บทที่ 2

การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โลหะหนักที่ทำการศึกษา

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นอย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 5 เท่าของน้ำ (Mottet, 1974) หรือมีน้ำหนักอะตอมสูงกว่า 100 ขึ้นไป (Greath, 1990) หรือมีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (Stoker and Seagers, 1976) เช่น ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม ทองแดง สังกะสี แมงกานีส และอาเซนิก เป็นต้น

ในการศึกษาครั้งนี้มุ่งศึกษาโลหะหนัก 3 ธาตุ คือ แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรมทั่วไป ทำให้มีการแพร่กระจายและปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งทางดิน น้ำ และอากาศ แล้วถ่ายทอดเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารและมีการสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิตต่างๆ ซึ่งโลหะหนักที่ศึกษานี้จัดเป็นสารเคมีที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ดังนั้นจึงขอรวบรวมสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่เกี่ยวกับโลหะหนักทั้ง 3 ธาตุนี้ ในแง่ของแหล่งกำเนิด (source and occurrence) สมบัติทางกายภาพและทางเคมี (physical and chemical properties) การนำไปใช้ประโยชน์ (uses of heavy metals) และความเป็นพิษ (toxicity) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. แคดเมียม (cadmium)

1.1 แหล่งกำเนิด

แคดเมียมเป็นธาตุที่ค่อนข้างหายากในธรรมชาติ ปกติจะไม่พบแคดเมียมในรูปอิสระ แต่จะพบรวมอยู่กับก๋ามะถัน เป็นสารประกอบแคดเมียมซัลไฟด์ ซึ่งมีสีเหลืองอยู่ในแร่กรีนนอกไคท์ (greenockite, CdS) และพบปะปนกับแร่สังกะสีซัลไฟด์ (sphalerite) โดยปริมาณของ

แคดเมียมจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณสังกะสีในแร่นั้น และยังอาจพบแคดเมียมปะปนอยู่กับสินแร่ตะกั่วและทองแดง ในปริมาณที่น้อยกว่าในสินแร่สังกะสี (ไมตรี สุทธจิตต์, 2531)

1.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมี

แคดเมียมเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่ถูกค้นพบตั้งแต่ปี ค.ศ.1817 แต่มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ในช่วง 50 ปีก่อนนี้เอง (Beliles, 1975) โดยมีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ "Cd" มีเลขมวลอะตอมเท่ากับ 48 มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 112.40 จุดเดือดเท่ากับ 766 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลวเท่ากับ 320.9 องศาเซลเซียส และความหนาแน่นเท่ากับ 8.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 20 องศาเซลเซียส ปกติจะมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +2 เสมอ ยกเว้นในรูปของ Cd_2O และ Cd_2Cl_2 จะมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +1 แคดเมียมสามารถละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ได้อย่างช้าๆ แต่จะละลายได้ดีมากในกรดไนตริก (HNO_3) โดยสารประกอบของแคดเมียมในรูปของเกลือซัลเฟตและเกลือไนเตรตจะละลายได้ดี แต่ในรูปของออกไซด์ ไฮดรอกไซด์และคาร์บอเนตจะไม่ละลายน้ำ ส่วนในสารละลายเบสมักจะไม่ละลาย สารประกอบของแคดเมียมกับสารพวกเฮไลด์จะละลายได้ดีในแอลกอฮอล์และอะซีโตน โดยแคดเมียมคลอไรด์สามารถละลายน้ำได้ดีเท่ากับ 7.7 โมลต่อลิตร ที่ 20 องศาเซลเซียสและเนื่องจากแคดเมียมทำปฏิกิริยาได้ดีในน้ำและในอากาศ ดังนั้นจึงไม่ค่อยจะเสถียร (unstable) โดยแคดเมียมสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O_2) ในสภาพที่มีความร้อน หรือเกิดไพโรไลซิส (pyrolysis) กับคาร์บอเนตหรือไนเตรตได้สารประกอบของแคดเมียมออกไซด์ (CdO) ซึ่งมีสีเหลืองแกมเขียวจนถึงสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งมีพิษรุนแรงมาก

1.3 การนำแคดเมียมไปใช้ประโยชน์

ในปัจจุบันมนุษย์นำแคดเมียมมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ทั้งทางเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม เช่น

1.3.1 ใช้เป็นตัวเคลือบผิวโลหะจำพวกเหล็กและเหล็กกล้า โดยกระบวนการ electro-deposition เมื่อเปรียบเทียบการเคลือบผิวกับสังกะสี แคดเมียมจะเคลือบผิวได้สม่ำเสมอและเรียบกว่า และสามารถทนการผุกร่อนได้ดีกว่า ทนการกัดกร่อนด้วยสารละลายเบส จึงใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเลคโทรนิก

1.3.2 ใช้ผลิตแบตเตอรี่ โดยใช้ร่วมกับโลหะนิเกิล สามารถประจุไฟใหม่ได้ (rechargeable battery) เรียกว่า cadmium-nickel battery

1.3.3 ใช้ผสมกับโลหะอื่นเป็นโลหะผสม (alloy) ต่างๆ เช่น

- alloy ของทองแดง ซึ่งมีแคดเมียมร้อยละ 1 ใช้ในการผลิตเส้นลวดโทรเลข และโทรศัพท์

- alloy ของทองแดงและตะกั่ว มีแคดเมียมผสมอยู่ร้อยละ 20 ใช้ในการผลิตแบบพิมพ์ (printing plate)

1.3.4 ใช้ผสมกับโลหะอื่นๆ ในกิจการเพชรพลอย เช่น ผสมกับทอง ผสมกับเงิน

1.3.5 ผสมกับโลหะอื่นให้มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ เช่น cadmium arsenide, cadmium antimonide และ cadmium telluride

1.3.6 ใช้ผสมสีบางชนิด เซรามิค ยางแก้ว หมึกพิมพ์ และผสมในพลาสติก ในรูปแคดเมียมสเตียเรต เป็นตัว stabilizer เพื่อทำให้พลาสติกคงรูป

1.3.7 ใช้ในกิจการอื่นๆ เช่น

- ใช้ผสมยาฆ่าเชื้อรา (fungicides) และยาฆ่าแมลง (insecticides)

- ใช้ในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู เป็นแท่งควบคุม (control rod) เพื่อเป็นตัวดูดนิวตรอน (neutron absorber)

- ใช้ในการผลิตหลอดฟลูออเรสเซนต์

- ใช้ในกิจการถ่ายรูป

- ใช้ในโรงงานผลิตปุ๋ยฟอสเฟต

1.4 <u>ความเป็นพิษของแคดเมียม</u>

การนำแคดเมียมมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันทำให้มีแคดเมียมแพร่กระจายปนเปื้อนลงสู่สิ่งแวดล้อมและทำให้เกิดพิษภัยต่อมนุษย์มาแล้ว เช่น เมื่อปี ค.ศ.1940 ประชาชนในหมู่บ้านริมแม่น้ำจินสุ (Jintsu) ประเทศญี่ปุ่นได้ป่วยเป็นโรค "อิไต-อิไต" (itai-itai) ผู้ป่วยมีอาการปวดกระดูกทั่วร่างกาย กระดูกเปราะ เบื่ออาหารและอ่อนเพลีย แหล่งของแคดเมียมเกิดจากเหมือง Kamioka ของบริษัท Mitsui mining and smelting น้ำจากแม่น้ำได้ถูกนำมาใช้ในการปลูกข้าว ทำให้แคดเมียมสะสมในข้าวมากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

พิษของแคดเมียมก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบการทำงานของร่างกายได้หลายอย่างและแคดเมียมจะมีครึ่งชีวิต (biological half-life) ในร่างกายอยู่ระหว่าง 19-38 ปี ซึ่งอวัยวะที่เป็นเป้าหมายที่แคดเมียมจะแสดงความเป็นพิษ ได้แก่

1.4.1 ระบบทางเดินอาหาร พิษเฉียบพลันเมื่อร่างกายได้รับแคดเมียมโดยการกิน คือ คลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง และเป็นตะคริวที่ท้อง ในกรณีที่ได้รับแคดเมียมปริมาณมากอาจตายภายใน 1-14 วัน เนื่องจากสูญเสียน้ำ และไตวาย การทำงานของไต หัวใจ และปอดล้มเหลว ปริมาณทั่วไปของแคดเมียมที่ทำให้คนตายได้ถ้ากินผ่านทางปากจะแตกต่างกัน ตามรูปแบบของสารแคดเมียม แต่โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 350-8,900 มิลลิกรัม

1.4.2 ระบบไตและระบบขับถ่าย โดยแคดเมียมทำความเสียหายต่อโกลเมอรูรัสและหลอดไตได้ 2 ประการคือ แคดเมียมไปรวมตัวกับโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกลายเป็นเมทัลโลไธโอนีลสะสมอยู่ในไต และแคดเมียมไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ leusine amino-peptidase ซึ่งมีสังกะสีเป็นองค์ประกอบ ทำให้ระบบการกรองและดูดสารกลับในไตผิดปกติ จนเกิดภาวะปัสสาวะมีโปรตีน (proteinuria) ภาวะปัสสาวะมีน้ำตาล (glucosuria) ภาวะปัสสาวะมีแคลเซียมมาก (hypercalciuria) และภาวะการมีกรดอะมิโน (amino aciduria)

1.4.3 เลือดและระบบการสร้างเลือด พบว่า ถ้ามีแคดเมียมในเลือดสูง ปริมาณฮีโมโกลบินและเฮปะโตโกลบินจะลดลง และเม็ดเลือดขาว (eosinophil) จะเพิ่มขึ้น สำหรับในสัตว์ พบว่า เกิดอาการโลหิตจาง เนื่องจากแคดเมียมไปทำให้ระดับของทรานส์เฟอริน (transferin) ลดต่ำลงและทำให้ปริมาณเหล็กในพลาสมาลดลงด้วย นอกจากนี้พบว่า แคดเมียมทำให้เกิดความดันเลือดสูง

1.4.4 ระบบประสาท พบว่า คนงานที่สัมผัสกับสารประกอบแคดเมียม ปรากฏว่ามีอาการปวดศีรษะบ่อยๆ เวียนศีรษะ ฉุนเฉียวง่าย และนอนไม่หลับ กระสับกระส่าย ในบางรายเกิดอาการ neurasthenia โดยมีอาการอ่อนเหลียอย่างเรื้อรัง เหนื่อยง่าย อ่อนแรง อาการจิตซึม เบื่ออาหาร นอนไม่หลับ และบางรายมีอาการ vegetative neurosis มีอาการประสาทที่เกิดจากความผิดปกติทางอารมณ์เนื่องจากเบื่ออาหาร

1.4.5 ระบบกระดูก พบว่าแคดเมียมทำให้เกิดพิษเรื้อรังต่อกระดูกได้ ถ้าร่างกายได้รับแคดเมียมติดต่อกันเป็นเวลานาน และมักเกิดกับคนที่ขาดแคลเซียมและวิตามิน ความเป็นพิษ

ต่อกระดูกอาจเกิดขึ้น เนื่องจากแคดเมียมไปมีผลต่อการดูดซึมธาตุแคลเซียมในทางเดินอาหาร ขัดขวางการทำงานของวิตามินดี และพาราไธรอยด์ และควบคุมอัตราส่วนของแคลเซียมและฟอสฟอรัสในร่างกาย ซึ่งมีผลทำให้เกิดโรค osteomalacia และโรค osterporosis มีอาการกระดูกอ่อน และผุเปราะ แตกหักง่ายเช่นเดียวกับโรค itai-itai

1.4.6 นอกจากนี้พบว่า แคดเมียมเป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) และเป็นสารที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ (mutagen) อีกด้วย

