

## บทที่ 2

### การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 คุณสมบัติทั่วไปของโลหะแคดเมียม ทองแดง และสังกะสี

โลหะหนักในด้านพิษวิทยา หมายถึง โลหะซึ่งถือเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีตัวหลัก ๆ ดังนี้คือ แคดเมียม ปรอท สังกะสี ทองแดง นิกเกิล โครเมียม ตะกั่ว โคบอลต์ วานาเดียม ไททาเนียม เหล็ก แมงกานีส เงิน ดีบุก รวมไปถึงอาเซนิกและซีลีเนียม (Calow, 1993)

Wood (1974) ได้จัดกลุ่มของโลหะที่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้เกณฑ์การจัดตามความเป็นพิษและที่ปรากฏในสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถจัดเป็น 3 กลุ่ม (ตารางที่ 2.1) ดังนี้ คือ

- (1) กลุ่มที่เป็นพิษไม่ร้ายแรง (non-critical)
- (2) กลุ่มที่เป็นพิษแต่ไม่ละลายและหายาก (toxic but very insoluble or very rare)
- (3) กลุ่มที่เป็นพิษมาก และพบเห็นได้ง่าย (very toxic and relatively accessible)

ตารางที่ 2.1 การจัดกลุ่มโลหะตามลักษณะของความเป็นพิษ

กลุ่มที่เป็นพิษไม่ร้ายแรง	กลุ่มที่เป็นพิษแต่ไม่สามารถละลาย และพบเห็นได้ยาก	กลุ่มที่เป็นพิษมาก และพบเห็นได้ง่าย
Na C F K P Li	Ti Ga Hf La Zr	Be As Au Co Se
Mg Fe Rb Ca S Sr	Os W Rh Nb Ir	Hg Ni Te Tl Cu
H Cl Al O Br Si	Ta Ru Re Ba	Pd Pb Zn Ag Sb
N		Sn Cd Bi Pt

ที่มา : Forstner และ Wittmann (1981)

Depledge และคณะ (1993) พบว่า โลหะหนักที่มีผู้ให้ความสนใจศึกษาในด้านพิษวิทยามาก คือ ปรอท แคดเมียม และตะกั่ว รองลงมาคือ ทองแดง สังกะสี เหล็กและนิกเกิล (Calow, 1993) ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกโลหะหนัก 3 ชนิด คือ แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ซึ่งมีลักษณะสมบัติพิเศษดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

### 2.1.1 แคดเมียม

#### (1) คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

แคดเมียมเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม IIB ของตารางธาตุ มีน้ำหนักอะตอม 112.41 กรัม มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดเท่ากับ 321 และ 767 องศาเซลเซียสตามลำดับ เป็นโลหะสีน้ำเงิน เนื้ออ่อน เมื่อถูกอากาศหรือน้ำจะทำให้ผิวโลหะนั้นหมอง แคดเมียมมีค่าออกซิเดชันเท่ากับ 0 +1 และ +2 แต่ที่พบเห็นโดยทั่วไปจะอยู่ในสถานะที่มีเลขออกซิเดชันเป็น +2 ซึ่งแคดเมียมสามารถเกิดสารประกอบเป็นพันธะคู่ เช่น สารประกอบออกไซด์ ไฮดรอกไซด์ ซัลไฟด์ ซีลีไนด์ (selenides) เทลลูไรด์ (tellurides) และเฮไลด์ (halides) สารละลายที่มีไอออนลบพวกกลุ่มเฮไลด์ แคดเมียมจะสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้ดี และสารละลายที่มีไอออนบวกพวกแอมโมเนีย และเอมีน จะสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้ แต่สารประกอบที่เกิดขึ้นนั้นไม่เสถียรเมื่ออยู่ในน้ำและอากาศ

#### (2) แหล่งกำเนิด

แคดเมียมจะปรากฏอยู่ในแร่ที่ค่อนข้างหายาก เช่น Greenockite (CdS) และ Otavite (CdCO) สารประกอบทั้งสองชนิดนั้นพบในแร่สังกะสี แต่จะมีในปริมาณที่น้อยมาก คือ ประมาณ 1-3% (Pierce, 1970) สำหรับแร่ที่มีส่วนประกอบของแคดเมียม ได้แก่ Hawleyite (CdS), Xanthocroite (Cd(H<sub>2</sub>O)<sub>x</sub>), Cadmoselite (CdSe) และ Monteporrite (CdO)

#### (3) การผลิต

แคดเมียมส่วนใหญ่ได้จากการหลอมแร่สังกะสีและตะกอนที่เกิดจากการอิเล็กโทรไลซ์สังกะสีให้บริสุทธิ์ ซึ่งแคดเมียมจะถูกแยกออกมาเป็นผลพลอยได้ ซึ่งในปี 1973 พบว่า มีปริมาณการผลิตแคดเมียมทั่วโลกถึง 17 ล้านกิโลกรัม ในขณะที่สหรัฐอเมริกาผลิต 3.36 ล้านกิโลกรัม (Sullivan และ Krieger, 1992) และในการหลอมแร่สังกะสีที่มีแคดเมียมเป็นองค์ประกอบด้วยนั้น โลหะทั้ง 2 ชนิดจะรีดิวซ์ซึ่งกันและกัน ซึ่งแคดเมียมจะเป็นสารระเหยเร็วกว่าสังกะสี ดังนั้นจึงสามารถแยกเอาแคดเมียมออกจากสังกะสีได้โดยการกลั่นแยก นอกจากนี้ แคดเมียมเป็นธาตุที่มีความไวในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่าสังกะสี ดังนั้นการแยกโดยการใช้ไฟฟ้า (electrolytic) ก็สามารถนำมาใช้ได้

## (4) การใช้ประโยชน์

สารประกอบแคดเมียมสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ประโยชน์ของสารประกอบแคดเมียมที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ

ชนิดของสารประกอบ	ประเภทของอุตสาหกรรม
1. Cadmium acetate	- อุตสาหกรรมเครื่องเคลือบ ชุบโลหะ สีย้อม และสิ่งทอ การทำเมอร์แคพแทน (mercaptans) บริสุทธิ์จากน้ำมันดิบและก๊าซโซลีน
2. Cadmium carbonate	สารฆ่าเชื้อราในสนามหญ้า
3. Cadmium chloride	- สารฆ่าแมลง สารฆ่าเชื้อรา สารในการอัดรูป การเคลือบในหลอดสุญญากาศ อุตสาหกรรมกระจกและสารหล่อลื่น อุตสาหกรรมสีย้อมและสิ่งทอ
4. Cadmium fluoborate	- อุตสาหกรรมชุบโลหะ
5. Cadmium fluoride	- อุตสาหกรรมแก้วและแท่งควบคุมปฏิกรณ์นิวเคลียร์
6. Cadmium nitrate	- อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ (นิเกิล-แคดเมียม) สารฆ่าเชื้อรา
7. Cadmium oxide	- อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ (อัลคาไลด์) สีผงสำหรับสารประกอบแคดเมียม
8. Cadmium sulfate	- อุตสาหกรรมพลาสติกพีวีซี และเม็ดสี
9. Cadmium sulfide	- ใช้เป็นเม็ดสี (สีเหลือง สีเลือดนกบนน้ำตาล) ผสมในพลาสติก อุตสาหกรรมยางและอีพอกซี (Epoxy) เรซิน ใช้เป็นหมึกพิมพ์ ใช้ทาเคลือบในหลอดคาโทด หลอดฟลูออเรสเซนต์

ที่มา : Sullivan และ Krieger (1992)

### 2.1.2 ทองแดง

#### (1) คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

ทองแดงเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม IB ของตารางธาตุ มีน้ำหนักอะตอม 63.546 กรัม มีจุดหลอมเหลว และจุดเดือด เท่ากับ 1083 และ 2567 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นโลหะที่เหนียวและเนื้ออ่อน มีคุณสมบัติเป็นตัวนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี ทองแดงที่พบโดยทั่วไปมีค่า ออกซิเดชัน +1 (cuprous ion) และ +2 (cupric ion) โลหะทองแดงมีความทนทานต่อการกัดกร่อน ทนต่ออากาศ น้ำ

และการคชชนิดไม่ออกซิไดซ์ (nonoxidizing) ในสภาวะของการละลาย cupric ion (Cu(II)) จะเสถียรกว่า cuprous ion (Cu (I)) เนื่องจาก cuprous ion จะเกิดออกซิเดชันรีดักชันได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามความเสถียรของ Cu (I) และ Cu (II) นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของอิออนลบหรือลิแกนด์ ค่าคงที่ของสารละลาย และชนิดของอะตอมในผลึก ทองแดงสามารถเกิดสารประกอบต่าง ๆ ได้ดังนี้คือ สารประกอบซัลไฟด์ อาร์ซีไนต์ คลอไรด์ และ คาร์บอเนต

## (2) แหล่งกำเนิด

ทองแดงปรากฏอยู่ในแร่หลายชนิด ได้แก่ Chalcocite ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), Covellite ( $\text{CuS}$ ) Chalcopyrite ( $\text{CuFeS}_2$ ), Bornite ( $\text{Cu}_3\text{FeS}_3$ ), Cuprite ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), Tenorite ( $\text{CuO}$ ) และ Malachite ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ )

## (3) การผลิต

ทองแดงถือเป็นโลหะชนิดแรกที่มีมนุษย์นำมาใช้ ในปี 1986 สหรัฐอเมริกาได้มีการผลิตทองแดงในปริมาณ 1.26 ล้านตัน ในปัจจุบันสหรัฐอเมริกาเป็นประเทศที่ผลิตทองแดงมากถึงร้อยละ 14 ของโลก นอกจากสหรัฐอเมริกาแล้วยังมีประเทศอื่น ๆ ที่ผลิตทองแดง ได้แก่ ชิลี แคนาดา เปรู เป็นต้น (Sullivan และ Krieger , 1992) การผลิตทองแดงนั้นได้จากการนำแร่ทองแดงมาผ่านกระบวนการร่อนแร่ (flotation) กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ และการหลอมโลหะทองแดง

## (4) การใช้ประโยชน์

สารประกอบทองแดงสามารถใช้ประโยชน์ได้ในหลาย ๆ กิจกรรม ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สารประกอบทองแดงที่ใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

ชนิดของสารประกอบ	ประเภทของอุตสาหกรรม
1. Cupric oxide	- ตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้ในแบตเตอรี่ ทำอิเล็กทรอนิกส์ ลดปริมาณซัลเฟอร์ในน้ำมัน ทำสี สารฆ่าแมลง สีในเซรามิค เครื่องประดับ การเชื่อมโลหะ
2. Cupric oxide	- ผลิตสารฆ่าเชื้อรา สารกันเสียในสี เซลโฟโตนิก เล็กทรอนิกส์ ตัวเร่งปฏิกิริยา ทำเม็ดสีในแก้วและกระจกเงา
3. Cupric acetate	- การผลิตเม็ดสี สารฆ่าเชื้อรา สีย้อมผ้า ดอกไม้ประดับ

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

ชนิดของสารประกอบ	ประเภทของอุตสาหกรรม
4. Cupric acetoarsenate	- ผลิตสารฆ่าแมลง สีที่ใช้ในทะเล
5. Cupric arsenite	- ผลิตเมดิสี สารรักษาเนื้อไม้ สารฆ่าเชื้อรา แมลงและหนู
6. Cupric carbonate	- ใช้รักษาเมล็ดพันธุ์ ผลิตสารฆ่ารา การทำดอกไม้เพลิง ผลิตเมดิสี สารผสมในอาหาร
7. Cupric chloride	- ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวช่วยในการติดสีของผ้าย้อม ตัวดึงซัลเฟอร์ และตัวดับกลิ่นของสารปิโตเลียม การชุบโลหะ การถ่ายภาพ เมดิสี สารรักษาเนื้อไม้ สารป้องกันการเชื้อ สารผสมในอาหาร
8. Cupric chromate (VI)	- สารฆ่าเชื้อรา รักษาเมล็ดพันธุ์ รักษาเนื้อไม้ สารช่วยให้ติดสีของผ้าย้อม รักษาสภาพสิ่งทอและเส้นใย
9. Cupric hydroxide (Copper hydrate)	- การผลิตแพเรเทียม (rayon) แบตเตอรี่ ใช้ทำสารช่วยให้ติดสีในการย้อมผ้า เมดิสี สารฆ่าเชื้อรา สารฆ่าแมลง สารผสมอาหาร ตัวเร่งปฏิกิริยา สารรักษากระดาด
10. Cupric nitrate	- การอัดรูป สารให้สี สารช่วยให้ติดสีในผ้าย้อม การทำโลหะทองแดง สังกะสีและอลูมิเนียม สารรักษาเนื้อไม้ สารกำจัดวัชพืช สารฆ่าเชื้อรา ผลิตดอกไม้เพลิง ตัวเร่งปฏิกิริยาของเชื้อเพลิงจากหินและปฏิกิริยาอินทรีย์
11. Cupric sulfate, (pentahydrate)	- สารฆ่าเชื้อรา กำจัดสาหร่าย สารฆ่าแบคทีเรีย สารกำจัดราสารผสมอาหาร ใช้ในสารละลาย Bordeaux สารช่วยให้ติดสีในผ้าย้อม การเตรียมสีย้อม การฟอกหนัง สารรักษาเนื้อไม้การชุบโลหะ ผลิตหมึกสี เมดิสี การถ่ายภาพและดอกไม้เพลิง
12. Cuprous cyanide	- การชุบโลหะ สารฆ่าแมลง สารฆ่าเชื้อรา สารกันเสียในสี ตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีเมอไรซ์เซชัน (polymerization)
13. Cupric tungstate (VI) Cuprous selenide	- สารกึ่งตัวนำ

ที่มา : Sullivan และ Krieger (1992)

### 2.1.3 สังกะสี

#### (1) คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

สังกะสีเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม IIB ของตารางธาตุ มีน้ำหนักอะตอม 65.35 กรัม มีจุดหลอมเหลว และจุดเดือดเท่ากับ 419.4 และ 90.7 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สังกะสีเป็นโลหะที่มีสีขาวถึงฟ้าเนื้ออ่อน โดยทั่วไป สังกะสีที่ปรากฏนั้นมีค่าออกซิเดชันเท่ากับ +2 สังกะสีมีความทนต่อสภาพอากาศแห้ง ยกเว้นถ้าอุณหภูมิสูงเกิน 225 องศาเซลเซียส ถ้าในสภาวะอุณหภูมิห้องมีสภาพอากาศที่ชื้นและมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก็จะเกิดแผ่นฟิล์มสีเทาของสารประกอบ hydrate basic carbonate เคลือบบนผิวเพื่อช่วยป้องกันการกัดกร่อน สังกะสีจะมีลักษณะทางเคมีคล้ายกับแคดเมียม ดังนั้น ในการเกิดสารประกอบต่าง ๆ จึงมีโครงสร้างคล้ายคลึงกัน เช่น การเกิดเกลือของกรดออกโซ (oxo acid) (เช่น ไนเตรต ซัลเฟต เปอร์คลอเรต และอาซิเตต) จะมีลักษณะที่คล้ายกัน คือ สามารถละลายน้ำได้

#### (2) แหล่งกำเนิด

สังกะสีจะปรากฏมากในแร่ sphalerite ( $ZnS$ ) ส่วนแร่อื่นที่เป็นแหล่งผลิตสังกะสี ได้แก่ Zincite ( $ZnO$ ), Smithsonite ( $ZnCO_3$ ), Calamine ( $ZnSO_4 \cdot H_2O$ ), Willemite ( $ZnSiO_4$ ) แร่สังกะสีที่มีความสำคัญทางการค้าส่วนมากจะอยู่ในรูปของแร่สังกะสีคาร์บอเนต และแร่สังกะสีซัลไฟด์

#### (3) การผลิต

การผลิตสังกะสีนั้นได้จากการนำแร่สังกะสีซัลไฟด์มาเผาไฟในที่ที่มีออกซิเจน ทำให้เกิดเป็นสารประกอบซิงค์ออกไซด์ เมื่อนำซิงค์ออกไซด์ไปรีดิวซ์ด้วยการเผาที่ถ่านโค้ก จะเกิดเป็นสังกะสีในสถานะเป็นก๊าซและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ ซิงค์ออกไซด์สามารถละลายได้ในกรด และสามารถถูกแยกโดยใช้ไฟฟ้า การผลิตสังกะสีมีมากในประเทศสหรัฐอเมริกา และประเทศอื่น ๆ รองลงมา ได้แก่ แคนาดา เม็กซิโก ฮอนดูรัส และเปรู เป็นต้น

#### (4) การใช้ประโยชน์

สารประกอบสังกะสีสามารถใช้ประโยชน์ในหลาย ๆ กิจกรรม ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สารประกอบสังกะสีที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

