	Sheldrick and Wang (1993)
Sediment texture	Textural triangle	Hillel (1998)

* วิเคราะห์โดย ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. การทดลองเพื่อศึกษาการดูดซับและการปลดปล่อยสารปรอทโดยดินตะกอน (Adsorption and Desorption of Mercury by Sediments)

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถของดินตะกอนในการดูดซับและการปลดปล่อยสารปรอท และศึกษาอิทธิพลของความเค็มหรือคลอไรด์ไอออนที่มีต่อกระบวนการทั้งสอง รวมทั้งความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของดินตะกอน ตลอดจนกลไกต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบ

7.1 การทดลองเกี่ยวกับการดูดซับ

ทำการทดลองกับดินตะกอนทะเลบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดทั้ง 8 สถานีเฉพาะที่เก็บตัวอย่างมาในฤดูแล้ง การทดลองใช้เทคนิคที่เรียกว่า batch equilibration technique ใช้อัตราส่วนดินตะกอนต่อสารละลาย 1 : 10 โดยใช้สารละลาย 0.01 M $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ เป็น background electrolyte ทั้งนี้เพื่อลดการเกิด non-specific adsorption และเพื่อให้เหมือนกับสภาพจริงของสารละลายดินในธรรมชาติ เนื่องจากแคลเซียม เป็นไอออนบวกที่พบได้ทั่วไปและมีอยู่มากในดิน (Bohn et al., 1985) ส่วนไนเตรทไอออนสามารถจับกับปรอทเพื่อเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complex formation) ได้น้อยมากหรือแทบไม่มีเลย (Newton et al., 1976; Sarkar et al., 1999) ทำการทดลองที่ความเค็ม 4 ระดับ คือ 0 15 30 และ 45 psu (practical salinity unit) โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เติมลงในสารละลาย background electrolyte ให้ได้ความเค็มต่างๆตามต้องการ และตรวจสอบโดยใช้ hand refractometer

การทดลองในแต่ละความเค็มทำในหลอด polypropylene centrifuge tube (Nalgene) ขนาด 50 มิลลิลิตรซึ่งทำความสะอาดด้วยกรดไนตริกเรียบร้อยแล้ว ใส่ดินตะกอนหนัก 2.00 กรัม และสารละลาย background electrolyte 20 มิลลิลิตรที่มีสารปรอทความเข้มข้นต่าง ๆ กัน โดยทดลองเลือกช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับดินตะกอนแต่ละชนิดก่อน ทั้งนี้สารละลายปรอทเตรียมมาจาก $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ เมื่อได้ช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการทดลองจริงความเข้มข้นละ 2 ขั้ว และนำตัวอย่างที่เตรียมเสร็จแล้วมาเขย่าเพื่อให้ปรอทอยู่ในสภาวะสมดุลในสารละลาย (equilibrate) โดยใส่ลงในเครื่องเขย่า (shaker) ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิที่ 27 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง การเลือกใช้เวลานในการเขย่าที่ 24 ชั่วโมงได้มาจากการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาระยะเวลาสัมผัสที่เข้าใกล้จุดสมดุลของการดูดซับ (equilibrium time) ซึ่งปรอทที่เหลืออยู่ในสารละลายอยู่ในสภาวะสมดุลหรือในปริมาณที่คงที่หลังจากถูกดูดซับเข้าไปในดินตะกอน ทั้งนี้โดยการเติมสารปรอทที่ความเข้มข้น 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในดินตะกอนและนำไปเขย่าที่ระยะเวลาต่างๆ คือ 1, 2, 4, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง แล้วตรวจวัดปริมาณปรอทที่เหลืออยู่ในสารละลาย จากผลการทดลองพบว่าระยะเวลาที่เหมาะสม คือ ที่ 24 ชั่วโมง

เมื่อครบกำหนดเวลาในการเขย่าตัวอย่าง (24 ชั่วโมง) ทำการแยกสารละลายส่วนใสและดินตะกอนออกจากกันโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge, Tomy Seiko Model CD-100-R, Rotor no. RT-7-A) ที่ความเร็ว 3,500 rpm เป็นเวลา 15 นาที นำสารละลายที่ได้กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No. 2 แล้วนำมาวิเคราะห์หาปริมาณปรอทโดยใช้ระบบ Flow Injection Mercury Hydried System

(FI-MHS) วัดความเข้มข้นด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer Model 4110ZL (Perkin-Elmer, Connecticut, USA) และนำตัวอย่างส่วนหนึ่งวัดค่า pH ไว้ด้วย คำนวณหาค่าปริมาณโปรตีนที่ถูกดูดซับโดยดินตะกอนจากผลต่างระหว่างปริมาณโปรตีนเริ่มต้นที่เติมลงไปและปริมาณโปรตีนที่เหลืออยู่ในสารละลายเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (equilibrating concentration) นำข้อมูลที่ได้มาสร้างเส้นกราฟโดยใช้แบบจำลองการดูดซับในรูปของสมการ Freundlich isotherm เพื่อใช้อธิบายกระบวนการดูดซับ ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$x/m = KC^{1/n} \quad (1)$$

สมการดังกล่าวสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$\log x/m = \log K + 1/n \log C \quad (2)$$

เมื่อ

x/m = ปริมาณโปรตีนที่ถูกดูดซับเข้าไปในดินตะกอน (ไมโครกรัมต่อกรัม)

C = ความเข้มข้นของโปรตีนที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล (ไมโครกรัมต่อลิตร)

K และ $1/n$ เป็นค่า Freundlich constants โดย K เป็นค่า intercept ของสมการ ใช้แสดงค่าความจุหรือความสามารถในการดูดซับของดินตะกอน (adsorption capacity หรือ degree of affinity of the solid phase/degree or strength of adsorption) ส่วน $1/n$ เป็นค่า adsorption isotherm slope ใช้แสดงค่า อัตราเร็วของการดูดซับ (rate of adsorption หรือ intensity of adsorption)

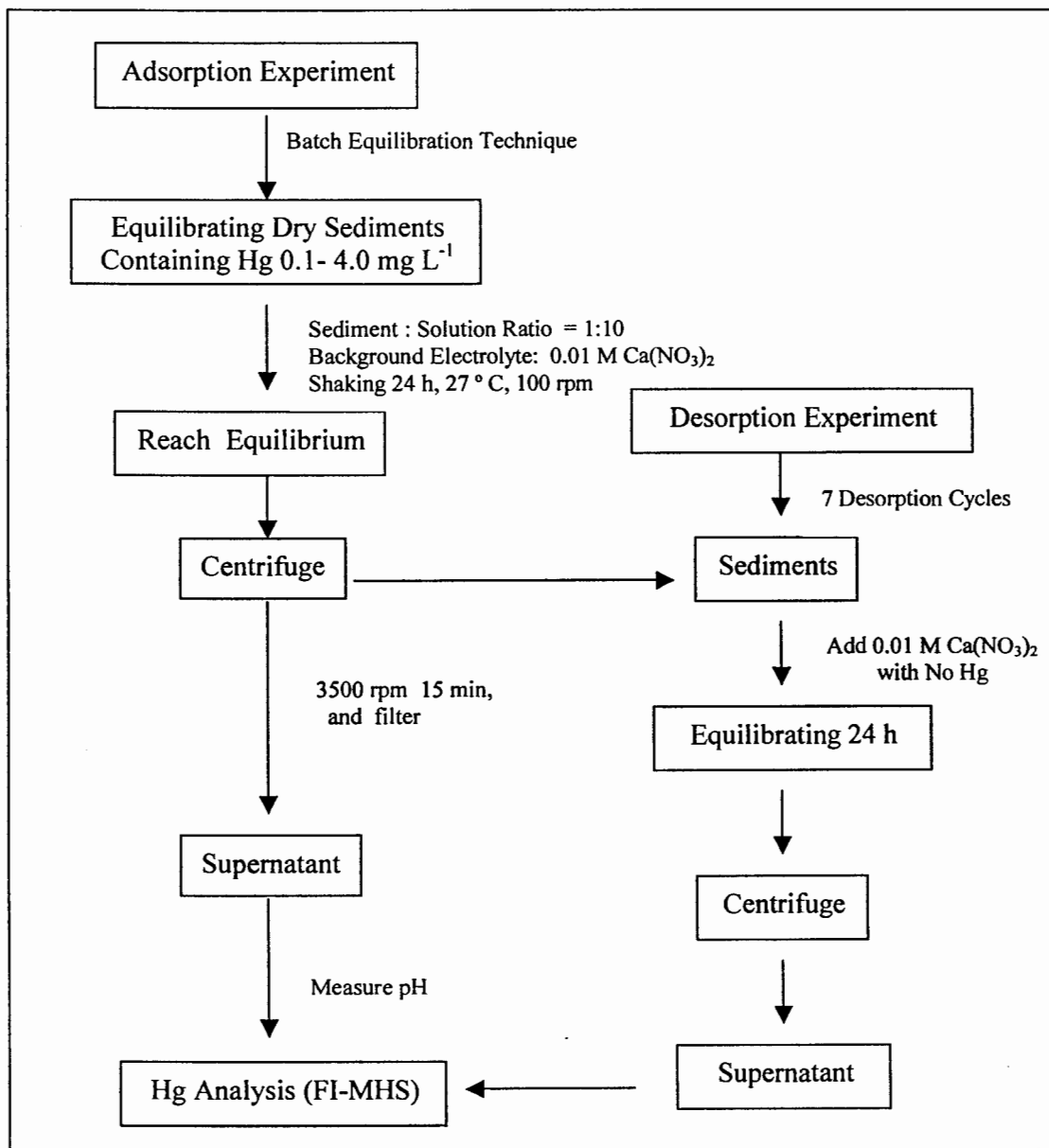
ทดสอบความเหมาะสมของสมการ Freundlich isotherm ที่ได้โดยพิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ (R^2) และทดสอบนัยสำคัญทางสถิติของค่า R^2 ด้วย คำนวณหาค่า K และ $1/n$ ของการดูดซับ (K_{ads} และ $1/n_{ads}$) โดยใช้ regression analysis แบบ power model ด้วยโปรแกรม SPSS และ EXCEL

7.2 การทดลองเกี่ยวกับการปลดปล่อย

ทำการทดลองศึกษาการปลดปล่อยสารโปรตีนออกจากดินตะกอนต่อเนื่องจากการทดลองการดูดซับ โดยเติมสารละลาย background electrolyte ที่ไม่มีสารโปรตีนลงในดินตะกอน แล้วนำไปเขย่าในเครื่องเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดำเนินการทดลองภายใต้สภาวะอย่างเดียวกันกับการศึกษาการดูดซับ โดยเลือกทำการทดลองที่ความเข้มข้น 2 ระดับซึ่งแตกต่างกัน ศึกษาการปลดปล่อยสารโปรตีนออกจากดินตะกอนในแต่ละระดับความเข้มข้นรวม 7 รอบ (7 desorption cycles) และทดลองที่ความถี่ 4 ระดับ

คำนวณหาปริมาณปรอทที่ยังคงเหลืออยู่ในดินตะกอนหลังจากที่ปรอทบางส่วนได้ถูกคายหรือปล่อยออกจากดินตะกอนแล้ว นำข้อมูลที่ได้มาทดสอบความเหมาะสมกับสมการ Freundlich isotherm และคำนวณหาค่า K และ $1/n$ ของการปลดปล่อย (K_{des} และ $1/n_{des}$) เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากกระบวนการดูดซับ

การทดลองเพื่อศึกษากระบวนการดูดซับและการปลดปล่อยสารปรอทโดยดินตะกอนดังกล่าวข้างต้น สรุปได้ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผนผังแสดงการทดลองเพื่อศึกษาการดูดซับและการปลดปล่อยสารปรอทโดยดินตะกอน

ผลและวิจารณ์ผล

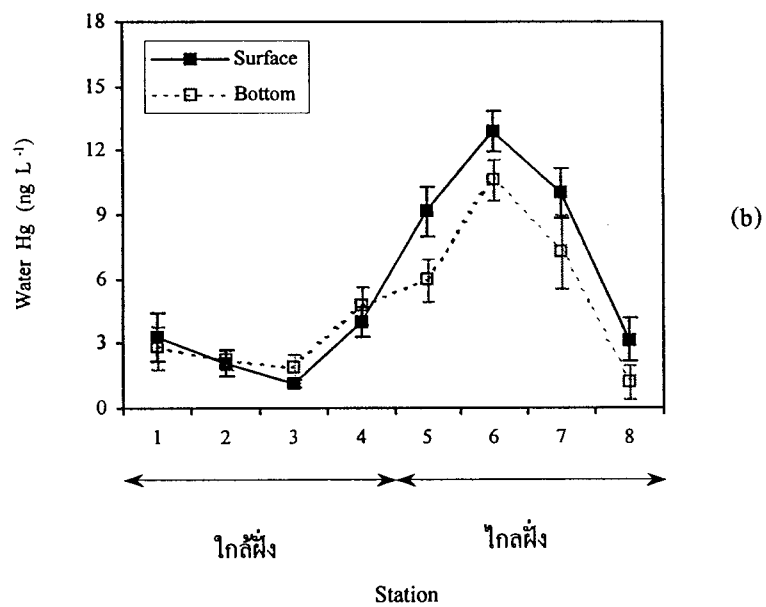
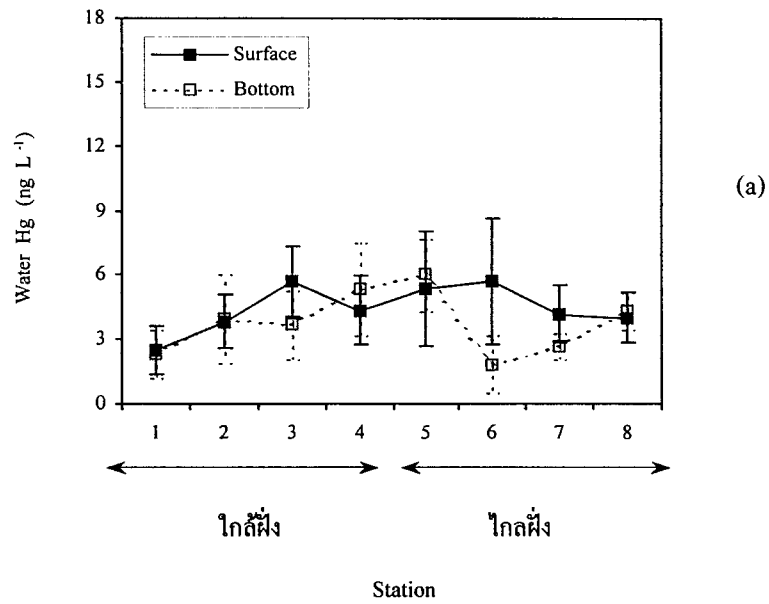
1. การกระจายของสารปรอทในน้ำ

ผลการศึกษาปริมาณปรอทรวมในน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด พบว่าความเข้มข้นที่ผิวน้ำและเหนือพื้นดินของทั้งสองฤดูมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (ภาพที่ 5) แสดงว่าน้ำทะเลมีการผสมผสานกันอย่างดีตลอดความลึกทั้งสองฤดู โดยค่าเฉลี่ยของปรอทรวมที่ผิวน้ำและเหนือพื้นดินของสถานีต่างๆ ในฤดูแล้งมีค่าระหว่าง $2.42 - 5.67 \text{ ng L}^{-1}$ และฤดูฝนมีค่าระหว่าง $1.52 - 11.77 \text{ ng L}^{-1}$ (ตารางที่ 8) ซึ่งค่าที่ตรวจพบดังกล่าวต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งของไทยหลายเท่า (ค่ามาตรฐานสารปรอทในน้ำทะเลของไทยกำหนดไว้ให้มีค่าไม่เกิน $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ หรือ 100 ng L^{-1}) ความเข้มข้นของสารปรอทในฤดูฝนมีแนวโน้มสูงกว่าในฤดูแล้งแต่พบเพียงบางสถานีเท่านั้น โดยเฉพาะสถานีที่ 6 และ 7 (ภาพที่ 5) ซึ่งเป็นสถานที่ที่อยู่ใกล้ฝั่งและอยู่ในบริเวณศูนย์กลางของนิคมอุตสาหกรรมฯ ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าน้ำฝนได้พัดพาสารปรอทจากบนฝั่งออกสู่ทะเล

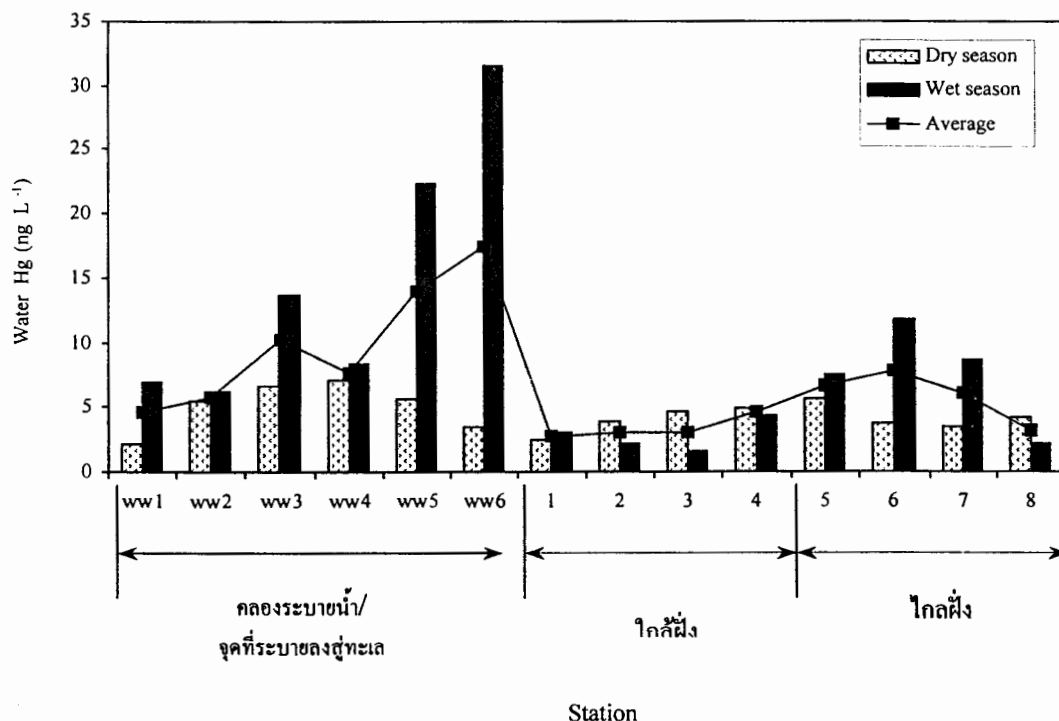
ตารางที่ 8 ปริมาณปรอทรวมในน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัด ระยอง ในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546) และฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546) รวมทั้งค่าเฉลี่ยตลอดปี (หน่วยเป็น ng L^{-1})

Station	Dry Season (March 2003)			Wet Season (October 2003)			Year Average
	Surface (n = 6)	Bottom (n = 6)	Mean $\pm$ SE (n = 12)	Surface (n = 6)	Bottom (n = 6)	Mean $\pm$ SE (n = 12)	
1	2.50	2.33	2.42 ± 0.75	3.30	2.82	3.06 ± 0.70	2.74
2	3.83	4.00	3.92 ± 1.14	2.07	2.25	2.16 ± 0.38	3.04
3	5.67	3.67	4.67 ± 1.12	1.13	1.90	1.52 ± 0.35	3.10
4	4.33	5.33	4.83 ± 1.29	4.00	4.78	4.39 ± 0.55	4.61
5	5.33	6.00	5.67 ± 1.51	9.15	5.93	7.54 ± 0.83	6.61
6	5.67	1.83	3.75 ± 1.65	12.90	10.63	11.77 ± 0.75	7.76
7	4.17	2.67	3.42 ± 0.74	10.00	7.30	8.65 ± 1.07	6.04
8	4.00	4.33	4.17 ± 0.68	3.15	1.23	2.19 ± 0.67	3.18

หมายเหตุ : Method Detection Limit (MDL) = 1 ng L^{-1}



ภาพที่ 5 การกระจายของสารปรอท (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน, $n = 6$) ที่ผิวน้ำและเหนือพื้นดิน ในบริเวณชายฝั่งทะเลนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดใน (a) ฤดูแห้ง และ (b) ฤดูฝน



ภาพที่ 6 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของปรอทรวมในน้ำที่พบในคลองระบายน้ำทิ้ง/จุดที่ระบายลงสู่ทะเล และความเข้มข้นเฉลี่ยของปรอทรวมในน้ำทะเลบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ในฤดูแล้ง และ ฤดูฝน และค่าเฉลี่ยตลอดปี

สำหรับความเข้มข้นของปรอทรวมในบริเวณคลองระบายน้ำทิ้ง/จุดที่ระบายลงสู่ทะเล พบว่า ในฤดูแล้งมีค่า 2.22 - 7.00 ng L⁻¹ และในฤดูฝนมีค่า 6.14 - 31.53 ng L⁻¹ (ตารางที่ 9) ซึ่งความเข้มข้นดังกล่าวสูงกว่าที่ตรวจพบในน้ำทะเลทั้งสองฤดูและในฤดูฝนพบสูงกว่าฤดูแล้งด้วย จุดที่พบสูงคือ ปากคลองบ้านตากวน (สถานี WW6) ซึ่งเป็นคลองระบายน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชนมาบตาพุด และคลองน้ำหอรองลงมาคือ คลองระบายน้ำทิ้งของการนิคมอุตสาหกรรมและน้ำจากรางระบายน้ำฝน (สถานี WW5) (ภาพที่ 6) ดังนั้นการปนเปื้อนของสารปรอทในน้ำทะเล จึงน่าจะมาจากกิจกรรมบนฝั่ง คือ น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชนและอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของปรอทที่ตรวจพบในคลองระบายน้ำทิ้งยังต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมซึ่งกำหนดไว้ให้มีค่าไม่เกิน 5 µg L⁻¹ (หรือเท่ากับ 5,000 ng L⁻¹) (กรมควบคุมมลพิษ, 2543) และต่ำกว่าค่ามาตรฐานสารปรอทในน้ำทะเลของไทยด้วย

ตารางที่ ๑ ปริมาณปรอทรวมในคลองระบายน้ำทิ้ง/จุดที่ระบายลงสู่ทะเล และคุณภาพน้ำอื่นๆ ในฤดูแล้ง (12 พฤษภาคม 2546) และ
ฤดูฝน (30 กันยายน 2546)

