บทที่ 1

บทนำ

การพัฒนาด้านการเกษตร อุตสาหกรรม และการขยายตัวของชุมชนในปัจจุบัน มีผลทำให้เกิดการแพร่กระจายของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมมากขึ้น การใช้ปุ๋ยและยาฆ่าแมลง ซึ่งมีส่วนผสมของโลหะหนัก น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน ซึ่งมีโลหะต่าง ๆ เจือปนอยู่ เช่น ตะกั่ว ปรอท ทองแดง สังกะสี ฯลฯ เป็นสาเหตุทำให้โลหะหนักแพร่กระจายลงไปในแหล่งน้ำ ในตะกอน และสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ซึ่งอาศัยอยู่ในแหล่งน้ำนั้น ปัจจุบันพบว่าน่านน้ำไทยหลายบริเวณมีแนวโน้มการปนเปื้อนของโลหะหนักเพิ่มมากขึ้น จากรายงานการศึกษาถึงปริมาณการแพร่กระจายของโลหะหนักในน่านน้ำไทย และในสัตว์ทะเล โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณอ่าวไทยและชายฝั่งตะวันออก ซึ่งเป็นแหล่งรองรับน้ำทิ้งต่าง ๆ จากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำและในตะกอนค่อนข้างสูง โดยเฉพาะโลหะปรอทและตะกั่ว (อำไพ อิทธิเกษม, 2521; อำไพ อิทธิเกษม, รัชนีกร บำรุงราชหิรัญย์, ไพฑูรย์ วรรณทงษ์ และขันธ์พงศ์ จริงจิตร, 2524) และบริเวณใกล้แหล่งอุตสาหกรรม แหล่งท่องเที่ยว แหล่งชุมชน โลหะในน้ำและในตะกอนจะมีค่าสูงกว่าในเขตที่ห่างไกลออกไป (เจริญ วัชระรังษี และคณะ 2524; Menasveta and Sawangwong, 1977) อย่างไรก็ดี ค่าเฉลี่ยโดยทั่วไปของโลหะในน้ำ ในตะกอน และในสัตว์ทะเล ยังอยู่ในเกณฑ์ต่ำกว่าค่าปลอดภัย (สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2524; อรพินท์ จันทร์ผ่องแสง, 2527; รัชนีกร บำรุงราชหิรัญย์, วรรณา จ่ายราช และขันธ์พงศ์ จริงจิตร, 2527; สุธรรม สิทธิชัยเกษม และสุวรรณี เฉินบำรุง 2527; Hungspreugs, 1982) ถึงแม้ว่าปริมาณโลหะหนักที่พบในปัจจุบันจะยังอยู่ในเกณฑ์ต่ำ แต่เนื่องจากสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ สามารถสะสมไว้ในร่างกายได้ และเพิ่มปริมาณสูงขึ้นตามห่วงโซ่อาหาร (Menasveta, 1976) ซึ่งสามารถถ่ายทอดไปยังมนุษย์ผู้บริโภค และอาจเป็นอันตรายถึงชีวิตได้ เมื่อได้รับโลหะเข้าสู่ร่างกายในปริมาณสูง เช่น โลหะปรอทเป็นต้น การศึกษาปริมาณโลหะสะสมในสิ่งมีชีวิต นับเป็นข้อมูลหนึ่งซึ่งจะบ่งบอกให้ทราบถึงระดับอันตรายของผู้บริโภค และสภาวะปัจจุบันของปริมาณโลหะในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะใน

สัตว์พวกปลา มีผู้สนใจศึกษากันมาก เช่น เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต, พิชาญ สว่างวงศ์ และชลีรัตน์ พยอมแย้ม, 2520; พิชาญ สว่างวงศ์, 2520; แววตา ทองระอา, พรทิพย์ ตัตตะวะศาสตร์, รวิวรรณ สังขศิลา และสุพจน์ ฐิตธรรมไม, 2530; Polprasert, Vongvisessomjai, Lohani, Muttamara, Arbhabhirama, Traichaiyaporn,Khan and Wangsuphachart,1979; Menasveta and Cheevaparanapiwat,1981 และ Hanson and Hoss, 1986 เป็นต้น เนื่องจากปลาเป็นสัตว์น้ำที่อยู่ลำดับขั้นสูงสุดของห่วงโซ่อาหารในทะเล ซึ่งคนส่วนใหญ่นิยมบริโภคและยังเป็นทรัพยากรที่สำคัญทางเศรษฐกิจ

สำหรับพื้นที่ชายฝั่งทะเลตะวันออก โดยเฉพาะบริเวณอ่าวไทย จังหวัดระยอง รัฐบาลได้กำหนดแนวทางการพัฒนาให้เป็นแหล่งอุตสาหกรรมที่สำคัญ เช่น โรงงานแยกก๊าซ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมปุ๋ยเคมี และท่าเรือน้ำลึก (สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาพื้นที่บริเวณฝั่งตะวันออก, 2529) การพัฒนาพื้นที่ดังกล่าวอาจก่อให้เกิดมลภาวะของโลหะหนักในทะเลเพิ่มขึ้น เนื่องจากการปล่อยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชนริมชายฝั่งลงสู่แหล่งน้ำหรือทะเล จึงควรมีการศึกษาถึงปริมาณการแพร่กระจายของโลหะในน้ำ ในตะกอน และปริมาณโลหะสะสมในสัตว์ทะเล รวมทั้งปริมาณโลหะที่ถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหารว่าในปัจจุบันมีปริมาณมากน้อยเพียงใด เพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางป้องกันปัญหามลภาวะอันอาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต

แนวทางในการศึกษาเพื่อหาปริมาณของโลหะทองแดง สังกะสี และตะกั่วที่สะสมอยู่ในห่วงโซ่อาหารของหมึกและปลากินเนื้อ ได้แก่ แพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ ปลาแป้น ปลาอมไข่ หมึกกล้วย หมึกกระดอง ปลาทรายแดง ปลาตาไต และปลาปากคม ในบริเวณ เขต 1 (จังหวัดตราด) และเขต 2 (จังหวัดระยองและจันทบุรี) โดยจะนำมาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะดังกล่าวในห่วงโซ่อาหารแต่ละบริเวณ ในช่วงเวลา 2 ฤดูกาล คือเดือนเมษายนและเดือนพฤศจิกายน 2530 และนำมาเปรียบเทียบการแพร่กระจายของโลหะในน้ำทะเลและในตะกอน ซึ่งเก็บจากพื้นที่แหล่งเดียวกัน

การสำรวจเอกสาร

ชีววิทยาบางประการของหมึกกล้วย หมึกกระดอง ปลาทรายแดง ปลาตาไต และปลาปากคม

หมึกกล้วย

หมึกกล้วย จัดอยู่ในครอบครัว Lolignidae พบแพร่กระจายอยู่ทั่วทุกเขตของอ่าวไทย จำนวนชนิดที่สำรวจพบมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ Loligo formosana (Sasaki), Lologo duvaucelii (d' Orbigny) และ Loligo tagoi (Sasaki) เป็นต้น สำหรับชนิด L. formosana และ L. duvaucelii จะมีความชุกชุมสูงสุดในบริเวณเขต 1 (จังหวัดตราด) และเขต 2 (จังหวัดระยองและจันทบุรี) หมึกกล้วยจะพบแพร่กระจายอยู่ในระดับความลึกประมาณ 20-29 เมตร และปริมาณความชุกชุมของหมึกแต่ละชนิดจะเพิ่มขึ้นตามระดับความลึกของน้ำ หมึกกล้วยชนิด L. duvaucelii จะมีความชุกชุมสูงสุดในระดับความลึก 30-39 เมตร และชนิด L. formosana จะมีความชุกชุมสูงสุดที่ระดับความลึกมากกว่า 40 เมตรขึ้นไป (เฉลียว ชลธาร, 2522) จากรายงานการศึกษาของ ทิวา รัตนอนันต์ (2521) พบว่า หมึกกล้วยจะมีฤดูการวางไข่ตลอดทั้งปี ในหมึกกล้วยชนิด L. formosana ขั้นสมบูรณ์ของไข่แก่จะมีเปอร์เซนต์สูงสุดในเดือนพฤษภาคม รองลงมาคือเดือนพฤศจิกายน หมึกที่มีขนาดความยาวตั้งแต่ 150-185 มม. จะมีความดกของไข่ประมาณ 800-7,000 ฟอง และในหมึกชนิด L. duvaucelii จะมีฤดูการวางไข่ในเดือนพฤษภาคม และระหว่างเดือนสิงหาคม-กันยายน โดยมีขนาดความยาวของลำตัวประมาณ 12.35 ซม. (วรรณเกียรติ ทับทิมแสง, 2526) สำหรับชนิดของอาหารที่พบในกระเพาะของหมึกกล้วย ทิวา รัตนอนันต์ (2522) รายงานว่า อาหารส่วนใหญ่จะเป็นปลา รองลงมาคือหมึก และพวกครัสตาเซียน

