

## บทที่ 1

### บทนำและตรวจเอกสาร

#### 1.1 บทนำสั้นเรื่อง

โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำเป็นผลมาจากการคั่งค้างของหิน ดิน แร่ และยังคงมาจากกิจกรรมของมนุษย์ การปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำอาจกลายเป็นปัญหาสำคัญ เนื่องจากการสะสมของโลหะเหล่านี้มักจะอยู่ในลำน้ำและเอสทูรี เพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่จะถูกพัดพาออกสู่ทะเล (Zwolsman, Eck and Burger, 1996) โลหะหนักบางชนิด เช่น สังกะสี ทองแดง และเหล็ก เป็นธาตุที่มีความจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต กล่าวคือ สิ่งมีชีวิตมีความต้องการในระดับความเข้มข้นหนึ่งเพื่อดำเนินกระบวนการทางชีวเคมีภายในร่างกาย แต่หากมีความเข้มข้นที่เกินระดับหนึ่งไปแล้วก็จะเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตเหล่านั้น โลหะหนักบางชนิดไม่ได้มีความจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต และหากมีความเข้มข้นอยู่ในระดับต่ำก็จะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต แต่หากมีระดับความเข้มข้นมากถึงระดับหนึ่งก็จะก่อให้เกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิตได้ โลหะหนักเหล่านี้ ได้แก่ โครเมียม แคดเมียม และตะกั่ว เป็นต้น (Clark, 1989) อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมอาจจะไม่ได้สูงจนส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตนั้น ๆ แบบเฉียบพลัน แต่อาจจะสะสมหรือเปลี่ยนแปลงกระบวนการต่าง ๆ ในร่างกายสิ่งมีชีวิต ก่อให้เกิดความเป็นพิษแบบเรื้อรัง (Campbell *et al.*, 1988)

เนื่องจากโลหะหนักคงทนอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้เป็นเวลานาน และมีความเป็นพิษแม้มีอยู่ในปริมาณเพียงเล็กน้อย (Langston, 1990; Claisse and Alzieu, 1993) ดังนั้นเมื่อปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำแล้วอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตทั้งในทางตรงและทางอ้อม อย่างไรก็ตามโลหะหนักมีพฤติกรรมแบบไม่อนุรักษ์ รูปแบบของโลหะหนักที่อยู่ในแหล่งน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงไปมาอยู่ตลอดเวลา ซึ่งบางรูปแบบส่งผลโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิต บางรูปแบบมีศักยภาพที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต และบางรูปแบบของโลหะหนักไม่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต นั่นคือ รูปแบบที่อยู่ในโครงผลึกแร่ ซึ่งสิ่งมีชีวิตไม่สามารถดูดซึมโลหะในรูปแบบหลังนี้ไปใช้หรือสะสมในตัวมันได้ เพราะต้องใช้สภาวะเคมีที่รุนแรงเท่านั้นจึงจะสกัดออกจากโครงผลึกได้ (Campbell *et al.*, 1988) ความเป็นพิษของโลหะหนักจึงขึ้นอยู่กับรูปแบบที่ปรากฏอยู่ในสิ่งแวดล้อม ไม่ใช่ปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมนั้น ดังนั้นการตรวจวัดความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะหนัก (ทุกรูปแบบรวมกัน) ในสิ่งแวดล้อม ข้อมูลที่ได้ก็จะไม่ชัดเจนเพียงพอในการจัดการสิ่งแวดล้อม (Loring and Rantala, 1995)

การเปลี่ยนแปลงรูปแบบทางเคมีของโลหะหนักในน้ำ เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะทางฟิสิกเคมีกัล (physico-chemical condition) ของมวลน้ำ ในบริเวณแอสทรี (estuary) อิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเค็ม ดังนั้นโลหะหนักในบริเวณนี้จึงอาจแยกตัวออกจากมวลน้ำหรือละลายกลับเข้าสู่มวลน้ำได้ หรืออาจจะถูกดูดซับหรือคายออกจากตะกอนแขวนลอย (ทั้งประเภทอนินทรีย์สารและอินทรีย์สาร) ได้อีกด้วย (Salomons and Förstner, 1984) เมื่อตะกอนแขวนลอยตกตะกอนลงสู่ท้องน้ำ ก็จะพาเอาโลหะหนักที่ดูดซับอยู่กับตะกอนแขวนลอยลงไปสะสมในบริเวณท้องน้ำด้วย ซึ่งหากตะกอนมีเนื้อละเอียดจะมีคุณลักษณะทางธรณีเคมีที่เอื้อต่อการดูดซับโลหะหนักมากกว่าตะกอนเนื้อหยาบ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับมวลน้ำได้มากกว่า โลหะหนักที่ถูกดูดซับอยู่เหล่านี้มีศักยภาพพร้อมที่จะถูกปลดปล่อยกลับออกสู่มวลน้ำได้ เมื่อสภาวะทางฟิสิกเคมีกัลเปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่เป็นรอยต่อของน้ำจืดและน้ำเค็ม

บริเวณที่ลึกลงไปได้ผิวตะกอนมักมีสภาวะขาดออกซิเจน เนื่องจากการออกซิเดชันเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ จะใช้ออกซิเจนไปจนหมด จึงมักพบว่าใต้ผิวน้ำตะกอนลงไปประมาณไม่เกิน 1 เซนติเมตร จะมีค่าออกซิเจนละลายเป็นศูนย์ (Sagemann *et al.*, 1996) ที่สภาวะเช่นนี้ โลหะหนักจะมีการเปลี่ยนรูปแบบไปมาระหว่างรูปแบบที่สะสมในตะกอนกับรูปแบบที่ละลายอยู่ในน้ำระหว่างตะกอน (porewater หรือ interstitial water) หากโลหะหนักในน้ำระหว่างตะกอนนี้มีปริมาณสูง ก็มีโอกาที่จะถูกปลดปล่อยออกมาสู่มวลน้ำเหนือผิวน้ำได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำต่อไปได้ กระบวนการนี้เรียกว่า การถ่ายเทโดยการแพร่ (diffusive flux) เกิดเนื่องมาจากความแตกต่าง (gradient) ของความเข้มข้น ระหว่างโลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำระหว่างตะกอนกับที่มีอยู่ในน้ำเหนือผิวน้ำ (Tessier, Carignan and Belzile, 1994; Berner, 1980)

สำหรับในบริเวณที่ลึกลงไปมาก ๆ จะมีสภาวะรีดิวซึ่งสัมพันธ์กัน จนกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ต้องดึงออกซิเจนจากซัลเฟตมาใช้ แล้วปลดปล่อยซัลไฟด์ออกมาทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำระหว่างตะกอน เกิดเป็นโลหะซัลไฟด์ซึ่งไม่ละลายน้ำและตกตะกอนกลับไปอยู่ในรูปแบบที่ไม่ละลายอีก สำหรับในกรณีของบริเวณที่เป็นน้ำจืด ปริมาณซัลเฟตในตะกอนจะมีจำกัดกว่าตะกอนในบริเวณน้ำเค็ม ดังนั้นจึงมีกระบวนการอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย โดยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของไอออนลบ ที่มีอยู่ในน้ำ (Campbell *et al.*, 1988) กระบวนการเหล่านี้เป็นการดึงเอาโลหะหนักให้อยู่ในรูปแบบที่ไม่มีพิษต่อสิ่งมีชีวิตโดยตรง ในการจัดการสิ่งแวดล้อมบางครั้งจึงอาจจะต้องควบคุมให้บริเวณดังกล่าวมีสภาพขาดออกซิเจนต่อไปเพื่อไม่ให้โลหะส่วนนี้ออกมาส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต

ปากคลองอู่ตะเภา เป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงสถานะทางฟิสิกส์เคมีกัล เนื่องจากเป็นบริเวณรอยต่อของน้ำจืดและน้ำเค็มจากทะเลสาบสงขลาตอนนอก นอกจากนี้คลองอู่ตะเภายังเป็นแหล่งรองรับน้ำทิ้งจากชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรม จึงเป็นคลองที่เสี่ยงต่อการเกิดภาวะมลพิษ และบริเวณดังกล่าวนี้ยังมีศักยภาพที่จะเป็นแหล่งแพร่มลสารได้หากสถานะทางฟิสิกส์เคมีกัลเปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะในทางที่จะทำให้โลหะหนักเปลี่ยนจากรูปแบบไม่ละลายน้ำเป็นรูปแบบที่ละลายน้ำ เท่าที่ผ่านมาการศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนักในคลองอู่ตะเภาจะเป็นการศึกษาความเข้มข้นในตะกอนหน้าดินหรือตะกอนผิวดิน ซึ่งใช้เครื่องมือเก็บตัวอย่างที่เป็นการคัดรวมตะกอนหน้าดินเข้าด้วยกัน อีกทั้งยังไม่พบว่ามีการศึกษาปริมาณและรูปแบบของโลหะหนักที่กระจายตัวในน้ำระหว่างตะกอนตามระดับความลึกในพื้นที่นี้มาก่อน

ดังนั้นการศึกษาถึงการกระจายตัวของโลหะหนักในตะกอนและน้ำระหว่างตะกอนในพื้นที่ปากคลองอู่ตะเภาตามระดับความลึกของตะกอน จะช่วยให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของโลหะหนักในตะกอนและน้ำระหว่างตะกอนในส่วนที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต ในการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาโลหะ 5 ชนิด คือ เหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง และตะกั่ว โดยเหล็กและแมงกานีสนั้นเป็นโลหะที่ตอบสนองการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์เคมีกัลอย่างรวดเร็ว และเป็นตัวการก่อให้เกิดการสะสมของโลหะชนิดอื่นในตะกอนได้ (Salomons and Förstner, 1984) ส่วนสังกะสี ทองแดง และตะกั่ว เป็นโลหะที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตหากมีปริมาณมาก การศึกษาในเรื่องนี้จะช่วยให้ทราบถึงลักษณะการถ่ายเทของโลหะหนักจากแหล่งสะสม คือ ตะกอน ออกสู่มวลน้ำ จากการที่ตะกอนมีศักยภาพในการถ่ายเทโลหะหนักโดยการแพร่จากตะกอนสู่น้ำเหนือผิวตะกอน การประเมินศักยภาพในการเกิดการถ่ายเทของสารปนเปื้อนดังกล่าวจึงมีความจำเป็น ซึ่งการศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวของรูปแบบโลหะหนักในแหล่งน้ำ จะช่วยให้เข้าใจในเรื่องสถานการณ์ที่แท้จริงของการปนเปื้อน และสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการจัดการต่อปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำได้ดียิ่งขึ้น (Thomas, 1994; Pual, DePinto and Lick, 1994)

## 1.2 แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติและการปนเปื้อนของโลหะหนัก

โลหะหนัก หรือ โลหะปริมาณน้อย (trace metals) มีอยู่ทั่วไป โดยเป็นองค์ประกอบของแร่ภายในเปลือกโลก เมื่อนมนุษย์นำมาใช้ในรูปแบบต่าง ๆ ทำให้เกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น ตามความเป็นจริงแล้วโลหะหนักที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมจึงอาจเกิดจากการชะล้าง กัดเซาะ และพังทลายของเปลือกโลก หรือเกิดจากการกระทำของมนุษย์ อย่างไรก็ตามปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักจากสาเหตุธรรมชาตินั้นมีอยู่น้อย ส่วนใหญ่จะเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์

เหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง และตะกั่ว เป็นโลหะที่มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย โลหะทั้งห้ามีแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติที่แตกต่างกัน ดังนั้นการปนเปื้อนของโลหะแต่ละชนิดจึงอาจมีลักษณะแตกต่างกันไป

เหล็ก (Iron; Fe) พบในแร่ 4 ชนิด คือ ฮีมาไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) แมกเนไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ซิเคอไรต์ ( $\text{FeCO}_3$ ) และไลมอนต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) ทุกชนิดจะรวมตัวอยู่กับออกซิเจนทั้งสิ้น แร่เหล็กทุกชนิดที่พบในทุกแหล่ง นอกจากจะมีสภาพเป็นออกไซด์แล้ว ยังมีธาตุอื่นผสมอยู่ด้วย เช่น ซิลิกอน คาร์บอน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ และแมงกานีส เป็นต้น (ชวลิต เชียงกุล, 2542)

แมงกานีส (Manganese; Mn) ตามปกติมักในรูปของแร่ไพโรลูไซต์ (Pyrolusite) ซึ่งเป็นแมงกานีสออกไซด์ ( $\text{MnO}_2$ ) ซึ่งเป็นออกไซด์ที่มีความคงตัวมากที่สุด การปนเปื้อนของแมงกานีสในสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นเนื่องจากการนำสารประกอบแมงกานีสไปใช้ในประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม ทั้งในรูปของสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ สารประกอบแมงกานีสอินทรีย์ เช่น เหล็กกล้าผสมแมงกานีส การทำโลหะผสม (alloy) การใช้แมงกานีสออกไซด์ในการทำถ่านไฟฉาย การใช้แมงกานีสโมโนออกไซด์ ( $\text{MnO}$ ) ผสมในอาหารเลี้ยงสัตว์ปีกและสารกำจัดเชื้อรา ฯลฯ ส่วนสารประกอบแมงกานีสอนินทรีย์ ได้แก่ โซโคเพนตะไดอิล แมงกานีสไตรคาร์บอเนต (CMT) และเมทิลโซโคเพนตะไดอิล แมงกานีสไตรคาร์บอเนต (MMT) สาร MMT ถูกใช้เป็นสารกันน้ำในน้ำมันเบนซิน ไร้สารตะกั่ว และเป็นสารช่วยลดเขม่าและควันในน้ำมันดีเซลซึ่งเมื่อเผาไหม้จะกลายเป็นแมงกานีสไดออกไซด์ (วิลาวณิชย์ จึงประเสริฐ และสุรจิต สุนทรธรรม, 2542)

สังกะสี (Zinc; Zn) พบได้ในแร่สฟาเลอไรต์ ( $\text{ZnS}$ ) สมิทโซไนท์ ( $\text{ZnCO}_3$ ) เซมิมอร์ไฟท์ ( $\text{Zn}_4(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) ซิงค์ไซท์ ( $\text{ZnO}$ ) วิลเลมไมท์ ( $\text{Zn}_2(\text{SiO}_4)$ ) และแฟรงคลินไนท์ (Franklinite) (สุธรรม เข้มนิยม และงามพิศ เข้มนิยม, 2519) การปนเปื้อนของสังกะสีมาจากกิจกรรมการกลึง เชื่อม หลอม หล่อโลหะ และการทำผลิตภัณฑ์โลหะสังกะสีประเภทต่าง ๆ เช่น เหล็กแผ่น ลวด ท่อ ประปา ชิ้นส่วนวิทยุ และโทรทัศน์ กระบอกไฟฉาย ชิ้นส่วนรถยนต์ ภาชนะในครัวและแบตเตอรี่ (นฤมล อภินิเวศ และไพศาลย์ เปี่ยมเมตตาวัฒน์, 2540; ชวลิต เชียงกุล, 2542)

ทองแดง (Copper; Cu) พบในแร่แคลโคไพไรท์ ( $\text{CuFeS}_2$ ) บอร์ไนท์ ( $\text{Cu}_3\text{FeS}_4$ ) แคลโคไซท์ ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) มาลาไคท์ ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ ) อาซูไรท์ ( $\text{Cu}_5(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$ ) และคริสโซคลอรา ( $\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (สุวิชัย สัมปัดตะวานิช และงามพิศ อังคทะวานิช, 2518) การปนเปื้อนของทองแดงเกิดขึ้นเนื่องจากการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องไฟฟ้า การทำสายไฟฟ้า หัวเร่งบังคับ อุปกรณ์เครื่องเขียนและเครื่องจักร เป็นต้น นอกจากนั้นยังนำมาทำเป็นวัสดุผสม เช่น ทองเหลืองและบรอนซ์ เป็นต้น (ชวลิต เชียงกุล, 2542)

ตะกั่ว (Lead; Pb) พบได้ในแร่กาลีนา (PbS) เซอร์ไซต์ (PbCO<sub>3</sub>) แอ่งกลีไซต์ (PbSO<sub>4</sub>) เป็นต้น (สุธรรม เข้มนิม และงามพิศ เข้มนิม, 2519) การปนเปื้อนของตะกั่วนอกจากจะมาจากการทำเหมืองแร่ตะกั่วแล้ว ยังเกิดจากอุตสาหกรรมต่อเนื่องที่นำตะกั่วมาใช้ประโยชน์ ตะกั่วอินทรีย์ เช่น ตะกั่วออกไซด์ (Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) ใช้มากในโรงงานทำแบตเตอรี่และทำสี ตะกั่วโครเมท (PbCrO<sub>4</sub>) ใช้ทำสีทาบ้าน เป็นต้น ส่วนตะกั่วอินทรีย์ เช่น เตตระเมทิลเลด (tetramethyl lead) และเตตระเอทิลเลด (tetraethyl lead) ใช้เป็นสารที่ทำให้เครื่องเดินเรียบ นอกจากนี้ตะกั่วยังใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ อุตสาหกรรมผลิตแก้ว เซรามิก และเครื่องปั้นดินเผา การทำเครื่องประดับโลหะ การชุบโลหะ การทำลูกปืน การบัดกรีตะกั่ว การเรียงพิมพ์และหล่อตัวพิมพ์ การผลิตและบรรจุสารกำจัดศัตรูพืช การพ่นสีกันสนิม เป็นต้น (วิลาวัณย์ จึงประเสริฐ และ สุรจิต สุนทรธรรม, 2542)

เมื่อโลหะหนักเหล่านี้ปนเปื้อนเข้าสู่แหล่งน้ำผิวดิน (surface water) ทั้งจากกระบวนการตามธรรมชาติ และจากกิจกรรมของมนุษย์ดังที่กล่าวมา ก็จะผ่านกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีววิทยาต่าง ๆ ซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบทางเคมี (chemical transformation) มีการเคลื่อนย้ายเปลี่ยนสถานที่ (translocation) เกิดการสะสม (accumulation) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นโลหะหนักเหล่านี้ในสิ่งแวดล้อม (Allen, 1994)

### 1.3 ความสำคัญของตะกอนและรูปแบบของโลหะที่อยู่ในตะกอน

โลหะหนักที่ปนเปื้อนเข้าสู่แหล่งน้ำ ท้ายที่สุดก็จะไปสะสม (sink) อยู่ในตะกอน ที่ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตหน้าดินโดยตรง หรือกลายเป็นแหล่งที่มา (source) ของการปนเปื้อนในมวลน้ำ ก่อให้เกิดการสะสมในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต และเข้าสู่สัตว์น้ำและมนุษย์ตามสายใยอาหาร (food web)

ปัจจุบันนี้ตะกอนที่มีการปนเปื้อนกลายเป็นแหล่งที่มาสำคัญของสารพิษในแหล่งน้ำ ทั้งในบริเวณอ่าว ทะเลสาบ ตลอดจนแม่น้ำหลายสาย การบรรเทาผลกระทบในแง่ลบที่เกิดขึ้นใช้เวลานาน และมีต้นทุนสูง ทำให้หลายประเทศให้ความสนใจและให้ความสำคัญในการศึกษาตะกอนมากขึ้น ในสหรัฐอเมริกา มีหลายหน่วยงานที่เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม เช่น หน่วยงานคุ้มครองสิ่งแวดล้อม (United State-Environmental Protection Agency: US-EPA) ตลอดจนสถาบันวิจัยและสถาบันการศึกษา ได้ศึกษาวิจัยในด้านนี้ มาเป็นระยะเวลาอันยาวนานแล้ว ทั้งนี้เพื่อให้เข้าใจกระบวนการ และผลกระทบของตะกอนที่มีการปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อม (Thomas, 1994)

โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำนั้นมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบอยู่ตลอดเวลา ในบางสถานะ รูปแบบที่ละลาย (dissolved form) ก็อาจมีการจับเป็นก้อน (coagulation) ออกจากมวลน้ำเป็นคอลลอยด์ (colloid) แล้วมีการรวมตัวหรือจับกลุ่ม (flocculation) ให้มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นแล้วตก

ตะกอนลงมาสะสมบริเวณท้องน้ำ ในแหล่งน้ำที่มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ต่ำ โลหะส่วนมากจะคงอยู่ในมวลน้ำ ในขณะที่ถ้าค่าความเป็นกรดต่างสูงขึ้น (pH >7 สำหรับ แคลเมียม นิกเกิล และสังกะสี และ pH>6 สำหรับตะกั่ว) โลหะจะถูกดูดซับ (adsorb) ไว้บนอนุภาคทำให้เกิดการแยกตัวออกจากมวลน้ำด้วยกระบวนการที่เรียกว่าการตกตะกอนร่วม (co-precipitation) (Paul, DePinto and Lick, 1994) ซึ่งท้ายที่สุดแล้วก็จะตกตะกอนเป็นตะกอนท้องน้ำทำให้ตะกอนท้องน้ำเป็นแหล่งสะสมของโลหะหนัก และเมื่อตะกอนตกทับถมกัน ตะกอนที่อยู่ส่วนล่างจะเริ่มอยู่ในสภาวะขาดออกซิเจนเนื่องจากการแลกเปลี่ยนออกซิเจนกับภายนอกลดลง และการใช้ออกซิเจนไปในการย่อยสลายของสารอินทรีย์ก็ส่งผลให้ค่าพีเอชลดต่ำลง ซึ่งในสภาวะเช่นนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้น ทำให้โลหะหนักบางส่วนถูกปลดปล่อยให้ละลายออกสู่น้ำระหว่างตะกอน หรือบางส่วนอาจจะถูกตรึงไว้ในตะกอน (Salomons and Förstner, 1984; Campbell *et al.*, 1988)

รูปแบบของโลหะหนักที่ปรากฏอยู่ในตะกอนตามธรรมชาติ แบ่งเป็น 2 ส่วน (Campbell *et al.*, 1988) คือ

- 1) ส่วนของโลหะหนักที่กำเนิดเองตามธรรมชาติและแทรกตัวอยู่ในโครงผลึกแร่ มีชื่อเรียกหลายแบบว่า “crystalline metals” หรือ “lattice-held metals” หรือ “detrital metals” หรือ “non-labile metals” โลหะในส่วนนี้ไม่อยู่ในรูปแบบที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต เนื่องจากจะไม่ออกมาสู่สารละลายในสภาวะธรรมชาติตามปกติ โลหะส่วนนี้จึงเป็นส่วนที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำไปใช้ได้ หรือที่เรียกว่า “non-bioavailable metals”
- 2) ส่วนที่เกิดจากการสะสมตัวหลังจากที่องค์ประกอบหินได้ผ่านกระบวนการกัดกร่อนทางเคมี (weathering) แล้ว ส่วนนี้จะเรียก “non-crystalline metals” หรือ “non-lattice held metals” หรือ “non-detrital metals” หรือ “labile metals” การเปลี่ยนแปลงสภาวะทางฟิสิกส์เคมีก็อาจทำให้โลหะในรูปแบบนี้แยกตัวออกจากตะกอนเข้าสู่มวลน้ำได้ จึงเป็นรูปแบบของโลหะหนักที่สิ่งมีชีวิตสามารถรับเข้าไปหรือนำไปใช้ได้ (uptake) เรียกว่าเป็น “bioavailable metals” ดังนั้นจึงมีศักยภาพที่จะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตได้

โลหะหนักส่วน “bioavailable metals” ซึ่งถูกตรึงและสะสมตัวกับตะกอน แบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน คือ ส่วนที่มีการดูดซับอยู่หรือในตำแหน่งที่มีการแลกเปลี่ยนไอออน (exchangeable fraction) ส่วนที่อยู่ในรูปสารประกอบเหล็กและแมงกานีสอสัญฐาน (amorphous Fe-Mn oxyhydroxide fraction) ส่วนที่อยู่ในรูปคาร์บอเนต (carbonate fraction) และส่วนที่จับอยู่กับสารอินทรีย์ (organic fraction)

โลหะหนักส่วนที่ถูกตรึงอยู่บนตะกอนนี้ อาจมีผลโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิต เนื่องจากตะกอนที่องน้ำเป็นที่อยู่อาศัยสำคัญของสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสัตว์และพืชหน้าดิน นอกจากนี้ สัตว์บางชนิดที่อาศัยอยู่ที่ผิวดิน เช่น ปลาบางชนิด ก็มีส่วนที่จะสัมผัสกับตะกอน อาจมีการกลืนกินตะกอนเป็นอาหารทำให้มีโอกาสที่โลหะหนักจะเกิดการสะสมและถ่ายทอดผ่านสายใยอาหารต่อไป อย่างไรก็ตามก็สิ่งมีชีวิตเหล่านี้จะดูดซับโลหะหนักจากมวลน้ำ (น้ำเหนือผิวดินและน้ำระหว่างตะกอน) หรือรับจากอนุภาคที่มันสัมผัสอยู่ ได้มากหรือน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับปัจจัยทางกายภาพและเคมี (อุณหภูมิ ความเค็ม สภาวะรีดอกซ์ เป็นต้น) และปัจจัยทางชีวภาพ (อายุ ขนาด วัฏจักรการสืบพันธุ์ เป็นต้น) (Campbell *et al.*, 1988; Tessier, Buffle and Campbell, 1994) อย่างไรก็ตามก็โลหะหนักแต่ละชนิดจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ แตกต่างกันไป โดยนอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของสิ่งมีชีวิตแล้ว ยังขึ้นอยู่กับรูปแบบทางเคมี (chemical species) ของโลหะด้วย ดังแสดงในตาราง ก-1 (ภาคผนวก ก)

นอกจากนี้โลหะหนักในส่วนที่ถูกตรึงอยู่บนตะกอน อาจถูกปลดปล่อยออกสู่มวลน้ำระหว่างอนุภาคตะกอนซึ่งเป็นส่วนที่สัมผัสโดยตรงกับสิ่งมีชีวิตหน้าดิน โดยผ่านกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ การกววนตะกอน (sediment resuspension) ปฏิกริยาดูดซับและคายออก (adsorption/desorption reaction) ปฏิกริยารีดักชันและออกซิเดชัน (reduction/oxidation reaction) และกระบวนการย่อยสลาย (degradation) เป็นต้น กระบวนการเหล่านี้ อาจจะเพิ่มหรือลดความเข้มข้นของโลหะหนักส่วนที่ละลายในมวลน้ำ (Santschi *et al.*, 1990) ซึ่งหากเป็นไปได้ในทางเพิ่มความเข้มข้นก็จะเป็นการคุกคามต่อระบบนิเวศ

#### 1.4 โลหะหนักในส่วนที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (bioavailable metals) ในตะกอน

การศึกษาปริมาณโลหะหนักในส่วนที่ไม่ได้อยู่ในโครงผลึกแร่ ซึ่งเป็นรูปแบบของโลหะที่สิ่งมีชีวิตรับเข้าหรือสามารถนำไปใช้ได้ จะช่วยให้ทราบถึงปริมาณโลหะหนักที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต ดังนั้นความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการกระจายตัวและความเข้มข้นของโลหะในรูปแบบดังกล่าวจึงเป็นสิ่งสำคัญ (Maneepong, 1996; Campbell *et al.*, 1998; Fang and Hong, 1999)

ความเข้มข้นของโลหะหนักในรูปแบบที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ ในตะกอนแหล่งน้ำแต่ละแหล่ง พบว่ามีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงในตาราง 1-1 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ กิจกรรมของมนุษย์ในลุ่มน้ำนั้น และสภาวะทางเคมีของตะกอน ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ตาราง 1-1 ความเข้มข้นของเหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดงและตะกั่วในรูปแบบที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ในตะกอนจากพื้นที่ต่างๆ (หน่วย mg/kg ยกเว้นเหล็ก มีหน่วย g/kg ของน้ำหนักแห้ง)

พื้นที่ศึกษา		เหล็ก	แมงกานีส	สังกะสี	ทองแดง	ตะกั่ว	อ้างอิง
1	คลองอู่ตะเภา	0.34 – 12.34	3 - 356	1.7 – 40.5	0.30 – 17.4	0.5 – 21.6	[ 1 ]
	ทะเลสาบสงขลาตอนล่าง (เฉพาะสถานีใกล้กับปากคลองอู่ตะเภา)	0.6 - 1.2	15 - 60	2 - 12	1.8 - 4	-	[ 2 ]
	อ่าวไทยตอนบน	7.7-16.6	435-855	13.6-31.4	-	-	[ 3 ]
	อ่าวไทยตอนล่าง	5.6-17.6	192-815	11.1-34.6	-	-	[ 3 ]
	South - Western Coast (Taiwan)	4.1 – 15.2	186 - 625	3.6 – 56.4	0.4 – 16.7	0.7 – 21.8	[ 4 ]
	East China Sea	3.0 – 13.0	126 - 729	10.4 – 50.3	0.4 – 10.8	1.5 – 10.4	[ 5 ]
2	The Mouth of 5 Rivers in Laucala Bay (Fiji)	-	90-722	10.62-61.20	6.74 - 23.09	0.15 – 0.66	[ 6 ]
	Cleveland Bay, Great Barrier Reef Lagoon (Australia)	31.8	-	109	15.8	19.2	[ 7 ]
	Wellington Harbour (New Zealand)	2.73	17	54.5	14.5	180	[ 8 ]
3	Chivo Beach, Havana Bay, Havana City (Cuba)	-	-	29 - 1688	9.20 - 1277	14 - 498	[ 9 ]
	Galveston Bay, Texas (USA)	0.5-2.5	80-380	10-20	-	-	[ 10 ]
	Rivers in the Baixo Jacui Region, Rio Grande do Sol State (Brazil)	0.29 – 20.60	31 - 1715	5.58 – 72.3	0.84 – 17.3	0.36 – 10.1	[ 11 ]
4	The Mouth of the River Asopos, Southern Evoikos Gulf (Greece)	3.9 – 5.8	241 - 299	21.7 – 46.8	11.9 – 23.0	13.8 – 19.4	[ 12 ]
	Ansedonia Bay, middle Tyrrhenian Sea (ปี 1986)	2.25-2.75	335-475	18-32	-	18-22	[ 13 ]
	Ansedonia Bay, middle Tyrrhenian Sea (ปี 1988)	1.75-5.5	325-1075	15-44	3-18	22-52	[ 13 ]
	Gulf of Aden (Yemen)	0.5-1.0	50-100	10-90	5-28	50-857	[ 14 ]

หมายเหตุ : 1, 2, 3 และ 4 คือ แถบเอเชีย ออสเตรเลีย อเมริกา และยุโรป ตามลำดับ

- [ 1 ] Manepong and Angsupanich, 1999 (สกัดด้วย 1 M HCl) [ 8 ] Dickinson, Dumber and McLeod, 1996 (สกัดด้วย 0.5 M HCl)
- [ 2 ] Manepong, 1996 (สกัดด้วย 0.01 M DTPA) [ 9 ] Gonzalez *et al.*, 1999 (สกัดด้วย 0.5 N HCl)
- [ 3 ] Sompongchaiyakul, 1989 (สกัดด้วย 1 N HNO<sub>3</sub>) [ 10 ] Warnken *et al.*, 2001 (สกัดด้วย 4.5 N HOAc)
- [ 4 ] Fang and Hong, 1999 (สกัดด้วย 1 N HCl) [ 11 ] Teixeira *et al.*, 2000 (สกัดด้วย 0.1 N HCl)
- [ 5 ] Lin and Chen, 1996 (สกัดด้วย 1 N HCl) [ 12 ] Angelidis and Aloupi, 2000 (สกัดด้วย 0.5 N HCl)
- [ 6 ] Morrison, Narayan and Gangaiya, 2001 (สกัดด้วย 25 % v/v HOAc) [ 13 ] Ciceri *et al.*, 1992 (สกัดด้วย 0.3 M HCl)
- [ 7 ] Doherty, Brunskill and Ridd, 2000 (สกัดด้วย 1 M HCl) [ 14 ] Szefer *et al.*, 1999 (สกัดด้วย 1 M HCl)



## 1.5 โลหะหนักในน้ำระหว่างตะกอน (porewater)

น้ำระหว่างตะกอนเป็นน้ำที่ถูกกักไว้ในช่องว่างระหว่างตะกอน ระหว่างที่เกิดกระบวนการตกตะกอน (Van Ryssen *et al.*, 1998) ในทางเคมีสิ่งแวดล้อมของตะกอน น้ำระหว่างตะกอนมีความสำคัญมาก ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาเคมีทุกอย่างที่พบในแหล่งน้ำ ส่วนใหญ่จะเกิดในน้ำระหว่างตะกอน

น้ำระหว่างตะกอนของตะกอนแต่ละลักษณะจะมีปริมาณที่แตกต่างกัน ตะกอนที่มีลักษณะเป็นทราย (sand) หรือตะกอนที่มีส่วนผสมเป็นทรายกับทรายแป้ง (silty sand) เป็นตะกอนที่มีลักษณะหยาบ จะมีน้ำระหว่างตะกอนประมาณ 30% ส่วนตะกอนที่มีเนื้อละเอียด คือ มีส่วนผสมของอนุภาคขนาดดินเหนียว (clay) มาก จะพบว่าอาจจะมีน้ำอยู่ได้ถึง 99% (Mudroch and Azcue, 1995)

ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำระหว่างตะกอนขึ้นกับสมดุลทางเคมีขณะนั้น เมื่อสภาวะแวดล้อมเปลี่ยนไป ปริมาณโลหะหนักที่ปรากฏอยู่ในรูปแบบละลาย (dissolved form) กับรูปแบบที่เป็นอนุภาค (particulate form) จะปรับสมดุลเคมีใหม่ ทำให้รูปแบบที่ปรากฏ เปลี่ยนแปลงไปด้วย กระบวนการที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ได้แก่ กระบวนการดูด-คาย (sorption) ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ทั้งการดูดซับ (adsorption) หรือการคายออก (desorption) และกระบวนการตกตะกอนร่วม (co-precipitation) กับเหล็กและแมงกานีส เป็นต้น กระบวนการที่เกิดขึ้นเหล่านี้ จะส่งผลต่อรูปแบบของโลหะหนักที่ปรากฏอยู่ในตะกอน (Salomons and Förstner, 1984)

ความเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยที่เกิดขึ้นภายในตะกอนจะมีผลต่อน้ำระหว่างตะกอน และเนื่องจากน้ำระหว่างตะกอนเป็นตัวเชื่อมระหว่างตะกอนท้องน้ำและน้ำเหนือผิวดตะกอน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่เกิดขึ้นในตะกอนหรือในน้ำเหนือตะกอน จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำเหนือผิวดตะกอนด้วย ปัจจุบันนักวิจัยสนใจศึกษาความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำระหว่างตะกอนเพิ่มมากขึ้นเป็นลำดับ นั้นแสดงให้เห็นถึงการตระหนักถึงความสำคัญของเรื่องนี้ในสิ่งแวดล้อมทางน้ำ ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำระหว่างตะกอนในแหล่งน้ำต่าง ๆ พบว่ามีช่วงความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตาราง 1-2

ตาราง 1-2 ความเข้มข้นของเหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดงและตะกั่วในน้ำระหว่างตะกอนจากพื้นที่ต่างๆ

พื้นที่ศึกษา		ความเข้มข้น (mg/l)		ความเข้มข้น (µg/l)			อ้างอิง
		เหล็ก	แมงกานีส	สังกะสี	ทองแดง	ตะกั่ว	
1	แม่น้ำบางปะกง (เอสทูรี)	0.08-0.27	0.16-6.24	14.1-39.4	22-100	8.9-26.5	[ 1 ]
	Coastal wetland (Hong Kong)	-	-	-	40-50	-	[ 2 ]
2	Hawkesbury Sandstone Freshwater stream, (Australia)	-	-	24-210	4.0-22.2	0.6-44.0	[ 3 ]
	Manukau Harbor (New Zealand)	0.05-7.00	0.01-3.75	-	-	-	[ 4 ]
	Gulf of Papua (Papua New Guinea)	0-6.98	0-13.74	-	1.90-19.07	-	[ 5 ]
3	Galveston Bay, Texas (USA)	0.21-6.81	0.62-15.49	2.35-26.81	-	-	[ 6 ]
	Maskinonge river (Canada)	16.20-51.94	1.48-3.02	-	6.99-15.25	-	[ 7 ]
	Point Pelee Marsh, western Lake Eric, Ontario (Canada)	0.25-11.0	0.05-1.0	-	-	-	[ 8 ]
4	North-Eastern Irish Sea	0.05-2.5	0.1-12.5	-	0.1-22	1-40	[ 9 ]
	Belgian coast , Southern of the North Sea	0-16	0-9	0-0.17	2-8.9	0-38	[ 10 ]
	Ansedonia Bay, middle Tyrrhenian Sea (ปี 1986)	0.05-1.5	0.75-6.25	10-160	-	0.5-1.5	[ 11 ]
	Ansedonia Bay, middle Tyrrhenian Sea (ปี 1988)	0.05-3.0	0.80-9.5	10-45	0.5-3.25	0.1-2.4	[ 11 ]
	Deltaic Lagoon, Italy	0.21-0.68	-	-	-	-	[ 12 ]
5	Lena Delta, Laptev Sea	0.11-24.18	0-49.06	2.62- 477.35	-	-	[ 13 ]

หมายเหตุ : 1, 2, 3, 4 และ 5 คือแถบเอเชีย ออสเตรเลีย อเมริกา ยุโรป และสแกนดิเนเวีย ตามลำดับ

- |       |   |        |                                 |
|-------|---|--------|---------------------------------|
| [ 1 ] | Checvaporn, Jacinto and San Diego-McGlone, 1995 | [ 8 ]  | Mayer, Ptacek and Zanini, 1999  |
| [ 2 ] | Lau and Chu, 1999                               | [ 9 ]  | William <i>et al.</i> , 1998    |
| [ 3 ] | Hayes and Buckney, 1998                         | [ 10 ] | Baeyens <i>et al.</i> , 1986    |
| [ 4 ] | Williamson, Hume and Mol-Krijnen, 1994          | [ 11 ] | Ciceri <i>et al.</i> , 1992     |
| [ 5 ] | Alongi <i>et al.</i> , 1996                     | [ 12 ] | Viel <i>et al.</i> , 1991       |
| [ 6 ] | Warnken <i>et al.</i> , 2001                    | [ 13 ] | Nolting, Dalen and Helder, 1996 |
| [ 7 ] | Carignan, Rapin and Tessier, 1985               |        |                                 |

## 1.6 สารอินทรีย์ (organic matter)

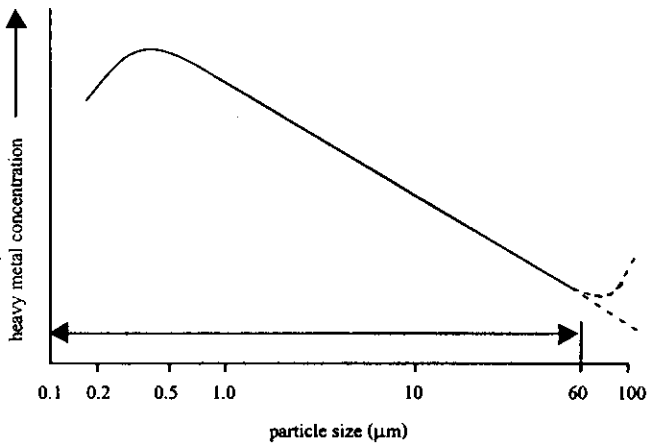
นอกจากเหล็กและแมงกานีสออกไซด์โครโคไซด์แล้ว สารอินทรีย์เป็นตัวพา (carrier) ที่มีประสิทธิภาพ ในกระบวนการการเคลื่อนย้ายโลหะหนัก (อาทิ สังกะสี โครเมียม นิกเกิล โคบอลต์ และทองแดง เป็นต้น) ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำลงสู่ตะกอน (Ergin, Kazan and Ediger, 1996) ทั้งนี้เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันจำนวนมากที่มีในสารอินทรีย์ สามารถเกิดปฏิกิริยากับแคตไอออนต่าง ๆ ในน้ำ เกิดเป็นสารประกอบกับโลหะหนักได้ สารอินทรีย์ในตะกอนจึงมีบทบาทในการเคลื่อนย้าย (transport) การสะสม (deposition) และการหน่วง (retention) โลหะหนัก (Salomons and Förstner, 1984)

สารอินทรีย์ในธรรมชาติมีอยู่หลายชนิด แต่ที่พบมากที่สุด ได้แก่ ฮิวมัส สำหรับการศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาเฉพาะสารอินทรีย์ในส่วนที่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ (readily oxidizable organic matter) เท่านั้น ซึ่งเป็นรูปแบบที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้โดยง่าย โดยเป็นการแยกสารฮิวมัสออกจากคาร์บอนอินทรีย์อื่น ๆ เช่น แกรไฟท์ (graphite) ถ่านหิน (coal) และคาร์บอนอินทรีย์ที่เชื่อมต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (Loring and Rantala, 1995)

## 1.7 ขนาดอนุภาคตะกอน

ขนาดอนุภาคเป็นองค์ประกอบของตะกอนทางกายภาพ ส่วนที่หยาบประกอบไปด้วย หินขนาดใหญ่ (boulder) หินขนาดเล็ก (cobble) กรวด (gravel) และทราย (sand) ส่วนที่ละเอียดประกอบด้วยทรายแป้ง (silt) และดินเหนียว (clay) อนุภาคในกลุ่มขนาดต่าง ๆ มีคุณลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น กลุ่มที่มีขนาดตั้งแต่ทรายและทรายแป้งขึ้นไปจะค่อนข้างหยาบ มีพื้นที่ผิวน้อย เพราะเกิดมาจากส่วนที่แตกหักของแร่และหิน โดยเฉพาะพวกควอทซ์ (quartz) ซึ่งเป็นแร่ดั้งเดิม (primary minerals) หากมีกลุ่มขนาดอนุภาคของทรายและทรายแป้งอยู่มาก ตะกอนก็จะร่วนซุย ไม่เกาะกันเป็นก้อน น้ำซึมผ่านได้ง่าย ขณะที่กลุ่มขนาดดินเหนียวซึ่งเกิดมาจากการผุพังของแร่ที่เกิดขึ้นมาใหม่ที่เรียกว่าแร่ทุติยภูมิ (secondary minerals) จะมีความละเอียดสูงและมีพื้นที่ผิวมาก (Gabler, 1982) และพบว่าโลหะหนักจะถูกดูดซับได้ดีในตะกอนที่มีเนื้อละเอียดเหล่านี้ (Burton and Liss, 1976; Unesco, 1978; Williamson, Hume and Mol-Krijnen, 1994; Fang and Hong, 1999; Ujevic, Odzak and Baric, 2000)

องค์ประกอบขนาดของอนุภาคที่ประกอบกันขึ้นเป็นตะกอนจึงมีผลต่อปริมาณ โลหะหนักที่สะสมอยู่ในตะกอน โดยทั่วไปพบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักลดลงเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคตะกอนลดลง จากภาพประกอบ 1-1 จะเห็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะหนักกับขนาดอนุภาคตะกอน อนุภาคที่มีความละเอียดกว่า ซึ่งมีดินเหนียวเป็นองค์ประกอบหลัก จะมีปริมาณโลหะหนักสูง

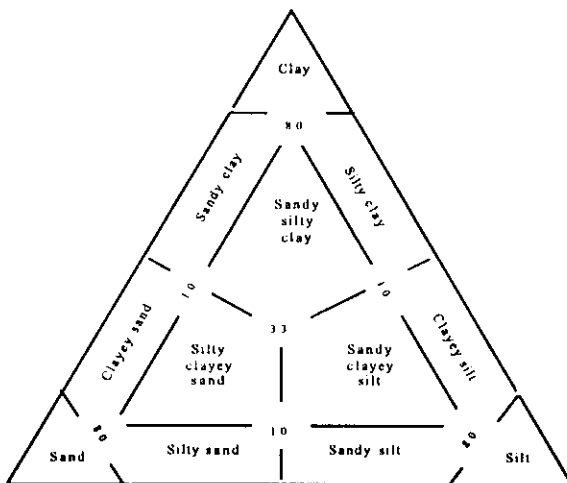


ที่มา : Förstner and Wittmann (1981)

ภาพประกอบ 1-1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะหนักกับขนาดอนุภาคตะกอน

ดังนั้นการศึกษาโลหะหนักในตะกอนเฉพาะส่วนที่มีขนาดเล็กกว่าที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 63 ไมโครเมตร โดยประมาณ จึงเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ซึ่งนอกจากจะลดความผิดพลาดในการแปรผล อันเกิดเนื่องจากความแตกต่างของขนาดอนุภาค (grain size effect) ในตัวอย่างที่แตกต่างกัน ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังทำให้ผลการศึกษาเปรียบเทียบกับงานอื่น ๆ เป็นไปได้ดีกว่าการวิเคราะห์ โดยไม่มีการแยกตะกอนขนาดหยาบออก (Förstner and Wittmann, 1981; Loring and Rantala, 1995)

ตะกอนที่มีองค์ประกอบขนาดต่าง ๆ กัน จะมีชื่อเรียกแตกต่างกันไป มาตรฐานการเรียกชื่อมีอยู่หลายแบบ โดยทุกแบบจะเป็นการกำหนดชื่อโดยอาศัยปริมาณสัมพัทธ์ของขนาดตะกอนทราย (>63 ไมโครเมตร) ทรายแป้ง (63-2 ไมโครเมตร) และดินเหนียว (<2 ไมโครเมตร) ในไดอะแกรมสามเหลี่ยมขององค์ประกอบขนาดอนุภาค ภาพประกอบ 1-2 เป็นการเรียกชื่อตะกอนตามมาตรฐานของ Gorsline (1960) (อ้างถึงใน Sompongchaiyakul, 1989)



ที่มา : Gorsline (1960) อ้างถึงใน Sompongchaiyakul (1989)

ภาพประกอบ 1-2 การเรียกชื่อตะกอนตามปริมาณสัมพัทธ์ของทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว

### 1.8 การถ่ายเทโดยการแพร่

การถ่ายเทโดยการแพร่ของโลหะหนักจากตะกอนสู่น้ำเหนือตะกอน เป็นการเคลื่อนที่ของโลหะหนักจากน้ำระหว่างตะกอนออกสู่น้ำเหนือผิวตะกอน (Berner, 1980) การแพร่ของโลหะจากตะกอนสู่น้ำเหนือผิวตะกอนจะมากหรือน้อย นอกจากจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของปริมาณโลหะหนักในน้ำระหว่างตะกอนและในน้ำเหนือผิวตะกอนแล้ว ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในตะกอนก็มีผลอย่างมาก ซึ่งปริมาณน้ำที่มีอยู่ระหว่างตะกอนนั้นขึ้นอยู่กับความพรุน (porosity) และขนาดอนุภาค (grain size) ของตะกอน

การถ่ายเทโดยการแพร่ของโลหะจากตะกอนสู่น้ำเหนือผิวตะกอน จะเป็นไปตามกฎข้อที่ 1 ของ Fick (Fick's First Law of Diffusion) (Berner, 1980; Tessier, Carignan and Belzile, 1994) ดังสมการ 1-1

Fick's First Law of Diffusion :

$$J_x = -\phi D_s \left( \frac{dc}{dz} \right)_{z=0} \tag{1-1}$$

เมื่อ

$J_i$  คือ ค่าการถ่ายเทโดยการแพร่ (diffusive flux)

$\phi$  คือ ค่าความพรุนของตะกอน หรือสัดส่วนปริมาตร (volume fraction) ของตะกอน โดยที่ 
$$\phi = \frac{V_{water}}{V_{water} + V_{solid}}$$

$D_s$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุล (molecular diffusion coefficient)

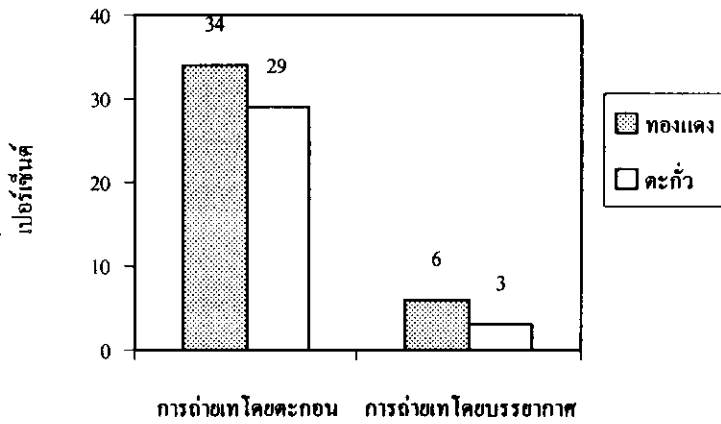
$\left(\frac{dc}{dz}\right)_{z=0}$  คือ ค่าความแตกต่างของความเข้มข้น (concentration gradient) ที่บริเวณรอยต่อระหว่างตะกอนและน้ำ โดยที่

$dc$  คือ ค่าความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของโลหะในน้ำเหนือผิวตะกอนและในน้ำระหว่างตะกอนที่ส่วนบนสุดของตะกอน (1 เซนติเมตร)

$dz$  คือ ค่าระยะห่างระหว่างน้ำเหนือผิวตะกอนและน้ำระหว่างตะกอนชั้นบนสุด (ให้มีค่าเท่ากับ 1 เซนติเมตร)

จากการศึกษาการถ่ายเททองแดง ตะกั่ว และแมงกานีส จากตะกอนสู่มวลน้ำ โดยการแพร่ในทะเลไอริชด้านตะวันออกเฉียงเหนือ (northeastern Irish sea) โดยใช้วิธีคำนวณความแตกต่างของความเข้มข้นของโลหะที่ละลายอยู่ในน้ำระหว่างตะกอนและในน้ำเหนือผิวตะกอน ทำให้พบว่าการปนเปื้อนของทองแดงและตะกั่วในบริเวณนี้มาจากการถ่ายเทระหว่างตะกอนและน้ำ (sediment-water flux: sedimental input) มากกว่าได้รับมาจากบรรยากาศ (atmospheric input) (Williams *et al.*, 1998) ดังแสดงในภาพประกอบ 1-3 ซึ่งการถ่ายเทโลหะในลักษณะเช่นนี้มีความสำคัญ เพราะจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมบริเวณนั้นในระยะยาว ผลการศึกษาการถ่ายเทโลหะหนักโดยการแพร่จากตะกอนส่วนใหญ่จะอยู่ในพื้นที่แถบยุโรปและอเมริกา ดังแสดงไว้ในตาราง 1-3

ในประเทศไทยมีการศึกษาการถ่ายเทโลหะหนักโดยการแพร่ ในบริเวณแอสทรีของแม่น้ำบางปะกงโดย Cheevaporn, Jacinto and San Diego-McGlone (1995) ผลการศึกษาพบว่าปริมาณโลหะที่พบมากในตะกอนผิวหน้าบริเวณแอสทรี อาจได้รับอิทธิพลจากกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในตะกอน โดยเป็นผลมาจากการเกิดกระบวนการไดอะเจเนซิส (diagenesis) ภายในตะกอน ส่งผลให้โลหะมีค่าสูงในน้ำระหว่างตะกอน และเกิดการแพร่ออกสู่น้ำผิวตะกอน อย่างไรก็ตามโลหะเหล่านี้สามารถกลับเข้าสู่ตะกอนได้อีกโดยกระบวนการตกตะกอนทับถม (deposition) และสรุปว่าการที่ตะกอนผิวหน้ามีปริมาณโลหะสูงไม่จำเป็นว่าจะจะเป็นผลมาจากการปนเปื้อนจากกิจกรรมของมนุษย์ แต่เพียงอย่างเดียว แต่อาจเป็นผลสืบเนื่องมาจากกระบวนการไดอะเจเนซิสที่เกิดขึ้นภายในตะกอนได้ด้วยเช่นกัน



ภาพประกอบ 1-3 การประมาณค่าการถ่ายเทโลหะบริเวณทะเลไอริสตะวันออกเฉียงเหนือ

ตาราง 1-3 ค่าการถ่ายเทโดยการแพร่ของเหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดงและตะกั่วจากพื้นที่ต่างๆ

พื้นที่	ค่าการถ่ายเทโดยการแพร่ ( $\mu\text{g cm}^{-2} \text{yr}^{-1}$ )					อ้างอิง
	เหล็ก	แมงกานีส	สังกะสี	ทองแดง	ตะกั่ว	
แม่น้ำบางปะกง (เอสทูรี)	-	-	1.50 - 2.30	2.10 - 4.80	1.50 - 2.50	[ 1 ]
North-Eastern Irish Sea	-	200 - 730	-	0.53 - 4.20	0.73 - 2.50	[ 2 ]
Gulf of Papua	-83.57 - 1192.43	46.12 - 1215.17	-	-	-	[ 3 ]
Weser river (estuary) (ประเทศเยอรมัน)	-	-	-	-0.46 - 2.09	-	[ 4 ]
Ansedonia Bay, middle Tyrrhenian Sea (ปี 1986)	9.64	683.28	16.64	-	-0.77	[ 5 ]
Ansedonia Bay, middle Tyrrhenian Sea (ปี 1988)	12.26	1401.60	3.59	-0.05	-0.86	[ 5 ]
Belgian coast (ตอนใต้ของทะเลเหนือ)	-	-	12.61 - 72.53	1.32 - 8.83	0.35 - 1.10	[ 6 ]
Scheldt estuary (ตอนใต้ของทะเลเหนือ)	-	-	61.18	12.87	2.80	[ 6 ]
Conway Estuary (Wales)	6.43	59.20	2.57	2.60	3.73	[ 7 ]
Tees Estuary (England)	-	-	0.76	4.10	-	[ 7 ]

หมายเหตุ :

- |  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| [ 1 ] Cheevaporn, Jancinto and San Diego-McGlone, 1995 | [ 5 ] Ciceri <i>et al.</i> , 1992   |
| [ 2 ] William <i>et al.</i> , 1998                     | [ 6 ] Baeyens <i>et al.</i> , 1986  |
| [ 3 ] Alongi <i>et al.</i> , 1996                      | [ 7 ] Elderfield and Hepworth, 1975 |
| [ 4 ] Skowronek <i>et al.</i> , 1994                   |                                     |

การถ่ายเทของโลหะจากตะกอนสู่มวลน้ำผิวหน้าโดยการแพร่แตกต่างกันไปตามสถานที่ ในบางบริเวณบางบริเวณพบค่าการถ่ายเทมีค่าเป็นลบ แสดงว่าให้เห็นว่าทิศทางของการแพร่ของโลหะเป็นไปในทิศทางตรงข้าม คือ จากมวลน้ำสู่ตะกอน อย่างไรก็ตามในบริเวณเอสทูรีที่ความเข้มข้นของโลหะในมวลน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาเมื่อความเค็มเปลี่ยนแปลงไป (เนื่องจากกระบวนการทางธรณีเคมีที่เกิดขึ้น) ปริมาณและทิศทางของการแพร่อาจเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งหากสามารถทำนายได้ก็สามารถควบคุมหรือจัดการเพื่อปรับปรุงคุณภาพสิ่งแวดล้อมในด้านนี้ได้ดีขึ้น

## 1.9 สภาพทั่วไปของพื้นที่ลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา

### 1.9.1 คุณลักษณะของลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา

ลุ่มน้ำอู่ตะเภาครอบคลุมพื้นที่ 2,305 ตารางกิโลเมตร และตั้งอยู่ในลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำนี้ประกอบด้วยดินทรายเป็นส่วนใหญ่ ลักษณะของภูมิประเทศเป็นเทือกเขาสูงทางทิศตะวันตก พื้นที่ตอนกลางเป็นที่ราบตะกอนแม่น้ำทับถม โดยมีคลองอู่ตะเภาเป็นลำน้ำสำคัญที่สุดในลุ่มน้ำ (วินัย แซ่จิว, 2539) คลองอู่ตะเภามีความยาวประมาณ 68 กิโลเมตร มีคลองเล็ก ๆ หลายสายไหลมารวมกัน ได้แก่ คลองवाद ซึ่งมีต้นน้ำจากเทือกเขาบรรทัด คลองดำ คลองจำไทร คลองหอยโข่ง คลองสะเดา ซึ่งมีต้นน้ำจากเทือกเขาสนกาลาศิริ คลองอู่ตะเภาจะไหลผ่านเขตอำเภอสะเดาและเขตอำเภอหาดใหญ่ โดยลงสู่ทะเลสาบสงขลาที่บ้านแหลมโพธิ์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา (สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 12, 2543)

อัตราการไหลของน้ำในคลองอู่ตะเภาผันแปรตามฤดูกาลในช่วงกว้าง ในฤดูแล้งมีอัตราการไหลน้อยกว่า 6 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และมากกว่า 90 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีในฤดูฝน โดยปกติความแตกต่างของระดับน้ำขึ้นลงบริเวณปากคลองอู่ตะเภามีค่าประมาณ 25 เซนติเมตร (วินัย แซ่จิว, 2539) ในฤดูแล้งน้ำเค็มสามารถรุกเข้าในคลองอู่ตะเภาได้ถึง 12 กิโลเมตร (บริเวณบ้านนารังนก) ทำให้เกิดการผสมผสานกันของน้ำจืดและน้ำเค็ม ลักษณะการผสมผสานจะเป็นแบบการผสมกันบางส่วน (partially mixed) จากนั้นจะเปลี่ยนเป็นน้ำจืดอย่างฉับพลัน ซึ่งการหยุดการรุกตัวของน้ำเค็มอย่างฉับพลันอาจเป็นสาเหตุของการคืนเงินในบางบริเวณ เช่น ที่บ้านหาร ความเค็มของน้ำในคลองอู่ตะเภาจะไวต่ออัตราการไหลของน้ำท่าและการเปลี่ยนแปลงความเค็มในทะเลสาบสงขลา (สมบูรณ์พรพิเนตพงศ์, 2541)

### 1.9.2 สภาพภูมิอากาศ

สภาพภูมิอากาศในพื้นที่ลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภาเป็นแบบร้อนชื้น ในเดือนพฤษภาคม-ตุลาคมได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ส่วนเดือนพฤศจิกายน-มกราคมจะได้รับอิทธิพลจาก



ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งทำให้เกิดฝนตกหนัก ภูมิภาคอากาศมหภาคแบ่งเป็น 2 ฤดู คือ เดือน กุมภาพันธ์-สิงหาคม เป็นฤดูแล้ง และกันยายน-มกราคม เป็นฤดูฝน จากการหาเฉลี่ยสภาพอุตุนิยมวิทยาที่วัดได้จากสถานีวัดอากาศท่าอากาศยานหาดใหญ่ โดยกรมอุตุนิยมวิทยา ระหว่าง ปี พ.ศ. 2516-2540 พบว่าโดยทั่วไปจะมีฝนตกเกือบทั้งปี เฉลี่ยต่อปีประมาณ 1,720 มิลลิเมตร อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุดเฉลี่ยตลอดปีมีค่า 31.4 และ 22.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และอัตราการระเหยเฉลี่ยเท่ากับ 1,650 มิลลิเมตรต่อปี (सानิชย์ สังข์ชุม, 2545)

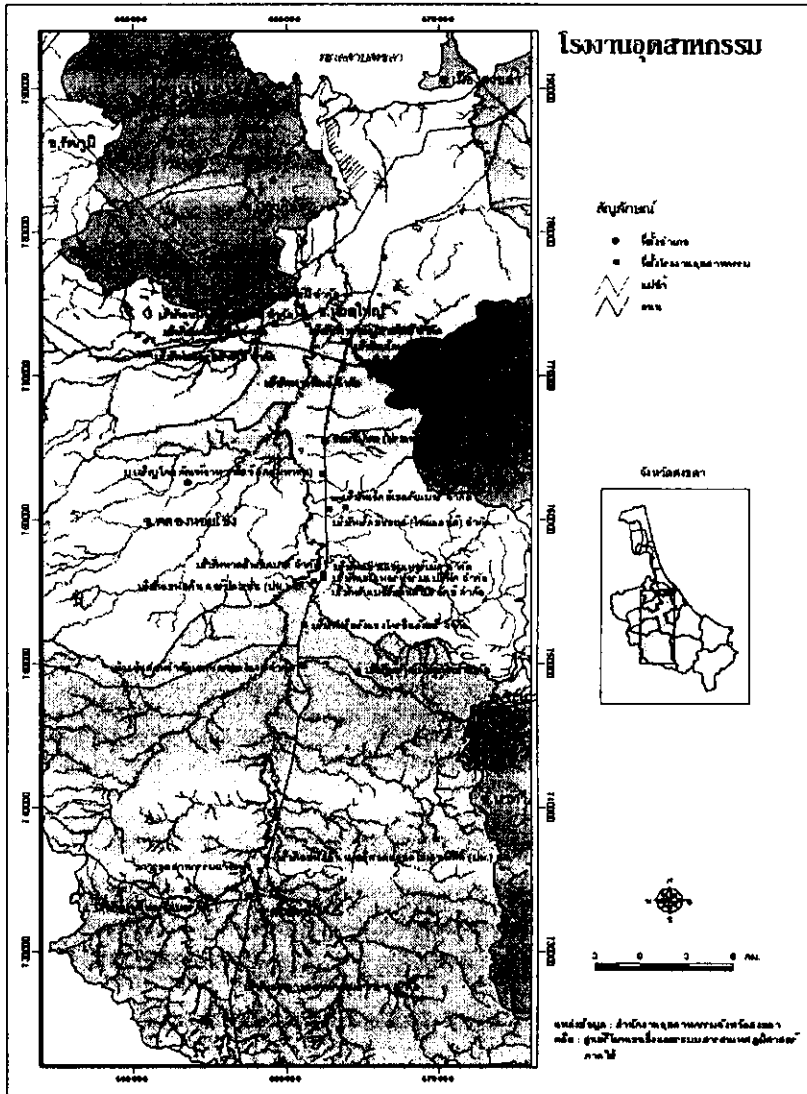
### 1.9.3 การใช้ประโยชน์คลองอุตะเถา

คลองอุตะเถาเป็นแหล่งน้ำที่ชุมชนบริเวณพื้นที่รับน้ำ นำมาใช้ประโยชน์มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตอำเภอหาดใหญ่และอำเภอเมืองสงขลา การใช้ประโยชน์ที่สำคัญ คือ

- 1) เป็นแหล่งน้ำดิบ ในการผลิตน้ำประปาสำหรับเทศบาลเมืองหาดใหญ่และสงขลา และพื้นที่เชื่อมต่อระหว่างหาดใหญ่กับสงขลา
- 2) เป็นแหล่งรองรับน้ำทิ้ง จากชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรม (รายละเอียดของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยน้ำทิ้งลงสู่คลองอุตะเถาแสดงใน ตาราง ข-1 (ภาคผนวก ข))
- 3) การใช้ประโยชน์ของราษฎรที่อยู่ทางท้ายน้ำของคลองอุตะเถา เพื่อการอุปโภค-บริโภค การเพาะปลูก การประมง และการคมนาคม เป็นต้น

### 1.9.4 การปนเปื้อนโลหะหนักในคลองอุตะเถา

ลุ่มน้ำคลองอุตะเถามีโรงงานอุตสาหกรรมประเภทและขนาดต่าง ๆ กัน เป็นจำนวนมาก ดังแสดงในภาพประกอบ 1-4 และตาราง ข-1 (ภาคผนวก ข) โรงงานเหล่านี้ระบายน้ำทิ้งลงสู่คลองทั้งโดยตรงและโดยอ้อม ทำให้คลองอุตะเถาคือรองรับน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมประมาณ 41,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน นับว่าเป็นแหล่งน้ำตามธรรมชาติที่ต้องรองรับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมมากที่สุดในบรรดาแหล่งน้ำอื่นของพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา (สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 12, 2543) นอกจากนี้คลองอุตะเถายังรองรับน้ำเสียจากชุมชนและธุรกิจบริการประเภทต่าง ๆ ทั้งจากเทศบาลนครหาดใหญ่ เทศบาลตำบลบ้านพรุ องค์การบริหารส่วนตำบลคอหงส์ องค์การบริหารส่วนตำบลคลองแห เทศบาลตำบลสะเดา เทศบาลตำบลพังลา เทศบาลตำบลปรีกและเทศบาลตำบลพะตง เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่จะปล่อยน้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดลงสู่คลองอุตะเถา (สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 12 และสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 11, 2542)



ที่มา : ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ภาคใต้, 2541

ภาพประกอบ 1-4 อุตสาหกรรมบางประเภทที่อยู่บริเวณคลองอู่ตะเภา

จากปริมาณน้ำทิ้งจำนวนมากที่ปล่อยลงสู่คลองอู่ตะเภา ทำให้บริเวณดังกล่าวมีโอกาสที่จะเป็นแหล่งสะสมของโลหะหนักได้ เนื่องจากน้ำทิ้งที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งมาจากแหล่งอุตสาหกรรมที่อาจมีโลหะหนักปนเปื้อน เช่น อุตสาหกรรมกลึงเชื่อมโลหะ การพิมพ์หรือบรรจุภัณฑ์ การทำไม้และเฟอร์นิเจอร์ อุตสาหกรรมยางและน้ำยาง อุตสาหกรรมอาหารสัตว์ เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้มีการใช้สารเคมีที่มีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบอยู่

เนื่องจากในบริเวณที่เป็นรอยต่อของน้ำจืดกับน้ำเค็ม โลหะหนักจะถูกดูดซับและสะสมไว้ในตะกอน โดยเฉพาะบริเวณที่ตะกอนมีเนื้อละเอียด ยังเป็นการเอื้อให้บริเวณดังกล่าวเป็นแหล่งสะสมโลหะหนักมากขึ้น ดังรายละเอียดที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ตะกอนคลองอยู่ตะเภาเป็นตะกอนที่มีสัดส่วนขนาดอนุภาคดินเหนียว ทรายแป้ง และทราย แตกต่างกันไปตลอดลำน้ำ โดยพบว่าการตกตะกอนของอนุภาคแขวนลอยจะเกิดขึ้นมากในช่วง 2 กิโลเมตร จากปากคลองอยู่ตะเภา ซึ่งเป็นช่วงรอยต่อของการเปลี่ยนแปลงความเค็ม ทำให้ตะกอนในบริเวณนี้มีอนุภาคขนาดดินเหนียวอยู่มาก และในบางบริเวณพบว่าตะกอนมีขนาดละเอียดกว่าตะกอนในทะเลสาบสงขลา ถัดเข้ามาในลำน้ำพบว่า เป็นบริเวณของการกักตะกอน ยกเว้นบริเวณที่มีคลองสายย่อยไหลมาบรรจบ เช่น คลองวาดและคลองเตย ซึ่งกระแสน้ำจะเกิดการปะทะแล้วเปลี่ยนแปลงความเร็ว บริเวณนี้ก็จะพบว่า การตกตะกอนของอนุภาคแขวนลอยเกิดขึ้นมากเช่นเดียวกัน (สมศักดิ์ มณีพงศ์, 2538) เท่าที่ผ่านมาการศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนักในคลองอยู่ตะเภา ดังแสดงในตาราง 1-4 เป็นการหาความเข้มข้นของสารมลพิษดังกล่าวในตะกอนหน้าดินหรือตะกอนผิวดิน โดยการเก็บตัวอย่างด้วยอุปกรณ์ตักดิน (grab sampler)

ตาราง 1 - 4 ปริมาณโลหะหนักในตะกอนคลองอยู่ตะเภา

ปีที่ศึกษา	ปริมาณ (มิลลิกรัม / กิโลกรัม)									อ้างอิง
	ปรอท	ตะกั่ว	แคดเมียม	ทองแดง	สังกะสี	นิกเกิล	โครเมียม	เหล็ก	แมงกานีส	
2535 <sup>*</sup>	< 0.02	7.44-21.86	0.91-2.96	-	-	-	-	-	-	[ 1 ]
2536 <sup>*</sup>	< 0.02	6.18-15.32	0.97- 4.35	-	-	-	-	-	-	[ 1 ]
2539 <sup>**</sup>	-	0.5- 21.6	< 0.1 - 0.3	0.3 -17.4	1.7- 40.5	0.4 - 4.0	0.2 - 3.0	340 - 12,343	3 - 356	[ 2 ]

หมายเหตุ : \* ศึกษาความเข้มข้นทั้งหมด (total concentration) ของโลหะหนัก

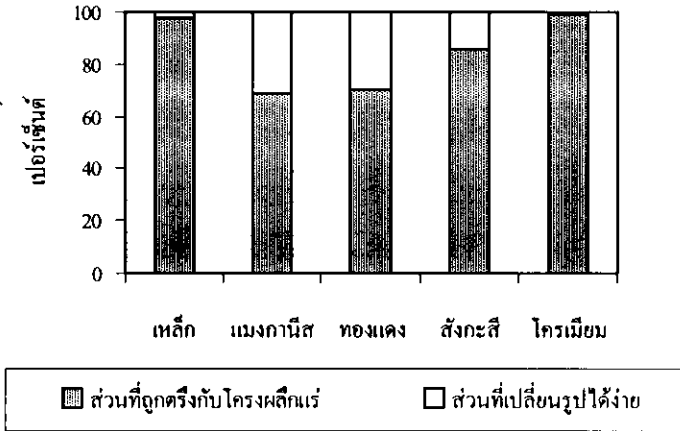
\*\* ศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักในรูปแบบที่สามารถละลายได้ใน IM HCl

[ 1 ] วินิตา อธิไกรสิน, 2538

[ 2 ] Manepong and Angsupanich, 1999

ข้อมูลปริมาณโลหะหนักในตะกอนคลองอยู่ตะเภาและทะเลสาบสงขลาตอนล่าง ส่วนใหญ่จะหาความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะ ปริมาณโลหะในรูปแบบที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้เพิ่งเริ่มรายงานโดย Manepong (1996) และ Manepong and Angsupanich (1999) Manepong (1996) พบว่าเหล็ก แมงกานีส ทองแดง สังกะสี และโครเมียม อยู่ในรูปแบบที่เปลี่ยนรูปได้ง่าย (labile) เพียง

ร้อยละ 2.5, 31.4, 29.5, 13.9 และ <0.5 ของความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะในตะกอน ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 1-5



ภาพประกอบ 1- 5 สัดส่วนของโลหะส่วนที่เปลี่ยนรูปได้ง่ายและส่วนที่ถูกต้องกับโครงผลึกแร่ ในตะกอนผิวหน้าจากทะเลสาบสงขลาตอนนอก

### 1.10 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณและรูปแบบของเหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง และตะกั่ว ที่กระจายตัวอยู่ในตะกอนและน้ำระหว่างตะกอนที่มีความลึกต่าง ๆ กัน
- 2) เพื่อศึกษาความสำคัญของเหล็กและแมงกานีส ต่อการสะสมของสังกะสี ทองแดง และตะกั่ว ในตะกอน โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของสังกะสี ทองแดง และตะกั่ว กับสัดส่วนของเหล็กและแมงกานีสทั้งในตะกอนและน้ำระหว่างตะกอน
- 3) เพื่อศึกษาความสำคัญของสารอินทรีย์ต่อการสะสมของเหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง และตะกั่ว ในตะกอน โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของโลหะที่ปรากฏในตะกอนและน้ำระหว่างตะกอนกับสัดส่วนของสารอินทรีย์ในตะกอน
- 4) กำหนดผลการถ่ายเทโดยการแพร่ของเหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง และตะกั่ว

### 1.11 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษาโลหะหนักที่แยกศึกษาตามรูปแบบจะได้ข้อมูลปริมาณ โลหะหนักที่สามารถใช้อธิบายในทางสิ่งแวดล้อมได้ชัดเจนกว่าการศึกษาโลหะรวมทุกรูปแบบ และข้อมูลโลหะหนักในน้ำระหว่างตะกอนจะช่วยให้รู้และเข้าใจการถ่ายเทของโลหะหนักที่สะสมในตะกอนออกสู่มวลน้ำที่อยู่เหนือตะกอน ซึ่งเป็นส่วนที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตโดยตรง ข้อมูลที่ได้นี้ยังสามารถที่จะนำไปใช้ร่วมกับข้อมูลทางชีววิทยา นิเวศวิทยา และข้อมูลอื่น ๆ เพื่อให้เข้าใจกลไกในระบบธรรมชาติที่ควบคุมพฤติกรรมและความเป็นพิษของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมทางน้ำ นอกจากนี้ข้อมูลโลหะหนักเฉพาะในส่วนที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต เมื่อนำไปใช้ในการแปรผลในเชิงพิษวิทยา และการประเมินความเสี่ยงของผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต จะทำให้งานเหล่านั้นมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากขึ้น ซึ่งทำให้การวางแผนการจัดการทางน้ำมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น