บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารเกี่ยวกับสาหร่ายทะเล

สาหร่ายทะเล (seaweeds) เป็นสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่บริเวณชายฝั่งตั้งแต่เขตน้ำขึ้นน้ำลงจนถึงที่ลึกที่มีแสงส่องถึง เป็นพวกที่ไม่มีราก ลำต้นและใบที่แท้จริง ประกอบด้วยทัลลัส (thallus) ที่เปลี่ยนแปลงไปทำ หน้าที่คล้ายราก (hold fast) ลำต้น (stipe) และใบ (blade) นอกจากนี้ยังมีทุ่นลอย (pneumatocysts) ซึ่งภายในมีก๊าซบรรจุอยู่ เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ช่วยในการลอยตัวให้อยู่ที่ผิวน้ำได้ สาหร่ายทะเลที่ศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วยสาหร่ายในกลุ่มต่อไปนี้

1. สาหร่ายสีเขียว (green algae) จัดอยู่ในดิวิชั่น คลอโรไฟตา (Division Chlorophyta) ส่วนใหญ่อาศัยอยู่ในน้ำจืด มีเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ที่อาศัยอยู่ในทะเล มีรงควัตถุที่สำคัญคือ คลอโรฟิลล์ เอ และบี (chlorophyll a, b) ที่ทำให้มองเห็นเป็นสีเขียวอย่างชัดเจน และมีอาหารสะสมเหมือนกับพืชชั้นสูง พบในเขตน้ำตื้นบริเวณชายฝั่งโดยเฉพาะพวกที่มีลักษณะเป็นสาย มักเกาะอยู่บนก้อนหินหรือบนสาหร่ายชนิดอื่นหรือในแอ่งน้ำ สาหร่ายในดิวิชั่นนี้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความเค็มได้ดี (กาญจนภาชน์ ลิ่วมโนมนต์, 2527, หน้า 118)

สาหร่ายสีเขียวในดิวิชั่น คลอโรไฟตา มีเพียง Class เดียวเท่านั้นคือ Class Chlorophyceae แต่เดิมอยู่ใน Order Ulotrichales ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของเซลล์ (cell)เป็นแบบเดียวกัน ต่างกันที่วัฏจักรชีวิต เซลล์มีคลอโรพลาสต์ (chloroplast) เป็นแถบข้างเซลล์ ไพรีนอยด์ (pyrenoid) กระจายอยู่บนคลอโรพลาสต์ แต่ละเซลล์มีนิวเคลียส (nucleus) เพียง 1 นิวเคลียส สืบพันธุ์โดยการสร้างซูโอสปอร์ (zoospore) ที่มีหนวด 2 หรือ 4 เส้น และแกมีต (gamete) มีหนวด 2 เส้น การรวมของแกมีตเป็นแบบไอโซแกมี (isogamy) แอนไอโซแกมี (anisogamy) หรือโอโอแกมี (oogamy) วัฏจักรชีวิตมีทั้งแบบแฮพลอนติก (haplontic type) และแบบดิโพลแฮพลอนติก (diplohaplontic type) ซึ่งมีทั้งแบบ 2 เจเนอเรชั่น (generation) มีรูปร่างลักษณะเหมือนกัน และแตกต่างกันในบางชนิด อาจไม่มีการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ (กาญจนภาณ์ ลิ่วมโนมนต์, 2527, หน้า 118)

สาหร่ายทะเลสกุล *Enteromorpha* เป็นสาหร่ายสีเขียวชนิดหนึ่ง สามารถจัดอนุกรมวิธานได้ดังนี้

Division Chlorophyta

Class Chlorophyceae

Order Ulvales

Family Ulvaceae

Genus *Enteromorpha*

สาหร่ายทะเลสกุล *Enteromorpha* มีลักษณะที่สำคัญคือ ทัลลัสเป็นหลอดกลวง มีความหนา 1 ชั้นของเซลล์ บางชนิดทัลลัสเรียบ บางชนิดหงิกงอ มีส่วนรากทำหน้าที่ยึดเกาะ แต่ในบางชนิดเมื่อแก่อาจหลุดลอยขึ้นมาที่ผิวหน้าน้ำ และลอยอยู่เป็นอิสระ เมื่องอกเป็นต้นใหม่ ๆ มีลักษณะเป็นเส้นสายที่เซลล์เรียงต่อกันแถวเดียว (uniseriate) เมื่อมีการแบ่งเซลล์จะได้เส้นสายมีเซลล์หลายแถว (pluriseriate) และมีความหนา 2 ชั้นของเซลล์ ซึ่งต่อมาเซลล์ทั้ง 2 ชั้นนี้จะแยกออกจากกัน จึงเกิดเป็นหลอดกลวงตรงกลาง บางชนิดมีวัฏจักรชีวิตแบบไอโซมอร์ฟิกดิโพลแฮพลอนติก (isomorphic diplohaplontic type) โดยต้นสปอโรไฟต์ (sporophyte) สร้างซูโอสปอร์ที่มีหนวด 4 เส้น และแกมีตมีหนวด 2 เส้น บางชนิดมีเฉพาะการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ โดยสร้างซูโอสปอร์ที่มีหนวด 2 หรือ 4 เส้น สำหรับแกมีตที่ไม่ได้ผสมกัน อาจไปงอกเป็นต้นแกมีโตไฟต์ (gametophyte) ได้ใหม่ (กาญจนภาชน์ ลิ่วมโนมนต์, 2527, หน้า 115-118)