ชนิดของสารประกอบ	ประเภทของอุตสาหกรรม
1. Zinc acetate	- สารรักษาเนื้อไม้ สารช่วยให้ติดสีในผ้าย้อม การทำกระจก สารรีเอเจนท์
2. Zinc carbonate	- ผลิตเม็ดสี สารผสมในอาหาร ใช้ทำภาชนะเครื่องเคลือบ ผลิตยาง
3. Zinc chloride	- สารช่วยกำจัดกลิ่น ป้องกันการติดเชื้อ สารรักษาเนื้อไม้ สารช่วยไม่ให้ติดไฟ การบัดกรี ผลิตซีเมนต์ สารช่วยให้ติดสีในการย้อม การกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม การบำบัดสิ่งทอ การทำยาง สารละลายสำหรับเซลล์โซล การผลิต activated carbon กระดาษขลุ่ยและสีย้อม
4. Zinc chromate (VI) Zinc hydroxide	- ผลิตเม็ดสีในสีทา ผลิตน้ำมัน น้ำมันขัดเงา พรหมน้ำมันและยาง
5. Zinc cyanide	- ปฏิกริยาฟลูออริเดชัน (fluoridation) ของสารประกอบอินทรีย์ ผลิตกระจก ผลิตอีนาเมล(enamels) สารรักษาเนื้อไม้ การชุบโลหะ การผลิตฟอสฟอรัสสำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์
6. Zinc oxide	- ผลิตเม็ดสี ซีเมนต์ แก้ว ยางรถยนต์ กาว ไม้ขีดไฟ รีเอเจนท์ หมึกขาว กระดาษอัดรูป สารกึ่งตัวนำ สารฆ่าเชื้อรา
7. Zinc phosphide	- ผลิตสารกำจัดหนู
8. Zinc silicate	- ผลิตจอโทรทัศน์ ฝอยอน
9. Zinc stearate	- การผลิตยาง ผลิตเครื่องสำอางและด้านเภสัชกรรม ointment สารกันน้ำ
10. Zinc sulfate	- สารช่วยให้เกิดสีในการย้อม สารรักษาเนื้อไม้ การฟอกกระดาษ สารรีเอเจนท์ การผลิตเกลือของสังกะสี
11. Zinc sulfide	- ผลิตเม็ดสี ผลิตรังสีเอ็กซ์เรย์และจอภาพโทรทัศน์

ที่มา : Sullivan และ Krieger (1992)

## 2.2 แหล่งที่มาของการปนเปื้อนของ แคดเมียม สังกะสี และทองแดงในแหล่งน้ำ

โลหะหนักที่ปรากฏในแหล่งน้ำนั้นมาจากทั้งกระบวนการทางธรรมชาติ และการกระทำของมนุษย์ โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำสามารถส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ โดยที่สิ่งมีชีวิตมีความสัมพันธ์กันตามห่วงโซ่อาหาร รวมทั้งมนุษย์สามารถได้รับโลหะหนักจนถึงระดับที่ส่งผลกระทบและเป็นความ

เสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์ การให้ความสนใจในเรื่องของโลหะหนักในแหล่งน้ำนั้นเริ่มจากเหตุการณ์ที่รุนแรงในประเทศญี่ปุ่น เมื่อชาวประมงที่บริเวณอ่าวมิชิมะและชุมชนที่อยู่บริเวณริมแม่น้ำจินสุ (Jintsu) ได้ล้มตายเนื่องจากพิษของแคดเมียม และปรอท (Ravera, 1979) ซึ่งถือเป็นโลหะหนักที่มีความเป็นพิษสูง ปัจจัยสำคัญที่ทำให้โลหะหนักในสิ่งแวดล้อมสามารถส่งผลกระทบได้ เนื่องจากโลหะหนักไม่สามารถสลายตัวได้โดยธรรมชาติหรือกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งต่างกับพวกสารอินทรีย์ แต่โลหะหนักบางชนิดที่ถือเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อสิ่งมีชีวิต ถ้าอยู่ในระดับที่เหมาะสมตามความต้องการของสิ่งมีชีวิตแล้ว จะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต เช่น ทองแดง สังกะสี เหล็ก แมงกานีส โคบอลต์ และโคบอลต์ เป็นต้น แต่ในกรณีที่ปริมาณมากเกินไปเกินความต้องการของสิ่งมีชีวิตแล้วย่อมสามารถส่งผลกระทบต่อ ปริมาณโลหะหนักที่พบเห็นในแหล่งน้ำนั้นมีที่มาหรือแหล่งกำเนิดหลายสาเหตุ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วโลหะหนักในแหล่งน้ำมีที่มาจากสาเหตุสำคัญ 5 ประการ (Forster และ Wittmann, 1981) คือ

### 2.2.1 การเปลี่ยนแปลงด้านธรณี

การเปลี่ยนแปลงสภาพทรัพยากรดิน หิน และแร่ เกิดจากการพัดพา การกัดเซาะ การชะล้างพังทลายโดยลมและฝน ซึ่งถือเป็นกระบวนการทางธรรมชาติที่เป็นผลทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายของสารประกอบ การเปลี่ยนแปลงด้วยสาเหตุนี้เป็นแหล่งที่บ่งบอกถึงปริมาณชั้นพื้นฐานของโลหะที่มีในแหล่งน้ำ โดยพิจารณาจากลักษณะโครงสร้างทางเคมีของโลหะหนักที่เกิดขึ้นขณะนั้น ซึ่งสามารถบ่งชี้ความเป็นไปได้ของโลหะหนักในแหล่งน้ำว่ามีปริมาณมากน้อยเพียงใด

### 2.2.2 กระบวนการผลิตแร่และโลหะ

ทรัพยากรแร่หลายชนิดที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบดังตัวอย่างแร่ที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น ทรัพยากรแร่ที่มีในธรรมชาติต้องนำมาผ่านกระบวนการต่าง ๆ เช่น การขุดเจาะ การย่อย การล้าง การถลุง และการหลอมแร่ เป็นต้น เพื่อให้ได้แร่ที่บริสุทธิ์และนำไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งระหว่างที่ผ่านกระบวนการผลิตแร่นั้นอาจเกิดฝุ่นละออง ซึ่งมีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบลอยฟุ้งสู่อากาศที่บริสุทธิ์และถูกพัดพาลงสู่แหล่งน้ำ สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตโลหะจากแร่ ต้องผ่านกระบวนการแยกโลหะโดยใช้ไฟฟ้า (electrolysis) การล้างด้วยกรด และการชุบโลหะ เพื่อให้ได้โลหะที่บริสุทธิ์ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวมีโอกาสที่โลหะจะปนเปื้อนไปกับของเสีย น้ำทิ้ง ที่ปล่อยสู่แหล่งน้ำโดยไม่ได้ผ่านการบำบัด ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศในแหล่งน้ำได้



### 2.2.3 การใช้โลหะและสารประกอบโลหะ

การนำโลหะและสารประกอบโลหะมาใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ มีอย่างกว้างขวาง ทั้งทางอุตสาหกรรม และเกษตรกรรม ดังตัวอย่างการใช้สารประกอบของแคดเมียม ทองแดงและสังกะสี ที่ได้แสดงในตาราง 2.2 ถึง 2.4 ซึ่งนอกจากโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดแล้ว การใช้ประโยชน์จากโลหะชนิดอื่นนั้นก็มีปริมาณมากเช่นกันในกิจกรรมต่าง ๆ เมื่อใช้ประโยชน์แล้วย่อมก่อให้เกิดของเสียที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ตัวอย่างอุตสาหกรรมบางประเภทที่มีการปนเปื้อนของโลหะกับน้ำทิ้ง ดังแสดงในตารางที่ 2.5 (Ravera,1979)

ตารางที่ 2.5 แสดงโลหะที่เป็นอันตรายบางชนิดในน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

ประเภทอุตสาหกรรม	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Se	Zn
เหมืองแร่ และหลอมโลหะ	/	/	/	/		/	/	/
สีและสีย้อม		/	/	/	/	/	/	
สารปราบศัตรูพืช	/				/	/		/
ไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้า				/	/	/		
การกัดผิวและหล่อโลหะ	/		/	/	/		/	
การชุบโลหะและเคลือบผิว		/	/		/			
วัตถุระเบิด	/			/	/	/		
ยางและพลาสติก						/		/
แบตเตอรี่		/			/	/		/
เภสัชกรรมและยา	/					/		
เส้นใย และสิ่งทอ			/	/				
ปิโตรเลียมและถ่านหิน	/				/			
เยื่อกระดาษ และกระดาษ						/		
ฟอกหนัง			/					

หมายเหตุ : เครื่องหมาย "/" หมายถึง ปรากฏในน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

ที่มา : Ravera (1979)

### 2.2.4 การขับถ่ายโลหะหนักในสัตว์และมนุษย์

โลหะหนักบางชนิดถือว่าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งในร่างกายของสัตว์และมนุษย์ นอกเหนือไปจากโลหะบางชนิดที่เป็นธาตุจำเป็น เช่น โซเดียม โปแตสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียมแล้ว

โลหะหนักบางชนิดถือได้ว่าเป็นธาตุที่จำเป็นเช่นกันแต่มีในปริมาณที่น้อยมาก ได้แก่ สังกะสี ทองแดง และ เหล็ก ซึ่งโลหะเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบของเอ็นไซม์ โปรตีนที่เกี่ยวข้องกับระบบการหายใจ และโครงสร้างของสิ่งมีชีวิต เช่น สังกะสีใน carbonic anhydrase, carboxypeptidase A และ B และ hydrogenases แมงกานีสใน pyruvate carboxylase ซีลีเนียมใน glutathione peroxidase ทองแดงใน cytochrome oxidase และ haemocyanin โคบอลท์ใน vitamin B12 และ เหล็กใน haemoglobin (Calow,1993) เมื่อมีการขับถ่ายของสัตว์และมนุษย์ ทำให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักดังกล่าวได้ Forstner และ Prosi ได้กล่าวว่า ในมนุษย์ที่เป็นผู้ใหญ่จะปล่อยสังกะสีในปริมาณ 7-20 มิลลิกรัมต่อวัน (Ravera,1979)

### 2.2.5 การทิ้งขยะทับถมกัน และน้ำชะกองขยะ

ขยะบางชนิดถือได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดของโลหะหนัก ถ้าทิ้งโดยปราศจากความระมัดระวัง และขาดการจัดการในการเก็บ การทิ้งขยะที่ถูกต้อง การทับถมของขยะก่อให้เกิดการปนเปื้อนของสารมลพิษในดิน นอกจากนี้แล้ว น้ำฝนสามารถชะกองขยะทำให้มีโลหะหนักปนเปื้อนกับน้ำชะกองขยะ และสามารถปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำได้ บางกรณีได้มีการนำเอา Sewage sludge มาใช้ผสมในดินที่เพาะปลูกพืชเพื่อเพิ่มสารอาหาร ในหลายกรณีภาคตะกอนนั้นจะปนเปื้อนโลหะที่เป็นพิษได้เมื่อมีการย่อยสลายภาคตะกอน พวกโลหะที่เป็นพิษจะอยู่ในรูปที่พืชสามารถจะรับเข้าไปได้ การฝังกากจากการทำเหมืองนั้นถือเป็นแหล่งสำคัญในการเกิดปัญหาโลหะหนักในแหล่งน้ำเช่นกัน แม้ว่าจะไม่ปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน ภาวะมลพิษของโลหะ ที่เกิดจากกองขยะของเสียนั้น สามารถบำบัดได้จากแหล่งชุมชนและอุตสาหกรรม ตัวอย่างการทิ้งขยะชุมชนที่กองอยู่ใกล้กัน 10 กอง ใกล้กับเมือง Aachen เยอรมันตะวันตก พบว่า มีปริมาณของแคดเมียม และทองแดงเพิ่มขึ้น ซึ่งมีศักยภาพที่ทำให้เกิดอันตรายต่อคุณภาพน้ำดื่ม (Forstner และ Wittmann, 1981)

## 2.3 การแพร่กระจายของแคดเมียม สังกะสี และ ทองแดง ในแหล่งน้ำ

### 2.3.1 การแพร่กระจายของแคดเมียม สังกะสี และทองแดง ในน้ำ

ลักษณะของโลหะหนักในทางเคมีที่อยู่ในน้ำนั้นเป็นตัวชี้ถึงสภาวะทางเคมีของแหล่งน้ำ นอกจากนี้ ชนิดของโลหะหนักที่ปรากฏสามารถจะบอกลักษณะการเคลื่อนที่ รูปแบบที่สิ่งที่มีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ และความสามารถในการเกิดพิษ โลหะหนักที่ปรากฏในแหล่งน้ำนั้นมีขนาดแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าโลหะหนักนั้นอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนหรืออออนอิสระ ค่าประจุของโลหะหนัก การจำแนกชนิดของโลหะหนักตามขนาด สามารถจำแนกได้ดังนี้คือ

- (1) ชนิดที่มีขนาดน้อยกว่า 0.45 ไมโครเมตร เป็นประเภทที่สามารถละลายได้
- (2) ชนิดที่มีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับ 0.45 ไมโครเมตร เป็นอนุภาคของโลหะแขวนลอย

หรือตะกอน

การกระจายตัวของโลหะในน้ำนั้นจะพบได้ทั้งในลักษณะของโลหะละลาย และของแข็งที่ไม่ละลาย โดยมากจะพบในรูปของอออนอิสระ สารประกอบเชิงซ้อนกับสารอนินทรีย์ที่โครงสร้างไม่ซับซ้อนที่จับกับสารอินทรีย์ และจับที่ผิวของอนุภาค ซึ่งชนิดของโลหะที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นกับปัจจัยทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมีของแหล่งน้ำ ในแหล่งน้ำที่มีปัญหามลพิษมักจะปรากฏโลหะอยู่ในทั้งสองลักษณะ แต่ถ้าเป็นแหล่งมลพิษที่มีปัญหาหนัก ๆ แล้ว มักจะพบโลหะที่อยู่ในรูปของโลหะละลายมากกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แคดเมียม สังกะสี และทองแดง (Ravera, 1979) เมื่อเกิดภาวะมลพิษมากขึ้น อนุภาคแขวนลอยของโลหะในแหล่งน้ำมีแนวโน้มที่ลดลง เช่น แม่น้ำ Mississippi มีปริมาณตะกั่ว และแคดเมียมที่อยู่ในรูปของอนุภาคแขวนลอย 89-99% ในขณะที่แม่น้ำในอเมริกาและฝรั่งเศส ที่มีปัญหามลพิษจะพบอยู่ในช่วง 30-84% เท่านั้น (Fergusson, 1990)

#### 2.3.1.1 แคดเมียมในน้ำ

แคดเมียมที่ปรากฏในน้ำส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอออนอิสระ ( $Cd^{2+}$ ) หรือไฮดรอกไซด์อออน ( $CdOH^+$ ) ภายใต้สภาวะที่ความเป็นกรดเป็นด่างน้อยกว่า 7 หรือ 8 แต่ถ้าความเป็นกรดเป็นด่าง 8-9 พบว่า ปริมาณของ  $CdOH^+$  จะลดลง ในขณะที่ปริมาณของ  $Cd^{2+}$  มีมากขึ้น ในแหล่งน้ำที่มีสารกลุ่มคลอไรด์ (chloro group) อยู่ แคดเมียมสามารถเกิดพันธะกับคลอไรด์เกิดเป็นสารประกอบที่มีความเสถียรมาก ในแหล่งน้ำจืดที่มีความเป็นด่าง แคดเมียมที่พบจะอยู่ในรูปของแคดเมียมคาร์บอเนต ( $CdCO_3$ ) การเกิด  $CdCO_3$  นั้นขึ้นอยู่กับความเป็นกรดเป็นด่าง และความเป็นด่าง ในกรณีที่มีความเป็นด่างสูง การเกิด  $CdCO_3$  ย่อมสูงด้วย และความเป็นกรดเป็นด่างมากกว่า 8  $CdCO_3$  ก็มีมากขึ้นเช่นกัน ในสภาวะรีดักชัน (ที่มีซัลเฟอร์อยู่) แคดเมียมจะเกิดเป็น bisulphide ion ( $CdHS^-$ )

