



## รายงานการวิจัย

การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสารปรอทในดินตะกอนและน้ำ  
บริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด  
(ปีที่ 1)

แหวตา ทองระอา  
ฉลวย มุสิกะ  
วันชัย วงสุดาวรรณ  
อาวุธ หมั่นหาผล

DA 085126  
22 มี.ค. 2552  
248938

เริ่มบริการ  
23 มี.ค. 2552

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2546

สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา

พ.ศ. 2547

# การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสารปรอทในดินตะกอนและน้ำ บริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด

โดย

แหวตา	ทองระอา
ฉนวน	มุสิกะ
วันชัย	วงสุดาวรรณ
อาวฐ	หมั่นหาผล

## บทคัดย่อ

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสารปรอทในดินตะกอนและน้ำบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดในปีแรกมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการแพร่กระจายของสารปรอทในน้ำทะเลบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ศึกษาการแพร่กระจายของสารปรอทในดินตะกอน และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทรวมและคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของดินตะกอน รวมทั้งศึกษารูปแบบทางเคมีของสารปรอทในดินตะกอน และปริมาณปรอทที่อยู่ในรูปแบบที่เข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ (bioavailable form)

ผลการศึกษาปริมาณปรอทรวมในน้ำทะเล พบว่ามีค่าน้อยมากทั้งในฤดูแล้งและฤดูฝน และต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำชายฝั่งทะเลของไทยหลายเท่า กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยที่พบในฤดูแล้งและฤดูฝนอยู่ระหว่าง  $< 2 - 5.50$  และ  $< 2 - 11.70$  แนนโนกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สำหรับปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนในฤดูแล้ง พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง  $0.006-0.130$  ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง และฤดูฝนมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง  $< 0.0023 - 0.224$  ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ทั้งนี้ปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนที่ตรวจพบดังกล่าวมีค่าสูงกว่ามาตรฐานของสารปรอทในดินตะกอนของบางประเทศ ปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนที่พบมีความสัมพันธ์ทางบวกค่อนข้างสูงมากกับออกไซด์ของเหล็ก ดินเหนียว สารอินทรีย์ และออกไซด์ของแมงกานีส โดยออกไซด์ของเหล็กเป็นองค์ประกอบในดินตะกอนที่มีบทบาทสำคัญมากในการดูดซับสารปรอทมากกว่าองค์ประกอบอื่น และจากการศึกษาปริมาณปรอทที่อยู่ในรูปแบบที่เข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้พบว่ามีค่าน้อยไม่เกิน 22 % ของปริมาณปรอทรวม โดยสอดคล้องกับผลศึกษารูปแบบทางเคมีของสารปรอทในดินตะกอน ซึ่งพบว่าสารปรอทมีอยู่ 2 รูปแบบที่สำคัญ คือ รูปที่จับรวมตัวกับสารอินทรีย์และซัลไฟด์ และรูปแบบที่อยู่ในโครงสร้างของแร่ธาตุในดิน ซึ่งเป็นรูปแบบที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องนี้เป็นโครงการวิจัยต่อเนื่องระยะเวลา 2 ปี เริ่มตั้งแต่ปี 2546-2547 สำหรับรายงานฉบับนี้เป็นการเสนอผลการวิจัยในปีที่ 1 ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดินหมวดเงินอุดหนุน มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ 2546 คณะผู้ทำการวิจัยใคร่ขอขอบคุณเป็นอย่างมากไว้ ณ โอกาสนี้ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเลทุกท่านที่มีส่วนทำให้งานวิจัยเรื่องนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
บทนำ	1
อุปกรณ์และวิธีการ	3
ผลและวิจารณ์ผล	10
เอกสารอ้างอิง	27

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตำแหน่งสถานีเก็บตัวอย่างน้ำทะเลและดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรม มาบตาพุดและบริเวณใกล้เคียง จังหวัดระยอง	4
2	% Recovery ของการวิเคราะห์ปริมาณปรอทในน้ำทะเล	7
3	ผลการวิเคราะห์ดินตะกอนทะเลมาตรฐาน (MESS-3)	7
4	การสกัดหารูปแบบทางเคมีของสารปรอทในดินตะกอน โดยวิธี sequential extraction	8
5	Sequential extraction ของดินตะกอนทะเลมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น (MESS-3)	9
6	คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของดินตะกอนที่ทำการวิเคราะห์และวิธีวิเคราะห์	10
7	คุณภาพน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเล นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ในฤดูน้ำแล้ง (31 มีนาคม 2546)	11
8	คุณภาพน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเล นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ในฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546)	12
9	คุณสมบัติดินตะกอนบริเวณชายฝั่งทะเล นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัด ระยอง ในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546)	14
10	คุณสมบัติดินตะกอนบริเวณชายฝั่งทะเล นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัด ระยอง ในฤดูน้ำมาก (2 ตุลาคม 2546)	15
11	ปริมาณปรอทรวมในน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเล นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546) และฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546) (หน่วยเป็น $\text{ng L}^{-1}$ )	16
12	คุณภาพน้ำทิ้งจากบริเวณโดยรอบนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดและบริเวณ ใกล้เคียง ในฤดูแล้ง (12 พฤษภาคม 2546) และฤดูฝน (30 กันยายน 2546)	17
13	ปริมาณปรอทในดินตะกอนบริเวณชายฝั่งทะเล นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ใน ฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546) และฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546) (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน) ( $n = 6$ )	19
14	เกณฑ์มาตรฐานของสารปรอทในน้ำทะเลและดินตะกอน	20

ตารางที่		หน้า
15	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทในดินตะกอนและคุณสมบัติของดินตะกอนในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546) (n = 48 ยกเว้น CEC = 24)	23
16	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทในดินตะกอนและคุณสมบัติของดินตะกอนในฤดูน้ำมาก (2 ตุลาคม 2546) (n = 48 ยกเว้น CEC = 24)	24

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	สถานีเก็บตัวอย่างน้ำทะเลและดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด และบริเวณใกล้เคียง จังหวัดระยอง	5
2	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทในน้ำที่กักเก็บสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำในรูปของ Humic acid ซึ่งพบในฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546)	18
3	ปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546) และฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546) (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน, n =6)	21
4	รูปแบบทางเคมีของสารปรอทในดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง (ก) ฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546) (ข) ฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546)	26

# การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสารปรอทในดินตะกอนและน้ำ

## บริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด

### บทนำ

ปรอทเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่มีความเป็นพิษสูงสุดต่อสิ่งมีชีวิต เนื่องจากมีความคงตัวสูงในสภาพแวดล้อม มีความเป็นพิษสูงถึงแม้ว่าในระดับความเข้มข้นต่ำๆ สามารถสะสมและเพิ่มขยายทางชีวภาพ (biomagnification) ในห่วงโซ่อาหาร สารปรอทที่สะสมในห่วงโซ่อาหารสามารถทำให้เกิดอันตรายร้ายแรงต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ได้จากการบริโภคอาหารทะเลที่มีการปนเปื้อนสารปรอท ดังจะเห็นได้จากมหันตภัยร้ายแรงของโรคมินามาตะที่เกิดในประเทศญี่ปุ่น เป็นต้น

ปรอทสามารถเข้าสู่แหล่งน้ำได้ทั้งจากขบวนการธรรมชาติ และจากกิจกรรมของมนุษย์ และเกิดได้ในหลายรูปแบบ (chemical forms) ขบวนการอันซับซ้อนทางด้านฟิสิกส์ เคมี และชีววิทยา ส่งผลสุดท้ายให้สารปรอทส่วนใหญ่เข้าไปสะสมอยู่ในดินตะกอน อย่างไรก็ตาม สารปรอทในดินตะกอนสามารถถูกปลดปล่อยกลับสู่แหล่งน้ำได้อีก โดยขบวนการต่างๆ สารปรอทที่ถูกปลดปล่อยออกจากดินตะกอนสามารถทำอันตรายต่อสัตว์น้ำ และสะสมได้ในห่วงโซ่อาหาร ดังนั้น ดินตะกอนจึงเปรียบเสมือนเป็นทั้งแหล่งเก็บ (sink) และแหล่งปล่อย (source) ของสารปรอทในแหล่งน้ำ ด้วยเหตุนี้ พฤติกรรมและการเปลี่ยนแปลงของสารปรอทในดินตะกอนจึงได้รับความสนใจในการศึกษาเพิ่มมากขึ้นในช่วงปีที่ผ่านมา

ประเทศไทยได้ประสบปัญหาการเพิ่มขึ้นของสารปรอทในบริเวณชายฝั่งทะเลอันเนื่องมาจากการพัฒนาอุตสาหกรรม และการขุดเจาะก๊าซธรรมชาติในอ่าวไทย (Chongprasith and Wilairatanadil, 1999) นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง เป็นที่ตั้งของอุตสาหกรรมหนักที่สำคัญบริเวณชายฝั่งทะเลภาคตะวันออกอันได้แก่ โรงงานแยกก๊าซธรรมชาติ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมปุ๋ยเคมี อุตสาหกรรมโรงกลั่นน้ำมัน เป็นต้น และเป็นพื้นที่หนึ่งที่ตรวจพบว่ามีสารปรอทสูงเกินกว่ามาตรฐานที่กำหนดในบางสถานีและบางปี ทั้งนี้ได้มีรายงานการตรวจพบสารปรอทในน้ำทะเลบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ในระหว่างปี 2538-2541 มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.01 - 0.48  $\mu\text{g/L}$  ซึ่งสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานของปรอทในน้ำทะเลชายฝั่งของประเทศไทยที่กำหนดไว้ให้มีค่าไม่เกิน 0.1  $\mu\text{g/L}$  โดยปริมาณสารปรอทที่ตรวจพบสูงอยู่ในระหว่างปี 2538 - 2539 (Chongprasith and Wilairatanadilok, 1999) นอกจากนี้ยังตรวจพบปริมาณสารปรอทค่อนข้างสูงในดินตะกอน บริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดอีกด้วย (Chongprasith and Wilairatanadilok, 1999; EVS Environment Consultants, 1999) ปริมาณสารปรอทที่ตรวจพบสูงทั้งในน้ำทะเลและดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด เป็นข้อเตือนใจให้หน่วยงานของรัฐที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะกรมควบคุมมลพิษ



ได้ตระหนักถึงปัญหาการปนเปื้อนของสารปรอท ในบริเวณนิคมอุตสาหกรรม และกำหนดไว้เป็น ปัญหาในระดับชาติที่จะต้องดำเนินการป้องกัน และแก้ไข รวมถึงตลอดถึงการติดตามตรวจสอบการ ปนเปื้อนของสารปรอทในน้ำ ดินตะกอน ตลอดจนสิ่งมีชีวิตอย่างสม่ำเสมอ

อย่างไรก็ตามข้อมูลของปริมาณปรอททั้งในน้ำ และดินตะกอน ในอดีต และปัจจุบัน พบว่าส่วนใหญ่ รายงานไว้ในรูปของปริมาณปรอทรวม (total Hg) ซึ่งจะไม่ค่อยมีประโยชน์มากนักในแง่ของการ ประเมินผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากปริมาณปรอทรวม ไม่ใช่เป็นปริมาณปรอทที่สิ่งมีชีวิต สามารถรับเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งหมด สารปรอทบางรูปเท่านั้นที่สามารถเข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้ หรือ เรียกว่า "bioavailable form" ซึ่งจะสามารถบ่งบอกได้ถึงระดับความเป็นพิษ (toxicity) หากรับเข้าสู่ ร่างกายมากเกินไป ดังนั้นข้อมูลของปริมาณปรอทรวมแต่เพียงอย่างเดียว ไม่สามารถบ่งชี้ถึง bioavailability และความเป็นพิษ ที่มีต่อสิ่งมีชีวิตใดๆ ได้เลย เนื่องจากทั้ง bioavailability และความเป็น พิษของปรอท หรือโลหะชนิดอื่นๆ ขึ้นอยู่กับรูปแบบทางเคมี (chemical speciation) ของโลหะชนิด นั้นๆ (Luoma, 1983; Bryan and Langston, 1992) สำหรับในน้ำทะเลนั้น ปรอทในรูปละลาย (dissolved Hg) จัดว่าเป็น bioavailable form ส่วนในดินตะกอนนั้น ปรอทในรูปของที่ละลายออกจากดินตะกอนได้ ง่าย (more soluble fractions) เท่านั้น จึงจะจัดว่าเป็น bioavailable form ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้อง ตรวจสอบปรอทในรูปของ bioavailable form ทั้งในน้ำทะเล และดินตะกอน ในบริเวณนิคมอุตสาหกรรม มาบตาพุด

โดยทั่วไปแล้ว ปริมาณโลหะหนักในน้ำทะเล ยังถูกควบคุมโดยขบวนการที่สำคัญ ได้แก่ การ ดูดซับ (adsorption) และการปลดปล่อย (desorption) ทั้งสองขบวนการดังกล่าวมีบทบาทที่สำคัญมากต่อ การแพร่กระจาย และการเคลื่อนย้ายกลับไปกลับมา (remobilization) ของปรอทในน้ำ และดินตะกอน ซึ่งทั้งสองขบวนการยังมีอิทธิพลของปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ มาเกี่ยวข้องด้วย เช่น การเปลี่ยนแปลงความ เกล็ม ความเป็นกรดเป็นด่าง การมีออกซิเจน หรือไร้ออกซิเจน (redox potential; Eh) ปริมาณสารอินทรีย์ และ chelating agents บางชนิด เป็นต้น

ความรู้ ความเข้าใจในเรื่องดังกล่าวข้างต้น จะช่วยทำให้เราเข้าใจดียิ่งขึ้น ถึงการนำพา (transport) การเปลี่ยนแปลงรูปแบบ (transformation) และ เส้นทางการเดิน (fate) ของสารปรอท หลังจาก ถูกปล่อยออกมาจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่ทะเล รวมถึง bioavailability และความเป็นพิษ ของสารปรอทที่อาจมีต่อสัตว์น้ำ หรือสิ่งมีชีวิตอื่นในบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ซึ่งข้อมูล ดังกล่าวมีอยู่จำกัด หรือน้อยมากในประเทศไทย โดยเฉพาะในบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดซึ่ง เป็นพื้นที่หนึ่งที่มีปัญหาการปนเปื้อนของสารปรอทยังไม่มีปรากฏในรายงานการศึกษามาก่อน

### วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของโครงการโดยทั่วไป เพื่อให้เกิดความรู้ ความเข้าใจ ที่ดีขึ้นเกี่ยวกับพฤติกรรม และการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสารปรอท เมื่อเข้าสู่ น้ำ และดินตะกอน ในบริเวณนิคมอุตสาหกรรม

มาบตาพุด ปริมาณปรอทในน้ำ และดินตะกอนที่สามารถเข้าสู่ร่างกายสัตว์น้ำได้ (bioavailable form) ปรากฏการณ์การดูดซับ (adsorption) และการปลดปล่อย (desorption) ของสารปรอทที่เกิดขึ้นในดินตะกอน และปัจจัยแวดล้อมที่มีอิทธิพล ตลอดจนปริมาณปรอทที่สะสมอยู่ในสัตว์ทะเล สำหรับวัตถุประสงค์จำเพาะสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. ศึกษาการแพร่กระจายของสารปรอท ในน้ำทะเลบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด
2. ศึกษาการแพร่กระจายของสารปรอทในดินตะกอน และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทรวม และคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี ของดินตะกอน
3. ศึกษารูปแบบทางธรณีเคมี (geochemical forms) ของสารปรอทในดินตะกอน และประเมินค่า bioavailable form ของสารปรอทในดินตะกอน
4. ศึกษาขบวนการดูดซับ (adsorption) และการปลดปล่อย (desorption) ของสารปรอท และประเมินค่าความจุ (capacity) ของดินตะกอนที่จะสามารถดูดซับ และปลดปล่อยสารปรอทออกมาสู่แหล่งน้ำ ตลอดจนความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี ของดินตะกอนที่มีต่อขบวนการทั้งสอง
5. ศึกษาอิทธิพลของความเค็ม ที่มีต่อขบวนการดูดซับ และการปลดปล่อยสารปรอท เนื่องจากความเค็มมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบทางเคมีของปรอท (Hg species) จากขบวนการ chloride complexation ซึ่งจะส่งผลต่อการดูดซับสารปรอทเข้าสู่ดินตะกอน
6. ศึกษาปริมาณการสะสมของสารปรอทในสัตว์ทะเลที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจบริเวณดังกล่าว และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทกับขนาดหรือน้ำหนักของสัตว์ทะเล

เนื่องจากโครงการวิจัยดังกล่าวเป็น โครงการต่อเนื่อง 2 ปี (ปีงบประมาณ 2546-2547) โดยวัตถุประสงค์ของการวิจัยในปีงบประมาณ 2546 ครอบคลุมวัตถุประสงค์ในข้อ 1-3 และวัตถุประสงค์ของการวิจัยในปีงบประมาณ 2547 ครอบคลุมวัตถุประสงค์ในข้อ 4-6 ดังนั้นรายงานฉบับนี้จึงรายงานเฉพาะผลการวิจัยในปีแรกเท่านั้น

## อุปกรณ์และวิธีการ

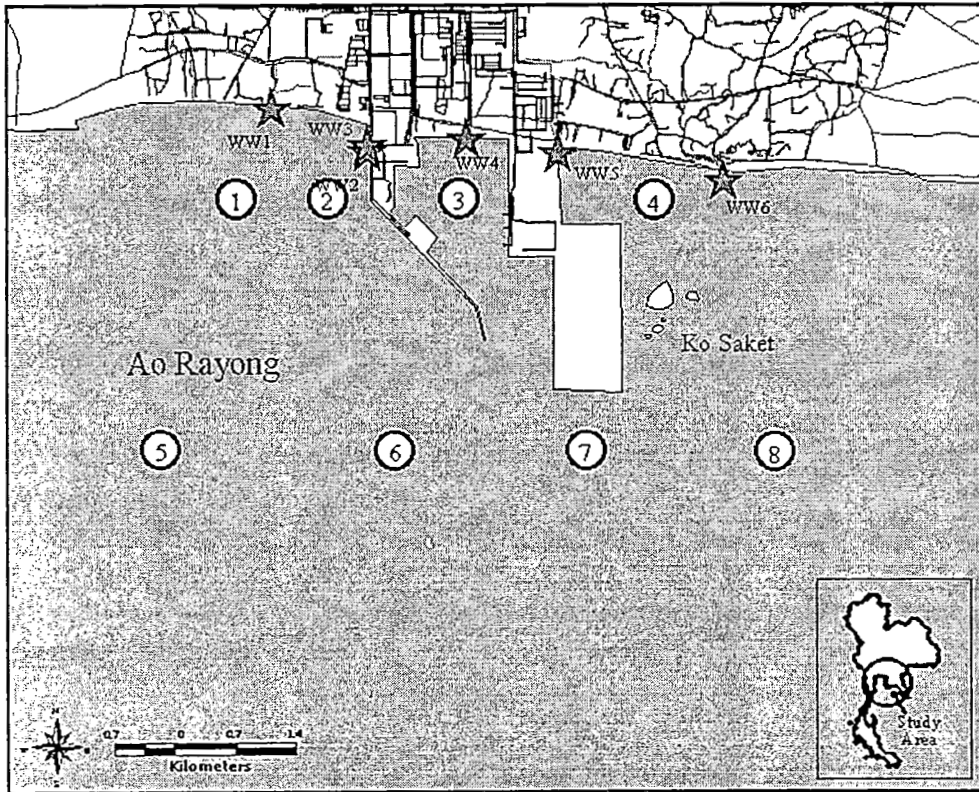
### 1. การสำรวจพื้นที่ และกำหนดสถานีเก็บตัวอย่าง

ทำการสำรวจพื้นที่โดยประสานงานกับสำนักงานนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง เพื่อกำหนดสถานีเก็บตัวอย่างในบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ให้ครอบคลุมพื้นที่ของการนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด และพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลจากน้ำทิ้งของนิคมอุตสาหกรรมผาแดงและนิคมอุตสาหกรรมตะวันออก ทั้งนี้ได้แบ่งจุดเก็บตัวอย่างออกเป็น 2 แนวคือ ระยะใกล้ฝั่ง 500-1000 เมตร (สถานี 1-4) และระยะไกลฝั่งไม่เกิน 5 กิโลเมตร (สถานี 5-8) เพื่อดูการแพร่กระจาย โดยมีจุดเก็บ

ตัวอย่างทั้งหมด 8 สถานี นอกจากนี้ได้กำหนดสถานีเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งบนฝั่งเพิ่มอีก 6 สถานีด้วย (WW1 – WW6) รายละเอียดสถานีเก็บตัวอย่างแสดงในตารางที่ 1 และภาพที่ 1

ตารางที่ 1 ตำแหน่งสถานีเก็บตัวอย่างน้ำทะเลและดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดและบริเวณใกล้เคียง จังหวัดระยอง

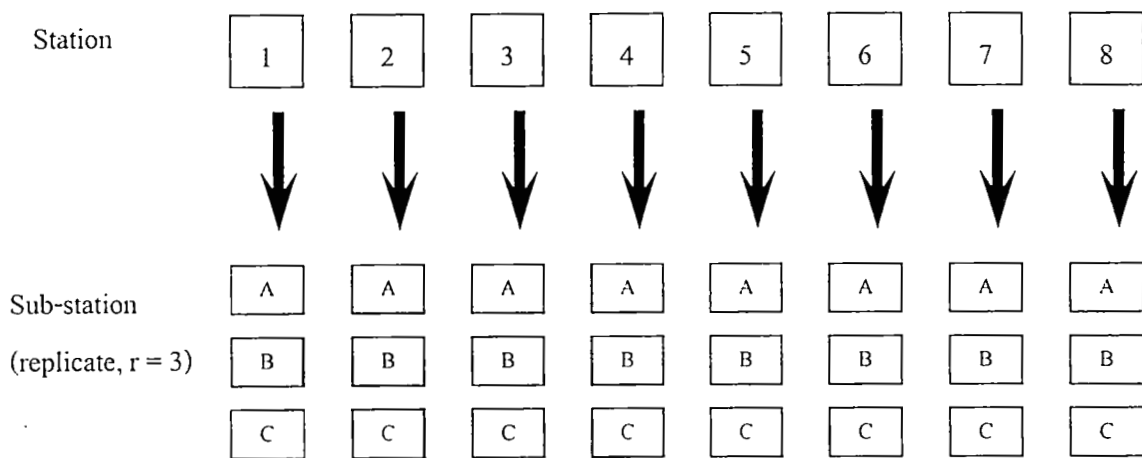
Station No.	Latitude	Longitude	Remark
1	N 12° 39' 57.8"	E 101° 07' 13.9"	
2	N 12° 39' 29.9"	E 101° 08' 04.2"	
3	N 12° 39' 39.4"	E 101° 08' 49.3"	
4	N 12° 39' 21.3"	E 101° 10' 36.7"	
5	N 12° 37' 30.8"	E 101° 06' 25.2"	
6	N 12° 37' 38.6"	E 101° 07' 41.9"	
7	N 12° 37' 38.8"	E 101° 09' 55.8"	
8	N 12° 37'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



ภาพที่ 1 สถานีเก็บตัวอย่างน้ำทะเลและดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด และบริเวณใกล้เคียง จังหวัดระยอง

## 2. ระยะเวลาและวิธีการเก็บตัวอย่างน้ำทะเล และดินตะกอน

เก็บตัวอย่างน้ำทะเลและดินตะกอน รวม 2 ครั้ง คือในฤดูน้ำน้อยหรือฤดูแล้งในวันที่ 31 มีนาคม 2546 และฤดูน้ำมากหรือฤดูฝนในวันที่ 2 ตุลาคม 2546 สำหรับตัวอย่างน้ำที่เก็บในวันที่ 12 พฤษภาคม 2546 และวันที่ 30 กันยายน 2546 เพื่อศึกษาอิทธิพลของฤดูกาลที่มีต่อการสะสมสารปรอทในน้ำและดินตะกอน ในแต่ละสถานีได้แบ่งออกเป็น 3 sub-stations โดยมีระยะห่างกันประมาณ 50 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 ตัวอย่างน้ำที่ได้จะเก็บในขวดแก้วไพเร็กซ์ที่มีฝาครอบในเป็น Teflon พร้อมทั้งเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น เพื่อให้ pH ของน้ำต่ำกว่าหรือเท่ากับ 2 ( $\text{pH} \leq 2$ ) และเก็บในถังแช่เย็น นอกจากนี้ทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำขั้นพื้นฐาน ได้แก่ อุณหภูมิ ความเค็ม ความเป็นกรด-ด่าง ความโปร่งแสง ออกซิเจนละลายน้ำ และสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำในรูปของ Fluorescence intensity unit (DOC Fluorescence) ตามวิธีของ Hayase and Tsubota (1985) ของแต่ละสถานีไว้ด้วย

สำหรับดินตะกอน เก็บโดยใช้เครื่องเก็บตัวอย่างดินแบบ Petersen grab หลังจากนั้นนำมาเก็บไว้ในตู้แช่แข็ง และทำให้แห้งโดยใช้เครื่อง Freeze dryer

## 3. การวิเคราะห์หาปริมาณปรอท (Mercury Analysis)

ปริมาณปรอทในน้ำทะเลทำการสกัดตัวอย่างโดยใช้วิธี BrCl oxidation วิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Cold Vapour Atomic Fluorescence Spectrometry (CVAFS) และวัดหาความเข้มข้นด้วยเครื่อง

Atomic Fluorescence Spectrophotometer (P.S. Analytical Ltd. รุ่น Merlin) ส่วนดินตะกอนทำการสกัดด้วยส่วนผสมของ 9:1 HNO<sub>3</sub>/HCl ตามวิธีของ Randlesome and Aston (1980) วิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Cold Vapour Atomic Absorption Spectrometry (CVAAS) และวัดหาความเข้มข้นด้วยเครื่อง Z4100 Atomic Absorption Spectrophotometer (Perkin-Elmer) ใช้ระบบ Flow Injection Mercury Hydried System (FI-MHS) ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 2 ซ้ำ

ความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ สำหรับตัวอย่างน้ำทะเลตรวจสอบโดยการหาค่า % recovery หลังจากที่ได้มีสารละลายมาตรฐานของปรอทที่ทราบความเข้มข้นลงในตัวอย่างน้ำทะเล พบว่า % recovery มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 88.44-102.49 % (ตารางที่ 2) ส่วนตัวอย่างดินตะกอนตรวจสอบกับดินตะกอนทะเลมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น (Marine Sediment Reference Material; MESS-3) จาก National Research Council Canada นอกจากนี้ตรวจสอบความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ (precision) โดยคำนวณหาค่า % RSD (Relative Standard Deviation) ดังแสดงในตารางที่ 3

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

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	9.25

#### 4. การศึกษารูปแบบทางเคมีของสารปรอทในดินตะกอน (Fractionation of Mercury in Sediments)

รูปแบบทางเคมีของสารปรอทในดินตะกอนทำการศึกษาโดยใช้เทคนิค 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

นำดินตะกอนของแต่ละสถานีที่ทำให้แห้งแล้ว มาทำการสกัดอย่างต่อเนื่องตามลำดับ ตามวิธีที่ได้อธิบายไว้ใน Tessier et al (1979) ดังแสดงในตารางที่ 4 ทำการทดลองตัวอย่างละ 2 ซ้ำ ข้อมูลที่ได้จะบอกลักษณะของรูปแบบทางเคมีของสารปรอทในดินตะกอน นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการทำนายหรือประเมินค่า bioavailability และการเคลื่อนที่ (mobility) ของสารปรอทในดินตะกอนอีกด้วย

ตารางที่ 4 การสกัดหารูปแบบทางเคมีของสารปรอทในดินตะกอน โดยวิธี sequential extraction

Fraction	Extracted Component	Extractant	Process
F1	Exchangeable	8 mL of 1 M MgCl <sub>2</sub> , 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 NH <sub>2</sub> OH. HCl in 25% (V/V) HOAc	96 ±3°C for 6 h. Occasional shaking
F4	Bound to Organic Matter and Sulfide	(a) 3 mL of 0.02 M HNO <sub>3</sub> + 5 mL of 30% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (pH 2.0 with HNO <sub>3</sub> ) (b) 3 mL of 30% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (pH 2.0 with HNO <sub>3</sub> ) (c) 5 mL of 3.2 M NH <sub>4</sub> OAc in 20% (V/V) HNO <sub>3</sub> And dilute to 20 mL	(a) Heat to 85±2° for 2 h with occasional shaking (b) Heat to 85±2° for 3 h with intermittent shaking, then cool (c) shake for 30 min
F5	Residual	9:1 HNO <sub>3</sub> /HCl mixture	Same technique as for total Hg analysis in sediments

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

ตารางที่ 5 Sequential extraction ของดินตะกอนทะเลมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น (MESS-3)

Fraction	MESS-3 ( $\mu\text{g g}^{-1}$ dry weight)				Mean $\pm$ SD
	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 $\pm$ 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 $\pm$ 8.63

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

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

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

#### 6. การวิเคราะห์คุณสมบัติของดินตะกอน (Sediment Characterization)

วิเคราะห์คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของดินตะกอน ตัวอย่างละ 2 ซ้ำ เพื่อใช้ในการหาความสัมพันธ์กับปริมาณปรอทที่สะสมอยู่ในดินตะกอน โดยการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficient, r) ด้วยโปรแกรม SPSS 10.0 คุณสมบัติของดินตะกอนที่ทำกรวิเคราะห์และวิธีวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 6



## ตารางที่ 6 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของดินตะกอนที่ทำการวิเคราะห์และวิธีวิเคราะห์

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 คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

### ผลและวิจารณ์ผล

ผลการศึกษา พบว่า คุณภาพน้ำทะเลพื้นฐานโดยทั่วไปทั้ง 2 ฤดู มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ดังแสดงในตารางที่ 7 และ 8

ตารางที่ 7 คุณภาพน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเล นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ในฤดูแล้ง  
(31 มีนาคม 2546)

Station	Depth (m)	Transparency (m)		Temp. (° C)	Salinity (psu)	pH	DO (mg L <sup>-1</sup> )	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 8 คุณภาพน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเล นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ในฤดูฝน  
(2 ตุลาคม 2546)

Station	Depth (m)	Transparency (m)		Temp. (° C)	Salinity (psu)	pH	DO (mg L <sup>-1</sup> )	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

สำหรับลักษณะของดินตะกอนพื้นที่ท้องทะเลที่สำรวจพบในฤดูแล้งโดยส่วนใหญ่เป็นดินทราย และดินร่วนปนทราย มีเนื้อดินเหนียวค่อนข้างต่ำอยู่ระหว่าง 2.7 - 20.6 % ปริมาณสารอินทรีย์ในดิน ตะกอนพบค่อนข้างน้อย คืออยู่ในช่วง 0.38-2.43 % มีค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 7.9 - 8.3 ปริมาณ แคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ในช่วง 0.83-17.46 % และค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินหรือ CEC อยู่ระหว่าง 0.87 - 15.27 centimoles per kilogram ( $\text{cmol kg}^{-1}$ ) (ตารางที่ 9) ส่วนในฤดูฝนลักษณะ ของดินตะกอนเป็นดินทรายและเลนปนทราย มีเนื้อดินเหนียวค่อนข้างต่ำเช่นกันอยู่ระหว่าง 1.9 - 42.5 % ปริมาณสารอินทรีย์อยู่ระหว่าง 0.24-2.05 % ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินตะกอนอยู่ระหว่าง 8.0-8.9 ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ในช่วง 1.20-13.81 % และค่า CEC อยู่ระหว่าง 1.13 - 12.77  $\text{cmol kg}^{-1}$  (ตารางที่ 10)

จากคุณลักษณะของดินตะกอนดังกล่าว เมื่อแบ่งตามประเภทดิน (soil classes) ของ US.EPA (Boulding, 1994) จัดว่า ดินตะกอนพื้นที่ท้องทะเลบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดเป็นดินที่มี สารอินทรีย์ต่ำ (low, สารอินทรีย์ 0.5-1.0 %) ถึงต่ำปานกลาง (moderately low, สารอินทรีย์ 1.0-2.0 %) ดินตะกอนมีคุณสมบัติเป็นด่างในระดับปานกลาง (moderately alkaline, pH 7.9-8.4) ถึงด่างสูง (strongly alkaline, pH 8.5-9.0) และมีค่า CEC อยู่ในระดับต่ำ ( $< 12 \text{ cmol kg}^{-1}$ ) ยกเว้นสถานีที่ 3 ซึ่งอยู่บริเวณตอน ในของนิคมมีค่า CEC อยู่ในระดับปานกลาง ( $12 - 20 \text{ cmol kg}^{-1}$ ) ทั้งนี้เนื่องจากดินตะกอนมีสารอินทรีย์ น้อย จึงทำให้มีค่า CEC น้อยตามไปด้วย เพราะสารอินทรีย์เป็นต้นกำเนิดของค่า CEC ในดิน (Sparks, 1995) จากลักษณะที่สำคัญโดยเฉพาะปริมาณสารอินทรีย์ เนื้อดินเหนียว และค่า CEC จึงคาดได้ว่าดิน ตะกอนบริเวณนี้มีความสามารถในการดูดซับสารปรอทรวมทั้งโลหะอื่นได้น้อย

ตารางที่ 9 คุณสมบัติดินตะกอนบริเวณชายฝั่งทะเล นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546)

Station	pH	CaCO <sub>3</sub> Equivalent (%)	Organic Matter (%)	CEC (cmol kg <sup>-1</sup> )	Total (Free) Oxides (mg g <sup>-1</sup> )		Amorphous Oxides (mg g <sup>-1</sup> )		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

\* สถานีจุดบ่อน้ำทิ้ง

ตารางที่ 10 คุณสมบัติดินตะกอนบริเวณชายฝั่งทะเล นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ในฤดูน้ำมาก (2 ตุลาคม 2546)

Station	pH	CaCO <sub>3</sub> Equivalent (%)	Organic Matter (%)	CEC (cmol kg <sup>-1</sup> )	Total (Free) Oxides (mg g <sup>-1</sup> )		Amorphous Oxides (mg g <sup>-1</sup> )		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

\* สถานีจุดปล่อยน้ำทิ้ง

ผลการศึกษาปริมาณปรอทรวมในน้ำทะเล พบว่ามีค่าน้อยมากทั้ง 2 ฤดู (ตารางที่ 11) ซึ่งค่าที่ตรวจพบต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำชายฝั่งทะเลของไทยหลายเท่า (ค่ามาตรฐานสารปรอทในน้ำทะเลของไทยกำหนดไว้ให้มีค่าไม่เกิน 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร) ส่วนปริมาณปรอทในน้ำทิ้ง พบว่า มีค่าสูงกว่าในน้ำทะเลทั้ง 2 ฤดูและในฤดูฝนพบสูงกว่าฤดูแล้ง (ตารางที่ 12)

ตารางที่ 11 ปริมาณปรอทรวมในน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเล นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546) และฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546) (หน่วยเป็น  $\text{ng L}^{-1}$ )

Station	Dry Season (March 2003)			Wet Season (October 2003)		
	Surface (n = 6)	Bottom (n = 6)	Mean $\pm$ SE (n = 12)	Surface (n = 6-9)	Bottom (n = 6-9)	Mean $\pm$ SE (n = 12-18)
1	2.00	2.17	2.08 $\pm$ 0.62	3.87	3.57	3.37 $\pm$ 0.37
2	3.83	3.00	3.42 $\pm$ 1.73	nd	2.25	nd
3	5.67	3.67	4.67 $\pm$ 0.69	nd	nd	nd
4	4.33	5.33	4.83 $\pm$ 1.44	4.28	4.78	4.42 $\pm$ 0.70
5	5.00	6.00	5.50 $\pm$ 1.22	7.73	5.84	7.60 $\pm$ 1.04
6	5.67	nd	nd	12.80	9.67	11.70 $\pm$ 0.97
7	4.17	2.67	3.42 $\pm$ 1.06	9.13	7.30	7.68 $\pm$ 1.03
8	4.00	4.33	4.17 $\pm$ 0.28	4.00	nd	nd

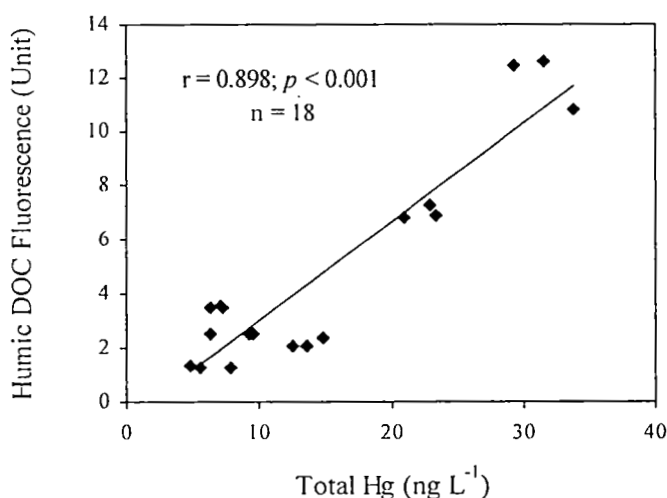
หมายเหตุ : nd = < 2  $\text{ng L}^{-1}$

ตารางที่ 12 คุณภาพน้ำทิ้งจากบริเวณโดยรอบนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดและบริเวณใกล้เคียง (12 พฤษภาคม 2546) และฤดูฝน (30 กันยายน 2546)

Station	Location	Dry Season (May 2003)				Wet Season (October 2003)			
		Salinity (psu)	pH	DOC Fluorescence (Unit) Humic Acid Fulvic Acid	Total Hg (ng L <sup>-1</sup> )	Salinity (psu)	pH	DOC Fluorescence (Unit) Humic Acid Fulvic Acid	Total Hg (ng L <sup>-1</sup> )
WW1	คลองบางมด น้ำทิ้งจากนิคมอุตสาหกรรมคนแดงและนิคมอุตสาหกรรมตะวันออกและชุมชนบางชะลุ	10	7.9	2.27	189.08	5	7.7	3.50	204.96
WW2	น้ำทิ้งจากระบบน้ำเสียส่วนกลางของนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดโดยตรง ร่วมกับน้ำจากรังระบายน้ำฝน	8	7.0	3.46	198.03	3	6.7	1.28	128.92
WW3	น้ำทิ้งจากระบบน้ำเสียส่วนกลางของนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดโดยตรง	4	6.8	2.08	689.80	2	6.9	2.17	882.53
WW4	น้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียจากกลุ่มโรงงานถนน ไอ เจ็ด ซึ่งเป็นโรงงานปุ๋ย และอะโรมาติก ร่วมกับน้ำจากรังระบายน้ำฝน (หน้าบริษัท ท่าเรือระยอง จำกัด Rayong Bulk Terminal Co, LTD.)	3	7.1	3.86	218.86	1	7.5	2.53	150.01
WWS	คลองระบายน้ำทิ้งของกรมอุตสาหกรรมและน้ำจากรังระบายน้ำฝน	20	7.7	1.85	143.34	1	7.4	6.997	167.35
WW6	ปากคลองตากวน น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชนมาบตาพุด คลองน้ำ	4	7.9	5.33	344.82	1	7.1	11.96	151.38
									22.39
									31.53



นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณปรอทรวมในน้ำทิ้งที่พบสูงในฤดูฝนนั้นมีความสัมพันธ์ค่อนข้างสูงกับปริมาณสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำโดยเฉพาะในรูปของ Humic acid ( $r = 0.898, p < 0.001$ ) กล่าวคือน้ำทิ้งที่มีสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำในรูปของ Humic acid สูงจะพบปริมาณปรอทรวมสูงด้วย ดังแสดงในภาพที่ 2 ดังนั้นสารอินทรีย์ในรูปของ Humic acid จึงมีบทบาทสำคัญในการจับกับสารปรอทได้ดีกว่า Fulvic acid



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทในน้ำทิ้งกับสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำในรูปของ Humic acid ซึ่งพบในฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546)

สำหรับปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนในฤดูแล้ง พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.006-0.130 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง และฤดูฝนมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง <math>0.0023 - 0.224</math> ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง (ตารางที่ 13) ปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนที่ตรวจพบมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับฤดูกาลและสถานี ในบริเวณสถานีใกล้ฝั่งปริมาณจะสูงกว่าสถานีไกลฝั่ง (ภาพที่ 3) โดยค่าสูงสุดทั้ง 2 ฤดูพบบริเวณตอนในของนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด (สถานีที่ 3) โดยเฉพาะจุดที่พบสูงมากอยู่บริเวณหน้าโรงงานปิโตรเคมีและในฤดูฝนพบสูงกว่าฤดูแล้ง (ภาพที่ 3) ทั้งนี้ปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนที่ตรวจพบดังกล่าวมีค่าสูงกว่ามาตรฐานของสารปรอทในดินตะกอนของบางประเทศ (ตารางที่ 14) เนื่องจากในขณะนี้ประเทศไทยยังไม่มีมาตรฐานของโลหะหนักในดินตะกอน

ตารางที่ 13 ปริมาณปรอทในดินตะกอนบริเวณชายฝั่งทะเล นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง  
 ในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546) และฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546) (ค่าเฉลี่ย  $\pm$  ความคลาดเคลื่อน  
 มาตรฐาน) (n = 6)

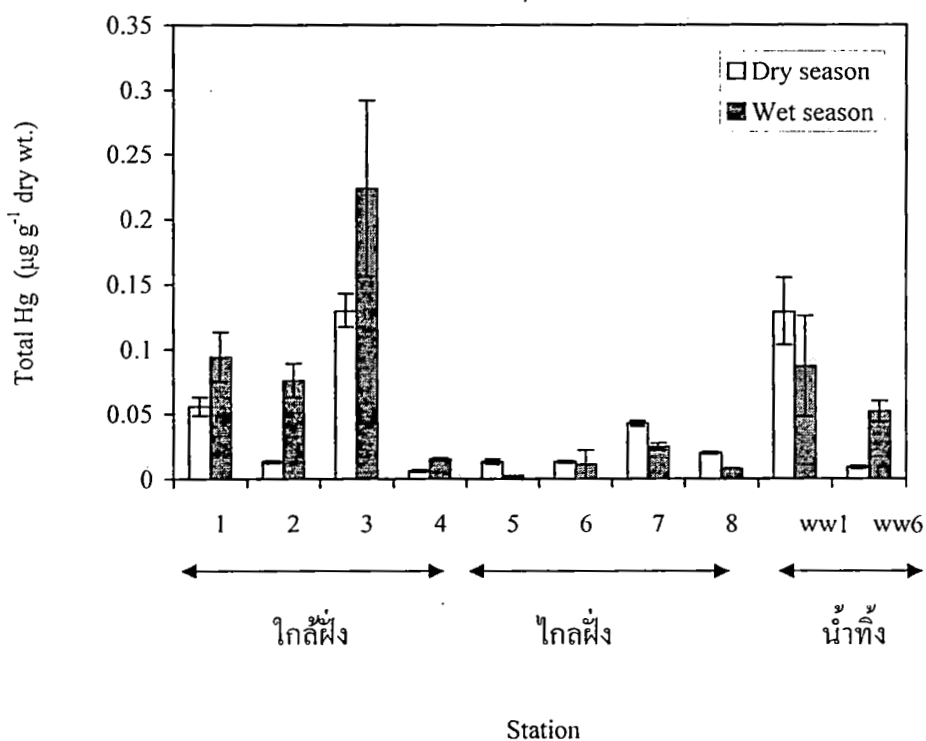
Station	Dry Season (March 2003)			Wet Season (October 2003)		
	Total Hg ( $\mu\text{g g}^{-1}$ dry wt.)	Bioavailable Hg ( $\mu\text{g g}^{-1}$ dry wt.)	% of Total Hg	Total Hg ( $\mu\text{g g}^{-1}$ dry wt.)	Bioavailable Hg ( $\mu\text{g g}^{-1}$ dry wt.)	% of Total Hg
1	0.056 $\pm$ 0.007	< 0.00025	<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

\* สถานีจุดปล่อยน้ำทิ้ง

ตารางที่ 14 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 <sup>1</sup> Sediment Quality Guidelines – Threshold Effect Level		0.13	MacDonald (1994) อ้างตาม กรมควบคุมมลพิษ (2546)
Florida DEP <sup>2</sup> Sediment Quality Guidelines – Probable Effect Level		0.7	
HongKong <sup>3</sup> Draft Sediment Quality Guidelines - Lower		0.5	HKGS (1998) อ้างตาม กรมควบคุมมลพิษ (2546)
HongKong <sup>4</sup> Draft Sediment Quality Guidelines - Higher		1	
Australia and New Zealand Draft Interim Sediment Quality Guidelines – Lower <sup>1</sup>		0.15	ANZECC (1998) อ้างตาม กรมควบคุมมลพิษ (2546)
Australia and New Zealand Draft Interim Sediment Quality Guidelines – Lower <sup>2</sup>		1	

- หมายเหตุ <sup>1</sup> = ค่าความเข้มข้นที่ไม่มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต (Threshold Effect Level, TEL)  
<sup>2</sup> = ค่าความเข้มข้นที่อาจจะมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต (Probable Effect Level, PEL)  
<sup>3</sup> = ค่าความเข้มข้นที่สามารถทำการขุดลอกตะกอนดินได้  
<sup>4</sup> = ค่าความเข้มข้นที่สามารถขุดลอกตะกอนดินได้โดยต้องผ่านการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม



ภาพที่ 3 ปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546) และฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546) (ค่าเฉลี่ย ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน, n =6)

อย่างไรก็ตาม ปริมาณปรอทรวมไม่ได้เป็นค่าบ่งบอกถึงผลกระทบที่จะมีต่อสิ่งมีชีวิตหรือ สิ่งแวดล้อมได้ เนื่องจากไม่ได้เป็นปริมาณที่สามารถเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ทั้งหมด จึงได้ทำการวิเคราะห์หา ปริมาณปรอทที่สามารถเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ (bioavailable form) และพบว่ามีความน้อยมาก โดยในฤดูแล้งมีค่า อยู่ระหว่าง  $<0.4 - 12\%$  ของปริมาณปรอทรวม และฤดูฝนมีค่าอยู่ระหว่าง  $0.2 - <22.2\%$  ของปริมาณ ปรอทรวม (ตารางที่ 13) ดังนั้นถึงแม้ตรวจพบปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนสูงบางสถานี แต่ปริมาณ ปรอทที่ตรวจพบนี้ไม่ได้อยู่ในรูปที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตหรือมีแต่น้อยมากๆ ผลการศึกษานี้สอดคล้อง กับการศึกษาของ Thongra-ar (2001) ซึ่งพบว่าปริมาณปรอทที่อยู่ในรูปแบบที่เข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ในดิน ตะกอนบริเวณแม่น้ำบางปะกงมีค่าน้อยเช่นกัน แต่น้อยกว่าดินตะกอนบริเวณมาบตาพุด กล่าวคือไม่เกิน  $10\%$  ของปริมาณปรอทรวมเท่านั้น เนื่องจากดินตะกอนบริเวณบางปะกงเป็นดินเหนียวและมีสารอินทรีย์ ค่อนข้างสูง

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทรวมในดินตะกอนและคุณสมบัติบางประการของ ดินตะกอน พบว่า ในฤดูแล้งปริมาณปรอทมีความสัมพันธ์ทางบวกค่อนข้างสูงมากกับออกไซด์ของเหล็ก รองลงมา คือ ปริมาณดินเหนียว สารอินทรีย์ และออกไซด์ของแมงกานีส ตามลำดับ (ตารางที่ 15) ส่วน ปริมาณปรอทรวมในฤดูฝนมีความสัมพันธ์ทางตรงค่อนข้างสูงกับออกไซด์ของเหล็กในรูปของ amorphous Fe oxides รองลงมาได้แก่ ปริมาณสารอินทรีย์ ดินเหนียว และออกไซด์ของแมงกานีส ตามลำดับ (ตารางที่ 16) จากความสัมพันธ์ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า ออกไซด์ของเหล็กเป็นองค์ประกอบ ในดินตะกอนบริเวณมาบตาพุดที่มีบทบาทสูงมากในการดูดซับสารปรอทมากกว่าองค์ประกอบอื่นใน ดินตะกอน 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) ในการดูดซับ โลหะหนักหรือตกตะกอนร่วม (coprecipitate) กับ cations และ anions ในสารละลาย (Alloway, 1995) นอกจากนี้ ออกไซด์ของโลหะเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงประจุได้ตามค่าของความเป็นกรด-ด่าง (pH-dependent charge) ซึ่งโดยทั่วไปจะมีประจุลบในสารละลายที่เป็นด่าง และมีประจุบวกในสารละลายที่เป็นกรด (Alloway, 1995)

ปริมาณปรอทที่พบทั้ง 2 ฤดูแล้งยังมีความสัมพันธ์ทางบวกค่อนข้างสูงมากกับค่า CEC ของดินตะกอน ด้วย (ตารางที่ 15 และ 16) จึงอาจเป็นไปได้ว่าการดูดซับของสารปรอทในดินตะกอนบริเวณนี้เกี่ยวข้องกับ ขบวนการ cation exchange (Semu et al., 1986) นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ทางลบระหว่าง ปริมาณปรอทกับค่าความเป็นกรด-ด่างของดินตะกอนอีกด้วยในทั้ง 2 ฤดู แสดงว่าปรอทในดินตะกอน จะสูงเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของดินลดต่ำลง สอดคล้องกับการศึกษาของ Yin et al. (1996) ซึ่งพบว่า ปรอทสามารถดูดซับได้ดีในดินที่มีสารละลายเป็นกรด เนื่องจากที่ความเป็นกรด-ด่างต่ำจะพบพวก positively charged Hg species มาก ทำให้สารปรอทดูดซับได้มากขึ้น

ตารางที่ 15 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทในดินตะกอนและคุณสมบัติของดินตะกอนในฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546)  
(n = 48 ยกเว้น CEC = 24)

	Total Hg	Avai. Hg	pH	CaCO <sub>3</sub>	Organic Matter	CEC	Total Fe Oxides	Amorp. Fe	Total Mn Oxides	Amorp. Mn	Clay
Total Hg	1.000										
Avai. Hg	0.157	1.000									
pH	-0.719**	0.188	1.000								
CaCO <sub>3</sub>	-0.013	-0.483**	-0.091	1.000							
Organic 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

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

๒๕๘.๑๖๘๓  
๗๔๙๗  
๓.๕

248938

ตารางที่ 16 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปรอทในดินตะกอนและคุณสมบัติของดินตะกอนในฤดูน้ำมาก (2 ตุลาคม 2546)

(n = 48 ยกเว้น CEC = 24)

	Total Hg	Avai. Hg	pH	CaCO <sub>3</sub>	Organic Matter	CEC	Total Fe Oxides	Amorp. Fe	Total Mn Oxides	Amorp. Mn	Clay
Total Hg	1.000										
Avai. Hg	-0.312*	1.000									
pH	-0.490**	0.397**	1.000								
CaCO <sub>3</sub>	-0.138	-0.576**	-0.080	1.000							
Organic 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

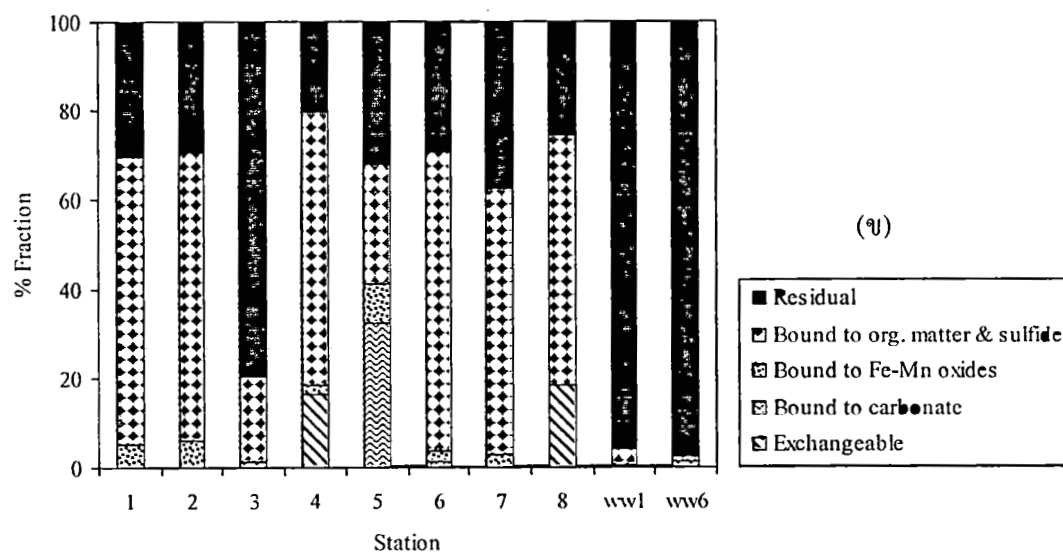
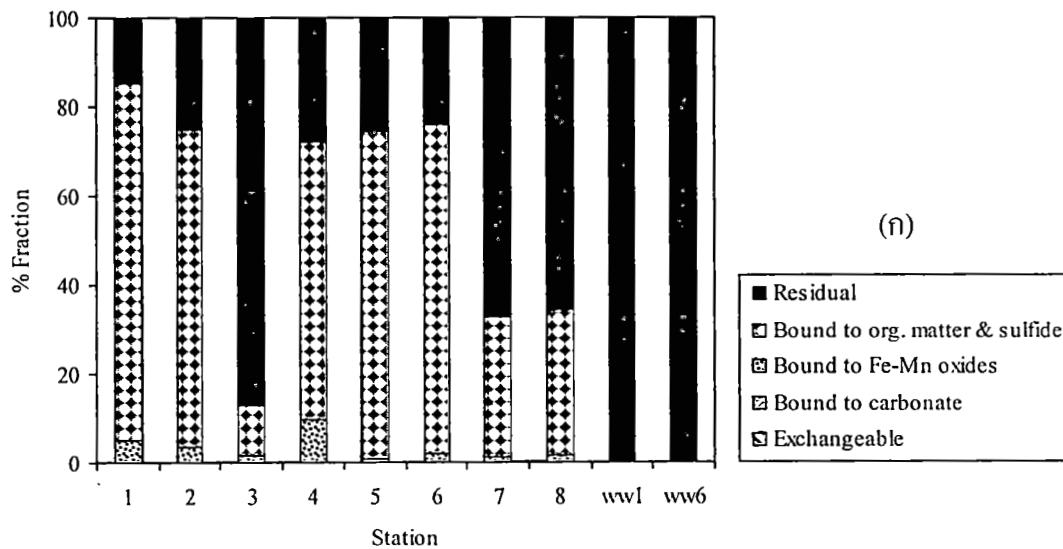
\*, \*\* : Significant at  $p = 0.05$  and  $0.01$  respectively

สำหรับการศึกษารูปแบบทางธรณีเคมี (geochemical forms) ของสารปรอทในดินตะกอนได้ทำการศึกษาโดยใช้วิธี sequential extraction เพื่อสกัดสารปรอทออกมาเป็น 5 รูปแบบ คือ exchangeable, bound to carbonate, bound to Fe and Mn oxides, bound to organic matter and sulfide และ residual โดยปกติแล้วปรอทในสามรูปแบบแรกจะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เนื่องจากสามารถที่จะถูกปลดปล่อยออกจากดินตะกอนได้ง่ายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยแวดล้อมที่อยู่โดยรอบ เช่น ความเป็นกรด-ด่าง ความเค็ม redox potential ฯลฯ (Gomez-Parra et al., 2000) ผลการศึกษาครั้งนี้พบว่าสารปรอทในดินตะกอนมีอยู่สองรูปแบบที่สำคัญ คือ รูปที่จับรวมตัวกับสารอินทรีย์และซัลไฟด์ (bound to organic matter and sulfide) และรูปแบบที่อยู่ในโครงสร้างของแร่ธาตุในดิน (residual) โดยในฤดูแล้ง พบปริมาณปรอทในรูปที่จับรวมตัวกับสารอินทรีย์และซัลไฟด์อยู่ในช่วงระหว่าง 11.3-79.8 % และในรูปที่อยู่ในโครงสร้างของแร่ธาตุในดินอยู่ในช่วงระหว่าง 14.9-67.1 % ส่วนในฤดูฝนพบปรอทในรูปที่จับรวมตัวกับสารอินทรีย์และซัลไฟด์อยู่ในช่วงระหว่าง 19.3-67.2 % และในรูปที่อยู่ในโครงสร้างของแร่ธาตุในดิน 29.1-79.4 % (ภาพที่ 4) ปริมาณปรอททั้งสองรูปแบบนี้ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ผลการศึกษาจึงสอดคล้องกับการวิเคราะห์หาปริมาณปรอทที่อยู่ในรูปแบบที่เข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ (bioavailable form) โดยสกัดตัวอย่างด้วย 0.5 N HCl ซึ่งตรวจพบว่ามีค่าน้อยมากดังแสดงในตารางที่ 13 ส่วนบริเวณสถานีที่เป็นจุดปล่อยน้ำทิ้ง (WW1 และ WW6) พบว่า ปรอทเกือบทั้งหมดอยู่ในโครงสร้างของแร่ธาตุในดิน

ดังนั้น ถึงแม้ว่าได้ตรวจพบปริมาณปรอทในดินตะกอนบริเวณมาบตาพุดสูงกว่าค่ามาตรฐานของบางประเทศในบางสถานี แต่ปริมาณปรอทที่ตรวจพบไม่ได้อยู่ในรูปที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

โดยสรุปแล้วการปนเปื้อนของสารปรอทในน้ำทะเลและดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดอยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตถึงแม้จะพบสูงในดินตะกอนบางสถานีและในบางฤดูกาลก็ตาม





ภาพที่ 4 รูปแบบทางเคมีของสารปรอทในดินตะกอนบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง (ก) ฤดูแล้ง (31 มีนาคม 2546) (ข) ฤดูฝน (2 ตุลาคม 2546)

## เอกสารอ้างอิง

- 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.
- 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.
- 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.
- EVS Environment Consultants. 1999. *Heavy Metals and Petroleum Hydrocarbon Contamination in Industrial Areas*. Final report. Prepared for Pollution Control Department. Bangkok, Thailand. 230 p.

- 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.
- 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.
- Luoma, S.N., 1983. Bioavailability of trace metals to aquatic organisms- a review. *Sci. Total Environ.* 28: 1-22.
- 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.
- Pollution Control Department. 1997. *Water Quality Criteria & Standards in Thailand*. Ministry of Science, Technology and Environment. Thailand. 160 p.
- 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.
- 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.
- Sparks, D.L. 1995. *Environmental Soil Chemistry*. San Diego: Academic Press.
- 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.

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.

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.