Station	Location	Dry Season (May 2003)					Wet Season (October 2003)				
		Salinity (psu)	pH	DOC Fluorescence (Unit)		Total Hg* (ng L ⁻¹)	Salinity (psu)	pH	DOC Fluorescence (Unit)		Total Hg* (ng L ⁻¹)
				Humic Acid	Fulvic Acid				Humic Acid	Fulvic Acid	
ww1	คลองบางเบิด น้ำทิ้งจากนิคมอุตสาหกรรม กรมผาแดงและนิคมอุตสาหกรรม ตะวันออกและชุมชนมาบชะลู	10	7.9	2.27	189.08	2.22± 0.06	5	7.7	3.50	204.96	6.94± 0.17
ww2	น้ำทิ้งจากระบบน้ำเสียส่วนกลางของ นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดโดยตรง รวมกับน้ำจากรางระบายน้ำฝน	8	7.0	3.46	198.03	5.44± 0.83	3	6.7	1.28	128.92	6.14± 0.52
ww3	น้ำทิ้งจากระบบน้ำเสียส่วนกลางของนิคม อุตสาหกรรมมาบตาพุดโดยตรง (เก็บจาก ปลายท่อก่อนลงสู่รางระบายน้ำฝน)	4	6.8	2.08	689.80	6.67± 0.22	2	6.9	2.17	882.53	13.72± 0.38
ww4	น้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียจากกลุ่ม โรงงานถนน ไอ เจ็ด ซึ่งเป็นโรงงานปุ๋ย และอะโรมาติก รวมกับน้ำจากราง ระบายน้ำฝน (หน้าบริษัท ท่าเรือระยอง จำกัด Rayong Bulk Terminal Co, LTD.)	3	7.1	3.86	218.86	7.00± 0.38	1	7.5	2.53	150.01	8.40± 0.58
ww5	คลองระบายน้ำทิ้งของการนิคมอุตสาหกรรม และน้ำจากรางระบายน้ำฝน	20	7.7	1.85	143.34	5.56± 0.06	1	7.4	7.00	167.35	22.39± 0.43
ww6	ปากคลองตากวน น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน มาบตาพุด คลองน้ำห	4	7.9	5.33	344.82	3.44± 0.17	1	7.1	11.96	151.38	31.53± 0.77

* : ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (n = 9)

ข้อมูลทางกายภาพและเคมีของน้ำทะเลโดยทั่วไปในบริเวณชายฝั่งนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ในฤดูแล้งและฤดูฝน แสดงในตารางที่ 10 และ 11 พบว่าไม่มีความแตกต่างกันในระดับความลึก และคุณภาพน้ำทั้งสองฤดูก็ไม่แตกต่างกันมากนักด้วย

ตารางที่ 10 ข้อมูลทางกายภาพและเคมีของน้ำทะเลโดยทั่วไปบริเวณชายฝั่ง นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด
จังหวัดระยอง ในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546)

Station	Depth (m)	Transparency (m)		Temp. (° C)	Salinity (psu)	pH	DO (mg L ⁻¹)	DOC Fluorescence (Unit)	
								Humic Acid	Fulvic Acid
1	4	2.1	Surface	31.5	31	8.2	8.3	0.34	9.28
			Bottom	31	31	8.2	7.5	0.36	9.80
			Average	31.3	31	8.2	7.9	0.35	9.54
2	4	1.5	Surface	32	30	8.2	8.3	0.25	7.45
			Bottom	31	30	8.2	7.8	0.31	8.52
			Average	31.5	30	8.2	8.1	0.28	7.98
3	11.9	2.4	Surface	31	30	8.3	8.6	0.29	7.34
			Bottom	30	30	8.2	7.2	0.26	8.08
			Average	30.5	30	8.2	7.9	0.28	7.71
4	3.9	1.4	Surface	31	30	8.2	9.5	0.36	10.50
			Bottom	31	31	8.2	9.0	0.33	9.75
			Average	31	30.5	8.2	9.3	0.34	10.13
5	16	11	Surface	30	30	8.1	8.4	0.22	6.19
			Bottom	29	31	8.2	8.0	0.25	6.61
			Average	29.5	30.5	8.1	8.2	0.23	6.40
6	14.5	7	Surface	31	30	8.2	8.2	0.27	6.77
			Bottom	30	31	8.2	8.0	0.24	6.17
			Average	30.5	30.5	8.2	8.1	0.26	6.47
7	12	1.5	Surface	31	30	8.2	9.0	0.40	15.20
			Bottom	30	32	8.2	7.5	0.23	6.46
			Average	30.5	31	8.2	8.3	0.31	10.83
8	11	2.1	Surface	31	30	8.2	8.4	0.32	8.71
			Bottom	30	31	8.2	8.0	0.32	9.44
			Average	30.5	30.5	8.2	8.2	0.32	9.08

ตารางที่ 11 ข้อมูลทางกายภาพและเคมีของน้ำทะเลโดยทั่วไปบริเวณชายฝั่ง นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด
จังหวัดระยอง ในฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546)

Station	Depth (m)	Transparency (m)		Temp. (°C)	Salinity (psu)	pH	DO (mg L ⁻¹)	DOC Fluorescence (Unit)	
								Humic Acid	Fulvic Acid
1	4.3	2.1	Surface	31.2	27	8.2	8.0	0.22	8.77
			Bottom	30.8	28	8.2	6.5	0.20	7.62
			Average	31.0	27.5	8.2	7.2	0.21	8.20
2	4.7	3.2	Surface	32.6	27	8.2	6.4	0.18	6.86
			Bottom	30.2	28	8.2	6.3	0.20	8.36
			Average	31.4	27.5	8.2	6.4	0.19	7.61
3	10.6	2.4	Surface	31.3	28	8.4	9.6	0.22	8.37
			Bottom	30.3	29.3	8.2	6.0	0.19	7.58
			Average	30.8	28.7	8.3	7.8	0.20	7.98
4	4.5	0.8	Surface	31.2	26	8.3	8.6	0.36	13.62
			Bottom	30.7	27	8.3	7.9	0.25	9.34
			Average	31.0	26.5	8.3	8.2	0.30	11.48
5	8.2	5	Surface	29.9	27	8.3	6.5	0.22	8.71
			Bottom	29.6	28	8.1	6.1	0.16	8.63
			Average	29.8	27.5	8.2	6.3	0.19	8.67
6	14.5	6.2	Surface	30.3	25	8.2	6.8	0.20	8.07
			Bottom	29.6	24	8.2	6.4	0.16	5.95
			Average	30.0	24.5	8.2	6.6	0.18	7.01
7	9.5	3.4	Surface	30.0	28	8.3	6.9	0.22	8.13
			Bottom	29.6	29	8.1	6.5	0.16	6.20
			Average	29.8	28.5	8.2	6.7	0.19	7.17
8	11.2	4.5	Surface	30.3	27	8.3	6.4	0.19	7.44
			Bottom	29.9	30	8.2	6.0	0.17	6.42
			Average	30.1	28.5	8.2	6.2	0.18	6.93

ปริมาณปรอทรวมในน้ำทะเลและในน้ำทิ้งที่คลองระบายน้ำ พบว่ามีความสัมพันธ์ทางบวกค่อนข้างสูงกับ Humic acid ที่อยู่ในสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ ซึ่งได้ทำการวัดค่าไว้ในรูปของ DOC Fluorescence (ภาพที่ 7) โดยเฉพาะพบความสัมพันธ์ที่ชัดเจนมากกับน้ำทิ้งที่คลองระบายน้ำหรือจุดที่ระบายลงสู่ทะเลในฤดูฝน จากความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงว่าน้ำที่มี Humic acid ในสารอินทรีย์สูงจะพบปริมาณปรอทรวมสูงตามด้วย และจากการศึกษาครั้งนี้ก็พบว่าในน้ำทิ้งมีสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำทั้ง Humic acid และ Fulvic acid สูงกว่าในน้ำทะเลมากด้วย

Humic acid และ Fulvic acid เป็นองค์ประกอบหลักที่อยู่ในสารอินทรีย์ทั้งในน้ำและดินตะกอน และมีความสามารถในการจับกับสารปรอทได้ดี โดยเฉพาะในสารอินทรีย์ที่มี S-containing functional groups มาก (Wallschläger et al., 1998b) การไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างสารปรอทกับ Fulvic acid ในการศึกษาครั้งนี้ อาจเนื่องมาจากโดยทั่วไป Humic acid มีองค์ประกอบของ กำมะถัน (S) และไนโตรเจน (N) มากกว่า Fulvic acid (Nissenbaum and Kaplan, 1972) จึงทำให้ Humic acid มีบทบาทสำคัญในการ

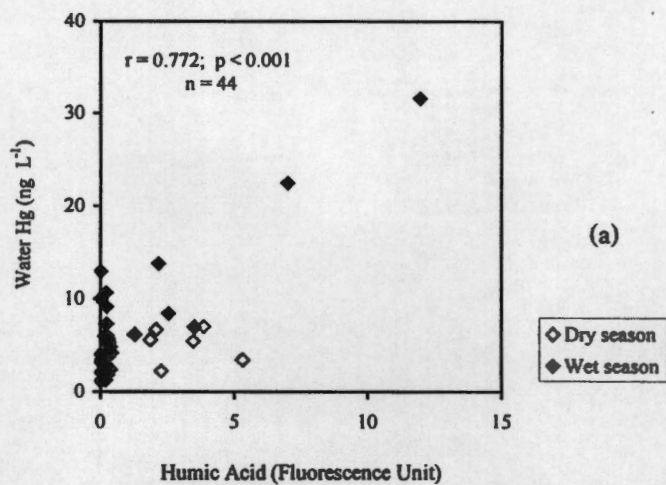
๒๕๕.1๕๕๖

กร ๕๖๖

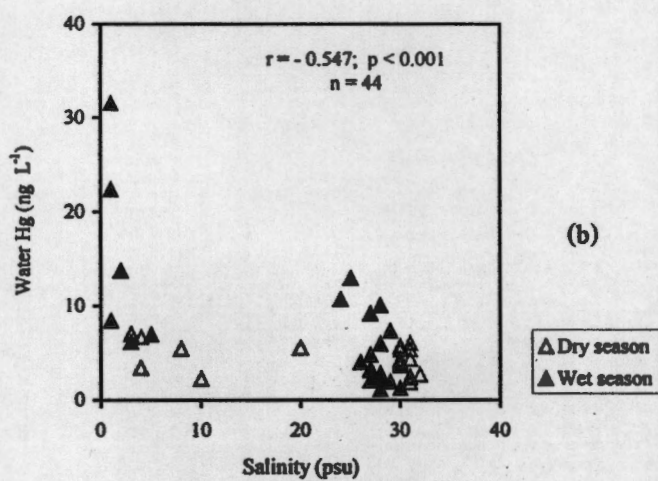
๑. ๕

249052

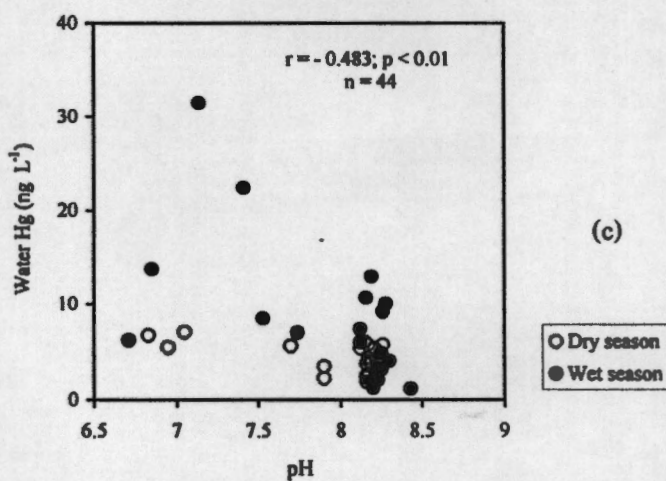
จับกับสารปรอทได้ดีกว่า Fulvic acid นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของสารปรอทมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเค็มของน้ำเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 7) ซึ่งแสดงถึงการถูกเจือจางด้วยน้ำเค็ม และสารปรอทยังมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเป็นกรด-ด่างของน้ำเพิ่มขึ้นอีกด้วย (ภาพที่ 7) สาเหตุน่าจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการ Hydrolysis ของสารปรอท เนื่องจากเมื่อความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นและมากกว่า 6 สารปรอทจะอยู่ในรูปของ $Hg(OH)_2$ (Hahne and Kroonte, 1973a) ซึ่งมีความว่องไวในการดูดซับเข้าสู่ดินตะกอนได้ดี (Yin et al., 1996) จึงทำให้ปริมาณปรอทที่เหลืออยู่ในน้ำลดลงเมื่อความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสารปรอทในน้ำกับ (a) สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำในรูปของ Humic acid
(b) ความเค็ม และ (c) ความเป็นกรด-ด่าง

2. การกระจายของสารปรอทในดินตะกอนและความสัมพันธ์กับคุณสมบัติดินตะกอน

การศึกษาปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนในฤดูแล้ง พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง $0.006-0.130 \mu\text{g g}^{-1}$ น้ำหนักแห้ง และฤดูฝนมีค่าระหว่าง $<0.0023 - 0.224 \mu\text{g g}^{-1}$ น้ำหนักแห้ง (ตารางที่ 12) ปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนที่ตรวจพบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) ขึ้นอยู่กับฤดูกาลและสถานี ในบริเวณสถานีใกล้ฝั่งปริมาณจะสูงกว่าสถานีไกลฝั่ง (ภาพที่ 8) โดยค่าสูงสุดทั้งสองฤดูพบบริเวณตอนในของนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด (สถานีที่ 3) โดยเฉพาะจุดที่พบสูงมากอยู่บริเวณหน้าโรงงานปิโตรเคมีและในฤดูฝนพบสูงกว่าฤดูแล้ง (ภาพที่ 8) ส่วนปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนที่คลองระบายน้ำทั้งซึ่งเก็บตัวอย่างได้เพียง 2 สถานี พบว่าบริเวณปากคลองบางเบิด (สถานี WW1) ซึ่งเป็นจุดที่รับน้ำทั้งจากนิคมอุตสาหกรรมผาแดงและนิคมอุตสาหกรรมตะวันออก และน้ำทั้งจากชุมชนมาบชะลูบ มีปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนสูงกว่าบริเวณปากคลองตากวน (สถานี WW6) ซึ่งเป็นจุดที่รับน้ำทั้งจากแหล่งชุมชนมาบตาพุดและคลองน้ำหนู ทั้งนี้ปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนที่ตรวจพบส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของสารปรอทในดินตะกอนของบางประเทศ ยกเว้นค่าสูงสุดที่พบในฤดูฝนนั้นมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนดตามมาตรฐานของประเทศออสเตรเลียและนิวซีแลนด์ (ตารางที่ 13) สำหรับในประเทศไทยนั้นในขณะนี้ยังไม่มีมาตรฐานของโลหะหนักในดินตะกอนกำหนดไว้

ตารางที่ 12 ค่าเฉลี่ยปริมาณปรอทรวม ($\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน; $n = 6$) ในดินตะกอนบริเวณชายฝั่งทะเล นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง และปริมาณปรอทที่สามารถเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ ในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546) และฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546)

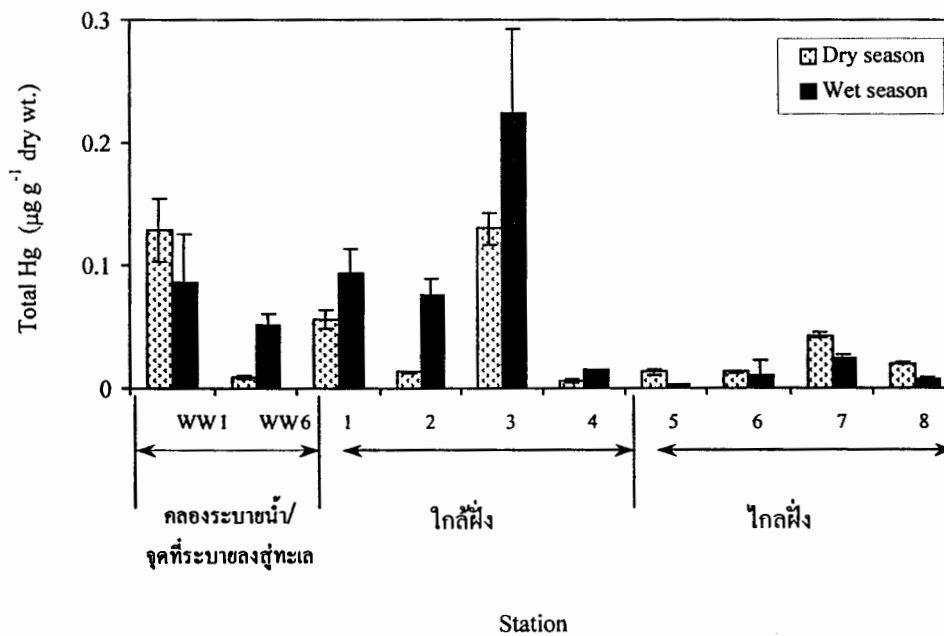
Station	Dry Season (March 2003)			Wet Season (October 2003)		
	Total Hg	Bioavailable Hg		Total Hg	Bioavailable Hg	
	($\mu\text{g g}^{-1}$ dry wt.)	($\mu\text{g g}^{-1}$ dry wt.)	% of Total Hg	($\mu\text{g g}^{-1}$ dry wt.)	($\mu\text{g g}^{-1}$ dry wt.)	% of Total Hg
1	0.056 ± 0.007	< 0.00025	< 0.4	0.094 ± 0.019	0.00026	0.3
2	0.013 ± 0.001	0.0016	11.9	0.076 ± 0.013	0.00086	1.1
3	0.130 ± 0.013	0.0016	1.2	0.224 ± 0.068	0.00052	0.2
4	0.006 ± 0.0009	< 0.00025	< 4.2	0.015 ± 0.0009	< 0.00025	< 1.7
5	0.013 ± 0.002	0.00051	3.9	< 0.0023	0.00051	< 22.2
6	0.013 ± 0.001	0.0014	11.0	0.011 ± 0.001	0.00151	13.7
7	0.043 ± 0.002	< 0.00025	< 0.6	0.025 ± 0.003	0.00079	3.2
8	0.020 ± 0.001	0.0009	4.5	0.008 ± 0.0004	0.00143	17.9
WW1*	0.129 ± 0.026	0.0007	0.5	0.087 ± 0.039	0.00060	0.7
WW6*	0.009 ± 0.001	< 0.00025	< 2.8	0.052 ± 0.008	0.00109	2.1

* คลองระบายน้ำ/จุดที่ระบายลงสู่ทะเล

ตารางที่ 13 เกณฑ์มาตรฐานของสารปรอทในน้ำทะเลและดินตะกอน

Standard/Guideline	Total mercury		Reference
	Seawater ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Sediment ($\mu\text{g g}^{-1}$ dry wt.)	
Thai Coastal Water Quality Standard	0.1		Pollution Control Department (1997)
ASEAN Marine Water Quality Criteria			Deocadiz et al. (1999)
- For protection of aquatic life	0.16		
- For protection of human health from seafood consumption	0.04		
- For protection of human health from recreational activities	21		
Average shale		0.4	Turekian and Wedepohl (1961)
Earth's crust		0.08	Riley and Chester 1971)
Average crustal abundance		0.08	Taylor (1964)
Sediment Quality Standard for the State of Washington		0.41	Ginn and Pastorok (1992)
Draft Interim Canadian Marine Sediment Quality Guideline		0.13	Environment Canada (1995)
Draft Interim Canadian Freshwater Sediment Quality Guideline		0.174	Environment Canada (1995)
Florida DEP ¹ Sediment Quality Guidelines - Threshold Effect Level		0.13	MacDonald (1994) อ้างตาม กรมควบคุมมลพิษ (2546)
Florida DEP ² Sediment Quality Guidelines - Probable Effect Level		0.7	
HongKong ³ Draft Sediment Quality Guidelines - Lower		0.5	HKGS (1998) อ้างตาม กรมควบคุมมลพิษ (2546)
HongKong ⁴ Draft Sediment Quality Guidelines - Higher		1	
Australia and New Zealand Draft Interim Sediment Quality Guidelines - Lower ¹		0.15	ANZECC (1998) อ้างตาม กรมควบคุมมลพิษ (2546)
Australia and New Zealand Draft Interim Sediment Quality Guidelines - Higher ²		1	

- หมายเหตุ ¹ = ค่าความเข้มข้นที่ไม่มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต (Threshold Effect Level, TEL)
- ² = ค่าความเข้มข้นที่อาจจะมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต (Probable Effect Level, PEL)
- ³ = ค่าความเข้มข้นที่สามารถทำการขุดลอกตะกอนดินได้
- ⁴ = ค่าความเข้มข้นที่สามารถขุดลอกตะกอนดินได้โดยไม่ต้องผ่านการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม



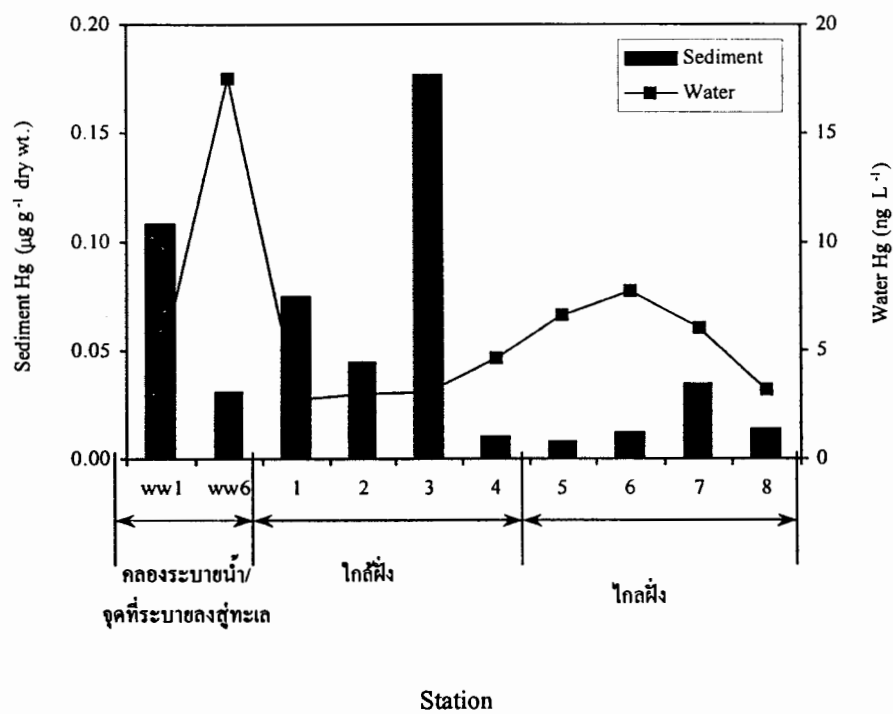
ภาพที่ 8 ค่าเฉลี่ยปริมาณปรอทรวม ($\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน, $n = 6$) ในดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรม
มาบตาพุด ในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546) และฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546)

ปริมาณปรอทรวมในน้ำและดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดจากการศึกษาครั้งนี้ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับรายงานฉบับอื่น (ตารางที่ 14) พบว่า ความเข้มข้นของปรอทรวมในน้ำมีค่าลดลงจากในช่วง 10 กว่าปีที่ผ่านมา สาเหตุของการลดลงน่าจะมาจากการปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์ให้มีความถูกต้องมากขึ้น และมีความระมัดระวังในการเก็บตัวอย่างเพื่อลดการปนเปื้อนในทุกขั้นตอน ส่วนปรอทรวมในดินตะกอนยังคงมีค่าใกล้เคียงกับในช่วง 5-6 ปีที่ผ่านมาและเป็นที่สังเกตว่าปรอทในดินตะกอนซึ่งพบในฤดูฝนหรือปลายฤดูฝนจะมีค่าสูงกว่าในฤดูแล้ง

ตารางที่ 14 เปรียบเทียบปริมาณปรอทรวมในน้ำทะเลและดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดจากการศึกษาครั้งนี้กับรายงานฉบับอื่น