2. สาหร่ายสีน้ำตาล (brown algae) จัดอยู่ในดิวิชั่น ฟีโอไฟตา (Division Phaeophyta) เจริญอยู่ตั้งแต่ชายฝั่งทะเลจนถึงบริเวณที่ลึกประมาณ 100 เมตร ขึ้นกับปริมาณที่แสงส่องลงไปได้ลึกมากน้อยเพียงใด สีของสาหร่ายสีน้ำตาลมีสีต่างกันตั้งแต่สีเขียวมะกอกจนถึงสีน้ำตาลดำ ขึ้นอยู่กับรงควัตถุ โดยเฉพาะฟูโคแซนทิน (fucoxanthin) ซึ่งเป็นรงควัตถุที่มีมากที่สุดในสาหร่ายกลุ่มนี้ และมีคลอโรฟิลล์เอ และซี ส่วนอาหารสะสมเป็นพวกลามินาริน (laminarin) ซึ่งเป็นโพลีแซคคาไรด์ (polysaccharide) ผนังเซลล์เป็นกรดแอลจินิค (alginic acid) ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ละลายน้ำ สาหร่ายสีน้ำตาลส่วนใหญ่มีขนาดที่มองเห็นด้วยตาเปล่า ไม่พบเซลล์เดี่ยว ๆ พบในเขตอบอุ่นและเขตหนาว ในเขตที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำลงต่ำสุด ตัวอย่างของสาหร่ายสีน้ำตาล ได้แก่ สาหร่ายทะเลสกุล *Padina* และสาหร่ายทะเลสกุล *Sargassum* (กาญจนภาชน์ ลิ่วมโนมนต์, 2527, หน้า 188-193)

สาหร่ายทะเลสกุล *Padina* เป็นสาหร่ายสีน้ำตาลอีกชนิดหนึ่ง สามารถจัดอนุกรมวิธานได้ดังนี้

Division Phaeophyta

Class Heterogeneratae

Order Dictyosiphonales

Family Dictyotaceae

Genus *Padina*

Padina Adanson มีชื่อเรียกว่า "เห็ดหิน หรือ เห็ดหูหนูทะเล" เป็นสาหร่ายสีน้ำตาลที่พบในเขตร้อน และเขตอบอุ่นทั่วโลก โดยมีลักษณะเป็นแผ่นแบนบางแผ่ออกเหมือนรูปพัด มีความหนาตั้งแต่ 1-8 เซลล์ ขอบของทัลลัสม้วนลงด้านล่าง รากมีลักษณะเป็นรูปถ้วย ที่ผิวด้านบนหรือทั้งด้านบนและด้านล่าง อาจมีหินปูนเคลือบติดอยู่ บนทัลลัสมีขนเรียงเป็นแถบโค้งขนานกับขอบ เรียก แถวขน (hair line) มีหลายเส้นขนานกัน

สาหร่ายสกุลนี้มีจุดเจริญอยู่ที่เซลล์ยอด ซึ่งเป็นแถวยาวตลอดขอบ ทำให้ส่วนนี้เจริญเร็วกว่าเซลล์ตอนล่าง ดังนั้นขอบของทัลลัสในบางชนิด จึงมีรอยพับ หรือฉีกขาด

การสืบพันธุ์ ส่วนใหญ่ต้นแยกเพศกัน แต่มีบางชนิดที่มี 2 เพศอยู่บนต้นเดียวกัน บางชนิดขึ้นในน้ำตื้นจะมี 2 เพศรวมกัน หากขึ้นในน้ำลึก จะแยกเพศกัน อวัยวะสืบพันธุ์ เกิดเป็นกลุ่ม ๆ ระหว่างแถวขน บางชนิดอาจมีเยื่อบาง ๆ เรียก อินดูเซียม (indusium) คลุมซอรัส (sorus) อยู่ ลักษณะของต้นแกมีโตไฟต์ และสปอร์โรไฟต์มีรูปร่างเหมือนกันทุกประการ

สาหร่ายทะเลสกุล *Sargassum* เป็นสาหร่ายสีน้ำตาลอีกชนิดหนึ่ง เป็นสาหร่ายที่มีการแพร่กระจายสูง พบทั่วทุกแห่งในเขตร้อนและเขตอบอุ่น เป็นสกุลใหญ่มีทั้งหมดประมาณ 150 ชนิด สามารถจัดอนุกรมวิธาน ได้ดังนี้

Division phaeophyta

Class Cyclosporeae

Order Fucales

Family Sargassaceae

Genus *Sargassum*

สาหร่ายทะเลสกุล *Sargassum* มีชื่อสามัญว่า "gulf weed" และมีชื่อไทยว่า สาหร่ายใบ หรือสาหร่ายทุ่น มีลักษณะที่สำคัญคือทัลลัสเหมือนพืชชั้นสูง มีส่วนที่เป็นรากสำหรับยึดเกาะ ต้นตั้งตรง มีแกนกลาง (central stauk) บางชนิดแตกแขนงได้มากจนเป็นพุ่ม แกนของต้นมีลักษณะกลมหรือแบน เบลดมีลักษณะเหมือนใบไม้ ขอบใบมีจักแหลม และมีแกนกลางใบ โคนใบมีถุงลมเล็ก ๆ ช่วยให้ลอยอยู่ในน้ำได้เมื่อหลุดออกจากที่ยึดเกาะ มีอายุนานประมาณ 2-3 ปี เมื่อถึงระยะสืบพันธุ์ จะสร้างรีเซปตาเคิลเป็นกระจุกที่ปลายยอดหรือปลายแขนง สาหร่ายสกุลนี้ ตามปกติขึ้นยึดเกาะกับพื้น (attached form) มีบางชนิดอาจขาดลอยเป็นชนิดลอยน้ำ (pelagic form) ได้ ซึ่งสามารถเจริญเติบโตและขยายพันธุ์โดยการขาดท่อน แต่ไม่สามารถสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศได้ (กาญจนภาชน์ ลิ่วมโนมนต์, 2527, หน้า 206-207)