2. ทองแดง

2.1 แหล่งกำเนิด

ทองแดงเป็นโลหะหนักที่พบอยู่ทั่วไป โดยมีต้นกำเนิดพบอยู่ในรูปออกไซด์ คาร์บอเนต และซัลไฟด์ของสินแร่ทองแดงในธรรมชาติ ปกติผิวโลกจะมีทองแดงประกอบอยู่ประมาณ 45 ส่วนในล้านส่วน (Schroeder, 1965) ทองแดงถูกนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรม เพราะมีสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดี นอกจากนี้ทองแดงยังเป็นสารที่จำเป็นต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ เป็นเอนไซม์ (enzyme) ของกระบวนการทางชีวเคมีที่สำคัญในร่างกายของสิ่งมีชีวิต และยังมีการใช้เกลือของทองแดงใส่ลงไปในถั่วกระป๋อง เพื่อให้มีสีเขียวสดใส ในสัตว์น้ำหลายชนิดจะมีทองแดงอยู่ในโครงสร้างของโปรตีนในเลือด เพื่อทำหน้าที่ในการลำเลียงออกซิเจน สัตว์น้ำบางชนิดอาจมีแคดเมียมในปริมาณสูง เช่น ในหอยนางรมอาจพบถึง 1,500 ส่วนในล้านส่วน

2.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมี

ทองแดงเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่ง มีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ "Cu" มีเลขมวลอะตอมเท่ากับ 29 น้ำหนักอะตอมเท่ากับ 63.546 จุดหลอมเหลวเท่ากับ 1,083 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นเท่ากับ 8.92 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 20 องศาเซลเซียส ทองแดงเป็นโลหะที่มีความเหนียว สามารถตัดให้โค้งงอตามรูปร่างที่ต้องการได้ มีเลขออกซิเดชัน คือ +1, +2 และ +3 นำไฟฟ้าได้ดีรองจากเงิน (Ag) ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศที่อุณหภูมิสูง จะได้สารประกอบทองแดงในรูปคิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O) ส่วนในขณะอุณหภูมิต่ำจะได้คิวปริกออกไซด์ (CuO) และอาจทำปฏิกิริยากับก๊าซธรรมชาติได้สารประกอบคิวปรัสซัลไฟด์ (Cu_2S) ทองแดงสามารถ

ละลายได้ดีในกรดซัลฟุริก (H_2SO_4) และกรดไนตริก และสามารถละลายได้ในสารละลายแอมโมเนียมและโปแตสเซียมไซยาไนด์ คิวปริกไฮดรอกไซด์ ($Cu(OH)_2$) จะตกตะกอนเป็นตะกอนเบา (bulky) และอาจเป็นผลึกได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น คิวปริกไฮดรอกไซด์ อาจเปลี่ยนเป็นคิวปริกออกไซด์ได้และสามารถละลายได้ดีในกรดแก่ แต่บางครั้งอาจพบคิวปริกอิออน (Cu^{2+}) อยู่ในรูปคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีน้ำอยู่ด้วยในรูป $CuSO_4.5H_2O$ และเกือบทั้งหมดของคิวปริกอิออนจะละลายได้ในน้ำ

2.3 การนำทองแดงไปใช้ประโยชน์

สำหรับทองแดงก็เป็นโลหะหนักอีกชนิดหนึ่งที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น

2.3.1 โรงงานทอผ้า เพราะเป็นองค์ประกอบสำคัญในสีย้อมผ้า

2.3.2 โรงงานผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า เพราะทองแดงเป็นสารที่นำไฟฟ้าที่ดีมาก และมีราคาไม่แพงนัก

2.3.3 โรงงานทำภาชนะหุงต้มและปรุงอาหารเพราะทองแดงเป็นตัวนำความร้อนที่ดีมาก

2.3.4 โรงงานผลิตสี สีย้อมผ้า และทำหมึก

2.3.5 โรงงานฟอกหนัง

2.3.6 อุตสาหกรรมผลิตปุ๋ยเคมี

2.3.7 อุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน

2.3.8 อุตสาหกรรมปิโตรเคมี

2.3.9 ใช้ในกระบวนการผลิตยาฆ่าแมลง และในสารฆ่าเชื้อรา

2.4 ความเป็นพิษของทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะหนักที่จำเป็นต่อกระบวนการสร้างเม็ดเลือดแดง (วิชัย ตันไพจิตร, 2524) โดยจะทำหน้าที่กระตุ้นการใช้เหล็กของฮีโมโกลบิน นอกจากนี้ยังเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ที่สำคัญอย่างน้อย 10 ชนิดในร่างกายที่มีผลต่อกระบวนการต่างๆ เช่น การสร้างเนื้อเยื่อพังผืด และคอลลาเจน ซึ่งจะให้ความแข็งแรงกับหลอดเลือดและกระดูก การสร้างเม็ดสีเมลานิน รวมทั้งเป็นองค์ประกอบหลักของสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะสัตว์พวกหอย หมึก และครัสเตเชียน

โดยเป็นส่วนประกอบของฮีโมไซยานิน (haemocyanin) ในเลือด ซึ่งจะทำหน้าที่ลำเลียงออกซิเจนในร่างกายสัตว์เหล่านี้

แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ถ้าบริโภคทองแดงเข้าทางระบบทางเดินอาหารในปริมาณมากพอจะทำให้เกิดอาการคลื่นเหียนอาเจียน ปวดกระเพาะ เลือดออกในกระเพาะและท้องร่วงได้ ถ้าเราบริโภคสารประกอบนี้ในปริมาณมากๆ จะทำให้เกิดโรคโลหิตจางได้ เพราะร่างกายควบคุมปริมาณทองแดงโดยเมือกที่ลำไส้ได้ ในคนปกติจะมีปริมาณทองแดงในซีรัม (serum) ประมาณ 120 - 145 ไมโครกรัมต่อลิตร นอกจากนี้พบว่า ทองแดงทำให้เกิดโรคชนิดหนึ่ง เรียกว่า "โรควิลสัน" เกิดความผิดปกติทางกรรมพันธุ์ รายงานโดยวิลสันเมื่อปี พ.ศ.2455 โดยผู้ป่วยจะมีอาการสะสมทองแดงในตับมากกว่าปกติ สาเหตุเกิดจากผู้ป่วยไม่สามารถขับทองแดงออกทางน้ำดีเข้าสู่ลำไส้ได้ และผู้ป่วยมีระดับเซลลูโลสพลาสมิน ซึ่งเป็นตัวขนถ่ายทองแดงต่ำด้วย เมื่อตับมีทองแดงอิ่มตัว ทองแดงก็จะแทรกซึมเข้าสู่ระบบโลหิต ทำให้ทองแดงไปพอกตามอวัยวะต่างๆ ที่สำคัญ ได้แก่ สมอง กระจกตา ไต มีผลทำให้อวัยวะเหล่านี้พิการได้

แม้ว่าทองแดงจะเป็นสารที่จำเป็นต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด แต่ระดับความเป็นพิษกับระดับการขาดทองแดงในสิ่งมีชีวิตบางชนิดนั้นอยู่ในช่วงที่แคบมาก และไม่มีระบบควบคุมเพื่อป้องกันการดูดซับเลย เช่น สาหร่าย (algaes) เห็ดรา (fungi) และพวกสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง (invertebrates) ดังนั้นจึงปรากฏอาการขาด (deliciency) ทองแดงและอาการที่เป็นพิษ (toxicity) ได้ง่ายด้วย (Beliles, 1975) ในสัตว์เคี้ยวเอื้อง (ruminants) จะมีความไวต่อการตอบสนอง ต่อพิษของทองแดงมากกว่าสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่มีกระเพาะอาหารเดี่ยว (monogastric mammals) ดังนั้นจึงเกิดอาการฮีโมไลซิส (haemolysis) และฮีโมโกลบินยูเรีย (haemoglobinuria) ขึ้นได้ง่าย แต่สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมอื่นๆ เช่น มนุษย์ มีความไวในการตอบสนองต่อทองแดงได้ต่ำ เพราะมีการพัฒนากลไกการควบคุมระดับของสารในเลือด (haemostatic machanism) ด้วยเหตุนี้จึงพบว่าทองแดงไม่ทำให้เกิดโรคเรื้อรัง และยังพบว่าปริมาณทองแดงที่สะสมในเนื้อเยื่อไม่เพิ่มขึ้นตามอายุ แม้ว่าระดับทองแดงในเลือดจะเพิ่มขึ้นก็ตาม (Schroeder et al., 1966)

สำหรับสัตว์น้ำ ถ้าได้รับทองแดงมากเกินไป ก็จะทำให้สัตว์น้ำตายได้ พบว่า ทองแดงในรูปของ copper sulphate จะทำให้เมือกปลาที่ขับออกมาตกตะกอน ทำให้ปลาตายเนื่องจากการแลกเปลี่ยนกาซผิดปกติ และเซลล์ที่เหงือกถูกทำลาย (Jones, 1964) นอกจากนี้ยังมีผลต่อ

ตัวอ่อนของปลาด้วย

3. สังกะสี

3.1 แหล่งกำเนิด

สังกะสีเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่พบปะปนอยู่กับสินแร่ต่างๆ ในรูปของซิงค์เบลนด์ (zinc blende) หรือฟาเลอไรท์ (phalerite) ซึ่งมีซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) เป็นองค์ประกอบหลัก และพบในสินแร่สมิทโซไนท์ (smithsonite) หรือคาลาไมน์ (calamine) มีซิงค์คาร์บอเนต ($ZnCO_3$) เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังพบในรูปวิลลีไมท์ (willemite, Zn_2SiO_4) และซิงค์ไซท์ (zincite, ZnO) ซึ่งโดยปกติจะพบแคดเมียมปะปนกับสังกะสีด้วย แต่มีจำนวนเล็กน้อย สำหรับในอุตสาหกรรมจะแยกสังกะสีในรูปของคาร์บอเนตและซัลไฟด์ ถ้าอยู่ในรูปของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จะนำมาละลายในกรด แล้วทำให้ตกตะกอนเพื่อแยกสังกะสีออกมา

3.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมี

สังกะสีเป็นโลหะหนักมีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ "Zn" มีเลขมวลอะตอมเท่ากับ 30 มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 65.38 จุดเดือดเท่ากับ 907 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลวเท่ากับ 419 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นเท่ากับ 7.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 20 องศาเซลเซียส ปกติเป็นโลหะที่มีความแข็งแต่เปราะ ไม่สามารถตัดให้โค้งงอตามรูปร่างที่ต้องการได้ และเนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำ จึงไม่คงตัวในธรรมชาติ เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย แม้ว่าสังกะสีจะมีสมบัติคล้ายแคดเมียมมาก แต่สังกะสีก็มีสมบัติเป็นสารพวกแอมโฟเทอริก (amphiteric) ทำให้สังกะสีสามารถละลายได้ทั้งในสารละลายกรดและสารละลายเบส โดยถ้าละลายในสารละลายเบสเข้มข้น จะอยู่ในรูปของซิงค์เกตอิออน (zincate ion) เช่น ZnO^{2-}, $[Zn(OH)_3(H_2O)]^-$, $[Zn(OH)_3(H_2O)_3]^-$ หรือ $[Zn(OH)_4]^{2-}$ สังกะสีจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเมื่อมีอุณหภูมิสูง จะอยู่ในรูป ZnO จะมีสีเหลือง เมื่อเย็นลงจะมีสีขาว ไฮดรอกไซด์ของสังกะสีสามารถแยกจากสารอื่นๆ โดยเติมสารละลายเบส จะเกิดตะกอนในรูปของ $Zn(OH)_2$ ซึ่งมีค่าคงที่ของการละลายประมาณ 10^{-11} สังกะสีจะทำปฏิกิริยากับสารกลุ่มเฮไลด์แล้วได้สารประกอบที่ละลายน้ำได้ดี เช่น $ZnCl_2$ และละลายได้ในแอลกอฮอล์และอะซีโตนด้วย