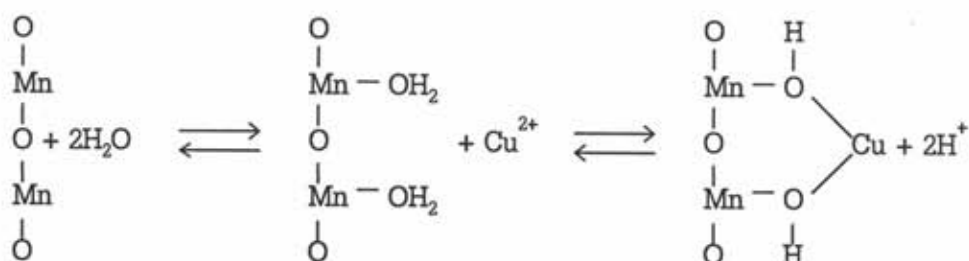
ในสภาพแหล่งน้ำที่มีมลภาวะแคดเมียมจะปรากฏอยู่ในรูปสารประกอบอื่น เช่น แคดเมียมซัลเฟต ( $CdSO_4$ ) และสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียมอินทรีย์ ในสภาพกรดอ่อนแคดเมียมสามารถเกิดพันธะกับสารต่าง ๆ เช่น สารซิสทีน (Cystine) ในกรดอะมิโน สารกลุ่มคาร์บอซิลิก โพลีแซคคาไรด์ และมลสารที่เป็นสารอินทรีย์ (เช่น NTA) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียมอินทรีย์นั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ที่เหมาะสม และอออนบวกของโลหะชนิดอื่น ที่สามารถเกิดสารประกอบได้เช่นเดียวกับแคดเมียม แต่แคดเมียมที่อยู่ในรูปแคดเมียมอออนและแคดเมียมอนินทรีย์นั้นมีความสำคัญกว่า (Fergusson, 1990)

### 2.3.1.2 ทองแดงในน้ำ

ทองแดงที่ปรากฏในแหล่งน้ำโดยทั่วไปมีค่าออกซิเดชัน +2 ซึ่ง  $\text{Cu}^{2+}$  จะจับกับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็น  $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$  ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นในแหล่งน้ำมีหลายชนิด บางชนิดมีความเสถียรต่ำ เช่น  $\text{CuSO}_4(\text{H}_2\text{O})_5$  และ  $\text{Cu}(\text{OH})^+(\text{H}_2\text{O})_5$  เป็นต้น ซึ่งถือเป็นตัวที่มีศักยภาพในการเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในแหล่งน้ำได้ นอกจากนี้ ทองแดงสามารถจับกับ Chelating agents บางตัว เช่น กรดซิตริก ซึ่งมีความเสถียรต่ำ แต่ถ้าจับกับกรดฟิววิก (fulvic) จะมีความเสถียรค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตาม สารประกอบเชิงซ้อนบางตัวถึงแม้เกิดพันธะที่ไม่แข็งแรง แต่ก็ไม่มีศักยภาพในการเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ เนื่องจากมีขนาดและรูปร่างของโมเลกุลที่ประกอบด้วยลิแกนด์มากกว่า 1 ลิแกนด์ เช่น สารประกอบ Hexadentate Cu-EDTA

ชนิดของสารประกอบทองแดงในแหล่งน้ำขึ้นกับความเป็นกรดเป็นด่าง และความเป็นด่างเป็นสำคัญ พบว่า ที่ความเป็นกรดเป็นด่างต่ำกว่า 5 ทั้งในน้ำที่มีค่าความเป็นด่างสูงหรือต่ำ เมื่อความเป็นกรดเป็นด่างสูงขึ้น ปริมาณของ  $\text{Cu}^{2+}$  จะลดลงและอยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ เช่น  $\text{CuCO}_3$ ,  $\text{CuOH}^+$  และ  $\text{Cu}(\text{CO}_3)_2^{2-}$  สำหรับสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์นั้น เกิดจากทองแดงจับกับลิแกนด์ของสารอินทรีย์ซึ่งมีทั้งที่เสถียรและไม่เสถียร ทองแดงที่อยู่ในรูปของคิวบริกไอออน ( $\text{Cu}(\text{II})$ ) นั้นจะเกิดเป็นสารประกอบได้มากในแหล่งน้ำและเกิดเป็นสารที่เสถียรมาก เมื่อมีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 7.5 ถึง 8.5 ทองแดงสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับกรดฮิวมิกได้ดี และความสามารถในการเกิดสารประกอบของทองแดงกับกรดอินทรีย์มีมากขึ้นเมื่อความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มขึ้นจาก 5 ถึง 10 (Spear และ Pierce, 1979)

ทองแดงสามารถจะดูดซับที่อนุภาคแขวนลอย ซึ่งพบว่าเกิดขึ้นมากในบริเวณที่เป็นจุดปล่อยของเสีย ซึ่งอนุภาคแขวนลอยที่สามารถดูดซับทองแดงได้ ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีพื้นผิวในการดูดซับได้ดี เช่น สารประกอบไฮดรอกไซด์ สารประกอบอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง พบว่า ที่ความเป็นกรดเป็นด่างมากกว่า 6 พื้นผิวของอนุภาคมีประจุเป็นลบ ซึ่งทองแดงสามารถเข้าไปจับกับอนุภาคดังกล่าวได้ดังตัวอย่างการดูดซับทองแดงบน  $\text{MnO}_2$  ดังแสดงในปฏิกิริยาข้างล่างนี้ (Spear และ Pierce, 1979)



### 2.3.1.3 สังกะสีในแหล่งน้ำ

สังกะสีที่ปรากฏในแหล่งน้ำนั้น พิจารณาจากปัจจัยทางชีวภาพ เคมีและด้านธรณีสามารถจำแนกได้เป็น 7 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 2.6 (Nriagu, 1980)

ตารางที่ 2.6 ชนิดของสังกะสีที่ปรากฏในแหล่งน้ำ

ลักษณะทางเคมี	สารตัวอย่าง	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (นาโนเมตร)
โลหะไฮเดรทอออน	$Zn(H_2O)_6^{2+}$	0.85
สารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ที่ไม่เสถียร	$Zn(H_2O)_5Cl^+$ , $Zn(H_2O)_5OH^+$	1
สารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ที่เสถียร	$ZnS$ , $ZnCO_3$ , $Zn_2SiO_4$	1-2
สารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ที่ไม่เสถียร	Zn-citrate , Zn-glycinate	1-2
สารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ที่เสถียร	Zn-humate , Zn-Cysteinate	2-4
อนุภาคอินทรีย์สารแขวนลอย	$Zn-Fe_2O_3$ , $Zn^{2+}-SiO_2$	10-500
อนุภาคอินทรีย์สารแขวนลอย	Zn-humic acid , Zn-organic detritus	10-500

ที่มา : Nriagu (1980)

สารประกอบของสังกะสีกับคลอไรด์ และซิสตีน (cysteine) เป็นสารประกอบที่เสถียรและเสถียรมากขึ้นเมื่อจับกับการดิววิค (fulvic) และซัลไฟด์ (sulfide) ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับบนอนุภาค คือ ความเป็นกรดเป็นด่าง เช่น ในแหล่งน้ำจืดที่มีความเป็นกรดเป็นด่าง 6.5-6.1 จะไม่ปรากฏสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของสังกะสี แต่ถ้าความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มขึ้น สังกะสีสามารถจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ได้ดีเพราะเกิด chelate ของโลหะได้มากขึ้น

#### 2.3.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวและชนิดของโลหะในแหล่งน้ำ

ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวและชนิดของโลหะในแหล่งน้ำ มีดังนี้คือ

(1) ลักษณะโดยทั่วไปของโลหะ เช่น ค่าออกซิเดชัน ความแข็งแรงของการเกิดพันธะของอออน ขนาดของโลหะ ค่าประจุ เป็นต้น

(2) ลักษณะของสภาวะแวดล้อมของน้ำ เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรดเป็นด่าง ความเป็นด่าง ความกระด้าง สภาวะออกซิเดชันและรีดักชัน เป็นต้น

(3) ความสามารถในการละลายของสารประกอบโลหะหนัก

(4) ชนิดของลิแกนด์ที่ปรากฏในน้ำที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อน ทั้งที่เป็นสารอนินทรีย์ เช่น  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HS}^-$  และ  $\text{CN}^-$  เป็นต้น และที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น กรดอินทรีย์ อินทรีย์คาร์บอนที่ละลาย (Dissolved organic carbon ; DOC) ฮิวมัส เปปไทด์ โพลีอะมิโนคาร์บอกซิเลท (Polyaminocarboxylates) เป็นต้น

(5) กระบวนการทางชีวเคมีที่ต้องพิจารณาถึงซึ่งเกี่ยวกับจุลศาสตร์ เทอร์โมไดนามิก สมดุลเคมีและค่าคงที่ของสภาวะเสถียร (stability constant)

### 2.3.2 แคลเมียม สังกะสี และทองแดงในตะกอนและดินตะกอน

โลหะที่อยู่ในน้ำสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ที่มีในแหล่งน้ำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงชนิดและลักษณะทางเคมีของโลหะ โดยทำให้แรงยึดระหว่างไอออนมีมากขึ้น เกิดสารประกอบที่มีขนาดและน้ำหนักที่มากขึ้น ทำให้อนุภาคที่ละลายในน้ำสามารถตกตะกอนลงสู่ท้องน้ำได้ และทับถมกันในดินตะกอน ความแตกต่างของปริมาณโลหะในดินตะกอน ในแม่น้ำและทะเลสาบนั้นขึ้นกับลักษณะที่ตั้ง และปัจจัยอื่นที่เป็นตัวแปร เช่น ความเข้มข้นของโลหะในดินตะกอน อิทธิพลของ lithogenous unit อิทธิพลในเชิงอุทกวิทยา สภาพทางธรณีเสถียรฐาน ผลการกระทำของมนุษย์ อิทธิพลจากพืช และแหล่งแร่ เป็นต้น (Fergusson, 1990)

ปริมาณของโลหะในดินตะกอนมีปริมาณลดลง เมื่อระยะห่างจากแหล่งกำเนิดมีมากขึ้น เนื่องจากเกิดการเจือจางมากขึ้น รูปแบบของการเกิดสารประกอบของโลหะหนักในดินตะกอนนั้นขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดและสภาพแวดล้อม ปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อนในดินตะกอนมากกว่าในน้ำ กระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นต่าง ๆ เช่น การจับกับอนุภาคไฮดรอกไซด์ของแมงกานีสหรือเหล็ก การตกตะกอน การรวมตะกอน (flocculation) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์

#### 2.3.2.1 กระบวนการในการเกิดสารประกอบในตะกอนและดินตะกอน

กระบวนการต่าง ๆ ในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะหนักในตะกอน และดินตะกอนนั้น มีดังนี้คือ (Fergusson, 1990)

## (1) การเข้าจับกับเม็ดแร่ (Incorporation into detrital minerals)

การเข้าจับของโลหะในเม็ดแร่หรืออนุภาคดินเหนียวเกิดขึ้นโดยการแทนที่โลหะที่มีอยู่เดิม

## (2) การตกตะกอนของสารประกอบ (Precipitation of specific compounds)

การตกตะกอนของสารประกอบมีความสัมพันธ์กับค่าความสามารถในการละลาย ( $K_{sp}$ ) ถ้าอนุภาคใดมีคุณสมบัติในการละลายได้ยาก แสดงว่า สามารถเกิดตะกอนได้ดี สารประกอบของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ที่เกิดขึ้นสามารถละลายได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบ เช่น ไฮดรอกไซด์ออลอน ( $\text{OH}^-$ ) ซัลไฟด์ ( $\text{S}_2^-$ ) คาร์บอเนต และฟอสเฟต นอกจากนี้ การตกตะกอนโลหะจะขึ้นกับความเป็นกรดเป็นด่าง เช่น ที่ความเป็นกรดเป็นด่างต่ำทองแดงตกตะกอนในรูปของ Azurite ( $\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$ ) ที่ความเป็นกรดเป็นด่างสูงจะตกตะกอน Cupric hydroxide ( $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ) และ Malachite ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ ) สำหรับแคดเมียม ที่ความเป็นกรดเป็นด่าง 5-6.5 แคดเมียมจะตกตะกอนในรูปคาร์บอเนต และซัลไฟด์ ซึ่งละลายได้ยากขึ้น สำหรับสังกะสีสามารถตกตะกอนอยู่ในรูปของ  $\text{ZnS}$  และ  $\text{ZnCO}_3$  ได้เช่นกัน

## (3) การดูดซับทางกายภาพของสารประกอบ (Physical sorption)

การดูดซับของโลหะที่เกิดขึ้นโดยเกิดจาก Electrostatic เป็นการเกิดแรงประจุไฟฟ้าที่บริเวณพื้นผิว (เช่น อนุภาคดินเหนียว หรือ ไฮดรอกไซด์ของแมงกานีสหรือเหล็ก เป็นต้น) อนุภาคที่จะดูดซับจะอยู่ในรูปของออลอนหรืออนุภาคที่มีขั้ว เช่น น้ำ สารไฮดรอกไซด์ของโลหะ (เช่น  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  และ  $\text{SiO}_2$ ) จะดูดซับทองแดงที่ละลายได้ดีที่ความเป็นกรดเป็นด่างมากกว่า 6 สำหรับสังกะสีสามารถดูดซับบนอนุภาค ferric hydroxide ได้ดีที่ความเป็นกรดเป็นด่างมากกว่า 7

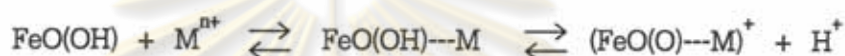
## (4) การดูดซับโดยกระบวนการทางเคมี และ การตกตะกอน (Chemisorption and Co-precipitation)

การดูดซับของโลหะที่เกิดขึ้นบนอนุภาคดินเหนียวโดยกระบวนการทางเคมี เกิดขึ้นจากการเข้าจับของโลหะบนตำแหน่งที่ว่างบนอนุภาคดินเหนียว ซึ่งจากกระบวนการนี้จะถูกควบคุมโดยความเป็นกรดเป็นด่างและลักษณะเฉพาะของโลหะ เช่น ค่าประจุ นอกจากนี้ การเกิดกระบวนการไฮเดรชันก็จะมีผลต่อการดึงดูดโลหะหนักด้วย ชนิดของอนุภาคดินเหนียวที่สามารถดูดซับโลหะหนักได้ดี สามารถเรียงลำดับได้ดีดังนี้ (Fergusson, 1990) คือ

montmorillonite > vermiculite > illite ~ chlorite > kaolinite

โลหะทองแดงสามารถจับกับอนุภาคดินเหนียวได้ดี พบว่า ที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่างเท่ากับ 8 มากกว่าร้อยละ 90 ของปริมาณทองแดง 100 และ 800 ไมโครกรัมต่อลิตร จะถูกดูดซับโดยอนุภาคดินเหนียว illite ปริมาณ 200 ถึง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร โลหะทองแดงสามารถจับกับอนุภาคดินเหนียวชนิดต่าง ๆ โดยสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ คือ montmorillonite > illite > kaolinite (Spear และ Picce, 1979)

นอกจากนี้แล้วการดูดซับบนอนุภาคไฮดรอกไซด์แมงกานีสหรือเหล็ก โดยกระบวนการทางเคมีและการตกตะกอนนั้น ถือเป็นกระบวนการหลักในการเกิดโลหะหนักในดินตะกอน เมื่อมีการดูดซับที่ผิวของอนุภาคไฮดรอกไซด์แล้ว จากนั้นมีการแลกเปลี่ยนโปรตอนหรืออออนเกิดขึ้น ดังแสดงในสมการ



สำหรับแคดเมียมจะถูกดูดซับบนอนุภาคดินเหนียวได้และมีแนวโน้มในการจับกับอนุภาคดินเหนียวเช่นเดียวกับโลหะทองแดงดังนี้ คือ chlorite (montmorillonite) > illite > kaolinite (Fergusson, 1990)

#### (5) การจับกับอนุภาคสารอินทรีย์ (Association with organic materials)

อนุภาคสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำสามารถจับกับโลหะหนักเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของโลหะ กระบวนการที่เกิดขึ้นถือเป็นหนทางหนึ่งที่สามารถดึงโลหะหนักจากน้ำ และตกเป็นดินตะกอน ตัวอย่างของสารอินทรีย์ที่สามารถจับกับโลหะอออนได้มีน้ำหนักโมเลกุล ตั้งแต่ 700-2,000,000 เช่น โพลีแซคคาไรด์ โปรตีน ฟีนอล เป็นต้น นอกจากนี้ ซากพืชและสัตว์ที่ทับถมในดินตะกอนก็เป็นส่วนหนึ่งที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบด้วย เนื่องจากได้รับโลหะก่อน หรือหลังจากเสียชีวิต

แคดเมียมและสังกะสีสามารถจับกับสารประกอบอินทรีย์ เช่น กรดฮิวมิก และ กรดฟิววิก เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน Cd-humic acid , Cu-fulvic acid และ Zn-humic acid เป็นต้น ความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ของทองแดงนั้นจะขึ้นกับความความเป็นกรดเป็นด่าง โดยพบว่าทองแดงเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับกรดฮิวมิกเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มจาก 7.5 เป็น 8.5 และสาร Cu-humate นั้นจะเสถียรมากที่สุด ที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่างมากกว่า 7 ขณะที่ Cu-fulvate เสถียรที่สุด ที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่างน้อยกว่า 7 (Spear และ pierce, 1979) และแนวโน้มของสังกะสี ก็เช่นกัน พบว่า เมื่อค่าความเป็นกรดเป็นด่างมากกว่า 7 สังกะสีสามารถจะจับตัวได้ดี และมีเสถียรภาพกับกรดฮิวมิก (Nriagu, 1980)