Year of Study	Water Hg (ng L ⁻¹)	Sediment Hg (µg g ⁻¹ dry wt.)	Reference
1987 -1990	< 200 - 800	-	กรมควบคุมมลพิษ (2535)
1995-1998	10 - 480	< 0.005 - 0.134	Chongprasith and Wilairatanadilok (1999)
December 2001	3.0 – 63	0.001 - 0.293	กรมควบคุมมลพิษ (2545)
March 2003	2.42 -5.67	0.006 - 0.130	การศึกษาครั้งนี้
October 2003	1.52 – 11.77	< 0.0023 - 0.224	การศึกษาครั้งนี้
March 2004	1.1 – 19.1	0.007 - 0.116	แววตา (เอกสารยังไม่ตีพิมพ์)
August 2004	6.0 - 23.0	-	แววตา (เอกสารยังไม่ตีพิมพ์)

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทในน้ำและดินตะกอน โดยการเปรียบเทียบผลจากค่าเฉลี่ยตลอดปี พบว่า สถานีที่พบความเข้มข้นของสารปรอทในดินตะกอนสูงมีแนวโน้มที่มีความเข้มข้นของสารปรอทในน้ำต่ำ และปรอทในดินตะกอนที่สถานีใกล้เคียงมีปริมาณสูงกว่าสถานีไกลฝั่ง ในขณะที่ปรอทในน้ำที่ไกลฝั่งมีค่าน้อยกว่าที่ไกลฝั่ง ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตลอดปีของปริมาณปรอทในน้ำและดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรม
มาบตาพุดในปี 2546

สำหรับลักษณะของดินตะกอนพื้นที่ท้องทะเลบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดที่สำรวจพบใน
 ฤดูแล้งโดยส่วนใหญ่เป็นดินทรายและดินร่วนปนทราย มีเนื้อดินเหนียวค่อนข้างต่ำอยู่ระหว่าง 2.7 -
 20.6 % ปริมาณสารอินทรีย์ในดินตะกอนพบค่อนข้างน้อย คืออยู่ในช่วง 0.38 - 2.43 % มีค่าความเป็น
 กรด-ด่าง อยู่ในช่วง 7.9 - 8.3 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ในช่วง 0.83 - 17.46 % และค่าความจุใน
 การแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินหรือ CEC อยู่ระหว่าง 0.87 - 15.27 centimoles per kilogram
 (cmol kg^{-1}) (ตารางที่ 15) ส่วนในฤดูฝนลักษณะของดินตะกอนเป็นดินทรายและเลนปนทราย มีเนื้อดิน
 เหนียวเพิ่มขึ้นจากฤดูแล้งคืออยู่ระหว่าง 1.9 - 42.5 % ปริมาณสารอินทรีย์อยู่ระหว่าง 0.24-2.05 % ค่า
 ความเป็นกรด-ด่างของดินตะกอนอยู่ระหว่าง 8.0 - 8.9 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ในช่วง 1.20 -
 13.81 % และค่า CEC อยู่ระหว่าง 1.13 - 12.77 cmol kg^{-1} สำหรับออกไซด์ของเหล็กทั้งสองรูปคือ
 Total Fe oxides และ Amorphous Fe oxides ในฤดูฝนมีปริมาณสูงกว่าฤดูแล้ง ส่วนออกไซด์ของ
 แมงกานีสนั้น พบว่าในฤดูแล้งมีปริมาณสูงกว่าฤดูฝน (ตารางที่ 16)

จากคุณลักษณะของดินตะกอนดังกล่าว เมื่อจำแนกประเภทดิน (soil classes) ตาม US.EPA
 (Boulding, 1994) พบว่า ดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดเป็นดินที่มีสารอินทรีย์ค่อนข้าง
 น้อยมาก (0.5 - 1.0 %) ถึงระดับน้อยปานกลาง (1.0 - 2.0 %) ดินตะกอนมีคุณสมบัติเป็นด่างในระดับ
 ปานกลาง (pH 7.9-8.4) ถึงด่างสูง (pH 8.5 - 9.0) และมีค่า CEC อยู่ในระดับต่ำ ($< 12 \text{ cmol kg}^{-1}$) ยกเว้น
 สถานีที่ 3 ซึ่งอยู่บริเวณตอนในของนิคมอุตสาหกรรมมีค่า CEC อยู่ในระดับปานกลาง ($12 - 20 \text{ cmol kg}^{-1}$)
 ทั้งนี้เนื่องจากดินตะกอนมีสารอินทรีย์น้อย จึงทำให้มีค่า CEC น้อยตามไปด้วย เพราะสารอินทรีย์
 เป็นต้นกำเนิดของค่า CEC ในดิน โดยมีการประมาณว่ามากกว่า 80 % ของค่า CEC ในดินมาจากสาร
 อินทรีย์ (Sparks, 1995) จากลักษณะที่สำคัญโดยเฉพาะปริมาณสารอินทรีย์ เนื้อดินเหนียว และค่า CEC
 จึงคาดได้ว่าดินตะกอนบริเวณนี้มีความสามารถในการดูดซับสารปรอทรวมทั้งโลหะอื่นได้น้อย

ตารางที่ 15 คุณสมบัติของดินตะกอนบางประการในบริเวณชายฝั่งทะเล นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546)

Station	pH	CaCO ₃ Equivalent (%)	Organic Matter (%)	CEC (cmol kg ⁻¹)	Total (Free) Oxides (mg g ⁻¹)		Amorphous Oxides (mg g ⁻¹)		Particle Size Distribution (%)			Texture Class
					Fe	Mn	Fe	Mn	Sand	Silt	Clay	
1	8.0	17.46	1.15	4.27	4.39	2.23	0.207	0.130	82.9	8.0	9.2	Loamy Sand
2	8.3	2.57	0.38	0.87	1.37	0.82	0.060	0.051	95.9	1.4	2.7	Sand
3	7.8	0.86	1.75	15.27	4.52	1.32	0.071	0.057	27.0	52.4	20.6	Silt Loam
4	8.1	5.29	0.36	1.33	1.16	1.02	0.068	0.054	94.7	1.3	4.0	Sand
5	8.1	2.06	0.52	2.60	0.94	0.77	0.046	0.035	92.2	4.5	3.3	Sand
6	8.1	2.14	0.76	2.00	0.89	0.73	0.028	0.025	94.4	1.9	3.8	Sand
7	7.9	4.70	2.43	11.67	4.07	1.76	0.091	0.069	39.6	49.5	10.9	Loam
8	7.9	2.21	0.76	4.07	1.67	1.16	0.052	0.036	85.4	8.2	6.5	Loamy Sand
WW1*	7.7	1.34	1.08	4.53	6.41	0.080	3.13	0.057	90.6	1.8	7.6	Sand
WW6*	7.6	2.72	1.35	1.07	2.07	0.026	1.00	0.019	91.8	3.7	4.5	Sand

* คลองระบายน้ำ/จุดที่ระบายลงสู่ทะเล

ตารางที่ 16 คุณสมบัติของดินตะกอนบางประการในบริเวณชายฝั่งทะเล นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ในฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546)

Station	pH	CaCO ₃ Equivalent (%)	Organic Matter (%)	CEC (cmol kg ⁻¹)	Total (Free) Oxides (mg g ⁻¹)		Amorphous Oxides (mg g ⁻¹)		Particle Size Distribution (%)			Texture Class
					Fe	Mn	Fe	Mn	Sand	Silt	Clay	
1	8.3	6.88	2.05	4.40	5.03	0.243	2.30	0.137	77.8	13.2	9.0	Sandy loam
2	8.3	4.60	1.29	7.89	5.43	0.239	2.68	0.165	78.9	12.7	8.4	Sandy loam
3	8.3	2.04	1.34	12.77	4.87	0.067	2.03	0.057	40.7	33.2	26.2	Loam
4	8.5	13.81	0.55	1.87	2.57	0.068	1.45	0.041	91.7	2.0	6.3	Sand
5	8.9	3.14	0.24	0.87	0.31	0.010	0.60	0.008	97.4	0.7	1.9	Sand
6	8.8	1.76	0.45	1.47	0.88	0.028	0.65	0.031	95.5	2.1	2.4	Sand
7	8.0	1.20	0.76	9.00	27.80	0.073	1.27	0.049	10.2	47.3	42.5	Silty clay
8	8.8	1.46	0.90	1.13	1.58	0.026	0.95	0.028	96.6	0.8	2.6	Sand
WW1*	7.9	5.22	5.04	12.78	22.80	0.404	7.81	0.181	77.3	13.7	9.0	Sandy loam
WW6*	7.0	0.28	1.72	6.00	7.92	0.230	3.79	0.209	54.3	27.3	18.4	Sandy loam

* คลองระบายน้ำ/จุดที่ระบายลงสู่ทะเล

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนและคุณสมบัติของดินตะกอนบางประการ พบว่า ในฤดูแล้งปริมาณปรอทมีความสัมพันธ์ทางบวกค่อนข้างสูงมากกับออกไซด์ของเหล็ก รองลงมา คือ ทรายแป้ง ดินเหนียว สารอินทรีย์ และออกไซด์ของแมงกานีส ตามลำดับ (ตารางที่ 17 และ ภาพที่ 10) ส่วนปริมาณปรอทรวมในฤดูฝนมีความสัมพันธ์ทางบวกค่อนข้างสูงกับออกไซด์ของเหล็กในรูปของ amorphous Fe oxides รองลงมาได้แก่ ทรายแป้ง สารอินทรีย์ ดินเหนียว และออกไซด์ของแมงกานีส ตามลำดับ (ตารางที่ 18 และภาพที่ 11) จากความสัมพันธ์ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า ออกไซด์ของเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักในดินตะกอนบริเวณมาตาพุดที่มีบทบาทสูงมากในการดูดซับสารปรอทมากกว่าองค์ประกอบอื่นในดินตะกอน ทั้งนี้เนื่องจากออกไซด์ของเหล็ก รวมทั้งของแมงกานีส และอะลูมิเนียม มีพื้นที่ผิว (specific surface areas) สูงมาก พบอยู่ในดินในรูปของ suspended particles และเกาะบนผิวของ clay minerals และ สารอินทรีย์ (humic substances) หรืออยู่ในรูป mixed gels (Sparks, 1995) เนื่องจากมีความว่องไว (reactivity) สูงมาก จึงเป็นตัวดูดซับ (adsorbent) ที่มีพลังสูงมาก (Bourg and Loch, 1995) ในการดูดซับโลหะหนักหรือตกตะกอนร่วม (coprecipitate) กับ cations และ anions ในสารละลาย (Alloway, 1995) นอกจากนี้ ออกไซด์ของโลหะเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงประจุได้ตามค่าของความเป็นกรด-ด่าง (pH-dependent charge) ซึ่งโดยทั่วไปจะมีประจุลบในสารละลายที่เป็นด่าง และมีประจุบวกในสารละลายที่เป็นกรด แต่ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ทำให้ออกไซด์ของโลหะมีประจุบวกและประจุลบเท่ากันเรียกว่า pzc (point of zero charge) ซึ่งแตกต่างกันไปตามออกไซด์แต่ละชนิด (Alloway, 1995) เนื่องจากดินตะกอนบริเวณนี้มีสภาพเป็นด่างจึงทำให้ออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสมีประจุเป็นลบและสามารถดูดซับสารปรอทที่เป็นประจุบวกได้ดี

ปริมาณปรอทที่พบทั้ง 2 ฤดูยังมีความสัมพันธ์ทางบวกค่อนข้างสูงมากกับค่า CEC ของดินตะกอนด้วย (ตารางที่ 17-18 และภาพที่ 10-11) จึงอาจเป็นไปได้ว่าการดูดซับสารปรอทในดินตะกอนบริเวณนี้เกี่ยวข้องกับกระบวนการ cation exchange คล้ายกับการศึกษาของ (Semu et al., 1986) นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ทางลบระหว่างปริมาณปรอทกับค่าความเป็นกรด-ด่างของดินตะกอนในทั้ง 2 ฤดูอีกด้วย แสดงว่าปรอทในดินตะกอนจะสูงเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของดินลดต่ำลง สอดคล้องกับการศึกษาของ Yin et al. (1996) ซึ่งพบว่าปรอทสามารถดูดซับได้ดีในดินที่มีสารละลายเป็นกรด เนื่องจากที่ความเป็นกรด-ด่างต่ำจะพบชนิดของปรอทที่มีประจุบวก (positively charged Hg species) มาก ทำให้สารปรอทดูดซับได้มากขึ้น

ตารางที่ 17 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนและคุณสมบัติของดินตะกอนบางประการในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546)

(n = 48 ยกเว้น CEC = 24)

	Total Hg	Avai. Hg	pH	CaCO ₃	Org. Matter	CEC	Total Fe Oxides	Amorp. Fe	Total Mn Oxides	Amorp. Mn	Clay	Silt	Sand
Total Hg	1.000												
Avai. Hg	0.157	1.000											
pH	-0.719**	0.188	1.000										
CaCO ₃	-0.013	-0.483**	-0.091	1.000									
Org. Matter	0.570**	-0.068	-0.629**	0.040	1.000								
CEC	0.820**	0.117	-0.768**	-0.150	0.820**	1.000							
Total Fe Oxides	0.804**	-0.217	-0.696**	0.343*	0.726**	0.796**	1.000						
Amorp. Fe	0.452**	-0.414**	-0.537**	0.658**	0.618**	0.473*	0.795**	1.000					
Total Mn Oxides	0.294*	-0.442**	-0.292*	0.875**	0.265	0.143	0.642**	0.869**	1.000				
Amorp. Mn	0.327*	-0.439**	-0.302*	0.750**	0.339*	0.204	0.657**	0.857**	0.915**	1.000			
Clay	0.653**	-0.177	-0.601**	0.032	0.302*	0.543**	0.615**	0.205	0.150	0.144	1.000		
Silt	0.747**	0.035	-0.679**	-0.162	0.852**	0.980**	0.747**	0.442**	0.108	0.173	0.492**	1.000	
Sand	-0.808**	0.027	0.737**	0.121	-0.783**	-0.963**	-0.796**	-0.421**	-0.134	-0.185	-0.711**	-0.962**	1.000

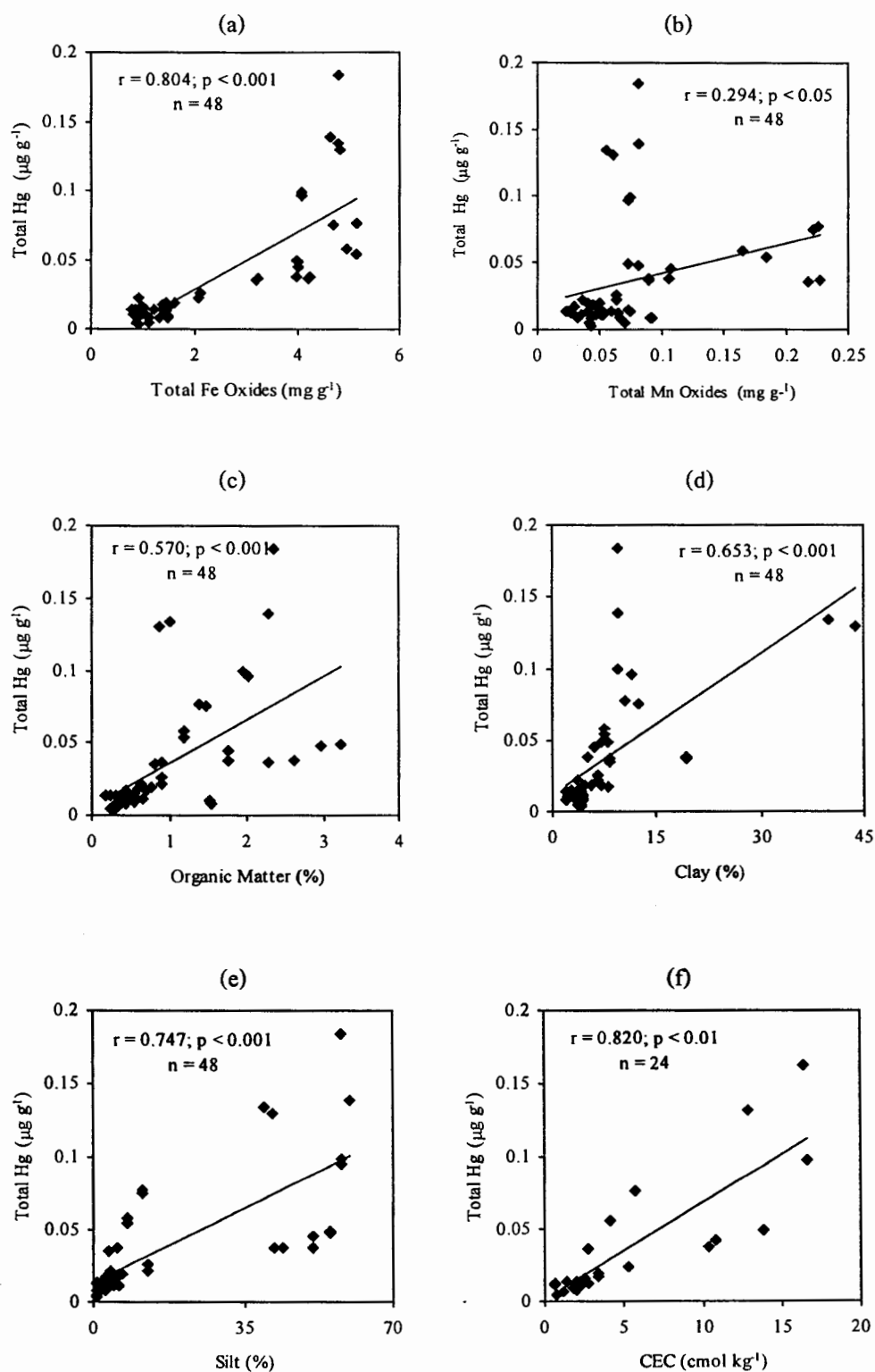
*, ** : Significant at p = 0.05 and 0.01 respectively

ตารางที่ 18 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนและคุณสมบัติของดินตะกอนบางประการในฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546)

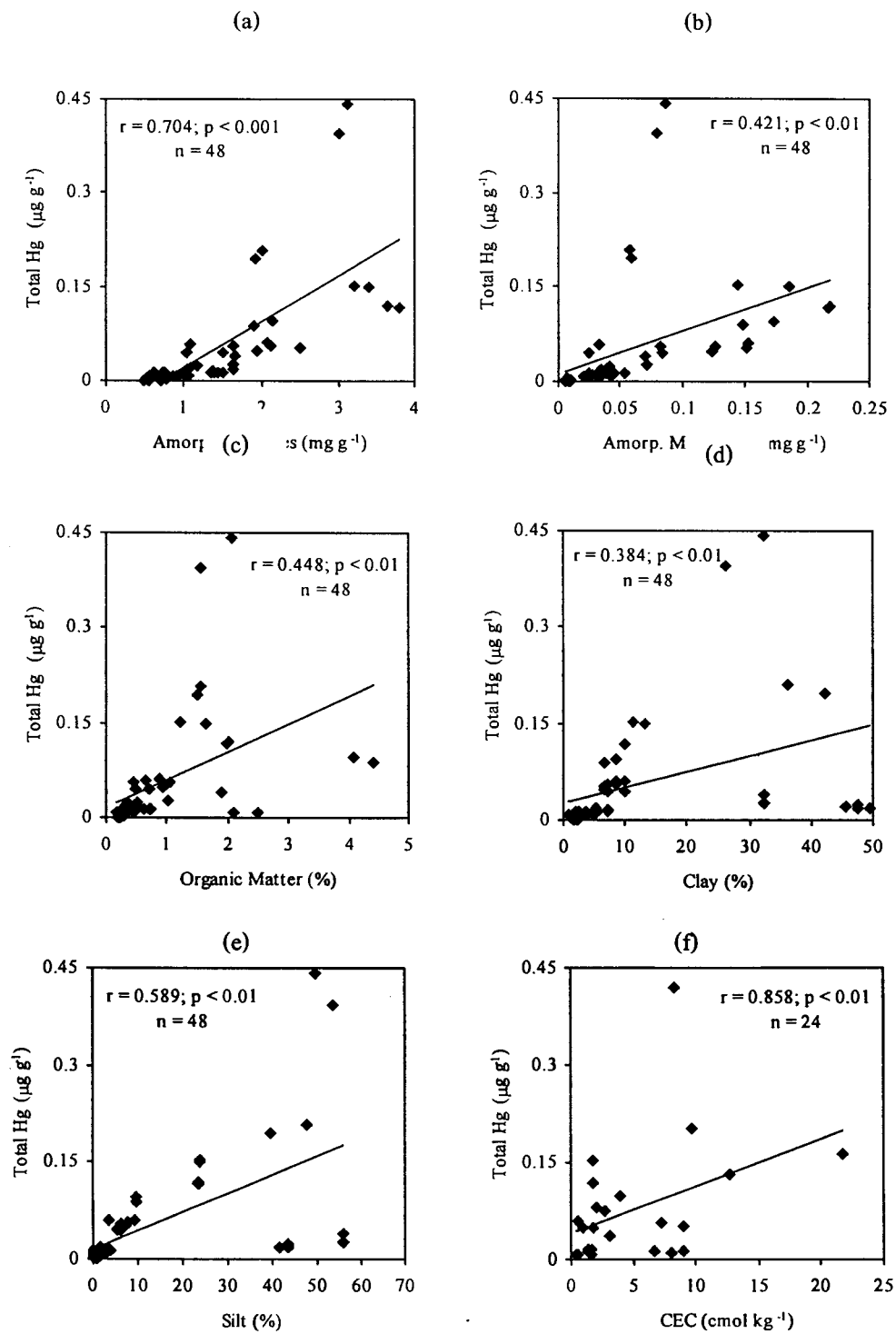
(n = 48 ยกเว้น CEC = 24)

	Total Hg	Avai. Hg	pH	CaCO ₃	Org. Matter	CEC	Total Fe Oxides	Amorp. Fe	Total Mn Oxides	Amorp. Mn	Clay	Silt	Sand
Total Hg	1.000												
Avai. Hg	-0.312*	1.000											
pH	-0.490**	0.397**	1.000										
CaCO ₃	-0.138	-0.576**	-0.080	1.000									
Org. Matter	0.448**	-0.343*	-0.472**	0.013	1.000								
CEC	0.858**	-0.217	-0.733**	-0.275	0.262	1.000							
Total Fe Oxides	0.049	-0.104	-0.714**	-0.216	0.078	0.485*	1.000						
Amorp. Fe	0.704**	-0.437**	-0.685**	0.243	0.551**	0.665**	0.154	1.000					
Total Mn Oxides	0.373**	-0.360*	-0.592**	0.292*	0.562**	0.351	0.135	0.874**	1.000				
Amorp. Mn	0.421**	-0.271	-0.593**	0.187	0.617**	0.414*	0.114	0.881**	0.965**	1.000			
Clay	0.384**	-0.143	-0.732**	-0.299*	0.119	0.697**	0.812**	0.231	0.053	0.061	1.000		
Silt	0.589**	-0.226	-0.791**	-0.318*	0.276	0.867**	0.783**	0.457**	0.234	0.249	0.906**	1.000	
Sand	-0.511**	0.194	0.784**	0.317	-0.212	-0.813**	-0.815	-0.366	-0.159	-0.170	-0.970**	-0.982**	1.000

*, ** : Significant at p = 0.05 and 0.01 respectively



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนกับ (a) ออกไซด์ของเหล็ก (b) ออกไซด์ของแมงกานีส (c) สารอินทรีย์ (d) ดินเหนียว (e) ทรายแป้ง และ (f) ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน ในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546)