3.3 การนำสังกะสีไปใช้ประโยชน์

สำหรับโลหะหนักคือสังกะสี ซึ่งมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมายเช่น

3.3.1 ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก ใช้สังกะสีช่วยป้องกันการสึกกร่อนของโลหะ จึงนำมาชุบสังกะสีเพื่อป้องกันสนิม

3.3.2 ในอุตสาหกรรมยาง มีการใช้ ZnO เพื่อให้ยางมีสีขาว

3.3.3 ในอุตสาหกรรมเซรามิค และเครื่องเคลือบ ก็มีการใช้ ZnO ด้วย

3.3.4 ในอุตสาหกรรมสิ่งทอและสีย้อม ใช้ $ZnCl_2$ ในการย้อมผ้า

3.3.5 ในอุตสาหกรรมฟอกหนัง ใช้ $ZnSO_4.7H_2O$ ในการเก็บรักษาหนัง

3.3.6 ในอุตสาหกรรมพรม และอุตสาหกรรมผลิตจอภาพโทรทัศน์ ใช้ ZnS เพื่อเคลือบจอภาพโทรทัศน์

3.3.7 ในอุตสาหกรรมกระดาษและไม้อัด จะใช้ $ZnCl_2$ ในการป้องกันเชื้อรา

3.3.8 ในอุตสาหกรรมการผลิตแชมพูสระผม มีการนำซิงค์ไพริดีนไธโอน (zinc pyridinethione) มาใช้เป็นส่วนผสมในการป้องกันรังแค

3.3.9 ในอุตสาหกรรมยาและเภสัชกรรม นำสังกะสีมาใช้ในการเตรียมอินซูลิน (insulin) และผสมในซิงค์เบซิดราซิน (zinc beacitracin)

นอกจากนี้ สังกะสียังถูกนำมาใช้ในครัวเรือนทั่วไป และเราจะพบได้ทั้งในดิน น้ำ และอากาศ ตลอดจนสิ่งมีชีวิตต่างๆ ในทางการเกษตรกรรมก็นำสังกะสีมาใช้ในการเพาะปลูก โดยเติมลงไปในดิน เพราะสังกะสีเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืชอีกด้วย

3.4 ความเป็นพิษของสังกะสี

ตามธรรมชาติจะพบว่าในกล้ามเนื้อ ตับ ไต และตับอ่อน มีสังกะสีสะสมอยู่จำนวนมาก โดยเฉพาะในระบบอวัยวะสืบพันธุ์ของเพศชาย จะพบว่ามีสังกะสีสะสมอยู่ทั้งที่ต่อมลูกหมาก (postate gland) และลูกอัณฑะ (testis) ที่ตาก็จะพบว่ามีความเข้มข้นของสังกะสีในปริมาณมาก ในเลือดโดยเฉพาะเม็ดเลือดแดงจะพบสังกะสีจำนวนมาก เมื่อใช้ไอโซโทปของสังกะสี (^{65}Zn) ศึกษาการสะสมของสังกะสี พบว่า ตับเป็นที่เก็บสะสมสังกะสีเป็นจำนวนมาก แต่เม็ดเลือดแดงและกระดูกก็มีแนวโน้มที่จะสะสมสังกะสีด้วย

ในหนู พบว่า สังกะสีกับแคดเมียมจะมีพิษหักล้างกัน ในสิ่งมีชีวิตสังกะสีจะทำให้มีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น แต่มีปฏิกิริยากับกระบวนการเมตาบอลิซึมของทองแดง ดังนั้นสามารถสรุปว่าแคดเมียมเป็นสารเคมีที่ต่อต้านกระบวนการเมตาบอลิซึม (antimetabolite) ของสังกะสี (Petering, Johnson and Slemmer, 1971)

ในมนุษย์ พบว่า พิษของสังกะสีทำให้เกิดอาการเป็นไข้ อาเจียน ปวดท้องและเกร็ง รวมทั้งมีอาการท้องเสียอีกด้วย (Underwood, 1971) สังกะสีมีความพิษมากโดยเฉพาะรูปซิงค์ออกไซด์ ทำให้เกิดอันตราย โดยจะมีอาการเป็นไข้ แต่ไม่มีอาการของพิษเรื้อรัง สังกะสีในรูป $ZnCl_2$ ก็ทำให้เกิดอาการแผลได้ถ้าสัมผัสถูก หรือถ้าสูดดมฝุ่นสังกะสีเข้าไป จะทำให้เกิดอาการที่ระบบทางเดินอาหารและระบบทางเดินหายใจ ทำให้ตัวเขียว ผิวหนังอักเสบ และมีเนื้องอกที่โพรงจมูกอีกด้วย

ในสุนัข พบว่า ซิงค์ไพริดีนไธออลออกไซด์ (zinc 2-pyridinethiol-oxide) ทำให้ตาบอด เนื่องจากจอตาถูกทำลาย แต่เมื่อทำการทดลองในลิงและในหนู พบว่า ไม่มีพิษเหมือนกับที่เกิดขึ้นในสุนัข ดังนั้นน่าจะเกิดจากการที่สังกะสีไปจับตัวกับโซเดียมไพริดีนไธโอน (sodium pyridinethione) และไฮดรอกซีไพริดีนไธโอน (hydroxy pyridinethione) ในเทปตัมลูซิดิน (tapetum lucidin) ในสุนัข ซึ่งโครงสร้างนี้จะไม่พบในมนุษย์และลิง (Winek and Buchler, 1966) และในไก่และหนู พบว่า สังกะสีทำให้เกิดมะเร็งขึ้นได้ ถ้าฉีดเข้าไปตรงๆ ซึ่งเป็นทางเดียวที่พบว่าสังกะสีเป็นสารก่อมะเร็ง (Sunderman, 1971)

สำหรับพิษของสารโลหะหนักคือ สังกะสี มีผลคล้ายคลึงกับพิษของสารทองแดง คือจะทำลายเซลบริเวณซี่เหงือกของปลา และมีผลต่อการวางไข่และตัวอ่อนของปลา ทำให้ปลามีการเจริญเติบโตช้าลง

จะเห็นได้ว่า ทั้งแคดเมียม ทองแดง และสังกะสี มีทั้งประโยชน์และโทษ หากมีการใช้อย่างไม่ถูกต้อง ก็จะเกิดการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในประเทศไทย การศึกษาพิษของโลหะหนักยังมีอยู่น้อยมาก และส่วนใหญ่จะศึกษาในมนุษย์และสัตว์ที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้น ปัญหาเกี่ยวกับความเป็นพิษของโลหะหนักต่อสัตว์น้ำจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ และจำเป็นควรแก่การศึกษาอย่างยิ่ง

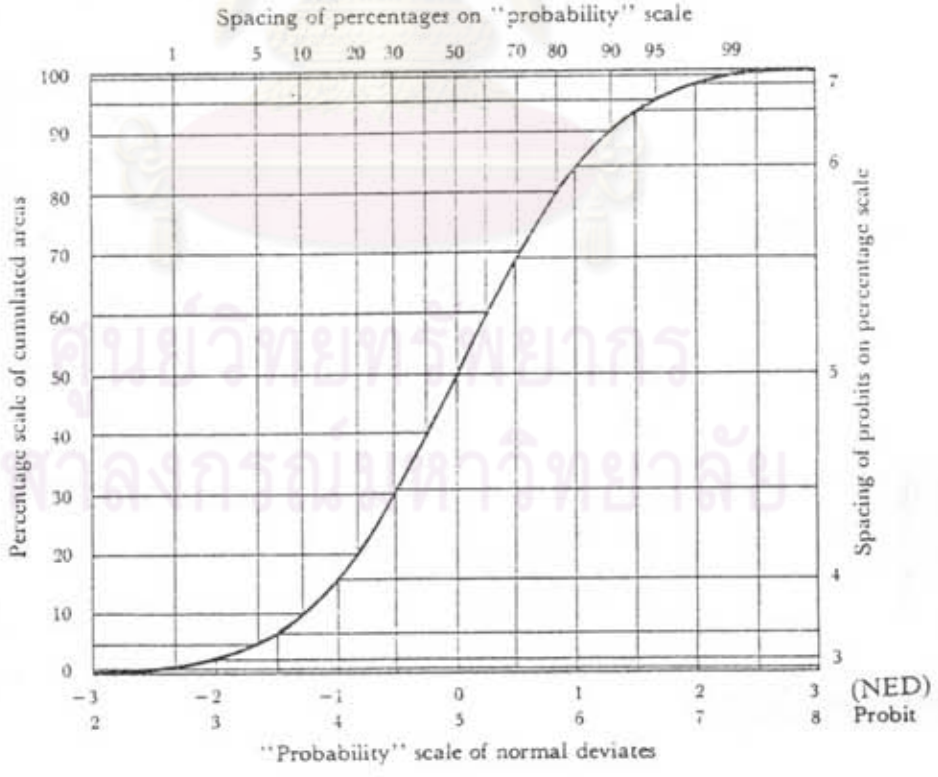
018866

การทดสอบสารพิษทางพิษวิทยา

ในหลายปีที่ผ่านมามีสารเคมีไม่น้อยกว่า 63,000 ชนิด ที่ถูกนำมาใช้ในชีวิตประจำวัน (Hunter, 1987) และมีการสังเคราะห์ขึ้นมาอีกไม่ต่ำกว่า 1,000 ชนิดต่อปี ซึ่งสารเคมีเหล่านี้อาจเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไป ถ้ามีการปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้การเฝ้าระวัง (monitoring) ผลกระทบของสารเคมีต่างๆ จึงเป็นสิ่งสำคัญ แต่กระทำได้ยาก เพราะสภาพธรรมชาติมีปัจจัยต่างๆ เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญและเป็นข้อจำกัดของการศึกษาทางพิษวิทยาของนิเวศวิทยาแหล่งน้ำ แต่ในปัจจุบันมีการพัฒนาเทคนิคสำหรับการทดลองทางพิษวิทยาในห้องปฏิบัติการขึ้น เพื่อเป็นเครื่องมือที่ช่วยนักพิษวิทยา ในการประเมินพิษของสารเคมีต่างๆ ทั้งชนิดและปริมาณ ตลอดจนทำนายเกี่ยวกับความเสียหายที่จะเกิดกับอวัยวะและเซลของสิ่งมีชีวิตหลายชนิด ซึ่งเทคนิคที่นิยมใช้ในการศึกษาทดลองทางพิษวิทยา โดยใช้สิ่งมีชีวิตเป็นตัวทดสอบ (biotesting) กับสารเคมีที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ และสังเกตุผลกระทบที่เกิดขึ้นกับสิ่งมีชีวิตนั้น แล้วนำผลมาแปรความหมาย (interpretation) เทียบกับตัวมาตรฐาน หรือตัวควบคุม โดยใช้สถิติช่วยในการวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลนั้น เป็นเทคนิคที่รู้จักกันทั่วไปว่า "เทคนิคทางชีววิเคราะห์" (bioassay) ซึ่งเทคนิคทางชีววิเคราะห์นี้ ได้ถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (dissolved oxygen) พีเอช (pH) อุณหภูมิ (temperature) ความเค็ม (salinity) ความขุ่น (turbidity) ปริมาณคลอรีน และสารพิษต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ (pesticides) รวมทั้งโลหะหนักและตัวทำละลายต่างๆ (solvents) ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้เป็นดัชนีวัดที่สำคัญในระบบนิเวศแหล่งน้ำ ว่ามีความเหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำนั้นเพียงใด และถ้าพารามิเตอร์เหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงไป ไม่ว่าจะเหตุใดก็ตาม จะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตชนิดใด (species) ได้บ้าง นอกจากนี้ ยังอาจใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการควบคุมคุณภาพน้ำที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ และเป็นมาตรฐานคุณภาพน้ำ ที่จะใช้ควบคุมปริมาณการปล่อยน้ำเสีย ที่ควรได้รับการอนุมัติจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องอีกด้วย