(6) การจับกับหมู่คาร์บอเนต (Association with carbonates)

สารประกอบในกลุ่มคาร์บอเนตและฟอสเฟตเป็นสารอนินทรีย์ที่ไอออนโลหะสามารถเข้าจับเกิดเป็นตะกอนได้ การเกิดตะกอนรูปแบบนี้จะเป็นไปอย่างช้ามาก ในกรณีของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต ไอออนของโลหะจะเปลี่ยนโครงสร้างจากรูปของ calcite ไปเป็นแบบ aragonite ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรน้อยกว่า เมื่อมีการจับกับโลหะได้แล้วก็จะเกิดการแปรสภาพของโครงสร้างผลึก โดยโลหะจะถูกจับเข้าไปภายในอนุภาคของแข็ง ทำให้อยู่ในรูปของสารประกอบคาร์บอเนตที่ไม่ละลายน้ำและสามารถตกตะกอนได้เอง สำหรับสารประกอบกลุ่มฟอสเฟต เช่น ออร์โธฟอสเฟต และ ไพโรฟอสเฟต พบว่า เมื่อทองแดงจับกับสารประกอบออร์โธฟอสเฟตเกิดเป็นสารประกอบ Cupric orthophosphate ( $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$ ) ที่ไม่ละลายน้ำ แต่ถ้าเกิดกับไพโรฟอสเฟต จะเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้เล็กน้อย ซึ่งจะอยู่ในรูป  $\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{Cu}$

2.3.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของโลหะทั้ง 3 ชนิดในตะกอน และดินตะกอน

ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวและ ชนิดของโลหะในดินตะกอน มีดังนี้ คือ

- (1) การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของแหล่งน้ำ เช่น การเพิ่มขึ้นของค่าความเค็ม (salinity) การลดลงของค่าความเป็นกรดเป็นด่าง การเปลี่ยนแปลงสภาวะรีดอกซ์ การเพิ่มของปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนสังเคราะห์ (เช่น Nitritotriacetic acid , Polyphosphates เป็นต้น) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ
- (2) กิจกรรมของจุลินทรีย์มีผลทำให้เกิดสารประกอบมากขึ้น โดยมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่างและ  $E_h$  ของน้ำ และเอ็นไซม์สามารถทำให้โลหะอนินทรีย์เปลี่ยนแปลงเป็นโลหะอินทรีย์
- (3) การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การเกิดชะล้างพังทลาย การขุดลอก (dredging) และการรบกวนทางชีวภาพ (bioturbation)

2.3.3 แคลเมียม สังกะสีและทองแดงในสิ่งมีชีวิต

โลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ที่ปรากฏอยู่ในสิ่งมีชีวิตนั้นเป็นผลจากการปฏิกิริยาที่ซับซ้อนของสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิด การที่โลหะหนักสามารถจับตัวอยู่ในส่วนต่างๆของสิ่งมีชีวิตได้ เนื่องจากชนิดของโลหะนั้นอยู่ในรูปที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ ปัจจัยทางชีวภาพของสิ่งมีชีวิตที่เป็นตัวกำหนดการจับโลหะ และการตอบสนองของโลหะ เช่น วงจรชีวิต ชีววิทยาของสิ่งมีชีวิต และระดับของการบริโภค เป็นตัวชี้พฤติกรรมของสิ่งมีชีวิต

### 2.3.3.1 กลไกในการรับโลหะหนักเข้าสู่สัตว์ในแหล่งน้ำ

สิ่งมีชีวิตสามารถนำเอาโลหะเข้าสู่ร่างกายได้หลายทาง เช่น การสัมผัสกับสารโดยตรง ซึ่งโลหะนั้นสามารถผ่านผนังเซลล์ หรือผ่านอวัยวะที่ใช้ในการหายใจ และผ่านทางกรกินอาหาร หรืออาจได้รับจากทั้ง 2 ทาง การที่สามารถบอกได้ว่าโลหะที่สิ่งมีชีวิตรับมานั้นผ่านทางใด ถือเป็นสิ่งสำคัญในการบ่งบอกการกระจายตัวของโลหะภายในร่างกาย และอวัยวะต่าง ๆ และที่สำคัญความเป็นพิษของโลหะ

สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำนั้นสามารถได้รับโลหะได้โดยผ่านทางผิวหนังของสิ่งมีชีวิต เนื่องจากได้รับสัมผัสกับโลหะในน้ำได้โดยตรง นอกจากนี้แล้ว สิ่งมีชีวิตประเภทนี้มีระบบการหายใจ ที่ต้องอาศัยการหมุนเวียนผ่านอวัยวะหายใจ เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนก๊าซ แต่สิ่งมีชีวิตบางประเภท เช่น หอย (molluscs) หลายชนิด crustaceans และพวก annelids เป็นต้น จะรับโลหะผ่านทางกรกินอาหารเป็นส่วนใหญ่ (Calow, 1993)

โลหะหนักที่สามารถแพร่ผ่านผนังของร่างกายสิ่งมีชีวิตหรืออวัยวะพิเศษสำหรับการหายใจ (เช่น เหงือกและปอด) ได้นั้น จะอยู่ในรูปของไอออนอิสระ ซึ่งกลไกของการดึงดูดโลหะของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำนั้น มีกลไกการแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) 8 ทาง ดังนี้คือ (ดังแสดงในรูปที่ 2.1)

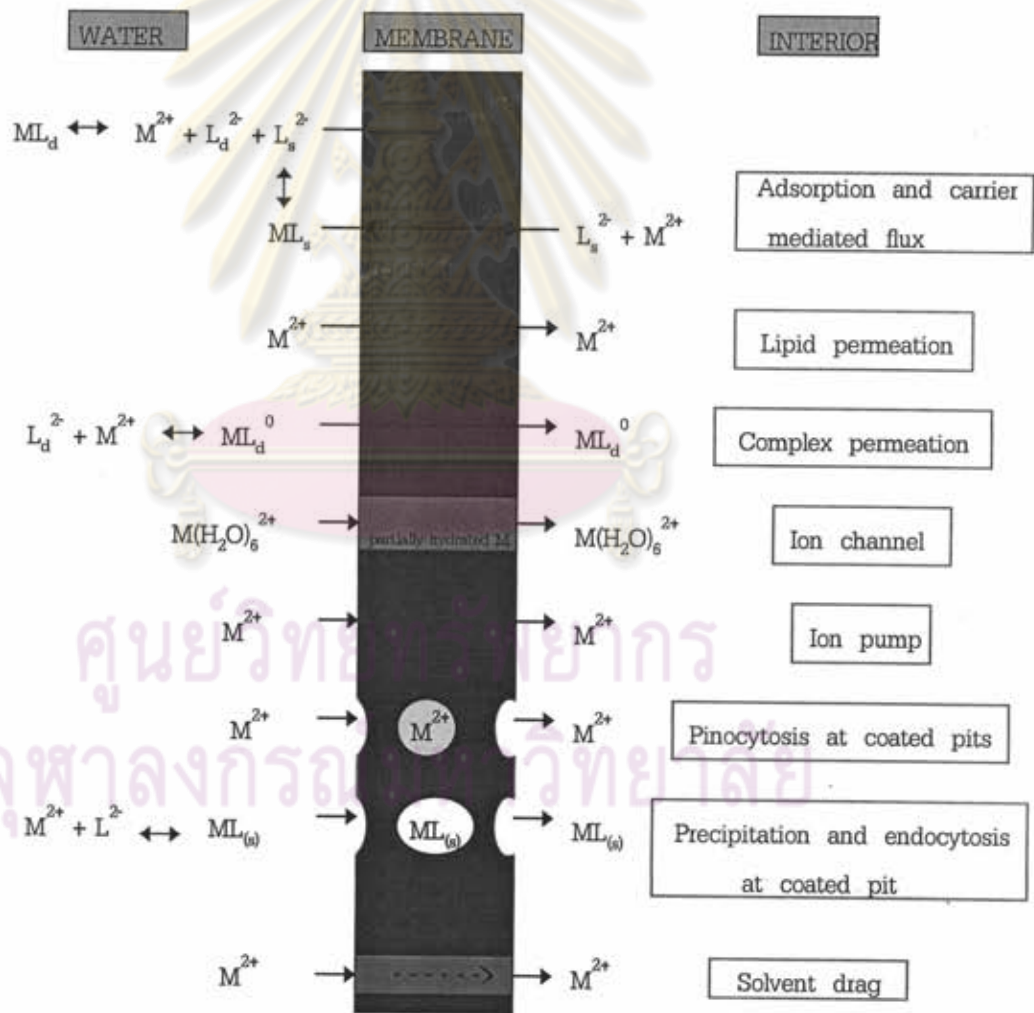
(Newman และ McIntosh, 1991; Hamelink และคณะ, 1994)

- (1) Adsorption and carrier mediated flux
- (2) Lipid permeation
- (3) Complex permeation
- (4) Ion channel
- (5) Ion pump
- (6) Pinocytosis at coated pits
- (7) Precipitation and endocytosis at coated pit
- (8) Solvent drag

เมื่อไอออนของโลหะหนักที่เข้าสู่ร่างกายของสัตว์น้ำจะสามารถเข้าจับกับโปรตีนได้ และ บทบาทของโลหะแต่ละชนิดย่อมแตกต่างกัน โลหะที่ถือว่าเป็นธาตุจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต เช่น สังกะสี ทองแดง และเหล็ก เป็นต้น มีส่วนช่วยในการเจริญเติบโตของเซลล์ โดยทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบของเอ็นไซม์โปรตีน ที่ใช้ในกระบวนการหายใจ และเป็นสารประกอบสำคัญของโครงสร้างสิ่งมีชีวิต แต่ถ้าโลหะประเภทนี้มีปริมาณสูงเกินความต้องการแล้วก็จะส่งผลกระทบต่อหรือก่อให้เกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิตได้ สำหรับโลหะที่ไม่ถือว่าเป็น

ธาตุจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต เช่น แคลเซียม ตะกั่ว ปรอท และลูมิเนียม เป็นต้น แม้จะมีในระดับต่ำก็ไม่ช่วยในการเจริญเติบโต แต่จะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตได้

เมื่อสัตว์นำรับโลหะหนักเข้าไปในร่างกายแล้วจะถูกดูดซับไว้ที่เนื้อเยื่อของร่างกาย และกระจายตัวไปสะสมในส่วนต่าง ๆ เช่น อีออนของโลหะจะทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชัน (เช่น ซัลไฟดริล (sulfhydryl) อะมิโน คาร์บอกซิล ไฮดรอกไซด์ และออกไซด์) บนพื้นผิวของเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์ และโมเลกุลของเอนไซม์ เป็นต้น เมื่อเวลาผ่านไปโลหะที่สะสมในเนื้อเยื่ออาจจะถูกกำจัดออก หรือแยกออกไปได้ในบางส่วนของร่างกาย แต่บางส่วนของร่างกายมีบทบาทในการกักเก็บโลหะหนักโดยมีการเปลี่ยนรูปของโลหะซึ่งเป็นการลดพิษของโลหะหนักได้ทางหนึ่ง



รูปที่ 2.1 กลไกการแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ของโลหะหนัก (Hamelink และคณะ, 1994)

สัตว์บางชนิดสามารถกักเก็บโลหะส่วนเกินไว้ในเซลล์ในบริเวณที่เป็น active site โดยสามารถแยกออกไปอยู่ในรูป granules หรืออาจถูกกำจัดออกไปกักเก็บในส่วนของ inert tissue เช่น เปลือก (shell) หรือ carapaces ในกรณีดังกล่าว โลหะจะไม่เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต ตัวอย่างของลักษณะดังกล่าวจะเห็นได้ชัดในสิ่งมีชีวิตพวก invertebrate ซึ่งจะเกิด granule ของโลหะที่ต่อมเกี่ยวกับการย่อยอาหาร เพื่อป้องกันการเข้าสู่ระบบเลือดของสัตว์เอง

การกักเก็บโลหะในเซลล์จะมีทั้งในรูปของสารที่สามารถละลาย และไม่ละลาย ซึ่งเป็นส่วนช่วยให้มีการใช้พลังงานน้อยลง ในปี 1989 Hopkin ได้จำแนกลักษณะของ granules ที่สิ่งมีชีวิตกักเก็บโลหะไว้ 4 ชนิด คือ (Calow, 1993)

(1) ชนิด เอ granules ของโลหะจับตัวอย่างเหนียวแน่นอยู่ในชั้นของ Ca และ Mg phosphate ซึ่งโลหะที่สามารถจับในลักษณะนี้ได้ ได้แก่ โลหะในกลุ่ม A และใน borderline metal (เช่น แมงกานีส ( $Mn^{2+}$ ) และ สังกะสี ( $Zn^{2+}$ ) เป็นต้น)

(2) ชนิด บี granules ของโลหะจะแยกตัวมากกว่าชนิดแรก จะเกาะติดบริเวณเซลล์เมมเบรนของอวัยวะ ซึ่งโลหะจะจับกับซัลเฟอร์ของเซลล์ ตัวอย่างของโลหะที่จับได้แก่ โลหะในหมู่ B และใน borderline metal (เช่น แคดเมียม ทองแดง ปรอท และ สังกะสี)

(3) ชนิด ซี granules ที่เกิดจากการจับโลหะกับเหล็ก ทำให้อยู่ในรูปของสารประกอบที่ไม่จำเป็นของสิ่งมีชีวิต เช่น สาร ferritin เป็นต้น

(4) ชนิด ดี granules มีขนาดใหญ่กว่า 3 ชนิดแรก โลหะจะจับกับ  $CaCO_3$  ซึ่งเป็นชั้นที่หนาแน่น

### 2.3.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการรับโลหะของสัตว์ในแหล่งน้ำ

#### 2.3.3.2.1 ปัจจัยทางกายภาพและเคมี

ปัจจัยทางกายภาพ และเคมีนั้นมีผลต่อปริมาณโลหะที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ และมีผลต่อความเป็นพิษและการสะสมในร่างกายของสิ่งมีชีวิต ปัจจัยที่มีผลต่อการรับโลหะของสิ่งมีชีวิต มีดังนี้คือ

#### (1) อุณหภูมิและปริมาณออกซิเจนในน้ำ

อุณหภูมิและปริมาณออกซิเจนละลายนั้นมีความสำคัญกับกระบวนการเมตาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิต พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น กลไกในการรับเอาโลหะนั้นจะสูงขึ้น เนื่องจาก อุณหภูมิไปกระตุ้นการ

หายใจ นอกจากนี้ อุณหภูมิและออกซิเจนที่ละลายมีผลต่อกระบวนการทางเคมีในน้ำ และดินตะกอน ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการปล่อยโลหะหนักไปอยู่ในรูปที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ เช่น ทำให้เกิดการออกซิเดชันและรีดักชันของโลหะ เป็นต้น

#### (2) ความกระด้างของน้ำ

ระดับความกระด้างของน้ำนั้นมีผลทำให้เกิดสารประกอบคาร์บอเนตที่ไม่ละลายน้ำ โดยโลหะหนักจะดูดซับกับอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตในน้ำ ซึ่งทำให้โลหะเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำไปใช้ได้ นอกจากนี้  $Mg^{2+}$  และ  $Ca^{2+}$  สามารถเข้าไปแย่งจับที่ active site ของเนื้อเยื่อแทนโลหะหนัก ทำให้โลหะหนักสามารถเข้าสู่ร่างกายสิ่งมีชีวิตได้น้อยลง

#### (3) สารประกอบอินทรีย์

อนุภาคของสารอินทรีย์ในน้ำสามารถนำพาไอออนโลหะออกจากน้ำได้ เกิดเป็นสารประกอบอินทรีย์ของโลหะ ซึ่งอยู่ในรูปที่ไม่เหมาะสมในการที่สิ่งมีชีวิตจะนำไปใช้ ดังนั้น ความเข้มข้นของโลหะสามารถจะเปลี่ยนแปลงโดยสารอินทรีย์ และสารประกอบอินทรีย์สังเคราะห์ (เช่น NTA EDTA เป็นต้น) ซึ่งสารประกอบที่เกิดขึ้นมีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้น และตกลงสู่ท้องน้ำสะสมในดินตะกอน แต่ถ้าเกิดกระบวนการสลายตัวทางชีวภาพ โลหะที่อยู่ในสารประกอบก็สามารถหลุดลอยสู่แหล่งน้ำได้อีก