3. สาหร่ายสีแดง (red algae) จัดอยู่ในดิวิชั่น โรโดไฟตา (Division Rhodophyta) เป็นสาหร่ายที่มีจำนวนชนิดมากกว่าสาหร่ายสีเขียว และสาหร่ายสีน้ำตาลรวมกัน พบตั้งแต่ชายฝั่ง

ถึงจนถึงบริเวณที่ลึกมีแสงส่องถึง และมีขนาดตั้งแต่เล็กซึ่งมักพบในเขตร้อน จนถึงขนาดใหญ่มักพบในเขตหนาว การที่สาหร่ายชนิดนี้มีสีแดงเนื่องจากมีรงควัตถุสีแดง คือไฟโคอีรีทริน (phycoerythrin) แต่บางชนิดอาจมีรงควัตถุสีน้ำเงิน คือไฟโคไซยานิน (phycocyanin) ส่วนคลอโรฟิลล์มีคลอโรฟิลล์เอ และดี อาหารสะสมเป็นพวกแป้ง (starch) ผนังเซลล์เป็นเซลลูโลส(cellulose) และมีชั้นเมือกซึ่งประกอบด้วยคาร์ราจีแนน (carrageenan) หรือวุ้น (agar) หุ้มอยู่ภายนอก

ทัลลัสของสาหร่ายสีแดงไม่แตกต่างกันมากทั้งโครงสร้างและขนาด เหมือนสาหร่ายสีน้ำตาล สาหร่ายสีแดงส่วนใหญ่มีทัลลัสเป็นสาย มีทั้งความกว้างและความหนา ตลอดจนการเรียงตัวของสายก็แตกต่างกัน มักพบสาหร่ายพวกนี้อยู่กันอย่างหนาแน่นเป็นกลุ่มบนโขดหินชายฝั่ง ตัวอย่างของสาหร่ายสีแดง ได้แก่ สาหร่ายวุ้น หรือสาหร่ายผมนาง หรือสาหร่ายเขากวาง (*Gracilaria*) พวกนี้มีเจลาตินสูงนิยมนำมาสกัดวุ้นและทำเครื่องสำอางได้ (สมถวิล จริตควร, ม.ป.ป.)

สาหร่ายทะเลสกุล *Gracilaria* เป็นสาหร่ายสีแดงชนิดหนึ่ง สามารถจัดอนุกรมวิธานได้ดังนี้

Division Rhodophyta
Class Rhodophyceae
Order Gigartinales
Family Gracilariaceae
Genus *Gracilaria*

มีลักษณะที่สำคัญคือ ทัลลัสกลมหรือแบน อวบน้ำ แตกแขนงมากน้อยสุดแต่ละชนิด บางชนิดแตกแขนงมากจนเป็นพุ่มใหญ่ โครงสร้างของเซลล์ประกอบด้วย เซลล์ซูโดพาเรนไคมา (pseudoparenchyma) เซลล์ชั้นผิวมีขนาดเล็ก และในชั้นถัดไปเซลล์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น ตามลำดับ ต้นแกมีโตไฟต์ และต้นสปอโรไฟต์ มีรูปร่างลักษณะเหมือนกัน หากเป็นต้นแกมีโตไฟต์ จะสร้างซิสโตคาร์ป (cystocarp) เป็นปุ่มกลม ๆ ขนาดหัวเข็มหมุด กระจายทั่วไปบนผิวของทัลลัส และมีเส้นสายส่งอาหารแทรกอยู่ระหว่างเพอริคาร์ป (pericarp) และโกนิโมบลาสต์ ฟิลาเมนต์ (gonimoblast filament) ส่วนเตตราสปอแรนเจียม (tetrasporangium) ฝังอยู่ใต้เซลล์ชั้นผิวของทัลลัส (กาญจนภาชน์ ลิ่วมโนมนต์, 2527)

สาหร่ายสกุลนี้ มีด้วยกันทั้งสิ้นมากกว่า 150 ชนิด (Ohmi, 1958) พบขึ้นในเขตร้อนและเขตอบอุ่น นิยมใช้สกัดวุ้น (agar) สาหร่ายทะเลวกุล *Gracilaria* ส่วนมากจะขึ้นปนอยู่กับสาหร่ายชนิดอื่นโดยเฉพาะสาหร่ายทะเลสกุล *Hypnea* แล้วจะแพร่กระจายได้ดี (Richardson, 1968, pp. 357-363) และเจริญได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 26.5-31.5 องศาเซลเซียส (สมชาย สกุลทับ, 2519, หน้า 50) เจริญได้ดีในช่วงความเค็มกว้างตั้งแต่ 25-33 ppt (สมภพ อินทสุวรรณ, 2528, หน้า 91)

เอกสารเกี่ยวกับโลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีเลขอะตอมมากกว่าเหล็ก (59) หรือโลหะที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (Sorentino, 1979, pp. 149-161) จากการศึกษาของวูด (Wood, 1974, pp. 1049-1052) กล่าวว่าหลักการทางสิ่งแวดล้อมสามารถแบ่งโลหะออกเป็น 3 ชนิด คือ โลหะไม่มีพิษ โลหะมีพิษน้อย และโลหะที่มีพิษร้ายแรง และมีความเกี่ยวข้องกับมนุษย์ ตามตาราง 1