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนกับ (a) ออกไซด์ของเหล็ก (b) ออกไซด์ของแมงกานีส (c) สารอินทรีย์ (d) ดินเหนียว (e) ทรายแป้ง และ (f) ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน ในฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546)

3. การศึกษารูปแบบทางธรณีเคมีของสารปรอทในดินตะกอน

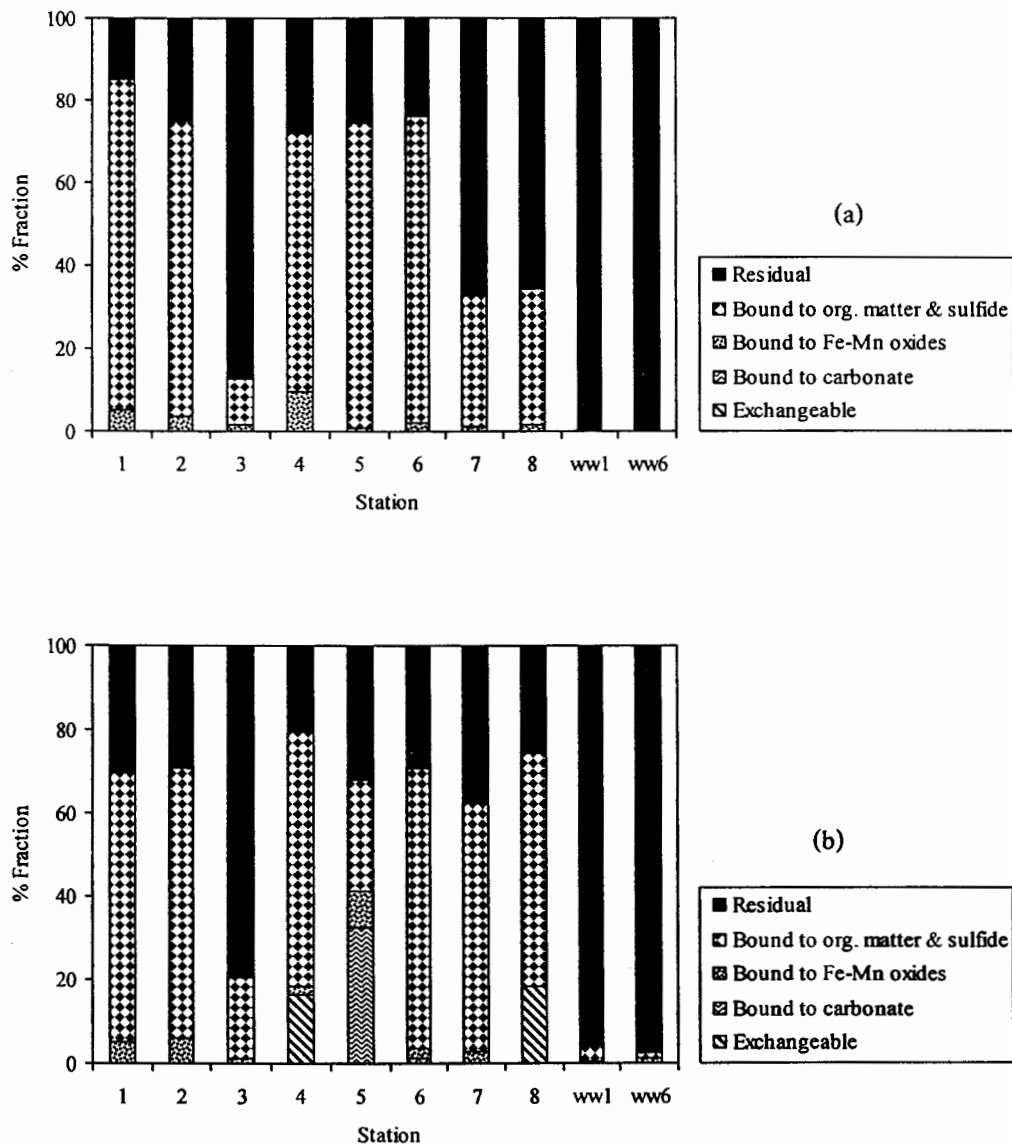
ข้อมูลของปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนแต่เพียงอย่างเดียวไม่สามารถบ่งบอกถึงผลกระทบหรืออันตรายที่จะมีต่อสิ่งมีชีวิตหรือสิ่งแวดล้อมได้ เนื่องจากไม่ได้เป็นปริมาณที่สามารถเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ทั้งหมด ปรอทมีรูปแบบทางเคมีหรือทางธรณีเคมี (geochemical forms) ต่างๆ กัน ซึ่งแต่ละรูปแบบมีความสามารถเข้าสู่สิ่งมีชีวิตหรือมีพิษแตกต่างกัน ในครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษารูปแบบทางธรณีเคมีของสารปรอทในดินตะกอนด้วย โดยใช้วิธี sequential extraction เพื่อสกัดสารปรอทออกมาเป็น 5 รูปแบบ เรียงลำดับตามการลดลงของความเป็นพิษและการเคลื่อนที่ในดินตะกอนได้ดังนี้ คือ exchangeable, bound to carbonate, bound to Fe and Mn oxides, bound to organic matter and sulfide และ residual โดยปกติแล้ว ปรอทในสามรูปแบบแรกจะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เนื่องจากสามารถที่จะถูกปลดปล่อยออกจากดินตะกอนได้ง่ายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยแวดล้อมที่อยู่โดยรอบ เช่น ความเป็นกรด-ด่าง ความเค็ม ศักย์ไฟฟ้า (redox potential) เป็นต้น (Gomez-Parra et al., 2000) และถูกจัดอยู่ในกลุ่มของ bioavailable forms ซึ่งสามารถเข้าสู่สิ่งมีชีวิตและก่อให้เกิดอันตรายได้ (Perin et al., 1997) ส่วนปรอทในรูปที่จับรวมตัวกับสารอินทรีย์และซัลไฟด์ (bound to organic matter and sulfide) ค่อนข้างที่จะถูกปลดปล่อยออกจากดินตะกอนได้ยาก เนื่องจากแรงจับยึดของสารอินทรีย์กับโลหะหนักค่อนข้างแน่นมาก สารปรอทในรูปนี้จึงไม่จัดเป็น bioavailable form อย่างไรก็ตามภายใต้สภาวะการมีออกซิเจน (oxidizing conditions) สารอินทรีย์สามารถถูกย่อยสลาย (Tessier et al., 1979) และซัลไฟด์สามารถเปลี่ยนรูปเป็น ออกไซด์และไฮดรอกไซด์ซึ่งละลายน้ำได้ดีกว่า (Waldichuk, 1985) ทำให้โลหะหนักที่จับอยู่ด้วยถูกปลดปล่อยออกจากดินตะกอนเข้าสู่ชั้นน้ำได้ ส่วนปรอทในรูปแบบสุดท้าย คือ รูปแบบที่อยู่ในโครงสร้างของแร่ธาตุในดิน (residual) จะมีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตน้อยที่สุดหรือแทบไม่มีเลย (unavailable form) เนื่องจากโลหะจะฝังตัวหรือรวมตัวอยู่กับโครงสร้างของแร่ธาตุที่อยู่ในดินตะกอน (silicate matrix) ซึ่งไม่สามารถถูกปลดปล่อยออกมาสู่ชั้นน้ำภายใต้การเปลี่ยนแปลงใดๆ ของธรรมชาติได้ (Tessier et al., 1979) เว้นแต่การเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาทางธรณี (geologic time) อันเป็นผลมาจากการผกผันการ mineral weathering (Gambrell et al., 1980)

สำหรับการศึกษานี้ พบว่าสารปรอทส่วนใหญ่ในดินตะกอนมีอยู่สองรูปแบบที่สำคัญ คือ รูปแบบที่จับรวมตัวกับสารอินทรีย์และซัลไฟด์ และรูปแบบที่อยู่ในโครงสร้างของแร่ธาตุในดิน (ภาพที่ 12) สำหรับสัดส่วนทั้งสองรูปแบบนั้นขึ้นอยู่กับแต่ละสถานี โดยในฤดูแล้ง พบปริมาณปรอทในรูปที่จับรวมตัวกับสารอินทรีย์และซัลไฟด์อยู่ในช่วงระหว่าง 11.3-79.8 % และในรูปแบบที่อยู่ในโครงสร้างของแร่ธาตุในดินอยู่ในช่วงระหว่าง 14.9-67.1 % ส่วนในฤดูฝนพบปรอทในรูปที่จับรวมตัวกับสารอินทรีย์และซัลไฟด์อยู่ในช่วงระหว่าง 19.3-67.2 % และในรูปแบบที่อยู่ในโครงสร้างของแร่ธาตุในดิน 29.1-79.4 % เนื่องจากปรอททั้งสองรูปแบบนี้มีโอกาสถูกปลดปล่อยเข้าสู่ชั้นน้ำได้น้อยมากดังกล่ามาแล้วข้างต้น จึงเป็นรูปแบบที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต สำหรับรูปแบบทางธรณีเคมีของสารปรอทใน

ดินตะกอนบริเวณคลองระบายน้ำทั้ง (สถานี WW1 และ WW6) พบว่า โปรทเกือบทั้งหมดอยู่ในโครงสร้างของแร่ธาตุในดิน

เนื่องจากปริมาณโปรทที่ถูกปลดปล่อยออกจากดินตะกอนได้ง่ายเท่านั้นสามารถเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตได้ หรือเรียกว่า "bioavailable form" และสามารถบ่งบอกได้ถึงระดับความเป็นพิษหากรับเข้าสู่ร่างกายมากเกินไป การศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการประเมินหาปริมาณโปรทที่อยู่ในรูปแบบที่เข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยตรงต่างหากอีกวิธีหนึ่ง โดยใช้การสกัดด้วย 0.5 N HCl ซึ่งสามารถใช้สกัดส่วนของโลหะทั้งในรูปของอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ไม่ได้จับอยู่กับโครงสร้างของแร่ธาตุในดิน (non-residual metals) ได้ดี และสามารถบ่งชี้ระดับของ bioavailability ต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่บนท้องทะเล ตลอดจนระดับการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินตะกอนจากกิจกรรมของมนุษย์ (Chester and Voutsinou, 1981) โดยทั่วไปแล้วการสกัดโลหะออกจากดินตะกอนโดยใช้กรดอย่างอ่อนหรือเจือจาง (weak acids) สามารถใช้เป็นตัวแทนในการศึกษา bioavailable fractions ได้มากที่สุด (Luoma and Bryan, 1981) เนื่องจากมีความคล้ายคลึงกับน้ำย่อยในกระเพาะอาหารของสัตว์หน้าดินที่อาศัยอยู่บนท้องทะเลเพื่อใช้ในการย่อยอาหารหรือโลหะที่กินเข้าไป (Waldichuk, 1985) ผลที่ได้จากการศึกษาโดยวิธีนี้ พบว่าโปรทในรูปดังกล่าวมีค่าน้อยมาก ในฤดูแล้งมีค่าอยู่ระหว่าง $<0.4 - 12\%$ ของปริมาณโปรทรวม และฤดูฝนมีค่าอยู่ระหว่าง $0.2 - < 22.2\%$ ของปริมาณโปรทรวม (ตารางที่ 12) โดยส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่า 10% ของปริมาณโปรทรวม และสอดคล้องกับผลที่ได้จากการศึกษารูปแบบทางธรรมชาติของสารโปรทที่พบในดินตะกอนซึ่งส่วนใหญ่เป็น unavailable forms ปริมาณของ bioavailable Hg ที่พบน้อยนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Thongra-ar (2001) ซึ่งพบปริมาณน้อยเช่นกันในบริเวณแม่น้ำบางปะกง แต่ปริมาณที่พบน้อยกว่าผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้มาก เนื่องจากดินตะกอนบริเวณแม่น้ำบางปะกงเป็นดินเหนียวและมีสารอินทรีย์ที่สูงกว่ามากจึงสามารถจับกับโปรทได้ดีกว่า

ดังนั้น ถึงแม้ว่าได้ตรวจพบปริมาณโปรทรวมในดินตะกอนบริเวณมาบตาพุดมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานของบางประเทศในบางสถานีและในบางฤดูกาลก็ตาม แต่ปริมาณโปรทที่ตรวจพบไม่ได้อยู่ในรูปที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตหรือมีค่าน้อยมากๆ การปนเปื้อนของสารโปรทในดินตะกอนบริเวณนี้จึงยังคงอยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต



ภาพที่ 12 รูปแบบทางธรณีเคมีของสารปรอทในดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง
(a) ฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546) และ (b) ฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546)

4. การศึกษาการดูดซับและการปลดปล่อยสารปรอทโดยดินตะกอนและอิทธิพลของความเค็ม

4.1 การดูดซับสารปรอท

การศึกษานี้ได้เลือกใช้แบบจำลองการดูดซับในรูปของสมการ Freundlich isotherm สำหรับใช้อธิบายกระบวนการดูดซับ เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวมีความเหมาะสมสำหรับความเข้มข้นของสารในระดับต่ำๆ (Sparks, 1995) และในการศึกษาเกี่ยวกับปัญหาสิ่งแวดล้อมทางทะเล หรือในแง่ของความห่วงใยต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมนั้น เรามักสนใจต้องการทราบความจุหรือความสามารถของดินตะกอนในการดูดซับสารได้ต่ำสุดหรือน้อยสุดมากกว่าค่าความจุสูงสุดที่ดินตะกอนจะดูดซับได้ ทั้งนี้เพื่อจะได้ทราบว่าความเข้มข้นของสารเริ่มแรกหลังจากปล่อยทิ้งลงสู่ทะเลและถูกดูดซับเข้าไปในดินตะกอนแล้วนั้น ปริมาณที่เหลืออยู่ในน้ำจะยังคงอยู่ในระดับที่ปลอดภัยหรือไม่ ดังนั้นค่าการดูดซับได้ต่ำสุดจะเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ต่อการเฝ้าระวังปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ดีกว่า ประกอบกับในสภาพจริงตามธรรมชาติสารมลพิษต่างๆ ไม่ได้ถูกปล่อยออกมาในระดับสูงมากๆ ด้วยเหตุนี้ จึงได้เลือกใช้ Freundlich isotherm สำหรับการศึกษานี้

การทดลองเลือกช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับทดลองการดูดซับสารปรอทโดยดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดรวม 8 สถานี ซึ่งมีลักษณะของเนื้อดินตะกอนแตกต่างกัน คือมีทั้งดินทราย ดินร่วน ดินทรายปนดินร่วน และดินร่วนปนทรายแข็ง เป็นต้น จากการทดลองเบื้องต้นพบว่าไม่สามารถใช้ความเข้มข้นช่วงเดียวกันในการทดลองกับดินทั้ง 8 สถานีได้ โดยดินที่มีองค์ประกอบของอนุภาคทรายค่อนข้างสูง (สถานีที่ 1 2 4 5 6 และ 8) ความเข้มข้นของสารปรอทที่เติมลงไปอยู่ในช่วงระหว่าง $0.1 - 2.0 \text{ mg L}^{-1}$ ส่วนดินที่มีองค์ประกอบของอนุภาคทรายแป้งและดินเหนียวค่อนข้างสูง (สถานีที่ 3 และ 7) ใช้ความเข้มข้นของสารปรอทในช่วงระหว่าง $0.5 - 4.0 \text{ mg L}^{-1}$ เนื่องจากที่ระดับความเข้มข้นสูงๆ นั้น อาจเกินขีดความสามารถของดินในการดูดซับเนื่องจากพื้นที่ผิวในการดูดซับเต็ม โดยเฉพาะเนื้อดินที่มีองค์ประกอบของอนุภาคทรายสูงทำให้ข้อมูลที่ได้ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญตามสมการ Freundlich isotherm โดยพิจารณาจากค่า R^2 มีค่าต่ำ แต่หากลดช่วงความเข้มข้นลงพบว่าข้อมูลมีความสัมพันธ์กันตามสมการดังกล่าวได้และให้ค่า R^2 สูงขึ้น ซึ่งแสดงว่าที่ความเข้มข้นสูงๆ อาจมีกลไกอย่างอื่นที่นอกเหนือจากกระบวนการดูดซับมาเกี่ยวข้องด้วย ส่วนเนื้อดินที่มีทรายแป้งและดินเหนียวสูงนั้นมีการดูดซับได้ดีกว่าดินทราย หากเลือกใช้ความเข้มข้นช่วงเดียวกับดินทราย ($0.1 - 2.0 \text{ mg L}^{-1}$) จะทำให้ไม่สามารถวัดค่าของปริมาณปรอทที่เหลืออยู่ในสารละลายได้เนื่องจากถูกดูดซับไปหมด ดังนั้นขนาดอนุภาคดินและลักษณะเนื้อดินจึงมีผลต่อการดูดซับ

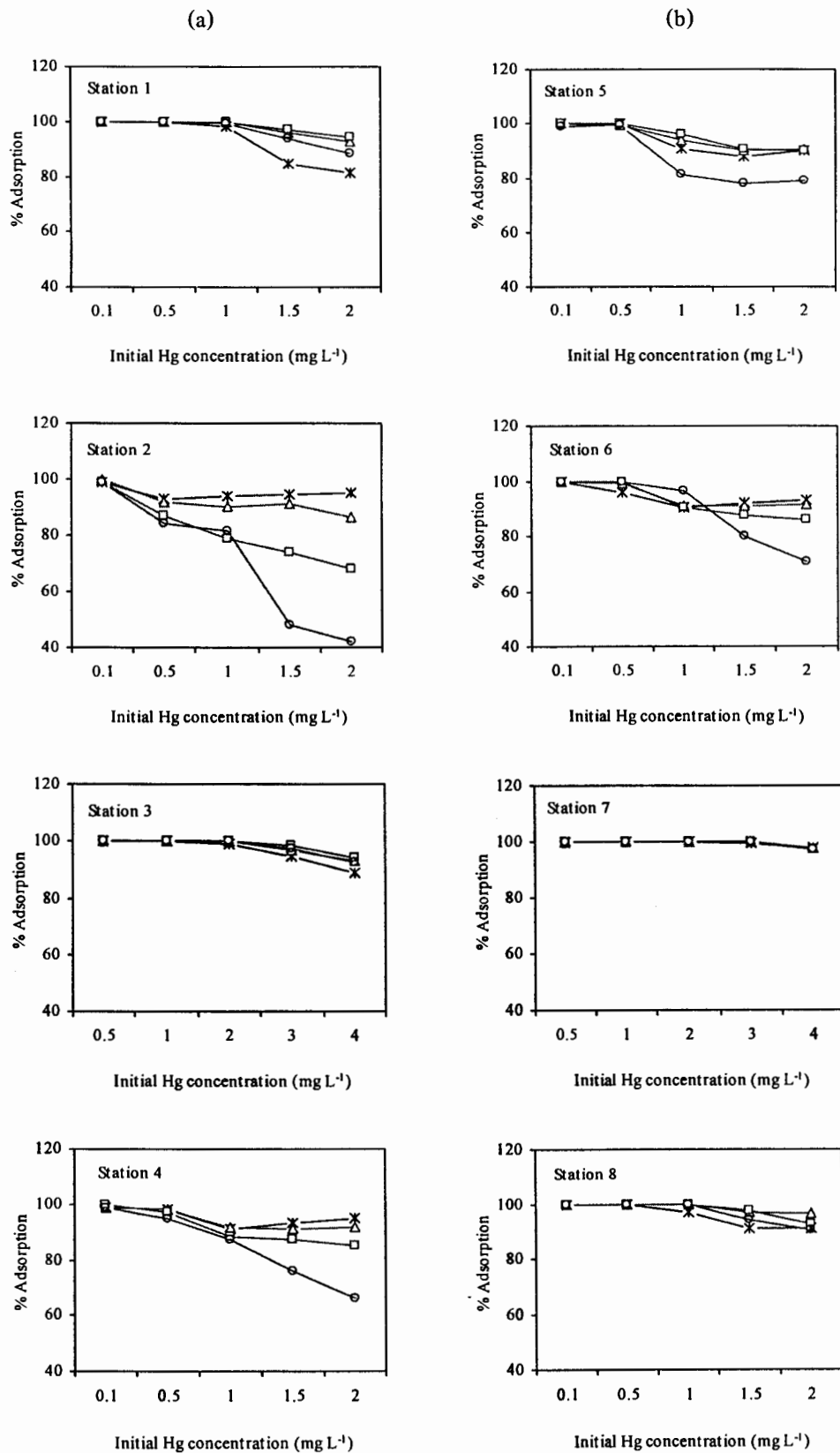
การศึกษาดูดซับที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารปรอทที่เติมลงไปดินตะกอนและที่ระดับความเค็มต่างๆ 4 ระดับคือ 0 15 30 และ 45 psu พบว่าการดูดซับจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารปรอทสูงขึ้น (ภาพที่ 13) โดยส่วนใหญ่จะลดลงที่ระดับความเข้มข้นที่สูงกว่า $0.5 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$ สำหรับดินทรายและดินทรายปนดินร่วน (สถานีที่ 1 2 4 5 6 และ 8) ส่วนดินร่วนและดินร่วนปนทรายแป้ง (สถานีที่ 3 และ 7) ซึ่งมีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่า การดูดซับจะลดลงที่ความเข้มข้นสูงกว่า

2.0 mg L^{-1} ส่วนผลของความเค็มนั้น พบว่า ความเค็มไม่มีผลต่อการดูดซับ ยกเว้นที่ความเค็ม 45 psu มีแนวโน้มที่การดูดซับสารปรอทจะลดลงจากความเค็มระดับอื่นๆ โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นของสารปรอทสูงๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานีด้วย โดยเฉพาะสถานีที่ 2 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่า การดูดซับที่ความเข้มข้นของปรอท 2.0 mg L^{-1} ได้ลดลงจาก 95 % เหลือเพียง 42 % เมื่อความเค็มเปลี่ยนจาก 0 เป็น 45 psu (ภาพที่ 13)