#### (4) ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง

การตกตะกอนโลหะกับอนุภาคอื่นที่มีในแหล่งน้ำ เช่น คาร์บอเนต เหล็กไฮดรอกไซด์ และอนุภาคสารอินทรีย์ เป็นต้น จะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำ นอกจากนี้ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ยังมีผลต่อสภาวะการละลายของสารประกอบของโลหะในน้ำเช่นกัน ในแหล่งน้ำที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างเป็นกรดทำให้ปริมาณโลหะละลายทั้งหมดในแหล่งน้ำเพิ่มขึ้น และเปลี่ยนแปลงเป็นรูปของไอออนซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตมากที่สุด

#### 2.3.3.2.2 ปัจจัยทางชีวภาพ

ปัจจัยทางชีวภาพที่มีต่อโลหะหนักในสิ่งมีชีวิตนั้นอาจเกิดขึ้นจากปัจจัยภายในของสิ่งมีชีวิตชนิดนั้นเอง หรือปัจจัยที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นที่อยู่ในแหล่งน้ำ ปัจจัยทางชีวภาพมีดังนี้ คือ

### (1) วงจรชีวิตและความเป็นอยู่ของสิ่งมีชีวิต

เมื่อพิจารณาในระยะเวลาอันยาวนานแล้ว อายุของสิ่งมีชีวิตนั้นมีผลต่อปริมาณของโลหะที่มีอยู่ในร่างกายของสิ่งมีชีวิต ซึ่งสามารถลดหรือเพิ่มปริมาณที่มีได้ พัฒนาการของร่างกายสิ่งมีชีวิตบางชนิด เช่น การลอกคราบ (ในกลุ่ม crustaceans) เป็นต้น ทำให้ปริมาณของโลหะในร่างกายนั้นเปลี่ยนแปลงได้ จากการศึกษาทดลองในปู *Carcinus maenas* Rath. พบว่าร้อยละ 61 ของสิ่งก่ลีทั้งหมดที่กำจัดออกจากร่างกายนั้นมาจากการลอกคราบ (Forstner และ Wittmann, 1981)

รูปแบบในการกินอาหารช่วงระยะตัวเต็มวัยและวัยอ่อนนั้น ย่อมมีผลต่อระดับของโลหะในสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้แล้ว เพศของสิ่งมีชีวิต เช่น ในปลา Zebrafish ที่ได้รับอาหารที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียม 10 ppm. เป็นเวลา 16 สัปดาห์ พบว่า ปลาเพศเมียมีปริมาณแคดเมียมมากกว่าในเพศผู้เป็น 2 เท่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเพศเมียมีกลไกในการสืบพันธุ์เข้ามาเกี่ยวข้อง (Forstner และ Wittmann, 1981)

### (2) การเปลี่ยนแปลงของสิ่งมีชีวิตตามฤดูกาล

กิจกรรมหรืออัตราการเกิดเมตามอลิซึมของสิ่งมีชีวิตนั้น จะขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ โดยส่วนมากสิ่งมีชีวิตจะมีกิจกรรมหรืออัตราการเกิดเมตามอลิซึมที่ต่ำลง เมื่อสภาพอากาศเย็นลง ซึ่งส่งผลต่อการรับและปล่อยโลหะหนักของร่างกาย สิ่งมีชีวิตบางชนิดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงฤดูกาลจะมีการสะสมไขมันในร่างกาย ซึ่งส่งผลในการกักเก็บสารประกอบโลหะอินทรีย์ที่สามารถกักเก็บหรือละลายในไขมันได้

### (3) ตัวแปรต่างๆของสิ่งมีชีวิต

ในสิ่งมีชีวิตต่างชนิดกันย่อมมีปริมาณโลหะหนักที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลำดับขั้นในการบริโภคในห่วงโซ่อาหารที่มีหลายระดับ ถึงแม้จะอยู่ในระดับเดียวกันแต่ปริมาณโลหะหนักที่มีในสิ่งมีชีวิตก็ไม่เหมือนกัน เนื่องจาก ที่อยู่อาศัยที่แตกต่างกัน โครงสร้างและหน้าที่ของอวัยวะที่ได้รับสัมผัสโลหะของสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดนั้นแตกต่างกัน เช่น อวัยวะที่ใช้ในการหายใจ (ซึ่งอาจเป็นเหงือก หรือผ่านผิวหนังโดยการแลกเปลี่ยนก๊าซ) สารไคติน (chitin) ที่เคลือบผิวของสัตว์ แต่ละชนิดมีปริมาณที่แตกต่างกันทำให้มีการสะสมของโลหะที่แตกต่างกัน เป็นต้น

## 2.4 ความเป็นพิษของแคดเมียม ทองแดง และ สังกะสี ต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

โลหะสามารถเกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตได้เมื่อเข้าสู่ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาชีวเคมี และมีผลทำให้สิ่งมีชีวิตผิดปกติไป ลักษณะผลกระทบที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของโลหะ ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปต่าง ๆ ดังนี้คือ

- (1) โลหะไฮเดรทอออน ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน
- (2) อีออนโลหะที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอีออนของสารอินทรีย์
- (3) อีออนโลหะที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับลิแกนด์ของสารอินทรีย์

โดยทั่วไป โมเลกุลของโลหะหนักจะเข้าทำลายเยื่อหุ้ม plasma และเข้าไปจับกับ protein และ phospholipids ยับยั้งการเกิด Na-K ใน ATPase ขัดขวางการส่งกรดอะมิโนผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ การเกิด peroxidation ทำให้มีผลต่อ enzyme โดยเฉพาะ DNA polymerase, Ca-ATPase, Na-K ATPase และยับยั้งการเกิด glutathione ผลกระทบที่เกิดในเซลล์นั้น โลหะจะเข้าไปขัดขวางกระบวนการเมตาบอลิซึมและสามารถเข้าไปใน nucleus ขณะที่มีการสังเคราะห์ DNA โดยมีผลต่อการสังเคราะห์ metallothionein ซึ่งเป็นรหัสในการสังเคราะห์ RNA ของเซลล์ ซึ่งลักษณะความเป็นพิษของโลหะแคดเมียม ทองแดง และ สังกะสี ที่มีต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำนั้นแสดงผลที่แตกต่างกัน ดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไปนี้

### 2.4.1 ความเป็นพิษของแคดเมียม

การรับเอาแคดเมียมของสัตว์ในแหล่งน้ำจืดนั้น ส่วนใหญ่จะผ่านทางเหงือก แต่ก็มีสัตว์บางจำพวกที่ได้รับผ่านทางอาหาร เมื่อสัตว์รับเอาแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายแล้ว แคดเมียมสามารถกระจายอยู่ในเนื้อเยื่อทุกส่วน แต่ที่พบเห็นมากได้แก่ เหงือก, ตับ, ไต, ตับอ่อน และ โครงร่างภายนอก (exoskeleton) สำหรับในระดับเซลล์แล้ว แคดเมียมจะฝังตัวอยู่ในส่วนของ cytoplasmic proteins โดยสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ metallothionein (MT) โดยอยู่ในรูปของ Cd-MT ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนนี้สามารถแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเข้าไปสู่ระบบเลือดได้ แคดเมียมสามารถจะเข้าแทนที่อนุภาคที่เป็นส่วนประกอบของโมเลกุลโปรตีนได้ เช่น แคดเมียม สามารถเข้าแทนที่แคลเซียมที่อยู่ในโปรตีน calmodulin เป็นต้น (Dobson, 1992) ผลกระทบของแคดเมียมที่เกิดขึ้นต่อสัตว์ในแหล่งน้ำนั้นมีหลายด้าน โดยเฉพาะผลในระยะยาวของสัตว์ เช่น การสืบพันธุ์, การเจริญเติบโต การรอดชีวิต เป็นต้น จากการตรวจเอกสารสามารถสรุปได้ดังนี้คือ

จากการศึกษาในปี 1984 ของ HolCombe และคณะ ซึ่งได้ทดสอบสาร  $CdCl_2$  กับหอยกาบเดียวหลายชนิด พบว่า มีผลทำให้การผลิตไข่ช้าลง เปอร์เซ็นต์ในการออกไข่ลดลงและรอดชีวิตน้อยลง การเติบโตมีน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (Dobson, 1992)

การศึกษาผลกระทบของแคดเมียมในพวก water flea ในกลุ่มของ Daphnia ซึ่งพวก Daphnia จะแสดงความไวต่อสารในระยะที่เซลล์ไข่สามารถเจริญเป็นตัวอ่อนได้ เช่น การศึกษาของ Kuhn และคณะในปี 1989 พบว่า การสืบพันธุ์ของ Daphnia magna จะถูกยับยั้งอย่างสมบูรณ์ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมมากกว่า 3.2 ไมโครกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังมีการทดสอบของแคดเมียมกับ Daphnia pulex โดย Bertram และ Hart ในปี 1979 ซึ่งศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อขนาดและจำนวนของ brood พบว่า ที่ความเข้มข้นของแคดเมียม 1 ถึง 30 ไมโครกรัมต่อลิตร มีผลทำให้ขนาดของ brood ลดลง จำนวน brood ต่อตัวลดลงและจำนวนครั้งในการออกลูกลดลงด้วย

#### 2.4.2 ความเป็นพิษของทองแดง

ทองแดงถือเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่อสัตว์ เนื่องจากทองแดงเป็นส่วนประกอบของส่วนต่าง ๆ ของระบบในร่างกาย เช่น เป็นส่วนประกอบใน Hemocyanin ที่ช่วยในการหายใจ เป็นส่วนประกอบที่จำเป็นของเอนไซม์หลายชนิด โดยเฉพาะเอนไซม์ Cytochrome oxidase เป็นต้น จะเห็นว่าทองแดงเป็นโลหะที่เป็นประโยชน์ต่อสัตว์ถ้ามีอยู่ในระดับต่ำ ทองแดงที่ส่งผลกระทบต่อสัตว์นั้นมักจะอยู่ในรูปของ  $Cu^{2+}$  และ  $CuOH^+$  มีคุณสมบัติที่สามารถแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ได้ดีและละลายในไขมันได้ดี ดังนั้นเมื่อสัตว์ได้รับทองแดงในปริมาณที่เกินความจำเป็นแล้ว ย่อมส่งผลกระทบต่อระบบต่าง ๆ ในร่างกายได้ดังนี้ คือ

- ผลกระทบต่อระบบการหายใจ การแพร่ผ่านชั้น Epithelium เช่น ในปลา พบว่า ทองแดงสามารถทำให้เหงือกเกิดอาการ necrosis เป็นอาการที่เกิดจากการตกตะกอนในช่องว่าง lamellae ของเหงือก ทำให้ขัดขวางระบบการแลกเปลี่ยนก๊าซ (Nriagu, 1979 ; Rand และ Petrocelli, 1985 )

- ผลกระทบต่อระบบเลือด ทองแดงมีผลทำให้ปริมาณ Glutathione ในเลือดลดลง และปริมาณของ Methemoglobin เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเครื่องชี้ให้เห็นถึงการเกิด Oxidation ของ Erythrocyte นอกจากนี้ยังพบว่า ทองแดงมีผลทำให้ Hematocrit และ Hemoglobin เพิ่มขึ้น เซลล์เม็ดเลือดแดงเกิดอาการบวม (Rand และ Petrocelli, 1985)

- ผลต่อการทำงานของเอนไซม์ โดยทองแดงเข้าไปยับยั้งการรับเข้าของ  $NaCl$  เนื่องจาก  $Cu^{2+}$  นั้น มีความสามารถในการจับกับกลุ่ม Sulphydryl (-SH) ได้ดี ทำให้มีผลต่อการเคลื่อนที่ของเอนไซม์บางชนิด เช่น  $Na^+ K^+ -ATPase$  ซึ่งอยู่บริเวณ Epithelium ของเหงือก (Taylor, 1995)



- ผลต่อระบบสืบพันธุ์ ผลของทองแดงต่อระบบสืบพันธุ์นั้นได้มีการศึกษาใน *Daphnia magna* ระยะตัวเต็มวัย โดยเปรียบเทียบระหว่างการให้อาหารด้วยสาหร่ายและอาหารสำเร็จชนิดเม็ด พบว่า ในกลุ่มที่ให้อาหารชนิดเม็ดที่ระดับทองแดง 20 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำให้ขนาดของ brood ลดลง ในกลุ่มที่ให้อาหารด้วยสาหร่าย ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาด brood ถึงแม้จะมีระดับของทองแดง 80 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ก็ตาม นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงจำนวนลูกต่อสัปดาห์ พบว่า ในน้ำที่มีค่าความกระด้างน้อย (45 mg/l CaCO<sub>3</sub>) และมีปริมาณทองแดง 22 และ 35 ไมโครกรัมต่อลิตรนั้น จำนวนลูกลดลงไปร้อยละ 16 และ 50 ตามลำดับ (Spear และ Pierce, 1979 )

- ผลต่อการเจริญเติบโต จากการศึกษาใน *Daphnia magna* ที่ระดับทองแดง 40 ไมโครกรัมต่อลิตร ในน้ำที่มีความกระด้าง 45 mg/l CaCO<sub>3</sub> มีผลทำให้น้ำหนักลดลงร้อยละ 26 ปริมาณโปรตีนลดลงร้อยละ 5 และ Glutamic oxalacetic transaminase ลดลงร้อยละ 10 เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (Spear และ Pierce, 1979 ) และการทดสอบที่ระดับทองแดง 30 ไมโครกรัมต่อลิตร ต่อกุ้งน้ำจืด (*O. rostricus*) เป็นเวลา 30 วัน พบว่า มีผลยับยั้งการเติบโตของลูกรุ่นใหม่ (Spear และ Pierce, 1979 )

#### 2.4.3 ความเป็นพิษของสังกะสี

สังกะสีถือว่าเป็นสารอาหารปริมาณน้อย (micronutrient) เนื่องจากเป็นโลหะที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโต และเป็นส่วนประกอบของเซลล์ในสัตว์ เป็นส่วนประกอบในเอนไซม์บางชนิด เช่น ใน carbonic anhydrase เป็นต้น สังกะสีเป็นส่วนประกอบสำคัญในโปรตีนมากกว่า 300 ชนิด ในสัตว์หลายชนิดจะพบว่าสังกะสีเป็นตัวหลักสำคัญที่พบมากใน metallothionein ซึ่งโปรตีนเหล่านี้มีบทบาทกับกิจกรรมของสิ่งมีชีวิต รวมไปถึงเมตาบอลิซึมของกรดนิวคลีอิก โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และกรดไขมัน และที่สำคัญมากกว่านั้นคือ สังกะสีเป็นส่วนสำคัญในการถ่ายทอดทาง DNA โดยจะเกี่ยวข้องกับ DNA และ RNA polymerase นอกจากประโยชน์ของสังกะสีที่มีต่อสัตว์แล้ว ความเป็นพิษของสังกะสีที่มีต่อสัตว์น้ำนั้นก็มีหลายด้านเช่นกัน ถ้าสัตว์ได้รับในปริมาณที่เกินความต้องการ ผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้นมีดังต่อไปนี้คือ

- ผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและเมตาบอลิซึม โดยสังกะสีมีผลในการยับยั้งการเติบโต การเปลี่ยนแปลงไขมันในร่างกาย ดังตัวอย่างการศึกษาของ Biesinger และ Christensen (1972) ได้ทดสอบพิษเฉียบพลันของสังกะสีที่มีต่อ *Daphnia* โดยใช้สังกะสีที่ระดับ 0.175 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 3 สัปดาห์ มีผลในการลดน้ำหนักไป 28 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม แต่มีร้อยละ 10 ที่พบว่ามีปริมาณโปรตีนในร่างกายเพิ่มขึ้น การศึกษาของ Wooldripge (1969) ทดสอบโลหะหลายชนิดรวมทั้งสังกะสีที่มีต่อ hydrophilid water beetles (*Tropisternum lateralis*) ระยะตัวเต็มวัยเป็นเวลา 2 สัปดาห์ พบว่า ที่ระดับสังกะสี 0.658 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลทำให้ไขมันในร่างกายถูกทำลาย (Niagu, 1980)

- ผลกระทบต่อระบบการหายใจ ผลของสังกะสีที่มีต่อระบบการหายใจนั้นมีลักษณะคล้ายคลึงกับทองแดง โดยที่มีผลกับเหงือกของปลา ทำให้เกิดอาการ hypoxia เป็นสาเหตุให้โครงสร้างของเหงือกถูกทำลาย ทำให้ปลาตายในที่สุด จากการศึกษาของ Chinnayya ในปี 1971 (Nriagu, 1980) โดยทดสอบในกุ้ง *Atyid* ชนิด *Caridina rajadhari* ที่ระดับสังกะสี 6.5 mg/l เป็นเวลา 30 นาที เป็นผลทำให้ลดการหายใจ