ตารางที่ 1 การจำแนกธาตุที่มีพิษและไม่มีพิษ

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

ที่มา : Wood (1974, pp. 1049-1052)

โลหะทั้ง 3 ชนิดนี้ ได้แก่ เหล็ก (Fe) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) เป็นธาตุหลักที่สำคัญและพบได้บ่อย ๆ ธาตุต่าง ๆ เหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญของสาหร่าย ส่วนความเข้มข้นของโลหะหนักปริมาณน้อย แต่ความเป็นพิษมีมากจะทำให้สาหร่ายเจริญได้น้อย เช่น ปรอท (Hg) ตะกั่ว (Pb) ซึ่งเป็นธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย ปริมาณความเข้มข้นเพียงเล็กน้อย (10—50 µgL-1) ทำให้เป็นพิษต่อสาหร่ายได้ (Perkins, 1979, pp. 425-442)

การสะสมโลหะหนัก

มอริสและเบลล์; ไอด์และคณะ (Morris & Bale, 1975; Eide et al., 1980) กล่าวว่าโลหะหนักเข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายทะเลได้ 2 แบบ คือ การแพร่อย่างช้า ๆ และการแพร่อย่างรวดเร็ว เช่น ตะกั่ว ถูกดูดซับเข้าทางผนังเซลล์ ผ่านพลาสมาเลมมา (plasmalemma) ไปยังไซโทพลาซึม (cytoplasm) โดยไม่มีตัวพา (carrier) ทำให้การแพร่เข้าสู่เซลล์ช้าลง ไอด์และคณะ (Eide et al., 1980) กล่าวว่าโลหะอื่น ๆ เช่น สังกะสี และแคดเมียม (Cd) แพร่ผ่านเข้าสู่ภายในเซลล์อย่างรวดเร็ว จำเป็นต้องอาศัยพลังงานช่วยในการแพร่เข้าสู่เซลล์

มอริสและเบล, ฟิลลิปส์ (Morris & Bale, 1975; Phillips, 1977) กล่าวว่า ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำทะเลบริเวณที่มีการปนเปื้อนของสารโลหะหนักเหล่านี้ เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของโลหะหนักในสาหร่ายทะเล โดยเฉพาะในสาหร่ายสีน้ำตาล เป็นสาหร่ายที่สามารถบ่งบอกถึงความเป็นพิษของโลหะหนักในบริเวณนั้น ๆ ได้ดี

ลัวมาและคณะ (Luoma et al., 1982) กล่าวว่า เหตุผลในการเลือกสาหร่ายเป็นตัวบ่งชี้การปนเปื้อนของโลหะหนัก ส่วนแรกคือ ระดับความเข้มข้นของโลหะหนักที่อยู่ในรูปของสารละลายสามารถแพร่กระจายไปโดยไม่มีขอบเขต และเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาได้ ส่วนที่สองคือ สาหร่ายทะเลสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีด้วยกระบวนการทางธรรมชาติทำให้ปริมาณโลหะหนักในน้ำทะเลลดน้อยลงหรือเจือจาง ส่วนที่สามคือ สาหร่ายทะเลไม่สามารถสะสมโลหะหนักได้ในรูปอื่น นอกจากในรูปของสารละลายเท่านั้น แต่ในสัตว์สามารถสะสมในรูปอื่น ๆ ได้

ไรซ์และลาพอยท์ (Rice & LaPointe, 1981) กล่าวว่า สาเหตุอื่น ๆ ที่มีผลต่อการสะสมโลหะหนักในสาหร่ายทะเล ได้แก่ แสงและธาตุไนโตรเจน เช่น ในสาหร่าย *Ulva fasciata* แสงและธาตุไตรเจนมีผลต่อการสะสมโลหะหนัก เหล็ก แมงกานีส สังกะสี และแคดเมียม

ไบรอัน และฮัมเมอร์สโตน (Bryan & Hummerstone, 1973) กล่าวว่า อายุของสาหร่ายทะเลยิ่งมีอายุมากการสะสมโลหะหนักจะมากด้วย นอกจากนี้ ตำแหน่งของสาหร่ายที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเล มีการสะสมโลหะหนักมากกว่าบริเวณที่อยู่ห่างชายฝั่งทะเล ส่วน เบอร์ดอน-โจนและคณะ (Burdon-Jones, et al., 1982) กล่าวว่า ฤดูกาลมีผลต่อการสะสมโลหะหนักและไบรอัน (Bryan, 1969) กล่าวว่า การไหลเวียนของกระแสน้ำเป็นเหตุที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนได้

ความเป็นพิษของโลหะหนัก

โลหะหนักบางชนิด เช่น ตะกั่ว มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตร้ายแรงมากแต่จากปริมาณที่มีอยู่ในธรรมชาติและอัตราการหมุนเวียนที่เกิดขึ้นในภาวะปกติจึงทำให้โอกาสเกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตน้อยมาก ยกเว้น สิ่งมีชีวิตที่อยู่ในบริเวณที่มีโลหะหนักในปริมาณที่สูงมาก เช่น อยู่ใกล้โรงงานอุตสาหกรรม โอกาสที่จะได้รับสารโลหะหนักย่อมมีมากขึ้น โลหะหนักแต่ละชนิดทำให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตแตกต่างกันไปหลายแบบ บางชนิดมีพิษร้ายแรงมากแม้จะมีระดับความเข้มข้นต่ำ เช่น ปรอท และแคดเมียม บางชนิดแม้จะเป็นองค์ประกอบที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตและเมตาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิตอยู่แล้ว เช่น ทองแดง สังกะสี เหล็ก แต่ถ้าร่างกายได้รับในปริมาณสูงเกินความต้องการจะเป็นพิษต่อร่างกายได้ นอกจากนี้ความเป็นพิษยังขึ้นกับวิธีการที่สิ่งมีชีวิตได้รับเข้าสู่ร่างกายและโครงสร้างของสารประกอบโลหะหนัก (มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, 2535, หน้า 970)