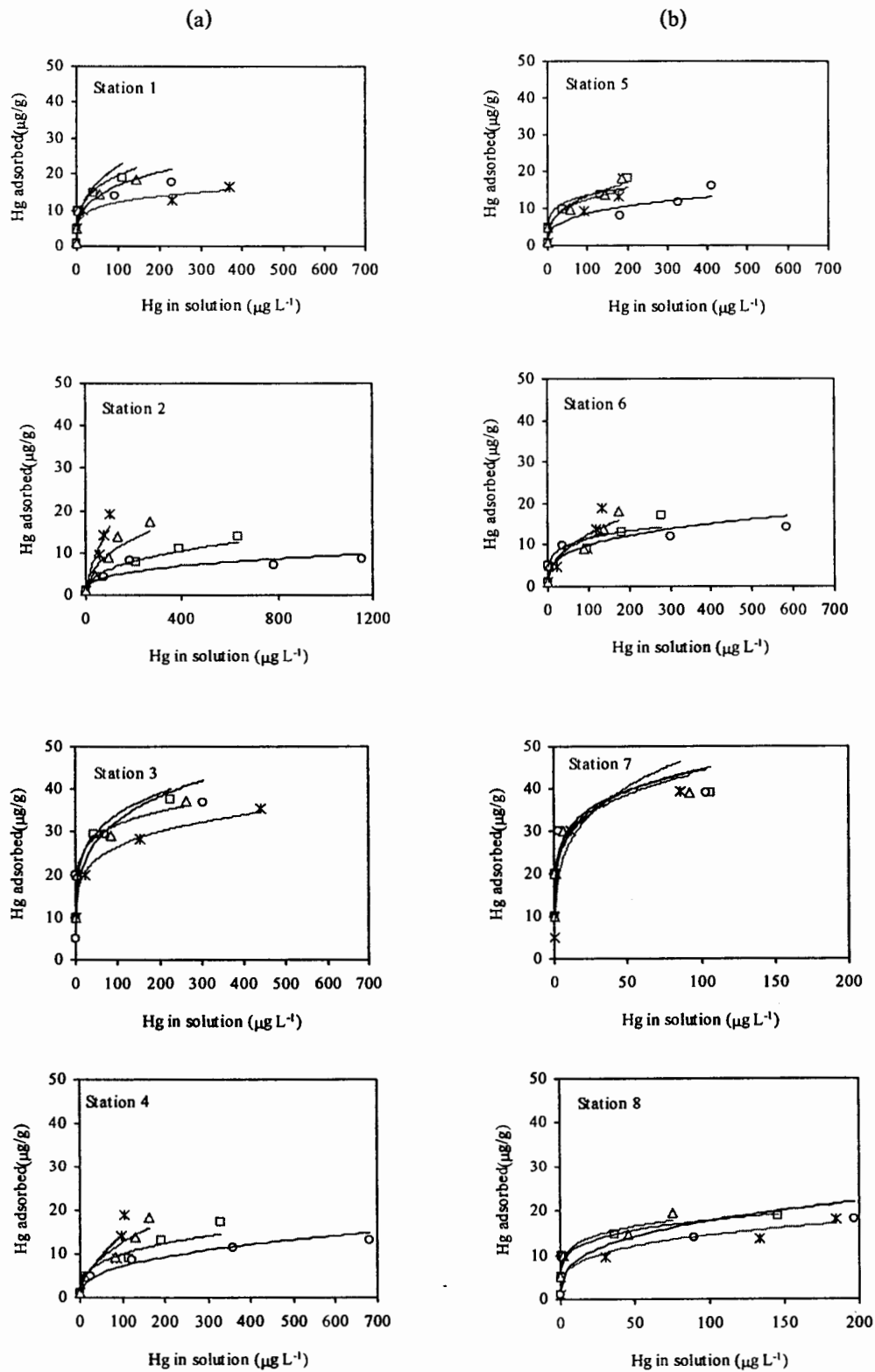
จากช่วงความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองดูดซับสารปรอทดังกล่าว พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารปรอทที่เติมลงไปปริมาณ 0.1 mg L^{-1} สำหรับดินที่มีทรายเป็นองค์ประกอบสูง และ 0.5 mg L^{-1} สำหรับดินที่มีทรายแป้งและดินเหนียวเป็นองค์ประกอบสูง จะทำให้ปริมาณปรอทที่เหลืออยู่ในน้ำมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งของประเทศไทยซึ่งกำหนดไว้ $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ และพบว่าปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับเข้าไปในดินตะกอนจะมีค่าเท่ากับ 1 และ $5 \mu\text{g g}^{-1}$ น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ดังนั้นหากควบคุมการปล่อยสารปรอทลงสู่แหล่งน้ำให้ได้ในปริมาณดังกล่าวก็จะสามารถรักษาระดับของปริมาณปรอทในแหล่งน้ำให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งได้ อย่างไรก็ตาม ในสภาพจริงตามธรรมชาติปรอทที่ถูกปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดไม่ได้ถูกดูดซับโดยดินตะกอนเพียงอย่างเดียว และปรอทที่อยู่ในดินตะกอนก็สามารถปล่อยกลับคืนสู่ชั้นน้ำได้อีกด้วย

การศึกษา isotherms ของการดูดซับสารปรอท พบว่า ข้อมูลมีความสัมพันธ์กันตามสมการ Freundlich isotherm และให้ค่า R^2 ที่มีนัยสำคัญทางสถิติในระดับสูง (ตารางที่ 19) เมื่อพิจารณาจากลักษณะกราฟของ adsorption isotherms ของดินตะกอนทั้ง 8 สถานี พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นโค้ง (curvilinear isotherms) ดังแสดงในภาพที่ 14 ซึ่งแสดงว่าพลังงานที่แหล่งพันธะ (binding sites) บนผิวดินตะกอนได้ลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารปรอทที่เติมลงไปในการละลายสูงขึ้น เนื่องจาก sorption sites เกิดการอิ่มตัว (saturation) ทั้งนี้สอดคล้องกับผลที่ได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสารปรอทซึ่งลดลงที่ความเข้มข้นสูงๆ ในขณะที่ระดับความเข้มข้นต่ำๆ สารปรอทถูกดูดซับได้ทั้งหมด 100 % หรือเกือบทั้งหมดของปริมาณปรอทที่เติมลงไป (ภาพที่ 13) และลักษณะ isotherms ของแต่ละระดับความเค็ม พบว่ามีความคล้ายคลึงกัน ยกเว้นที่ความเค็ม 45 psu ของบางสถานีซึ่งเส้นกราฟ isotherm มีความยาวมากกว่าที่ความเค็มอื่นๆ (ภาพที่ 14) เนื่องจากพื้นที่ผิวดูดซับเต็มทำให้มีปริมาณปรอทเหลืออยู่ในสารละลายมากกว่าที่ความเค็มอื่นๆ

ค่า Freundlich adsorption parameters (K_{ads} และ $1/n_{ads}$) ของดินตะกอนแต่ละสถานีและแต่ละความเค็มแสดงในตารางที่ 19 โดย K_{ads} มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.9061 - 21.836 และ $1/n_{ads}$ มีค่าน้อยกว่า 1 อยู่ในช่วงระหว่าง 0.1533 - 0.6267 ซึ่งแสดงว่าเส้นกราฟที่ได้ไม่เป็นเส้นตรงด้วย ทั้ง K_{ads} และ $1/n_{ads}$ เป็นค่า Freundlich constants ซึ่งค่า K_{ads} แสดงถึงค่าความจุหรือความสามารถในการดูดซับของดินตะกอน (adsorption capacity) ส่วน $1/n_{ads}$ แสดงถึงอัตราเร็วของการดูดซับ (intensity of adsorption หรือ rate of adsorption) สังเกตได้ว่าถึงแม้ดินตะกอนบางสถานีมีค่าความจุในการดูดซับสารปรอทที่ต่ำ แต่มีอัตราเร็วของการดูดซับสูง



ภาพที่ 13 เปอร์เซ็นต์การดูดซับสารปรอทในแต่ละระดับความเข้มข้นเริ่มต้นที่เติมลงไปดินตะกอน
สถานีต่างๆ (a) สถานีใกล้ฝั่ง (b) สถานีห่างฝั่ง และที่ความเค็มต่างๆกัน
($\ast$: 0 psu, Δ : 15 psu, $\square$: 30 psu, $\circ$: 45 psu)



ภาพที่ 14 Freundlich isotherms ของการดูดซับสารปรอทโดยดินตะกอนมาบตาพุดสถานีต่างๆ

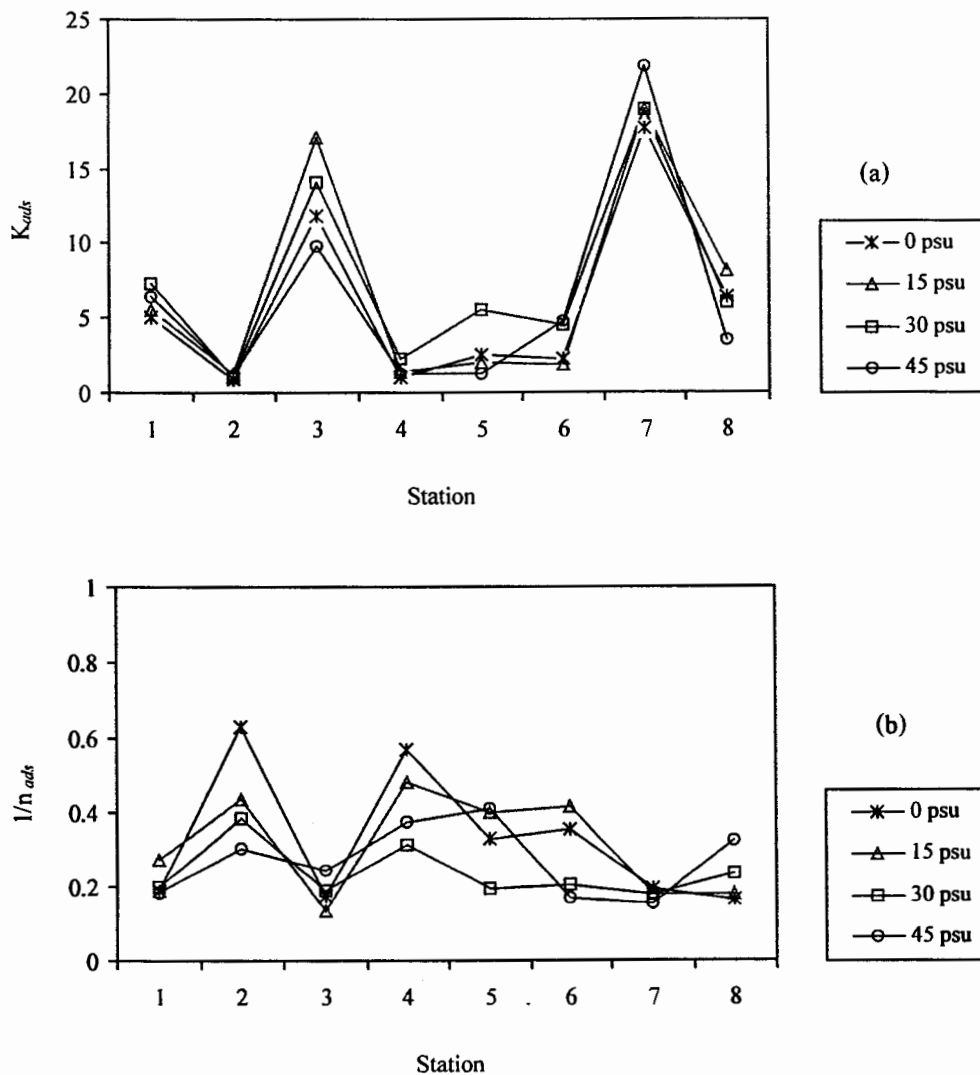
(a) สถานีใกล้ฝั่ง (b) สถานีห่างฝั่ง และที่ความเค็มต่างๆกัน (* : 0 psu, Δ : 15 psu, $\square$: 30 psu, $\circ$: 45 psu)

ตารางที่ 19 Freundlich adsorption parameters ของการดูดซับสารปรอทที่ความเค็มต่างๆกัน

Station	Initial Hg added (mg L ⁻¹)	Sediment pH	Sediment organic matter (%)	Salinity (psu)	Adsorption equilibrium pH ± SD	K _{ads}	1/n _{ads}	R ²	% Adsorption of initial Hg added
Sand / Loamy sand									
1	0.1 – 2.0	8.0	1.15	0	7.6± 0.2	5.0624	0.1900	0.9538*	81.6 - 100
				15	7.9 ± 0.1	5.5131	0.2743	0.9016*	92.8 - 100
				30	8.0 ± 0.1	7.2763	0.2030	0.9757*	94.4 - 100
				45	8.0 ± 0.1	6.449	0.1857	0.9681*	88.5 -100
2	0.1 – 2.0	8.3	0.38	0	7.2 ± 1.6	0.9061	0.6267	0.9890**	94.9 – 99
				15	8.3 ± 0.1	1.3025	0.4383	0.9602**	86.4 - 100
				30	8.2 ± 0.1	1.0311	0.3873	0.9895**	68.3 – 99
				45	8.3 ± 0.1	1.0913	0.3090	0.9322**	42.2 – 99
4	0.1 – 2.0	8.1	0.36	0	7.7 ± 0.2	1.0407	0.5654	0.9453**	94.8 – 99
				15	8.2 ± 0.3	1.3523	0.4840	0.9771**	96.3 - 100
				30	7.9 ± 0.3	2.3067	0.3167	0.9869**	85.4 - 100
				45	8.1 ± 0.1	1.2673	0.3776	0.9897**	65.9 - 99
5	0.1 – 2.0	8.1	0.52	0	7.5 ± 0.2	2.4918	0.3313	0.9799*	90.5 - 100
				15	8.0 ± 0.1	1.9654	0.4018	0.9955**	90.7 - 100
				30	7.8 ± 0.3	5.4961	0.1950	0.9460*	90.0 - 100
				45	8.0 ± 0.1	1.1038	0.4140	0.9879**	79.4 - 99
6	0.1 – 2.0	8.1	0.76	0	8.0 ± 0.1	2.2494	0.3567	0.9403**	93.3 - 100
				15	8.2 ± 0.1	1.8324	0.4179	0.9549**	91.4 - 100
				30	8.4 ± 0.1	4.5123	0.2045	0.8893	86.1 - 100
				45	8.2 ± 0.3	4.7188	0.1726	0.9782*	70.8 - 100
8	0.1 – 2.0	7.9	0.76	0	7.7 ± 0.7	6.3835	0.1676	0.9365*	90.8 - 100
				15	7.9 ± 0.2	8.1549	0.1798	0.9803**	96.3 - 100
				30	7.9 ± 0.2	5.9984	0.2372	0.9980*	92.7 - 100
				45	8.0 ± 0.1	3.5097	0.3248	0.9463*	90.2 - 100
Silt loam / Loam									
3	0.5 – 4.0	7.8	1.75	0	7.6 ± 0.1	11.825	0.1761	0.9970**	89.0 - 100
				15	7.7 ± 0.1	17.097	0.1340	0.9933**	93.4 - 100
				30	7.8 ± 0.1	14.131	0.1917	0.9440*	94.3 - 100
				45	7.8 ± 0.1	9.7829	0.2454	0.9561*	92.4 - 100
7	0.5 – 4.0	7.9	2.43	0	7.9 ± 0.1	17.759	0.1949	0.9638*	97.9 - 100
				15	8.0 ± 0.1	18.941	0.1817	0.8138	97.7 - 100
				30	8.0 ± 0.1	19.019	0.1819	0.9040*	97.4 - 100
				45	8.0 ± 0.1	21.836	0.1533	0.9050*	97.4 - 100

*, ** : Significant at p = 0.05 and 0.01 respectively

ผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่า K_{ads} และ $1/n_{ads}$ พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งโดยขึ้นอยู่กับสถานีและความเค็มด้วย ($p < 0.001$) อย่างไรก็ตามมีแนวโน้มที่ความเค็มไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า K_{ads} มากนัก แต่ค่า K_{ads} จะมีความแตกต่างกันในแต่ละสถานี โดยสถานีที่ 7 มีค่าสูงสุด รองลงมาคือ สถานีที่ 3 ซึ่งทั้งสองสถานีมีเนื้อดินตะกอนที่มีองค์ประกอบของทรายแป้งและดินเหนียวสูงกว่าสถานีอื่นและอยู่บริเวณตอนในของนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด อย่างไรก็ตามถึงแม้ดินตะกอนทั้งสองสถานียังกล่าวมีความสามารถหรือความจุในการดูดซับได้สูง แต่อัตราเร็วของการดูดซับจะช้ากว่าสถานีอื่นๆ (ภาพที่ 15)



ภาพที่ 15 เปรียบเทียบค่า Freundlich adsorption parameters (a) K_{ads} และ (b) $1/n_{ads}$ ของดินตะกอนแต่ละสถานีในการดูดซับสารปรอทที่ความเค็มต่างๆ

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Freundlich adsorption parameters กับคุณสมบัติของดินตะกอน แสดงในตารางที่ 20 พบว่าค่าความจุหรือความสามารถในการดูดซับ (K_{ads}) สารปรอทของดินตะกอนมีความสัมพันธ์ทางบวกอย่างสูงมากกับปริมาณของสารอินทรีย์ รองลงมาคือ ทรายแป้ง ออกไซด์ของเหล็ก และดินเหนียว จากความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงว่า องค์ประกอบในดินตะกอนทั้ง 4 อย่างดังกล่าวทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ (adsorbent) สารปรอท และเนื่องจากดินตะกอนบริเวณมาบตาพุดนี้มีสารอินทรีย์อยู่ค่อนข้างน้อยแต่พบว่ามีความสัมพันธ์ในระดับที่สูง แสดงว่า สารอินทรีย์ต้องมีบทบาทสำคัญมากในการดูดซับสารปรอทที่ดีกว่าองค์ประกอบอื่นๆในดินตะกอน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสารอินทรีย์มีบทบาทสำคัญมากในการดูดซับไอออนต่างๆของโลหะได้ดีถึงแม้ว่ามีอยู่ในดินน้อยก็ตาม (Sparks, 1995) และสำหรับกับปรอทนั้นยังมีความสามารถในการจับกับสารอินทรีย์ที่อยู่ในดินได้ดีกว่าองค์ประกอบที่เป็นอนินทรีย์สารอื่นๆในดินตะกอน (Schuster, 1991; Yin et al., 1996) โดยมีฮิวมิก (humic substances) ซึ่งอยู่ในสารอินทรีย์และประกอบด้วย humic acids และ fulvic acids ทำหน้าที่ในการจับกับปรอท (Wallschläger et al., 1998) และการจับกันยังขึ้นอยู่กับหมู่ functional groups ในสารอินทรีย์อีกด้วย โดยพบว่าสารปรอทชอบที่จะจับตัวกับ N-and S-containing groups ในสารอินทรีย์ (Sparks, 1995) โดยเฉพาะกับ S- มากกว่า N-containing groups (Skylberg et al., 2000) และปริมาณการดูดซับสารปรอทได้สูงสุดพบว่าเป็นสัดส่วนกับปริมาณสารอินทรีย์ในดินตะกอนอีกด้วย (Yin et al., 1997a, b) แต่เนื่องจากดินตะกอนบริเวณที่ทำการศึกษานี้มีสารอินทรีย์อยู่ค่อนข้างน้อย ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับโดยสารอินทรีย์จึงอาจมีไม่มากนัก ประกอบกับปริมาณอนุภาคดินเหนียวมีค่อนข้างน้อยด้วย ดังนั้น ตัวดูดซับหลักสำหรับดินบริเวณนี้ จึงน่าจะเป็นทรายแป้งและเหล็กออกไซด์

ตารางที่ 20 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Freundlich adsorption parameters และคุณสมบัติของดินตะกอน ที่ความเค็มต่างๆ (n = 8)

Sediment Characteristics	Salinity 0 psu		Salinity 15 psu		Salinity 30 psu		Salinity 45 psu	
	K_{ads}	$1/n_{ads}$	K_{ads}	$1/n_{ads}$	K_{ads}	$1/n_{ads}$	K_{ads}	$1/n_{ads}$
pH	-0.774*	0.874**	-0.830*	0.894**	-0.782*	0.731*	NS	NS
CEC	0.892**	NS	0.954**	-0.832*	0.911**	NS	0.768*	NS
Organic matter	0.973**	NS	0.943**	-0.780*	0.982*	NS	0.969**	NS
Total Fe oxides	0.759*	NS	0.793*	-0.766*	0.779*	NS	0.713*	NS
Total Mn oxides	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Amorp. Fe oxides	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Amorp. Me oxides	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
CaCO ₃ content	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Clay	0.732*	NS	0.843**	-0.807*	0.761*	NS	NS	NS
Silt	0.932**	NS	0.969**	-0.781*	0.941**	NS	0.841**	NS
Sand	-0.908**	NS	-0.961**	NS	-0.921**	NS	-0.802*	NS

*, **: Significant at p = 0.05 and 0.01 respectively

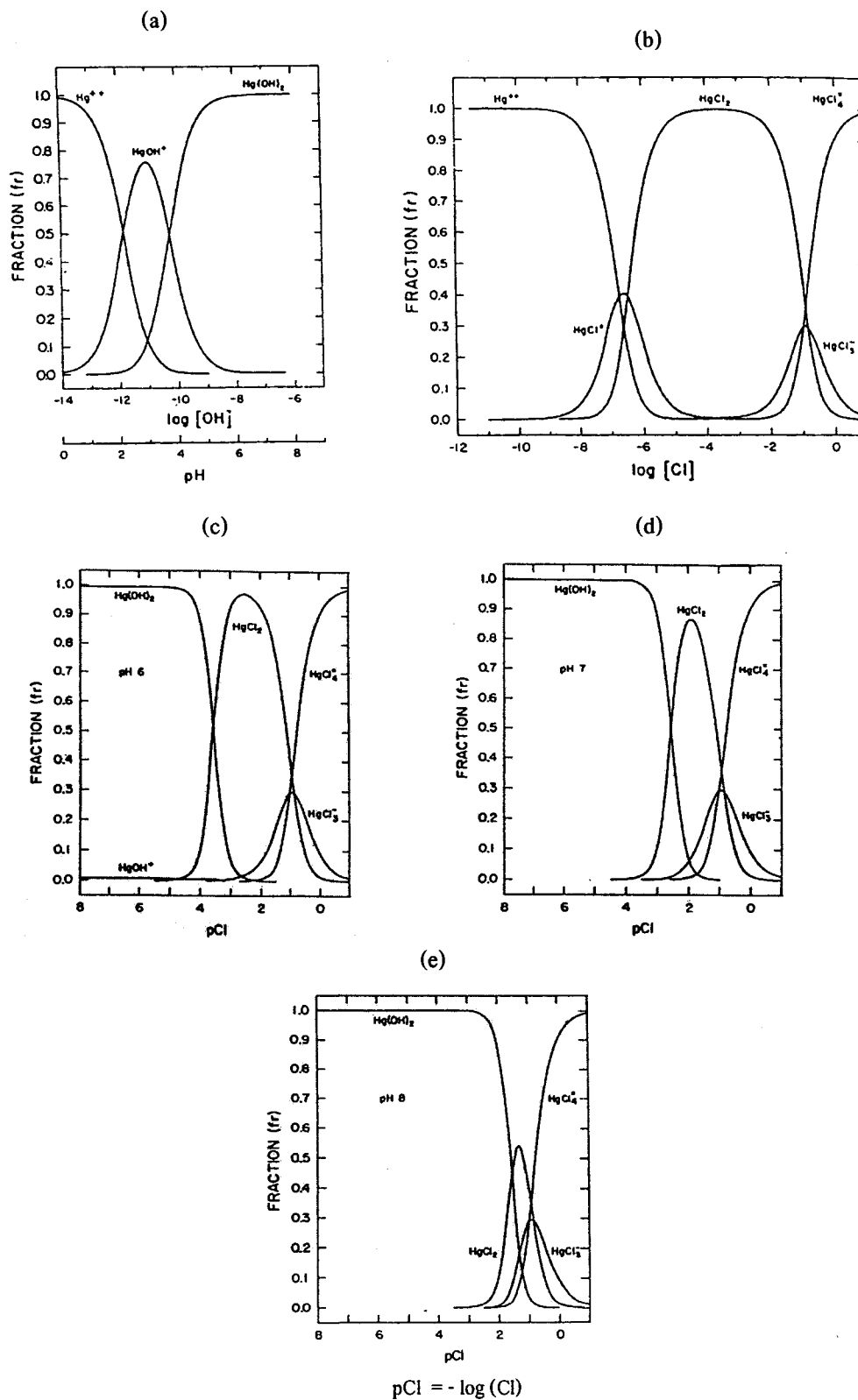
NS : Not significant (p > 0.05)

นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ทางบวกระหว่างค่า K_{ads} กับค่า CEC ทุกระดับความเค็มที่ทดลอง ซึ่งแสดงว่า การดูดซับสารปรอทเกี่ยวข้องกับกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (cation exchange reaction) มากกว่าที่จะเป็นกระบวนการ chemisorption และพบความสัมพันธ์ทางลบกับอนุภาคราย แสดงว่า หากมีสัดส่วนของอนุภาครายสูงจะทำให้ความสามารถหรือความจุของดินในการดูดซับสารปรอทลดน้อยลง และจากการศึกษา พบว่า ถ้าความเป็นกรด-ด่างของดินตะกอนมีอิทธิพลอย่างมากต่อกระบวนการดูดซับสารปรอททั้งผลที่มีต่อความสามารถหรือความจุของดินในการดูดซับและอัตราเร็วของการดูดซับ ถึงแม้ว่าความเป็นกรด-ด่างของดินตะกอนที่ศึกษาครั้งนี้ไม่แตกต่างกันมากนักก็ตาม คือมีค่าอยู่ระหว่าง 7.8 - 8.3 เนื่องจากพบความสัมพันธ์ทางลบอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่า K_{ads} กับค่าความเป็นกรด-ด่างของดินตะกอนโดยเฉพาะในช่วงความเค็มระหว่าง 0-30 psu ซึ่งแสดงว่าความสามารถของดินตะกอนในการดูดซับสารปรอทจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของดินลดต่ำลงหรือในสภาวะที่เป็นกรดมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเป็นกรด-ด่างต่ำจะพบปรอทชนิดที่มีประจุบวก (positively charged Hg species) มาก ทำให้สารปรอทถูกดูดซับได้มากขึ้น (Yin et al., 1996) และในทางกลับกันอัตราเร็วของการดูดซับ ($1/n_{ads}$) สารปรอทจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเพิ่มขึ้น

การศึกษาอิทธิพลของความเค็มที่มีต่อการดูดซับสารปรอทโดยดินตะกอน พบว่า ส่วนใหญ่แล้วความเค็มไม่มีผลต่อการดูดซับสารปรอท ยกเว้นที่ความเค็มระดับสูงๆ โดยเฉพาะที่ 45 psu มีผลทำให้การดูดซับสารปรอทลดน้อยลงทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของสารปรอทและลักษณะของดินตะกอนแต่ละสถานีด้วย โดยดินตะกอนที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงกว่าและเนื้อดินมีสัดส่วนของอนุภาครายแป้งและดินเหนียวสูงกว่า (สถานีที่ 3 และ 7) มีการดูดซับสารปรอทได้ดีกว่า และความเค็มที่ทำการศึกษาแทบไม่มีผลต่อการดูดซับสารปรอท ทำให้ปริมาณปรอทที่ถูกดูดซับมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 4 ความเค็ม ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์สามารถไปลดอิทธิพลของคลอไรด์ลงได้ เพราะสารอินทรีย์สามารถจับกับปรอทได้ดีกว่าคลอไรด์ (Yin et al., 1996) ซึ่งตามปกติแล้วความเค็ม หรือคลอไรด์ไอออนจัดว่าเป็น complexing agent ตัวหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญต่อการละลายได้ และการเคลื่อนที่ (mobility) ของสารปรอทในสิ่งแวดล้อม การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของคลอไรด์ สามารถเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมีของปรอทไอออน เช่น การละลายได้ และประจุ (charge) ซึ่งอาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการดูดซับสารปรอทโดยดินตะกอน (Hahne and Kroontje, 1973a) คลอไรด์ สามารถลดการดูดซับสารปรอทอันเป็นผลมาจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของคลอไรด์ (chloride complexes) โดยเฉพาะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำจะพบมาก (Barrow and Cox, 1992a, b; Nguyen et al., 1994) และชนิดของปรอทที่พบมากที่สุดที่ระดับความเค็มต่ำได้แก่ $Hg(OH)_2$ และ $HgCl_2$ ซึ่งเป็นพวกไม่มีประจุ (uncharged species) โดยมี $Hg(OH)_2$ เป็นชนิดเด่นและมีความว่องไวในการดูดซับได้ดี (active adsorbed species) (Yin et al., 1996; Sarkar et al., 1999) ส่วนที่ระดับความเค็มสูงๆนั้น ชนิดของปรอทส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของประจุลบ เช่น $HgCl_2^-$ และ $HgCl_4^{2-}$ (ภาพที่ 16) ซึ่งไม่สามารถถูกดูดซับได้ (MacNaughton and James, 1974) เนื่องจากดินตะกอนมีคุณสมบัติเป็นประจุลบอยู่แล้ว เพราะในธรรมชาติดินตะกอนจะประกอบ

ด้วยสารอินทรีย์ซึ่งมีค่า pzc (point of zero charge) ที่ต่ำมากจึงทำให้มีประจุลบที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง ในช่วงกว้างมาก (ตั้งแต่ pH > 3 ขึ้นไป) และเมื่อ pH เพิ่มขึ้น ประจุลบก็เพิ่มจำนวนตามไปด้วยจาก กระบวนการ dissociation ของ H^+ จาก functional groups (Sparks, 1995) นอกจากนี้ในดินยังประกอบด้วย clay minerals และ hydrous Al and Fe oxides ซึ่งให้ประจุลบแก่ดินตะกอนอีกด้วย ดังนั้นที่ระดับ ความเค็มสูงๆ จึงน่าจะมีผลต่อการลดปริมาณการดูดซับสารปรอท อย่างไรก็ตามอาจไม่เป็นไปตามที่ กล่าวนี้เสมอไป เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์สามารถไปลดอิทธิพลของคลอไรด์ที่มีต่อการดูดซับสาร ปรอทลงได้ (Yin et al., 1996)

Thongra-ar (2001) ได้ศึกษาอิทธิพลของความเค็มต่อการดูดซับสารปรอทโดยดินตะกอนจากแม่น้ำบางปะกง พบว่า ความเค็มไม่มีผลต่อการดูดซับสารปรอทเช่นเดียวกัน เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนของปรอทและสารอินทรีย์ (Hg-organic complexes) มีอิทธิพลเหนือกว่าสารประกอบเชิงซ้อนของปรอทและคลอไรด์ (Hg-Cl complexes) จึงไปบดบังอิทธิพลของคลอไรด์โดยสิ้นเชิง ถึงแม้ดิน ตะกอนบริเวณมาบตาพุดมีสารอินทรีย์ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับดินบริเวณแม่น้ำบางปะกงมาก แต่จาก ความสัมพันธ์ที่พบในระดับสูงระหว่างค่าความจุในการดูดซับสารปรอทของดินตะกอนกับปริมาณสาร อินทรีย์ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 4 ระดับความเค็ม (ตารางที่ 20) จึงน่าเป็นเหตุผลสำคัญของการลดอิทธิพล ของความเค็มที่มีต่อการดูดซับสารปรอทที่พบในการศึกษาครั้งนี้

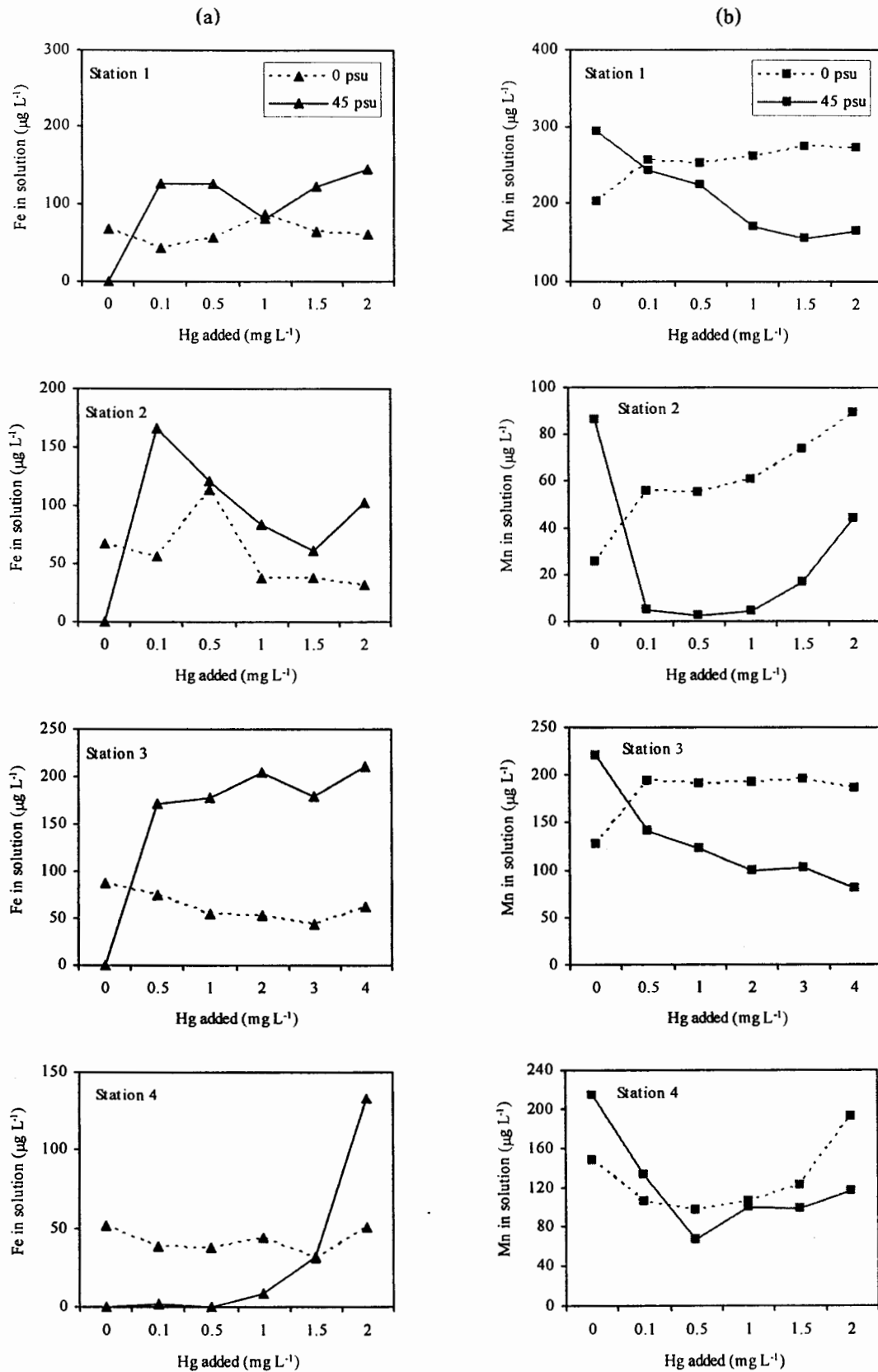


ภาพที่ 16 ชนิดของปรอท (Hg species) ที่ระดับความเป็นกรด-ด่างและคลอไรด์ไอออน ต่างๆกัน

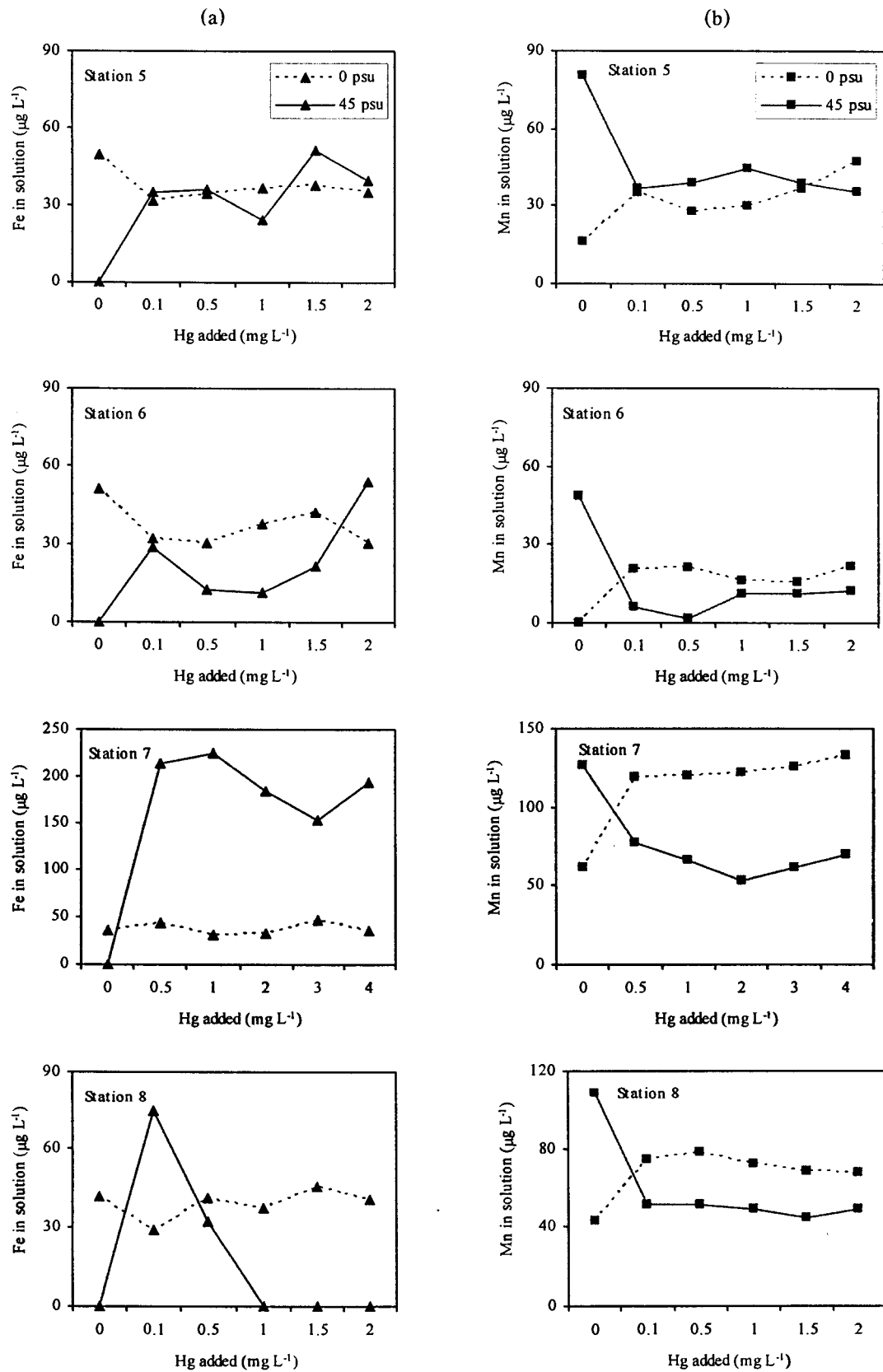
(a) และ (b) จาก Hahne and Kroontje (1973a);

(c), (d) และ (e) จาก Hahne and Kroontje (1973b)

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการตรวจวัดปริมาณของเหล็กและแมงกานีสในสารละลายที่ทำการทดลองดูดซับสารปรอทที่ความเข้มข้นต่างๆโดยดินตะกอน ณ จุดสมดุลของการดูดซับที่ 24 ชั่วโมง เฉพาะที่ความเค็ม 0 และ 45 psu ดังแสดงในภาพที่ 17 ผลการศึกษา พบว่าที่ความเค็ม 0 psu มีการปล่อยแมงกานีสออกจากดินตะกอนซึ่งมีแนวโน้มตามความเข้มข้นของปรอทที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 17 (b)) แสดงว่าปรอทถูกดูดซับที่ออกไซด์ของแมงกานีสได้ดีกว่าออกไซด์ของเหล็กถึงแม้ว่าดินตะกอนบริเวณนี้มีออกไซด์ของแมงกานีสน้อยกว่าของเหล็กหลายเท่าก็ตาม และในกระบวนการดูดซับปรอทที่ออกไซด์ของโลหะนั้น ปรอทได้เข้าไปแทนที่แมงกานีสมากกว่าไปแทนที่เหล็กในโครงสร้างของออกไซด์ เนื่องจากแมงกานีสออกไซด์มีความว่องไวในการดูดซับสารปรอทมาก ทั้งนี้มีรายงานว่า ในบรรดาโลหะออกไซด์ทั้งหลาย แมงกานีสไดออกไซด์ เป็นตัวดูดซับสารปรอทที่ดีที่สุด (most effective adsorbent) ในขณะที่เหล็กออกไซด์อยู่ในอันดับรองลงมา (Kraukopf, 1956 อ้างใน Lockwood and Chen, 1973) และนอกจากนี้ McKenzie (1970) อ้างโดย Backes et al. (1995) พบว่าการดูดซับโลหะเข้าไปในออกไซด์ของแมงกานีสนั้นเกี่ยวข้องกับการปล่อยแมงกานีส (Mn^{2+}) และอออนบวกอื่นๆออกจากออกไซด์แล้วโลหะเหล่านั้นก็เข้าไปแทนที่อออนบวกต่างๆที่ถูกปล่อยออกมา ซึ่งคล้ายกับที่พบในการศึกษาครั้งนี้ แต่เมื่อความเค็มสูงขึ้น (45 psu) พบว่าการปล่อยแมงกานีสออกจากดินตะกอนได้ลดลงจากที่ไม่มีความเค็มซึ่งตรงกันข้ามกับเหล็กที่มีแนวโน้มละลายออกจากดินตะกอนเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 17 (a)) เนื่องจากคลอไรด์สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเหล็กและแมงกานีสที่อยู่ในดินตะกอนได้ด้วยทำให้โลหะทั้งสองละลายออกมาจากดินตะกอนพร้อมกับพาเอาสารปรอทที่เกาะติดออกมาด้วย (Wang et al., 1991) จากผลการศึกษานี้อาจเป็นไปได้ว่าเหล็กสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับคลอไรด์ได้ดีกว่าแมงกานีสจึงทำให้เหล็กละลายออกมาจากดินตะกอนมากกว่า ประกอบกับปรอทที่อยู่ในสารละลายก็สามารถจับกับคลอไรด์ได้ดีด้วยเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของปรอทและคลอไรด์ ทำให้ปรอทไม่สามารถเข้าไปแทนที่แมงกานีสในโครงสร้างของออกไซด์ได้ ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้การดูดซับสารปรอทโดยดินตะกอนบางสถานีสลดลงเมื่อความเค็มสูงขึ้นดังได้กล่าวมาแล้วในตอนแรกๆ



ภาพที่ 17 ปริมาณ (a) เหล็ก และ (b) แมงกานีสในสารละลายทดลองศึกษาการดูดซับสารปรอทโดย
ดินตะกอนสถานีต่างๆที่ความเค็ม 0 และ 45 psu



ภาพที่ 17 (ต่อ)

4.2 การปลดปล่อยสารปรอท

การศึกษาการปลดปล่อยสารปรอทออกจากดินตะกอนที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน 2 ระดับ โดยเติมแค่ 0.05 M $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ซึ่งใช้เป็น background electrolyte ลงในดินตะกอนและไม่เติมสารปรอท ยกเว้นในกรณีศึกษาอิทธิพลของความเค็มได้เติม NaCl ลงไปด้วย ทำการทดลองรวม 7 รอบ พบว่าในช่วงแรกโดยเฉพาะในรอบที่ 1 มีสารปรอทถูกปล่อยออกมามาก หลังจากนั้นปริมาณได้ลดลงแต่ก็ยังคงมีการปล่อยออกมาอยู่เรื่อยๆ แม้เมื่อครบ 7 รอบแล้วก็ตาม และเมื่อนำข้อมูลมาหาความสัมพันธ์กันตามสมการ Freundlich isotherm พบว่ามีข้อมูลบางชุดไม่มีความสัมพันธ์กันตามสมการดังกล่าวโดยพิจารณาจากค่า R^2 ที่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 21 ทั้งนี้ข้อมูลที่พบว่ามีความสัมพันธ์ตามสมการ Freundlich isotherm นั้น จะเป็นข้อมูลที่ดินตะกอนมีสารปรอทอยู่สูงกว่าดินตะกอนที่มีสารปรอทอยู่น้อย อย่างไรก็ตามในที่นี้จะขอนำข้อมูลดังกล่าวมาประกอบในการอภิปรายผลด้วย เนื่องจากได้ทำการลองคัดข้อมูลบางส่วนออกเพื่อเพิ่มค่า R^2 ให้สูงขึ้น และพบว่าไม่มีผลทำให้ค่า K_{des} และ $1/n_{des}$ ที่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากข้อมูลเดิมมากนัก

ผลการศึกษาเมื่อพิจารณาจากค่า Freundlich desorption parameters (K_{des} และ $1/n_{des}$) พบว่า K_{des} มีค่าสูงกว่า K_{ads} ในขณะที่ $1/n_{des}$ มีค่าน้อยกว่า $1/n_{ads}$ ซึ่งแสดงว่าการคายหรือปล่อยสารปรอทออกจากดินตะกอนนั้นต้องใช้พลังงานสูงในการดึงสารปรอทออกมา ทั้งนี้พลังงานที่ใช้ยังขึ้นกับระดับความเข้มข้นของสารปรอทที่ถูกดูดซับเข้าไปด้วย เนื่องจากค่า K_{des} ของดินตะกอนที่มีสารปรอทสูงจะมากกว่าในดินตะกอนที่มีสารปรอทน้อยกว่า ส่วนอัตราเร็วในการปลดปล่อยสารปรอทจะตรงกันข้ามกันและช้ากว่าอัตราการดูดซับมากด้วย จากผลดังกล่าว ซึ่งค่า $K_{des} > K_{ads}$ และ $1/n_{des} < 1/n_{ads}$ แสดงว่าปรอทที่ถูกดูดซับไว้ไม่สามารถปล่อยกลับคืนสู่ชั้นน้ำได้ทั้งหมดจะยังคงมีปรอทบางส่วนตกค้างและจับแน่นอยู่ในดินตะกอนด้วย ซึ่งเป็นการดูดซับที่เรียกว่า irreversible sorption ทั้งนี้เนื่องจากในดินตะกอนที่ศึกษามีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ ดินเหนียว และทรายแป้ง แม้มีอยู่ในปริมาณไม่มากนักก็ตาม แต่องค์ประกอบเหล่านี้ โดยเฉพาะสารอินทรีย์มีความสามารถในการจับยึดกับสารปรอทได้ดีมาก (Yin et al., 1997 a, b) นอกจากนี้ Wallischläger et al. (1998) ยังรายงานว่าสารปรอทที่จับรวมตัวกับสารอินทรีย์ด้วย S-containing groups จะเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (complexes) ที่เฉื่อยในปฏิกิริยาเคมี เช่น การแข่งขันแย่งที่กัน (competition) กับ cations ชนิดอื่นจะไม่เกิดขึ้น และสารปรอทจะถูกปล่อยออกจากสารประกอบเชิงซ้อนนี้ได้ช้าหรือน้อยมาก

ตารางที่ 21 Freundlich desorption parameters ของการปลดปล่อยสารปรอท และปริมาณสารปรอทที่ปลดปล่อยออกจากดินตะกอนที่ความเค็มต่างๆ กัน