หมึกกระดอง

หมึกกระดอง จัดอยู่ในครอบครัว Sepiidae จำนวนชนิดที่พบแพร่กระจายทั่วทุกเขตของอ่าวไทย มีอยู่ด้วยกัน 6 ชนิด ได้แก่ Sepia pharaonis (Ehrenberg), Sepia lycidas (Gray), Sepia aculeata (Ferussac & d' Orbigny), Sepia recurvirostra (Steenstrup) และ Sepia brevimana (Steenstrup) ลักษณะการแพร่กระจายของหมึกกระดอง จะมีความชุกชุมที่ระดับความลึก 20-29 เมตร ส่วนในระดับความลึก 10-19 เมตร, 30-39 เมตร และมากกว่า 40 เมตรขึ้นไป หมึกประเภทนี้จะมีความชุกชุมลด

ลงตามลำดับ (เฉลียว ชลธาร, 2522) หมึกกระดองจะมีการวางไข่ตลอดทั้งปี ในหมึกชนิด S. aculeata เพศเมียจะมีไข่แก่พร้อมที่จะวางไข่ในขนาดความยาวของลำตัวตั้งแต่ 80 มม. ขึ้นไป และจะมีการวางไข่ปริมาณสูงในช่วงเดือนมีนาคม-เมษายน และเดือนกรกฎาคม-กันยายน โดยมีความดกของไข่ตั้งแต่ 787-3,912 ฟอง (เจิดจินดา ไชติยะปุตตะ, 2522, 2523) และในหมึกชนิด S. recurvirostra จะมีการวางไข่ในเดือนพฤศจิกายน-กุมภาพันธ์ และเดือนมิถุนายน-กันยายน ซึ่งปริมาณของการวางไข่ในช่วงแรกจะสูงกว่าช่วงที่ 2 ขนาดลำตัวของหมึกที่มีการวางไข่จะมีความยาวตั้งแต่ 70-100 มม. และมีความดกของไข่เฉลี่ยประมาณ 746 ฟอง (เจิดจินดา ไชติยะปุตตะ, 2524) สำหรับชนิดของอาหารที่พบในกระเพาะของหมึกกระดองส่วนใหญ่ ได้แก่ ครัสตาเซียนชนิดต่าง ๆ รองลงมาคือ ปลาและหมึก ซึ่งพบน้อยมาก (เจิดจินดา ไชติยะปุตตะ, 2522, 2524)

ปลาทรายแดง

ปลาทรายแดง หรือปลาแดง เป็นปลาหน้าดินที่สำคัญและมีคุณค่าทางเศรษฐกิจของไทยชนิดหนึ่ง ถูกจำแนกอยู่ในสกุล Nemipterus ครอบครัว Nemipteridae ซึ่งมีจำนวนชนิดมากถึง 12 ชนิด (Wongratana, 1968) โดยทั่วไปจะพบปลาทรายแดงแพร่กระจายอยู่ในน่านน้ำไทยทั่วทุกบริเวณ ประภา วัฒนกูล (2523) รายงานว่า ปลาทรายแดงชนิด Nemipterus nematophorus ซึ่งพบในอ่าวไทย จะมีฤดูการวางไข่เกือบตลอดปี โดยเฉพาะบริเวณอ่าวไทยฝั่งตะวันออก จะมีการวางไข่มากในเดือนพฤศจิกายนและเดือนมีนาคม ส่วนอ่าวไทยฝั่งตะวันตกตอนบน จะมีการวางไข่มากในเดือนมกราคม-มีนาคม และเดือนสิงหาคม และอ่าวไทยฝั่งตะวันตกตอนล่าง จะมีการวางไข่มากในเดือนมกราคม-เมษายน สิงหาคมและพฤศจิกายน ขนาดของปลาที่มีการวางไข่ครั้งแรกมีความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 11.7 ซม. และโดยทั่วไปตัวผู้จะมีความยาวมากกว่าตัวเมีย สำหรับชนิดและองค์ประกอบของอาหารปลาทรายแดงทั้งเพศผู้และเพศเมียจะมีนิสัยการกินอาหารเกือบคล้ายคลึงกันในทุก ๆ ขั้นตอนการเจริญเติบโต องค์ประกอบของอาหารส่วนใหญ่จะเป็นกุ้ง 55.96% รองลงมาเป็นพวกปลา 34.52% หมึก 9.42% และหนอน 0.10% (สุมณฑา อินทอง, 2520)

ปลาตาโต

ปลาตาโต หรือปลาตาหวาน (Priacanthus tayenus) จัดอยู่ในครอบครัว

Priacanthidae ปัจจุบันจัดเป็นปลาที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่ง มีปริมาณความชุกชุมมาก และพบแพร่กระจายอยู่ทั่วตลอดทั้งอ่าวไทย (Ristragsa, 1969) ปลาชนิดนี้นอกจากจะพบในอ่าวไทยแล้วยังมีอยู่ทั่วไป ตั้งแต่น่านน้ำมหาสมุทรอินเดียจนถึงแหลมมลายู (Day, 1958) นอกจากนี้ยังพบว่ามีอยู่แถบแอตแลนติคตอนใต้และอินโดแปซิฟิค (Fowler, 1967) และบริเวณทะเลจีน เกาะฟอร์โมซา ฟิลิปปินส์ และใต้ลงไปจนถึงอินเดียตะวันออก (Okada, 1955) จากการศึกษาของ วิชัย ชมจุรัย (2523) พบว่า ปลาตาโตจะวางไข่เป็นระยะยาวนานเกือบตลอดทั้งปี จำนวนไข่ที่พบในปลาขนาดความยาว 178 และ 190 มม. มีประมาณ 23,000 และ 26,000 ฟอง ตามลำดับ และความยาวเฉลี่ยของตัวผู้จะยาวกว่าตัวเมีย 12.64 มม. อาหารของปลาตาโตส่วนใหญ่จะเป็นพวกกุ้ง ปู ปลา หนอน และสัตว์เล็ก ๆ อื่น ๆ สุดแท้แต่จะมีมากน้อยเพียงใด (Munro, 1967) จากการศึกษาชนิดและองค์ประกอบของอาหารในกระเพาะปลาตาโต สุมณฑา อินทอง (2525a) รายงานว่าชนิดของอาหารส่วนใหญ่จะเป็นพวกปลา เช่น ปลาแป้น ปลาอมไข่ ปลาบู่แคระ และลูกปลาอื่น ๆ ประมาณ 46.96% รองลงมาเป็นกุ้ง 34.99% หอย 7.19% ปู 4.20% กั้ง 2.69% หมึก 2.60% และเคย 1.36% นอกจากนี้ยังพบว่าในปลาตาโตแต่ละขนาด องค์ประกอบของอาหารไม่มีความแตกต่างกัน

ปลาปากคม

ปลาปากคม หรือปลาตุ๊กแก (Lizard fish) จัดอยู่ในครอบครัว Synodontidae จำนวนชนิดที่สำรวจพบในอ่าวไทยมีอยู่ด้วยกัน 7 ชนิด (Shindo and Yamada, 1972) แต่ชนิดที่พบแพร่กระจายทั่วทุกเขตของอ่าวไทย และมีคุณค่าทางเศรษฐกิจมีเพียง 2 ชนิด คือ Saurida undosquamis (Richardson) และ Saurida elongata (Temminck & Schlegel) (สมศักดิ์ ปราไมกช์ชุติมา, 2521; มณฑล เอี่ยมสะอาด และดิเรก ธรรมนิยม, 2523) สำหรับปลาปากคมทั้งสองชนิด เพศเมียจะมีขนาดยาวกว่าเพศผู้ (ทวีป บุญวานิช และสุพัตรา อมรชัยไรจนกุล, 2525a, 2525b) และจะมีการวางไข่ตลอดทั้งปี ในปลาชนิด S. undosquamis จะวางไข่ครั้งแรกเมื่อมีความยาวเท่ากับ 16.25 ซม. ส่วนชนิด S. elongata จะวางไข่ครั้งแรกเมื่อขนาดความยาวเท่ากับ 22.25 ซม. ช่วงระยะเวลาของการวางไข่พบมากในเดือนมกราคม-มีนาคม และในเดือนกรกฎาคม-กันยายน (ประภา วัฒนกุล, 2526) แหล่งของการวางไข่จะอยู่ในน้ำลึกประมาณ 51-55 เมตร และมีความเค็มของน้ำระหว่าง 33.17-33.24 ppt (ทวีศักดิ์ ชาญประเสริญพร, 2522) แหล่งวางไข่ที่พบในเขต