การหาค่าความเป็นพิษเฉียบพลัน

วิธีการในทางสถิติที่นิยมใช้ในการหาค่าความเป็นพิษเฉียบพลันของสารพิษต่อสัตว์ทดลองที่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน คือ วิธีโพรบิต (probit analysis) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาโดย Finney (1974) โดยให้สิ่งมีชีวิต หรือสัตว์ทดลองได้รับสารพิษ หรือตัวกระตุ้น (stimuli) ชนิดใดชนิดหนึ่ง แล้วจะพบว่า สิ่งมีชีวิตจะตอบสนองต่อตัวกระตุ้นนั้น โดยที่จำนวนของสิ่งมีชีวิตที่แสดงอาการตอบสนอง (response) ต่อสารพิษจะแตกต่างกันที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งเรียกการตอบสนองของสัตว์ทดลองนี้ว่า biological variation โดยตัวที่อ่อนแอหรือว่องไวต่อการตอบสนอง (sensitivity) จะแสดงอาการก่อนเมื่อได้รับสารพิษที่ความเข้มข้นระดับต่ำๆ ส่วนตัวที่ทนทานต่อสารพิษ จะแสดงอาการเมื่อได้รับสารพิษที่ระดับความเข้มข้นสูงขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น หรือปริมาณ (dose) และการตอบสนองของสิ่งมีชีวิตนี้ จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ในลักษณะซิกมอยด์ (sigmoid curve) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารพิษ และเปอร์เซนต์การตอบสนอง ของสัตว์ทดลอง (Finney, 1971)

เมื่อนำความสัมพันธ์ ระหว่างความเข้มข้นของสารพิษ กับการตอบสนองของสิ่งมีชีวิต (dose response relationship) มาแจกแจงความถี่ จะได้แผนภูมิการแจกแจงเป็นรูปโค้งระฆังคว่ำ (normal frequency distribution) ดังแสดงในรูป 2.2 โดยกลุ่มของสิ่งมีชีวิตที่อยู่ทางซ้ายสุดของเส้นโค้งนี้ คือ พวกที่ตอบสนองได้ว่องไวที่สุด และพวกที่อยู่ทางขวาสุด คือ พวกที่ทนทานต่อสารพิษ

เมื่อมาพิจารณาถึงการแจกแจงประชากรแบบปกติ โดยประชากรในที่นี้ หมายถึง สิ่งมีชีวิตที่ตอบสนองต่อสารพิษที่ใช้ทดลอง และมีองศาความเท่ากันของประชากร (degree of population homogenity) ก็คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, σ) ซึ่งส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานนี้ จะใช้วัดการกระจายของข้อมูลจากค่าเฉลี่ย (mean) สำหรับการทดลองทางพิษวิทยานี้ ค่าเฉลี่ยของการแจกแจงประชากรของสัตว์ทดลอง คือ ค่า log ED_{50} นั่นเอง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma(\mu-x)^2}{N-1}} \qquad \text{----------(1)}$$

เมื่อ N คือ จำนวนของสัตว์ทดลอง

μ คือ ค่า log ED_{50}

และ x คือ ค่า log ของระดับความเข้มข้นใดๆ

ถ้าคำนวณประชากรของสิ่งมีชีวิตภายใต้โค้งแจกแจงความถี่แบบปกติ เมื่อมีค่า $\mu+1$, $\mu+2$ และ $\mu+3$ จะมีค่าเท่ากับร้อยละ 68.3, 95.5 และ 97.7 ของประชากรสัตว์ทดลอง ดังรูปที่ 2.2 แต่จากค่า ED_{50} ที่จะหาได้จากโค้งซิกมอยด์ตามรูปที่ 2.1 จะมีค่าที่ถูกต้องแม่นยำจำเป็นต้องมีข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น และร้อยละของการตอบสนองจำนวนมาก เพื่อแก้ปัญหานี้ จึงต้องพยายามเปลี่ยนเส้นโค้งให้เป็นเส้นตรง ซึ่งทำได้โดยการเปลี่ยนค่าความน่าจะเป็นในการตอบสนองให้อยู่ในรูปของเทอม normal equivalent deviation(N.E.D.) โดยสมการที่ 2

$$y^* = \frac{(x-\mu)}{6} \qquad \text{----------(2)}$$

เมื่อ $x = \mu$ จะได้ $y^* = 0$

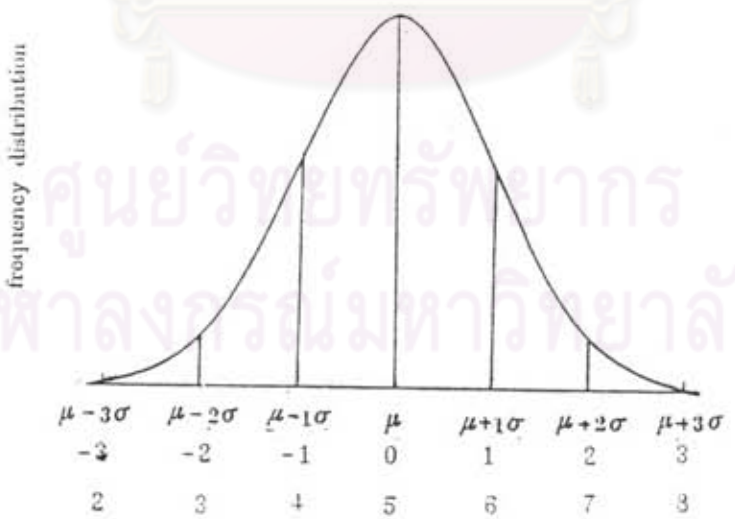
y^* = N.E.D. ของค่า P (probability) ใดๆ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1

เมื่อ $\mu = 0$ และ $6 = 1$

x = ค่า log ของความเข้มข้นใดๆ ถ้าให้ b = 1/6 และ a = $-\mu/6$

ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N.E.D. กับค่าความเข้มข้นจะเป็นสมการเส้นตรง คือ

$$y^* = a + bx \qquad \text{----------(3)}$$



รูปที่ 2.2 การแจกแจงความถี่แบบโค้งปกติของประชากรสัตว์ทดลอง (Finney, 1971)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการที่ 3 จะเห็นว่า y^* จะมีค่าอยู่ระหว่าง $-\alpha$ ถึง α และจะมีค่าเป็นลบเมื่อ P น้อยกว่า 0.5 ดังนั้น เพื่อความสะดวกในการหาค่าทางสถิติ จึงใช้ค่าโพรบิตแทนค่า N.E.D. โดยใช้

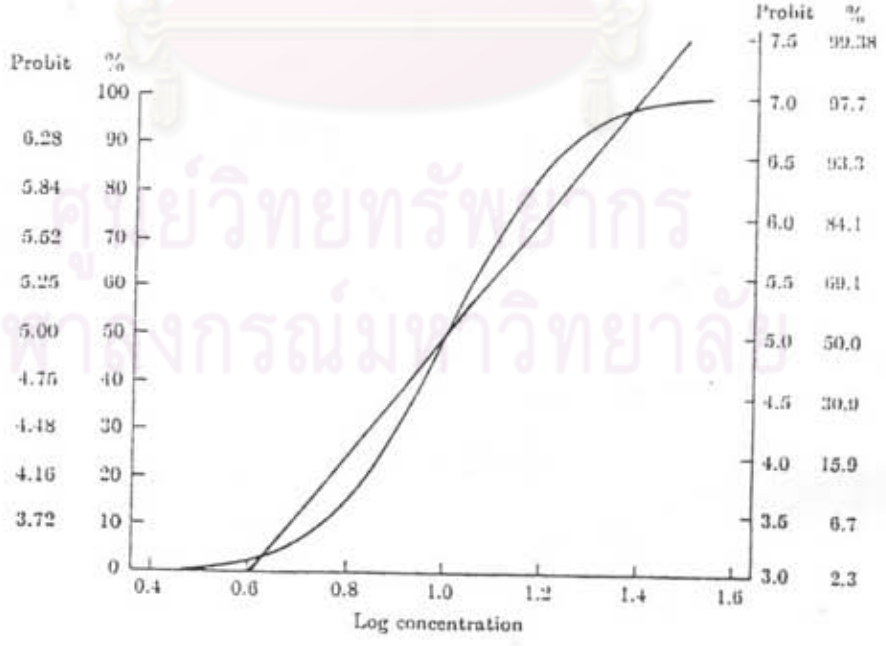
$$\text{probit } (y) = 5 + y^*$$

$$y = 5 + a + bx$$

ถ้าให้ $a^* = 5 + a$

ดังนั้น $y = a^* + bx$ ----------(4)

ซึ่งสมการข้างต้นได้รับการเสนอโดย Bliss (1934) แม้ว่าจะเพิ่มค่าคงที่ลงไปเพื่อปรับหน่วยให้มีค่าเป็นบวกเมื่อค่า P น้อยกว่า 0.5 แล้ว แต่สมการที่ 4 ก็ยังเป็นสมการเส้นตรง ด้วยเหตุนี้ การหาค่า ED_{50} จึงหาได้จากกราฟเส้นตรง (probit line) ระหว่างความเข้มข้นและค่าโพรบิต ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยเปลี่ยนค่าร้อยละของการตอบสนองเป็นค่าโพรบิตเสียก่อน โดยอาจดูจากตารางสำเร็จก็ได้ (Finney, 1971)



รูปที่ 2.3 กราฟเส้นตรงแสดงความเข้มข้นและค่าโพรบิต (Finney, 1971)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาค่า LC_{50} ของสารมลพิษต่างๆ ที่มีต่อสัตว์น้ำ

การหาค่า LC_{50} ซึ่งมักมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบสารเคมีต่างๆ ว่าจะเป็นอันตรายต่อสัตว์ทดลองเพียงใดเมื่อรั่วไหลลงสู่แหล่งน้ำ โดยในทางนิเวศวิทยามุ่งศึกษาเพื่อหาข้อมูลไปใช้ในการกำหนดมาตรฐานคุณภาพของน้ำทิ้งจากกิจกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรม เกษตรกรรม เหมืองแร่ เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ในการประเมินผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ถ้ามีสารเคมีเหล่านี้ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ และในปัจจุบันยังใช้เพื่อวัดพิษของสารเคมีที่ผลิตขึ้นมาใหม่อีกด้วย ซึ่งการทดลองเพื่อหาค่า LC_{50} นี้ ต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ดังนี้ (ประสงค์ โรจน์เลิศจรรยา, 2531)

1. สัตว์ทดลอง

ควรเป็นสัตว์ที่มีความว่องไวในการตอบสนองเมื่อได้รับสารพิษ มีการแพร่กระจายอยู่ทั่วไปในแหล่งน้ำธรรมชาติ สามารถเพาะเลี้ยงได้ง่าย มีสภาพแข็งแรง ไม่มีโรค และมีอายุหรือขนาดเท่าๆ กัน

2. การนำพาสัตว์ทดลอง

ต้องระมัดระวังในการนำพา หรือขนส่งสัตว์ทดลอง มิให้สัตว์ทดลองตาย หรืออ่อนแอลงก่อนที่จะนำมาใช้ทดลอง โดยต้องจัดสภาพแวดล้อมให้เหมาะสม

3. การนำมาเลี้ยงเพื่อให้เคยชินกับสภาพในห้องปฏิบัติการ

4. การเตรียมน้ำที่ใช้ในการทดลองทางพิษวิทยา

4.1 ควรเป็นน้ำสะอาด โดยตั้งทิ้งไว้หรือเป่าอากาศ (aerated) เป็นเวลาอย่างน้อย 7 วัน ก่อนนำมาใช้ในการทดลอง