ธาตุที่เป็นพิษ เช่น แคดเมียม และปรอท โลหะหนักส่วนใหญ่สามารถทำปฏิกิริยากับกำมะถันได้ดี จึงสามารถยับยั้งการทำหน้าที่ของเอนไซม์ ด้วยการสร้างพันธะกับกลุ่มของกำมะถันที่อยู่ในเอนไซม์ กลุ่มคาร์บอกซิลิก (-COOH) และกลุ่มอมิโน ($-NH_2$) ในโปรตีนก็สามารถสร้างพันธะทางเคมีกับโลหะหนักได้เช่นกัน ไอออนของแคดเมียม ทองแดง ตะกั่วและปรอท เมื่อเข้าไปสร้างพันธะทางเคมีกับสารอินทรีย์ที่เป็นเยื่อหุ้มเซลล์ จะทำให้ขบวนการขนย้ายมวลสารต่าง ๆ ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์มีประสิทธิภาพลดลง นอกจากนี้ยังเข้ารวมตัวกับสารประกอบชีวภาพฟอสเฟตจนเกิดการตกตะกอน (นัทธีรา สรรมณี, 2541, หน้า 137)

ตัวอย่างของโลหะหนัก

สังกะสี

สังกะสีเป็นธาตุในหมู่ IIB มีเลขอะตอม 30 เลขมวล 65.37 มีสีขาวแกมเทา มีความถ่วงจำเพาะ 7.14 จุดหลอมเหลว 419 องศาเซลเซียส จุดเดือด 907 องศาเซลเซียส มีความแข็งแต่เปราะ ไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ในกรดเจือจาง เช่น กรดซัลฟูริก และกรดไฮโดรคลอริกเจือจางได้ก๊าซไฮโดรเจน ปกติไม่พบสังกะสีอยู่ในรูปอิสระในธรรมชาติ พบในรูปแร่หรือสารประกอบ (Hawley, 1977, p. 940) มีสัญลักษณ์ “Zn”

สังกะสีพบได้ทั้งในสัตว์ พืช และจุลินทรีย์ ความเข้มข้นของสังกะสีขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของสังกะสีในขณะนั้น อิออนสังกะสีถูกดูดซับด้วยดินตะกอนและดิน ตามปกติแหล่งน้ำผิวดินจะมีสังกะสีน้อยกว่า 0.05 mg/l ในน้ำทะเล 0.01 mg/l (โสภาพรรณ จิรนิรัตศัย, 2534, หน้า 12)

การนำสังกะสีมาใช้ประโยชน์ เช่น ใช้เคลือบผิวโลหะชนิดอื่นที่เกิดสนิมได้ง่าย แต่มีความแข็งแรงทนทานกว่า ฉาบผิวเหล็กสำหรับงานก่อสร้างต่าง ๆ และนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการถลุงแร่สังกะสี ยาปราบศัตรูพืช อุตสาหกรรมยา สี เครื่องพิมพ์ ผ้าแรยอง กระดาษ เครื่องสำอาง และใช้สารประกอบของสังกะสีเพิ่มค่าออกเทนในน้ำมันเชื้อเพลิงแทนสารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว (สงัด อัครวนิช, 2534, หน้า 15)

การแพร่กระจายลงสู่สิ่งแวดล้อม มีการแพร่กระจายทั้งในอากาศ ลงสู่ดิน และแหล่งน้ำ การชะล้างของน้ำฝนจากบ้านที่มุงหลังคาด้วยโลหะที่มีสังกะสีเคลือบ ในปี 2534 พบว่ามีสังกะสีในแม่น้ำแม่กลอง 70.26 mg/l (โสภาพรรณ จิรนิรัติศัย, 2534, หน้า 16) จากการศึกษาของ สงัด อัครวนิช (2534, หน้า 15) ในลุ่มน้ำป่าลักพบปริมาณสังกะสี 58.91-105.49 mg/l

ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต สังกะสีเป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิต แต่ในปริมาณที่ไม่มากนัก เช่น เป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ เช่น carbonic anhydrase, alcohol dehydrogenase สังกะสีเข้าสู่ร่างกายโดยปนมากับอาหาร และการหายใจ ความเป็นพิษของสังกะสีเกิดจากร่างกาย

ได้รับในปริมาณมากเกินไป จะมีอาการผิดปกติ เช่น ปวดท้อง วิงเวียน ช็อค และอาจตายได้ นอกจากนี้ยังมีผลต่อโครโมโซมของคน ที่ระดับความเข้มข้น 20 ppm จะทำให้โครโมโซมหัก และที่ระดับความเข้มข้น 30 ppm ทำให้การแบ่งเซลล์ผิดปกติ สังกะสีจะถูกขับออกจากร่างกายทางลำไส้ใหญ่ และทางปัสสาวะ ถ้าตรวจพบสังกะสีในปัสสาวะสูงถึง 800 mg/l แสดงว่าเกิดความผิดปกติของร่างกาย ซึ่งจะเป็นอาการของโรคไตอักเสบและโรคตับแข็ง (สงัด อัครวนิช, 2534, หน้า 16)

ทองแดง

ทองแดงเป็นธาตุในหมู่ IB ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 29 เลขมวล 63.546 เป็นโลหะสีแดง มีความถ่วงจำเพาะ 8.96 จุดหลอมเหลว 1,086 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2,595 องศาเซลเซียส นำไฟฟ้าได้ดีรองจากเงิน ทนการกัดกร่อนในอากาศได้ดีกว่าเหล็ก ทองแดงบริสุทธิ์มีความอ่อนปานกลาง ไอของทองแดงเป็นสีเขียว ปกติไม่พบในรูปอิสระ แต่พบในรูปแร่และสารประกอบ (Hawley, 1977, p. 450) มีสัญลักษณ์ "Cu"

ทองแดงในธรรมชาติ พบทั่วไปในสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติในรูปของแร่ สารประกอบของทองแดงมีหลายรูปแบบ เช่น คลอไรด์ ซัลเฟต ไนเตรต มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี ส่วนสารประกอบที่อยู่ในรูปของคาร์บอเนต ไฮดรอกไซด์ ออกไซด์และซัลไฟด์ จะไม่ละลายน้ำ (สงัด อัครวนิช, 2534, หน้า 13)

การแพร่กระจายของทองแดง ส่วนใหญ่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การถลุงแร่ การใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืช การเติมเกลือของทองแดงในแหล่งน้ำเพื่อควบคุมการเจริญเติบโตของสาหร่าย ในแหล่งน้ำธรรมชาติพบทองแดงในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการนำทองแดงมาใช้ประโยชน์ กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม (2532, หน้า 61) รายงานปริมาณของทองแดงที่ตรวจพบในแม่น้ำแม่กลองในปี 2529-2531 โดยในปี 2529 ตรวจพบ 0.175 mg/l ปี 2530 ตรวจพบ 2.8-39.5 mg/l ปี 2531 ตรวจพบ 3.6-72.0 mg/l จะเห็นได้ว่าปริมาณทองแดงที่ตรวจพบมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (มาตรฐานน้ำผิวดิน 100 mg/l)

การรับทองแดงเข้าสู่ร่างกายและโทษของทองแดง ทองแดงเข้าสู่ร่างกายโดยการปนเปื้อนในอาหารและการหายใจ การดูดซับทองแดงส่วนใหญ่เกิดที่กระเพาะอาหารแล้วสะสมไว้ที่ตับ ไต สมอง หัวใจ และผม ในคนปกติจะมีทองแดงในเลือด 1 mg/l ถ้าร่างกายได้รับทองแดงเกินความต้องการจะมีอาการอ่อนเพลีย อาเจียน ท้องร่วง เม็ดเลือดแดงถูกทำลาย เกิดอาการตับวาย มีเลือดมากในทางเดินอาหาร (โสภาพรรณ จิรนิรัติศัย, 2534, หน้า 9)

เอกสารเกี่ยวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

องอาจ ชูทอง (2522) ศึกษาปริมาณโลหะหนักในสาหร่ายทะเลบางชนิดในอ่าวไทย พบว่าระหว่างสาหร่ายสีน้ำตาลด้วยกัน คือ *Padina* และ *Dictyota* ไม่มีการสะสมโลหะชนิดใดแตกต่างกันทั้งสองฝั่งทะเลของอ่าวไทย แต่สาหร่ายสีแดงและสีน้ำตาลจะมีการสะสมโลหะหนักต่างกัน ซึ่งเป็นเพียงโลหะหนักบางชนิดเท่านั้น คือ แคดเมียม เหล็ก แมงกานีส และสังกะสี ฉะนั้นสาหร่ายทะเลต่างชนิดกันหรือต่างสกุลกันมีการสะสมโลหะหนักบางชนิดแตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของไบรอัน และฮัมเมอร์สโตน (Bryan & Hummerstone, 1973) ที่ได้ทำการศึกษาสาหร่ายสีน้ำตาล ในบริเวณย่านน้ำกร่อยทางตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศอังกฤษ เมื่อปี ค.ศ. 1969-1972 นอกจากนี้ยังพบว่า การสะสมสังกะสี ในสาหร่ายสกุล *Padina* เท่านั้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล และความสามารถในการสะสมโลหะหนักของสาหร่ายทะเลแต่ละชนิดนั้นแตกต่างกัน

สุธรรม สิทธิชัยเกษม และสุวรรณี เฉินบำรุง (2527) ศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนักในบริเวณปากแม่น้ำของอ่าวไทยตอนบน พบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะทองแดง ในน้ำทะเลมีค่าอยู่ในช่วง 14.5 — 27.1 ppb นอกจากนี้ยังพบว่าโลหะหนักทองแดงมีการสะสมในดินตะกอน และสัตว์น้ำในปริมาณที่สูง จึงเป็นสิ่งเตือนถึงอันตรายของโลหะหนักต่อสัตว์น้ำ ระบบนิเวศ และผู้บริโภคสัตว์น้ำ

เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต และวรวิทย์ ชีวาพรานาพิพัฒน์ (2531) ได้วิเคราะห์หาระดับการสะสมตัวของโลหะหนัก ได้แก่ ทองแดง และสังกะสี ในหอยแมลงภู่ ปลากระบอก และดินตะกอนบริเวณปากแม่น้ำแม่กลอง ท่าจีน เจ้าพระยาและบางปะกงพบว่าบริเวณปากแม่น้ำทั้งสี่สายมีโลหะหนักทั้ง 2 ชนิด การสะสมของโลหะทองแดงและสังกะสี มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน

แววตา ทองระอา และคณะ (2530) ทำการศึกษาคุณภาพน้ำทะเลบริเวณแหลมฉบังระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ 2529 ถึง กุมภาพันธ์ 2530 พบว่าคุณภาพของน้ำทะเลเฉลี่ยรอบปีมีผลดังนี้ อุณหภูมิมีค่าเท่ากับ 29.1 ± 1.6 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด — ด่าง มีค่าเท่ากับ 8.67 ± 0.35 ความเค็มมีค่าเท่ากับ 32.8 ± 2.1 ppt ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำมีค่าเท่ากับ 6.14 ± 0.91 mg/l

แววตา ทองระอา และคณะ (2531) ทำการสำรวจคุณภาพน้ำทะเลบริเวณแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี และบริเวณมาบตาพุด จังหวัดระยอง พบว่าคุณภาพน้ำทะเลเฉลี่ยในรอบปี 2531 มีค่าดังนี้ บริเวณแหลมฉบัง อุณหภูมิมีค่าเท่ากับ 26.6 ± 2.0 องศาเซลเซียส ความเค็มมีค่าเท่ากับ 32.5 ± 2.1 ppt ความเป็นกรด - ด่างมีค่าเท่ากับ 8.27 ± 0.16 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำทะเลมี

ค่าเท่ากับ 7.22 ± 0.69 mg/l และบริเวณมาบตาพุด อุณหภูมิมีค่าเท่ากับ 26.8 ± 2.0 องศาเซลเซียส ความเค็มมีค่าเท่ากับ 32.8 ± 2.6 ppt ความเป็นกรด – ด่างมีค่าเท่ากับ 8.29 ± 0.18 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำทะเลมีค่าเท่ากับ 7.56 ± 0.77 mg/l

แววตา ทองระอา และคณะ (2534) ได้ศึกษาคุณภาพน้ำทะเลในเขตว่ายน้ำชายหาดบางแสน หาดพัทยา และหาดจอมเทียน จังหวัดชลบุรี ในช่วงเดือนมกราคมถึงธันวาคม 2534 พบว่าคุณภาพน้ำในแต่ละหาดเป็นดังนี้ หาดบางแสน มีค่าอุณหภูมิน้ำ 27.0 – 32.0 องศาเซลเซียส ความเค็ม 17.0 – 36.0 % ความเป็นกรด-ด่าง 7.92 - 8.36 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ 5.5 – 8.8 mg/l ค่าบีโอดี 0.4 – 7.4 mg/l ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียรวม 13 – 18,000 MPN/100ml และปริมาณฟีคอลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย 8 – 2,400 MPN/100ml หาดพัทยา มีค่าอุณหภูมิน้ำ 28.0 – 32.0 องศาเซลเซียส ความเค็ม 27.0 – 35.0% ความเป็นกรด-ด่าง 7.70 – 8.45 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ 4.6 – 12.5 mg/l ค่าบีโอดี 0.3 – 8.0 mg/l ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียรวม 21 – 24,000 MPN/100ml และปริมาณฟีคอลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย 2 – 130,000 MPN/100ml ส่วนหาดจอมเทียน มีค่าอุณหภูมิน้ำ 28.0-32.0 องศาเซลเซียส ความเค็ม 30.0 – 36.0% ความเป็นกรด-ด่าง 7.75 – 8.39 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ 6.1 – 8.9 mg/l ค่าบีโอดี 0 – 8.3 mg/l ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียรวม < 2 – 2,800 MPN/100ml และปริมาณฟีคอลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย < 2 – 2,400 MPN/100ml

สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา (2537) ศึกษาคุณภาพน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออก พบว่าปริมาณโลหะหนักในทะเลบริเวณอ่าวชลบุรี รวมถึงปากแม่น้ำบางปะกง อ่าวชลบุรี อ่างศิลา และบ้านหัวเขามีค่าเฉลี่ยไม่เกินกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ได้แก่ สังกะสีมีค่าระหว่าง 0.94 – 2.31 mg/l ปริมาณโลหะหนักในน้ำทะเลบริเวณศรีราชาและบางพระ พบว่า สังกะสีมีค่าระหว่าง 0.38 – 0.50 mg/l ทองแดงมีค่าระหว่าง 0.07 – 0.10 mg/l

ประดิษฐ์ มีสุข และสัชญา เบญจกุล (2538) ศึกษาหาปริมาณโลหะหนักในสัตว์น้ำและสาหร่ายในทะเลสาบสงขลา ในเดือนธันวาคม 2538 จำนวน 24 ตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์พบว่า สังกะสี ในปลากระพงขาว มีค่าเท่ากับ 0.094 – 1.881 (μg/g) ในหอยแมลงภู่ 0 – 1.750, 2.634 – 4.573 ppm ในปูทะเล 0.311 – 0.719 ppm ในสาหร่ายผมนาง 0.072 – 6.807 ppm ตามลำดับ

สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา (2540) ได้ติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำในแม่น้ำระยอง พบปริมาณโลหะหนักทองแดง มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานแหล่งน้ำที่กำหนดไว้

ฟยูจ และเจม (Fuge & Jame, 1973) ศึกษาปริมาณ Zn Cu Fe Co และ Cd ในสาหร่าย *Fucus vesiculotus* และ *Fucus serratus* พบว่า ปริมาณโลหะหนักเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล ซึ่งจะมีปริมาณโลหะหนักในสาหร่ายทั้งสองชนิดนี้สูงในฤดูใบไม้ผลิและจะต่ำในฤดูใบไม้ร่วง นอกจากนี้ เขายังพบว่า สาหร่ายทะเลจะสะสมโลหะหนักได้โดยการดูดซึมโดยตรง ซึ่งตัวมันเองจะไม่สามารถควบคุมปริมาณความเข้มข้นของโลหะในตัวมันเองได้

คูยูคาก และโวเลสกีย์ (Kuyucak & Volesky, 1988) พบว่าสาหร่าย *Ascophyllum nodosum* สามารถดูดซับโคบอลได้ 160 มิลลิกรัมโคบอลต่อกรัมอัลจีเนตด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน และพบว่าองค์ประกอบของผนังเซลล์มีบทบาทในการจับโลหะหนักเนื่องจากมีหมู่คาร์บอกซิลิก การดูดซับโลหะหนักที่ผิวเซลล์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ขณะที่จับโลหะโคบอลเข้าไปในเซลล์เกิดได้ช้ากว่าความเข้มข้นของสารมลพิษที่สำคัญ (Fowler, 1990) เช่น ปรอท แคดเมียม ตะกั่ว PCBs และ DDT ในแหล่งน้ำทะเล ดินตะกอน และสิ่งมีชีวิตของทะเลโลก โดยปกติความเข้มข้นสูงสุด มักพบบริเวณแหล่งประชากรหนาแน่น และบริเวณแหล่งอุตสาหกรรมที่อยู่ใกล้ปากแม่น้ำสำคัญ ๆ

คริสต์ และคณะ (Crist et al., 1992) พบว่าสาหร่ายสีน้ำตาลเป็นกลุ่มที่สามารถจับของโลหะได้เนื่องจากมีองค์ประกอบของโพลีแซคคาไรด์ ซึ่งลักษณะของการจับโลหะหนักมี 2 แบบ คือ แบบรวดเร็ว ใช้เวลาน้อยกว่า 4 วินาที เป็นปฏิกิริยาที่ผิวและมีการแลกเปลี่ยนไอออนของหมู่คาร์บอกซิลิก และกรดยูโรนิค อีกแบบหนึ่งใช้เวลามากกว่า 4 วินาที เป็นการแพร่ของเข้าไปภายในผนังเซลล์

ศิริวรรณ ลาภทับทิมทอง (2544) ศึกษาหาปริมาณการสะสมของโลหะหนักบางชนิด คือ แคดเมียม ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี ในตัวอย่างหอยแครง หอยแมลงภู่ และหอยนางรม พบว่าในหอยแครงและหอยนางรม มีปริมาณโลหะหนักสะสมสูง และเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ซึ่งโลหะสังกะสีมีการสะสมในหอยทั้ง 3 ชนิด สูงสุด รองลงมาคือ ทองแดง แคดเมียม และตะกั่ว ตามลำดับ

วรรณา โกศัลวิตร (2542) พบว่าปริมาณโลหะทั้งหมดในแท่งตะกอนดินของโลหะแคดเมียม โครเมียม ทองแดง ตะกั่วและสังกะสี ค่าเฉลี่ย 1.57 3.04 7.09 16.03 และ 12.4 $\mu g/g$ ตามลำดับ โดยทองแดง (69.12%) และสังกะสี (47.57%) ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปเคลื่อนย้ายได้ง่าย (labile form) สูงสุด ซึ่งง่ายต่อการปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม เพียงมีการเปลี่ยนแปลงสภาพสิ่งแวดล้อมทั้งกายภาพและเคมี

ศุภวัตร กาญจน์อติเรกลาภ และคณะ (2542) ศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนักในสัตว์ทะเลบางชนิดบริเวณชายฝั่งตะวันออกของอ่าวไทย พบว่า ความเข้มข้นของ ทองแดง และ

สังกะสี มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง <0.01-96.80 และ 1.17-143.88 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ การสะสมของโลหะหนักในสัตว์ทะเลพบว่า สังกะสีมีการสะสมสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ ทองแดง

วรวิทย์ ชีวาพร (2541) ทำการศึกษาอัตราการสะสมของสารพิษโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมแห่งตะกอนดิน พบว่า บริเวณศรีราชา มีอัตราการสะสมตัวของโลหะหนักทองแดง (Cu) สูงสุด 6.03 $\mu g/cm^2/yr$ ส่วนบริเวณอ่างศิลา แหลมฉบัง พัทยา และมาบตาพุด มีค่าเท่ากับ 2.37 2.47 2.80 และ 1.00 $\mu g/cm^2/yr$ ตามลำดับ ส่วนอัตราการสะสมตัวของโลหะหนักสังกะสี (Zn) พบว่า ศรีราชา มีอัตราการสะสมตัวของโลหะหนักสังกะสีสูงที่สุด 19.19 $\mu g/cm^2/yr$ ส่วนอ่างศิลา แหลมฉบัง พัทยา และมาบตาพุด มีค่าดังนี้ 11.2 12.12 12.04 และ 5.06 $\mu g/cm^2/yr$ ตามลำดับ

กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ (2542) ได้ทำการตรวจวัดปริมาณโลหะหนักทองแดง และสังกะสี บริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด นิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง และบริเวณคลังน้ำมันและท่าเรือโรงกลั่นน้ำมันศรีราชา บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยาและปากแม่น้ำบางปะกง สรุปได้คือ ปริมาณโลหะหนักทองแดงและสังกะสีตรวจวัดได้ ตรวจวัดในทุกพื้นที่มีค่าไม่เกินมาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่ง ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 7 (พ.ศ. 2537) เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่ง