อ่าวไทยฝั่งตะวันออก คือตั้งแต่จังหวัดระยองถึงตราด อ่าวไทยฝั่งตะวันตก ตั้งแต่จังหวัดประจวบ ฯ ถึงชุมพร และฝั่งทะเลตอนใต้ของอ่าวไทยในเขตจังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา และปัตตานี (ประภา วัฒนกุล, 2526)

องค์ประกอบของอาหารในปลาปากคม ชนิด S. undosquamis ส่วนใหญ่เป็นพวกปลามากที่สุดคือประมาณ 18.06% รองลงมาเป็นพวกครัสตาเซียน (Crustaceans) 7.38% และเซฟฮาโลพอด (Cephalopods) 0.19% ชนิดของปลาที่พบมากที่สุด คือปลาแป้น ปลาไส้ตันและปลากะตัก ส่วนปลาที่พบน้อยที่สุดคือ ปลาอมไข่ (สุมณฑา อินทอง, 2519) ส่วนในปลาปากคมชนิด S. elongata ที่อาศัยอยู่ในน้ำลึก 20-40 เมตร องค์ประกอบของอาหารส่วนใหญ่จะเป็นปลากะตัก รองลงมาเป็นหมึก และในบริเวณน้ำลึกมากกว่า 40 เมตร อาหารที่มีความสำคัญจะเป็นพวกปลาแป้น หมึก และปลาข้างเหลือง ซึ่งอาจสรุปได้ว่าองค์ประกอบของอาหารในปลาปากคมชนิดนี้จะเป็นปลา 86.74% หมึก 10.64% กุ้ง 1.27% หอย 0.04% และชิ้นส่วนต่าง ๆ อีกประมาณ 1.31% (สุมณฑา อินทอง, 2525b)

<u>โลหะหนักในสิ่งแวดล้อมทางทะเล</u>

<u>แหล่งกำเนิดของโลหะในน้ำ</u>

แหล่งกำเนิดทางธรรมชาติของโลหะในน้ำส่วนใหญ่มาจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของหินบนผิวโลก โดยทั่วไปจะพบโลหะเจือปนอยู่ในหินปริมาณเพียงเล็กน้อย เช่น โลหะตะกั่วจะพบเจือปนอยู่ในหินอัคคีและหินแปรประมาณ 10-20 ไมโครกรัมต่อกรัม และประมาณ 10-70 ไมโครกรัมต่อกรัมในหินปูน หรือมากกว่า 100 ไมโครกรัมต่อกรัมในหินฟอสเฟตบางชนิด (WHO, 1983) นอกจากโลหะจะเกิดจากการผุพังของหินที่ผิวหน้าแล้ว แหล่งสำคัญของโลหะในทะเลส่วนใหญ่จะมาจากการกระทำของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะตะกั่ว WHO (1983) รายงานว่า ปริมาณการเผาไหม้ของโลหะตะกั่วในรูป lead alkyl จะทำให้เกิดไอของตะกั่วแพร่กระจายอยู่ในชั้นบรรยากาศถึง 61% และโดยการทับถมของโลหะจากชั้นบรรยากาศลงสู่แม่น้ำและทะเล Copin-Montegut, Courau and Nicolas (1986) รายงานว่ามนุษย์ทำให้โลหะตะกั่วถูกปล่อยลงสู่มหาสมุทรแอตแลนติค มีปริมาณสูงถึง 250 ตันต่อปี และจากรายงานการศึกษาปริมาณโลหะที่ไหลลงสู่มหาสมุทรแอนแลนติค Keeney-Kennicutt and Presley (1986) พบว่ามีปริมาณสูงเป็น 40 เท่าของขบวนการต่าง ๆ ที่เกิดจากธรรมชาติ

การแพร่กระจายของโลหะในน้ำทะเล

แม่น้ำถือเป็นแหล่งสำคัญที่ส่งโลหะลงสู่ทะเล ส่วนประกอบของน้ำในแม่น้ำรวมทั้งผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ซึ่งเกิดจากการกัดกร่อนของหิน จากการชะล้างบนแผ่นดินและจากชั้นบรรยากาศในรูปของฝุ่นละอองหรือไอจะถูกนำพาลงสู่แม่น้ำ Albert, Leyden and Patterson (1976) ได้สรุปว่า โลหะหนักในน้ำทะเลส่วนใหญ่โดยทั่วไปมาจากสิ่งเจือปนต่าง ๆ ที่มนุษย์ทิ้งลงไปในแม่น้ำ ซึ่งจากการศึกษาความไว (sensitivity) ของน้ำทะเลชายฝั่ง Yeats, Bewers and Walton (1978) พบว่า ระดับความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชายฝั่งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดการพัดพาของปริมาณโลหะจากแม่น้ำลงสู่ทะเล

สิ่งเจือปนต่าง ๆ ในน้ำ ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารแขวนลอยและมีบทบาทต่อปริมาณความเข้มข้นของโลหะที่ละลายอยู่ในน้ำ (Kremling, 1985) จากการศึกษาของ Rebello, Haekel, Santelli and Schroeder (1986) พบว่า น้ำในแม่น้ำและลำธารหลายสายซึ่งเป็นแหล่งรองรับน้ำทิ้งน้ำเสียจากบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ จะมีปริมาณสารแขวนลอยเฉลี่ย 70-80 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสารแขวนลอยเหล่านี้ประมาณ 40-100 เปอร์เซนต์ จะอยู่ในรูปสารอินทรีย์ และจากการศึกษาของ Wallace, Hoffman and Duce (1977) พบว่าสารอินทรีย์จะมีอิทธิพลต่อปริมาณความเข้มข้นของโลหะในน้ำและโลหะที่ล่องลอยอยู่ในชั้นของบรรยากาศเหนือน้ำทะเลนั้น โดยสารอินทรีย์สามารถรวมตัวกับโลหะในชั้นบรรยากาศเป็นชั้นฟิล์มบาง ๆ ที่ผิวหน้า และโดยการกระทำของคลื่น จะทำให้ชั้นฟิล์มบาง ๆ เหล่านั้นแตกกระจายออกเป็นฟองเล็ก ๆ อันเป็นเหตุให้โลหะถูกส่งลงสู่คอลัมน์น้ำ และเกิดการแพร่กระจายลงไปตามแนวดิ่ง (Wallace and Duce, 1978)

โดยทั่วไปค่าความเข้มข้นของโลหะที่ผิวหน้าจะสูงกว่าในชั้นน้ำที่อยู่ลึกลงไป (Frache, Manfrinetti, Piccazzo and Tucci, 1976) จากรายงานการศึกษาปริมาณการแพร่กระจายของโลหะในน้ำทะเลบริเวณมหาสมุทรแอตแลนติค Buckley and Van Den Berg (1986) พบว่า ค่าความเข้มข้นของโลหะทองแดงที่ผิวหน้า 1800 nM จะลดลงเหลือประมาณ 6-20 nM ในระดับน้ำที่ลึกลงไป เช่นเดียวกับโลหะตะกั่ว Copin-Montegut, Courau and Nicolas (1986) รายงานว่า โลหะตะกั่วที่ผิวหน้าค่าระหว่าง 50-150 ng/l จะค่อย ๆ ลดลงเหลือประมาณ 20-25 ng/l ตามระดับความลึกของน้ำ ปรากฏการณ์การลดลงของโลหะตามความลึกที่เกิดขึ้น Ishimori, Harada and Tsunogai (1985) ได้อธิบายว่าอนุภาคของสิ่งมีชีวิต (biogenic particles) เป็นตัวการสำคัญที่ควบคุมปริมาณการแพร่กระจายของโลหะบางชนิดในแนวดิ่ง โดยการเคลื่อนย้ายโลหะที่ผิวหน้าลงสู่คอลัมน์น้ำและแพร่กระจายลงไปตามความลึก และโดยการศึกษาของ Wangersky (1986) ได้สรุปว่า ปริมาณความเข้มข้นของโลหะในน้ำทะเลที่ผิวหน้า ส่วนใหญ่จะถูกควบคุมโดยขบวนการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีของสารชีวภาพในทะเล โดยอาศัยขบวนการนี้ โลหะจะถูกเคลื่อนย้ายออกจากน้ำ และถูกทำให้กลับคืนสู่น้ำทะเลอีก โดยการย่อยสลายของแบคทีเรียและจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กอื่น ๆ เช่น แพลงก์ตอน ซึ่งมีความสามารถที่จะดูดซับโลหะจำนวนมากและเคลื่อนย้ายออกจากน้ำทะเล ไปอยู่ในสิ่งมีชีวิตระดับที่สูงกว่าในห่วงโซ่อาหาร แล้วเกิดการแพร่กระจายไปสู่สิ่งแวดล้อมในทะเลในรูปของกาก หรือซากที่เน่าเปื่อยผุพังรวมทั้งของเสียต่าง ๆ ทำให้เกิดขบวนการคืนกลับของโลหะ