Station	Salinity (psu)	Initial Hg added (mg L ⁻¹)	Initial adsorbed Hg (µg g ⁻¹ dry wt.)	K _{des}	1/n _{des}	R ²	Total desorbed amount	
							(µg g ⁻¹)	(%)
1	0	1	9.83	9.8277	0.00002	0.0045	0.013	0.13
		2	16.31	15.728	0.0057	0.9384**	0.744	4.59
	15	1	9.97	9.9617	0.0006	0.8202**	0.015	0.16
		2	18.56	18.513	0.0005	0.9039**	0.056	0.30
	30	1	9.98	9.969	0.00006	0.0251	0.012	0.12
		2	18.89	18.857	0.0003	0.9211**	0.042	0.22
	45	1	9.95	9.9364	0.001	0.7406*	0.031	0.31
		2	17.70	17.662	0.0004	0.8066**	0.051	0.29
2	0	1	9.43	7.6318	0.0441	0.8407**	1.166	13.05
		2	18.98	15.826	0.038	0.8657**	1.654	9.04
	15	1	9.05	7.2375	0.0486	0.9096**	1.088	12.64
		2	17.28	13.113	0.052	0.9198**	2.368	14.58
	30	1	7.90	7.4215	0.0107	0.9128**	0.457	5.94
		2	13.66	11.603	0.0243	0.9400**	1.593	12.19
	45	1	8.17	7.6868	0.0106	0.8965**	0.501	6.22
		2	8.43	6.5264	0.0325	0.8856**	1.701	21.18
4	0	1	8.94	8.7836	0.0036	0.9691**	0.212	2.34
		2	19.01	15.927	0.001	0.9367**	3.10	17.03
	15	1	9.16	9.0792	0.0019	0.9460**	0.102	1.12
		2	18.38	17.217	0.0086	0.7155*	1.186	6.6
	30	1	8.85	8.8099	0.0009	0.9393**	0.060	0.68
		2	16.54	15.827	0.0109	0.8193**	0.635	3.88
	45	1	8.75	8.7422	0.0002	0.9388**	0.021	0.24
		2	13.18	12.756	0.0045	0.9044**	0.459	3.49
5	0	1	9.08	9.067	0.0003	0.8756*	0.018	0.2
		2	18.46	15.903	0.0009	0.8293**	2.577	14.06
	15	1	9.42	9.4056	0.0004	0.6421*	0.027	0.28
		2	18.13	17.538	0.0061	0.9714**	0.657	3.65
	30	1	9.62	9.6059	0.0004	0.5640	0.026	0.27
		2	17.99	17.936	0.0006	0.8674**	0.080	0.45
	45	1	8.16	8.1365	0.0006	0.9245**	0.032	0.39
		2	15.88	15.837	0.0005	0.8276*	0.064	0.40
6	0	1	9.03	9.7502	0.0063	0.9592**	0.396	4.4
		2	18.66	16.069	0.0056	0.8014*	2.640	14.64
	15	1	9.12	9.1064	0.0004	0.7701**	0.029	0.31
		2	18.27	16.481	0.016	0.7144*	1.596	9.02
	30	1	9.03	9.0168	0.0003	0.6973*	0.025	0.28
		2	17.21	16.694	0.0048	0.8937**	0.523	3.07
	45	1	9.64	9.6265	0.0004	0.9126**	0.026	0.27
		2	14.15	13.471	0.0066	0.8488**	0.057	0.41

ตารางที่ 21 (ต่อ)

Station	Salinity (psu)	Initial Hg added (mg L ⁻¹)	Initial adsorbed Hg (μg g ⁻¹ dry wt.)	K _{des}	1/n _{des}	R ²	Total desorbed amount	
							(μg g ⁻¹)	(%)
8	0	1	9.70	9.7067	-0.001	0.0477	0.011	0.11
		2	18.16	17.403	0.0078	0.9629**	0.985	5.43
	15	1	9.98	9.9723	0.001	0.6056*	0.028	0.28
		2	19.25	19.212	0.0005	0.8282*	0.53	0.28
	30	1	9.99	9.9874	0.0004	0.7027*	0.018	0.18
		2	18.54	18.51	0.0003	0.8850**	0.040	0.22
	45	1	9.98	9.9679	0.0013	0.7258	0.032	0.32
		2	18.03	18.008	0.0002	0.5221	0.047	0.26
3	0	2	20.00	19.767	0.00006	0.1484	0.012	0.06
		4	35.60	35.525	0.0003	0.9738**	0.105	0.29
	15	2	19.98	19.975	0.0003	0.6552	0.017	0.08
		4	37.36	37.262	0.0005	0.9900**	0.119	0.32
	30	2	19.98	19.976	0.0002	0.9449**	0.016	0.08
		4	37.72	37.68	0.0002	0.9497**	0.047	0.12
	45	2	19.98	19.974	0.0007	0.6145	0.028	0.14
		4	36.96	36.939	0.0001	0.6681*	0.048	0.13
7	0	2	19.99	19.984	-0.0001	0.1674	0.010	0.05
		4	39.14	39.108	0.0002	0.8440**	0.047	0.12
	15	2	20.00	19.994	-0.00005	0.0096	0.010	0.05
		4	39.08	39.013	0.0004	0.9537**	0.086	0.22
	30	2	20.00	19.986	-0.00003	0.0101	0.009	0.05
		4	38.75	38.858	0.0023	0.9622**	0.019	0.05
	45	2	10.00	19.979	-0.0006	0.3408	0.019	0.19
		4	38.96	39.534	0.0181	0.7401*	0.038	0.10

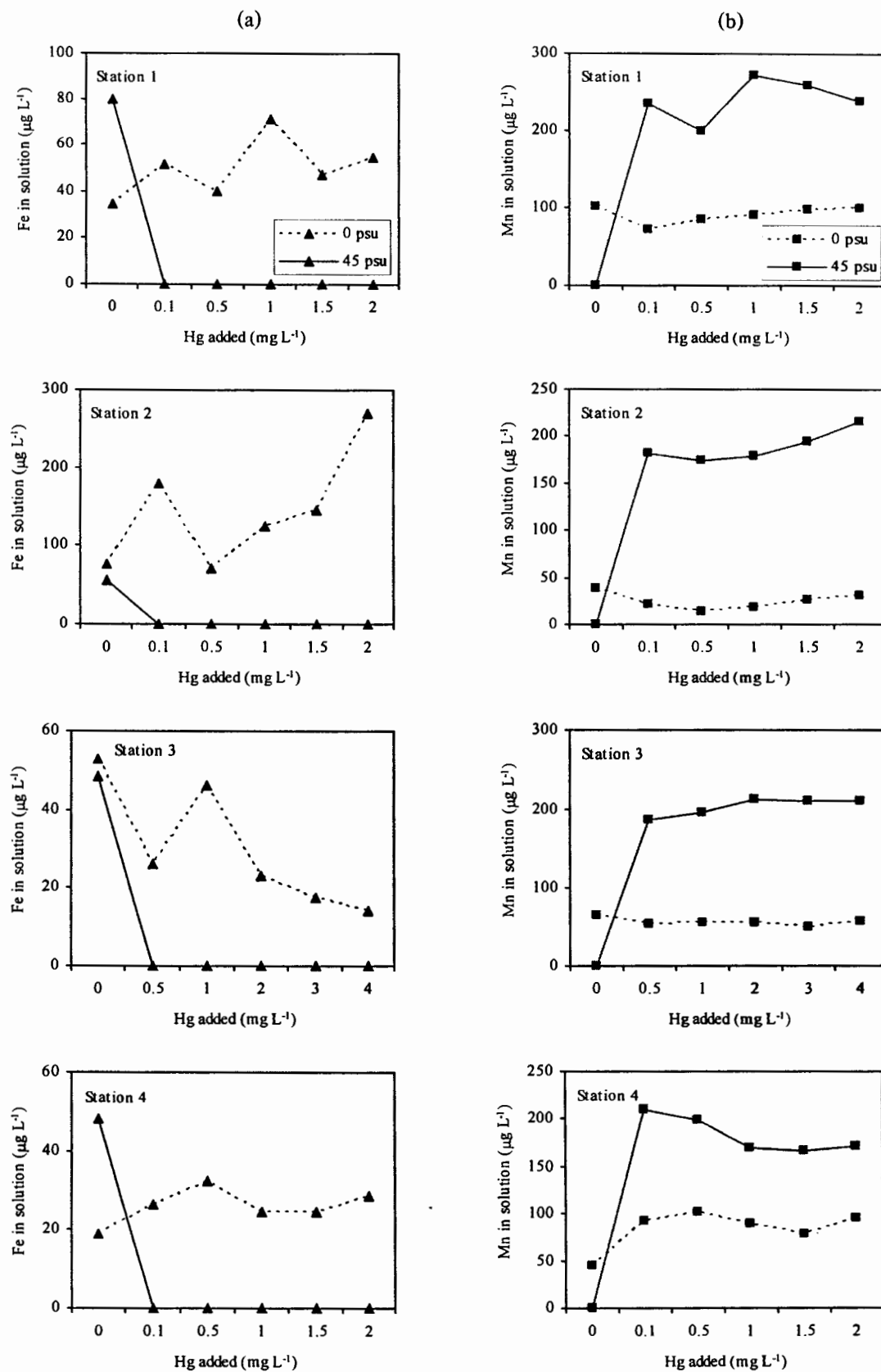
*, **: Significant at $p = 0.05$ and 0.01 respectively

จากตารางที่ 21 พบว่าปรอทถูกปล่อยออกจากดินตะกอนได้น้อยมากส่วนใหญ่ไม่ถึง 10 % ของปริมาณที่ดูดซับไว้ และดินตะกอนในสถานีเดียวกันปริมาณปรอทที่ปล่อยออกมานี้ยังขึ้นอยู่กับปริมาณที่ดูดซับไว้ด้วย ซึ่งหากปริมาณที่ดูดซับไว้มีมาก การปล่อยออกมาก็มีแนวโน้มมากตามไปด้วยแต่ไม่ทุกสถานี นอกจากนี้ยังพบว่า ดินตะกอนของสถานีที่ 3 และ 7 ซึ่งมีปริมาณของสารอินทรีย์ ดินเหนียว และทรายแป้งสูงกว่าสถานีอื่นๆทั้งหมด มีการปล่อยสารปรอทออกมาน้อยมากๆ กล่าวคือส่วนใหญ่ น้อยกว่า 0.2 % ของปริมาณปรอทที่ดูดซับไว้ ซึ่งมีค่าโดยประมาณ 20-40 μg g⁻¹ น้ำหนักแห้ง (ข้อสังเกต ปริมาณปรอทที่ดูดซับของสถานีที่ 3 และ 7 จะสูงกว่าสถานีอื่นเพราะมีการดูดซับได้ดีกว่า) และจากผล การศึกษาปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดในปี 2546 พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง <0.0023 - 0.224 μg g⁻¹ น้ำหนักแห้ง ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับผลจากการทดลองครั้งนี้ ดัง

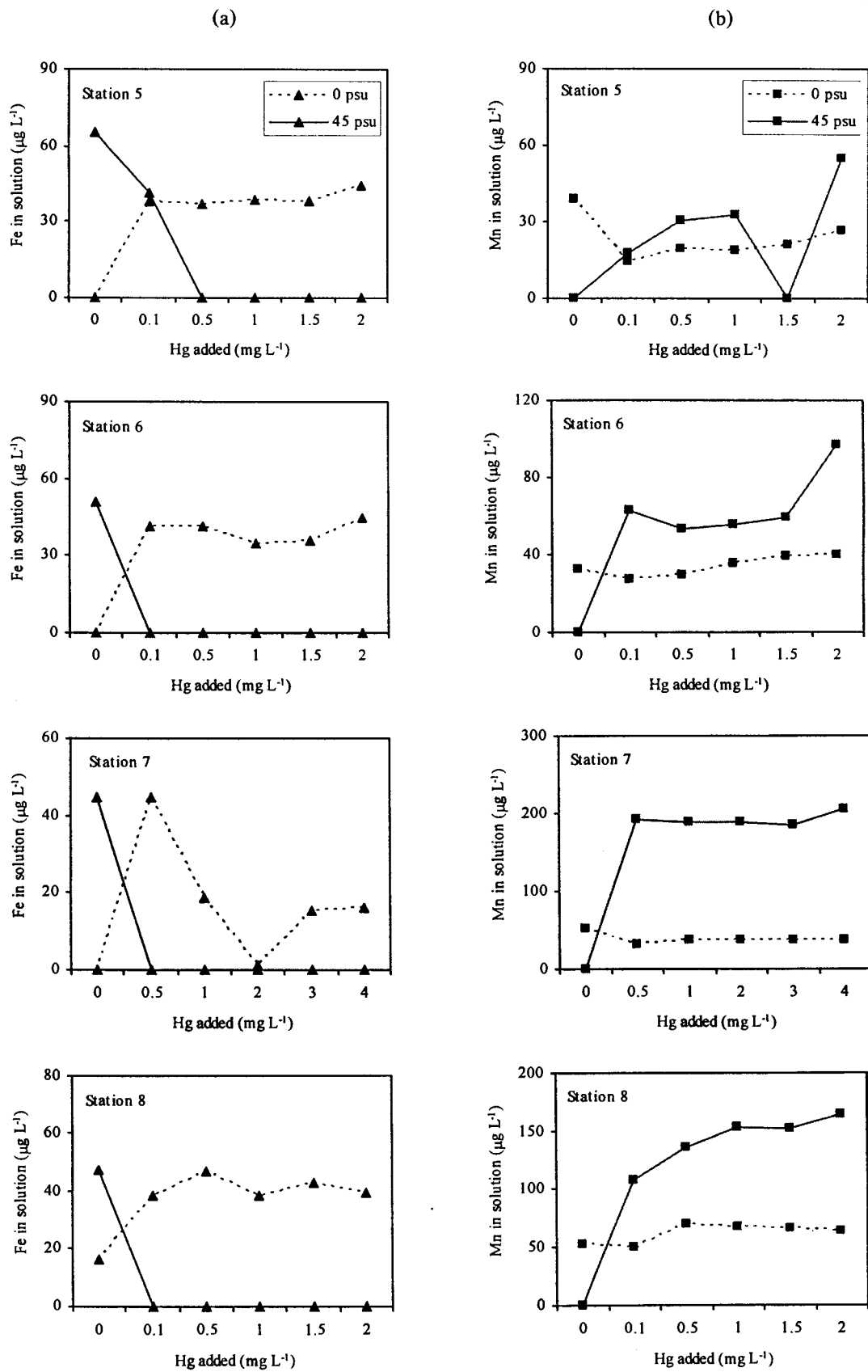
นั้น ในสภาพจริงตามธรรมชาติ การปลดปล่อยสารปรอทออกจากดินตะกอนบริเวณมาบตาพุดจึงเป็นไปได้ยากมากหรือแทบไม่เกิดขึ้นเลย

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของความเค็มหรือคลอไรด์ที่มีต่อการปลดปล่อยสารปรอทออกจากดินตะกอนนั้น เมื่อพิจารณาจากค่า K_{des} และ $1/n_{des}$ ของทั้งสี่ความเค็ม พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกัน แต่มีแนวโน้มที่ระดับความเค็มสูงๆ ที่ ค่า K_{des} จะลดลง และ $1/n_{des}$ เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่า activation energy สำหรับใช้ในการดึงปรอทออกจากดินตะกอนได้ลดลง ประกอบกับอัตราเร็วในการปล่อยหรือคายสารได้เพิ่มขึ้น จึงทำให้ปรอทที่ถูกดูดซับไว้จะละลายออกจากดินตะกอนได้ง่ายขึ้นกว่าที่ระดับความเค็มต่ำหรือที่ไม่มีความเค็ม เนื่องจากปรอทละลายออกมาเพื่อไปรวมกับคลอไรด์เกิดสารประกอบเชิงซ้อนขึ้น ทั้งนี้จะพบได้เฉพาะในดินตะกอนที่มีการเติมสารปรอทไว้สูงซึ่งในที่นี้คือที่ระดับ 2 mg L^{-1} อย่างไรก็ตามพบเพียงบางสถานีเท่านั้น โดยเฉพาะสถานีที่ 2 ซึ่งเป็นดินทรายและมีสารอินทรีย์น้อย แสดงว่าไม่เพียงแต่ความเค็มเท่านั้น คุณลักษณะของดินตะกอนและองค์ประกอบในดินตะกอนก็มีผลต่อการปลดปล่อยสารปรอทด้วย

นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณของเหล็กและแมงกานีสที่ละลายออกจากดินตะกอนในกระบวนการศึกษาการปลดปล่อยสารปรอทด้วยที่ความเค็ม 0 และ 45 psu ซึ่งพบผลในทางตรงกันข้ามกับการศึกษาการดูดซับ ดังแสดงในภาพที่ 18 โดยพบว่า ที่ความเค็ม 0 psu นั้นมีการคายโลหะทั้งสองออกจากดินตะกอนด้วย ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจาก แคลเซียมไอออน (Ca^{++}) ซึ่งจัดเป็น major cation ชนิดหนึ่ง และมี affinity สูงในการจับกับ binding sites ของดินตะกอน (Backes et al., 1995) และมาจาก $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ซึ่งใช้เป็น background electrolyte ที่เติมลงไปดินตะกอนขณะทำการทดลองเพื่อเลียนแบบสภาพจริงในธรรมชาติ ได้เข้าไปแทนที่เหล็กและแมงกานีสในออกไซด์ของโลหะที่อยู่ในดินตะกอนรวมทั้งแทนที่ปรอทในดินตะกอนด้วย แต่เมื่อความเค็มเพิ่มขึ้นเป็น 45 psu ไม่พบการปล่อยเหล็กออกจากดินตะกอนที่ถูกดูดซับสารปรอทไว้ ยกเว้นในดินที่ไม่ได้เติมสารปรอทเข้าไป ในขณะที่พบการปล่อยแมงกานีสออกมาในปริมาณสูงกว่าที่ความเค็ม 0 psu แสดงว่าการปลดปล่อยสารปรอทออกจากดินตะกอน นอกจากอิทธิพลของคลอไรด์ที่ดึงสารปรอทละลายออกมาแล้ว ปรอทบางส่วนอาจมาจากแมงกานีสออกไซด์ที่ละลายออกมาจากอิทธิพลของคลอไรด์เช่นกันพร้อมกับพาเอาสารปรอทที่เกาะติดตามออกมาด้วย ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าในสภาวะปกติที่ไม่มีการปล่อยสารปรอทใดๆลงสู่แหล่งน้ำและเป็นน้ำจืด ปรอทที่ถูกดูดซับไว้โดยดินตะกอนสามารถปล่อยกลับคืนสู่แหล่งน้ำได้จากกระบวนการที่ไอออนบวกที่อยู่ในน้ำและมีความสามารถสูงกว่าหรือมี affinity สูงเข้าไปแทนที่โลหะบนพื้นผิวดินตะกอน แต่ในน้ำทะเลที่มีความเค็มสูงๆ ปรอทที่ถูกดูดซับไว้บางส่วนสามารถปล่อยกลับคืนสู่แหล่งน้ำจากอิทธิพลของคลอไรด์และการละลายออกมาพร้อมกับแมงกานีสที่อยู่ในดินตะกอนซึ่งอาจจะอยู่ในโครงสร้างของออกไซด์มากกว่าที่ละลายออกมาพร้อมกับเหล็ก



ภาพที่ 18 ปริมาณ (a) เหล็ก และ (b) แมงกานีสในสารละลายทดลองศึกษาการปลดปล่อยสารปรอทโดยดินตะกอนสถานีต่างๆที่ความเค็ม 0 และ 45 psu

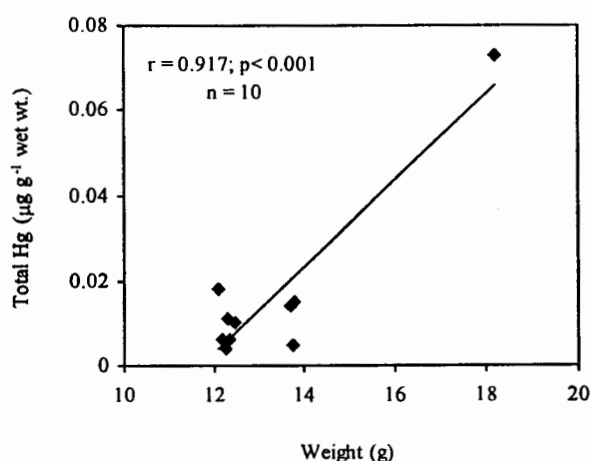


ภาพที่ 18 (ต่อ)

5. การศึกษาปริมาณการสะสมสารปรอทในสัตว์ทะเล

สำหรับการศึกษาการสะสมของสารปรอทในสัตว์ทะเลบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ได้ทำการเก็บตัวอย่างโดยการตกเบ็ดและซื้อจากชาวประมงที่จับปลาอยู่ในบริเวณดังกล่าวได้ตัวอย่างสัตว์ทะเลทั้งหมด 26 ชนิด (species) จำแนกเป็นปลา 16 ชนิด 77 ตัวอย่าง หมึก 2 ชนิด 6 ตัวอย่าง ปู 1 ชนิด 21 ตัวอย่าง หอย 5 ชนิด 19 ตัวอย่าง กุ้ง 2 ชนิด 8 ตัวอย่าง รวมจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 131 ตัวอย่าง ผลการศึกษา พบว่า ปริมาณการสะสมสารปรอทสูงสุดพบในหอยเท้าช้างเล็ก *Cassia pila* เท่ากับ 0.232 mg kg^{-1} น้ำหนักเปียก รองลงมาได้แก่ ปลาข้างตะกวด *Therapon puta* (0.075 mg kg^{-1} น้ำหนักเปียก) และปลาเป็นใหญ่ *Leiognathus* sp. (0.073 mg kg^{-1} น้ำหนักเปียก) ตามลำดับ (ตารางที่ 22) อย่างไรก็ตาม ปริมาณการสะสมสารปรอทในสัตว์ทะเลทั้งหมดที่ได้จากการศึกษานี้ขึ้นอยู่กับระดับที่ปลอดภัยสำหรับการบริโภคตามมาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อนกำหนดโดยกระทรวงสาธารณสุขให้มีค่าสารปรอทไม่เกิน 0.5 mg kg^{-1} น้ำหนักเปียก สำหรับอาหารทะเล (กระทรวงสาธารณสุข, 2529)

การศึกษความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทกับขนาดหรือน้ำหนักของสัตว์ทะเลพบเฉพาะความสัมพันธ์ทางบวกกับปลากระโทงแทงนั้น ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทรวมกับน้ำหนักของปลากระโทงแทง

ตารางที่ 22 ปริมาณการสะสมของสารปรอทในสัตว์ทะเลบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง

Species	Scientific name	Number of Specimen	Body Weight (g)		Total Length (cm)		Total Hg (mg kg ⁻¹ wet wt.)	
			Mean	SD	Mean	SD	Range	Mean ± SD
ปลาทุ	<i>Rastrelliger neglectus</i>	14	24.0	8.5	12.9	1.44	0.014 - 0.028	0.021 ± 0.004
ปลากระแ	<i>Sardinella</i> sp.	10	13.3	1.9	10.8	0.62	0.005 - 0.018	0.016 ± 0.021
ปลาเห็ดโคน	<i>Sillago maculata</i>	13	48.9	15.5	16.7	1.4	0.003 - 0.068	0.038 ± 0.022
ปลาเห็ดโคน	<i>Sillago sihama</i>	4	37.4	25.2	15.6	3.0	0.019 - 0.102	0.046 ± 0.038
ปลาคอกหมากครีบน้ำ	<i>Gerres punctatus</i>	9	124.6	16.6	19.5	0.97	0.002 - 0.058	0.028 ± 0.025
ปลาคอกหมาก	<i>Gerres</i> sp.	1	29.5	-	13.0	-	0.005	0.005
ปลากะเบน	<i>Dasyatis</i> sp.	3	206.1	34.7	27.7	7.5	0.004 - 0.042	0.025 ± 0.019
ปลาสิลิดโบขนุน	<i>Siganus</i> sp.	3	273.5	4.1	24.0	1.0	0.015 - 0.017	0.015 ± 0.001
ปลาลิ้นหมา	<i>Grammatobothus polyophthalmus</i>	1	218.4	-	24	-	0.054	0.054
ปลาเป็นใหญ่	<i>Leiognathus</i> sp.	2	20.7	0.8	11	0	0.068 - 0.079	0.073 ± 0.008
ปลากะพงเหลืองมัน	<i>Lutianus vitta</i>	1	129.4	-	21	-	0.039	0.039
ปลากะพงแดงข้างปาน	<i>Lutianus russelli</i>	1	75.3	-	17	-	0.026	0.026
ปลากะพงข้างแถบ	<i>Lutjanus vitta</i>	1	13.2	-	10	-	0.054	0.054
ปลาสิกุล	<i>Caranx kalla</i>	2	28.4	5.1	14.5	1.4	0.037 - 0.040	0.038 ± 0.002
ปลาทรายแดง	<i>Nemipterus</i> sp.	5	81.3	51.1	17.4	4.4	0.042 - 0.109	0.063 ± 0.027
ปลาข้างตะเภา	<i>Therapon puta</i>	7	33.8	20.4	12.3	2.9	0.044 - 0.138	0.075 ± 0.030
ปูม้า	<i>Portunus pelagicus</i>	21	82.7	28.4	-	-	0.010 - 0.050	0.024 ± 0.009