4.2 พารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำที่จะนำมาใช้ทดลอง เช่นออกซิเจนที่ละลายในน้ำ พีเอช ความเป็นกรด-ด่าง (acidity-alkalinity) ความกระด้างของน้ำ (hardness) และอุณหภูมิ ควรนำมาตรวจวิเคราะห์ ทั้งในช่วงก่อนการทดลองและหลังจากทดลอง

5. ภาชนะที่ใช้ในการทดลอง

โดยทั่วไปมักใช้ภาชนะที่ทำมาจากพลาสติก แก้ว หรือแสตนเลส ในการเลือกใช้ภาชนะจะต้องคำนึงถึงชนิดของสารพิษที่ใช้ในการทดลองด้วย

6. การทดลอง แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

6.1 การทดลองเบื้องต้น (small scale exploratory test) เป็นการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นอย่างคร่าวๆ ที่ทำให้สัตว์ทดลองตายตั้งแต่ร้อยละ 0-100 ของประชากรสัตว์ทดลองทั้งหมด

6.2 การทดลองขั้นละเอียด (full scale exploratory test) โดยการนำช่วงความเข้มข้นของสารพิษจากการทดลองเบื้องต้น มาจัดระดับความเข้มข้นใหม่ โดยวิธีการดังนี้

6.2.1 แบ่งช่วงความเข้มข้นของสารพิษออกเป็น 5 ระดับความเข้มข้นและ 1 ชุดควบคุม โดยทำการทดลอง 2 หรือ 3 ซ้ำ (replication)

6.2.2 ใส่สัตว์ทดลองลงไปในแต่ละภาชนะ ซึ่งถ้าเป็นสัตว์ทดลองขนาดเล็ก เช่น ไรน้ำแดง ควรใส่สัตว์ทดลอง 10 ตัว หรือมากกว่า แต่โดยทั่วไปอาจใช้สัดส่วนดังนี้ คือ น้ำหนักสัตว์ทดลองต่อสารละลายที่ใช้ทดลองต่อวัน เท่ากับ 2 กรัมต่อ 2 ลิตรต่อวัน ถึง 1 กรัมต่อ 10 ลิตรต่อวัน (APHA, 1985)

7. การหาค่า LC_{50} โดยวิธีโพรบิต

ในการประเมินความเป็นพิษของสารพิษต่อสัตว์น้ำ ซึ่งจะแสดงความเป็นพิษในเทอมของ LC_{50} คือเป็นระดับความเข้มข้นของสารพิษที่ทำให้สัตว์ทดลองตายร้อยละ 50 ของประชากรสัตว์ทดลองทั้งหมด แต่เนื่องจากการทดลองมีระยะเวลาเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้น ค่า LC_{50} จึงต้องกำหนดช่วงเวลาที่ใช้ทดลองไว้ด้วย โดยปกติเวลาที่ใช้ในการทดลองมักจะอยู่ในช่วง 24-120 ชั่วโมง ซึ่งเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้ คือ 24-h LC_{50}, 48-h LC_{50} หรือ 96-h LC_{50} เป็นต้น ซึ่งวิธีคำนวณหาค่าดังกล่าวในปัจจุบันสามารถทำได้หลายวิธี เช่น นำค่าร้อยละการตายมาพลอต (plot) ลงบนกระดาษ percentage-log หรือนำร้อยละการตายมาเปิดตารางโพรบิต เปลี่ยนค่าร้อยละการตายเป็นค่าโพรบิต แล้วจึงนำมาพลอตลงบนกระดาษโพรบิต (probit graph paper) และวิธีที่นิยมใช้และสะดวก คือ ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป (package) ช่วยในการวิเคราะห์ เช่น SPSS-X และ SYSTAT เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS-X release 3.0 ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง

<u>งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องที่ศึกษา</u>

1. ชีววิทยาบางประการของไรน้ำแดง

ไรน้ำแดง (water flea) เป็นสัตว์น้ำจืดขนาดเล็กพวกเดียวกับกุ้งและปู พบได้อยู่ทั่วไปในแหล่งน้ำธรรมชาติ เมื่อนำมาเลี้ยงลูกปลาวัยอ่อนและสัตว์น้ำชนิดต่างๆ ทำให้มีการรอดตายสูง เนื่องจากไรน้ำแดงเป็นสัตว์น้ำที่มีคุณค่าทางอาหารสูง มีโปรตีนถึงร้อยละ 70 (ธรรมนูญ โรจนะบุรานนท์ และ ฉวีวรรณ อภิสิทธิไพศาล, 2523) และไรน้ำแดงสดให้พลังงานสูงถึง 300.29 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (สำรวย เสร็จกิจ, 2533) โดยไรน้ำแดงมีลักษณะทางอนุกรมวิธานดังนี้

Phylum Arthropoda

Class Crustacea

Order Cladocera

Family Daphniae

Genus Moina

Species Moina macrocopa

ไรน้ำแดงเป็นสัตว์น้ำจำพวก Crustacean มีขนาด 0.4-1.8 มิลลิเมตร (สันทนา ดวงสวัสดิ์, 2529) โดยเฉลี่ยจะมีขนาด 1.25 มิลลิเมตร สำหรับไรน้ำแดงประเภทไทยตามแหล่งน้ำธรรมชาติ มักจะเป็น Moina macrocopa (ธรรมนูญ โรจนะบุรานนท์ และ ฉวีวรรณ อภิสิทธิไพศาล, 2523) มีลักษณะทางชีววิทยาดังนี้

1.1 รูปร่างลักษณะ

สามารถแบ่งรูปร่างลักษณะของไรน้ำแดงตัวเต็มวัยได้ดังนี้

1.1.1 ไรน้ำแดงเพศผู้ (male)

จะมีลักษณะตัวเต็มวัย คือ ลำตัวมีลักษณะยาว ขนาดเล็กประมาณ 0.5-0.7 มิลลิเมตร ส่วนหัวใหญ่ยาวโค้งไปข้างหน้า แต่โค้งน้อยกว่าตัวเมีย มีตารวมขนาดใหญ่ หนวดคู่แรกมีลักษณะโค้งงอ มีขนรับความรู้สึกที่กลางหนวด 2 เส้น ตรงปลายหนวดมีลักษณะคล้ายตะขอ ขาคู่แรกมีขนยาว เปลือกหุ้มลำตัวค่อนข้างยาวรี และหุ้มปิดลำตัวได้ไม่มิด

1.1.2 ไรน้ำแดงเพศเมีย (female) สามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ

- ไรน้ำแดงเพศเมียที่แพร่พันธุ์ด้วยการผสมกับเพศผู้ (sexual female)

จะมีลักษณะตัวเต็มวัย คือ มีขนาดยาว 0.9-1.8 มิลลิเมตร สีเหลืองถึงแดง ลำตัวใหญ่หนา และปกคลุมด้วยเปลือกไม่มิด เปลือกจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมได้สัดส่วน ฝาด้านหลังจะหนาและมีลักษณะเหมือนฝา 2 ฝามาประกบกันอยู่ มีรูปร่างคล้ายอานม้า มีช่องว่างภายในเพื่อเป็นที่อยู่ของไข่ 2 ใบ เมื่อมองด้วยตาเปล่าจะเห็นเกราะบรรจุไข่ที่มีเปลือกหุ้มหนา 2 ใบอยู่ที่ช่องว่างที่หลังนี้ สำหรับเปลือกจะมีขน (setae) ที่ขอบล่าง ส่วนหัวจะมีขนาดใหญ่หนาด้านหน้ากลม มีหนวด 2 คู่ที่ข้อต่อระหว่างปล้องมี Setae ส่วนท้อง (abdomen) มีรูปร่างคล้ายเกือกม้า

ตอนท้าย (post abdomen) มีรูปร่างคล้ายกรวย และตอนปลายมี 2 แฉก (bident) ไข่ของไรน้ำแดงที่ผสมพันธุ์แบบอาศัยเพศบางครั้งจะเรียกว่า "resting egg"

-ไรน้ำแดงเพศเมียที่แพร่พันธุ์ด้วยไข่ที่ไม่ต้องผสมกับเพศผู้ (parthenogenetic female) ตัวเต็มวัยมีขนาดยาว 0.9-1.8 มิลลิเมตร สีเหลืองจนถึงแดง ขึ้นกับปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ ถ้ามีน้อยจะสีแดง (สำรวย เสร็จกิจ, 2533) ลำตัวใหญ่หนาและปกคลุมด้วยเปลือกไม่มิด เปลือกมีรูปร่างกลมรีขอบล่างมีขน ส่วนหัวมีขนาดใหญ่หนาด้านหน้ากลมมน ไม่มีรอยคอดเหนือตา (supra-ocular depression) หนวดคู่แรก (antennule) มีขนาดเล็กและมีขน มีปล้องเดียว มีขนรับความรู้สึกที่ปลาย และตรงกลางหนวดมี setae 1 เส้น หนวดคู่ที่สอง (antennae) มีขนาดใหญ่ตรงปลายแบ่งเป็น 2 กิ่ง (biramus) กิ่งบนมี 4 ปล้อง กิ่งล่างมี 3 ปล้อง ที่ข้อต่อระหว่างปล้องมี setae ส่วนท้องมีรูปร่างคล้ายเกือกม้า ตอนท้ายมีรูปร่างคล้ายกรวย ตอนปลายแยกเป็น 2 แฉก ตัวแก่ของเพศเมียมีขนาดใหญ่มาก เนื่องจากมีตัวอ่อนอยู่ใน brood chamber ซึ่งมีลักษณะเป็นช่องว่างรูปรี อยู่ด้านหลังของลำตัวและยาวออกได้ตามแนวยาว

1.2 การสืบพันธุ์

1.2.1 การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ (sexual reproduction)

การสืบพันธุ์แบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อสภาวะแวดล้อมไม่เหมาะสม เช่น มีการสะสมของของเสียต่างๆ ที่ได้จากกระบวนการเมตาบอลิซึม การขาดแคลนอาหารและมีสภาพอุณหภูมิต่ำกว่า 14 องศาเซลเซียส (Pennak, 1985) ดังนั้น ไรน้ำแดงเพศเมียจะสร้าง parthenogenetic egg ที่มีแต่ไรน้ำแดงเพศผู้ แล้วไรน้ำแดงเพศผู้จะเข้าไปผสมพันธุ์กับไรน้ำแดงเพศเมีย แล้วสร้างไข่ที่มีเปลือกหุ้มหนา เพื่อให้ทนต่อสภาวะแวดล้อม ซึ่งเรียกว่า "resting egg" ไข่นี้จะมีขนาดใหญ่และมีสีขาวขุ่น แต่มีจำนวนเพียง 2 ใบต่อไรตัวแม่ 1 ตัว

1.2.2 การสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ (parthenogenesis)

การสืบพันธุ์แบบนี้เป็นการสืบพันธุ์แบบปกติของไรน้ำแดง ซึ่งเป็นการสร้างไข่ที่เรียกว่า parthenogenetic eggs ซึ่งจะมีอยู่หลายใบ การสืบพันธุ์แบบนี้ ไรน้ำแดงเพศเมียไม่ต้องผสมพันธุ์กับไรน้ำแดงเพศผู้ โดยไรน้ำแดงเพศเมียจะสร้างไข่ และให้ตัวอ่อนเจริญเติบโตอยู่ในถุง (brood chamber) ที่อยู่บนหลังของไรน้ำแดงเพศเมีย เมื่อตัวอ่อนเจริญเติบโตเต็มที่จะว่ายน้ำ

ออกมาจากถุง ไรน้ำแดงที่เกิดขึ้นนี้มักจะเป็นเพศเมีย ส่วนใหญ่มีสัดส่วน คือ จะมีไรน้ำแดงเพศผู้ประมาณร้อยละ 5 และเป็นไรน้ำแดงเพศเมียร้อยละ 95 (สำรวย เสร็จกิจ, 2533) แต่จากการศึกษาของ Bellosillo (1957) พบว่า สัดส่วนเพศของลูกที่ได้ ถูกควบคุมด้วยปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม เช่น อาหาร ถ้าเลี้ยงไรน้ำแดงตัวเมียหลายๆ ตัวในอาหารความเข้มข้นต่างๆ ในสภาพนี้ จะให้ลูกไรน้ำแดงเพศผู้จำนวนมาก แต่ถ้านำมาแยกเลี้ยงเดี่ยวในความเข้มข้นของอาหารต่ำๆ ก็จะมีไรน้ำแดงเพศผู้จำนวนน้อยมาก หรือที่อุณหภูมิต่ำ สัดส่วนของลูกตัวผู้จะมีจำนวนมากกว่าที่อุณหภูมิปกติ (25-30 องศาเซลเซียส) เมื่อพิจารณาสภาพแวดล้อม คือ อุณหภูมิ อาหาร และความหนาแน่นของประชากร พบว่า ความหนาแน่นของประชากรมีผลมากที่สุดในการเกิดไรน้ำแดงเพศผู้ (นันทพันธ์ ชินะจิตร, 2507)

1.3 วงชีวิต

ไรน้ำแดงเป็นสัตว์ที่มีวงชีวิตสั้นและเจริญเติบโตได้รวดเร็ว เมื่อ parthenogenetic eggs ถูกสร้างขึ้น ก็จะแบ่งตัวทันทีจนเป็นตัว แล้วออกจาก brood chamber ของตัวแม่ จนเป็นตัวเต็มวัย และสามารถผลิตลูกได้ ใช้เวลาประมาณ 48-60 ชั่วโมง และจะมีการลอกคราบ 1 ครั้ง แล้วจึงให้ลูกรุ่นต่อไป โดยจำนวนครั้งในการให้ลูกของตัวแม่นี้จะไม่เท่ากัน ปกติระยะห่างของการให้ลูกจะห่างกันประมาณ 24-36 ชั่วโมง ดังนั้น วงชีวิตของไรน้ำแดงจึงมี 3 ขั้นตอน คือ ไข่ วัยอ่อน และตัวเต็มวัย

1.4 ที่อยู่อาศัยและอาหารของไรน้ำแดง

ไรน้ำแดงชอบอยู่อาศัยในสภาพแวดล้อมที่ค่อนข้างสกปรก มีเศษอาหาร ซากพืช ซากสัตว์ และขยะมูลฝอยต่างๆ รวมทั้งจุลินทรีย์และแพลงค์ตอนอยู่ ดังนั้น จึงมักพบในแหล่งน้ำนิ่ง หรือแหล่งน้ำขังทั่วๆ ไป สันทนา ควงสวัสดิ์ (2529) รายงานว่า ไรน้ำแดงสามารถอยู่ในที่ที่มีออกซิเจนละลายอยู่ 0.5-4.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งอาหารที่ไรน้ำแดงกินจะเป็นพวกโปรโตซัว แบคทีเรีย ทั้งแบบแท่ง (bacillus) และแบบกลม (coccus) Euglena sp. และ Chlorella sp. ไรน้ำแดงจะกินอาหารโดยการโบกพัดอาหารต่างๆ เข้าไปในปาก แล้วกรองแยกอาหารไว้ (filter feeder) ซึ่งอาหารของไรน้ำแดงไม่เฉพาะเจาะจงปกติจะขึ้นกับบริเวณแหล่งน้ำที่มันอาศัยอยู่ เช่น ถ้ามี Euglena sp. อยู่มากก็จะพบ Euglena sp.

จำนวนมากอยู่ในทางเดินอาหารของไรน้ำแดง

1.5 ศัตรูของไรน้ำแดง

ศัตรูของไรน้ำแดงที่พบโดย Bellosillo (1957) คือ cyclops ปลาชนิดต่างๆ และไฮดรา (hydra) ส่วนที่เป็นพาราสิต (parsite) ก็ได้แก่ Vorticella sp. และ rotifer โดยเฉพาะ Brachionus rubens ซึ่งจะใช้ไรน้ำแดงเป็นที่ยึดเกาะ และปกคลุมตัวไรน้ำแดงจนเกือบมิด ทำให้ไรน้ำแดงหาอาหารและเคลื่อนไหวไม่ได้ ส่วนพวกมวลของแบคทีเรียและรา ถ้าเข้าไปอยู่ในตัวไรน้ำแดงมากเกินไป จะทำให้ตายได้ แต่ลูกน้ำยุง พบว่าไม่ทำอันตรายไรน้ำแดงโดยตรง

2. งานวิจัยที่เกี่ยวกับเรื่องที่ศึกษา

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโลหะหนักในสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในน้ำ เช่น พวกสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง ยังมีอยู่น้อยมาก เพราะการทดลองในสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กทำได้ยากกว่า ดังนั้น งานวิจัยจึงมักจะเป็นสัตว์น้ำขนาดใหญ่ เช่น ปลา และพวกหอย เป็นต้น ซึ่งเท่าที่รวบรวมมาได้มีดังนี้

Radhakrisnaiah และ Busappa(1986) พบว่าแคดเมียมทำให้ปู Oziotelphusa senex เกิดความเครียดและกินอาหารลดลง กระบวนการหายใจลดลงและการขับถ่ายของเสียออกจากร่างกายก็ต่ำลงด้วย ทำให้ไม่เจริญเติบโต และทำให้การสืบพันธุ์กำเนิดลูกรุ่นต่อไปลดจำนวนลง

Bertram และ Hart (1979) พบว่า แคดเมียมระดับความเข้มข้นน้อยกว่า 1 ไมโครกรัมต่อลิตร มีผลทำให้สิ่งมีชีวิตในกลุ่ม Daphnia sp. มีจำนวนลูกลดลง

Torreblanca และคณะ (1991) พบว่า แคดเมียมทำให้ระดับโปรตีนที่เนื้อเยื่อบริเวณเหงือกของ Procamburus charkii ลดลง แต่ไม่ทำให้ระดับของ lactate ลดลง

Sastry (1983) พบว่า ระดับของไขมัน (lipids) ที่ hepatopancreas ซึ่งเป็นแหล่งสะสมพลังงานที่สำคัญของพวกครัสเตเชียน (crustaceans) จะลดลง และถูกส่งไปสะสมที่อวัยวะต่างๆ เมื่อสัตว์พวกครัสเตเชียนได้รับแคดเมียม ดังนั้น พิษของแคดเมียมจึงถูกส่งไปอวัยวะสืบพันธุ์ของสัตว์ด้วย เพราะฉะนั้น จึงทำให้จำนวนลูกของสัตว์พวกครัสเตเชียนมีจำนวนลดลง

Yoshinari และ Subramanian (1977) พบว่า สารพวกไคติน (chitin) เป็นสารที่มีความสามารถสูงในการดูดซึมโลหะหนัก และสารพวกไคตินนี้ก็จะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของโครงร่างภายนอก (exoskeleton) ของสัตว์น้ำหลายชนิด ดังนั้น การลอกคราบของสัตว์พวกนี้จึงอาจเป็นวิธีการลดสารพิษจากร่างกายสัตว์ก็ได้

Lasenby และ Duyn (1992) พบว่า โลหะหลายชนิดโดยเฉพาะแคดเมียมและสังกะสี จะถูกสะสมที่เปลือกของ Mysis relicta ได้สูงมาก อาจถึง 8 เท่า และ 13 เท่า ตามลำดับ จากระดับความเข้มข้นของสารละลายที่อาศัยอยู่

Wedemeyer, Meyer และ Smith (1976) พบว่า โดยปกติทองแดงในระดับความเข้มข้นต่ำๆ จะไม่เป็นพิษต่อมนุษย์ แต่สำหรับสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำแล้ว ความเข้มข้นของทองแดงที่ละลายอยู่ในน้ำเพียงเล็กน้อย ประมาณ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็เป็นอันตรายอย่างรุนแรงมาก โดยถ้าเป็นน้ำอ่อน คือ มีความกระด้างน้อยกว่า 100 มิลลิกรัมของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร (mg $CaCO_3$/l) ระดับทองแดงที่ความเข้มข้น 0.006 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็จะเป็นอันตรายต่อปลา ถ้าน้ำมีความกระด้างมาก ระดับทองแดงที่เป็นพิษ จะมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้น ถ้าน้ำมีความกระด้างมาก ความเป็นพิษของโลหะหนักจะลดลง สำหรับระดับพิษเฉียบพลันของสารพิษต่อสัตว์น้ำชนิดต่างๆ สรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ระดับพิษเฉียบพลันของสารพิษต่อสัตว์น้ำชนิดต่างๆ

toxic substances	test animals	LC_{50}	hrs.	refference
detergent	ไรน้ำแดง			
-fab	"	28.1 ppm	24	ธนาภรณ์ จิตตปาลนงค์, 2526
-breeze	"	37.3 ppm	24	
-white	"	16.8 ppm	24	
LAS	ไรน้ำแดง	7.5 ppm	24	เรวัติ วัฒนานุกูลกิจ, 2530
ABS	"	37.5 ppm	24	
$HgCl_2$	"	0.015 ppm	24	ธรรมนูญ โรจนะบุรานนท์และ
	"	0.009 ppm	48	ประยูทธ เจริญกุล, 2535
$PbNO_3$	"	0.85 ppm	24	
	"	0.65 ppm	48	
Zn	Daphnia magna	0.072 ppm	64	Anderson, 1948
Cd	"	<1.6 ppb	64	Anderson, 1950
Cu	"	0.06 ppm	48	Biesinger และ
				Christensen, 1972
Fe	"	9.60 ppm	48	
Zn	"	0.28 ppm	48	
Cu	Daphnia hyalina	0.005 ppm	48	Baudouin และ Scoppa,
Zn	"	0.04 ppm	48	1974
Cu	Cyclops abyssorum	2.50 ppm	48	
Zn	"	5.50 ppm	48	
Hg	ปลากระพงขาว	0.1128 ppm	96	ชูชาติ ชัยรัตน์, 2528
Pb	"	128.7 ppm	48	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

toxic substance	test animal	LC_{50}	hrs.	refference
dipterax	ปลาช่อน	1.38 ppm	96	สมเกียรติ กาญจนาคาร, 2529
	ปลาตะเพียน	27.0 ppm	96	
	ปลาไน	27.0 ppm	96	
NH_3	กุ้งก้ามกราม		48	จารุวรรณ วิริวงษ์นุสรณ์, 2525
	12 วัน	1.85 ppm	48	
	23 วัน	2.05 ppm	48	
dieldrin	ปลาตะเพียนขาว	12.1 ppb	96	พีระ อ่าวสมบูรณ์, 2527
heptachlor	"	20.6 ppb	96	
NH_3-N	ปลาดุกด้าน	15.8 ppm	48	ช่วยชูศรี ศรีภูมิ่น, 2524
NO_2-N	"	35.9 ppm	48	
Zn	ปลาตะเพียนขาว	34.2 ppm	96	แววดา ทองระอา, 2525
Cu	"	1.26 ppm	96	
Cu	ปลานิล	73.4 ppm	24	จารุวรรณ สมศิริ, 2525
Hg	"	1.98 ppm	24	
Zn	"	86.41 ppm	24	
Cu	"	63.92 ppm	48	
Hg	"	3.80 ppm	48	
Zn	"	74.76 ppm	48	
Cu	"	58.30 ppm	72	
Hg	"	3.71 ppm	72	
Zn	"	65.55 ppm	72	
Cd	Procambarus charkii	58.3 ppm	96	Delramo และคณะ, 1987