ในรูปที่เป็นสารแขวนลอยในน้ำอีก (Duce, Quinn, Olney, Piotrowicz, Ray and Wade, 1972; Knauer and Martin, 1973)

นอกจากปัจจัยทางชีวภาพจะมีอิทธิพลต่อปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในทะเลแล้ว Knauer and Martin (1973) ยังพบว่า การเปลี่ยนแปลงทางอุทกวิทยา (hydrological fluctuation) จะมีผลต่อระดับความเข้มข้นของโลหะในบริเวณผิวน้ำใกล้ฝั่งมากกว่าปัจจัยทางชีวภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเวลาที่มีการเกิดน้ำผุด (upwelling water) ความเข้มข้นของโลหะในน้ำใกล้ฝั่งจะมีค่าสูง และมีค่าที่แตกต่างกันมาก เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำใกลฝั่ง และจากการศึกษาของ Abdullah, Royle and Morris (1972) ยังพบว่า การไหลเวียนของน้ำในพื้นที่ที่จำกัด เช่น ช่องแคบ หรืออ่าว จะมีผลทำให้ความเข้มข้นของโลหะในน้ำใกล้ฝั่งมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของโลหะในน้ำซึ่งอยู่ห่างฝั่งออกไป นอกจากนี้ปฏิกิริยาทางเคมี และพฤติกรรมบางประการของโลหะ ก็มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของโลหะในน้ำเช่นกัน Paulson, Feeley, Curl and Gendron (1984) พบว่า ในเขตที่มีการผสมผสานกันระหว่างน้ำจืดกับน้ำเค็ม จะมีผลทำให้โลหะบางชนิด เช่น เหล็กและทองแดง เกิดการเคลื่อนย้ายจากรูปที่ละลายน้ำมาอยู่ในรูปสารแขวนลอย ในขณะที่โลหะแมงกานีสและแคดเมียมเกิดการคายสารจากรูปอนุภาคแขวนลอยมาอยู่ในรูปที่ละลายน้ำ อันเป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของโลหะในน้ำได้

<u>รูปแบบทางเคมีของโลหะในน้ำทะเลและปัจจัยที่ควบคุม</u>

โลหะหนักในน้ำส่วนใหญ่ จะอยู่ในรูปของโลหะละลายน้ำและในรูปของสารแขวนลอย (Wigham, 1976) รูปของโลหะละลายน้ำ อาจเป็นโลหะหรืออิออนของโลหะละลายน้ำ หรือรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์หรืออนินทรีย์เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำ (Batley and Florence, 1976; Frache, Baffi, Dodane and Zanicchi, 1976) โลหะหลายชนิดสามารถคงอยู่ในน้ำทะเลในปริมาณความเข้มข้นที่มากกว่าที่พบในธรรมชาติ ทั้งนี้เพราะเกลือของโลหะบางตัวมีค่าการละลายสูง (Bryan, 1976)

จากการศึกษารูปแบบทางเคมีของโลหะแคดเมียม ตะกั่ว และทองแดงที่ละลายน้ำ โดยวิธีกรองผ่านเยื่อเมมเบรนขนาด 0.22 μm Hasle and Abdullah (1981) พบว่า โลหะแคดเมียมที่ละลายน้ำทั้งหมดจัดเป็นพวกที่มีน้ำหนักไมเลกุลต่ำ และเป็นชนิด labile กล่าวคือ เป็นชนิดที่เกิดจากความสมดุลระหว่างอิออนบวกของโลหะกับลิแกนอินทรีย์ (organic ligand)

ซึ่งจะทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ค่อนข้างเสถียร สำหรับโลหะตะกั่ว ส่วนใหญ่จัดเป็นชนิด non-labile (มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเช่นกัน) และครึ่งหนึ่งของโลหะตะกั่วทั้งหมดจะอยู่ในรูปของตะกั่วอินทรีย์ ส่วนโลหะทองแดงมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน จะปรากฏในรูปของสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนและคอลลอยด์เป็นส่วนมาก ในน้ำทะเลธรรมชาติจะพบทองแดงที่เป็นคอลลอยด์อยู่ในรูปของ $Cu(OH)_2$ หรือ $CuCO_3$ ประมาณ 90% (Spear and Pierce, 1979) และจากการศึกษาลักษณะทางเคมีของโลหะทองแดง Wallace, Jr. (1982) พบว่า 6 - 30% ของโลหะทองแดง จะยึดเกาะกับสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำและที่เป็นคอลลอยด์ และโดยวิธีการศึกษาทางเคมีไฟฟ้า van den Berg, Buckley, Huang and Nimmo (1986) พบว่า โลหะทองแดงความเข้มข้นระหว่าง $1.4\text{-}5 \times 10^{-7}$ M มีความสามารถที่จะเกิดสารอินทรีย์เชิงซ้อนได้ดี คือมีค่า log K ระหว่าง 9.2 - 10.5 ซึ่งค่า log K จะลดลงตามค่าของความเค็มและการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำ สำหรับโลหะในรูปของสารประกอบอนินทรีย์เชิงซ้อน Mantoura, Dickson and Riley (1978) พบว่า ในน้ำที่มีค่าความเค็มมากกว่า 10 ppt โลหะอนินทรีย์ส่วนใหญ่ ยกเว้นทองแดงและนิคเกิล จะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับคลอไรด์-อิออน โดยเฉพาะโลหะปรอทและแคดเมียม จะอยู่ในรูปของ chloro complex ประมาณ 84% และสัดส่วนการเกิด chloro complex จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของคลอไรด์ในน้ำ

นอกจากค่าความเค็มแล้ว Tipping (1986) และ Hunt and Fitzgerald (1983) ยังพบว่าค่า pH และ alkalinity ของน้ำ ก็เป็นปัจจัยอันหนึ่งที่ควบคุมรูปแบบทางเคมีของโลหะในน้ำ โดยพบว่าในน้ำที่มีค่า pH น้อยกว่า 6 จะทำให้การดูดซับสารอินทรีย์ของโลหะทองแดงบนออกไซด์ของเหล็กเกิดได้มากกว่าที่ค่า pH มากกว่า 6 แต่อย่างไรก็ตามความสามารถของสารต่าง ๆ ที่จะดูดซับทองแดง (Cu^{2+}) จะถูกลดลงอย่างเด่นชัดในน้ำทะเลที่มีความเข้มข้นของโลหะแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ปริมาณสูง เนื่องจากเกิดการแข่งขันระหว่าง Mg^{2+} และ Cu^{2+} ที่แขนสำหรับการดูดซับ (ที่ค่า pH = 6)

การศึกษาถึงรูปแบบทางเคมีและปัจจัยที่ควบคุมการแพร่กระจายของโลหะแต่ละชนิดในน้ำทะเล มีความสำคัญเพราะทำให้ทราบถึงขบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของโลหะ ซึ่งอาจมีผลความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในทะเลได้ ตัวอย่างเช่น โลหะทองแดงในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำบางตัว เช่น ฮีโมโกลบิน จะลดค่าความเป็นพิษของทองแดงในรูปที่เป็นอิออนอิสระ (Cu^{2+}) ลงได้ ส่วนทองแดงซึ่งจับกับ chelator ตัวอื่น ๆ เช่น ไขมันบางชนิด ได้แก่ PAN (phenanthroline) และ TAN (pyridyl-and thiazolylhydroxyazo compounds)

จะมีผลทำให้ค่าความเป็นพิษของทองแดงต่อสิ่งมีชีวิตเพิ่มมากขึ้น (Florence and Stauber, 1986) สำหรับไลหะตะกั่ว WHO (1983) รายงานว่า ตะกั่วในรูปของ tetraethyl lead และ tetramethyl lead จะเป็นรูปที่แสดงค่าความเป็นพิษต่อ กุ้ง หอย และปลา มากกว่าในรูปของ triethyl lead และ trimethyl lead เป็นต้น