ตารางที่ 22 (ต่อ)

Species	Scientific name	Number of Specimen	Body Weight (g)		Total Length (cm)		Total Hg (mg kg ⁻¹ wet wt.)	
			Mean	SD	Mean	SD	Range	Mean ± SD
หมึกหอม (หัว)	<i>Sepioteuthis</i> sp.	5	120.2	48.3	31.0	3.7	0.017 - 0.048	0.036 ± 0.013
หมึกหอม (ตัว)	<i>Sepioteuthis</i> sp.	5	120.2	48.3	31.0	3.7	0.020 - 0.062	0.043 ± 0.016
หมึกสาย (หัว)	<i>Octopus</i> sp.	1	30.7	-	-	-	0.028	0.028
หมึกสาย (ตัว)	<i>Octopus</i> sp.	1	30.7	-	-	-	0.020	0.020
หอยสังข์จุฬารามณ์	<i>Cymbiola nobilis</i>	3	331.4	31.7	-	-	0.013 - 0.016	0.015 ± 0.002
หอยแมลงภู	<i>Mytilus viridis</i>	3	45.9	24.2	-	-	0.011 - 0.028	0.012 ± 0.001
หอยมุก	<i>Pinctada</i> sp.	8	39.1	7.8	-	-	0.020 - 0.032	0.025 ± 0.004
หอยหวาน	<i>Babylonia arcolata</i>	3	38.4	5.0	-	-	0.032 - 0.054	0.045 ± 0.011
หอยเท้าช้างเล็ก	<i>Cassis pila</i>	2	76.6	2.7	-	-	0.216 - 0.247	0.232 ± 0.021
กั้งคึกแตง	<i>Squilla</i> sp.	3	27.2	3.5	-	-	0.028 - 0.041	0.035 ± 0.006
กั้งกระดาน	<i>Thenus orientalis</i>	5	69.1	16.4	-	-	0.019 - 0.035	0.024 ± 0.008

สารปรอทที่สะสมในสัตว์ทะเลนั้นสามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ได้จากการบริโภคอาหารทะเล การปนเปื้อนของสารปรอทในสิ่งมีชีวิตในทะเลจึงสามารถใช้ในการประเมินผลกระทบทางชีวภาพต่อสิ่งแวดล้อมทางทะเลและผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ได้ สัตว์ทะเลมีการสะสมสารปรอทได้แตกต่างกันในแต่ละชนิดโดยขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการกินอาหารและแหล่งที่อยู่อาศัย ซึ่งทำให้มีโอกาสในการได้รับสารปรอทแตกต่างกัน ปลาที่มีโอกาสสะสมสารปรอทมากกว่าสัตว์น้ำอื่นๆทั้งทางตรงจากน้ำทะเลหรือทางอ้อมโดยผ่านห่วงโซ่อาหาร (Keckes and Miettinen, 1972) เนื่องจากสารปรอทมี affinity สูงในการจับกับ sulfhydryl groups ในโปรตีนที่อยู่ในปลา (Spry and Wiener, 1991) ประกอบกับปลาส่วนใหญ่มีโปรตีนสูงกว่าสัตว์น้ำประเภทอื่นๆ และสารปรอทที่สะสมในปลาส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเมทิลเมอร์คิวรี (methylmercury) ซึ่งเป็นสารประกอบปรอทอินทรีย์ที่มีพิษมากที่สุด (Francesconi and Lenanton, 1992) สามารถสะสมในปลาได้สูงกว่าปรอทอนินทรีย์ทั้งจากอาหารและน้ำ (Riisgard and Famme, 1986) เนื่องจากมีความเสถียร และปลาสามารถกำจัดปรอทอนินทรีย์ออกจากร่างกายได้ง่ายกว่าเมทิลเมอร์คิวรีด้วย (Boudou and Ribeyre, 1985) ดังนั้น มนุษย์จึงสามารถรับเมทิลเมอร์คิวรีเข้าสู่ร่างกายได้จากการบริโภคอาหารเป็นส่วนใหญ่โดยเฉพาะจากปลาและผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำจากปลา อย่างไรก็ตาม การได้รับสารปรอทเข้าสู่ร่างกายผ่านการบริโภคปลานั้น ยังขึ้นอยู่กับอัตราการบริโภคปลาของแต่ละบุคคลและชนิดของปลาด้วย (Boischio and Henshel, 2000) ดังนั้น ผู้บริโภคปลาในอัตราสูงและมีการปนเปื้อนของสารปรอทในปลาสูงด้วยจึงมีโอกาสเสี่ยงต่อการได้รับอันตรายจากพิษของสารปรอท

สรุปผลการศึกษา

1. ปริมาณปรอทรวมในน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดในฤดูแล้งและฤดูฝน พบว่ามีค่าระหว่าง 2.42 - 5.67 และ 1.52 - 11.77 ng L⁻¹ ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งของไทย และในฤดูฝนมีแนวโน้มสูงกว่าฤดูแล้งแต่พบเพียงบางสถานี ส่วนปรอทรวมที่พบในคลองระบายน้ำทิ้ง/จุดที่ระบายลงสู่ทะเล มีปริมาณสูงกว่าที่ตรวจพบในน้ำทะเลทั้งสองฤดูและในฤดูฝนสูงกว่าฤดูแล้งด้วย

2. ปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนในฤดูแล้ง มีค่าระหว่าง 0.006 - 0.130 µg g⁻¹ น้ำหนักแห้ง และฤดูฝนมีค่าระหว่าง <0.0023 - 0.224 µg g⁻¹ น้ำหนักแห้ง สถานีใกล้ฝั่งมีปริมาณปรอทสูงกว่าสถานีไกลฝั่ง โดยเฉพาะจุดที่พบสูงมากอยู่บริเวณหน้าโรงงานปิโตรเคมี และในฤดูฝนพบสูงกว่าฤดูแล้ง โดยค่าสูงสุดที่พบ สูงกว่ามาตรฐานของสารปรอทในดินตะกอนของบางประเทศ นอกจากนี้สถานีที่พบความเข้มข้นของสารปรอทในดินตะกอนสูงมักมีความเข้มข้นของสารปรอทในน้ำต่ำ

3. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนและคุณสมบัติของดินตะกอนบางประการพบว่า สารปรอทมีความสัมพันธ์ทางบวกค่อนข้างสูงมากกับออกไซด์ของเหล็ก รองลงมา คือ สารอินทรีย์ ทรายแป้ง ดินเหนียว และออกไซด์ของแมงกานีส

4. รูปแบบทางเคมีของสารปรอทที่พบมากในดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดมีอยู่สองรูปแบบที่สำคัญ คือ รูปที่จับรวมตัวกับสารอินทรีย์และซัลไฟด์ และรูปแบบที่อยู่ในโครงสร้างของแร่ธาตุในดิน ซึ่งปรอททั้งสองรูปแบบนี้มีโอกาสถูกปลดปล่อยเข้าสู่ชั้นน้ำได้น้อยจึงเป็นรูปแบบที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับค่าที่ตรวจวัดได้โดยตรงจากปริมาณปรอทที่สามารถเข้าสู่สิ่งมีชีวิต (bioavailable Hg) ซึ่งพบว่ามีค่าน้อยเช่นกัน

5. การศึกษาการดูดซับและการปลดปล่อยสารปรอทโดยดินตะกอนที่ความเค็ม 4 ระดับ คือ 0 15 30 และ 45 psu พบว่าการดูดซับจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารปรอทสูงขึ้นโดยขึ้นอยู่กับลักษณะของเนื้อดินตะกอนด้วย ความเค็มไม่มีผลต่อการดูดซับยกเว้นที่ 45 psu ซึ่งมีแนวโน้มทำให้การดูดซับสารปรอทที่ความเข้มข้นสูงๆลดลงจากความเค็มระดับอื่นๆ และปรอทที่ถูกดูดซับไว้ไม่สามารถปลดปล่อยออกจากดินตะกอนได้ทั้งหมด นอกจากนี้พบว่าความเค็มไม่มีผลต่อการปล่อยสารปรอทออกจากดินตะกอนด้วย

6. องค์ประกอบในดินตะกอนที่มีบทบาทสำคัญต่อความสามารถหรือความจุของดินตะกอนในการดูดซับสารปรอท ได้แก่ สารอินทรีย์ ออกไซด์ของเหล็ก ทรายแป้ง และดินเหนียว

7. ปริมาณการสะสมสารปรอทในสัตว์ทะเลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยสำหรับการบริโภคตามมาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อนกำหนดไว้โดยกระทรวงสาธารณสุข

เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงสาธารณสุข. 2529. มาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน, ประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 98 ลงวันที่ 21 มกราคม พ.ศ. 2529. กระทรวงสาธารณสุข กรุงเทพมหานคร. 2 น.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2543. มาตรฐานคุณภาพน้ำและเกณฑ์ระดับคุณภาพน้ำในประเทศไทย. กรมควบคุมมลพิษ. กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. 210 น.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2545. รายงานโครงการประเมินความสามารถในการรองรับมลพิษและประเมินความเสี่ยงต่อนิเวศทางทะเล. กรมควบคุมมลพิษ. กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. 217 น.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2546. ทะเลไทย.....วันนี้. ส่วนแหล่งน้ำทะเล สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ. 180 น.
- Alloway, B.J. 1995. Soil processes and the behavior of metals. In: Alloway, B.J. (ed.). *Heavy Metals in Soils*. London: Blackie Academic and Professional. p.11-37.
- Backes, C.A., McLaren, R.G., Rate, A.W. and Swift, R.S. 1995. Kinetics of cadmium and cobalt desorption from iron and manganese oxides. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 778-785.
- Barrow, N.J. and Cox, V.C. 1992a. The effects of pH and chloride concentration on mercury sorption. I. By goethite. *J. Soil Sci.* 43: 295-304.
- Barrow, N.J. and Cox, V.C. 1992b. The effects of pH and chloride concentration on mercury sorption. II. By a soil. *J. Soil Sci.* 43: 305-312.
- Bohn, H.L., McNeal, B.L. and O'Connor, G.A. 1985. *Soil Chemistry*. 2nd edition. New York: John Wiley & Sons, Inc. 341 p.
- Boischio, A.A.P. and Henshel, D. 2000. Fish consumption, fish lore and mercury pollution- risk communication for the Madeira River people. *Environ. Res. Section A*. 84: 108-126.
- Boudou, A. and Ribeyre, F. 1985. Experimental study of trophic contamination of *Salmo gairdneri* by two mercury compounds- $HgCl_2$ and CH_3HgCl - analysis at the organism and organ levels. *Water Air Soil Pollut.* 26: 137-148.
- Boulding, J.R. 1994. *Description and Sampling of Contaminated Soils: A Field Guide*. 2nd edition. Boca Raton: Lewis Publishers.
- Bourg, A.C.M. and Loch, J.P.G. 1995. Mobilization of heavy metals as affected by pH and redox conditions. In: Salomons, W. and Stigliani, W.M. (eds.). *Biogeochemistry of Pollutants in Soils and Sediments: Risk Assessment of Delayed and Non-Linear Responses*. New York: Springer-Verlag. p. 87-102.

งานส่งเสริมการวิจัย

กองบริการการศึกษา

- 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. *Environ. Pollut.* 76: 89-131.
- Chester, R. and Voutsinou, F.G. 1981. The initial assessment of trace metal pollution in coastal sediments. *Mar. Pollut. Bull.* 12: 84-91.
- Chongprasith, P., Wilairatanadilok, W. and Rattikhansukha, C. 1995. Environmental studies in management of the Upper Gulf of Thailand. In: Watson, D., and Ong, K.S. (eds.). *ASEAN-Canada Marine Environmental Quality Technical Papers and Mission Report*. Contributions of the ASEAN-Canada Technical Mission to the Coastal Zone Canada'94 Conference (21-23 September 1994), Halifax, Canada. EVS Environment Consultants, Vancouver and Department of Fisheries, Malaysia. p. 62-73.
- Deocadiz, E.S., Diaz, V.R. and Otico, P.F.J. 1999. ASEAN marine water quality criteria for mercury. In: McPherson, C.A., Chapman, P.M., Viger, G.A. and Ong, K.S. (eds.). *ASEAN Marine Water Quality Criteria: Contextual Framework, Principle, Methodology and Criteria for 18 Parameters*. ASEAN Marine Environmental Quality Criteria - Working Group (AMEQC-WG), ASEAN-Canada Cooperative Programme on Marine Science - Phases II (CPMS-II). EVS Environment Consultants, North Vancouver and Department of Fisheries, Malaysia. p. XIII-1 - XIII-34.
- Environment Canada 1995. *Interim Sediment Quality Guidelines*. Soil and Sediment Quality Section, Guidelines Division, Ecosystem Conservation Directorate Evaluation and Interpretation Branch, Ottawa, Ontario. 10 p.
- Francesconi, K.A. and Lenanton, C.J. 1992. Mercury contamination in a semi-enclosed marine embayment: organic and inorganic mercury content of biota and factors influencing mercury levels in fish. *Marine Environ. Res.* 33: 189-212.
- Gambrell, R.P., Khalid, R.A., and Patrick, W.H.Jr. 1980. Chemical availability of mercury, lead, and zinc in Mobile Bay sediment suspensions as affected by pH and oxidation-reduction conditions. *Environ. Sci. Technol.* 14: 431-436.
- Ginn, T.C., and Pastorok, R.A., 1992. Assessment and management of contaminated sediments in Puget Sound. In: Burton, G.A. (ed.). *Sediment Toxicity Assessment*. Boca Raton: Lewis Publishers. p. 371-401.

- Gomez-Parra, A., Forja, J.M., Delvalls, T.A., Saenz, I. and Riba, I. 2000. Early contamination by heavy metals of the Guadalquivir estuary after the Aznalcollar mining spill (SW Spain). *Mar. Pollut. Bull.* 40: 1115-1123.
- Goh, T.B., Arnaud, R.J.St. and Mermut, A.R. 1993. Carbonates. In: Carter, M.R. (ed.). *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. Boca Raton: Lewis Publishers. p. 177-185.
- Gunn, A.A., Winnard, D.A., and Hunt, D.T.E. 1988. Trace metal speciation in sediments and soils; an overview from a water industry perspective. In: Kramer, J.R. and Allen, H.E. (eds.). *Metal Speciation: Theory, Analysis and Application*. Michigan: Lewis Publishers. p. 261-294.
- Hahne, H.C.H. and Kroontje, W. 1973a. Significant of pH and chloride concentration on behavior of heavy metal pollutions: mercury(II), cadmium(II), zinc(II), and lead(II). *J. Environ. Qual.* 2: 444-450.
- Hahne, H.C.H. and Kroontje, W. 1973b. The simultaneous effect of pH and chloride concentrations upon mercury(II) as a pollutant. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37: 838-843.
- Hayase, K. And Tsubota, H. 1985. Sedimentary humic acid and fulvic acid as fluorescent organic materials. *Geochim. Cosmochimica Acta.* 49: 159-163.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics*. San Diego: Academic Press.
- Keckes, S. and Miettinen, J.K. 1972. Mercury as a marine pollutant. In: Ruivo, M. (ed.). *Marine Pollution and Sea Life*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). London: Fishing News (Books) Ltd. p. 276-289.
- Langston, W. J. 1980. Arsenic in U.K. estuarine sediments and its availability to deposit-feeding bivalve. *J. mar. biol. Ass. U.K.* 60: 869-881.
- Lockwood, R.A. and Chen, K.Y. 1973. Adsorption of Hg(II) by hydrous manganese oxides. *Environ. Sci. Technol.* 7: 1028-1034.
- Louie, H.W. 1983. Determination of total mercury in fish: An improved method. *Analyst.* 108: 1313-1317.
- Luoma, S.N., 1983. Bioavailability of trace metals to aquatic organisms- a review. *Sci. Total Environ.* 28: 1-22.
- Luoma, S. N., and Bryan, G.W. 1978. Factors controlling the availability of sediment-bound lead to the estuarine bivalve *Scrobicularia plana*. *J. mar. biol. Ass. U.K.* 58: 793-802.
- Luoma, S.N. and Bryan, G.W. 1981. A statistical assessment of the form of trace metals in oxidized estuarine sediments employing chemical extractants. *Sci. Total Environ.* 17: 165-196.

- MacNaughton, M.G. and James, R.O. 1974. Adsorption of aqueous mercury (II) complexes at the oxide/water interface. *J. Colloid Interface Sci.* 47: 431-440.
- McKenzie, R.M. 1970. The reaction of cobalt with manganese dioxide minerals. *Aust. J. Soil Res.* 8: 97-106.
- Newton, D.W., Ellis, R.Jr., and Paulsen, G.M. 1976. Effect of pH and complex formation on mercury(II) adsorption by bentonite. *J. Environ. Qual.* 5: 251-254.
- Nelson, D.W. and Sommers, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Page, A.L., Miller, R.H. and Keeney, D.R. (eds.). *Method of Soil Analysis, Part II. Chemical and Microbiological Properties*. 2nd edition. American Society of Agronomy, Inc. and Soil Science Society of America, Inc. Publishers, Madison, Wisconsin, USA. p. 539-579.
- Nguyen, V.D., Kniewald, G. and Branica, M. 1994. Distribution of mercury between electrolyte and natural bentonite. *Mar. Chem.* 46: 33-47.
- Nissenbaum, A., and Kaplan, I.R. 1972. Chemical and isotopic evidence for the in situ origin of marine humic substances. *Limnol. Oceanogr.* 17: 570-582.
- Perin, G., Bonardi, M., Fabris, R., Simoncini, B., Manente, S., Tosi, L. and Scotto, S. 1997. Heavy metal pollution in central Venice lagoon bottom sediments: evaluation of the metal bioavailability by geochemical speciation procedure. *Environ. Technol.* 18: 593-604.
- Pimpisut, D., Jinsart, W. and Hooper, M. 2005. Modeling of the BTX species based on an emission inventory of sources at the Map Ta Phut Industrial Estate in Thailand. *ScienceAsia* 31:103-112.
- Pollution Control Department. 1997. *Water Quality Criteria & Standards in Thailand*. Ministry of Science, Technology and Environment. Thailand. 160 p.
- Parkpoin, P., W. Thongra-ar, R.D. DeLaune and A. Jugsujinda. 2001. Adsorption and Desorption of Mercury by Bangpakong River Sediments as Influenced by Salinities. *J. Environ. Sci. Health, A.* 36(5): 623-640.
- Randlesome, J.E. and Aston, S.R. 1980. A rapid method for the determination of mercury in sediments, suspended solids and soils. *Environ. Technol. Lett.* 1: 3-8.
- Riley, J.P., and Chester, R., 1971. *Introduction to Marine Chemistry*. London: Academic Press.
- Ross, G.J. and Wang, C. 1993. Extractable Al, Fe, Mn, and Si. In: Carter, M.R. (ed.). *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. Boca Raton: Lewis Publishers. p. 239-241.
- Sarkar, D., Essington, M.E. and Misra, K.C. 1999. Adsorption of mercury (II) by variable charge surfaces of quartz and gibbsite. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1626-1636.

- Schuster, E. 1991. The behavior of mercury in the soil with special emphasis on complexation and adsorption processes - a review of the literature. *Water Air Soil Pollut.* 56: 667-680.
- Semu, E., Singh, B.R. and Selmer-Olsen, A.R. 1986. Adsorption of mercury compounds by tropical soils. I. Adsorption in soil profiles in relation to their physical, chemical, and mineralogical properties. *Water Air Soil Pollut.* 27: 19-27.
- Sheldrick, B.H. and Wang, C. 1993. Particle size distribution. In: Carter, M.R. (ed.). *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. Boca Raton: Lewis Publishers. p. 499-511.
- Skylberg, U., Xia, K., Bloom, P.R., Nater, E.A. and Bleam, W.F. 2000. Binding of mercury(II) to reduced sulfur in soil organic matter along upland-peat soil transects. *J. Environ. Qual.* 29: 855-865.
- Sparks, D.L. 1995. *Environmental Soil Chemistry*. San Diego: Academic Press.
- Spry, D.J. and Wiener, J.G. 1991. Metal bioavailability and toxicity to fish in low-alkalinity lakes: a critical review. *Environ. Pollut.* 71: 243-304.
- Taylor, S.R. 1964. The abundance of chemical elements in the continental crust- a new table. *Geochim Cosmochim Acta.* 28: 1273-1285.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C., and Bisson, M. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal. Chem.* 51:844-851.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C., Auclair, J.C., and Bisson, M. 1984. Relationships between the Partitioning of Trace Metals in Sediments and Their Accumulation in the Tissues of the Freshwater Mollusc *Elliptio complanata* in a Mining Area. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 41: 1463-1472.
- Thongra-ar, W. 2001. Fate of Mercury in Sediments of the Bangpakong River Estuary and Its Toxicity as Influenced by Salinity. D.Tech.Sc.Thesis, Asian Institute of Technology. 190 p.
- Turekian, K.K. and Wedepohl, K.H. 1961. Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 72: 175-192.
- Waldichuk, M. 1985. Biological availability of metals to marine organisms. *Mar. Pollut. Bull.* 16: 7-11.
- Wallschläger, D., Desai, M.V.M., Spengler, M., WindmÖller, C.C. and Wilken, R. 1998. How humic substances dominate mercury geochemistry in contaminated floodplain soils and sediments. *J. Environ. Qual.* 27: 1044-1054.

- Wang, J.S., Huang, P.M. , Liaw, W.K. and Hammer, U.T. 1991. Kinetics of the desorption of mercury from selected freshwater sediments as influenced by chloride. *Water Air Soil Pollut.* 56: 533-542.
- Yin, Y., Allen, H.E., Li, Y., Huang, C.P. and Sanders, P.F. 1996. Adsorption of mercury(II) by soil: Effects of pH, chloride, and organic matter. *J. Environ. Qual.* 25: 837-844.
- Yin, Y., Allen, H.E., Huang, C.P. and Sanders, P.F. 1997a. Adsorption/desorption isotherms of Hg (II) by soil. *Soil Sci.* 162: 35-45.
- Yin, Y., Allen, H.E., Huang, C.P., Spark, D.L., Sanders, P.F. 1997b. Kinetics of mercury (II) adsorption and desorption on soil. *Environ. Sci. Technol.* 31: 496-503.