

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป เป็นธาตุที่มีเลขอะตอม 23-92 และอยู่ในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ โลหะหนักกลุ่มที่ได้รับความสนใจในการศึกษากันมาก คือ พวกที่จัดอยู่ในกลุ่มของธาตุทรานซิชัน (transition elements) เช่น แคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) ปรอท (Hg) โครเมียม (Cr) โคบอลต์ (Cr) และธาตุอื่นๆ ในกลุ่มรีเพลสเซนเตตีฟ (representative elements) ได้แก่ ตะกั่ว (Pb) อาร์เซนิก (As) ซีลีเนียม (Se) เป็นต้น ลักษณะทั่วไปของทองแดง แคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสี แสดงในภาคผนวก ก

2.1 แหล่งกำเนิดของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม

ลักษณะของแหล่งกำเนิดโลหะหนักสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 แหล่งใหญ่ คือ

1. แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ ได้แก่ โลหะหนักที่ปะปนอยู่ในชั้นของเปลือกโลก ชั้นหิน และแร่ธาตุชนิดต่างๆ

2. แหล่งกำเนิดที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์ เช่น

-จากการทำอุตสาหกรรม โรงงานอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการผลิตเกี่ยวข้องกับโลหะหนักจะปลดปล่อยโลหะหนักรูปแบบต่างๆออกสู่สิ่งแวดล้อม เช่น โรงงานแบตเตอรี่ โรงงานถลุงโลหะ โรงงานฟอกย้อม เป็นต้น

-จากการเกษตร โดยการนำเอาสารเคมีมาใช้ในการเพิ่มผลผลิต ทั้งในรูปของปุ๋ยและการใช้สารปราบศัตรูพืชเพื่อป้องกันการสูญเสียผลผลิต เช่น ยากำจัดเชื้อรา ยาฆ่าหญ้าบางชนิดซึ่งจะมีทองแดงและอาร์เซนิกเป็นส่วนประกอบ

-จากแหล่งชุมชน เช่น การนำโลหะหนักไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น เป็นส่วนผสมในสีทาบ้าน ถ่านไฟฉาย น้ำมันเครื่อง เป็นต้น การขาดการจัดการกำจัดของเสียที่เหมาะสมทำให้เกิดปัญหาการแพร่กระจายของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น

-จากการทำเหมืองแร่ เช่น การขุดแร่ การชะล้าง การตกตะกอน เป็นต้น

2.2 รูปแบบของโลหะหนักในดินตะกอน

Goldberg (1954) จำแนกองค์ประกอบของดินตะกอนที่โลหะหนักอาจเข้าไปอยู่ร่วมด้วย ตามแหล่งกำเนิดออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ดังนี้ คือ

1. องค์ประกอบที่มีกำเนิดมาจากเปลือกโลก (lithogeneous components)

ดินและหินเป็นแหล่งที่มาของโลหะหนักในดินตะกอนที่สำคัญ กล่าวคือ โลหะต่างๆที่อยู่ในดินตะกอนจะมาจากดินและหินซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของดินตะกอน โดยกระบวนการเกิดของดินตะกอนสามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติและเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์

กระบวนการเกิดดินตะกอนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจะเกิดขึ้นตลอดเวลา ซึ่งเกิดจากการพัดพาของฝน ลมหรือหิมะ โดยเกิดการกัดเซาะหรือชะล้างพื้นดินหรือหินริมฝั่งแม่น้ำหรือบริเวณอื่นๆที่น้ำไหลผ่าน เศษดินและหินก็จะถูกระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติและถูกพัดพา (transport) โดยกระแส น้ำ ในระหว่างนั้นอาจมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอนุภาคและเกิดการทับถมของอนุภาคเหล่านั้น เกิดเป็นดินตะกอนที่สะสมอยู่ใต้ท้องน้ำ ดังนั้น องค์ประกอบต่างๆของดินและหินจึงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของดินตะกอนด้วย

นอกจากนี้กิจกรรมต่างๆของมนุษย์ก็มีส่วนช่วยในการทำให้ดินและหินถูกแปรสภาพเป็นดินตะกอนได้เหมือนกัน เช่น ในการทำเหมืองแร่ หินที่ได้จากการขุดเจาะเหมืองแร่ ซึ่งไม่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ แต่มีปริมาณโลหะหนักค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับหินทั่วไป จะถูกปล่อยทิ้ง เมื่อชะล้างลงในแหล่งน้ำก็จะเป็นต้นกำเนิดของดินตะกอนเช่นกัน ดังนั้น ปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนท้องน้ำจึงขึ้นอยู่กับชนิดของหินหรือดิน และแร่ธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2

2. น้ำ (Hydrogeneous formation)

ในแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีกระบวนการต่างๆที่ทำให้ปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนเปลี่ยนแปลงไป เช่น กระบวนการตกตะกอน (precipitation) การดูดซับ (adsorption) และแลกเปลี่ยนโลหะหนักที่อยู่ในน้ำกับอนุภาคของตะกอน

2.1 การตกตะกอนของโลหะหนัก (Heavy metal precipitation)

ไอออนของโลหะหนักที่มีอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติสามารถเกิดปฏิกิริยากับไอออนลบ (anion) ในน้ำเกิดเป็นสารประกอบ ถ้าสารประกอบที่เกิดขึ้นนั้นไม่ละลายน้ำ ก็จะตกตะกอนจมลงสู่พื้นท้องน้ำ ปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการตกตะกอนของไอออนโลหะ มีดังนี้

ตารางที่ 2.1 ปริมาณโลหะหนักในแร่ธาตุต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของหิน (Wedepohl, 1974)

% in Earth's crust	Cu (ppm)		Zn (ppm)		Pb (ppm)	
	range	mean	range	mean	range	mean
1 Olivine	6 - 960	115	50 - 82	63	0.2 - 7.2	2
4 Pyroxene	4 - 1,000	120	16 - 200	97	0.3 - 20	6
5 Amphibole	1 - 300	78	34 - 690	196	1 - 70	11
4 Biotite	1 - 480	86	34 - 4,000	527	7 - 95	21
2 Muscovite	5 - 152	36	24 - 200	59	6 - 70	20
42 Plagiocase	8 - 700	62	1 - 50	17	1 - 70	20
22 Alkali feldspar	1 - 20	4	10 - 24	15	2 - 700	53
18 Quartz		2	4 - 11	7	0.1 - 3	1

ตารางที่ 2.2 ปริมาณโลหะหนักที่พบในหินแกรนิต หินชั้น หินทรายและคาร์บอเนต (ppm)
(Turekian and Wedepohl, 1961)

	Granitic rock	Shales	Sandstone	Carbonates
Manganese	540	850	390	1100
Barium	420	580	190	10
Strontium	440	300	20	610
Vanadium	88	130	20	20
Boron	9	100	35	20
Zinc	60	95	16	20
Chromium	22	90	35	11
Copper	30	45	15	4
Lead	15	20	7	9
Cadmium	0.13	0.3	0.02	0.035
Mercury	0.08	0.4	0.03	0.04
Silver	0.15	0.27	0.12	0.19

ก. ความสามารถในการละลาย (Solubility)

ความสามารถในการละลายน้ำของสารประกอบที่เกิดขึ้น พิจารณาได้จากค่าคงที่ผลคูณของของความเข้มข้นเป็นโมลาร์ของไอออนในสารละลายที่อุณหภูมิใดๆ ยกกำลังด้วยจำนวนโมลของไอออนนั้น (solubility product constant, K_{sp}) ดังนี้



$$K_{sp} \text{ สำหรับ } MX_2 = [M^{2+}][X^{-}]^2$$

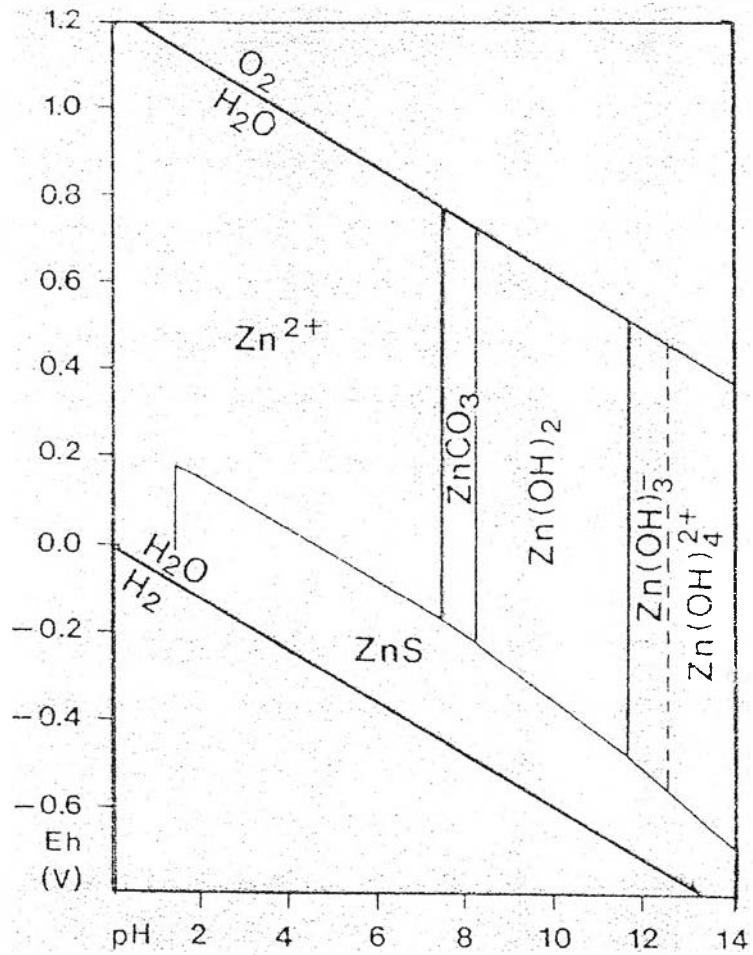
$$\text{เช่น } K_{sp} \text{ สำหรับ } PbCl_2 = [Pb^{2+}][Cl_2^{-}]^2 = 1.7 \times 10^{-5}$$

ถ้า $[Pb^{2+}][Cl_2^{-}]^2 > 1.7 \times 10^{-5}$ ก็จะทำให้ตะกั่วคลอไรด์ ($PbCl_2$) สามารถตกตะกอนได้ จะเห็นได้ว่าโลหะไอออนที่อยู่ในน้ำจะสามารถตกตะกอนได้หรือไม่จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนของโลหะนั้นๆ กับความเข้มข้นและชนิดของไอออนลบ (anionic species) เช่น ไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต ซัลไฟด์ และอื่นๆ

ข. ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction)

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันเป็นปฏิกิริยาที่มีการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอน ธาตุที่อยู่ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาจะสามารถเป็นได้ทั้งตัวออกซิไดส์และตัวรีดิวซ์ ขึ้นอยู่กับว่าธาตุนั้นเป็นตัวให้หรือรับอิเล็กตรอน และตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายโลหะหนักคือ ศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์ (Redox potential, Eh) ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่เกี่ยวข้องในการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน 1 โมล จากตัวออกซิแดนซ์ไปยังไฮโดรเจน ในสภาวะออกซิเดชัน ค่า Eh จะเป็นบวกและค่า Eh จะเป็นลบ เมื่ออยู่ในสภาวะรีดักชัน

เนื่องจากโลหะที่อยู่ในสภาวะสมดุลตามธรรมชาติจะขึ้นอยู่กับค่า Eh และ pH การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกราฟของ Eh และ pH (Eh-pH diagrams) จึงสามารถแสดง ถึงสภาพของธาตุต่างๆที่จะเสถียรในสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น Eh-pH ไดอะแกรมของสังกะสี (Hem, 1972) ดังรูปที่ 2.1 สำหรับระบบของ $Zn+S+CO_2+H_2O$ ในสภาวะปกติของแหล่งน้ำธรรมชาติ (pH อยู่ในช่วง 7.0-8.3) สังกะสีคาร์บอเนต (zinc carbonate) จะเป็นรูปแบบที่มีความเสถียรมากที่สุด และเมื่อ pH มีค่าสูงกว่า 8.3 สังกะสีไฮดรอกไซด์ (zinc hydroxide) ก็จะมีการตกตะกอน



รูปที่ 2.1 Eh-pH ไดอะแกรมของสังกะสีสำหรับระบบของ $Zn+S+CO_2+H_2O$ (Hem, 1972)

ค. การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะในสารละลาย

ในแหล่งน้ำจะมีสารที่ก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexing agent) จำนวนมากทั้งที่มาจากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ขึ้นของมนุษย์ ซึ่งอาจเป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เช่น คลอไรด์ ไบคาร์บอเนต ฟลูออไรด์ ฟอสเฟต เป็นต้น ที่สามารถทำหน้าที่เป็นลิแกนด์ (ligand) และรวมอยู่กับโลหะไอออนที่อยู่ในน้ำ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งมีทั้งประเภทที่ละลายน้ำได้และประเภทที่ไม่ละลายน้ำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะไอออน ความเข้มข้นของลิแกนด์และค่าความเป็นกรด-เบส

ดังนั้น ลิแกนด์ต่างๆที่ละลายอยู่ในน้ำจึงมีผลต่อการแพร่กระจายของโลหะหนักระหว่างของแข็ง (solid phase) กับน้ำ (aqueous phase) โดยที่โลหะหนักจะเกิดพันธะโคออร์ดิเนตกับลิแกนด์ ถ้าหากโลหะหนักเกิดพันธะกับลิแกนด์แล้วได้สารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ ก็จะทำให้เกิดการตกตะกอนลงสู่ท้องน้ำ ทำให้ปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนเพิ่มมากขึ้น

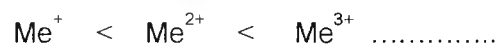
2.2 การแลกเปลี่ยนและการดูดซับไอออนบวก (Cation exchange and adsorption)

โดยปกติโลหะหนักส่วนใหญ่ที่ละลายอยู่ในน้ำภายใต้สภาวะปกติจะถูกดูดซับจากอนุภาคของแข็งต่างๆที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยอนุภาคดังกล่าวจะแย่งกับสารที่ก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexing agent) จับกับโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำ แล้วจมตัวลงสู่ท้องน้ำ นอกจากนี้อนุภาคของแข็งเหล่านี้ยังสามารถทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ (buffer) ในการควบคุมการละลายของโลหะหนักเข้าสู่ระบบน้ำธรรมชาติได้อีกด้วย

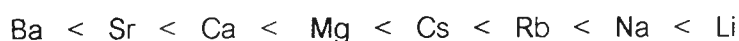
ไอออนของโลหะหนักหรือไอออนบวก แต่ละชนิดจะมีความสามารถในการจับกับตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้ (Scheffer and Schachtschabel, 1966)

ก. ผลของวาเลนซ์กับการเกิดน้ำผลึก (Valence and hydration effects)

ความสามารถของโลหะไอออนในการจับกับตัวแลกเปลี่ยนไอออนจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อโลหะไอออนนั้นมีเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้น กล่าวคือ



และความสามารถในการจับกับอนุภาคของแข็งของไอออนบวกจะเพิ่มขึ้นเมื่อการเกิดน้ำผลึก (hydration) ของไอออนบวกนั้นลดลง เนื่องจากการที่ไอออนบวกเกิดน้ำผลึกลดลง จะมีผลทำให้ความหนาแน่นของประจุเพิ่มขึ้น เช่น โลหะอัลคาไลน์ (alkaline) และโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท (alkaline earth) มีลำดับความสามารถในการจับกับอนุภาคของแข็ง ดังนี้

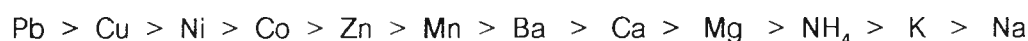


ข. ความเข้มข้นของสารละลาย (Concentration of solution)

เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จำนวนไอออนบวกที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนก็จะมีมากขึ้น จึงทำให้ไอออนบวกจับกับผิวอนุภาคของแข็งได้มากขึ้นด้วย

ค. การแลกเปลี่ยนประจุบวกบนสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ (Cation exchange on organic and inorganic substance)

สารอินทรีย์เลือกที่จะจับกับไอออนบวกที่มีประจุบวกสอง (divalent) มากกว่าพวกที่มีประจุบวกหนึ่ง (monovalent) และยังสามารถจับกับโลหะหนักได้ดีกว่าโลหะอัลคาไลน์และโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท ดังนี้



Reynolds (1935) สรุปความสามารถในการจับกับไอออนบวกของโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate หรือ Zeolites) ซึ่งเป็นตัวแลกเปลี่ยนอนินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้น ได้ดังนี้



ง. ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับไอออนบวกที่ถูกไฮโดรไลส์ (Reaction involving hydrolyzed cation)

ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่ไอออนบวกเกิดไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้ไอออนบวกเหล่านั้นเกิดการแลกเปลี่ยนได้ดีขึ้น เนื่องจากการเกิดไฮดรอกไซด์คอมเพล็กซ์ เช่น CuOH^+ , FeOH^{2+} จะทำให้สารเหล่านี้ดูดซับกับอนุภาคของแข็งได้มากกว่าไอออนบวกอิสระ (free cation) เช่น Cu^{2+} , Fe^{3+}

จ. ปฏิกิริยาที่เป็นลักษณะเฉพาะตัวระหว่างตัวแลกเปลี่ยนอนินทรีย์กับไอออนบวก (specific reaction between exchangers and cation)

เนื่องจากคุณสมบัติของตัวแลกเปลี่ยนอนินทรีย์ที่อยู่ในอนุภาคของแข็งจะแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของดินตะกอนหรือแหล่งที่มาของดินตะกอน ดังนั้น ตะกอนในแต่ละ

แหล่งน้ำจึงมีความสามารถในการจับกับไอออนบวกได้แตกต่างกันไป โดยที่อัตราเร็วของการแลกเปลี่ยนไอออนบวกจะขึ้นอยู่กับความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนของดินตะกอน

3. กระบวนการทางชีวภาพ (Biogenous formation)

โลหะหนักที่อยู่ในดินตะกอนท้องน้ำส่วนหนึ่งจะมาจากกระบวนการย่อยสลายของอินทรีย์สาร เช่น การย่อยสลายของซากพืชซากสัตว์ ในพืชแต่ละชนิดจะมีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ ซึ่งปริมาณและชนิดของโลหะหนักในพืชแต่ละชนิดก็จะต่างกัน และพืชแต่ละชนิดจะมีความต้องการโลหะหนักในกระบวนการต่างๆ เช่น ในกระบวนการสังเคราะห์แสง พืชต้องการโลหะหนักบางตัว เช่น แมงกานีส เหล็ก สังกะสี และวานาเดียม ในกระบวนการตรึงไนโตรเจนในรากพืชบางชนิดก็ต้องการเหล็ก โบรอน โมลิบดีนัม และโคบอลต์ จึงทำให้พืชมีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ และเมื่อพืชเหล่านี้ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำหรือทับถมในแหล่งน้ำ เมื่อมีการย่อยสลายหรือถูกทับถมเป็นดินตะกอน โลหะหนักที่อยู่ในพืชเหล่านี้ก็จะถูกละลายและทับถมอยู่ในดินตะกอนท้องน้ำ

4. บรรยากาศ (Atmogenous fomation)

โลหะหนักที่อยู่ในบรรยากาศนั้นมีหลายชนิด ซึ่งอาจมาจากแหล่งธรรมชาติ เช่น ฝุ่นจากการระเบิดภูเขาไฟ ฝุ่นจากการฟุ้งกระจายของหินและดิน หรือการเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีของดินและหิน ส่วนโลหะที่มาจากกิจกรรมมนุษย์ เช่น จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีการเติมโลหะหนักลงไป จากโรงงานที่เกี่ยวข้องกับโลหะหนัก

โลหะหนักที่แพร่กระจายอยู่ในบรรยากาศ หรือที่ถูกดูดซับอยู่บนอนุภาคของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ สามารถเคลื่อนย้ายลงสู่แหล่งน้ำบนผิวโลกได้เมื่อเกิดฝนตกหรือหิมะ โดยจะถูกชะล้างลงมาพร้อมกับฝนหรือหิมะ

Forstner and Wittman (1981) สรุปถึงการเคลื่อนย้าย (mobilization) โลหะหนักออกจากสารแขวนลอยในน้ำและตะกอนท้องน้ำว่ามีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะทางเคมีในน้ำ ดังนี้

ก. ความเข้มข้นของเกลือมากขึ้น เนื่องจากเกลือของโลหะอัลคาไลด์และอัลคาไลด์เอิร์ท สามารถแย่งกับไอออนบวกของโลหะหนักจับกับอนุภาคของแข็งในดินตะกอนได้ ดังนั้น

หากในแหล่งน้ำมีความเข้มข้นของเกลือของโลหะอัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ทเพิ่มขึ้นก็จะทำให้เกลือของโลหะอัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ทแย่งจับกับอนุภาคของแข็งแทนไอออนบวกของโลหะหนักมากขึ้น จึงทำให้ไอออนบวกของโลหะหนักที่เคยจับกับอนุภาคของแข็งในดินตะกอน ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น ปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนจึงลดลง

ข. การเปลี่ยนแปลงสถานะของปฏิกิริยารีดอกซ์ หากในแหล่งน้ำนั้นมีปริมาณออกซิเจนลดลง จะทำให้โลหะหนักไฮดรอกไซด์ (ในดินตะกอน) ที่อยู่ในสถานะที่ไม่ละลายน้ำ สามารถที่จะละลายน้ำได้บางส่วนหรืออาจจะละลายได้หมด ทำให้ปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนลดลง

ค. ค่า pH เมื่อน้ำมีค่า pH ต่ำ จะมีผลทำให้ตะกอนของพวกโลหะคาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์สามารถละลายในน้ำได้ จึงทำให้โลหะหนักที่จับอยู่กับคาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์ ถูกเคลื่อนย้ายออกจากตะกอน

ง. ความเข้มข้นของสารที่ก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexing agent) ทั้งที่มาจากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ขึ้นของมนุษย์ หากในแหล่งน้ำมีสารที่ก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่สามารถรวมกับไอออนของโลหะหนักแล้วได้สารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้เพิ่มมากขึ้น ก็จะทำให้ไอออนของโลหะหนักถูกเคลื่อนย้ายออกจากตะกอน แต่หากสารที่ก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน รวมกับไอออนของโลหะแล้วได้สารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อเกิดการตกตะกอนลงสู่ท้องน้ำ ก็จะทำให้ปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

2.3 โลหะหนักในดินตะกอน

ดินตะกอนโดยทั่วไปมีองค์ประกอบต่างๆกันออกไป องค์ประกอบสำคัญในดินตะกอนที่มีผลต่อการสะสมโลหะในดินตะกอน ได้แก่ องค์ประกอบพวกคาร์บอเนต ออกไซด์ของแมงกานีสและเหล็ก สารอินทรีย์ องค์ประกอบดังกล่าวเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพ redox potential ในดินตะกอน (Tessier et. al., 1979) ซึ่งมีผลทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักในดินตะกอนเปลี่ยนแปลงไปด้วย

การศึกษ ปริมาณโลหะหนักในดินตะกอน นิยมศึกษาใน 2 ลักษณะ คือ

1. การศึกษาในรูปปริมาณโลหะหนักรวมทุกรูปแบบในดินตะกอนด้วยวิธีการย่อยสลายหมด (Total Digestion) โดยทำการย่อยตัวอย่างดินตะกอนด้วยกรดเข้มข้นและสารออกซิไดส์ (oxidizing agent) อย่างแรง เช่น HNO_3 , HCl , HClO_4 เพื่อออกซิไดส์สารอินทรีย์ในดินตะกอน

และ HF เพื่อทำลายพันธะของซิลิเกตในดินตะกอน เป็นต้น (Loon, 1985)

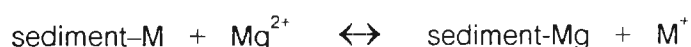
2. การศึกษาปริมาณโลหะหนักจำแนกตามแต่ละรูปแบบในดินตะกอน ด้วยวิธีการสกัดตามลำดับขั้น (Sequential extraction) โดยใช้สารสกัด (extractant) ที่มีความจำเพาะในการสกัดโลหะในแต่ละรูปแบบ วิธีการดังกล่าวทำให้สามารถแยกโลหะหนักที่อยู่ในรูป labile form ออกจาก residual phase และยังให้ข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบต่างๆที่มีผลต่อการสะสมของโลหะหนักในดินตะกอนอีกด้วย (Martin, 1987)

Chester and Voutsinou (1981) ทำการแยกโลหะหนักในดินตะกอนที่ศึกษาออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. Residual heavy metals เป็นโลหะหนักที่มีอยู่ใน crystal lattice ของโครงสร้างที่เป็น silicate matrix ในดินตะกอน จึงมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในสภาวะการผันแปรธรรมชาติ
2. Non-residual heavy metals เป็นโลหะหนักที่ดูดซับอยู่กับอนุภาคของดินตะกอนในหลายรูปแบบ เช่น เป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ในตะกอน อยู่ในรูปสารประกอบที่ละลายน้ำได้ หรือเป็นโลหะหนักที่เกิดการตกตะกอนลงสู่ดินตะกอนโดยตรง การจับตัวของโลหะหนักในรูปของ non - residual กับดินตะกอน จะอยู่ในลักษณะที่ไม่แน่นอนเท่ากับโลหะหนักในรูป residual ดังนั้น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม โลหะหนักที่อยู่ในรูปของ non - residual จึงสามารถเคลื่อนย้ายออกจากดินตะกอนและเข้าสู่ระบบนิเวศได้ง่าย การศึกษาโลหะหนักในรูปของ non-residual จึงบ่งบอกถึงภาวะการปนเปื้อนด้วยโลหะหนักที่มีสาเหตุมาจากการกระทำของมนุษย์ได้ดี

การศึกษารูปแบบของโลหะหนักในดินตะกอนได้รับการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์โลหะในแต่ละรูปแบบอย่างต่อเนื่อง โดยเลือกใช้สารสกัด (extractant) และสภาวะต่างๆที่แตกต่างกันไป เช่น วิธีการสกัดตามลำดับขั้นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ วิธีการของ Tessier et al. (1979) ซึ่งทำการปรับปรุงและพัฒนาวิธีการแยกโลหะออกเป็นรูปแบบต่างๆ สำหรับการวิเคราะห์ดินตะกอนปากแม่น้ำ โดยแยกโลหะหนักในดินตะกอนออกเป็น 5 รูปแบบ คือ

1. รูปแบบที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable) ได้แก่ โลหะหนักที่ดูดซับอยู่กับองค์ประกอบต่างๆในดินตะกอน ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของอิออนในน้ำ สารสกัดที่ใช้ต้องมีความสามารถแย่งจับกับส่วนที่จะแลกเปลี่ยนอิออนได้ดีกว่าอิออนของโลหะ เช่น $BaCl_2$, $MgCl_2$, NH_4OAc

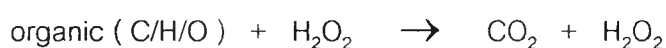


2. รูปแบบที่จับอยู่กับคาร์บอเนต (Bound to carbonate) ได้แก่ โลหะหนักที่รวมอยู่กับสารประกอบจำพวกคาร์บอเนต วัตถุประสงค์การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-เบส ใช้ HOAc/NaOAc พีเอช 5.0 หรือ complexing agent เป็นสารสกัด เพื่อให้ H^+ ในอะซิเตตไปจับกับคาร์บอเนตและปล่อยไอออนโลหะที่จับอยู่กับคาร์บอเนตอย่างหลวมๆออกมา (Pickering, 1981)



3. รูปแบบที่จับอยู่กับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ (Bound to Fe oxide and Bound to Mn oxide) สกัดด้วย reducing agent เช่น hydroxylamine hydrochloride ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$), dithionite ($\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$), oxalate ($\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$) เพื่อรีดิวซ์ Fe (III) ไปเป็น Fe (II) Mn(III) และ Mn(IV) ไปเป็น Mn(II)

4. รูปแบบที่จับอยู่กับสารอินทรีย์ (Bound to organic matter) ได้แก่ โลหะหนักที่อยู่ร่วมกับสารอินทรีย์ในดินตะกอน ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อสารอินทรีย์เหล่านี้เกิดการออกซิเดชัน หรือ degradation โดยใช้ oxidizing agent เช่น hypochlorite (OCl^-) หรือ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{HNO}_3$ เป็นสารสกัด



5. รูปแบบ residual ได้แก่ โลหะหนักที่จับยึดอยู่กับแร่ธาตุปฐมภูมิและทุติยภูมิ (primary and secondary minerals) ในโครงสร้างผลึกของแร่ในดินตะกอน ในการวิเคราะห์โลหะรูปแบบดังกล่าว จึงต้องใช้กรดและสารออกซิไดส์อย่างแรง เช่น HF และ HClO_4 เพื่อทำลายโครงสร้างซิลิเกตและสารอินทรีย์ในดินตะกอน

Tsai et al. (1998) ได้ปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์โลหะหนักจากวิธีการของ Tessier และคณะ (1979) โดยแยกการวิเคราะห์รูปแบบที่จับกับแมงกานีสออกไซด์ออกจากเหล็กออกไซด์ โดยใช้ 0.1 M $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ ใน 0.1 M HNO_3 ในการสกัดโลหะหนักรูปแบบที่จับกับแมงกานีสออกไซด์ และใช้ 0.1 M $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ ใน 25% acetic ในการสกัดโลหะหนักรูปแบบที่จับกับเหล็กออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 วิธีการศึกษาโลหะหนักด้วยวิธีการสกัดตามลำดับขั้น (Sequential extraction)

Fraction	Reactions and conditions		
	Tessier et al.,(1979)	Forstner et al.,(1981)	Tsai et al.,(1998)
Exchangeable	1M MgCl ₂ pH7	1M CH ₃ COONH ₄ pH7	1M CH ₃ COONH ₄ pH7
Carbonate	1M CH ₃ COONa, pH 5	1M CH ₃ COONa, pH 5	1M CH ₃ COONa, pH 5
Easily reducible		0.1M NH ₂ OH HCl, pH2	
- Fe oxides			0.1M NH ₂ OH HCl in 0.1M HNO ₃
- Mn oxides			0.1M NH ₂ OH HCl in 25% acetic acid
- Fe and Mn oxides	0.04M NH ₂ OH HCl in 25% acetic acid, 96°C		
Moderately reducible		0.2M (NH ₄) ₂ C ₂ O ₄ H ₂ · 0.2M H ₂ C ₂ O ₄	
Organic matter and sulphides	HNO ₃ + 30%H ₂ O ₂ , 85°C + 3.2M CH ₃ COONH ₄ in 20% HNO ₃	H ₂ O ₂ pH2+CH ₂ COONH ₄	0.1M HNO ₃ + 30%H ₂ O ₂ , 85°C + 3.2M CH ₃ COONH ₄ in 20% HNO ₃
Residual	HF, HClO ₄	HNO ₃	

2.4 การสะสมของโลหะหนักในพืชชายเลน

พืชชายเลนสามารถดูดซับโลหะหนัก เช่น ปรัอท แคดเมียม และตะกั่ว (Walsh et al., 1979) เหล็ก แมงกานีส และสังกะสี (Lacerda et al., 1986) และทองแดง (Banus, 1977) จากน้ำในดิน (interstitial water) และจากการแลกเปลี่ยนผ่าน exchange sites ของอนุภาคตะกอนและส่งผ่านไปยังส่วนใบ และสามารถนำเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารโดยผ่านการกินของสัตว์กินพืช และจากการร่วงหล่นของใบลงสู่พื้นดิน

ในพืชโดยทั่วไปพบว่า ความเข้มข้นของโลหะในเนื้อเยื่อพืชมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของโลหะในตะกอน พืชชายเลนมีข้อจำกัดในเรื่องการดูดซับโลหะ (uptake) เนื่องจากอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความเค็มสูง จึงมีกลไกที่ควบคุมปริมาณเกลือที่เข้าสู่พืช เช่น ในพืชตระกูลแอม (*Avicennia* spp.) จะมีการขับเกลือ (salt-excretion) ซึ่งกลไกดังกล่าวจะส่งผลต่อการดูดซับโลหะด้วย

Larcerda et al. (1986) พบว่าปริมาณโลหะหนักที่พบในใบพืชชายเลนและในดินตะกอนมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ (significant correlations) สำหรับเหล็กและแมงกานีส แต่ไม่มีความสัมพันธ์กันสำหรับโลหะปริมาณน้อยอื่นๆ เช่น โคโรเมียม ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี

Walsh et al. (1979) รายงานว่าการเกิดขึ้นของ sulphide ที่ไม่ละลายน้ำในดินตะกอนป่าชายเลน ทำให้ปริมาณโลหะที่จะพบได้ในพืชมีปริมาณลดลง พืชจะลดการดูดซับโลหะผ่าน ion-exclusion ในราก และกลไกการกำจัดพิษในระดับเนื้อเยื่อ

2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทโลหะหนักจากดินเข้าสู่พืช

Hague and Subramanian (1982) สรุปปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทโลหะหนักจากดินเข้าสู่พืช ดังนี้

(1) ค่า pH ของดิน เป็นปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลายของโลหะออกจากพื้นผิวของแร่ การเกิด chelate ในดิน รูปแบบของโลหะและการขนย้าย รวมทั้งการมีอยู่ในสิ่งมีชีวิต (bioaccumulation) Lindsay (1972) พบว่า ความสามารถในการละลายของสังกะสีในดินจะเพิ่มขึ้น 100 เท่า ในแต่ละหน่วยของค่าความเป็นกรด-เบสที่ลดลง

(2) ปริมาณสารอินทรีย์ในดิน เป็นปัจจัยสำคัญต่อการสะสมและการถ่ายเทโลหะหนักจากดินเข้าสู่พืช รวมทั้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับความเป็นพิษของโลหะ

(3) ปริมาณฟอสเฟตในดิน ซึ่งจะมีผลต่อการดูดตั้ง (uptake) ของโลหะ

(4) ชนิดของพืช เนื่องจากความแตกต่างทางด้านสรีรวิทยาของพืช ทำให้การสะสมโลหะหนักในพืชมีความแตกต่างกัน พืชแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการต้านทานและทนต่อโลหะที่มีอยู่ในปริมาณมากได้แตกต่างกัน

(5) การสะสมสัมพัทธ์ (relative accumulation) ในแต่ละส่วนของพืช โดยทั่วไปพบว่า ในรากจะมีการสะสมของโลหะได้สูงกว่าในส่วนยอด

(6) ช่วงระยะเวลาที่ได้รับ (exposure period) มีผลโดยตรงต่อการสะสมของพืช เช่น การดูดตั้ง (uptake) สังกะสีในต้นข้าวที่โตเต็มวัย จะมีมากกว่าข้าววัยอ่อน ในขณะที่การดูดตั้งทองแดงและตะกั่ว จะลดน้อยลงเมื่อเข้าสู่ระยะโตเต็มวัย (Takijima and Katsumi, 1973)

(7) กลไกการแข่งขันกันและการเสริมกัน (competition and synergism) ของโลหะ เช่น จากการศึกษาของ Brar and Sekhon (1976) พบว่า ทองแดงจะแข่งกับสังกะสีในการจับกันภายในเมล็ดข้าว Miller et al. (1977) พบว่า การดูดตั้งของแคดเมียมในใบอ่อนข้าวโพดจะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณตะกั่วในดินมากขึ้น

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 งานวิจัยเกี่ยวกับโลหะหนักในดินตะกอน

การศึกษารูปแบบของโลหะหนักในดินตะกอนบริเวณแม่น้ำท่าจีนตอนล่างยังไม่เคยมีการศึกษามาก่อน ส่วนใหญ่ศึกษาในรูปปริมาณโลหะหนักรวม เช่น จากการศึกษาของสนิท อักษรแก้วและคณะ (2542) ศึกษาปริมาณการสะสมของโลหะหนักในดินตะกอนบริเวณแม่น้ำท่าจีนตอนล่าง พบว่า ปริมาณแคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ในดินตะกอนจากบริเวณคลองมหาชัยมีค่าค่อนข้างสูง ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 4.6, 105.1, และ 488.6 ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ การสะสมของโลหะหนักในดินตะกอนไม่มีความแตกต่างระหว่างสถานีมากนัก ยกเว้น สังกะสีซึ่งพบการสะสมที่สถานีปากคลองภาษีเจริญและปากคลองมหาชัยสูงกว่าสถานีอื่น

การศึกษาปริมาณโลหะหนักตามรูปแบบในดินตะกอนด้วยวิธีการสกัดตามลำดับชั้นในบริเวณอื่นๆ เช่น อ่าวไทยตอนบน โดย จิระ จตุรานนท์ (2526) ศึกษาปริมาณแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสีใน 4 รูปแบบ คือ รูปแบบที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ง่าย รูปแบบที่จับกับคาร์บอเนต รูปแบบที่จับกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ และรูปแบบที่จับกับสารอินทรีย์ ในดินตะกอนผิวหน้า ตามวิธีการของ Tessier et al. (1979) พบว่าแคดเมียมในรูปแบบที่จับอยู่กับสารอินทรีย์มีความเข้มข้นสูงกว่ารูปแบบอื่นๆ ส่วนตะกั่ว และสังกะสี รูปแบบที่จับอยู่กับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์มีความเข้มข้นสูงสุด นอกจากนี้ยังศึกษาในดินตะกอนตามความลึก (0-25 ซม.) บริเวณอ่าวไทยตอนบนใกล้กับปากแม่น้ำท่าจีน พบว่า มีปริมาณทองแดงอยู่ในช่วง 18.26-24.12 ไมโครกรัม /กรัม น้ำหนักแห้ง ตะกั่ว 18.76-27.79 ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง สังกะสี 76.07-69.08 ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง ส่วนแคดเมียมไม่สามารถตรวจวัดได้

เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล (2532) ศึกษาารูปแบบทางเคมีของแคดเมียมและสังกะสีในดินตะกอนจากอ่าวไทยตอนบน พบว่า แคดเมียมอยู่ในรูปแบบ exchangeable และรูปแบบที่จับอยู่กับ carbonate มากที่สุด รองลงมาคือรูปแบบที่จับกับ oxyhydroxides และรูปแบบที่จับอยู่กับสารอินทรีย์ สังกะสีอยู่ในรูปแบบที่จับกับสารอินทรีย์มากที่สุด รองลงมาคือ รูปแบบที่จับกับ oxyhydroxide รูปแบบ exchangeable และรูปแบบที่จับกับ carbonate

อารมณี เชาวลิต (2534) ศึกษาสภาวะทางเคมีของโลหะทองแดง ตะกั่ว สังกะสี สารหนูและแคดเมียม ในตะกอนธารน้ำบริเวณต้นน้ำใกล้กับเหมืองแร่ตะกั่ว แร่ทองแดง และแร่สังกะสี จังหวัดพิจิตร พบสารหนูและแคดเมียมปริมาณสูง คือ 3.40-12.00 และ 1.15-6.32 มิลลิกรัม/กิโลกรัม โดยอยู่ในรูปแบบ exchangeable เพียงอย่างเดียว สังกะสีส่วนใหญ่ (73.86%) อยู่ในรูปของ residual ตะกั่วส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบ residual และ organic matter โดยมีปริมาณอยู่ในช่วง 9.49 -49.53 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และทองแดงส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบ residual และ organic matter และรูปแบบที่จับกับ carbonate

ลักขณา เมี้ยนกำเนิด (2539) ศึกษาการสะสมของโครเมียม ทองแดง และตะกั่วในแท่งตะกอนความลึก 40 เซนติเมตร จากสถานีอ่าวระยองและสถานีอำเภอกาญจนบุรี ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักรวม พบว่า โครเมียมและทองแดง ในดินตะกอนจากบริเวณสถานีอำเภอกาญจนบุรี มีค่าอยู่ในช่วง 48.5-58.0 และ 19.4-22.6 ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ สูงกว่าโครเมียมและทองแดงในดินตะกอนจากสถานีอ่าว

ระยอง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 38.3-48.5 และ 14.6-18.2 ไมโครกรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วน ตะกั่วจะพบในดินตะกอนจากบริเวณสถานีอ่าวระยองสูงกว่าสถานีอำเภอแกลง เท่ากับ 20.3-25.3 และ 18.4-21.3 ไมโครกรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

งานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาปริมาณโลหะหนักด้วยวิธี Sequential extraction ในต่างประเทศ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาในครั้งนี้มีดังนี้

Fizman et al. (1984) ศึกษาการแพร่กระจายของรูปแบบทางธรณีเคมี (Geochemical distribution) ของ Cu และ Zn ในดินตะกอนป่าชายเลนและดินตะกอนใกล้กับชายฝั่งบริเวณ Sepetiba Bay ประเทศ บราซิล โดยศึกษาในรูปแบบที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ รูปแบบที่จับอยู่กับสารอินทรีย์และซิลไฟด์ รูปแบบที่จับอยู่กับ oxyhydroxide ของ Fe และ Mn และพวกที่จับอยู่ใน lattice ดังแสดงใน ตารางที่ 2.4 พบว่า ในดินตะกอนป่าชายเลน Cu และ Zn อยู่ในรูปที่จับอยู่กับสารอินทรีย์และซิลไฟด์สูงที่สุด เท่ากับ 68.9 % และ 59 % ตามลำดับ ส่วนดินตะกอนใกล้ชายฝั่ง อยู่ในรูปที่จับอยู่กับ oxyhydroxide ของ Fe และ Mn สูงที่สุด เท่ากับ 56 % และ 48 % ตามลำดับ โดยพบดินตะกอนจากทั้งสองแหล่งอยู่ในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ในระดับที่ต่ำมาก

Rauret et al. (1988) ศึกษาปริมาณของโลหะทองแดงและตะกั่วในรูปแบบต่างๆในตัวอย่างดินตะกอนจากแม่น้ำ Tenes ประเทศสเปน พบว่า ทองแดงส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่จับกับสารอินทรีย์ รองลงมาคือ อยู่ในรูปแบบของ residual ส่วนตะกั่วจะอยู่ในรูปที่จับกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์มากที่สุด และไม่พบตะกั่วในรูปแบบที่สามารถแลกเปลี่ยนได้เลย

Fernandes (1997) ศึกษาการแพร่กระจายของโลหะทองแดง ตะกั่วและสังกะสี ในดินตะกอนจากบริเวณ Jacarepagua lagoonal system ซึ่งประกอบด้วย 3 lagoon ย่อย คือ Jacarepagua lagoon, Camorim lagoon และ Tijuca lagoon เก็บตัวอย่างดินตะกอนทั้งสิ้น 6 สถานี ผลการศึกษาพบว่า ทองแดงส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่จับอยู่กับสารอินทรีย์และซิลไฟด์ ตะกั่ว และสังกะสีอยู่ในรูปที่จับกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ และพบว่าการเกิดโลหะซิลไฟด์และสารเชิงซ้อนของโลหะกับสารอินทรีย์จะทำให้ความเป็นพิษของโลหะลดลง

Tsai et al. (1998) ศึกษาทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี ในดินตะกอนตามลำดับความลึก บริเวณแม่น้ำ Eii-Ren ประเทศไต้หวัน ด้วยวิธีการสกัดตามลำดับขั้นที่ปรับปรุง

มาจากวิธีของ Tessier et al. (1979) โดยศึกษาโลหะหนักในรูปของ Non-residual 5 รูปแบบ คือ รูปแบบที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ รูปแบบที่จับอยู่กับคาร์บอนเนต รูปแบบที่จับอยู่กับแมงกานีสออกไซด์ รูปแบบที่จับอยู่กับเหล็กออกไซด์ และรูปแบบที่จับอยู่กับสารอินทรีย์ ผลการศึกษา พบว่า ทองแดง ส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่จับอยู่กับสารอินทรีย์ สังกะสีส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่จับอยู่กับคาร์บอนเนต และตะกั่วอยู่ในรูปที่จับกับคาร์บอนเนตใกล้เคียงกับในรูปที่จับอยู่กับเหล็กออกไซด์ และพบว่า ปริมาณโลหะหนักในดินตะกอนตามความลึกทั้ง 5 รูปแบบ ในดินตะกอนชั้นที่อยู่ด้านล่างมีค่าต่ำกว่าดินตะกอนในชั้นบน

5.2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับโลหะหนักในพืช

Lacerda and Rezende (1994) ศึกษาปริมาณทองแดง แคดเมียม และ สังกะสีในส่วนใบของต้นแสม *Avicennia schaueriana* และดินตะกอนจากอ่าว Sepetiba ประเทศบราซิล พบว่า ในดินตะกอนมีค่าเฉลี่ยปริมาณทองแดง เท่ากับ 3.0 ไมโครกรัม/กรัม แคดเมียม 1.8 ไมโครกรัม/กรัม และสังกะสี 245 ไมโครกรัม/กรัม ในส่วนใบของต้นแสม *Avicennia schaueriana* มีค่าปริมาณทองแดงเฉลี่ย เท่ากับ 11.4 ไมโครกรัม/กรัม แคดเมียม 0.6 ไมโครกรัม /กรัม และสังกะสี 50.7 ไมโครกรัม/กรัม

Zheng et al. (1997) ได้ทำการศึกษา ปริมาณ Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Ni และ Mn ในดินตะกอนป่าชายเลนและในส่วนต่างๆของต้นโกงกาง *Rhizophora stylosa* บริเวณ Yingluo Bay ประเทศจีน พบว่า ความเข้มข้นเฉลี่ยของ Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Ni และ Mn ที่พบในต้นโกงกางเท่ากับ 0.98, 0.86, 4.91, 0.11, 0.50, 1.06 และ 14.60 ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักแห้งตามลำดับ และพบว่า ต้นโกงกางมีความสามารถในการดูดซึมโลหะแต่ละชนิดค่อนข้างต่ำ ยกเว้นแคดเมียม นอกจากนี้ยังพบว่า Pb, Cd, Cr และ Mn สะสมในใบแก่ได้มากกว่าในใบอ่อน