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

toxic substance	test animal	LC_{50}	hrs.	refference
Hg	american oyster	0.0056 ppm	96	Calabrese และคณะ, 1973
Ag	"	0.0058 ppm	96	
Cu	"	0.103 ppm	96	
Zn	"	0.31 ppm	96	
Ni	"	1.81 ppm	96	
Pb	"	2.45 ppm	96	
Cd	"	3.80 ppm	96	
As	"	7.50 ppm	96	
Cr	"	10.3 ppm	96	
Mn	"	16.0 ppm	96	
Al	"	7.5 ppm	96	
NH_3-N	rainbow trout	0.26 ppm	96	
	channel catfish	0.50 ppm	96	
	cladoceran	1.27 ppm	96	
Cu	Artemia nauplii			
	ลาฐ 1 วัน	0.44 ppm	24	วารพงษ์ อัศวเกษมศิ, 2534
	2	0.25 ppm	24	
	3	0.32 ppm	24	
	5	0.29 ppm	24	
	7	0.27 ppm	24	
	9	0.35 ppm	24	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

toxic substance	test animal	LC_{50}	hrs.	refference
Cu	Artemia nauplii			
	อายุ 15 วัน	0.52 ppm	24	วรพงษ์ อัศวเกษมณี, 2534
	9	0.24 ppm	48	
	15	0.32 ppm	48	
Pb	อายุ 1 วัน	190.0 ppm	24	
	2	128.0 ppm	24	
	3	143.0 ppm	24	
	5	155.0 ppm	24	
	7	195.0 ppm	24	
	9	162.0 ppm	24	
	15	195.0 ppm	24	
	9	112.0 ppm	48	
	15	165.0 ppm	48	
DDT	Artemia	0.142 ppm	5	Tarpley, 1958
Cl	กุ้งก้ามกราม			โสภัณ ใจรักพันธุ์, 2528
	T = 27 °C	0.19 ppm	96	
	T = 32 °C	0.18 ppm	96	
	T = 37 °C	0.19 ppm	96	
	ปลาตะเพียนขาว			
	T = 27 °C	0.37 ppm	96	
	T = 37 °C	0.34 ppm	96	
	T = 39 °C	0.20 ppm	96	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

toxic substance	test animal	LC_{50}	hrs.	refference
Cl	ปลาดุกลูย			
	T = 27 °C	0.67 ppm	96	
	T = 32 °C	0.45 ppm	96	
	T = 37 °C	0.34 ppm	96	
$HgCl_2$	Teleost fish	ทดสอบ histopathological study ที่ระยะเวลา 5, 10, 15, 20 และ 30 วัน พบว่า ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเซลล์ (Sastry and Gupta, 1977)		
Cu, Hg	Fiddle crabs	ทดสอบความทนทานของปู 2 ชนิดที่อยู่ในแหล่งที่มีภาวะมลพิษต่างกัน พบว่า ความทนทานแตกต่างกัน โดยชนิดที่อยู่ในแหล่งที่มีมลพิษมีความทนทานมากกว่า (Uma, 1987)		

สำหรับการตอบสนองของสัตว์น้ำต่างๆ ในด้านพิษรองเฉียบพลัน พอจะสรุปได้ดังนี้ คือ

1. การเปลี่ยนแปลงทางด้านพฤติกรรม

Sparque และคณะ (1965) พบว่า ปลาแซลมอน (salmon) จะมีพฤติกรรมที่พยายามหลีกเลี่ยงน้ำที่มีมลพิษพวกโลหะหนักปะปนอยู่ โดยจะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ เมื่อมีระดับความเข้มข้นของโลหะหนักสูงถึงระดับหนึ่ง เช่น ทองแดง ต้องมีความเข้มข้นสูงกว่า 2.4 ไมโครกรัมต่อลิตร และสังกะสีประมาณ 54 ไมโครกรัมต่อลิตร

Wentsel และคณะ (1977) พบว่า midge larvae ของ Chironomus tentans จะหนีจากตะกอน (sediment) ที่มีปริมาณโลหะหนักสะสมอยู่ เช่น แคดเมียมที่ระดับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร และสังกะสี 9,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

Mc Greer (1979) พบว่า หอยสองฝา (Macoma balthica) จะหลีกหนีตะกอนที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก เช่น ถ้ามีตะกั่วที่ระดับ 74 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ ทองแดง 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. การเปลี่ยนแปลงทางด้านชีวเคมี

Donaldson และ Dye (1975) พบว่า ปลาแซลมอน (Oneorhynchus nerka) จะตอบสนองต่อทองแดง โดยจะมีระดับของคอร์ติโคสเตอรอยด์ (corticosteroid) สูงขึ้น สัมพันธ์กับระดับความเข้มข้นของทองแดงที่สูงขึ้น

Dye และ Donaldson (1974) พบว่า ปลาแซลมอนจะตอบสนองต่อสังกะสี โดยจะมีระดับคอร์ติโคสเตอรอยด์สูงขึ้น สัมพันธ์กับระดับความเข้มข้นของสังกะสีเช่นเดียวกับทองแดง

Moore และ Stebbing (1976) พบว่า โลหะหนักต่างๆ เช่น ทองแดงที่ระดับ 1.2-1.9 ไมโครกรัมต่อลิตร แคดเมียมที่ระดับ 40-70 ไมโครกรัมต่อลิตร และปรอทที่ระดับ 0.2 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำให้ปริมาณของไลโซโซม (lysosome) ใน Companularia flexuosa เพิ่มขึ้น ซึ่งในปัจจุบันนี้ก็มีการวัดปริมาณไลโซโซมที่เพิ่มขึ้นของสิ่งมีชีวิตในน้ำนิ่ง เพื่อทดลองเกี่ยวกับพิษเรื้อรังของสารพิษต่างๆ (Bayne et al., 1979)

3. การเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปร่างลักษณะ

Sindermann และคณะ (1980) พบว่า กระดูกโครงร่างของปลาที่อาศัยอยู่บริเวณแคลิฟอร์เนีย นิวยอร์คและญี่ปุ่น มีการเปลี่ยนแปลงของเซลล์และเนื้อเยื่อ ถึงขั้นที่ทำให้มีการผิดปกติจนถึงผิดรูปร่าง หรือพิการ ซึ่งเป็นผลมาจากมลพิษที่ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำที่อยู่อาศัย โดยมีเหตุบ่งชี้ว่า เกิดจากโลหะหนักและพวกคลอริเนตเดดไฮโดรคาร์บอน (chlorinated hydrocarbon)

Gardner (1975) พบว่า เนื้อเยื่อของระบบประสาทรับสัมผัสของปลาทะเลหลายชนิดถูกทำลายเมื่อได้รับ ทองแดง ปรอท เงิน สารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ และน้ำมันปิโตรเลียมชนิดต่างๆ โดยสรุปว่า พยาธิสภาพที่เป็นผลมาจากมลพิษต่างๆ ในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะทางด้านระบบประสาทรับความรู้สึก แม้ว่าจะทำให้เกิดการสูญเสียระบบรับสัมผัสแบบชั่วคราว ก็สามารถนำมาถึงการถูกทำลายของสิ่งมีชีวิตชนิดนั้นในธรรมชาติ

4. การเปลี่ยนแปลงทางด้านสรีรวิทยา

ผลที่เกิดขึ้นต่อระบบสรีรวิทยาในสัตว์ทดลอง ทางพิษวิทยาถือว่าเป็นสิ่งสำคัญที่สุด เป็นจุดสิ้นสุดของการทดลองทางพิษวิทยา สำหรับการทดลองในขั้นนี้ที่น่าสนใจและเป็นที่นิยม คือ การดูพฤติกรรมการกินอาหาร การศึกษาถึงกระบวนการเมตาบอลิซึม การศึกษาถึงความสมดุลของระบบออสโมซิสในสัตว์ต่างๆ เป็นต้น ดังงานวิจัยของ Reeve และคณะ (1977) พบว่า โคปิปอด (copepod) ที่ได้รับผลกระทบจากทองแดงที่ระดับ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร จะตอบสนองโดยลดการกินและย่อยอาหารพวกแพลงค์ตอนต่างๆ ซึ่งต่อมา Moriatou, Apostolopoulou และ Verriopoulos (1979) ก็ยืนยันว่า โคปิปอดมีการลดลงของอัตราการกินอาหาร เมื่อทดลองเพิ่มระดับความเข้มข้นของทองแดง จาก 1-10 ไมโครกรัมต่อลิตร แล้วพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของทองแดงมากกว่า 5 ไมโครกรัมต่อลิตร จะทำให้โคปิปอดลดการกินอาหารลง และยังพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของทองแดง 1-10 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำให้อัตราการใช้ออกซิเจนของโคปิปอดสูงขึ้น ในช่วงระยะเวลาทดลองที่มากกว่า 20 ชั่วโมง นอกจากนี้ ธรรมนูญ โรจนะบุรานนท์ และประยุทธ เจริญกุล (2535) พบว่า เมอร์คิวริกคลอไรด์ ($HgCl_2$) และเลดไนเตรต ($PbNO_3$) ที่ระดับความเข้มข้น 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 17.6 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ จะลดอัตราการใช้ออกซิเจนของปลาตะเพียนขาว ซึ่ง Stoner และ Livington (1978) ก็พบว่า การที่สัตว์ทดลองเพิ่มอัตราการใช้ออกซิเจนนี้ เป็นการตอบสนองด้านกระบวนการเมตาบอลิซึม เพราะออกซิเจนเป็นสารที่จำเป็นต่อกระบวนการเมตาบอลิซึม เมื่อพิจารณาประกอบกับการที่สัตว์ลดการกินอาหารลง แต่ต้องการใช้ออกซิเจนมากขึ้น จะทำให้สัตว์อ่อนแอลง และตายไปในที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I17866765

สำหรับการเปลี่ยนแปลงทางด้านอื่นๆ เช่น การเจริญเติบโต (growth) ถือว่าเป็นผลลัพธ์ของกระบวนการต่างๆ ในสิ่งมีชีวิต ทั้งการกินอาหาร (consumption) การขับถ่าย (excretion) และ การหายใจ (respiration) จากการศึกษาของ Mckim และ Benoit (1971) พบว่า ลูกปลาเทราท์ที่ได้รับปริมาณทองแดง 17-32 ไมโครกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 14 เดือน จะมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำลง แต่การเปลี่ยนแปลงนี้ไม่พบเมื่อทดลองในปลาที่เจริญพันธุ์แล้ว และพบอีกว่า ลูกปลาที่ได้จากพ่อแม่พันธุ์ที่ได้รับทองแดงในระดับความเข้มข้น 9-32 ไมโครกรัมต่อลิตร จะมีการเจริญเติบโตที่ลดลงด้วย ดังนั้น การวัดอัตราการเจริญเติบโตในระยะเวลายาวนานจะใช้เป็นดัชนีวัดพิษเรื้อรังได้

Percy (1978); Giffillan และ Vandermulen (1978); Borgmann และคนอื่นๆ (1980) และ Buikema และคณะ (1980) พบว่า การลดลงของการเจริญเติบโตในสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง(macroinvertebrate) ไม่เพียงแต่พบในการทดลองพิษเรื้อรังเท่านั้น แต่ในการทดลองพิษรองเฉียบพลัน (sublethal effects) ก็พบว่า มีการลดลงของการเจริญเติบโตด้วย และพบว่า การลดลงของน้ำหนักตัว (body weight) จะมีความสัมพันธ์กับการลดลงของจำนวนไข่ในตัวแม่ ซึ่งธรรมนูญ โรจนะบุรานนท์ และประยุทธ เจริญกุล (2535) ก็พบว่า เมอร์คิวริกคลอไรด์และเลดไนเตรต ทำให้จำนวนลูกของไรน้ำแดงในรุ่นที่ 1 มีจำนวนลดลง

ดังนั้น พิษของโลหะหนักต่างๆ ไม่เพียงแต่มีผลต่อการเจริญเติบโตเท่านั้น ยังมีผลต่อการสืบพันธุ์ และการเพิ่มจำนวนประชากรของสิ่งมีชีวิตอีกด้วย เพราะองค์ประกอบที่สำคัญของวงจรชีวิตของสิ่งมีชีวิตมีหลายขั้นตอน และผลของสารพิษก็อาจจะทำให้กระบวนการสืบพันธุ์ประสบความล้มเหลวได้ ดังตารางที่ 2.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบของสารพิษต่อกระบวนการสืบพันธุ์ของสิ่งมีชีวิต

vital process	critical effects of pollutants
-development of gametes	-incomplete or abnormal development of ova or spermatozoa; gene damage
-fertilization	-interference with homing of spermatozoa to the ova; impairment of the ability of spermatozoa to enter the micropyle and successfully fertilize the ova
-embryo development	-cytological and cytogenetic abnormalities including chromosome bridging breakage and translocation; interference with hardening of the egg; interference with gas and water exchanges; cessation of development
-hatching	-failure to hatch; high mortality of newly hatched larvae; teratogenic abnormalities
-sexual maturation	-histopathological effects on gonads; changes in production and metabolism of gonadotropins
-courting and mating	-destruction of spawning and mating grounds; inappropriate courting or mating behavior leading to reduced mating success

ที่มา : Miller, 1984

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและการเพิ่มจำนวนของไรน้ำแดง พอสรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและการเพิ่มจำนวนของไรน้ำแดง

factors	effects	refferences
แสง	ถ้ามากกว่า 250 แคนเดิลต่อตารางฟุต จะทำให้การเจริญเติบโตของไรน้ำแดงลดลง	วราภร วราอัศวปติ, 2514
พื้นที่ผิว	พบว่า ถ้าผิวน้ำถูกปกคลุมด้วยแผ่นเทียนไขทั้งหมด จะทำให้จำนวนไรน้ำแดงลดลง	
pH	พบว่า ไรน้ำแดงต้องการ pH ในช่วง 5.2-9.2 ก็จะสามารถเจริญเติบโตได้ตามปกติ	Bellosillo, 1957
อุณหภูมิ	พบว่า ไรน้ำแดงมีการเจริญเติบโตตามปกติ ที่อุณหภูมิ 26-31 องศาเซลเซียส	
อาหาร	พบว่า แบคทีเรียใน soil-manure เช่น Flavobacterium surescens F. diffusum Micrococcus flavus Bacterium lactis Escherichae erogenese เป็นแบคทีเรียที่เหมาะสมสำหรับเพาะเลี้ยงไรน้ำแดง	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

factors	effects	refferences
คลอรีน	คลอรีนจะเป็นพิษต่อสัตว์น้ำที่ทดลองทางพิษวิทยาได้ ดังนั้น ควรตรวจวัดปริมาณคลอรีนให้มีความเข้มข้นไม่เกิน 0.003 มิลลิกรัมต่อลิตร	Snieszko และ Alexlrod, 1976
โลหะหนัก	ความเป็นพิษของโลหะหนักต่างๆ ต่อ Daphnia magna เรียงตามลำดับดังนี้ คือ Hg>Ag>Cu>Zn>Cr>Cd>Pb>Ni	Khangarot และ Ray, 1978
	ความเป็นพิษของโลหะหนักต่างๆ ต่อ Salmo gairdneri เรียงตามลำดับดังนี้ คือ Ag=Hg>Cu>Zn>Cd>Pb>Cr>Ni	
	ความเป็นพิษของโลหะหนักต่างๆ ต่อ Daphnia hyalina เรียงตามลำดับ ดังนี้ คือ Hg>Cu>Cr>Zn>Cd>Pb>Mg>Sr>Cs>Ca	Bandouin และ Scoppa, 1974
	ความเป็นพิษของโลหะหนักต่างๆ ต่อ Cyclops abyssorum เรียงตามลำดับดังนี้ คือ Hg>Cu>Cd>Zn>Pb>Cr>Ni>Co>Mg>Sr>Cs>Ca	
	ความเป็นพิษของโลหะหนักต่างๆ ต่อ Chironomus tenddipes เรียงตามลำดับดังนี้ คือ Hg>Cd>Pb>Zn>Mn	Rao และ Saxena,1981
	ความเป็นพิษของโลหะหนักต่างๆ ต่อ Lymnaea acuminata เรียงตามลำดับดังนี้ คือ Hg>Cu>Cd>Ni>Cr>Zn	Khangarot และ คณะ, 1982

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

factors	effects	refferences
	ความเป็นพิษของโลหะหนักต่างๆ ต่อ Mya arenaria เรียงตามลำดับดังนี้ คือ Ag=Hg>Cu>Zn>Cd>Pb>Cr>Ni	Eisler และ Hennkey, 1977
	ความเป็นพิษของโลหะหนักต่างๆ ต่อ Bufo melanostictus เรียงตามลำดับดังนี้ คือ Ag>Hg>Cu>Cd>Zn>Ni>Cr	khangarot และ Ray, 1987
	ความเป็นพิษของโลหะหนักต่างๆ ต่อ Rena hexadacytlaa เรียงตามลำดับดังนี้ คือ Ag=Hg>Cu>Zn>Cd>Pb>Cr>Ni	khangarot และ คณะ, 1985
ความกระด้าง	ความเป็นพิษของโลหะหนักต่อสัตว์น้ำเปลี่ยนแปลงไปตามความกระด้างของน้ำที่ใช้ทดลอง ถ้าน้ำมีความกระด้างมาก ความเป็นพิษของโลหะหนักจะลดลง	Lioyd, 1961; Throp และ Lake, 1974
DO	ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ ถ้ามีน้อยพิษของโลหะหนักจะเพิ่มขึ้น	Lioyd, 1960 และ Westfall, 1945

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การแพร่กระจายของแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีในแหล่งน้ำธรรมชาติ

เมื่อแคดเมียม ทองแดง และสังกะสี รั่วไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติแล้ว จะมีการกระจายตัวออกไป และเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับสารเคมีต่างๆ ที่อยู่ในแหล่งน้ำนั้น โดยมีกระบวนการพอสรุปได้ดังนี้ (ผกา สุขเกษม และ หทัยรัตน์ การีเวทย์, 2533)

1. การตกตะกอน

โดยทั่วไป ถ้าความเข้มข้นของโลหะหนักต่างๆ สูงกว่าค่าการละลายได้ของโลหะหนักหรือสารประกอบของโลหะหนักชนิดนั้นๆ ก็จะเกิดการตกตะกอน แต่โลหะหนักส่วนใหญ่ที่รั่วไหลลงสู่แหล่งน้ำ จะเข้าทำปฏิกิริยากับแอนไอออนต่างๆ ในน้ำ เช่น คาร์บอเนต ไฮดรอกซิล และคลอไรด์ เป็นต้น ก็อาจจะเกิดตะกอนขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติของโลหะหนักชนิดนั้นๆ เช่น แคดเมียมในรูปของ CdO, $Cd(OH)_2$ และ $Cd(CO_3)$ จะไม่ละลายน้ำ ดังนั้น ก็จะตกตะกอนลง หรือทองแดงในรูปของ $Cu(OH)_2$ จะตกตะกอน แต่ตะกอนจะมีลักษณะเป็นตะกอนเบา แต่โดยทั่วไปสารประกอบของคิวปริกไอออน (Cu^{2+}) จะสามารถละลายน้ำได้ แต่อย่างไรก็ตาม ในแหล่งน้ำทั่วไปมักจะมีสารอินทรีย์ต่างๆ ละลายอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้น เมื่อแบคทีเรียและจุลินทรีย์ต่างๆ ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านี้ ก็จะทำให้ระดับออกซิเจนที่ละลายน้ำมีอยู่น้อย และโลหะหนักส่วนใหญ่ ทั้งสังกะสี ทองแดง แคดเมียม ปรอท ตะกั่ว และเงิน เมื่อทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในน้ำที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในสภาพที่มีออกซิเจนน้อย ก็จะเกิดเป็นสารประกอบของโลหะซัลไฟด์ขึ้น ซึ่งโลหะซัลไฟด์นี้จะละลายน้ำได้น้อยมาก การตกตะกอนก็จะเกิดขึ้นมากด้วย

2. การดูดซับ

โลหะหนักที่ละลายอยู่ในแหล่งน้ำ จะสามารถดูดซับสารต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ เช่น พวกอนุภาคดินต่างๆ ซากแพลงค์ตอนทั้งพืชและสัตว์ สารประกอบพวกเฟอริกออกไซด์ (hydrated ferric oxide) และแมกนีเซียมออกไซด์ (hydrated magnesium oxide) ทำให้โลหะหนัก

สามารถแพร่กระจายไปได้ตามกระแสน้ำ และพร้อมที่จะตกตะกอนลงสู่พื้นท้องน้ำได้ในที่สุด

3. การละลายของโลหะหนักในน้ำ

จากการที่โลหะหนักต่างๆ สามารถละลายจากรูปที่เป็นของแข็ง ไปสู่สภาพที่เป็นอิออนอิสระ ทำให้สิ่งมีชีวิตที่อยู่ในแหล่งน้ำสามารถดูดเอาโลหะหนักที่ละลายในน้ำนี้ เข้าไปสะสมอยู่ในร่างกายได้ ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตชนิดนั้นๆ ได้ ซึ่งกระบวนการย้อนกลับที่ทำให้โลหะหนักสามารถละลายในน้ำ พอจะสรุปได้ดังนี้ คือ

3.1 การเพิ่มความเข้มข้นของเกลือต่างๆ ในน้ำ โดยเฉพาะพวกอัลคาไลน์ และอัลคาไลน์เอิร์ธ เช่น กรณีโลหะหนักในน้ำจืดไหลลงทะเล ซึ่งมี Na^+ อยู่มาก จึงมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ Na^+ แย่งที่โลหะต่างๆ ทำให้เกิดตะกอนของโลหะหนักน้อยลง และละลายอยู่ในรูปสารละลายมากขึ้น

3.2 การลดลงของออกซิเจนในน้ำ ทำให้เกิดสภาวะ redox แล้วสารประกอบไฮดรัสออกไซด์ของโลหะหนัก ก็จะละลายน้ำได้มากขึ้น

3.3 การลดลงของ pH คือ การที่ pH ลดลง ทำให้ H^+ เพิ่มขึ้น แล้วไปแทนที่โลหะหนัก ในสารประกอบคาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์

4. การแพร่กระจายโดยสิ่งมีชีวิตต่างๆ ในน้ำ

ในกระบวนการทางชีววิทยาในสัตว์ พบว่า สัตว์ที่อาศัยอยู่บริเวณแหล่งน้ำต่างๆ เมื่อได้รับสารโลหะหนักต่างๆ แล้วจะพยายามกำจัดสารเหล่านี้ เช่น พวกสัตว์หน้าดิน (benthos) จะไปเร่งให้อนุภาคของโลหะหนักต่างๆ รวมตัวกับสารอินทรีย์ โดยวิธีการกินเข้าไปแล้วถ่ายมูลออกมา ทำให้โลหะหนักต่างๆ มีการแพร่กระจายออกไปตามทางที่สัตว์หน้าดินเคลื่อนที่ หรือจากคราบที่สัตว์ลอกทิ้ง เพราะการลอกคราบของสัตว์หลายชนิดพบว่าเป็นวิธีการในการกำจัดโลหะหนักจากร่างกายสัตว์วิธีหนึ่ง

แต่อย่างไรก็ตาม ไม่ว่าการตกตะกอน หรือการดูดซับ จะทำให้ระดับความเข้มข้นของสารโลหะหนักต่างๆ ลดลง แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพทางกายภาพ หรือทางชีวเคมีในแหล่งน้ำเหมาะสม โลหะหนักเหล่านี้ก็จะสามารถละลายกลับเข้ามาสู่ชั้นของน้ำได้อีก และจะเกิดการสะสมเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร จนเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ ในระบบนิเวศในที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย