การสะสมและเคลื่อนย้ายโลหะหนักในป่าชายเลนชุมชนบ้านแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี

Accumulation and Transfer of Heavy Metals in the Mangrove from Ban Laemchabang Community, Chon Buri Province

แววตา ทองระอา* ฉลวย มุสิกะ วันชัย วงสุดาวรรณ และ อาวุธ หมั่นหาผล

Waewtaa Thongra-ar*, Chaluay Musika, Wanchai Wongsudawan and Arvut Munhapon

สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา

Institute of Marine Science, Burapha University

Received : 23 June 2017

Accepted : 16 September 2017

Published online : 28 September 2017

บทคัดย่อ

ป่าชายเลนมีความสำคัญในการเป็นแหล่งสะสมและกักเก็บโลหะหนัก การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสะสมโลหะหนักปรอท ตะกั่ว แคดเมียม นิเกิล สังกะสี ทองแดง และเหล็ก ในดินตะกอนป่าชายเลนชุมชนบ้านแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี และความสามารถของพืชป่าชายเลนสกุลแสม (*Avicennia)* ซึ่งประกอบด้วยแสมขาว (*A. alba)* และแสมดำ (*A. officinalis)* ในการสะสมและเคลื่อนย้ายโลหะหนักในรากและใบ ผลการศึกษา พบว่าค่าสูงสุดของโลหะหนักเกือบทุกชนิดในดินตะกอนพบบริเวณก่อนเข้าสู่ป่าชายเลน และต่ำสุดที่บริเวณออกจากป่าชายเลนไปสู่ทะเล ดินตะกอนในป่าชายเลนจึงช่วยลดการพัดพาโลหะหนักออกสู่ทะเล การสะสมโลหะหนักในดินตะกอนและเนื้อเยื่อพืชมีลำดับการสะสมที่สอดคล้องกัน คือ เหล็ก > สังกะสี > ทองแดง > ตะกั่ว > นิเกิล > แคดเมียม > ปรอท ความเข้มข้นของโลหะหนักทุกชนิดพบสูงสุดในดินตะกอน ส่วนในรากและใบไม่แตกต่างกัน พืชป่าชายเลนสกุลแสมมีความสามารถสะสมโลหะหนักได้น้อย (ค่า BCF < 1) การเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากรากไปสู่ใบพบสูงเฉพาะ ปรอท ตะกั่ว ทองแดง นิเกิล และสังกะสี (ค่า TF > 1) เนื่องจากค่า BCF ที่ต่ำมากนี้ ทำให้พืชป่าชายเลนทั้งแสมขาวและแสมดำไม่เหมาะนำมาใช้บำบัดโลหะหนักในพื้นที่ป่าชายเลนแห่งนี้ จึงควรทำการศึกษาเพิ่มเติมกับพืชป่าชายเลนชนิดอื่นต่อไป รวมทั้งศึกษารูปทางเคมีของโลหะหนักในดินตะกอนด้วย

คำสำคัญ : โลหะหนัก ป่าชายเลน ดินตะกอน พืชป่าชายเลน บ้านแหลมฉบัง

***Corresponding author. E-mail** : wta.thongraar@gmail.com

Abstract

Mangroves play an important role as natural sinks for heavy metals. This study aimed to investigate the accumulation of heavy metals (Hg, Pb, Cd, Ni, Zn, Cu and Fe) in the mangrove sediments from Ban Laemchabang Community, Chon Buri Province. The ability of mangrove plants of the genus *Avicennia* consisting of *A. alba* and *A. officinalis* to accumulate and translocate heavy metals within their roots and leaves was also investigated. The results showed that the highest concentrations of almost all the heavy metals in the sediments were found in the area before entering the mangrove and the lowest concentrations were found in the area outside the mangrove to the sea. Therefore, the sediments could reduce the metals transport to the sea. The accumulation of heavy metals in the sediments and plant tissues was in the same order: Fe > Zn > Cu > Pb > Ni > Cd > Hg. The concentrations of all the heavy metals were highest in the sediments, while those in the roots and leaves were not significantly different ($p > 0.05$). The ability of mangrove plants to accumulate heavy metals was very low (BCF values < 1). In addition, the metal transferability from the roots to leaves was high only for Hg, Pb, Cu, Ni and Zn (TF values > 1). Due to the low BCF values, the mangrove plants (*A. alba* and *A. officinalis)* cannot be categorized as phytoremediation species of heavy metals in this mangrove area. Further study should be conducted with other mangrove species including metal speciation in the sediments.

Keywords : heavy metal, mangrove, sediment, mangrove plant, Ban Laemchabang

บทนำ

ป่าชายเลนเป็นระบบนิเวศที่มีคุณค่าและให้ประโยชน์นานับประการ โดยเฉพาะได้รับการยอมรับว่าเป็นแหล่งสะสมและกักเก็บที่มีอยู่ในธรรมชาติของสารมลพิษต่างๆที่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ (Tam & Wong, 1996; Machado *et al*., 2002) ป่าชายเลนชุมชนบ้านแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี มีพื้นที่ประมาณ 40 ไร่ มีคลองน้ำไหลผ่าน อยู่ภายในกลางหมู่บ้าน เป็นป่าชายเลนผืนสุดท้ายที่มีอยู่ในชุมชน และเป็นแหล่งเรียนรู้ธรรมชาติอย่างดีเกี่ยวกับระบบนิเวศป่าชายเลนให้กับนักเรียนโรงเรียนวัดแหลมฉบัง แต่เนื่องจากบริเวณป่าชายเลนถูกล้อมรอบไปด้วยชุมชนและนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง รวมทั้งโรงกลั่นน้ำมันเอสโซ่ ศรีราชา คลัง ปตท. และโรงกลั่นน้ำมันไทยออยล์ (Wat Laemchabang School, 2011) จึงทำให้พื้นที่ป่าชายเลนได้รับน้ำเสียจากแหล่งชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ดังกล่าว

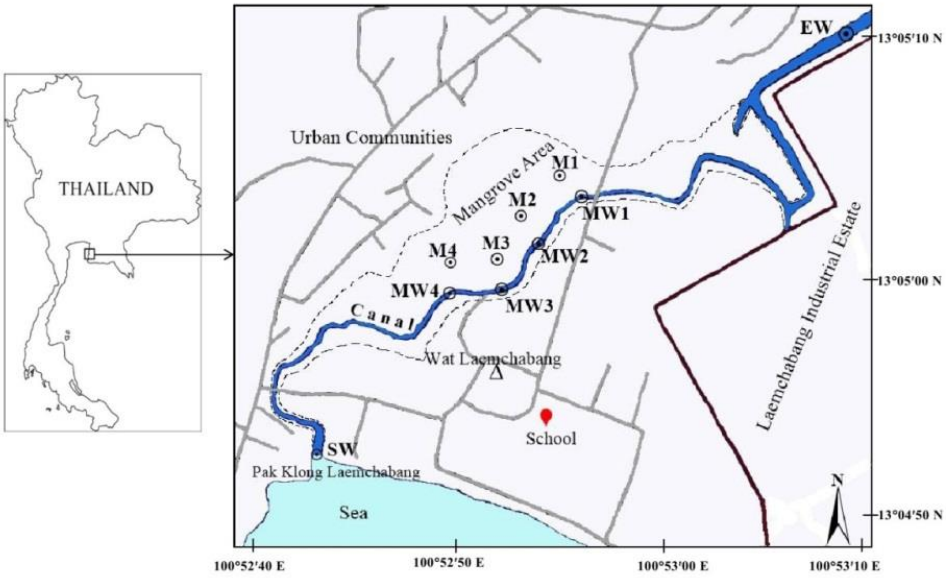
โลหะหนักนับเป็นสารมลพิษชนิดหนึ่งที่มักพบปนเปื้อนในน้ำเสียโดยเฉพาะที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรม (Rehman *et al*., 2008; Fernandes *et al*., 2012) เป็นสารมลพิษที่มีอันตรายและมีความเป็นพิษสูงต่อสิ่งมีชีวิต มีความคงทนในสิ่งแวดล้อม และสามารถสะสมได้ในสิ่งมีชีวิต (Tam & Wong, 2000; Abohassan, 2013) รวมทั้งมักพบสะสมในดินตะกอนป่าชายเลน (Harbison, 1986; Tam & Wong, 1996; Fernandes *et al*., 2012) เนื่องจากดินตะกอนป่าชายเลนมีขนาดอนุภาคเล็ก ลักษณะเนื้อดินเป็นดินเหนียว มีสารอินทรีย์สูง และส่วนใหญ่มีสภาพไร้ออกซิเจนทำให้มีซัลไฟด์สูง จึงมีคุณสมบัติจับกับโลหะหนักได้ดี (Harbison, 1986; MacFarlane *et al*., 2003) โลหะหนักในดินตะกอนยังสามารถเคลื่อนย้ายเข้าไปสะสมในพืชป่าชายเลน (Defew *et al*., 2005) ทั้งนี้ได้มีการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่าพืชป่าชายเลนหลายชนิดมีความทนทานต่อปริมาณโลหะหนักได้ในระดับสูงโดยเฉพาะแสมทะเล (*Avicennia marina)* สามารถทนทานและสะสมโลหะหนักหลายชนิดได้สูงกว่าพืชป่าชายเลนชนิดอื่น (MacFarlane & Burchett, 2002; MacFarlane *et al*., 2003) ด้วยเหตุนี้จึงนิยมใช้ดินตะกอนและพืชป่าชายเลนเป็นดัชนีชี้วัดมลพิษและการปนเปื้อนโลหะหนัก (MacFarlane

et al., 2003; Defew *et al*., 2005) ประกอบกับการศึกษาโลหะหนักในพืชป่าชายเลนมีอยู่จำกัดในประเทศไทยซึ่งส่วนใหญ่ทำการศึกษาในดินตะกอน ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาการสะสมโลหะหนักที่มีพิษ (ปรอท ตะกั่ว และแคดเมียม) และโลหะหนักที่มีประโยชน์ (นิเกิล สังกะสี ทองแดง และเหล็ก) ในดินตะกอน และ 2) ศึกษาความสามารถของพืชป่าชายเลนสกุลแสม (*Avicennia)* ในการสะสมและเคลื่อนย้ายโลหะหนักดังกล่าวจากดินตะกอนไปสู่รากและใบ ทั้งนี้พืชสกุลแสมเป็นพันธุ์ไม้ที่สำคัญและพบกระจายทั่วไปในพื้นที่ป่าชายเลนชุมชนบ้านแหลมฉบัง ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยแสมขาว (*Avicennia alba)* และแสมดำ (*Avicennia officinalis)*

วิธีดำเนินการวิจัย

1. สถานีเก็บตัวอย่าง

กำหนดสถานีเก็บตัวอย่างในบริเวณพื้นที่ป่าชายเลนชุมชนบ้านแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี รวม 10 สถานี (ภาพที่ 1) เริ่มตั้งแต่สถานีก่อนเข้าสู่ป่าชายเลน (EW) ซึ่งเป็นบริเวณคลองที่ถูกขุดขึ้นมาและอยู่ใกล้กับบริเวณนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง สถานีในป่าชายเลน 8 สถานี แบ่งเป็นสถานีที่อยู่ตามแนวคลองน้ำไหลผ่าน 4 สถานี (MW1, MW2, MW3 และ MW4) และสถานีที่เป็นป่าทางฝั่งซ้ายของคลองตามแนวขนานกับสถานีในคลอง 4 สถานี (M1, M2, M3 และ M4) และสถานีที่ปากคลองแหลมฉบัง 1 สถานี (SW) ซึ่งเป็นบริเวณที่ออกจากป่าชายเลนสู่ทะเล



ภาพที่ 1 สถานีเก็บตัวอย่างในบริเวณพื้นที่ป่าชายเลนชุมชนบ้านแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี (----- แนวพื้นที่ป่าชายเลน)

2. การเก็บตัวอย่างและรักษาสภาพตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างในเดือนตุลาคม พ.ศ. 2555 ดินตะกอนเก็บที่ผิวหน้าโดยใช้ช้อนที่ทำด้วยพลาสติก สถานีละ 3 ซ้ำ ใส่ในถุงพลาสติก ซ้ำละประมาณ 1 กิโลกรัม นำมาแช่แข็งที่อุณหภูมิ -40 ºC ทำให้แห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งด้วยความเย็น (freeze dryer) ร่อนผ่านตะแกรงไนล่อนขนาด 2 mm บดให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันด้วย agate mortar และเก็บในตู้ดูดความชื้น รวมทั้งเก็บตัวอย่างดินที่ร่อนแล้วอีกส่วนหนึ่งโดยไม่ต้องบดเพื่อนำมาหาลักษณะเนื้อดินตะกอน สำหรับพืชป่าชายเลนเก็บเฉพาะสกุลแสมซึ่งประกอบด้วยแสมขาว (*A. alba)* และแสมดำ (*A. officinalis)* เท่านั้น เนื่องจากพบกระจายทุกสถานีในบริเวณเดียวกับที่เก็บดินตะกอน โดยเก็บทั้งรากและใบในแต่ละสถานีรวมประมาณ 5-6 ต้นที่มีขนาดใกล้เคียงกัน รากเก็บโดยใช้มือค่อยๆขุดลงไปในดินและใช้เฉพาะรากส่วนที่อยู่ใต้ดิน ส่วนใบใช้กรรไกรตัด เลือกใบเขียวที่สมบูรณ์

รวมกันประมาณ 20 ใบ เก็บแยกรากและใบลงในถุงพลาสติก แล้วนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นให้สะอาด และทำให้แห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งด้วยความเย็น หลังจากนั้นจึงนำมาบดให้ละเอียดและเก็บในตู้ดูดความชื้นเพื่อวิเคราะห์โลหะหนักต่อไป ทั้งนี้แสมขาวและแสมดำที่นำมาวิเคราะห์โลหะหนักนั้นเป็นตัวอย่างรวมกันทั้งสองชนิด

3. การวิเคราะห์โลหะหนัก

โลหะหนักที่ทำการวิเคราะห์รวม 7 ชนิด ได้แก่ ปรอท (Hg) ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) นิเกิล (Ni) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) และ เหล็ก (Fe) โดยวิเคราะห์ในรูปของปริมาณโลหะรวม (total metal) โลหะหนักในดินตะกอนทำการสกัดตัวอย่างด้วยสารละลายผสมของ aqua regia (HNO_3: HCl, 1:3 v/v) และ hydrofluoric acid (HF) อัตราส่วน 1: 6 ที่อุณหภูมิ 95 ºC (Loring & Rantala, 1992) ยกเว้นปรอททำการสกัดตัวอย่างด้วยสารละลายผสมของ HNO_3 และ HCl อัตราส่วน 4:1 ที่อุณหภูมิ 95 ºC สำหรับโลหะหนักในรากและใบของพืชป่าชายเลนทำการสกัดโดยเผาตัวอย่างให้เป็นเถ้าที่อุณหภูมิ 450 ºC เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และละลายด้วย 5M HCl และ HNO_3 อัตราส่วน 5 : 1 (Ong Che, 1999) ยกเว้นปรอททำการสกัดตัวอย่างด้วยสารละลายผสมของ conc. HNO_3 และ H_2O_2 ที่อุณหภูมิ 90 ºC (MacFarlane *et al*., 2003) นำตัวอย่างดินตะกอน รากและใบที่สกัดแล้วมาวัดความเข้มข้นโลหะหนัก ดังนี้ นิเกิล สังกะสี ทองแดง และเหล็ก วัดโดยใช้เทคนิค flame atomic absorption spectrometry ด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (AAS), model AAnalyst 100 (Perkin-Elmer) แคดเมียม และตะกั่ว วัดโดยใช้เทคนิค graphite furnace atomic absorption spectrometry ด้วยเครื่อง AAS, model 4110ZL (Perkin-Elmer) ส่วนปรอทวัดโดยใช้เทคนิค cold vapour atomic absorption spectrometry ระบบ flow injection mercury hydried system, model FIAS 100 ด้วยเครื่อง AAS, model 4110ZL (Perkin-Elmer) ทั้งนี้ได้ตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์กับสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น (standard reference material, SRM) คือ Estuarine Sediment (SRM 1646a) และ Apple Leaves (SRM 1515) ของ National Institute of Standards and Technology (NIST), USA พบว่า % Recovery ของโลหะหนักทั้งหมดที่ทำการศึกษามีค่าดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์สารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น

Heavy metals	Estuarine sediment (SRM 1646a)			Apple leaves (SRM 1515)		
	Certified value (µg/g dry wt.)	Measured value (µg/g dry wt.)(n=3)	% Recovery	Certified value (µg/g dry wt.)	Measured value (µg/g dry wt.)(n=4)	% Recovery
Hg	0.04 (Noncertified value*)	0.043 ± 0.002	106.5 ± 6.0	0.044 ± 0.004	0.036 ± 0.001	81.0 ± 2.1
Pb	11.7 ± 1.2	8.25 ± 0.006	85.0 ± 0.07	0.470 ± 0.024	0.429 ± 0.012	91.3 ± 2.7
Cd	0.148 ± 0.007	0.122 ± 0.012	83.0 ± 8.1	0.013 ± 0.002	0.013 ± 0.001	102.3 ± 4.1
Ni	23 (Noncertified value*)	17.6 ± 0.70	76.4 ± 3.1	0.91 ± 0.12	1.03 ± 0.07	113.0 ± 7.5
Zn	48.9 ± 1.6	43.3 ± 0.43	88.6 ± 0.9	12.5 ± 0.3	13.6 ± 0.25	108.7 ± 2.0
Cu	10.01 ± 0.34	9.10 ± 0.42	90.9 ± 4.2	5.64 ± 0.24	5.53 ± 0.12	98.1 ± 2.2
Fe	20,080 ± 390	19,319 ± 334	96.2 ± 1.7	83 ± 5	76.3 ± 0.16	91.8 ± 0.3

* เป็นค่าที่ยังไม่ได้รับการรับรอง และใช้เป็นเพียงข้อมูลเท่านั้น (NIST, 2004)

นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์คุณภาพดินตะกอนบางประการ ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง โดย pH meter (suspension of 1 : 2.5 sediment : water) (Usman *et al.,* 2013) ปริมาณสารอินทรีย์ โดยวิธี acid-dichromate oxidation method (Division of Soil Science, 1994) การกระจายขนาดอนุภาคดินตะกอน โดยวิธี hydrometer method (Sheldrick & Wang, 1993) และลักษณะเนื้อดินตะกอน โดยใช้ textural triangle (Hillel, 1998)

4. การศึกษาความสามารถของพืชป่าชายเลนในการสะสมและเคลื่อนย้ายโลหะหนัก

การศึกษาความสามารถของพืชป่าชายเลนในการสะสมโลหะหนักจากดินตะกอนไปสู่ราก และใบ โดยคำนวณหาค่า Bioconcentration factor (BCF) และศึกษาการเคลื่อนย้ายโลหะหนักที่สะสมจากรากไปสู่ใบของพืชป่าชายเลน โดยคำนวณหาค่า Translocation factor (TF) ตามสูตร ดังนี้ (MacFarlane *et al*., 2007)

$$\text{Root BCF} = \text{Root metal / Sediment metal} \quad (1)$$

$$\text{Leaf BCF} = \text{Leaf metal / Sediment metal} \quad (2)$$

$$\text{TF} = \text{Leaf metal / Root metal} \quad (3)$$

5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ในการวิเคราะห์ความแตกต่างของโลหะหนักแต่ละชนิดในดินตะกอน ราก และใบ โดยใช้ One-way ANOVA และจำแนกความแตกต่างระหว่างกลุ่มใช้ S-N-K (Student-Newman-Keuls) รวมทั้งวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโลหะหนักในดินตะกอนและคุณภาพดินตะกอน โดยใช้ Pearson correlation

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การสะสมโลหะหนักในดินตะกอนป่าชายเลน

ผลการวิเคราะห์คุณภาพดินตะกอนและปริมาณโลหะหนักที่สะสมในดินตะกอนแสดงในตารางที่ 2 พบว่าดินตะกอนมีสภาพเป็นกรดเล็กน้อยถึงสภาพเป็นด่าง (pH 6.0- 8.8) มีสารอินทรีย์ค่อนข้างสูงส่วนใหญ่มากกว่า 4% และลักษณะของเนื้อดินตะกอนส่วนใหญ่เป็นดินร่วน และดินร่วนปนทราย ปริมาณโลหะหนัก ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม นิเกิล สังกะสี ทองแดง และเหล็ก มีค่าในช่วงระหว่าง 0.011 - 0.162, 14.0 - 86.9, 0.049 - 1.95, 31.2 - 50.1, 33.7 - 854, 3.25 - 140 และ 3,979 - 16,960 µg/g dry wt. ตามลำดับ โลหะหนักทุกชนิดมีความแตกต่างกันในระหว่างสถานีอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อันเนื่องมาจากความแตกต่างของคุณภาพดินตะกอนในแต่ละสถานี โดยเฉพาะปริมาณสารอินทรีย์ ทรายแป้ง และดินเหนียว ซึ่งพบความสัมพันธ์ทางบวกกับปริมาณโลหะหนักอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$) (ตารางที่ 3) ทำให้ดินตะกอนที่มีสารอินทรีย์ ทรายแป้ง และดินเหนียวสูง จะมีโลหะหนักสูงด้วย เนื่องจากดินตะกอนที่มีขนาดอนุภาคเล็ก (ทรายแป้ง และดินเหนียว) จะมีพื้นที่ผิว (surface area) มากทำให้จับกับโลหะหนักได้ดี (Chakraborty *et al*., 2014) ประกอบกับสารอินทรีย์มักพบสะสมในดินตะกอนที่มีขนาดอนุภาคเล็กและเกิดร่วมอยู่กับดินเหนียว (Sparks, 1995) สารอินทรีย์จึงเกิดปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวแร่ดินเหนียวได้ ซึ่งอาจเป็นการดูดซับที่พื้นผิวอนุภาค การแลกเปลี่ยนประจุ หรือสร้างพันธะโควาเลนต์กับกลุ่ม silanol และ aliminol ของแร่ดินเหนียว (Lagaly *et al*., 2013) ทั้งแร่ดินเหนียวและสารอินทรีย์จึงเป็นตัวกำจัดโลหะหนักออกจากมวลน้ำไปสะสมอยู่ที่ดินตะกอน โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) กระบวนการดูดซับ (adsorption) และคีเลชัน (chelation) นอกจากนี้ความแตกต่างของโลหะหนักในแต่ละสถานีอาจมาจากความแตกต่างของพื้นที่ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติและการปนเปื้อนที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ได้อีกด้วย

ค่าสูงสุดของโลหะหนักทุกชนิดยกเว้นตะกั่ว และเหล็ก พบที่สถานีแรกก่อนเข้าสู่ป่าชายเลน (สถานี EW) ใกล้กับบริเวณนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง ส่วนค่าต่ำสุดของโลหะหนักทุกชนิดพบที่ปากคลองแหลมฉบัง (สถานี SW) ซึ่งเป็นสถานีที่ออกจากป่าชายเลนไปสู่ทะเล โดยดินตะกอนบริเวณนี้มีขนาดอนุภาคเป็นทรายมากถึง 88.8% ซึ่งอนุภาคทรายนั้นมีโครงสร้างเป็นควอร์ตทำให้เฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยาทุกชนิด จึงพบโลหะหนักในบริเวณนี้ต่ำสุด ทั้งนี้โลหะหนักทุกชนิดภายในพื้นที่ป่าชายเลน (สถานี MW1, MW2, MW3, MW4, M1, M2, M3, และ M4) มีค่าค่อนข้างสูง (ตารางที่ 2) และผันแปรไปตามปริมาณสารอินทรีย์และดินตะกอนขนาดอนุภาคเล็ก ตามที่พบความสัมพันธ์ทางบวกกับปริมาณโลหะหนักดังกล่าวแล้วข้างต้น โลหะหนักที่ปนเปื้อนมาในมวลน้ำจะถูกกำจัดออกโดยกระบวนการธรณีเคมี และไปกักเก็บอยู่ในดินตะกอน ทั้งนี้ความสามารถในการกักเก็บโลหะหนักนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะเนื้อดินตะกอน ดินตะกอนที่มีเนื้อละเอียดจะประกอบไปด้วยแร่ดินเหนียวมากและมีสารอินทรีย์สะสมอยู่สูง ทำให้ดินตะกอนลักษณะนี้สามารถตรึงโลหะหนักเอาไว้ได้มากกว่าดินตะกอนเนื้อหยาบ ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นทราย ด้วยคุณลักษณะที่ดีของดินตะกอนป่าชายเลนที่มีสารอินทรีย์และดินตะกอนขนาดอนุภาคเล็กค่อนข้างสูง ทำให้ดินตะกอนป่าชายเลนเป็นแหล่งสะสมและกักเก็บโลหะหนักที่ดี จึงช่วยลดการพัดพาโลหะหนักออกสู่ทะเล เหล็กเป็นโลหะหนักที่มีการสะสมมากที่สุดในดินตะกอน สอดคล้องกับการศึกษาของ Defew *et al*. (2005) ในขณะที่ปรอทเป็นโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยที่สุด โดยลำดับการสะสมโลหะหนักในดินตะกอนเป็นดังนี้ เหล็ก > สังกะสี > ทองแดง > ตะกั่ว > นิเกิล > แคดเมียม > ปรอท เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของโลหะหนักในดินตะกอนนี้กับค่าพื้นฐานของโลหะหนักในธรรมชาติ (background metal level) โดยใช้ค่า world average shale ของ Turekian & Wedepohl (1961) เนื่องจากค่า world average shale นี้ นิยมใช้ในกรณีที่ไม่มีการศึกษาค่าพื้นฐานของโลหะหนักในดินตะกอนบริเวณนั้น (Ong *et al*., 2013) และเป็นค่า pre-civilisation background levels ซึ่งเป็นปริมาณโลหะหนักใน standard earth materials (Abrahim & Parker, 2008) พบว่า ค่าเฉลี่ยของตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี และทองแดง มีค่าสูงเกินกว่าค่าพื้นฐานของโลหะหนักในธรรมชาติ ในขณะที่ปรอท นิเกิล และเหล็ก มีค่าต่ำกว่าค่าพื้นฐานดังกล่าว (ตารางที่ 2) แสดงว่ามีการเพิ่มขึ้นของตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี และทองแดงในพื้นที่ป่าชายเลนสูงเกินกว่าค่าปกติในธรรมชาติ ซึ่งสาเหตุอาจมาจากกิจกรรมของมนุษย์โดยเฉพาะโรงงานอุตสาหกรรมที่อยู่ภายในนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง ได้แก่ อุตสาหกรรมประเภทไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมยางรถยนต์ โทรทัศน์และวิดีทัศน์ เป็นต้น รวมทั้งชุมชนที่อยู่โดยรอบป่าชายเลน ทั้งนี้โลหะหนักในดินตะกอนป่าชายเลนที่มีค่าสูงหลายแห่งทั่วโลกมีสาเหตุมาจากมลพิษที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ทั้งสิ้น (Defew *et al*., 2005; Tam & Wong, 2000)

เมื่อเปรียบเทียบโลหะหนักในดินตะกอนป่าชายเลนบริเวณเดียวกันกับการศึกษาของ Thongra-ar *et al*. (2015) (ตารางที่ 4) ซึ่งทำการศึกษาต่างระยะเวลากัน พบว่า ปริมาณโลหะหนักส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับป่าชายเลนบริเวณอื่นทั้งในและต่างประเทศ พบว่าปริมาณตะกั่ว แคดเมียม นิเกิล สังกะสีและทองแดงในดินตะกอนป่าชายเลนบ้านแหลมฉบังมีค่าสูงกว่าดินตะกอนป่าชายเลนที่จังหวัดสมุทรสาคร (Buajan & Pumijumnong, 2010) และจังหวัดชุมพร (Pumijumnong & Uppadit, 2012) รวมทั้งสูงกว่าดินตะกอนป่าชายเลนที่สิงคโปร์ (Cuong *et al*., 2005) ยกเว้นตะกั่วมีค่าน้อยกว่าดินตะกอนป่าชายเลนที่ Mai Po ประเทศฮ่องกง (Ong Che, 1999) และอ่าว Punta Mala ประเทศปานามา (Defew *et al*., 2005) รวมทั้งที่คาบสมุทรมาเลเซีย (Nazli & Hashim, 2010) สำหรับปรอทพบว่ามีค่าน้อยกว่าดินตะกอนป่าชายเลนบริเวณชายฝั่งตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศจีน (Ding *et al*., 2009) ส่วนแคดเมียมมีค่าน้อยกว่าดินตะกอนป่าชายเลนชายฝั่งทะเลแดง ประเทศซาอุดิอาระเบีย (Usman *et al.,* 2013) และชายฝั่งทางตอนใต้ของ Gujarat ประเทศอินเดีย (Dudani *et al*., 2017) ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวนี้อาจเนื่องมาจากคุณภาพดินตะกอนและกิจกรรมโดยรอบพื้นที่ป่าชายเลนที่แตกต่างกันในแต่ละบริเวณ

ตารางที่ 2 คุณภาพดินตะกอนและปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนบริเวณป่าชายเลน ชุมชนบ้านแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี

Stations	Sediment	Organic	Particle size distribution (%)			Sediment	Heavy metals (µg/g dry wt.)						
	pH	matter (%)	Sand	Silt	Clay	texture	Hg	Pb	Cd	Ni	Zn	Cu	Fe
EW	7.0	6.7	59.2	34.0	6.8	Sandy loam	0.162	57.9	1.20	50.1	854	140	15,175
MW1	7.0	3.3	40.4	46.0	13.6	Loam	0.062	73.2	0.939	33.2	213	56.8	11,485
MW2	6.8	4.7	46.1	42.0	11.9	Loam	0.111	73.5	0.770	31.2	278	65.7	15,046
MW3	6.8	7.6	45.1	43.0	11.9	Loam	0.113	86.9	1.95	49.7	389	90.2	15,717
MW4	6.7	7.2	73.5	20.5	6.0	Loamy sand	0.077	50.0	0.892	46.2	204	48.2	11,789
M1	7.0	7.3	10.2	77.0	12.8	Silt loam	0.128	61.3	0.972	35.7	421	75.6	13,800
M2	6.3	10.5	43.8	44.0	12.2	Loam	0.142	81.5	1.06	41.7	358	98.7	16,960
M3	6.5	3.4	78.8	10.0	11.2	Sandy loam	0.050	35.6	0.512	32.0	161	30.9	8,758
M4	6.0	4.5	64.4	24.0	11.6	Sandy loam	0.085	50.2	0.763	37.1	189	48.7	12,007
SW	8.8	2.7	88.8	8.0	3.2	Sand	0.011	14.0	0.049	31.3	33.7	3.25	3,979
Average	6.9	5.8	55.1	34.6	10.2		0.094	58.4	0.912	38.8	310	65.8	12,472
SD	0.7	2.5	22.2	19.7	3.5		0.048	22.9	0.565	9.7	256	39.1	3,958
Min.	6.0	2.7	10.2	8.0	3.2		0.011	14.0	0.049	31.2	33.7	3.25	3,979
Max.	8.8	10.5	88.8	77.0	13.6		0.162	86.9	1.95	50.1	854	140	16,960
World average shale (Turekian & Wedepohl, 1961)							0.4	20	0.3	68	95	45	47,200

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของโลหะหนักในดินตะกอนป่าชายเลนและคุณภาพดินตะกอนบางประการ (n = 30)

	Hg	Pb	Cd	Ni	Zn	Cu	Fe
Sediment pH	-.614**	-.513**	-.555**	-.246	-.579**	-.563**	-.734**
Organic matter	.748**	.561**	.620**	.563**	.674**	.710**	.724**
Sand	-.611**	-.673**	-.524**	-.030	-.607**	-.582**	-.640**
Silt	.603**	.642**	.505**	.062	.602**	.579**	.612**
Clay	.562**	.685**	.554**	-.063	.556**	.525**	.701**

** Significant at p = 0.01

ตารางที่ 4 ปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนบริเวณป่าชายเลน ชุมชนบ้านแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี เปรียบเทียบกับป่าชายเลนในบริเวณอื่นทั้งในและต่างประเทศ (หน่วยเป็น µg/g dry wt.)

Locations	Hg	Pb	Cd	Ni	Zn	Cu	Fe	References
Ban Laem Chabang (Oct. 2012)	0.094 (0.011 - 0.162)	58.4 (14.0 - 86.9)	0.912 (0.049 - 1.95)	38.8 (31.2 - 50.1)	310 (33.7- 854)	65.8 (3.25 - 140)	12,472 (3,979 - 16,960)	This study
Ban Laem Chabang (Feb. 2014)	0.120 (0.004 - 0.325)	45.2 (14.9 - 79.8)	1.15 (0.018 -3.37)	11.96 (2.16 - 26.8)	341 (28.2 - 800)	55.3 (2.69 – 126)	11,951 (2,582 - 20,345)	Thongra-ar *et al.* (2015)
Samut Sakhon	-	8.15 - 25.99	0.04 - 0.07	-	7.50 - 46.43	2.26 - 51.19	-	Buajan & Pumijumnong (2010)
Chumphon	-	0.24 - 12.50	0.002 - 0.037	0.47- 14.0	0.53 - 40.85	2.26 - 51.19	-	Pumijumnong & Uppadit (2012)
Mai Po, Hong Kong	-	161.6 - 219.8	0.5 - 0.6	65.3 - 66.0	277.2 - 321.2	41.9 - 49.8	-	Ong Che (1999)
Deep Bay, Hong Kong	-	80	3	30	240	80	-	Tam & Wong (2000)
Punta Mala Bay, Pacific Panama	-	78.2	<10	27.3	105	56.3	9,827	Defew *et al*. (2005)
Singapore								Cuong *et al*.
- Sungei Buloh,	-	12.28	0.181	7.44	51.24	7.06	-	(2005)
- S. Khatib Bongsu	-	30.98	0.266	11.65	120	32.00	-	
13 Mangrove, Southeastern Coast, China	0.189 (0.0023-0.904)	-	-	-	-	-	-	Ding *et al*. (2009)
Peninsular Malaysia	-	83.1± 3.1	0.8±0.5	-	4.3±0.1	31.9±2.0	-	Nazli & Hashim (2010)
Coast of Red Sea, Saudi Arabia	-	45.2 (13.5 - 230)	1.23 (ND - 5.48)	8.48 (ND - 20.9)	57.2 (3.95 - 275)	112 (45.5 - 280)	-	Usman *et al*. (2013)
South Gujarat, India	-	11.22 ± 1.56	10.40 ± 1.75	21.53 ± 2.51	31.91 ± 7.8	33.88 ± 7.9	-	Dudani *et al*. (2017)

การสะสมโลหะหนักในพืชป่าชายเลน

ค่าเฉลี่ยปริมาณโลหะหนักในรากและใบของพืชป่าชายเลนสกุลแสม (*Avicennia)* แสดงในตารางที่ 5 พบว่าปริมาณการสะสมมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดโลหะหนัก โดยโลหะหนักที่มีการสะสมมากเรียงตามลำดับ คือ เหล็ก > สังกะสี > ทองแดง > ตะกั่ว > นิเกิล > แคดเมียม > ปรอท ซึ่งมีความสอดคล้องเช่นเดียวกับลำดับการสะสมโลหะหนักในดินตะกอน ทั้งนี้เหล็ก สังกะสี และทองแดง มีการสะสมมากในรากและใบนั้น เพราะเป็นโลหะที่พืชมีความต้องการและมีประโยชน์ต่อการเจริญเติบโต สอดคล้องกับการศึกษาของ Ong Che (1999) นอกจากนี้ Usman *et al.* (2013) ทำการศึกษาโลหะหนักหลายชนิดยกเว้นเหล็กในแสมทะเล (*A. marina*) พบว่า สังกะสีและทองแดงมีการสะสมมากที่สุด ส่วนตะกั่ว แคดเมียม และปรอท มีการสะสมน้อย เพราะเป็นโลหะที่มีพิษและไม่มีประโยชน์ต่อพืช สำหรับปรอทมีการสะสมน้อยที่สุดสอดคล้องกับการศึกษาของ Marchand *et al*. (2006) เนื่องจากปรอทมักจับตัวแน่นกับดินตะกอน โดยเฉพาะดินที่มีสารอินทรีย์สูง (Yin *et al*., 1996) ทำให้ปริมาณที่เข้าไปสะสมในพืชมีน้อย จากปริมาณโลหะหนักที่พบในรากและใบนี้สามารถบ่งชี้ได้ว่าพืชป่าชายเลนสกุลแสม (แสมขาวและแสมดำ) ไม่มีคุณสมบัติในการเป็น Hyperaccumulators คือ พืชที่มีความสามารถดูดซึมโลหะหนักปริมาณมากเข้าไว้ในเนื้อเยื่อได้ เพราะปริมาณโลหะหนักทุกชนิดที่ตรวจพบในรากและใบมีค่าน้อยว่า 1,000 µg/g dry wt. (Baker & Brooks, 1989)

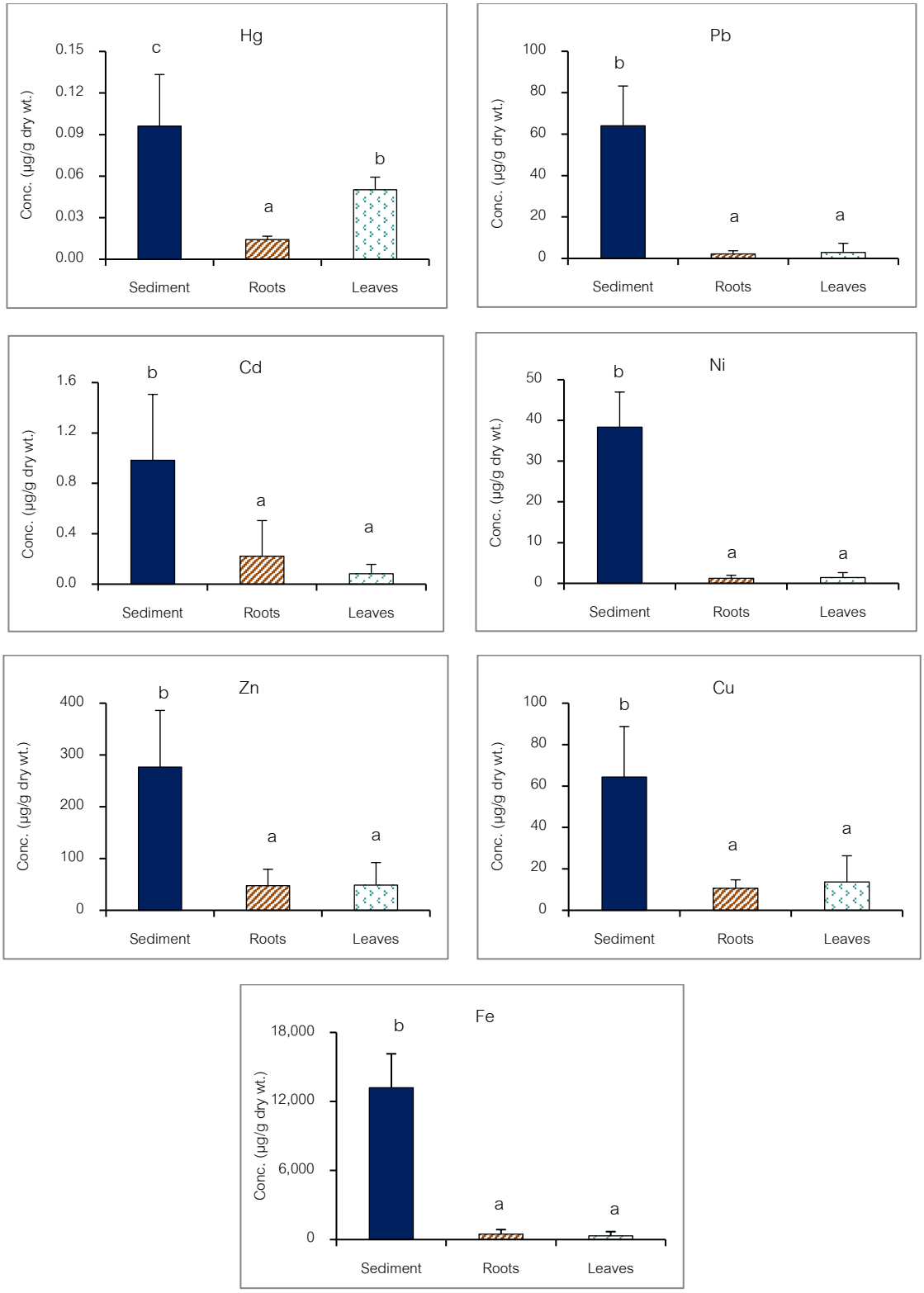
ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานปริมาณโลหะหนักในรากและใบของพืชป่าชายเลนสกุลแสม (*Avicennia)* เปรียบเทียบกับการศึกษาของนักวิจัยท่านอื่น และค่าปริมาณโลหะหนักในพืชที่เป็น Hyperaccumulators

Mangrove tissues	Non-essential metals (µg/g dry wt.)			Essential metals (µg/g dry wt.)				References
	Hg	Pb	Cd	Ni	Zn	Cu	Fe	
Avicennia alba & *Avicennia officinalis*								
Roots	0.014 ± 0.002	2.16 ± 1.53	0.222 ± 0.283	1.23 ± 0.74	47.5 ± 31.7	10.7 ± 4.07	478 ± 389	This study
Leaves	0.050 ± 0.009	2.87 ± 4.42	0.083 ± 0.074	1.43 ± 1.22	48.7 ± 43.6	13.7 ± 12.7	322 ± 365	
Avicennia marina, Daguanshan Mangrove Provincial Reserve, China								
Roots	0.106	-	-	-	-	-	-	Ding *et al.*
Leaves	0.551	-	-	-	-	-	-	(2011)
Avicennia marina, Coast of Red Sea, Saudi Arabia								
Roots	-	-	Not detectable	4.02	36.8	270.5	-	Usman *et al*
Leaves	-	-	1.04	2.30	29.5	356.6	-	.(2013)
Avicennia marina, Qeshm Island, Persian Gulf, Iran								
Roots	-	9.43 ± 1.74	-	39.76 ± 4.20	18.94 ± 7.25	25.51 ± 2.49	-	Einollahipeer
Leaves	-	0.84 ± 0.07	-	2.44 ± 0.71	33.83 ± 13.80	37.73 ± 17.59	-	*et al*. (2013)
Avicennia marina, Shuaiba region on Red Sea Coast, Saudi Arabia								
Roots	-	5.01	0.33	33.12	18.27	38.39	3,913.14	Abohassan
Leaves	-	0.57	0.01	12.58	4.23	4.17	473.18	(2013)
Hyperaccumulators		1,000	-	1,000	10,000	1,000	-	Baker & Brooks (1989)

เมื่อเปรียบเทียบการสะสมโลหะหนักระหว่างดินตะกอน ราก และใบ พบว่าโลหะหนักทุกชนิดมีการสะสมมากที่สุดในดินตะกอน (ภาพที่ 2) สอดคล้องกับการศึกษาของ Keshavarz *et al*. (2012) และ Einollahipeer *et al*. (2013) เนื่องจากโลหะหนักที่เข้าสู่รากของพืชป่าชายเลนนั้นขึ้นอยู่กับรูปทางเคมีของโลหะหนัก (metal speciation) ในดินตะกอนด้วย (Chakraborty *et al*., 2014) แต่โลหะหนักที่วิเคราะห์ในดินตะกอนอยู่ในรูปของปริมาณโลหะรวม ซึ่งไม่สามารถเข้าสู่

สิ่งมีชีวิตได้ทั้งหมด เฉพาะโลหะหนักที่อยู่ในรูปที่สิ่งมีชีวิตนำมาใช้ได้ (bioavailable form) เท่านั้นที่เข้าสู่สิ่งมีชีวิต ประกอบกับผลการศึกษาครั้งนี้ไม่พบความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างโลหะหนักในดินตะกอน ราก และใบ เช่นเดียวกับการศึกษาของ MacFarlane *et al*. (2003) และ Marchand *et al*. (2006) จึงเป็นไปได้ว่าพืชป่าชายเลนหลีกเลี่ยงการดูดซึมโลหะหนักเข้าไปในเนื้อเยื่อ หรืออีกนัยหนึ่งเป็นเพราะว่าปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนที่อยู่ในรูปที่สิ่งมีชีวิตนำมาใช้ได้นั้นมีน้อยถึงแม้ว่าปริมาณโลหะหนักรวมในดินตะกอนมีสูงก็ตาม ซึ่งกลไกที่ทำให้โลหะหนักในดินตะกอนอยู่ในรูปที่สิ่งมีชีวิตนำมาใช้ได้น้อยนั้นเป็นเพราะว่าดินตะกอนป่าชายเลนมักมีสภาพไร้ออกซิเจน จนซัลเฟตเปลี่ยนเป็นซัลไฟด์ ซึ่งซัลไฟด์จะสร้างพันธะที่แข็งแรงกับโลหะหนักเกิดเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ จึงเป็นการตรึงโลหะหนักเอาไว้ในดินตะกอนให้อยู่ในรูปที่สิ่งมีชีวิตนำมาใช้ได้น้อย อีกทั้งไม่ถูกดูดซึมโดยรากพืชเพราะว่าเป็นของแข็ง แต่หากสิ่งแวดล้อมบริเวณนั้นมีการเติมอากาศเข้าไป ซัลไฟด์ก็จะถูกออกซิไดซ์และปล่อยโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ นอกจากนี้โลหะหนักยังเกิดการจับตัวกับสารอินทรีย์ที่มีค่อนข้างสูงในดินตะกอน รวมทั้งเกิดคราบสนิมเหล็ก (iron plaques) เคลือบอยู่ที่ผิวหน้าของรากพืชป่าชายเลน จึงเป็นสาเหตุทำให้โลหะหนักเข้าไปสะสมอยู่ในพืชป่าชายเลนได้น้อยอีกด้วย (MacFarlane *et al*., 2003) และพืชป่าชายเลนบางชนิดมีกลไกในการปรับตัว โดยเฉพาะแสมทะเลสามารถขับเกลือออกทางใบซึ่งจะทำให้โลหะหนักส่วนเกินสามารถกำจัดออกไปได้ด้วยเช่นกัน (MacFarlane & Burchett, 1999)

สำหรับปริมาณการสะสมโลหะหนักในรากและใบพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ยกเว้นปรอทมีการสะสมในใบมากกว่าราก (ภาพที่ 2) ซึ่งโดยทั่วไปนั้นพืชป่าชายเลนส่วนใหญ่มีการสะสมโลหะหนักในรากมากกว่าลำต้นและใบหรือส่วนที่อยู่บนอากาศ (aerial parts) โดยรากของพืชป่าชายเลนทำหน้าที่เป็นด่านกั้น (barrier) ในการเคลื่อนที่ของโลหะหนักจากดินไปสู่ลำต้นและใบ (MacFarlane & Burchett, 2002; Gupta & Chakrabarti, 2013) อย่างไรก็ตามในบางพื้นที่พบการสะสมโลหะหนักบางชนิดในใบมากกว่าราก เช่น การศึกษาของ Usman *et al.* (2013) และ Einollahipeer *et al.* (2013) เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกับป่าชายเลนบริเวณอื่นซึ่งทำการศึกษากับพืชสกุลแสมแต่เป็นแสมทะเล (*A. marina*) พบว่าปริมาณโลหะหนักส่วนใหญ่ในรากจากการศึกษาครั้งนี้โดยเฉพาะปรอท ตะกั่ว แคดเมียม นิเกิล ทองแดง และเหล็ก มีค่าน้อยกว่าที่พบจากการศึกษาของ Ding *et al*. (2011), Usman *et al.* (2013), Einollahipeer *et al*. (2013) และ Abohassan (2013) (ตารางที่ 5) สำหรับปรอทที่พบการสะสมในใบมากกว่ารากนั้นสอดคล้องกับการศึกษาของ Ding *et al*. (2011) นอกจากนี้ He *et al.* (2014) ศึกษาปรอทในใบและลำต้นของพืชป่าชายเลน 8 ชนิด พบปรอทในใบมากกว่าลำต้น ซึ่งสาเหตุที่พบปรอทในใบมากกว่ารากหรือลำต้นนั้น น่าจะเป็นเพราะว่าปรอทที่พบในดินตะกอนป่าชายเลนในเขตร้อนและกึ่งเขตร้อนส่วนใหญ่อยู่ในรูปของไอปรอท (volatile Hg) เนื่องจากอุณหภูมิที่สูง และแดดจัดมีส่วนช่วยทำให้ปรอทแพร่กระจายผ่านทางบรรยากาศ (Ding *et al*., 2009) พืชจึงสามารถรับปรอทจากอากาศได้โดยตรง โดยการดูดซับเข้าทางใบในรูปของไอปรอท นอกเหนือจากปรอทที่ดูดซึมเข้าทางราก (Marchand *et al*., 2006; He *et al.,* 2014) ประกอบกับลักษณะโครงสร้างทางสรีระวิทยาของใบพืชป่าชายเลนที่ผนังเซลล์ของผิวชั้นนอกมีความหนาจึงช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำและการปล่อยปรอทออกทางใบได้อีกด้วย (Ding *et al*., 2011)



ภาพที่ 2 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโลหะหนักชนิดต่างๆในดินตะกอน ราก และใบของพืชป่าชายเลนสกุลแสม (แสมขาว, *A. alba* และแสมดำ, *A. officinalis)* (ตัวอักษรบนกราฟแท่งที่เหมือนกัน หมายถึงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ; $p > 0.05$)

ความสามารถของพืชป่าชายเลนในการสะสมและเคลื่อนย้ายโลหะหนัก

ความสามารถของพืชป่าชายเลนในการสะสมโลหะหนักจากดินตะกอนประเมินจากค่า Root BCF (อัตราส่วนระหว่างโลหะหนักที่อยู่ในรากและดินตะกอน) และ Leaf BCF (อัตราส่วนระหว่างโลหะหนักที่อยู่ในใบและดินตะกอน) ส่วนความสามารถของพืชในการเคลื่อนย้ายโลหะหนักที่สะสมจากรากไปสู่ใบประเมินจากค่า Translocation factor, TF (อัตราส่วนระหว่างโลหะหนักที่อยู่ในใบและราก) จากผลการศึกษาในตารางที่ 6 พบว่าโลหะหนักทั้ง 7 ชนิดที่ทำการศึกษามีค่า Root BCF < 1.0 อยู่ในช่วงระหว่าง 0.032 - 0.23 แสดงว่ารากของพืชป่าชายเลนมีความสามารถสะสมโลหะหนักทุกชนิดได้น้อยกว่าปริมาณที่มีอยู่ในดินตะกอน โดยโลหะหนักสามารถเข้าสู่รากของพืชสกุลแสมได้เพียงร้อยละ 3.2 - 23 ของปริมาณที่อยู่ในดินตะกอนขึ้นอยู่กับชนิดโลหะหนักถึงแม้โลหะหนักบางชนิดจะพบสูงมากในดินตะกอนก็ตาม จากค่า Root BCF แสดงให้เห็นว่ารากของพืชสกุลแสมนี้มีประสิทธิภาพในการดูดซึมแคดเมียม ทองแดง สังกะสี และปรอท ได้ดีกว่าเหล็ก ตะกั่ว และนิเกิล สำหรับค่า Leaf BCF ของโลหะหนักทุกชนิด มีค่า < 1.0 เช่นเดียวกัน อยู่ในช่วงระหว่าง 0.024 - 0.52 โดยค่า Leaf BCF ของปรอทมีค่าสูงสุด รองลงมาคือ ทองแดงและสังกะสี จากผลดังกล่าวข้างต้นทั้งค่า Root BCF และ Leaf BCF ของโลหะหนักทุกชนิดที่มีค่า < 1 แสดงว่าโลหะหนักส่วนใหญ่อยู่ในดินตะกอนไม่ถูกดูดซึมเข้าไปในเนื้อเยื่อพืช ในกรณีนี้ดินตะกอนป่าชายเลนจึงนับเป็นดัชนีบ่งชี้การปนเปื้อนโลหะหนักได้ดี และเมื่อพิจารณาการเคลื่อนย้ายโลหะหนักที่สะสมในรากไปสู่ใบของพืชสกุลแสมจากค่า TF ซึ่งโดยทั่วไปนั้นพืชที่มีค่า TF > 1 จัดเป็นพืชที่มีประสิทธิภาพสูงในการเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากรากไปสะสมยังส่วนต่างๆที่อยู่เหนือพื้นดินได้ดี (Usman *et al*., 2013) พบว่าค่า TF ของโลหะหนักทั้ง 7 ชนิดที่ทำการศึกษามีค่าอยู่ระหว่าง 0.37 - 3.53 โดยโลหะหนักที่มีการเคลื่อนย้ายไปสู่ใบได้ดีซึ่งมีค่า TF > 1 ได้แก่ ปรอท ตะกั่ว ทองแดง นิเกิล และสังกะสี ตามลำดับ (ตารางที่ 6) ซึ่งปรอท และตะกั่ว เป็นโลหะหนักที่มีพิษ พืชอาจมีกลไกในการทำลายพิษของโลหะหนักภายในเซลล์เกิดขึ้น และกรณีของปรอทนั้นอาจเป็นไปได้ว่าพืชสามารถรับปรอทเข้าสู่ใบได้โดยตรงอีกด้วย จึงเป็นเรื่องน่าสนใจในการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป ส่วนทองแดง นิเกิล และสังกะสี เป็นโลหะหนักที่มีประโยชน์พืชจึงนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ สำหรับแคดเมียมและเหล็กมีการเคลื่อนย้ายไปสู่ใบได้น้อย (ค่า TF < 1) โลหะส่วนใหญ่จึงอยู่ที่รากทำให้ลดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมลงได้ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าปรอท ตะกั่ว ทองแดง นิเกิล และสังกะสี สามารถเคลื่อนย้ายจากรากไปสู่ใบได้ดี แต่ปริมาณที่สะสมในรากมีน้อย (Root BCF < 1) รวมทั้งการย่อยสลายของใบพืชป่าชายเลนที่ร่วงหล่นในแต่ละปีนั้นมีน้อยมาก (MacFarlane *et al*., 2007) โลหะหนักส่วนใหญ่จึงยังคงอยู่ในป่าชายเลน

ตารางที่ 6 ค่า Bioconcentration factor (BCF) และ Translocation factor (TF) ของโลหะหนักชนิดต่างๆในพืชป่าชายเลนสกุลแสม (*Avicennia)* จากการศึกษาครั้งนี้

	Hg	Pb	Cd	Ni	Zn	Cu	Fe
Root BCF	0.15	0.034	0.23	0.032	0.17	0.17	0.036
Leaf BCF	0.52	0.045	0.084	0.037	0.18	0.21	0.024
TF	3.53	1.33	0.37	1.16	1.02	1.28	0.67

ค่า BCF และ TF นี้สามารถนำมาใช้พิจารณาในกระบวนการบำบัดโลหะหนักโดยใช้พืชเพื่อลดการปนเปื้อนในดินตะกอน (phytoremediation) โดยใช้กลไกต่างๆ กล่าวคือในกรณีที่ค่า BCF > 1 และ TF < 1 เป็นการบำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินตะกอนโดยใช้กลไก phytostabilization ซึ่งเป็นการตรึงหรือสะสมโลหะหนักไว้ที่รากของพืชมากกว่าการเคลื่อนย้ายส่งต่อไปในส่วนของลำต้นและใบของพืช แต่ถ้าค่า BCF > 1 และ TF > 1 จะเป็นการบำบัดโดยใช้กลไกที่เรียกว่า

phytoextraction เป็นการดูดซึมโลหะหนักจากดินตะกอนเข้าสู่รากแล้วนำไปสะสมยังส่วนของพืชที่อยู่เหนือพื้นดิน (Usman *et al*., 2012) ดังนั้นพืชสกุลแสมทั้งแสมขาวและแสมดำจากการศึกษาครั้งนี้จึงยังไม่เหมาะนำมาใช้เป็นพืชที่ช่วยบำบัดโลหะหนักในพื้นที่ป่าชายเลนชุมชนบ้านแหลมฉบัง เพราะปริมาณโลหะหนักที่ดูดซึมเข้าสู่รากนั้นมีน้อย เนื่องจากค่า Root BCF < 1 มาก ถึงแม้ค่า TF ของโลหะหนักบางชนิดมีค่า >1 ก็ตาม

สรุปผลการวิจัย

ดินตะกอนป่าชายเลนชุมชนบ้านแหลมฉบังเป็นแหล่งสะสมและกักเก็บโลหะหนักที่ดี โดยค่าสูงสุดของโลหะหนักเกือบทุกชนิดพบในบริเวณก่อนเข้าสู่ป่าชายเลนใกล้กับนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง และมีปริมาณลดลงเมื่อออกจากป่าชายเลนไปสู่ทะเล ส่วนโลหะหนักทุกชนิดภายในพื้นที่ป่าชายเลนมีค่าค่อนข้างสูง และผันแปรไปตามปริมาณสารอินทรีย์และดินตะกอนขนาดอนุภาคเล็ก ดินตะกอนในป่าชายเลนจึงช่วยลดการปนเปื้อนโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก การสะสมโลหะหนักในรากและใบของพืชป่าชายเลนสกุลแสมซึ่งประกอบด้วยแสมขาว (*A. alba)* และแสมดำ (*A. officinalis)* พบว่ามีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดโลหะหนัก และมีความสอดคล้องเช่นเดียวกับลำดับการสะสมโลหะหนักในดินตะกอน ดังนี้ เหล็ก > สังกะสี > ทองแดง > ตะกั่ว > นิเกิล > แคดเมียม > ปรอท โลหะหนักทุกชนิดมีการสะสมมากที่สุดในดินตะกอน ส่วนการสะสมในรากและใบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ พืชมีความสามารถสะสมโลหะหนักจากดินตะกอนได้น้อย โลหะหนักส่วนใหญ่จึงยังคงอยู่ในดินตะกอนไม่ถูกดูดซึมเข้าไปในเนื้อเยื่อ (ค่า BCF < 1) ส่วนการเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากรากไปสู่ใบ พบว่า ปรอท ตะกั่ว ทองแดง นิเกิล และสังกะสี มีการเคลื่อนย้ายไปสู่ใบได้ดี (ค่า TF > 1) สำหรับพืชป่าชายเลนทั้งแสมขาวและแสมดำนี้ยังไม่เหมาะนำมาใช้ในการบำบัดโลหะหนักในพื้นที่ป่าชายเลนแห่งนี้ จึงควรทำการศึกษาเพิ่มเติมกับพืชป่าชายเลนชนิดอื่นต่อไป โดยศึกษาพร้อมกันหลายชนิดเพื่อคัดเลือกชนิดที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักได้ดี รวมทั้งศึกษารูปทางเคมีของโลหะหนักในดินตะกอนด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณเป็นอย่างมากไว้ ณ โอกาสนี้ และขอขอบคุณอาจารย์อภิวิชญ์ นวลแก้ว และนักเรียนจากโรงเรียนวัดแหลมฉบัง อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ที่ช่วยในการเก็บตัวอย่าง

เอกสารอ้างอิง

Abrahim, G. M. S., & Parker, R. J. (2008). Assessment of Heavy Metal Enrichment Factors and the Degree of Contamination in Marine Sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environmental Monitoring and Assessment*, *136*, 227-238.

Abohassan, R.A. (2013). Heavy Metal Pollution in *Avicennia marina* Mangrove Systems on the Red Sea Coast of Saudi Arabia. *JKAU: Meteorology, Environment and Arid Land Agriculture Science*, 24(1), 35-53.

Baker, A.J.M., & Brooks, R.R. (1989). Terrestrial Higher Plants which Hyperaccumulate Metallic Elements- A Review of their Distribution, Ecology and Phytochemistry. *Biorecovery*, *1*, 81-126.

Buajai, S., & Pumijumnong, N. (2010). Distribution of Heavy Metals in Mangrove Sediment at the Tha Chin Estuary, Samut Sakhon Province, Thailand. *Journal of Environmental Research, 32*, 61-77.

Chakraborty, P., Chakraborty, S., Ramteke, D., & Chennuri, K. (2014). Kinetic Speciation and Bioavailability of Copper and Nickel in Mangrove Sediments. *Marine Pollution Bulletin*, *88,* 224-230.

Cuong, D.T., Bayen, S., Wurl, O., Subramanian, K., Wong, K.K.S., Sivasothi, N., & Obbard, J.P. (2005). Heavy Metal Contamination in Mangrove Habitats of Singapore. *Marine Pollution Bulletin*, *50*, 1713-1744.

Defew, L.H., Mair, M.M., & Guzman, H.M. (2005). An Assessment of Metal Contamination in Mangrove Sediments and Leaves from Punta Mala Bay, Pacific Panama. *Marine Pollution Bulletin, 5*, 547-552.

Ding, Z.H., Liu, J.I., Li, L.Q., Lin, H.N., Wu, H., & Hu, Z.Z. (2009). Distribution and Speciation of Mercury in Surficial Sediments from Main Mangrove Wetlands in China. *Marine Pollution Bulletin*, *58*, 1319-1325.

Ding, Z., Wu, H., Feng, X., Liu, J., Liu, Y., Yuan, Y., Zhang, L., Lin, G., & Jiayong, P. (2011). Distribution of Hg in Mangrove Trees and Its Implication for Hg Enrichment in the Mangrove Ecosystem. *Applied Geochemistry, 26,* 205-212.

Division of Soil Science. (1994). *Method of Soil and Plant Analysis*. Bangkok: Department of Agriculture. (in Thai)

Dudani, S.N., Lakhmapurkar, J., Gavali, D., & Patel, T. (2017). Heavy Metal Accumulation in the Mangrove Ecosystem of South Gujarat Coast, India. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *17*, 755-766.

Einollahipeer, F., Khammar, S., & Sabaghzadeh, A. (2013). A Study on Heavy Metal Concentration in Sediment and Mangrove (*Avicennia marina*) Tissues in Qeshm Islang, Persian Gulf. *Journal of Novel Applied Sciences*, *2*(10), 498-504.

Fernandes, L., Nayak, G.N., & Ilangovan, D. (2012). Geochemical Assessment of Metal Concentrations in Mangrove Sediments along Mumbai Coast, India. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, *6*, 223-228.

Gupta, S. & Chakrabarti, S.K. (2013). Mangrove - A Potential Phyto-remediator and Useful Bio-indicator against Heavy Metal Toxicity. *International Journal of Bio-resource and Stress Management, 4*(2) special, 322-327.

Harbison, P. (1986). Mangrove Muds - A Sink or Source for Trace Metals. *Marine Pollution Bulletin, 17*, 246-250.

He, B., Li, R., Chai, M., & Qiu, G. (2014). Threat of Heavy Metal Contamination in Eight Mangrove Plants from the Futian Mangrove Forest, China. *Environmental Geochemistry and Health*, *36*, 467-476.

Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*. San Diego: Academic Press.

Keshavarz, M., Mohammadikia, D., Gharibpour, F., & Dabbagh, A. (2012). Accumulation of Heavy Metals (Pb, Cd, V) in Sediment, Roots and Leaves of Mangrove Species in Sirik Creek along the Sea Coast of Oman, Iran. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, *16*(4), 323-326.

Lagaly, G., Ogawa, M., & Dékány, I. (2013). Clay Mineral-Organic Interactions. *Developments in Clay Science, 5*, 435-505.

Loring, D.H., & Rantala, R.T.T. (1992). Manual for the Geochemical Analyses of Marine Sediments and Suspended Particulate Matter. *Earth-Science Reviews*, *32*, 235 - 283.

Machado, W., Silva-Filho, E.V., Oliverira, R.R., & Lacerda, L.D. (2002). Trace Metal Retention in Mangrove Ecosystems in Guanabara Bay, SE Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, *44*, 1277-1280.

MacFarlane, G.R. & Burchett, M.D. (1999). Zinc Distribution and Excretion in the Leaves of the Grey Mangrove, *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. *Environmental and Experimental Botany*, *41*, 167-175.

MacFarlane, G.R. & Burchett, M.D. (2002). Toxicity, Growth and Accumulation Relationships of Copper, Lead and Zinc in the Grey Mangrove *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. *Marine Environmental Research*, *54,* 65-85.

MacFarlane, G.R., Pulkownik, A., & Burchett, M.D. (2003). Accumulation and Distribution of Heavy Metals in the Grey Mangrove, *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh.: Biological Indication Potential. *Environmental Pollution*, *123*, 139-151.

Marchand, C., Lallier-Vergès, E., Baltzer, F., Albèric, P., Cossa, D., & Baillif, P. (2006). Heavy Metals Distribution in Mangrove Sediment along the Mobile Coastline of French Guiana. *Marine Chemistry, 98*, 1-17.

MacFarlane, G.R., Koller, C.E., & Blomberg, S.P. (2007). Accumulation and Partitioning of Heavy Metals in Mangroves: A Synthesis of Field-based Studies. *Chemosphere*, *69*, 1454-1464.

Nazli, M.F, & Hashim, N.R. (2010). Heavy Metal Concentrations in an Important Mangrove Species, *Sonneratia caseolaris* in Peninsular Malaysia. *EnvironmentAsia, 3,* 50-55.

NIST (National Institute of Standards and Technology). (2004). *Certificate of Analysis, Standard Reference Material 1646a, Estuarine Sediment.* Gaithersburg: Measurement Service Division.

Ong Che, R.G. (1999). Concentration of 7 Heavy Metals in Sediments and Mangrove Root Samples from Mai Po, Hong Kong. *Marine Pollution Bulletin*, *39*, 269-279.

Ong, M.C., Menier, D., Shazili, N.A.M., & Kamaruzzaman, B.Y. (2013). Geochemical Characteristics of Heavy Metals Concentration in Sediments of Quiberon Bay Waters, South Brittany, France. *Oriental Journal of Chemistry, 29*(1), 39-45.

Pumijumnong, N. & Uppadit, B. (2012). Accumulation of Heavy Metals in Mangrove Sediments of Chumphon Province, Thailand. *Journal of Environmental Research, 34*, 21-38.

Rehman, W., Zeb, A., Noor, N., & Nawaz, M. (2008). Heavy Metal Pollution Assessment in Various Industries of Pakistan. *Environmental Geology*, *55*, 353-358.

Sheldrick, B.H., & Wang, C. (1993). Particle Size Distribution. In. Carter, M.R. (Ed.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. (pp. 499-511). Boca Raton: Lewis Publishers.

Sparks, D.L. (1995). *Environmental Soil Chemistry*. San Diego: Academic Press.

Tam, N.F.Y., & Wong, Y.S. (1996). Retention and Distribution of Heavy Metals in Mangrove Soils Receiving Wastewater. *Environmental Pollution, 94,* 283-291.

Tam, N.F.Y., & Wong, Y.S. (2000). Spatial Variation of Heavy Metals in Surface Sediments of Hong Kong Mangrove Swamps. *Environmental Pollution, 110*, 195-205.

Thongra-ar, W., Musika, C., Wongsudawan, W., & Munhapon, A. (2015). Distribution and Accumulation of Some Heavy Metals in Mangrove Sediments of Ban Laemchabang Community, Chon Buri Province. In. *Proceeding of the Burapha University International Conference 2015*. (pp.780-788). Bangsaen, Chonburi.

Turekian, K.K., & Wedepohl, K.H. (1961). Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust. *Geological Society of America Bulletin*, *72*, 175-192.

Usman, A.R.A., Lee, S.S., Awad, Y.M., Lim, K.J., Yang, J.E., & Ok, Y.S. (2012). Soil Pollution Assessment and Identification of Hyperaccumulating Plants in Chromated Copper Arsenate (CCA) Contaminated Sites, Korea. *Chemosphere*, *87*, 872-878.

Usman, A.R.A., Alkredaa, R.S., & Al-Wabel, M.I. (2013). Heavy Metal Contamination in Sediments and Mangroves from the Coast of Red Sea: *Avicennia marina* as Potential Metal Bioaccumulator. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *97*, 263-270.

Wat Laemchabang School. (2011). Mangrove of Ban Laemchabang Community…….. When the Mangrove Surrounded by Industrial Estate. In. *Proceeding of the 14th Mangrove National Seminar*. (pp. 455-459). Bangkok: PROTEXTS. (in Thai)

Yin, Y., Allen, H.E., Li, Y., Huang, C.P., & Sanders, P.F. (1996). Adsorption of Mercury(II) by Soil: Effects of pH, Chloride, and Organic matter. *Journal of Environmental Quality, 25*, 837-844.