- ผลกระทบต่อระบบการสืบพันธุ์ ได้ทำการศึกษาถึงการพัฒนนาการเจริญของเซลล์ไข่โดยในปี 1974 Kobayashi ศึกษาในหอยกาบเดี่ยวชนิด *Radix auricularius* ที่ระดับสังกะสี 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระดับที่สูงกว่านี้ พบว่า มีผลทำให้เกิด Cytolysis ขณะที่ถ้าระดับสังกะสี 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลทำให้ยับยั้งการพัฒนาเซลล์ไข่ และการศึกษาของ Biesinger และ Christensen ในปี 1972 พบว่า ที่ระดับสังกะสี 0.070 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลทำให้ reproductive impairment ของ *Daphnia magna* ลดลงไปร้อยละ 50 (Nriagu, 1980)

#### 2.4.4 ปฏิสัมพันธ์ของแคดเมียม ทองแดง และสังกะสี

เนื่องจากโลหะทั้งสามชนิดนั้นอยู่ในกลุ่ม IB และ IIB ในตารางธาตุ ซึ่งคุณสมบัติเกี่ยวกับค่าประจุจัดอยู่ในกลุ่ม "soft metal" ดังนั้น มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับ Sulfur (S>O>N) ได้ดี สำหรับ  $Zn^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ซึ่งถือว่ามีความสามารถในการจับกับกลุ่ม Sulphydryl ในเอนไซม์และโปรตีนได้ดี รวมทั้งสามารถเกิดปฏิกิริยากับไนโตรเจนและออกซิเจนใน Nucleophilic group ของ Nucleotides Nucleic acid และ Peptides เป็นต้น

การเกิดพิษของโลหะที่ไม่มีความจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิตนั้น อาจเกิดจากสาเหตุที่โลหะนั้นเข้าไปแทนที่  $Cu^{2+}$  และ  $Zn^{2+}$  และมีประสิทธิภาพในการแย่งจับกับลิแกนด์ของสารอินทรีย์ในสิ่งมีชีวิต สำหรับโลหะหนักที่มีความสามารถในการจับกับหมู่ Sulphydryl (-SH) นั้นเรียงลำดับได้ดังนี้คือ (Viarengo และ Nott, 1993)



เมื่อโลหะเหล่านี้จับกับ -SH แล้วทำให้เปลี่ยนแปลงโครงสร้างและหน้าที่ของโมเลกุลเหล่านี้ส่งผล กระทบต่อลักษณะทางกายภาพของเซลล์สิ่งมีชีวิตได้

สำหรับแคดเมียมแล้ว สามารถจะเปลี่ยนแปลงเมตาบอลิซึม และหน้าที่ของธาตุที่จำเป็นต่อร่างกาย เช่น สังกะสี เหล็ก แมงกานีส ทองแดง ซีลีเนียม และแคลเซียม เป็นต้น ถ้าในขณะที่ปริมาณธาตุที่จำเป็นเหล่านี้ไม่เพียงพอต่อความต้องการของสิ่งมีชีวิตแล้ว ความเป็นพิษของแคดเมียมและปริมาณ

การสะสมในเนื้อเยื่อจะเพิ่มมากขึ้น ในทางตรงข้าม ถ้าปริมาณธาตุที่จำเป็นดังกล่าวมีมากเกินไปเกินความต้องการแล้ว ก็จะสามารถป้องกันการเกิดพิษของแคดเมียมได้ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแคดเมียมกับโลหะที่มีประจุ 2 นั้น จะเกิดขึ้นบริเวณ absorption site แคดเมียมสามารถเข้าจับที่ binding site ของโปรตีนหลายชนิดที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซึม (absorption) และการเคลื่อนย้าย (transportation) ในร่างกาย

แคดเมียมและสังกะสีที่ปรากฏในสัตว์นั้นพบว่าโลหะทั้งสองชนิดนี้จะต้านฤทธิ์กัน ซึ่งโลหะแต่ละตัวจะแย่งกันเข้าไปจับที่ binding site ของ carrier protein ซึ่งโปรตีนที่สำคัญ ได้แก่ metallothionein สำหรับโมเลกุลของเอนไซม์ที่มีสารประกอบของสังกะสีอยู่นั้น การแสดงความเป็นพิษของแคดเมียมที่เกิดขึ้นอาจมีสาเหตุจากการแทนที่ของแคดเมียมในโมเลกุลเอนไซม์

สำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่างแคดเมียมและทองแดงนั้น แคดเมียมจะส่งผลกระทบต่อทองแดงด้วยกลไกที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับสังกะสี ซึ่งผลกระทบที่มีจะเกี่ยวกับการเจริญเติบโต ฮีโมโกลบินในเลือด (เกิด anemia) ceruloplasmin activity และรูปแบบการสืบพันธุ์ ถือว่า แคดเมียมมีผลกระทบอย่างมาก โดยแสดงผลในทางต้านกับทองแดง และถึงแม้ว่าจะรับแคดเมียมเข้าไปในปริมาณน้อยก็ตามแต่เมตามอลิซึมของทองแดงย่อมถูกกระทบด้วย

ทองแดงที่จับตัวในสารประกอบเชิงซ้อนนั้นมีความเสถียรมาก เช่น  $\text{Cu}^{2+}$  ในโปรตีน การแทนที่  $\text{Cu}^{2+}$  สามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มีปริมาณธาตุอื่นมาก ๆ ในทางกลับกัน  $\text{Cu}^{2+}$  สามารถแทนที่ตัวอื่นได้ การที่สามารถแทนที่กันได้เนื่องจากมี electron configuration และขนาดของออร์บิทัลคล้ายกัน เช่น ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{Cu}^{2+}$  และ  $\text{Zn}^{2+}$  เพราะฉะนั้นความเสถียรที่เกิดขึ้นในโปรตีนจะเหมือนกัน ดังนั้น การจะใช้  $\text{Zn}^{2+}$  ทดแทน  $\text{Cu}^{2+}$  ใน metallo enzymes เป็นไปได้

ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างสังกะสีและทองแดงนั้นจะกระจายตัวในเซลล์ โดยมีการจับอยู่ในกรดอะมิโน peptides หรือโปรตีนที่เป็นตัวกลางในเมตามอลิซึม สัตว์ส่วนที่ปรากฏในแต่ละตัวกลานั้นแตกต่างกัน Bremner และ Davies ได้แสดงให้เห็นว่า ทองแดง และ สังกะสี จะปรากฏอยู่ในโมเลกุลของโปรตีน ซึ่งส่วนใหญ่จะมีน้ำหนักโมเลกุล 3 ช่วงหลัก ๆ คือ (Nriagu, 1981)

- (1) น้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 65,000 - 75,000
- (2) น้ำหนักโมเลกุล 35,000
- (3) น้ำหนักโมเลกุล 8,000 - 12,000

โปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (8,000 - 12,000) จะอยู่ในกลุ่ม thionien ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง ทองแดงและสังกะสีใน thioniens นั้นจะเกิดการแทนที่กันที่ binding sites นอกจากนี้สังกะสีเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการสังเคราะห์ thionein เพิ่มความเสถียรและลดอัตราการย่อยสลาย โมเลกุล

ของ thioniens นั้นถือเป็นตัวที่มีบทบาทในการกักเก็บและลดพิษของโลหะหลายชนิดได้ ในกรณีที่มีปริมาณของทองแดงเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความต้องการสังกะสีน้อยลง หรือถ้าขาดแคลนสังกะสี ก็จะนำไปสู่ความต้องการทองแดงมากขึ้น ยกตัวอย่าง การศึกษาของ Engel และ Brouwer ในปี 1989 (Calow, 1993) ได้แสดงให้เห็นว่า ระหว่างการลอกคราบของปู จะพบปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้นที่ ecdysis (อาจมีผลจากการเกิด heamocyanin catabolism ทำให้ปล่อยทองแดงออกมา) และทองแดงจะเข้าจับใน metallothionein ที่ midgut gland โดยเข้าไปแทนที่สังกะสี จะเห็นได้ว่า ขณะที่ปริมาณของทองแดงเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณของสังกะสีลดลงได้

## 2.5 ชีววิทยามบางประการของไรแดง

ไรแดงเป็นสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังจำพวกเดียวกับกุ้งและปู หรือเรียกว่ากลุ่ม crustacean ซึ่งมีชื่อวิทยาศาสตร์ *Moina macrocopa* มีชื่อสามัญว่า water flea เป็นแพลงก์ตอนสัตว์ชนิดหนึ่งถือว่าเป็นอาหารธรรมชาติที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง ดังนั้น การอนุบาลสัตว์น้ำวัยอ่อนด้วยไรแดงจึงทำให้อัตรารอด และอัตราการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำวัยอ่อนสูงมาก ส่วนประกอบของไรแดงเมื่อคิดเป็นน้ำหนักแห้งประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 74.09 (สันทนา ดวงสวัสดิ์, 2529 และ ธรรมบุญ โรจนะบุรานนท์ และฉวีวรรณ อภิลิทธิไพศาล, 2523) คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 12.50 ไขมันร้อยละ 10.19 และเถ้าร้อยละ 3.47 (สันทนา ดวงสวัสดิ์, 2529) ไรแดงสดให้พลังงานสูงถึง 300.29 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (สำรวย เสรีจกิจ, 2533)

ไรแดงมีลักษณะทางอนุกรมวิธานดังนี้ คือ (Edmondson, 1959)

Phylum	Arthropoda
Class	Crustacea
Subclass	Branchiopoda
Superorder	Diplostraca Gerstaecker
Order	Cladocera Calman
Suborder	Elycladucera Eriksson
Superfamily	Chydoroidea
Family	Daphnidae
Genus	Moina
Species	<i>Moina macrocopa</i>

### 2.5.1 รูปร่าง ลักษณะของไรแดง

ไรแดงมีขนาดตั้งแต่ 0.4 - 1.8 มิลลิเมตร ลำตัวมีสีแดงเรื่อ ๆ ลำตัวอ้วนเกือบกลมมีขนาดเฉลี่ย 1.3 มิลลิเมตร บริเวณส่วนหัวและลำตัวจะปกคลุมด้วยสาร cuticle บริเวณรอยต่อระหว่างส่วนหัวและลำตัวจะมีรอยเว้า เรียกบริเวณนี้ว่า cervical sinus หรือ notch ไรแดงมีอวัยวะที่มีความไวต่อแสงคือ ตาประกอบ (large compound eye)

ในส่วนของตาประกอบนั้นมีเลนส์จำนวนมาก และตาประกอบจะสามารถหมุนโดยการทำงานของกล้ามเนื้อที่อยู่บริเวณนั้น ตาประกอบจะเป็นอวัยวะที่ถือเป็นจุดเด่นที่สุด เพราะขนาดของตา มีสีดำ และการเคลื่อนไหวตลอดเวลาระหว่างที่มีชีวิตอยู่

ในส่วนหัวของไรแดงจะมีหนวด 2 คู่ คือ หนวดคู่แรก (first antennae หรือ antennules) เป็นส่วนที่มีขนรับความรู้สึก (sense-hairs) และหนวดคู่ที่สอง (second antennae หรือ antennae) เป็นอวัยวะสำคัญที่ใช้ในการเคลื่อนที่โดยใช้กล้ามเนื้อที่แข็งแรง บริเวณฐานมีขนาดใหญ่ ตรงปลายจะแยกเป็น 2 กิ่ง (biramus) กิ่งบนมี 4 ปล้อง กิ่งล่างมี 3 ปล้อง แต่ละปล้องจะมีขน (setae) จำนวนของขนที่อยู่บริเวณปล้องของไรแดง สามารถเขียนออกมาเป็นสูตรได้ตามสัดส่วนในกิ่งบนต่อกิ่งล่าง ดังนี้คือ  $\frac{0-0-1-3}{1-1-3}$  ไรแดงเป็นสัตว์ที่มี antennae ขนาดเล็ก จึงมีการเคลื่อนที่ด้วยจังหวะขึ้นลงที่รวดเร็ว ทำให้เกิดการหมุน และการเคลื่อนที่มีทิศทางไม่แน่นอน

ลำตัวของไรแดงจะหุ้มด้วยเปลือก (carapace) 2 ด้าน ซึ่งหุ้มปิดลำตัวได้ไม่มิด ขอบด้านท้องของเปลือกจะมีขนอ่อนฝังตัวอยู่ ผนังด้านในของเปลือกหุ้มจะบางกว่าด้านนอก และมีส่วนช่วยในการแลกเปลี่ยนก๊าซที่เกี่ยวข้องกับการหายใจ บริเวณด้านหลังของลำตัวจะมีหัวใจ มีลักษณะเป็นถุงรูปรี เต็มอย่างรวดเร็วและสังเกตเห็นได้ง่าย ไรแดงจะไม่มีระบบท่อลำเลียงเลือด แต่ใช้การหมุนเวียนผ่านช่องทางต่าง ๆ ที่ซับซ้อนในร่างกาย การหายใจจะเกิดขึ้นจากการแลกเปลี่ยนก๊าซบริเวณขาและผนังด้านในของเปลือกหุ้ม

อวัยวะที่อยู่ภายในเปลือกหุ้ม จะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนขา ลักษณะเป็นปล้องมีหนามแหลมจำนวนมาก และส่วนท้อง (abdomen) รวมถึงตอนท้าย (postabdomen) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกรวย ตอนปลายมี 2 แฉก (bident) ช่องทางเดินอาหารจะยาวผ่านลำตัว ด้านข้างบริเวณตรงกลางทางเดินอาหารเป็นอวัยวะสืบพันธุ์ การเคลื่อนที่ของขาทำให้เกิดมีการไหลเวียนของน้ำผ่านเปลือกหุ้ม เพื่อนำพาออกซิเจนเพื่อการหายใจและนำพาอนุภาคที่เป็นอาหาร เช่น เซลล์ของสาหร่าย ไรแดงมีนิสัยการกินอยู่ตลอดเวลา

ไรแดงที่เป็นตัวเต็มวัย จะมีลักษณะรูปร่างแตกต่างกันระหว่างไรแดงเพศผู้ (male) และไรแดงเพศเมีย (female) ดังนี้คือ

#### 2.5.1.1 ไรแดงเพศผู้

ลักษณะลำตัวยาว ขนาดเล็กประมาณ 0.5-0.7 มิลลิเมตร ส่วนหัวจะยาวโค้งไปด้านหน้ามากกว่าเพศเมีย หนวดคู่แรกมีลักษณะโค้งงอมีขนรับความรู้สึกตรงกลาง 2 เส้น และตรงปลายหนวดมีลักษณะคล้ายตะขอ (hooks) 5-6 อัน เปลือกหุ้มลำตัวค่อนข้างยาวรี

#### 2.5.1.2 ไรแดงเพศเมีย

ไรแดงเพศเมียมี 2 ลักษณะ ดังนี้คือ

- ไรแดงเพศเมียที่สืบพันธุ์ด้วยการผสมกับเพศผู้ (sexual female) มีขนาดยาว 0.9 - 1.8 มิลลิเมตร ลำตัวใหญ่หนา เปลือกมีรูปร่างค่อนข้างกลมได้สัดส่วน ผาด้านหลังจะหนา มีช่องว่างภายในเพื่อเป็นที่อยู่ของไข่ 2 ใบ เมื่อมองด้วยตาเปล่าจะเห็นการะบรจุไข่ที่มีเปลือกหนา 2 ใบ อยู่ในช่องว่างนี้ ส่วนหัวมีขนาดใหญ่หนา ด้านหน้ากลม ไข่ของไรแดงที่ผสมพันธุ์ลักษณะนี้เรียกว่า resting eggs

- ไรแดงเพศเมียที่สืบพันธุ์โดยไม่ต้องผสมกับเพศผู้ (parthenogenetic female) มีขนาดยาว 0.9-1.8 มิลลิเมตร สีเหลืองจนถึงแดงขึ้นกับปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ ถ้ามีน้อยจะมีสีแดง (สำรวย เสร็จกิจ, 2533) ลำตัวใหญ่มาก เปลือกมีรูปร่างกลมรี ส่วนหัวมีขนาดใหญ่หนา ด้านหน้ากลมมน หนวดคู่แรกมีขนาดเล็ก มีปล้องเดียว มีขนรับความรู้สึกที่ปลายและตรงกลางมี setae 1 เส้น ตัวเต็มวัยของเพศเมียมีขนาดใหญ่มาก เนื่องจากมีตัวอ่อนอยู่ใน brood chamber ซึ่งเป็นช่องว่างรูปรี อยู่ด้านหลังของลำตัว

### 2.5.2 การสืบพันธุ์

#### 2.5.2.1 การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ (sexual reproduction)

การสืบพันธุ์แบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อสภาวะไม่เหมาะสม เช่น การขาดแคลนอาหาร ประชากรหนาแน่นเกินไป สภาพอุณหภูมิต่ำกว่า 14 องศาเซลเซียส (ไซคชัย ยะชูศรี, 2536) เป็นต้น ทำให้ไข่ที่เกิด parthenogeresis มีการพัฒนาเป็นเพศผู้แทนเพศเมีย ในขณะเดียวกันไรแดงเพศเมียจะผลิตไข่ที่แตกต่างไปจากเดิม ซึ่งเรียกว่า resting egg ซึ่งไข่จะมี cytoplasm ที่มีความชุ่มและคล้ำ ส่วน carapace ที่ปิด

ส่วน brood chamber มีลักษณะหนาและทึบเพื่อให้ทนต่อสภาวะแวดล้อม จำนวนไข่จะมีจำนวนเพียง 2 ใบต่อไรแดงตัวเมีย 1 ตัว

#### 2.5.2.2 การสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ (parthenogenesis)

การสืบพันธุ์ลักษณะนี้ของเพศเมีย มีการพัฒนาการสืบพันธุ์โดยไม่ต้องอาศัยการปฏิสนธิ ซึ่งเป็น การสร้างไข่ที่เรียกว่า parthenogenetic eggs มีจำนวนหลายใบ เซลล์ไข่จะพัฒนาเป็นตัวอ่อนเจริญเติบโตเต็มที่แล้วจะว่ายน้ำออกมาจากถุงไข่ ไรแดงที่เกิดขึ้นมักจะเป็นเพศเมีย โดยมีสัดส่วนของไรแดงเพศเมียร้อยละ 95 และเพศผู้ร้อยละ 5 (สำรวจ เสร็จกิจ, 2533) ไรแดงสามารถเกิด parthenogenesis อย่างต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งหมดอายุขัยหรือสภาวะแวดล้อมไม่เหมาะสม อย่างไรก็ตามจำนวนลูกและสัดส่วนเพศของลูกที่ได้ถูกควบคุมด้วยปัจจัยสิ่งแวดล้อม จากการศึกษาของ Bellosillo ในปี 1957 (โชคชัย ยะชูศรี, 2536) พบว่า อาหารเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อสัดส่วนเพศของลูก โดยถ้าเลี้ยงตัวแม่หลาย ๆ ตัวที่ระดับความเข้มข้นของอาหารต่าง ๆ จะให้ลูกเพศผู้จำนวนมาก แต่ถ้านำตัวแม่มาแยกเลี้ยงเดี่ยวในความเข้มข้นของอาหารต่าง ๆ จะให้ลูกเพศผู้จำนวนน้อยมาก นอกจากนี้แล้ว ที่อุณหภูมิต่ำ สัดส่วนลูกเพศผู้มีจำนวนมากกว่าที่อุณหภูมิปกติ (25-30 องศาเซลเซียส) และจากการศึกษาของนันทพันธ์ (2507) ซึ่งเปรียบเทียบปัจจัยสิ่งแวดล้อม คือ อุณหภูมิ อาหาร และความหนาแน่นของประชากร พบว่าความหนาแน่นของประชากรมีผลต่อการเกิดไรแดงเพศผู้มากที่สุด

#### 2.5.3 วงจรชีวิต

ไรแดงเป็นสัตว์ที่มีวงจรชีวิตสั้นและเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยแบ่งวงจรชีวิตของไรแดงออกเป็น 3 ระยะหลัก ๆ คือ ไข่ ตัวอ่อน และ ตัวเต็มวัย เมื่อไรแดงตัวเต็มวัยสร้าง parthenogenesis eggs ขึ้น เซลล์ไข่จะแบ่งตัวทันทีจนเป็นตัวอ่อน แล้วตัวอ่อนออกจากตัวแม่จนเป็นตัวเต็มวัย และสามารถสร้าง parthenogenesis eggs ได้ ใช้เวลาประมาณ 48-56 ชั่วโมง หลังจากตัวแม่ที่ตัวอ่อนออกจาก brood chamber แล้ว จะมีการลอกคราบ 1 ครั้ง ก่อนจะสร้างเซลล์ไข่รุ่นใหม่ ระยะเวลาที่ลูกรุ่นต่อไปจะออกมาจะห่างกันประมาณ 24-30 ชั่วโมง การให้ลูกแต่ละครั้งของตัวแม่ไรแดงจะไม่เท่ากัน

#### 2.5.4 ที่อยู่อาศัยและการกินอาหาร

แหล่งน้ำธรรมชาติที่พบไรแดงอยู่มากมักจะเป็นแหล่งน้ำที่รองรับของเสียตามบ้านเรือนที่อยู่อาศัย และแหล่งน้ำที่มีพืชและพันธุ์ไม้ที่อาศัยอยู่ จึงมักเป็นแหล่งน้ำนิ่งหรือน้ำขังทั่ว ๆ ไป ไรแดงสามารถอยู่ในที่ที่มีออกซิเจนละลายอยู่ 0.5-4.2 มิลลิกรัมต่อลิตร (สันทนา ดวงสวัสดิ์, 2529) อุปนิสัยการกิน

อาหารของไรแดง พบว่า ไรแดงกินแบคทีเรียซึ่งมีทั้งแบบแท่ง (bacillus) และแบบกลม (coccus) พวกแพลงก์ตอนสัตว์ ได้แก่ โปรโตซัว และพวกแพลงก์ตอนพืช เช่น Euglena sp. และ Chlorella sp.

### 2.5.5 ศัตรูและพาราสิตของไรแดง

ศัตรูของไรแดงที่พบโดย Bellosillo (1957) คือ Cyclops ปลานชนิดต่าง ๆ และไฮดรา (hydra) สำหรับพาราสิต ได้แก่ Vorticella sp. และ Rotifer เป็นต้น ซึ่งพาราสิตจำนวนนี้จะเข้าไปยึดเกาะตามลำตัว ถ้ายึดเกาะเป็นจำนวนมากแล้วจะเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่และการกินอาหารของไรแดงได้ ไรแดงที่พบว่ามิแบคทีเรียและราอยู่ภายในตัวมากเกินไป เป็นสาเหตุที่ทำให้ไรแดงตายได้

### 2.6 การศึกษาความเป็นพิษของสารผสม

สภาพแหล่งน้ำตามธรรมชาติจะปรากฏสารพิษอยู่ด้วยกันหลายชนิด ซึ่งสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในแหล่งน้ำนั้นย่อมได้รับหรือสัมผัสกับสารพิษมากกว่าหนึ่งชนิดในเวลาเดียวกัน ดังนั้นการทดสอบสารผสมเพื่อประเมินความเป็นพิษของสารผสมว่ามีความเป็นพิษแบบพิษร่วมกับพิษเสริมฤทธิ์กัน หรือต้านฤทธิ์กัน เมื่อเปรียบเทียบกับความเป็นพิษของสารเดี่ยวแต่ละตัว

การทดลองที่มีสารพิษมากกว่าหนึ่งชนิด โดยทั่วไปเรียกว่า การศึกษาความเป็นพิษของสารผสม ซึ่งมีวิธีการและขั้นตอนการทดลองเช่นเดียวกับสารเดี่ยว มีการวิเคราะห์โดยใช้วิธีโพรบิท (probit analysis) (ดังแสดงในภาคผนวก ก) สำหรับสารผสมได้มีการกำหนดหน่วยความเข้มข้นของสารพิษแต่ละชนิด รวมทั้งสารผสม ให้อยู่ในรูปของ "หน่วยความเป็นพิษ" (Toxic Unit : TU) ซึ่งเป็นหน่วยที่แสดงถึงปริมาณของสารแต่ละชนิดเป็นกึ่งเท่าของระดับเริ่มเป็นพิษ (Sprague, 1970; Rand และ Pegtrocelli, 1985) สมการแสดงถึงหน่วยความเป็นพิษของสารเดี่ยวและสารผสม ดังแสดงในสมการ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$\text{Toxic Unit} = \frac{\text{ความเข้มข้นของสารพิษแต่ละชนิด}}{\text{ระดับเริ่มเป็นพิษของสารนั้น ๆ (ILC}_{50} \text{ หรือ LC}_{50})} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{TU}_{(A+B)} = \frac{\text{ความเข้มข้นของสาร A}}{\text{ILC}_{50} \text{ ของ A}} + \frac{\text{ความเข้มข้นของสาร B}}{\text{ILC}_{50} \text{ ของ B}} \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ  $\text{TU}_{(A+B)}$  หมายถึง ค่าความเป็นพิษของสารผสมระหว่างสาร A และสาร B



จากการทดลองส่วนใหญ่จะพบว่า ค่าความเป็นพิษในรูปมัธยฐานของระดับความเข้มข้นที่ทำให้สัตว์ทดลองตายร้อยละ 50 ภายในเวลา 48 หรือ 96 ชั่วโมง (48-h  $LC_{50}$  หรือ 96-h  $LC_{50}$ ) มักจะเท่ากับหรือใกล้เคียงกับระดับเริ่มเป็นพิษ (Sprague, 1970) จึงนิยมใช้ค่า 48-h  $LC_{50}$  หรือ 96-h  $LC_{50}$  แทนระดับเริ่มเป็นพิษที่ใช้ในการคิดคำนวณความเป็นพิษได้อีกด้วย (Brown, 1968; Brown และคณะ, 1969 ; Brown และ Dalton, 1970 ; Thorp และ Lake, 1974 ; Tsai และ McKee, 1980 อ้างถึงใน ชูชาติ ชัยรัตน์, 2528)

ลักษณะความเป็นพิษร่วมกันของสารผสม อาจเป็นอิสระซึ่งกันและกัน หรือมีอิทธิพลร่วมกันอย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งสามารถสรุปลักษณะความเป็นพิษร่วมกันของสารผสมได้ดังนี้ คือ (ชูชาติ ชัยรัตน์, 2528)

(1) พิษแบบอิสระต่อกัน (no interaction) หมายถึง ความเป็นพิษของสารละลายผสมเท่ากับ ผลของความเป็นพิษของสารใดสารหนึ่ง โดยแต่ละสารมีส่วนของการผสมในรูปของหน่วยความเป็นพิษที่เท่ากัน หรือเท่ากับความเป็นพิษของสารใดสารหนึ่งที่มีสัดส่วนในการผสมมากที่สุด

(2) พิษร่วมกันเท่ากับผลบวก (additive or strictly additive interaction) หมายถึง ความเป็นพิษของสารละลายผสมเท่ากับผลของความเป็นพิษของสารแต่ละชนิดรวมกัน

(3) พิษร่วมกันมากกว่าผลบวกหรือเสริมฤทธิ์กัน (more-than-additive or supra-additive interaction) หมายถึง ความเป็นพิษของสารละลายผสมมีมากกว่าผลของความเป็นพิษของสารแต่ละชนิดรวมกัน

(4) พิษร่วมกันต่ำกว่าผลบวก (less-than-additive or infra-additive interaction) หมายถึง ความเป็นพิษของสารละลายผสมที่มีค่าอยู่ระหว่างความเป็นพิษแบบข้อ (1) และ (2)

(5) พิษแบบต้านฤทธิ์กัน (antagonism) หมายถึง ความเป็นพิษของแต่ละสารในสารละลายผสมไปลดพิษซึ่งกันและกัน มีผลทำให้ความเป็นพิษของสารละลายผสมต่ำกว่าแบบข้อ (1)

Sprague และ Ramsay (1965) ใช้ผลจากการรวมค่า TU เพื่อประเมินค่าความเป็นพิษของสารผสม โดยแสดงความสัมพันธ์ออกมาเป็นสมการที่ 3 ดังนี้คือ (Vouk และคณะ, 1987)

$$x TU_A + y TU_B = 1 TU_{(A+B)} \quad \dots\dots\dots(3)$$

เมื่อ x หมายถึง ค่าแสดงความเป็นพิษในรูป TU ของสาร A

y หมายถึง ค่าแสดงความเป็นพิษในรูป TU ของสาร B

จากสมการที่ 3 ค่า  $x$  และ  $y$  สามารถบ่งชี้ถึงชนิดของอิทธิพลร่วมกันว่าเป็นแบบใด โดยแสดง  
ได้ดังนี้คือ

ค่าของ $x$ และ $y$	ชนิดของอิทธิพลร่วม
$x$ หรือ $y > 1.0$	ความเป็นพิษแบบต้านฤทธิ์กัน
$x$ และ $y < 1.0$ และ	
$x + y > 1$	ความเป็นพิษร่วมกันน้อยกว่าผลบวก
$x + y = 1$	ความเป็นพิษร่วมกันเท่ากับผลบวก
$x + y < 1$	ความเป็นพิษร่วมกันมากกว่าผลบวก (เสริมฤทธิ์กัน)

ในปี 1975 Marking และ Dawson ได้ปรับวิธีการแสดงผลความเป็นพิษของสารผสม เพื่อให้สามารถแสดงผลในเชิงปริมาณที่ชัดเจนมากขึ้น โดยใช้วิธีการของ Sprague และ Ramsay เป็นพื้นฐานในการคิด ซึ่งวิธีการดังกล่าวแสดงออกมาในรูปของค่า Additive Index ซึ่งมีขั้นตอนในการหาค่าดังกล่าวดังนี้คือ (Mayer และ Hamelink, 1977 ; Rand และ Petrocelli, 1985 )

(1) หาค่า Sum of biological activity (S) (คือค่าเดียวกับค่า TU ของสารผสมที่ทำให้สัตว์ทดลองตายร้อยละ 50)

$$S = \frac{A_m}{A_i} + \frac{B_m}{B_i} \dots\dots\dots(4)$$

ซึ่ง A และ B หมายถึง ชนิดของสาร A และ B  
i และ m หมายถึง ค่าความเป็นพิษ ( $LC_{50}$ ) ของสาร A และ B ในสภาพ  
สารละลายเดี่ยวและสารละลายผสม  
S หมายถึง ผลรวมของค่าความเป็นพิษของสาร A และ B

เมื่อ  $S = 1$  แสดงว่า เป็นพิษร่วมกันแบบผลบวก  
 $S > 1$  แสดงว่า เป็นพิษร่วมกันน้อยกว่าผลบวก  
 $S < 1$  แสดงว่า เป็นพิษร่วมกันมากกว่าผลบวก

(2) นำค่า S ที่ได้ ไปหาค่า Additive Index (AI) ดังนี้

$$\text{กรณีที่ค่า } S < 1 ; \text{ AI} = (1/S) - 1 \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{กรณีที่ค่า } S > 1 ; \text{ AI} = S(-1) + 1 \quad \dots\dots\dots(6)$$

ซึ่งสมการ (5) จะให้ค่ามากกว่า 0 เป็นค่าแสดงความเป็นพิษร่วมกันมากกว่าผลบวก และสมการ (6) จะให้ค่าน้อยกว่า 0 เป็นค่าแสดงความเป็นพิษร่วมกันน้อยกว่าผลบวก

ในปี 1979 Konemann ได้พัฒนาแนวทางในการคิดค่าความเป็นพิษของสารผสมขึ้นอีกลักษณะหนึ่ง โดยแสดงค่าความเป็นพิษร่วมกันของสารผสมในเชิงปริมาณเป็นค่า "mixture toxicity index" (MTI) ซึ่งมีวิธีการหาค่าดังกล่าวจากตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้คือ (Vouk และคณะ, 1987 ; Cairns, Nicderlehner และ Pratt, 1990 ; Hermens และคณะ, 1984)

$f_i$  = ความเข้มข้นของสารแต่ละตัวในสารผสม โดยแสดงเป็นค่า TU

$f_{\max}$  = ค่าความเข้มข้นของสาร ( $f_i$ ) ที่มากที่สุดที่ปรากฏในสารผสม

M = ผลรวม TU ของสารผสม

จากค่าดังกล่าว มาคำนวณค่า  $M_o$  ดังสมการ (7)

$$M_o = \frac{M}{f_{\max}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ค่าที่ได้จากการคำนวณ สามารถบ่งชี้ชนิดของอิทธิพลร่วมกันว่าเป็นลักษณะใด โดยแสดงได้ดังนี้

ค่าของ M, $M_o$ และ $f_{\max}$	ชนิดของอิทธิพลรวม
$M > M_o, f_{\max} > 1$	ความเป็นพิษแบบต้านฤทธิ์กัน
$M = M_o, f_{\max} = 1$	ความเป็นพิษเป็นอิสระต่อกัน
$M_o > M > 1, f_{\max} < 1$	ความเป็นพิษร่วมกันน้อยกว่าผลบวก
$M = 1, f_{\max} < 1$	ความเป็นพิษร่วมกันเท่ากับผลบวก
$M < 1, f_{\max} < 1$	ความเป็นพิษร่วมกันมากกว่าผลบวก

นำค่า  $M$  และ  $M_0$  ที่ได้มาหาค่า MTI จากสมการ (8)

$$MTI = \frac{\log M_0 - \log M}{\log M_0} \quad \dots\dots\dots(8)$$

ซึ่ง ค่า MTI > 1	หมายถึง	ความเป็นพิษแบบเสริมฤทธิ์กัน
MTI = 1	หมายถึง	ความเป็นพิษร่วมกันเท่ากับผลบวก
MTI = 0	หมายถึง	ความเป็นพิษเป็นอิสระต่อกัน
MTI < 0	หมายถึง	ความเป็นพิษแบบต้านฤทธิ์กัน
0 < MTI < 1	หมายถึง	ความเป็นพิษร่วมกันน้อยกว่าผลบวก

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทดสอบความเป็นพิษของสารผสมในสัตว์น้ำ ส่วนใหญ่จะทำ การทดสอบในปลาและหอย แต่ในสัตว์ขนาดเล็กที่อยู่ในระดับเดียวกับไรแดงนั้นมีน้อยมาก ซึ่งงานวิจัยโดยส่วนมากจะศึกษาในระดับพิษเฉียบพลันของสารผสม การศึกษาในระดับพิษเรื้อรังเฉียบพลันนั้นมีอยู่น้อยมาก จากการรวบรวมเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้คือ

### 2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับพิษเฉียบพลัน

Lloyd (1961) ได้ทำการทดสอบความเป็นพิษของสารผสมระหว่างซิงค์ซัลเฟต และคอปเปอร์ซัลเฟต ที่มีต่อ Rainbow trout ชนิด *Salmo gairdnerii* Richardson พบว่า ที่สภาวะน้ำกระด้างน้อย (15-10 mg CaCO<sub>3</sub>/l) ระดับของสังกะสีที่ 0.56 มิลลิกรัมต่อลิตร และทองแดง ที่ 0.046 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงผลความเป็นพิษแบบเสริมฤทธิ์กัน

Sprague (1964) ทดสอบหาระดับของทองแดง และสังกะสี ที่ทำให้ Atlantic Salmon ในวัยอ่อนตาย พบว่า ค่า Incipient lethal levels (ILL) ของทองแดง เท่ากับ 48 ไมโครกรัมต่อลิตร และสังกะสี เท่ากับ 600 ไมโครกรัมต่อลิตร สำหรับสารละลายผสมของทองแดง และสังกะสี ที่ระดับ ILL ของทั้ง 2 ตัวมารวมกันนั้น มีผลทำให้ปลาตายเร็วขึ้นเป็น 2 เท่า

Sprague และ Ramsay (1965) ทดสอบพิษเฉียบพลันของสารคู่ผสมระหว่างทองแดง และสังกะสี ที่มีต่อ juvenile Salmon (*Salmo Slar L.*) พบว่า ลักษณะความเป็นพิษของสารผสมเป็นแบบพิษร่วมกันมากกว่าผลบวก

Brown, Mitrovic และ Stark (1968) พบว่า ในสภาวะของสารผสมระหว่าง Alkyl benzene sulphonate (ABS) กับสังกะสีนั้น มีความเป็นพิษต่อ Rainbow trout ในกลุ่มที่ได้รับสัมผัสสังกะสีมาก่อน มากกว่าในกลุ่มที่ไม่เคยได้รับสัมผัสสังกะสีเลย แสดงว่า Rainbow trout ที่ได้รับสัมผัสสังกะสีมาก่อนนั้นไม่ได้ทำให้สามารถมีสภาวะทนต่อความเป็นพิษของสังกะสีที่ปรากฏพร้อมกับ ABS ได้

Eisler และ Gardner (1973) พบว่า สารผสมระหว่างทองแดง และสังกะสี ที่ศึกษาที่เวลา 96 ชั่วโมง มีผลทำให้ estuarine teleost ตายมากกว่าผลที่เกิดจากสารแต่ละตัว และความเข้มข้นของแคดเมียมที่ระดับรองเฉียบพลันมีผลในทางลบต่อการดำรงชีวิตของปลาเมื่ออยู่ร่วมกับทองแดง หรือสังกะสี หรืออยู่ร่วมกับสารทั้ง 2 ตัว

Calamari และ Marchetti (1973) ศึกษาความเป็นพิษของสารผสมระหว่างโลหะ 2 ชนิด (copper และ mercury) กับสารชักฟอง 3 ชนิด (2 ชนิดเป็นพวก anionic และ 1 ชนิดเป็น non-ionic) ที่มีต่อ rainbow trout (*Salmo Gairdneri Rich.*) เป็นเวลา 14 วัน พบว่า สารคู่ผสมระหว่างโลหะทั้งสอง กับสารชักฟองชนิด anionic แสดงความเป็นพิษร่วมกันมากกว่าผลบวกและสารคู่ผสมระหว่างโลหะทั้งสอง กับสารชักฟองชนิด non-ionic แสดงความเป็นพิษร่วมกันน้อยกว่าผลบวก

Roales และ Perlmutter (1974) ทดสอบสารเมทิลเมอร์คิวรี (methylmercury) และทองแดง ในสภาพสารเดี่ยวและสารผสมที่มีต่อปลา Blue Gourami (*Trichogaster trichopterus*) โดยสารผสมจะทดสอบโดยใช้สัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ของปรอทต่อทองแดง ดังนี้คือ 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 และ 0:100 พบว่า การเพิ่มขึ้นของทองแดงที่ 20% เป็น 60% มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การตายลดลง แสดงว่า ทองแดง สามารถจะต้านฤทธิ์ของปรอทได้

Lewis (1978) ทดสอบความเป็นพิษเฉียบพลันของทองแดง สังกะสี และแมงกานีส ในสภาพสารเดี่ยวและสารผสมที่มีต่อ juvenile logfin dace (*Agosia chrysogaster*) พบว่า สารคู่ผสมระหว่างทองแดง และสังกะสี มีความเป็นพิษมากที่สุด และแสดงความเป็นพิษร่วมกันมากกว่าผลบวก ซึ่งจะตรงข้ามกับสารคู่ผสมระหว่างทองแดง และแมงกานีส ผลของความเป็นพิษของทองแดง และสังกะสีที่มีต่อปลามีลักษณะคล้ายกัน แต่ทั้ง 2 สารมีความเป็นพิษมากกว่าแมงกานีส

Tsai และ Makee (1980) ได้ทดสอบความเป็นพิษเฉียบพลันของสารผสมของสาร chloramines, copper และ linear alkylate sulfonate ที่มีต่อ goldfish (*Carassius auratus*) พบว่า สารคู่ผสมของสารดังกล่าวที่มีสัดส่วนความเป็นพิษ 1:1 นั้น จะแสดงความเป็นพิษร่วมกับแบบผลบวก แต่ที่ สัดส่วนที่ไม่เท่ากัน เช่น 1:2 และ 2:1 มักจะแสดงความเป็นพิษร่วมกันแบบเสริมฤทธิ์กัน

Saisombat (1983) ทดสอบความเป็นพิษของสารคู่ผสมระหว่างแคดเมียม กับสังกะสีต่อ ปลาตุ๊กตอย (*Clarias macrocephalus* Gunther) พบว่า สารคู่ผสมแคดเมียมกับสังกะสีที่สัดส่วนความเป็น พิษ 1:1, 2:1 และ 1:2 นั้น แสดงความเป็นพิษร่วมกันมากกว่าผลบวกหรือเสริมฤทธิ์กัน

Rojlertjanya (1983) ทดสอบพิษเฉียบพลันของทองแดง และแคดเมียม ในสภาพสารเดี่ยว และสารผสมต่อกุ้งน้ำจืด (*Macrobrachium rosenbergii* De Man) พบว่า ความเป็นพิษของสารผสม ทองแดง และแคดเมียมที่สัดส่วนต่าง ๆ สามารถจัดลำดับได้ดังนี้คือ  $Cu:Cd (1:3) > Cu:Cd (1:1) > Cu:Cd (3:1)$  ทุกสัดส่วนแสดงความเป็นพิษร่วมกันมากกว่าผลบวกหรือเสริมฤทธิ์กัน

Hermens และคณะ (1984) ทดสอบอิทธิพลร่วมของสารมลพิษในแหล่งน้ำ 14 ชนิด ต่อการ ตายและการยับยั้งการสืบพันธุ์ของ *Daphnia magna* พบว่า อิทธิพลร่วมของสารที่มีต่อการสืบพันธุ์นั้นจะ อยู่ในระดับต่ำกว่าที่มีผลต่อการตาย ถึงแม้ระดับพิษรองเฉียบพลันของสารผสมต่ำกว่าระดับพิษเฉียบพลัน แต่ ความเป็นพิษของสารผสมที่ระดับพิษรองเฉียบพลันมีผลมากกว่าความเป็นพิษของสารแต่ละตัว

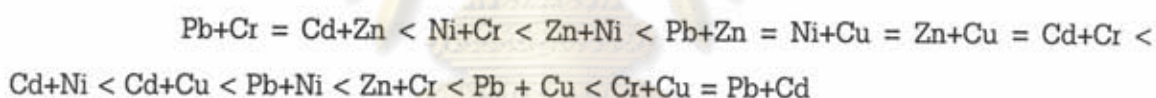
de March (1988) ทดสอบพิษเฉียบพลันของสารคู่ผสมระหว่างอออนบวก 5 ตัว คือ  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  และ  $K^+$  ต่อ Amphipod (*Gammarus lacustris* (Sars)) พบว่า คู่ผสมระหว่าง  $K^+$  หรือ  $Mg^{2+}$  ที่คู่กับ  $Cu^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  หรือ  $Zn^{2+}$  มีความเป็นพิษร่วมกันเท่ากับผลบวก คู่ผสมระหว่าง  $Cu^{2+}$  กับ  $Cd^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  กับ  $Zn^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  กับ  $Zn^{2+}$  มีความเป็นพิษร่วมกันมากกว่าผลบวก และคู่ผสมระหว่าง  $Mg^{2+}$  และ  $K$  มีความเป็นพิษร่วมกันน้อยกว่าผลบวก

Verriopoulos และ Dimas (1988) ศึกษาอิทธิพลร่วมของทองแดง แคดเมียม สังกะสี ตะกั่ว นิกเกิล และโครเมียม ที่มีต่อ copepod (*Tisbe holothuriae*) พบว่า อิทธิพลร่วมของสารแต่ละคู่ เป็นดังนี้

คู่ผสมของโลหะ	ชนิดของความเป็นพิษร่วมกัน
Cd + Cu	พิษร่วมกันมากกว่าผลบวก
Cd + Zn	พิษร่วมกันเท่ากับผลบวก
Cd + Ni	พิษร่วมกันมากกว่าผลบวก

คู่ผสมของโลหะ	ชนิดของความเป็นพิษร่วมกัน
Cd + Pb	พิษร่วมกันมากกว่าผลบวก
Cd + Cr	พิษร่วมกันมากกว่าผลบวก
Cu + Zn	พิษร่วมกันมากกว่าผลบวก
Cu + Ni	พิษร่วมกันมากกว่าผลบวก
Cu + Pb	พิษร่วมกันมากกว่าผลบวก
Cu + Cr	พิษร่วมกันมากกว่าผลบวก
Zn + Ni	พิษร่วมกันมากกว่าผลบวกและ พิษร่วมกันเท่ากับผลบวก
Zn + Pb	พิษร่วมกันมากกว่าผลบวก
Zn + Cr	พิษร่วมกันมากกว่าผลบวก
Ni + Pb	พิษร่วมกันมากกว่าผลบวก
Ni + Cr	พิษร่วมกันมากกว่าผลบวก
Pb + Cr	พิษร่วมกันเท่ากับผลบวกและ พิษร่วมกันน้อยกว่าผลบวก

เมื่อจัดลำดับความเป็นพิษของสารคู่ผสมทั้งหมดสามารถจัดลำดับได้ดังนี้คือ



Roberts, Vasseur และ Dive (1990) ศึกษาอิทธิพลร่วมของ Atrazine และทองแดงที่มีต่อสาหร่าย (*Selenastrum capricornutum*) โปรโตซัว (*Colpidium campylum*) และแบคทีเรีย (*Photobacterium phosphoricum*) พบว่า Atrazine (100 ไมโครกรัมต่อลิตร) และทองแดง (25 ไมโครกรัมต่อลิตร) ไม่มีอิทธิพลร่วมกันต่อสาหร่ายและโปรโตซัว แต่มีผลเสริมฤทธิ์กันต่อแบคทีเรีย

Enserink, Maas-Diepeveen และ Leeuwen (1991) ศึกษาอิทธิพลของโลหะหลายชนิด ได้แก่ อาเซนิก แคดเมียม โครเมียม ทองแดง ปรอท ตะกั่ว นิกเกิล และสังกะสี พบว่า สารผสมของโลหะเหล่านี้ที่ระดับที่กำหนดตามคุณภาพน้ำของ Dutch ที่ยอมให้มีได้ เมื่อนำมาทดสอบ พบว่า มีความเป็นพิษรุนแรงต่อ *Daphnia magna* และทำให้ *Salmo gairdneri* ตาย 50% ภายหลังจากทดสอบเป็นเวลา 60 วัน ระหว่างการพัฒนาจาก embryo เป็น larval ถึงแม้จะลดความเข้มข้นลงไป 5 เท่า ก็มิได้ทำให้ประชากรของ *Daphnia magna* ลดลง 10%

แวนตา ทองระอา (2525 และ 2529) พบว่า ความเป็นพิษของสารละลายผสมระหว่างสังกะสีและทองแดงที่มีต่อปลาตะเพียนขาว (*Puntius gonionotus* Bleeker) ที่สัดส่วนความเป็นพิษ 1:1 เป็นพิษร่วมกันเท่ากับผลบวก แต่ที่สัดส่วนความเป็นพิษ 2:1 และ 1:2 เป็นพิษร่วมกันมากกว่าผลบวก (เสริมฤทธิ์กัน) ขึ้นอยู่กับสัดส่วนความเป็นพิษของโลหะทั้งสอง และความเป็นพิษของสารละลายผสมระหว่างตะกั่วและแคดเมียมที่มีต่อปลากะพงขาว มีลักษณะความเป็นพิษแบบต้านฤทธิ์กัน การลดลงของสัดส่วนความเป็นพิษของโลหะทั้งสองชนิด ทำให้ความเป็นพิษลดลง และการสะสมโลหะตัวใดตัวหนึ่งในสัตว์ทดลองไม่ได้รับอิทธิพลจากโลหะอีกชนิดหนึ่ง

ชูชาติ ชัยรัตน์ (2528) พบว่า อิทธิพลร่วมระหว่างปรอทและตะกั่วที่มีต่อปลากะพงขาว ที่สัดส่วน 1:1 มีลักษณะความเป็นพิษของสารผสมเป็นแบบร่วมกันเท่ากับผลบวก แต่ที่สัดส่วน 1:2 และ 2:1 มีลักษณะความเป็นพิษร่วมกันน้อยกว่าผลบวก

### 2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพิษรองเฉียบพลัน

Saunders และ Sprague (1967) ศึกษาผลกระทบของทองแดง และสังกะสีที่มีต่อการอพยพเพื่อการวางไข่ของ Atlantic Salmon พบว่า ที่ระดับสารผสม 0.35 - 0.43 TU มีผลทำให้ Salmon ระยะตัวเต็มวัยตอบสนองโดยการหลบหนี และที่ระดับสารผสม 0.3 TU มีผลทำให้หยุดการอพยพไปเหนือลำน้ำเพื่อวางไข่

Eaton (1973) ศึกษาพิษรองเฉียบพลันของสารผสมระหว่างทองแดง แคดเมียม และสังกะสี โดยใช้ระดับเดียวกับค่าของพิษรองเฉียบพลันของสารแต่ละตัวมาผสมกัน เมื่อพิจารณาความเป็นพิษพบว่า ทองแดง มีความเป็นพิษสูงขึ้น แต่แคดเมียมจะมีค่าลดลง และ สังกะสีมีค่าใกล้เคียงกับระดับพิษรองเฉียบพลันของสารตัวเดียว

Spehar, Leonard และ DeFoe (1978) ทดสอบพิษรองเฉียบพลันของสารผสมของแคดเมียม และสังกะสีต่อ Flagfish (*Jordanella floridae*) พบว่า การรอดชีวิตของ larvae ที่ทดสอบตั้งแต่เป็น embryo นั้นลดลงในการทดสอบสารเดี่ยว ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกันนั้นผสมกัน การรอดชีวิตนั้นไม่ลดลง แสดงว่า ที่ความเข้มข้นนี้ของสารคู่ผสมมีความเป็นพิษแบบต้านฤทธิ์กัน นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการสืบพันธุ์ลดลง (จำนวนปลาและการผลิตเซลล์ embryo) มากกว่าสารเดี่ยว