พฤติกรรมและการแพร่กระจายของไลหะในตะกอน

เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำทะเล ในตะกอนจะมีปริมาณความเข้มข้นของไลหะสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากไลหะบางชนิดสามารถเคลื่อนย้ายออกจากน้ำทะเลมาอยู่ในสภาพที่แขวนลอยได้ โดยจับกับผิวของอนุภาคต่าง ๆ เช่น ออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส แร่ธาตุประเภทดินเหนียวหรือแพลงก์ตอน เป็นต้น (Paulson et al., 1984) Hunt and Fitzgerald (1983) รายงานว่า ไลหะทองแดงสามารถเคลื่อนย้ายออกจากน้ำโดยการดูดซับบนแพลงก์ตอนพืช 0.22 $meq.g^{-1}$ แพลงก์ตอนสัตว์ 1.0 - 2.5 $meq.g^{-1}$ และสารแขวนลอยอื่น ๆ ประมาณ 0.3 $meq.g^{-1}$ เป็นต้น เมื่ออนุภาคเหล่านี้มีขนาดใหญ่และหนักมากขึ้นก็จะตกตะกอนลงสู่ผิวดิน โดยมีค่าความเร็วในการตกตะกอนที่ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคนั้น ๆ (Gibbs,1986) สำหรับไลหะที่ละลายน้ำก็อาจตกตะกอนได้โดยการจับอิออนลบในน้ำทะเล ได้แก่ $CO_3^{=}$, Cl^- และ OH^- เป็นต้น เมื่อค่าความเข้มข้นของไลหะสูงกว่าค่าการละลายไลหะก็จะตกตะกอน (Bryan, 1976) ปฏิกิริยาทางเคมีและสภาพแวดล้อมบางประการ เช่น pH ของน้ำก็มีอิทธิพลต่อการตกตะกอนของไลหะ Wilber (1971) พบว่าไลหะทองแดงจะตกตะกอนในรูปเกลือของไลหะ 75% ทันทีที่น้ำเสียซึ่งปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมสัมผัสกับแหล่งน้ำธรรมชาติ และเปอร์เซ็นต์ของการตกตะกอนจะลดลงเมื่อน้ำมีค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้น

ไลหะที่ตกตะกอน อาจถูกละลายกลับคืนสู่ชั้นน้ำเหนือตะกอนได้อีก เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างไลหะที่อยู่ในรูปของแข็ง (solid phase) และไลหะในรูปละลายน้ำ ผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในคอลัมน์ของดินตะกอน จะทำให้ไลหะเกิดการแพร่ออกสู่น้ำที่แทรกอยู่ระหว่างตะกอน (interstitial water) ซึ่งจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของไลหะที่ผิวหน้า และไลหะในชั้นน้ำเหนือตะกอนนั้น (Elderfield and Hepworth, 1975) จากการศึกษาของ Douglas, Mills and Quinn (1986) พบว่า การเกิดสารประกอบวินทรีย์เชิงซ้อนของไลหะโครเมียมในน้ำที่แทรกอยู่ระหว่างตะกอน ทำให้ไลหะโครเมียมถูกส่งผ่านกลับไปตามคอลัมน์น้ำได้อีก ภายใต้ภาวะที่ขาดออกซิเจน (reducing condition) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างทองแดงกับ

สารอินทรีย์ในน้ำที่แทรกอยู่ระหว่างตะกอน จะเกิดปฏิกิริยาได้ยากกว่าการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโลหะทองแดงกับซัลไฟด์อิออน จึงทำให้โลหะทองแดงยังคงสะสมอยู่ในตะกอนนั้น Davies-Colley, Nelson and Williamson (1985) รายงานว่า ค่าความเข้มข้นของซัลไฟด์ 10^{-7} M หรือมากกว่าจะเป็นตัวควบคุมปริมาณการสะสมของโลหะทองแดงและแคดเมียมในตะกอน เนื่องจากซัลไฟด์ของโลหะดังกล่าวไม่ละลายน้ำ

ปริมาณการสะสมของโลหะในตะกอนตามแนวดิ่ง สามารถศึกษาได้โดยวิธีไอโซโทป-กัมมันตรังสีของ Pb-210 (Bruland, Bertine, Koide and Goldberg, 1974; Edgington and Robbins, 1976; Golberg, Hodge, Koide and Griffin, 1976) เพราะนอกจากจะทราบถึงแหล่งที่มาของโลหะแล้วยังทราบถึงประวัติการทับถมของโลหะตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้ จากการศึกษาประวัติการสะสมของโลหะในเขต Severn เอสทูรี ประเทศอังกฤษ Allen and Rae (1986) พบว่า โลหะตะกั่วและสังกะสีที่เข้าสู่เอสทูรี ส่วนใหญ่มีแหล่งกำเนิดมาจากธรรมชาติรวมกับโลหะที่ถูกพัดพามาจากแม่น้ำ อันเป็นผลมาจากการกระทำของมนุษย์ ซึ่งทำให้อัตราการสะสมของโลหะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาที่มีการอุตสาหกรรมเกิดขึ้น และจากรายงานการศึกษาของ Hoshika and Shiosawa (1984, 1986) สามารถยืนยันได้ว่าปัจจุบันมนุษย์ทำให้โลหะทองแดงและสังกะสีบริเวณชายฝั่งทะเล Seto ประเทศญี่ปุ่นมีอัตราการสะสมเพิ่มขึ้นจากธรรมชาติมีค่าประมาณ 310 และ 1,700 ตันต่อปี ตามลำดับ

การแพร่กระจายของโลหะในตะกอนแต่ละบริเวณ ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของโลหะชนิดและองค์ประกอบของอนุภาคต่าง ๆ ในตะกอน ในทะเลลึกหรือในมหาสมุทร โลหะในตะกอนส่วนใหญ่ จะมาจากการสลายตัวของหินและจากการตกตะกอนของแร่ที่เกิดขึ้นในทะเล ตัวอย่างเช่น โลหะเหล็กและแมงกานีส ส่วนใหญ่จะมีแหล่งกำเนิดมาจากหิน ส่วนโลหะโคบอลท์ ทองแดง นิคเกิลและสังกะสี จะมีแหล่งกำเนิดมาจากน้ำ 34 - 68% ของส่วนทั้งหมด (Takematsu, 1978) สำหรับตะกอนใกล้ชายฝั่ง โลหะหนักหลายชนิด ได้แก่ แมงกานีส นิคเกิล ทองแดง และสังกะสี ส่วนใหญ่มาจากการพัดพาของแม่น้ำ และจากการพังทลายของชายฝั่ง (Helz and Sinex, 1986) Thomson, Luoma, Johansson and Cain (1984) พบว่า ในพื้นที่บางแห่ง เช่น ทางตอนใต้ของอ่าวซานฟรานซิสโก การเพิ่มขึ้นของโลหะเงิน ทองแดงและสังกะสีในตะกอน มีสาเหตุเนื่องมาจากการปล่อยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและน้ำใช้จากบ้านเรือน และจากการศึกษาถึงชนิด ขนาด และองค์ประกอบของตะกอน พบว่าตะกอนที่มีขนาดเล็ก มีแนวโน้มที่จะสะสมโลหะได้สูงกว่าในดินตะกอนที่มีขนาดใหญ่ จากการ

ศึกษาของ Robbe, Marchandise and Gouleau (1985) รายงานว่า ในตะกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ของแร่ kaolinite และ illite สูงจะเกิดการดูดซับโลหะทองแดงเข้าสู่ตะกอนได้สูงกว่าโลหะชนิดอื่น ๆ เช่น โลหะสังกะสีและตะกั่ว เป็นต้น นอกจากนี้ปริมาณสารอินทรีย์ในดินและปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการขนส่งของโลหะ (transportation) ยังมีผลทำให้การสะสมโลหะในตะกอน ลดลงตามระยะทางจากปากแม่น้ำออกสู่ทะเล Pagenkopf and Cameron,1979; Rosental, Eagle and Orren, 1986) ทั้งนี้อาจรวมถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศตามฤดูกาล ก็มีอิทธิพลต่ออัตราการสะสมของโลหะในตะกอนด้วยเช่นกัน (Holmes, 1986)

การสะสมโลหะในสิ่งมีชีวิตและห่วงโซ่อาหารในทะเล

โดยอาศัยขบวนการดูดซึมโลหะจากน้ำ สาหร่ายทะเลรวมทั้งแพลงก์ตอนพืชหลายชนิดสามารถสะสมโลหะไว้ได้ในปริมาณสูงกว่าที่ปรากฏอยู่ในสิ่งแวดล้อมหลายเท่า (Riley and Roth, 1971; Preston, Jefferies, Dutton, Harvey and Steele,1972;Knauer and Martin, 1973) Morris (1971) พบว่า ไดอะตอมทะเลหลายชนิดสามารถสะสมโลหะไว้ในร่างกายมีปริมาณเป็น 10^2 - 10^6 เท่าของโลหะที่มีอยู่ในน้ำ และปริมาณการดูดซึมโลหะจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของโลหะในน้ำ (Canterford, Buchanan and Ducker, 1978; Fabiano, Baffi and Frache, 1985)

ในสัตว์ทะเล การสะสมโลหะส่วนใหญ่จะได้มาจากอาหารที่สัตว์กินเข้าไปมากกว่าที่ละลายอยู่ในน้ำ (Bryan, Potts and Forster, 1977) Preston (1971) รายงานว่าปริมาณการสะสมโลหะสังกะสี โคบอลท์ และโครเมียม ที่พบในหอยนางรมส่วนใหญ่มาจากการกินอาหารของหอย หรือในหอยชนิดที่ฝังตัวอยู่ในดิน Scrobicularia plana การสะสมโลหะแคดเมียม โคบอลท์ โครเมียม นิคเกิล ตะกั่ว และสังกะสี ได้มาจากการย่อยอาหารในตะกอนมากกว่าการดูดซับจากน้ำเช่นเดียวกัน (Bryan and Uysal, 1978) อย่างไรก็ตาม ในสัตว์ทะเลอื่น ๆ เช่น กุ้ง และปู Renfro, Fowler, Heyraud and La Rosa (1975) พบว่าการสะสมโลหะสังกะสีซึ่งได้จากน้ำและอาหารไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นในปลาปริมาณการสะสมโลหะสังกะสีจะได้จากอาหารมากกว่าการดูดซึมจากน้ำ 2.5 เท่า

โลหะที่สะสมอยู่ในร่างกายสัตว์ จะแพร่กระจายไปตามอวัยวะส่วนต่าง ๆ เช่น ในหอยเชลล์; Pecten maximus และ Chlamys opercularis โลหะแมงกานีส สังกะสี และ

ตะกั่ว จะถูกสะสมปริมาณสูงที่ไต โลหะแคดเมียม เงิน เหล็ก และโครเมียม จะถูกสะสมปริมาณสูงที่ต่อมย่อยอาหาร ส่วนโลหะโคบอลท์และนิคเกิล จะแพร่กระจายอยู่ระหว่างอวัยวะทั้งสอง (Bryan, 1973) ในหอยสองฝาที่ฝังตัวอยู่ในดิน; Scrobicularia plana (da costa) Bryan and Uysal (1978) พบว่ามากกว่า 75% ของโลหะแคดเมียม โคบอลท์ นิคเกิล ตะกั่ว และสังกะสี จะถูกสะสมอยู่ในส่วนของอวัยวะภายในมากกว่าส่วนที่เป็นเนื้อและปริมาณการสะสมของโลหะ ในส่วนที่เป็นเนื้อจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของหอย สำหรับในปลา โลหะส่วนใหญ่จะถูกสะสมอยู่ที่ตับ ส่วนอวัยวะภายในและกล้ามเนื้อจะมีปริมาณน้อยกว่า (อรพินท์ จันทร์ผ่องแสง, 2520; Windom, Taylor and Stickney, 1973; Byrne, Balasubramanian, Overton and Albert, 1985; Denton and Burdon-Jones,1986) จากการศึกษาของกัลยา วัฒยากรและคณะ (2521) พบว่าในตับปลากระดูกแข็งหลายชนิดที่จับได้ในอ่าวไทย จะมีปริมาณของโลหะแคดเมียมสะสมสูงกว่าโลหะชนิดอื่น ๆ ส่วนโลหะตะกั่วและสังกะสีมีปริมาณสูงที่อวัยวะสืบพันธุ์ และโดยทั่วไปการสะสมของโลหะต่าง ๆ ในอวัยวะภายในจะสูงกว่าในกล้ามเนื้อหลายเท่า

การสะสมของโลหะในปลาส่วนใหญ่จะไม่ขึ้นกับอายุ (Tong, Youngs, Gutenmann and Lisk,1974; Eustace,1974) พบว่า ในปลากระบอก (Mugil Cephalus) ซึ่งหากินในบริเวณน้ำตื้นชายฝั่ง จะมีผลทำให้การสะสมโลหะมีปริมาณที่แตกต่างกันไป เมื่อเปรียบเทียบกับปลาที่หากินอยู่ผิวน้ำ แต่อย่างไรก็ดี สำหรับโลหะปรอท Moharram, EL-Sharnouby, Moustaffa and EL-Soukkary (1987) พบว่าค่าความเข้มข้นของปรอทจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของความยาวและความอ้วนของปลา (fatness) และความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของปรอทกับความยาวก็ยังมีการเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน (Scott and Armstrong, 1972) ทั้งนี้อาจเกี่ยวข้องกับเรื่องเพศของปลาก็ได้ จากการศึกษาของ Forrester, Ketchen and Wong (1972) พบว่า ในปลา spiny dogfish เพศผู้จะมีปริมาณการสะสมโลหะปรอทสูงกว่าในเพศเมีย ซึ่งมีขนาดของความยาวที่เท่ากัน

การศึกษาเกี่ยวกับปริมาณโลหะสะสมในสิ่งมีชีวิต นอกจากจะเกี่ยวข้องกับปัจจัยทางชีวภาพแล้ว ปัจจัยทางด้านสภาวะแวดล้อมบางประการ เช่น pH, alkalinity และ hardness ของน้ำ ก็อาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการสะสมโลหะของสัตว์ได้เช่นเดียวกัน ตัวอย่างเช่น ในน้ำที่มีค่า pH อยู่ระหว่าง 5 - 7 จะมีผลทำให้การดูดซับโลหะแคดเมียมใน

ปลาเทราท์ไม่เป็นอิสระ และเมื่อค่า pH เท่ากับ 7.6 โลหะแคดเมียมจะถูกดูดซึมลดลง เนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ bicarbonate และ carbonate ในน้ำนั้น หรือในน้ำที่มีค่าความเข้มข้นของ Ca^{2+} ปริมาณสูงก็จะมีผลทำให้อัตราการดูดซึมโลหะสังกะสีในปลา Stickleback เพิ่มขึ้นเป็น 3.5 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำที่ไม่มีปริมาณของ Ca^{2+} เป็นต้น (Part, Svanberg and Kiessling, 1985; Matthiessen and Brafield, 1977)

อย่างไรก็ตามการสะสมโลหะของสิ่งมีชีวิตจะไม่มีผลต่อมนุษย์ ถ้าในสิ่งแวดล้อมนั้นไม่มีมลภาวะเกิดขึ้น แต่เมื่อใดที่เกิดมลภาวะอันเนื่องมาจากการกระทำของมนุษย์ จนเป็นเหตุให้ค่าความเข้มข้นของโลหะในบริเวณนั้นเพิ่มขึ้น ก็อาจเป็นไปได้ว่าโลหะเหล่านั้นจะถูกสะสมและถ่ายทอดขึ้นไปตามห่วงโซ่อาหารในทะเล และอาจจะก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ได้ เมื่อบริโภคสัตว์ทะเลที่มีค่าความเข้มข้นของโลหะปริมาณสูงเข้าไปในร่างกาย (Stewart and Schutz-Baldes, 1976) จากการศึกษาของ Hanson and Hoss (1986) พบว่าในตัวอ่อนปลาซึ่งจับได้จากแหล่งที่ได้รับผลกระทบของโลหะจะมีค่าความเข้มข้นของโลหะทองแดง สังกะสี แมงกานีสและเหล็ก ปริมาณสูงกว่าในแหล่งที่ไม่เกิดมลภาวะของโลหะ และเป็นไปได้ที่ปริมาณโลหะดังกล่าวจะถูกถ่ายทอดต่อไปยังมนุษย์

จากการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการถ่ายทอดของโลหะตามห่วงโซ่อาหารของสัตว์ครัสตาเซียน Romeo and Nicolas (1986) พบว่า โลหะตะกั่วซึ่งถูกดูดซึมจากน้ำโดยแพลงก์ตอนพืช จะถูกถ่ายทอดต่อไปโดยการกินของ copepod และจะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นในพวก Euphausia ที่กิน copepod เป็นอาหาร ซึ่งจะเห็นได้ว่า Euphausia เปรียบเสมือนตัวเคลื่อนย้ายโลหะออกจากน้ำ และสามารถถ่ายทอดปริมาณโลหะต่อไปได้ตามห่วงโซ่อาหาร โดยการกินของสัตว์ที่มีขนาดใหญ่กว่า เช่น ปลา เป็นต้น

ปริมาณการถ่ายทอดของโลหะหนักในสิ่งมีชีวิต ตัวอย่างเช่น โลหะปรอท Potter, Kidd and Standiford (1975) ได้สรุปว่า โดยทั่วไปจะเริ่มต้นจากแหล่งอาหารในทะเล ได้แก่ น้ำ ตะกอน และสารต่าง ๆ ในน้ำ และโดยการกินของพืช สัตว์ที่กินพืช และ สัตว์ที่กินสัตว์ จะทำให้ปริมาณโลหะถูกถ่ายทอดต่อไปตามห่วงโซ่อาหาร และในจำพวกปลาล่าเหยื่อที่มีขนาดใหญ่ จะถูกจัดเป็นลำดับสูงสุดของห่วงโซ่อาหารในทะเล และมีปริมาณการสะสมของปรอทสูงกว่าในสัตว์ทะเลชนิดอื่น ๆ ทำนองเดียวกับผลการศึกษาของ Menasveta (1976) และพิชาญ สว่างวงศ์ (2520) ซึ่งพบว่า ในปลาที่อยู่ใน trophic level สูงกว่าจะสะสม

โลหะปรอทได้สูงกว่าในปลาหรือสิ่งมีชีวิตที่อยู่ใน trophic level ที่ต่ำลงมาตามห่วงโซ่อาหารในทะเล

ความเป็นพิษของโลหะต่อสิ่งมีชีวิต

ค่าความเป็นพิษของโลหะต่อสิ่งมีชีวิต โดยทั่วไปจะแสดงออกเมื่อสัตว์หรือสิ่งมีชีวิตนั้น ๆ สัมผัสหรือได้รับโลหะสะสมไว้ในร่างกายปริมาณสูงเกินขีดความสามารถที่ร่างกายจะทนอยู่ได้ ซึ่งโดยทั่วไปพิษของโลหะจะแสดงให้เห็นใน 2 ระดับ คือ ความเป็นพิษอย่างเฉียบพลัน ซึ่งจะมีผลทำให้สัตว์ตายได้ เมื่อสัมผัสกับโลหะที่มีความเข้มข้นสูง และอาการเป็นพิษอย่างเรื้อรัง ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิต เช่น การเจริญเติบโต การกินอาหาร และการหายใจ เป็นต้น สำหรับมนุษย์ การเจือปนของโลหะในอาหารและในฝุ่นละออง รวมทั้งจากการสัมผัสกับโลหะโดยตรง ทำให้มนุษย์ได้รับโลหะเข้าสู่ร่างกายทั้งทางตรงและทางอ้อม นอกจากนี้สภาพแวดล้อมบางประการและรูปแบบทางเคมีของโลหะที่แตกต่างกัน ก็มีผลเอื้ออำนวยให้โลหะแสดงค่าความเป็นพิษเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้

พิษของโลหะทองแดง

ทองแดงถูกจัดเป็นโลหะปริมาณน้อยที่มีความจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต ในพืชทองแดงเป็นองค์ประกอบของ plastocyanin ซึ่งมีหน้าที่ช่วยส่งอีเลคตรอนในขบวนการสังเคราะห์แสง (Steelmann-Nielsen and Wium-Anderson,1971) ในสัตว์ โดยเฉพาะพวกครัสตาเซียน และหอย ทองแดงเป็นส่วนประกอบของ ฮีโมไกลบิน ซึ่งมีบทบาทในการส่งผ่านออกซิเจนในเลือด (Scott and Major, 1972) สำหรับมนุษย์ทองแดงมีบทบาทเกี่ยวกับการสร้างฮีโมไกลบินและการทำงานของเอ็นไซม์บางชนิด แต่ความต้องการของร่างกายมีน้อย

พิษของโลหะทองแดงต่อแพลงก์ตอนพืชจะมีผลต่อขบวนการทางเคมีภายในเซล เช่น ลดการสร้าง ATP ภายในเซล (Viarengo, 1985) ขัดขวางการแยกจากกันของเซล (Thomas, Hollibaugh and Seibert,1980) และเพิ่มความสามารถในการที่เยื่อจะยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hwang, Scott and Brierley,1977) เป็นต้น นอกจากนี้ทองแดงยังมีผลต่อการเจริญเติบโตของเซล Florence and Stauber (1986) พบว่า ทองแดงอิออนความเข้มข้น 20 µg/l จะทำให้ ไดอะตอมทะเล Nitzchia closterium มีอัตราการเจริญเติบโตลดลง 50% และที่ความเข้มข้นมากกว่า 100 µg/l ผลของทองแดงจะทำให้เซลหยุดการเจริญเติบโตอย่างสมบูรณ์

013938

นอกจากนี้ Steelmann-Nielsen and Wium-Anderson (1970) ยังพบว่า โลหะทองแดง แม้มีความเข้มข้นต่ำเพียง 1 ppb ก็มีผลทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงในแพลงก์ตอนพืชบางชนิดลดลงได้ สำหรับในสัตว์ Moraitou-Apostolopoulou and Verriopoulos (1979) พบว่า โลหะทองแดงความเข้มข้นระหว่าง 0.001 - 0.01 mg/l จะมีผลทำให้การกินอาหาร ความมีอายุยืนยาว (longivity) และความดกของไข่ใน copepod (Acartia clausi) ลดลง ในขณะที่อัตราใช้ออกซิเจนแสดงการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงความเข้มข้นเดียวกัน ค่าความเป็นพิษของทองแดง สำหรับสัตว์ทะเลที่ไม่มีกระดูกสันหลัง (marine invertebrate) โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วง 6 - 10 µg/l ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความเป็นพิษต่อวงจรชีวิตของ copepod หลายชนิด หรือแม้แต่ในพวกหอยสองฝา เช่น หอยแมลงภู่ หรือหอยกาบ Spear and Pierce (1979) รายงานว่า ค่า LC_{50} ของทองแดงต่อสัตว์จำพวกสัตว์ทะเลที่ไม่มีกระดูกสันหลังในทุก ๆ กรณี (case) ที่ทำการตรวจสอบจะมีค่าไม่เกิน 60 µg/l (ตารางที่ 12.13 ของภาคผนวก ก) ส่วนในปลา โดยเฉพาะลูกปลาวัยอ่อน จะทนค่าความเป็นพิษของทองแดงได้น้อยกว่าตัวเต็มวัย Roch and McCarter (1986) รายงานค่า LC_{50} ของโลหะทองแดงต่อลูกปลาเทราท์ Salmo gairdneri ในเวลา 7 วัน จะมีค่าเท่ากับ 60 µg Cu/l ส่วนในลูกปลา Perch; Perca fluviatilis (น้ำหนัก 3.8 ± 0.35g) ค่า LC_{50} ในเวลา 96 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 15° C จะเท่ากับ 300 µg Cu/l (Collvin, 1984) สำหรับปลาทะเลชนิดอื่น ค่า LC_{50} ของทองแดง ในเวลา 96 ชั่วโมง จะอยู่ในช่วง 1.4 - 3.0 mg/l (ตารางที่ 14 ของภาคผนวก ก) และค่าความเป็นพิษจะเพิ่มขึ้นอีกเมื่อน้ำมีค่า pH และความเค็มเพิ่มขึ้น (Spear and Pierce, 1979) พิษของทองแดงนอกจากจะทำให้ปลาตายในระยะอันสั้นแล้ว ทองแดงยังมีผลต่ออัตราการเจริญเติบโต การกินอาหาร และการหายใจสูงสุดของปลาอีกด้วย จากผลการศึกษาของ Waiwood and Beamish (1978) พบว่า อัตราการเจริญเติบโตของปลาเทราท์จะลดลง 25% เมื่อค่าความเข้มข้นของทองแดงอยู่ในช่วง 2 - 206 µg/l (เมื่อค่า pH เพิ่มจาก 6 เป็น 8) และในปลา Perch อัตราการหายใจของปลาจะเพิ่มขึ้น เมื่อทองแดงมีค่าความเข้มข้นสูงกว่า 22 µg/l ขึ้นไป (Collvin, 1985) นอกจากนี้ Steele (1983) ยังพบว่า โลหะทองแดงความเข้มข้นเพียง 0.01 mg/l ก็มีผลทำให้พฤติกรรมการกลับตัวของปลาผิดปกติไปได้ สำหรับมนุษย์พิษของทองแดงอาจทำให้เกิดโรคโลหิตจางได้ ถ้าร่างกายได้รับทองแดงมากเกินไป (กิตติ เอกอำพน, 2528)

พิษของโลหะสังกะสี

โลหะสังกะสีมีความสำคัญต่อขบวนการทางชีวของสิ่งมีชีวิต เช่นเดียวกับทองแดง โดยทั่วไปสังกะสีจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชและสัตว์ และเป็นส่วนประกอบของเอ็นไซม์บางชนิด Bruland,Knauer and Martin (1978) พบว่า ความเข้มข้นปกติของสังกะสีอิออนในน้ำทะเล 10^{-7} M ถือเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นของแพลงก์ตอนพืชหลายชนิด จากผลการศึกษาของ Anderson, Morel and Guillard (1978) พบว่า ไดอะตอมทะเล, Thalassiosira weissflogii จะมีอัตราการเจริญสูงสุด ในน้ำทะเลที่มีค่าความเข้มข้นของสังกะสี (Zn^{2+}) อยู่ในช่วง 10^{-9}- 10^{-11}M และโดยทั่วไปโลหะสังกะสีที่มีความเข้มข้นสูงกว่าก็จะแสดงความเป็นพิษต่อพืชด้วยเช่นกัน Jensen and Rystad (1974) ได้ทดลองเลี้ยงไดอะตอมทะเล 3 ชนิด (ได้แก่ Skeletonema costatum (Grev), Thalassiosira pseudonana (Hase) และ Phaeodactylum triconutum (Bohnlin)) ในน้ำที่มีค่าความเข้มข้นของสังกะสีอิออน (Zn^{2+}) 50, 250 และ 2500 µg/l ตามลำดับ พบว่า อัตราการเจริญเติบโตของไดอะตอมทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มลดลงสัมพันธ์กับปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีที่เติมลงไป และจากการศึกษาของ Chipman, Rice and Price (1958) พบว่า เซลของไดอะตอม Nitzchia sp. จะถูกทำลาย เมื่อค่าความเข้มข้นของสังกะสีอยู่ระหว่าง 1 - 5 mg/l สำหรับในสัตว์ความเข้มข้นของสังกะสีตั้งแต่ 0.1 ถึง 2.0 ppm จะมีผลทำให้การพัฒนาของไข่จนถึงระยะ gastrula ในปลา Clupea harengus L. เร็วกว่าปกติ เมื่อค่าความเข้มข้นเพิ่มเป็น 6.0 ppm การพัฒนาจะช้ากว่าปกติและที่ค่าความเข้มข้นระหว่าง 0.5-6.0 ppm จะมีผลทำให้โครงสร้างภายในเซลสมองของลูกปลาเปลี่ยนแปลงไป (Somasundaram, King and Shackley,1984a;1984b)หรือในหอยเม่น Timourian (1968) รายงานว่า ความเข้มข้นสังกะสี 0.06 ppm จะทำให้ไข่ของหอยมีการพัฒนาช้าลง และ 25% ของไข่ที่พัฒนาแล้วจะมีลักษณะโครงสร้างที่ผิดปกติเช่นกัน และจากผลการศึกษาของ Jones (1975) รายงานว่า ค่าความเข้มข้นของซิงค์ซัลเฟต 10 ppm และ 20 ppm จะมีผลทำให้อัตราการตายของไอโซพอดทะเลเพิ่มมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 5 °c เป็น 10 °c และในกุ้ง (Paratya tasmanenis Rick) ที่ค่าความเข้มข้นของซิงค์ซัลเฟต 1.21 mg/l จะมีผลทำให้ระยะ Zoea ของกุ้งมีอัตราการตาย 50% ในเวลา 96 ชั่วโมง (Thorp and Lake, 1974) ส่วนในปลา Graham, Byron and Norris (1986) รายงานว่าช่วงความเข้มข้นของโลหะสังกะสีที่ทำให้ปลาเทราท์ตายเป็นครึ่งหนึ่งในเวลา 96 ชั่วโมง จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.6 - 0.9 mg/l สำหรับมนุษย์หากได้รับโลหะสังกะสีมากเกินไป จะทำให้

เกิดอาการอ่อนเพลีย วิงเวียนศีรษะ ปวดกล้ามเนื้อ คลื่นไส้และอาเจียนเป็นต้น (กิตติ เอก-อำพล, 2528)

พิษของไลหะตะกั่ว

ค่าความเป็นพิษอย่างเฉียบพลันและพิษอย่างเรื้อรังของไลหะตะกั่วต่อพืชโดยทั่วไปจะมีค่าความเข้มข้นมากกว่า 100 µg/l (WHO, 1983) แต่อย่างไรก็ตามไลหะตะกั่วที่มีความเข้มข้นต่ำเพียง 1.0 - 1.3 µg/l ก็สามารถทำให้สาหร่ายทะเล; Ditylum brightwelli มีอัตราการเจริญเติบโตลดลง 50% (Canterford and Canterford, 1980) และที่ค่าความเข้มข้น 100 µg/l ไดอะตอม; Thalassiosira aestevatis จะมีอัตราการสังเคราะห์แสงลดลง 70 - 80% (Woolery and Lewin, 1976) ในตัวอ่อนของปู (Cancer magister) Martin, Osborn, Billig and Glickstein (1981) รายงานค่า LC_{50} ของตะกั่วในเวลา 48 ชั่วโมง เท่ากับ 575 µg/l และในตัวอ่อนอาทีเมีย (Artemia salina) Brown and Ahsanullah (1971) รายงานค่า LC_{50} ในเวลา 24 ชั่วโมง เท่ากับ 1.0 µg/l สำหรับหอยโดยทั่วไปในระยะตัวอ่อนจะมีความไวต่อพิษของตะกั่วมากกว่าตัวเต็มวัย อย่างไรก็ดี Calabrese, Collier, Nelson and MacInnes (1973) รายงานว่า ค่าความเข้มข้นของตะกั่ว 500 mg/l ในเวลา 48 ชั่วโมง จะไม่มีผลต่อการตายของหอยนางรมตัวอ่อน แต่อาจมีผลในด้านพัฒนาการของหอยก็เป็นได้ จากผลการศึกษาของ Hrs-Brenko, Claus and Bubic (1977) พบว่า ค่าความเข้มข้นของตะกั่ว 100 µg/l จะทำให้ลูกหอยมีการพัฒนาที่ผิดปกติ เมื่อน้ำมีค่าความเค็มมากกว่า 32.5 ppt และมีอุณหภูมิสูงกว่า 17.5C สำหรับสัตว์น้ำพวกปลาเกลือของไลหะตะกั่ว จะทำให้เกิดการตกตะกอนโดยจับกับเมือก (mucus) และสะสมอยู่ที่เหงือก ทำให้ปลามีความสามารถในการแลกเปลี่ยนออกซิเจนลดลง ซึ่งอาจมีผลทำให้ปลาตายได้เมื่อสัมผัสกับตะกั่วเป็นเวลานาน (Messuwana, 1981; ณิฏฐารัตน์ ปภาวสิทธิ์ และสมเกียรติ ปิยะธีรธิติวรกุล, 2526) จากการศึกษาของ วัฒนา ไวยนิยา และชลัญญา ธารบุปผา (2526) พบว่า LC_{50} ของไลหะตะกั่วต่อลูกปลากะพงขาว อายุ 2 เดือน ในเวลา 96 ชั่วโมง จะมีค่าเท่า 3.15 ppm

สำหรับพิษของตะกั่วต่อมนุษย์ทั้งในรูปตะกั่วอินทรีย์และอนินทรีย์ จะมีผลต่อระบบเม็ดเลือด ระบบประสาท และระบบการทำงานของไต (EPA, 1976) โดยตะกั่วจะยึดจับกับเม็ดเลือดแดง รบกวนการทำงานของเอ็นไซม์ที่สังเคราะห์ heme ทำให้ระดับ ซีโมโกลบิน

ลดลง (Messuwana, 1981) และทำให้เกิดโรคมะเร็งในเม็ดเลือด (anemia) เมื่อมีปริมาณตะกั่วในเลือดอยู่ในระดับ 60 - 80 µg/100 ml (WHO, 1983) ผลของตะกั่วต่อระบบประสาทจะทำให้เกิดอาการเฉื่อยชา เมื่อยล้า อ่อนเพลีย เป็นง่อยและเป็นอัมพาต ถ้ามีสารตะกั่วสะสมอยู่ในร่างกายปริมาณมาก (กิตติ เอกอำพล, 2528 ; กรองทิพย์ ศรีตะปัญญะ, 2530) WHO (1980) รายงานระดับตะกั่วในเลือดที่มีผลต่อระบบประสาทจะอยู่ในช่วง 40 - 50 µg/100 ml และจะมีอาการเด่นชัดมากขึ้นเมื่อตะกั่วอยู่ในระดับ 70 µg/100 ml และผลของตะกั่วต่อไต จะทำให้ระบบไตทำงานล้มเหลว โดยตะกั่วจะไปรวมกับโปรตีนที่ไตทำให้หลอดไตทำงานผิดปกติ นอกจากนี้ในเพศหญิงที่มีอาชีพสัมผัสกับสารตะกั่วเป็นประจำจะมีเปอร์เซ็นต์ของการแท้งลูกและไม่ประสบความสำเร็จในการมีบุตรสูงกว่าผู้ที่ไม่มีอาชีพเกี่ยวข้องกับสารตะกั่วดังกล่าว (WHO, 1983)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย