

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการดูดซับ (Adsorption) (นิพนธ์และคณะ, 2536)

2.1.1 รูปแบบของการดูดซับ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ยึดติดกับผิวตัวดูดซับโดยแรงแวนเดอร์วาลส์ที่อ่อน เรียกระบวนการดูดซับที่ผิวตัวดูดซับนี้ว่า การดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการแบบผันกลับได้ ส่วนกระบวนการที่ตัวดูดซับหลุดออกจากผิวตัวดูดซับ เรียกว่า Desorption นอกจากนี้ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะซ้อนกันเป็นหลายชั้นที่เรียกว่า Multilayer

2. การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกยึดติดอยู่กับผิวตัวดูดซับซึ่งเป็นของแข็งโดยพันธะเคมีที่แข็งแรงในลักษณะที่เป็นชั้นเดียว (monolayer) การดูดซับแบบนี้ไม่เป็นกระบวนการแบบผันกลับได้ คืออุณหภูมิต่ำ ๆ จะไม่เกิด desorption จะทำให้เกิด desorption ได้ต้องใช้อุณหภูมิสูง ๆ และลดความดันลงมาก ๆ

2.1.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1. สมบัติของตัวดูดซับ

พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูพรุน หากรูพรุนมีมากทำให้พื้นที่ผิวดูดซับมาก ดังนั้นความสามารถในการดูดซับก็จะมากขึ้น การดูดซับจะเกิดได้ดีเมื่อโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย หากรูพรุนมีมากแต่มีขนาดเล็ก หรือรูพรุนขนาดใหญ่ แต่ปากรูพรุนมีขนาดเล็ก ก็ไม่ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

2. สมบัติของสารที่ถูกดูดซับ

ก) ความสามารถในการละลาย สารที่มีความสามารถในการละลายสูง จะถูกดูดซับได้น้อย เพราะจะต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อนที่จะเกิดการดูดซับ ซึ่งถ้าไม่มีการทำลายพันธะก็จะไม่สามารถเกิดการดูดซับได้

ข) น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล ถ้าน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น และโมเลกุลที่มีโครงสร้างเป็นกึ่ง จะถูกดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลที่เป็นไซตรง

ค) ค่าความเป็นกรด-ด่าง การดูดซับจะขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นผิวตัวดูดซับ เช่น ถ้าพีเอชของสารละลายลดลงจะส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออนที่พื้นผิวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้การดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น

ง) อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังกับพื้นผิวของตัวดูดซับน้อยลง

2.1.3 ความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity)

ปริมาณสารที่ถูกดูดซับอยู่บนตัวดูดซับจะขึ้นกับความเข้มข้นของสารในเฟสเคลื่อนที่ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารในเฟสเคลื่อนที่ ณ อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ซอร์ปชัน ไอโซเทอร์ม (Sorption isotherm) (แม้น, 2535) สำหรับการศึกษาความสามารถในการดูดซับ เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ไปกับความเข้มข้นของสารที่ใช้ไป กับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ ณ จุดสมดุล เพื่อคัดเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุด โดยอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ซึ่งระบบดูดซับที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

1) Langmuir Isotherm

การดูดซับแบบ Langmuir เป็นพื้นฐานของการดูดซับอื่น ๆ ซึ่งมีสมมติฐานว่ามีการดูดซับสูงสุดสัมพันธ์กับโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่จัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ มีพลังงานของการดูดซับคงที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับในแนวระนาบบนพื้นผิวตัวดูดซับ

$$Q = \frac{Q_m bC}{1 + bC} \quad (1)$$

Q = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ (จำนวนโมลหรือกรัม) ต่อปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)

Q_m = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ (จำนวนโมลหรือกรัม) ต่อปริมาณตัวดูดซับ (กรัม) ที่จัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียว (monolayer) บนพื้นผิวตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล

C = ความเข้มข้นที่จุดสมดุล (mg/l หรือ M)

b = ค่าคงที่ของการดูดซับ (หน่วย ลิตร/กรัมหรือโมล) ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงาน

จัดเป็นสมการเส้นตรงจะได้

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_m} + \frac{1}{bQ_m} \cdot \frac{1}{C} \quad (2)$$

หรือ

$$\frac{C}{Q} = \frac{C}{Q_m} + \frac{1}{bQ_m} \quad (3)$$

จากสมการ (2) หรือ (3) เมื่อเขียนกราฟเส้นตรง จะสามารถคำนวณหาค่า Q_m และ b ได้

2) Freundlich Isotherm

การดูดซับแบบ Freundlich นี้เป็นการดูดซับแบบที่ตัวถูกดูดซับเรียงซ้อนกันหลายชั้น ด้วยพันธะอ่อน ๆ

$$q_e = X/M = KC^{1/n} \quad (4)$$

เมื่อ q_e = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (mg/g)

X = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ (mg)

M = ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (g)

C = ความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกดูดซับ (mg/L, M)

K = Freundlich sorption coefficient, ค่าคงที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

$1/n$ = ค่าคงที่ที่แสดงถึงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย

สมการ Freundlich เมื่อเขียนกราฟค่า X/M และ C จากการทดลอง ลงบนกราฟ $\log\text{-}\log$ จะได้ดังสมการ

$$\text{Log } q_e = \text{log } K + 1/n \text{ log } C \quad (5)$$

สามารถหาค่า K และ $1/n$ ได้โดยที่ $1/n =$ ความชันของกราฟ

$$K = \text{ค่า } X/M \text{ ที่ค่า } C = 1$$

ถ้า K และ $1/n$ มีค่าต่ำ ความสามารถในการดูดซับจะต่ำในทุกค่าความเข้มข้น แต่ถ้า $1/n$ สูงแสดงว่าความสามารถในการดูดซับนี้จะขึ้นกับความเข้มข้น เช่น หากความเข้มข้นต่ำ ความสามารถในการดูดซับจะลดลงอย่างรวดเร็ว และในทางตรงกันข้ามเมื่อความเข้มข้นสูง ความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นอย่างมาก

2.2 โลหะหนัก (Heavy metals)

โลหะหนักที่สำคัญที่จะกล่าวถึงในที่นี้ ได้แก่ ตะกั่ว ทองแดง และสารหนู

2.2.1 ตะกั่ว (Lead)

ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ตะกั่วที่เป็นธาตุอิสระในธรรมชาติมีน้อยมากส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแร่ เช่น แร่กาลีนา (Galena) แร่เซอร์ไซต์ (Cerussite) และแร่แองกลีไซต์ (Anglesite) สารประกอบตะกั่วแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ตะกั่วอนินทรีย์ (Inorganic lead) ซึ่งอยู่ในรูปเกลือและออกไซด์ (เช่น ตะกั่วคาร์บอเนต ตะกั่วโครเมต ตะกั่วออกไซด์ เป็นต้น) และตะกั่วอินทรีย์ (Organic lead) เช่น ตะกั่วเตตระเอทิล และ ตะกั่วเตตระเมทิล ซึ่งใช้ผสมในน้ำมันเบนซิน เพื่อเพิ่มค่าออกเทนของน้ำมันให้สูงขึ้น สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่วนี้ค่อนข้างมีพิษมากกว่าตะกั่วอนินทรีย์

ตะกั่วมีการนำมาใช้ประโยชน์มากมาย ได้แก่

1. ใช้ในการสังเคราะห์เตตระเอทิลเลด (Tetraethyl Lead, TEL) เป็นสารที่เติมลงในน้ำมันเบนซิน เพื่อเพิ่มเลขออกเทน (Octane Number) เมื่อเกิดการเผาไหม้ตะกั่วก็จะถูกปลดปล่อยออกมากับไอเสีย
2. ใช้ในแบตเตอรี่ ที่ใช้ทั่วไปเป็นเซลล์กัลวานิกที่ใช้โลหะตะกั่วเป็นแอโนด และออกไซด์ของโลหะตะกั่ว (PbO_2) เป็นแคโทด อุตสาหกรรมแบตเตอรี่รถยนต์จึงเป็นแหล่งที่ใช้โลหะตะกั่วเป็นปริมาณมหาศาลแหล่งหนึ่ง
3. ใช้ทำฉนวนหุ้มสายเคเบิล ฉนวนกัมมันตรังสี ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกและแก้ว
4. ใช้ทำเม็ดสี เช่น “ตะกั่วขาว” ($2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb(OH)}_2$) “ตะกั่วแดง” ($\text{Pb}_3\text{O}_4 \cdot \text{CaPbO}_4 \cdot \text{PbCrO}_4$) ถ้าเม็ดสีเหล่านี้ใช้ทำของเล่นเด็กจะเป็นอันตรายต่อเด็กมาก
5. การใช้งานอื่น ๆ ได้แก่ งานบัดกรี ทำโลหะเจือ ใช้ในการทำท่ออุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมกรวดซัลฟูริก กระสุนปืน และเคยใช้ผสมกับสีทาบ้าน เป็นต้น

ปฏิกิริยาในดิน

สินแร่ตะกั่วในธรรมชาติ เช่น กาลีนา เมื่อสลายตัวจะถูกออกซิไดซ์อย่างช้า ๆ ให้อยู่ในรูปของคาร์บอเนต หรือถูกตรึงโดยแร่ดินเหนียว ออกไซด์ของเหล็กหรืออะลูมิเนียม และอินทรีย์วัตถุโดยทั่วไปตะกั่วจะอยู่ในรูป Pb^{2+} มากกว่า Pb^{4+} และมีลักษณะคล้ายกลุ่มแอลคาไลน์เอิร์ท ดังนั้นจึงสามารถเข้าแทนที่ K , Ba ,

Sr และแม้แต่ Ca ในแร่และในตำแหน่งที่ไอออนของธาตุเหล่านี้ถูกดูดซับ ตะกั่วเป็นธาตุโลหะหนักที่เคลื่อนที่ได้น้อยที่สุด สภาพละลายได้จะลดลงอย่างมากโดยการใส่ปูน ในดินที่มีพีเอชสูง ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ ฟอสเฟต หรือคาร์บอเนต หรือเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์และความเสถียรค่อนข้างมาก การเพิ่มความเป็นกรดแก่ดินจะทำให้สภาพละลายได้ของตะกั่วเพิ่มขึ้นได้บ้าง นอกจากนี้ ปริมาณสะสมตะกั่วในดินบนสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินที่ไม่มีการไถพรวน ดังนั้น ดินที่มีตะกั่วปนเปื้อนอินทรีย์วัตถุในดินบนจึงเป็นแหล่งสะสมตะกั่วที่สำคัญ ตะกั่วอาจเกิดปฏิกิริยาแบบเมทิลเลชันได้เช่นกันซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ ทั้งแบบชีวภาพหรือเป็นปฏิกิริยาเคมี

การปนเปื้อน

การปนเปื้อนต่อสภาพแวดล้อมของตะกั่ว เกิดการปนเปื้อนจากสภาพเหตุการณ์ธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟระเบิดและจากการกระทำของมนุษย์ เช่น จากการถลุงแร่ จากควัน และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และจากไอเสียรถยนต์ ควันเป็นแหล่งแพร่กระจายตะกั่วที่สำคัญ ตะกั่วที่เป็นสารมลพิษจากควันโรงงานโรงงานส่วนใหญ่อยู่ในรูปตะกั่ว เช่น PbS , PbO , $PbSO_4$ และ $PbO \cdot PbSO_4$ ขณะที่ตะกั่วในควันจากรถยนต์อยู่ในรูปเกลือเฮไลด์ (halide salt) เช่น $PbBr$, $PbBrCl$, $Pb(OH)Br$ และ $(PbO)_2PbBr_2$ ละอองตะกั่วนี้ไม่เสถียรและจะเปลี่ยนเป็นรูปออกไซด์ คาร์บอเนต และซัลเฟต สำหรับการปนเปื้อนในดินเกิดได้จากการใช้ดินเป็นแหล่งทิ้งกากตะกอนน้ำโสโครก (sewage sludge) และอินทรีย์วัตถุเหลือใช้ต่าง ๆ เช่น มูลสัตว์ สารประกอบทางเคมี เช่น ปุ๋ย สารกำจัดศัตรูพืช และวัสดุเหลือใช้จากครัวเรือน ตัวอย่างเช่น การขุดและการถลุงแร่กาลีน่า ทำให้เกิดการปนเปื้อนวงกว้างขวาง เนื่องจากสินแร่ต่าง ๆ อาจเกิดการแทนที่ของธาตุโลหะที่มีขนาดเท่า ๆ กัน โดยกระบวนการแทนที่สรีระใกล้เคียง (isomorphous substitution) ทำให้มีการปนเปื้อนธาตุโลหะอื่นขึ้นได้ในสินแร่นั้น ๆ เช่น สามารถเกิดได้กับสินแร่ซัลไฟด์โดยอาจเกิดได้ทั้งกับตัวโลหะเองและกับซัลเฟอร์แอนไอออน ตัวอย่างเช่น สินแร่กาลีนาก็อาจมีเงิน (silver) ผสมอยู่หลายเปอร์เซ็นต์ ในแร่สฟาเลอไรต์ (Sphalerite, ZnS) ก็อาจมีแคดเมียมผสมอยู่มาก ส่วนปรอทสามารถปนอยู่ได้ทั้งสินแร่ตะกั่วและสินแร่สังกะสี ดังนั้นการขุดและการถลุงแร่จึงมีการปนเปื้อนไม่เฉพาะจากธาตุที่ต้องการถลุงเท่านั้น แต่ยังปนเปื้อนจากธาตุที่ปนเปื้อนอยู่ในสินแร่นั้นอีกด้วย สำหรับตะกั่วในดิน ภายหลังจากการปนเปื้อน ดินที่มีลักษณะเป็นที่ลุ่มจะฟื้นตัวจากการปนเปื้อนด้วยการทับถมของตะกอนดินใหม่ ทำให้ชั้นดินที่มีการปนเปื้อนอยู่ล่างลึกลงไป ซึ่งกระบวนการทับถมเช่นนี้ ใช้เวลานานนับร้อย ๆ ปี ในกรณีที่เกิดการปนเปื้อนในดินที่มีลักษณะเป็นที่ราบสูง การเคลื่อนย้ายของตะกั่วในดินลงสู่ชั้นล่างเป็นไปอย่างช้ามาก เนื่องจากสารประกอบของตะกั่วจะสะสมอยู่บนดินชั้นบนสารเหล่านี้มีสภาพละลายได้ต่ำมาก และคงทนต่อการสลายตัวด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ จึงยังคงอยู่ในดินได้นาน เช่น ถ้าต้องการให้ตะกั่วในดินลดลง 10% ในกรณีที่ดินมีการปนเปื้อนจะต้องใช้เวลาถึง 90 ถึง 200 ปี

ผลต่อสภาพแวดล้อม

ตะกั่วเข้าสู่พืชได้ 2 ทาง คือ ทางรากและทางใบ เมื่อเข้าสู่พืชแล้วจะสะสมอยู่ที่เยื่อหุ้มเซลล์ ไมโทคอนเดรีย และคลอโรพลาสม ตะกั่วที่เข้าทางราก ส่วนใหญ่จะสะสมอยู่ที่รากฝอยและรากขนาดเล็ก พืชของตะกั่วในพืชเกิดขึ้นโดยการยับยั้งการเปลี่ยนแปลงของพลาสมิด ยับยั้งการออกซิไดซ์ของออกซิเจนใน

กระบวนการหายใจที่ไม่โตคอนเดรีย มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง ยับยั้งการเจริญเติบโตของราก และใบ และยืดเวลาการงอกของเมล็ด ตะกั่วในดินแทบทั้งหมดอยู่ในรูปที่พืชดูดกินไม่ได้ ตะกั่วในปริมาณเพียง 0.003 ถึง 0.005 % ของปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดินเท่านั้นที่พืชดูดกินได้ นอกจากนั้นการย้ายตำแหน่งของตะกั่วจากรากไปยังส่วนของใบพืชก็เกิดขึ้นได้น้อยมาก คือย้ายตำแหน่งได้เพียงประมาณ 3 % เท่านั้น ระดับปกติของตะกั่วในพืชคือ 0.5 – 3 ppm ส่วนระดับเป็นพิษในพืชนั้นขึ้นกับพืชแต่ละชนิดที่ทนต่อสารตะกั่วได้ไม่เท่ากัน และระดับความเป็นพิษของตะกั่วในพืชชนิดหนึ่ง ๆ ยังขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยที่พืชที่ขึ้นในดินที่มีธาตุอาหารครบสามารถทนต่อระดับตะกั่วในปริมาณที่สูงกว่าเมื่อปลูกในดินที่ขาดธาตุอาหาร ดังนั้นการปนเปื้อนของตะกั่วสู่สัตว์เลี้ยงจึงมิใช่โดยการที่สัตว์ได้จากการกินตะกั่วในพืช แต่โดยการกินพืช (เช่น ใบหญ้า) ที่มีละอองผงตะกั่วจากไอเสียดาอยู่บนผิวใบและลำต้นเป็นส่วนใหญ่

แหล่งของการปนเปื้อนที่สำคัญสู่คนและสัตว์อีกแหล่งก็คือ อาหารที่ได้จากพืชพรรณที่ปลูกบนดินที่ปนเปื้อนด้วยตะกั่ว ดินสภาพปกติจะมีตะกั่วที่ละลายได้อยู่ประมาณ 1 ppm แต่พืชมักจะไม่ได้แสดงอาการเป็นพิษจากตะกั่วแม้จะมีตะกั่วในเนื้อเยื่อสูงถึง 50 ppm ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งโดยทั่วไปพืชอาจมีตะกั่วในระดับปกติเพียง 1 ppm จึงนับเป็นอันตรายต่อคนและสัตว์เป็นอย่างมาก

ภาวะมลพิษของตะกั่วมีผลต่อกิจกรรมจุลินทรีย์ในดิน โดยการจำกัดการทำงานของเอนไซม์ทำให้การสลายของอินทรีย์วัตถุเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอินทรีย์สารที่สลายตัวได้ยาก เช่น เซลลูโลส นอกจากนั้น อาจมีผลทำให้ไนโตรเจนในดินสะสมในรูปไนเตรท ซึ่งผลกระทบดังกล่าว ผู้บริโภคในธรรมชาติเช่น ไม้เดือนดินจะสะสมตะกั่วได้มากขึ้นจากการกินดินที่ปนเปื้อนตะกั่วเข้าไป

พิษของตะกั่ว

ตะกั่วที่มนุษย์ได้รับจากสิ่งแวดล้อมประมาณ 20 – 50% ผ่านทางอากาศ สำหรับตะกั่วที่มนุษย์ได้รับทางน้ำและอาหาร ในผู้ใหญ่จะดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดได้เพียง 10% แต่ในเด็กจะดูดซึมได้สูงถึง 40-50% ตะกั่วจึงเป็นพิษในเด็กได้มากกว่าผู้ใหญ่ ตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายจะกระจายไปอยู่ที่อวัยวะต่าง ๆ เช่น สมอง ปอด ตับ ม้าม และมากที่สุดที่กระดูก โดยจะอยู่ในร่างกายได้นานถึง 16-27 ปี ตัวอย่างของโรคพิษตะกั่วในมนุษย์มีดังนี้ (กองจัดการสารอันตรายและกากของเสียกรมควบคุมมลพิษ, 2541)

1) ระบบเลือด ตะกั่วจะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ในการสร้างเม็ดเลือดแดงที่ไขกระดูกทำให้ในร่างกายมีเม็ดเลือดน้อย เม็ดเลือดแดงผิดปกติและแตกง่าย เลือดจาง ทำให้ผู้ป่วยมีอาการซีด อ่อนเพลียง่าย เป็นลมหรือมีอาการเวียนง่าย

2) ระบบประสาท ตะกั่วเป็นพิษต่อเซลล์ประสาท ทำให้เนื้อสมองบวม ยับยั้งการทำงานของสารเคมีในสมองและทำลายเยื่อหุ้มปลายประสาท ผู้ป่วยมีอาการปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน อาจมีอาการชัก เดินเซ ความคุมการทรงตัวไม่ดี นอนไม่ค่อยหลับ ปวดหัวเรื้อรัง ชา อารมณ์แปรปรวน วิปริต งุนงง เชื่องช้า ความจำเสื่อม คิดช้า ในเด็กเล็กอาจพัฒนาการทางสมองช้ากว่าปกติ

3) ไต ในรายที่มีอาการรุนแรงเฉียบพลันท่อไตส่วนต้นจะถูกทำลาย ในรายที่เป็นเรื้อรังอาจเกิดภาวะไตวาย และไตพิการ

- 4) ระบบสืบพันธุ์ อสุจิเพศชายและไข่ของเพศหญิงผิดปกติ ทำให้ผู้ป่วยด้วยโรคพิษตะกั่วเรื้อรัง เป็นหมัน มีความผิดปกติของประจำเดือน รวมถึงอาการอื่น ๆ ของระบบสืบพันธุ์
- 5) กระเพาะและลำไส้ เมื่อได้รับพิษตะกั่ว จะทำให้ปวดท้องอย่างรุนแรง อุจจาระมีเลือดปน เมื่อมีอาการมากจะมีความรู้สึกมีรสโลหะในปาก

2.2.2 ทองแดง (Copper)

โลหะทองแดงพบทั้งรูปอิสระในธรรมชาติและในรูปสารประกอบร่วมกับธาตุอื่น ๆ มีการนำทองแดงไปใช้ประโยชน์หลายด้าน ได้แก่ ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง การผลิตท่อ น้ำ ถังน้ำ ขดลวด กัดมัน้ำ การทำเส้นลวดไฟฟ้า วงจรไฟฟ้าและเครื่องมือไฟฟ้าต่าง ๆ และ ในการเคลือบผิวโลหะ เป็นต้น

ทองแดงเป็นธาตุที่ร่างกายต้องการในปริมาณเล็กน้อย (essential trace element) โดยจำเป็นสำหรับกระบวนการเผาผลาญอาหาร และเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์บางชนิดในร่างกาย ดังนั้นทองแดงในปริมาณน้อยจะไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษ แต่ถ้ามีปริมาณมาก จะให้โทษและเป็นพิษต่อพืช สัตว์ร้าย รวมถึงคนได้ (Manahan, 1994)

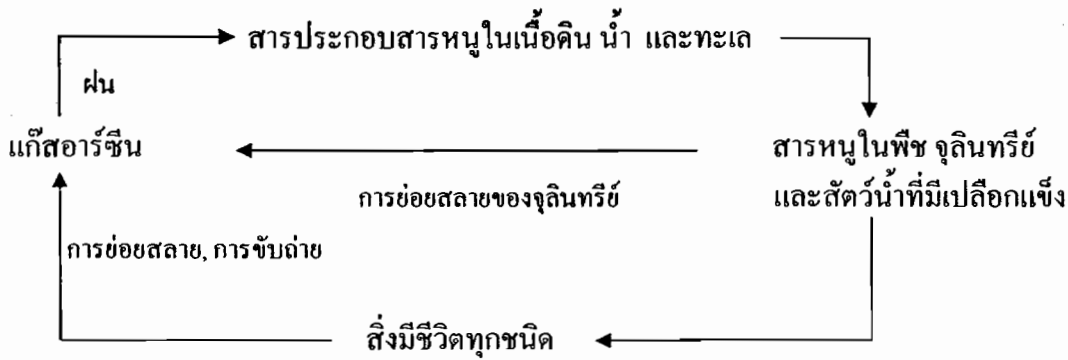
2.2.3 สารหนู (Arsenic)

สารหนู (Arsenic) เป็นธาตุกึ่งโลหะที่มีอยู่แพร่หลายในธรรมชาติในหลายรูปแบบ ได้แก่ โลหะสารหนู ซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็งหรือผงที่ไม่ละลายน้ำ สารประกอบอนินทรีย์ของสารหนู (เช่น arsenic trioxide, arsenic pentoxide, arsenic acid และ arsenites) สารประกอบอินทรีย์ของสารหนู (เช่น methanearsenic acid, dimethylhydroxyarsine และ trimethylarsine oxide) และ ก๊าซอาร์ซีน (AsH_3)

สารประกอบสารหนูส่วนใหญ่นำไปใช้ทางเกษตรกรรม คือ เป็นสารกำจัดวัชพืช (Herbicides) เป็นสารป้องกันและกำจัดแมลง (Insecticides) น้ำยารักษาสภาพเนื้อไม้ (Wood preservative) สาร Desiccants และสารเติมในอาหารสัตว์ (Feed additives) นอกจากนั้นใช้ในอุตสาหกรรมแก้วและเซรามิก อุตสาหกรรมต่อเรือ อุตสาหกรรมพลาสติก (polymerization reactions) อุตสาหกรรมฟอกหนังสัตว์ อุตสาหกรรมน้ำมัน ใช้เป็นส่วนประกอบเครื่องมือหลอดอิเล็กทรอนิกส์ และยารักษาโรคทั้งในคนและในสัตว์สำหรับรักษาโรคที่เกิดจากโปรโตซัว (protozoal disease) และโรคที่เกิดจากพยาธิบางชนิด (helminthiasis) รวมทั้งโรคที่เกิดจากพวกสไปโรเช็ต (Spirochete) (กองจัดการสารอันตรายและกากของเสียกรมควบคุมมลพิษ, 2541)

วัฏจักรและการปนเปื้อนของสารหนูในสิ่งแวดล้อม

สารหนูมีอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อมโดยจะพบสารประกอบสารหนูในดิน น้ำ ดินตะกอน และทะเล แต่จะพบสารหนูในรูปสารประกอบอินทรีย์น้อยกว่ารูปสารประกอบอนินทรีย์ และสารหนูสามารถแพร่เข้าสู่สิ่งมีชีวิต โดยจะสะสมในพืช จุลินทรีย์และสัตว์น้ำ เมื่อเกิดการย่อยสลายของจุลินทรีย์จะได้สารหนูในรูปของแก๊สอาร์ซีน และจะกลับมาสะสมในน้ำและในดินเมื่อฝนตกค้างภาพต่อไป



การปนเปื้อนสารหนูในน้ำ

โดยทั่วไปสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำอยู่ทั้งในรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ สารประกอบอินทรีย์ส่วนใหญ่ได้แก่ กรดเมทิลอาร์เซนิก และกรดไดเมทิลอาร์เซนิก แต่มักมีอยู่ในปริมาณที่ต่ำกว่ารูปสารประกอบอนินทรีย์ ในน้ำที่ออกซิเจนต่ำพบว่ามีสารอินทรีย์พวกไคโรพลาเลนค์เป็นส่วนใหญ่

การปนเปื้อนสารหนูในดิน

ดินที่มีปริมาณสารหนูอยู่สูง มักจะเป็นดินที่ถูกพัดมาจากเหมืองแร่และดินที่มีสารอินทรีย์อุดมสมบูรณ์ แหล่งกำเนิดที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนสารหนูในดิน ได้แก่ การประกอบอุตสาหกรรมต่าง ๆ การทำเหมืองแร่ ถลุงโลหะ อุตสาหกรรมเคมีที่ต้องใช้แร่พวกกำมะถันและฟอสฟอรัส การเผาไหม้ถ่านหิน

การปนเปื้อนสารหนูในพืช

ปริมาณสารหนูที่ปนเปื้อนในพืชจะมากหรือน้อยขึ้นกับชนิดของพืช อัตราการเจริญเติบโต สภาพดินที่ปลูก และแหล่งกำเนิดมลพิษ พบว่าใบของพืชจำพวกผักมีปริมาณสารหนูสูงกว่าพืชชนิดอื่น ๆ ผลไม้มีสารหนูอยู่ค่อนข้างต่ำ และเห็ดต่าง ๆ สามารถสะสมสารหนูได้ค่อนข้างสูง พืชโดยทั่วไปมักสะสมสารหนูในรากสูงกว่าส่วนอื่น ๆ

การปนเปื้อนสารหนูในสัตว์น้ำ

สารหนูมีอยู่ทั่วไปในสัตว์เพราะสัตว์สามารถรับสารหนูเข้าสู่ร่างกายได้ โดยสารหนูจะปนเปื้อนอยู่ในพืชที่กิน ในน้ำที่ดื่ม ในอากาศที่หายใจ ปริมาณสารหนูในสัตว์น้ำก็จะมีค่าแตกต่างกันในดับและในเนื้อเยื่อ แต่จะมีค่าที่สูงที่สุดในไขมัน และปริมาณสารหนูที่สะสมในสัตว์ยังขึ้นอยู่กับอายุของสัตว์น้ำด้วย

ความเป็นพิษ (Toxicity)

ความเป็นพิษต่อสัตว์

จากการศึกษาในสัตว์ทดลองพบว่า trivalent inorganic arsenic มีความเป็นพิษมากกว่า pentavalent และสารประกอบที่มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ จะมีความเป็นพิษมากกว่าสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารประกอบที่ละลายน้ำได้จะทำให้เกิดการดูดซึมเข้าไปในร่างกายได้ดี ปฏิกริยาการเกิดพิษเกิดขึ้นเนื่องจากสารหนูไปยับยั้งการทำงานของ -SH group ในเอนไซม์ เช่น pyruvate dehydrogenase

ปริมาณต่ำสุดของสารหนูที่ทำให้หนูตายเมื่อฉีดเข้ากล้ามเนื้อ คือ 25 mg/kg และปริมาณต่ำที่สุดของสารหนูที่ทำให้กระต่ายตายเมื่อฉีดเข้าได้ผิวหนังคือ 300 mg/kg

ความเป็นพิษต่อมนุษย์

ลักษณะการเกิดพิษเนื่องจากสารหนูส่วนใหญ่เป็นการเกิดพิษแบบเรื้อรังจากการสัมผัสสารหนูเข้าสู่ร่างกายติดต่อกันและระยะเวลานาน ซึ่งอาการที่แสดงออกทางระบบต่าง ๆ อาจแยกเป็น

1. ผิวหนังส่วนที่สัมผัสกับสารหนูจะเกิดการระคายเคือง เกิดเป็นโรคผิวหนัง โดยเฉพาะผิวหนังที่อยู่ตามซอกมุมต่าง ๆ เช่น รักแร้ ซอกคอ หู หนังสอก มุมปาก ซึ่งบางที่เป็นตุ่มแข็งหรือผิวหนังแข็งด้าน โดยเฉพาะที่ฝ่าเท้า ผิวหนังอาจจะหลุดลอกออกคล้ายกับใบไม้ผลัดใบ หรือบริเวณที่สัมผัสจะเป็นจุดสี คล้ายกับเม็ดฝนเกิดเป็นหูด และต่อไปอาจเป็นสาเหตุของมะเร็งที่ผิวหนัง
2. เยื่อเมือก (Mucous membrane) เมื่อสัมผัสกับฝุ่นผง หรือก๊าซ จะทำให้เกิดการระคายเคืองตรงส่วนนั้น และฝุ่นผงบางส่วนจะลงไปปอดมีอาการคล้ายกับเป็นหวัดคัดจมูก
3. ตา จะตาแดง ตาอักเสบ (Conjunctiviti)
4. ระบบหายใจ สารหนูจะไปสะสมที่ปอด ทำให้หลอดลมเกิดอักเสบ อาจมีผลให้เกิดมะเร็งที่ปอด
5. ระบบประสาท สารหนูจะเข้าสู่ระบบการไหลเวียนของโลหิตมีผลต่อหน่วยย่อย cellular enzyme ทำให้การทำงานเสียไป เกิดการเบื่ออาหาร ปลายประสาทอักเสบ แขนขาชา อาจจะเป็นอัมพาต
6. สมอง ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อสมอง กระสับกระส่าย ความจำเสื่อม อาการอื่น ๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้เช่น เกิดโลหิตจาง อาการทางตับ ไต

2.3 สาหร่ายทะเล

จากการสำรวจสาหร่ายทะเลในอ่าวปัตตานีโดยระพีพรและ โชคชัย (2541) พบสาหร่ายทะเลกระจายอยู่ในบริเวณบ้านตันหยงดูโล ปากแม่น้ำยะหริ่ง บ้านคาโต๊ะ และแหลมดาซี โดยเป็นสาหร่าย 3 ดิวิชัน 8 ชนิด คือ Division Chlorophyta 4 ชนิด ได้แก่ *Enteromorpha intestinalis*, *Ulva reticulata*, *Chaetomorpha* sp. และ *Cladophora* sp. Division Phaeophyta 1 ชนิด คือ *Pladina* sp. และ Division Rhodophyta 3 ชนิด ได้แก่ *Gracilaria fisheri*, *G. tenustipitata* และ *Hypnea* sp.

2.3.1 สาหร่ายผมนาง (*Gracilaria* sp.)

สาหร่ายสกุลกรากซิลารีเย (*Gracilaria*) เป็นสาหร่ายสีแดงมีหลายสายพันธุ์ และมีชื่อเรียกตามท้องถิ่น เช่น สาหร่ายผมนาง สาหร่ายข้อ สาหร่ายเขากวาง หรือสาหร่ายวุ้น เป็นสาหร่ายทะเลที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ คือชาวประมงที่อยู่รอบอ่าวปัตตานี เก็บเกี่ยวสาหร่ายผมนางทั้งชนิดเส้นเล็ก (*G. tenustipitata*) และชนิดเส้นใหญ่ (*G. fisheri*) เพื่อบริโภคและจำหน่ายตามตลาดท้องถิ่นในสภาพสาหร่ายสด หรือแปรรูปเป็นสาหร่ายตากแห้งเก็บไว้จำหน่ายแก่ผู้บริโภคเพื่อการส่งออก เป็นวัตถุดิบป้อนโรงงานสกัดสารจำพวกวุ้น ซึ่งเป็นสาร อินทรีย์ที่ใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมหลายประเภท รวมทั้งใช้ในด้านการแพทย์และเภสัชกรรม ได้แก่ เครื่องดื่ม เครื่องสำอาง สี สิ่งทอ เครื่องหนัง และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ (ระพีพร และ โชคชัย, 2541) นอกจากนี้ สาหร่ายผมนางยังสามารถใช้เป็นอาหารสัตว์ใช้เลี้ยงสุกร วัวและม้า ใช้ทำปุ๋ย ในรูปของปุ๋ยสด หรือปุ๋ยน้ำ รวมถึงใช้ป้องกันแมลงศัตรูพืชได้อีกด้วย (โสดดาวัลย์, 2545)

ลักษณะทั่วไปของสาหร่ายผสมนาง คือ มีทลัสต์ตั้งตรง เป็นรูปเรียวยาว ทรงกระบอก กลม หรือแบน อวบน้ำ ลักษณะของทลัสต์มีตั้งแต่บอบบาง อ่อนนุ่ม หักง่าย เปราะ ไปจนกระทั่งเหนียวเหมือนฟังผืด หรือกระดูกอ่อน ผิวของทลัสต์อาจจะเรียบหรือหยากก็ได้ การเจริญเติบโตเกิดได้ 2 ทาง คือ การเจริญเติบโตที่เซลล์ปลายยอด และการแตกแขนงด้านข้าง ทลัสต์มักเกิดขึ้นเป็นพุ่มจากฐาน โดยที่โคนของทลัสต์มีฐานกลมแบนที่เรียกว่า โฮลด์ฟาสท์ (Holdfast) ทำหน้าที่แทนรากยึดเกาะกับวัตถุใต้น้ำ การแตกแขนงอาจจะเป็นแบบ 2 ง่าม (dichotomous) แตกแบบไม่เป็นระเบียบ แตกเป็นหลายแขนงแผ่ขยายออกไปเรื่อย ๆ หรือแตกแขนงข้างออกจากแขนงหลักทุก ๆ ช่วงความยาว โดยความยาวของทลัสต์มีตั้งแต่ 4 ซม. ถึง 3.5 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.5 ถึง 4.0 มม.

สาหร่ายผสมนางมีวัฏจักรชีวิตแบบสลับ เรียกว่า ไตรเฟสติก (triphasic type) มี 3 ระยะ คือ ระยะแกมีโตไฟท์ (gametophyte phase) มีจำนวนโครโมโซมเป็นแฮพลอยด์ (haploid) ระยะคาร์โปสปอโรไฟท์ (carposporophyte phase) และระยะเตตระสปอโรไฟท์ (tetrasporophyte phase) มีจำนวนโครโมโซมเป็นแบบดิพลอยด์ (diploid) โดยระยะที่ 1 และ 2 เกิดอยู่บนต้นแกมีโตไฟท์ (gametophyte plant) ส่วนระยะที่ 3 เกิดบนต้นเตตระสปอโรไฟท์ (tetrasporophyte plant) ลักษณะของต้นแกมีโตไฟท์และต้นเตตระสปอโรไฟท์ จะเหมือนกัน

การสืบพันธุ์ของสาหร่ายผสมนางสกุลกราซิลารีย มีทั้งแบบไม่อาศัยเพศ โดยการสร้างเตตระสปออร์บนทลัสต์ ส่วนแบบอาศัยเพศโดยการสร้างเซลล์สืบพันธุ์เพศผู้ที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งเรียกว่า *สเปออร์มาเตียม* (Spermatium) ขึ้นภายในแอนเทอริเดียม พิต (antheridium pits) ส่วนแกมีโตไฟท์เพศเมีย จะสร้างเซลล์สืบพันธุ์เพศเมีย เรียกว่า *คาร์โปโกเนียม* (carpogonium) อยู่บนคาร์โปโกเนียด ฟิลาเมนต์ (carpogonial filament) เมื่อเวลาสืบพันธุ์ สเปออร์มาเตียมจะหลุดลอยตามน้ำมาผสมกับคาร์โปโกเนียมบนทลัสต์เพศเมียได้เป็นไซโกต (zygote) เมื่อไซโกตแบ่งตัวแบบไมโทซิส ได้คาร์โปโกเนียด ฟิลาเมนต์ เป็นปุ่ม มีคาร์โปสปอเรนเจียมอยู่ตรงทลัสต์และมีเพอริคาร์พ เป็นเปลือกหุ้ม เรียกระยะนี้ว่า *ระยะคาร์โปสปอโรไฟต์* เมื่อเจริญเต็มที่จะมีลักษณะเป็นคุ่ม ๆ กลม ๆ กระจายอยู่ตามผิวของทลัสต์ เรียกว่า *ซิสโตคาร์พ* (cystocarp) ภายในคาร์โปสปอเรนเจียมมี 1 คาร์โปสปออร์ เมื่อแก่เต็มที่จะหลุดจากซิสโตคาร์พ ไปออกเป็นต้นดิพลอยด์ เป็นระยะเตตระสปอโรไฟต์ เมื่อโตเต็มที่จะสร้างเตตระสปออร์ขึ้นภายในเตตระสปอเรนเจียม โดยการแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส ได้เตตระสปออร์ที่มีโครโมโซมเป็นแฮพลอยด์ ที่ออกเป็นต้นแกมีโตไฟท์เพศผู้และเพศเมียอย่างละเท่า ๆ กัน เป็นการเจริญครบวัฏจักร

สาหร่ายทะเลสดมีน้ำร้อยละ 80-90 เมื่อทำให้แห้งแล้วน้ำจะลดลงเหลือเพียงร้อยละ 10-20 ส่วนประกอบอื่นมีคาร์โบไฮเดรตมากที่สุดประมาณร้อยละ 40-60 รองลงมาเป็นโปรตีน ส่วนไขมันมีน้อยมากประมาณร้อยละ 1-2 นอกจากนี้ยังมีวิตามิน สารสี และอื่น ๆ สำหรับสีของสาหร่ายผสมนางจะแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ที่พบ ตั้งแต่สีแดง-ดำ แดง น้ำตาล แดง-น้ำตาล ชมพู ม่วงเข้ม สีแดง-ม่วง เทา เขียว เหลือง หรือใส เมื่อดากแห้งจะเป็นสีน้ำตาลไหม้ ดำเทา หรือ น้ำตาล สารสีของสาหร่ายผสมนาง (*G. fisheri*) ประกอบด้วยคลอโรฟิลล์ เอ, คลอโรฟิลล์ ดี, ไฟโคบิลิน เช่น R-phycoerythrin, R-phyococyanin, C-allophycocyanin เป็นต้น และคาโรทีนอยด์ เช่น β -carotene และ Antheraxanthin เป็นต้น (กาญจนาภรณ์, 2527)

2.3.2 สาหร่ายผักกาด (*Ulva reticulata*)

สาหร่ายผักกาดนี้มีชื่อสามัญว่า Sea lettuce เป็นสาหร่ายสีเขียว มีลักษณะเป็นแผ่นแบนบางสีเขียวอ่อน ความหนาของทลัสต์เป็นสองชั้นเซลล์ มีส่วนล่างเป็นรากยึดเกาะ ดันที่งอกใหม่ ๆ จะมีเซลล์เรียงกันเป็นแถวเดี่ยว ต่อมาจะมีหลายแถว มีสองชั้น และมีรูพรุนพบหลุดลอยเป็นอิสระ การเจริญเติบโตโดยการแบ่งเซลล์ทั้งในแนวกว้างและแนวยาว จึงแผ่ออกเป็นแผ่น มีรอยจับอยู่ตรงขอบ วัฏจักรชีวิตเป็นแบบไอโซมอร์ฟิก ดิโพลแฮพลอนติก โดยชูโอสปอร์มีขนาด 4 เซ็น และแกมีตมีขนาด 2 เซ็น สาหร่ายผักกาดนี้ยังนำมาใช้ประโยชน์ไม่มาก (กนกศักดิ์, 2543)

2.4 กลไกการสะสมโลหะหนักโดยจุลินทรีย์ (Gadd, 1992)

เซลล์จุลินทรีย์สามารถสะสมโลหะหนัก สารกัมมันตรังสี และสารประกอบอินทรีย์ของโลหะไว้ภายในเซลล์ได้ โดยกระบวนการต่างๆ ทั้งทางเคมีฟิสิกส์และทางชีววิทยา การจับกับสารประกอบเหล่านี้จะเกิดขึ้นอย่างอิสระโดยไม่ขึ้นกับกระบวนการเมตาบอลิซึม การดูดซับหรือจับกับสารประกอบ จะเกิดขึ้นกับเซลล์ที่มีชีวิตและไม่มีชีวิต นอกจากนี้สารประกอบพวกโพลีแซคคาไรด์ แคปซูลและชั้นเมือกต่าง ๆ จะมีความสามารถในการจับกับโลหะได้เช่นเดียวกับผนังเซลล์ และองค์ประกอบภายนอกของเซลล์แบคทีเรีย นอกจากนี้ผนังเซลล์ของสาหร่าย ราและยีสต์ มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะแทบทั้งสิ้น โดยโลหะจะจับกับส่วนต่างๆเหล่านี้โดยอาศัยหมู่ต่าง ๆ ที่มีประจุ สภาพของสิ่งแวดล้อมก็มีอิทธิพลต่อกระบวนการเหล่านี้ด้วย โดยเฉพาะค่าพีเอชและการแข่งขันกันของไอออนต่างๆ อย่างไรก็ตาม กระบวนการเมตาบอลิซึมจะเปลี่ยนแปลงสภาพสิ่งแวดล้อมที่อยู่ใกล้เคียงกับเซลล์ ทำให้ค่าต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงได้ เซลล์จุลินทรีย์จะทำหน้าที่เปรียบเสมือนเป็น จุดศูนย์กลางในการเกิดการรวมตัวของผลึกโลหะ รวมทั้งพวกฟอสเฟต ซัลไฟด์ และออกไซด์ การเกิดผลึกของธาตุทองและเงินจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชัน ในขณะที่การตกตะกอนภายในและรอบ ๆ เซลล์จุลินทรีย์ของธาตุยูเรเนียมและทอเรียมจะเพิ่มขึ้นเมื่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส กลไกดังกล่าวเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสะสมของโลหะในปริมาณที่สูง การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของโลหะชนิดต่างๆ รวมทั้งส่วนประกอบของผนังเซลล์จุลินทรีย์และสารที่เซลล์ผลิตออกมาออกเซลล์ มีผลทำให้เซลล์จุลินทรีย์แต่ละชนิดเกิดความสามารถในการสะสมที่แตกต่างกัน

สภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำ และมีสารยับยั้งการเกิดกระบวนการทางเคมี หรือการขาดแหล่งพลังงานสามารถยับยั้งการสะสมโลหะหนักภายในเซลล์ได้ อัตราการดูดซับขึ้นกับสภาวะทางกายภาพของเซลล์ ส่วนประกอบของสภาพแวดล้อมหรือสารอาหารที่เซลล์ใช้ในการเจริญเติบโต การขนถ่ายไอออนโลหะเข้าสู่เซลล์จะอาศัยปริมาณของไอออนต่างๆ เช่น ปริมาณไฮโดรเจนไอออนและปริมาณโพแทสเซียมไอออน ซึ่งทำให้เกิดการส่งผ่านเข้าไปในเยื่อหุ้มเซลล์ได้ กระบวนการนี้จะต้องใช้เอนไซม์ ATPase เป็นตัวพาออกเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมี (ATP) ไปเป็นพลังงานทางชีวภาพ โลหะหนักที่มีความเป็นพิษที่สามารถผ่านเข้าออกเยื่อหุ้มเซลล์ได้นั้นจะเข้าสู่เซลล์ และจะจับกับเซลล์บริเวณจำเพาะของเซลล์ที่อยู่ภายใน ทำให้เกิดการสะสมของโลหะเหล่านี้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อมีการสะสมมากขึ้นและเซลล์ไม่สามารถกำจัดได้ทัน สิ่งมีชีวิตนั้นก็ตายลง นอกจากเซลล์จะมีวิธีการในการลดความเป็นพิษของโลหะหนักชนิดนั้นได้

นอกจากนี้กลไกอื่น ๆ ในการดูดซับโลหะของจุลินทรีย์ยังมีอีกหลายกลไก เช่น การเชื่อมติดของเหล็กกับ siderophores และการขนถ่ายร่วมกันระหว่างโลหะกับสารตั้งต้นประเภทอินทรีย์ เช่น ใน จุลินทรีย์พวก *Pseudomonas putida* จะขนถ่ายเจอมาเนียมโดยใช้ catechol จับกับเจอมาเนียมให้อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน Ge-catechol จึงจะผ่านเข้าสู่เซลล์ได้ (Gadd, 1992)

ตัวอย่างของจุลินทรีย์ที่สะสมโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ในระดับที่ยอมรับในอุตสาหกรรมแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างจุลินทรีย์ที่สะสมโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ไว้ในเซลล์ และปริมาณการสะสมในระดับที่ยอมรับในอุตสาหกรรม

ชนิดของจุลินทรีย์	โลหะหนัก	ปริมาณการสะสมภายในเซลล์ (เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง)
Bacteria		
<i>Streptomyces</i> sp.	Uranium	2-14
<i>S. viridochromogenes</i> ^a	Uranium	30
<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	Silver	25
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Uranium	15
Algae		
<i>Penicillium</i> sp.	Uranium	8-17
<i>Chlorella vulgaris</i> ^a	Gold	10
<i>Bacillus cereus</i>	Cadmium	4-9
Yeasts		
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Uranium	10-15
	Thorium	12

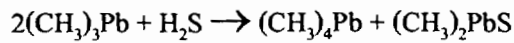
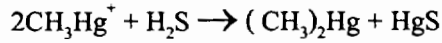
^a Immobilized cells

ที่มา : Gadd , G.M. (1992). Heavy Metal Pollutants : Environmental and Biotechnological Aspects.

In : Encyclopedia of Microbiology, Vol. 2, Alexander, M., ed., Academic Press, San Diego, p. 354.

กลไกการลดความเป็นพิษของโลหะหนักโดยจุลินทรีย์

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนภายนอกเซลล์จุลินทรีย์ การตกตะกอนและการดกผลึกของโลหะหนักเป็นผลทำให้ความเป็นพิษของโลหะนั้น ๆ ลดลง รวมทั้งสารประกอบพวก โพลีแซคคาไรด์ กรดอินทรีย์ สารสีจากจุลินทรีย์ (pigment) โปรตีนและสารเมตาบอไลต์อื่นๆ ก็สามารถเคลื่อนย้ายไอออนของโลหะทั้งหมดออกจากสารละลายและ/หรือเปลี่ยนรูปโลหะเหล่านั้นให้อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษน้อยลงได้ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดจากจุลินทรีย์สามารถทำให้เกิดสารประกอบของโลหะซัลไฟด์ที่ไม่สามารถละลายได้ มีลักษณะเม็ดขนาดเล็กภายในเซลล์ของจุลินทรีย์หรืออยู่รอบ ๆ ผิวเซลล์ได้ ตัวอย่างการเปลี่ยนรูปสารประกอบโลหะหนักให้อยู่ในรูปสารประกอบซัลไฟด์ที่ไม่ละลาย เช่น



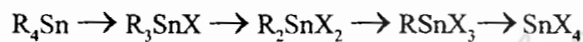
นอกจากนี้ จุลินทรีย์ประเภทที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการเจริญเติบโตที่สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ เช่น *Desulfovibrio* สามารถทำให้สารประกอบอินทรีย์ของโลหะเปลี่ยนรูปไปเป็นสารที่ระเหยได้ ซึ่งมีผลในการลดความเป็นพิษของโลหะได้ดีเช่นเดียวกัน การสะสมโลหะ ภายในเซลล์ลดลง เกิดจากการขับโลหะออกนอกเซลล์และเกิดจากเซลล์ไม่ยอมให้สารผ่านเข้าออกจากเซลล์ ทั้งนี้เพื่อการมีชีวิตรอดของเซลล์ การไม่ยอมให้สารผ่านเข้าออกจากเซลล์ อาจเกิดจากโครงสร้างและสารประกอบของผนังเซลล์ เกิดการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนที่เชื่อมหุ้มเซลล์ หรือเกิดจากแรงดันออสโมซิสที่เพิ่มขึ้นของเซลล์ แบคทีเรียชนิดที่สร้างพลาสมิดได้จะมีความสามารถในการต้านทานแคดเมียมและอาร์ซีนิก ความสามารถในการต้านทานความเป็นพิษของโลหะหนักจะขึ้นกับปัจจัยจากสิ่งแวดล้อม เช่น ค่าพีเอช และการแข่งขันกันของไอออน จุลินทรีย์บางสายพันธุ์ที่ทนต่อความเป็นพิษของโลหะหนักสามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าสายพันธุ์ที่มีความไวต่อระดับความเป็นพิษ เนื่องจากสายพันธุ์ที่มีความต้านทานมีกระบวนการในการลดความเป็นพิษภายในเซลล์ได้ เมื่อมีการสะสมโลหะหนักมากขึ้นจึงไม่เกิดอันตรายต่อเซลล์

ภายในเซลล์ของจุลินทรีย์ ไอออนของโลหะหนักอาจเป็นพิษลดลงเนื่องจากส่วนประกอบทางเคมีของโลหะหนักนั้นรวมตัวกับ โปรตีนหรือเข้าไปรวมกับส่วนประกอบของเซลล์ที่มีความจำเพาะ โดยส่วนประกอบของเซลล์จะมีความสามารถในการจับกับโลหะที่แตกต่างกันออกไป อาจอยู่ในรูปของเม็ดขนาดเล็ก เช่น cyanophycin พบในแบคทีเรียจำพวก cyanobacteria หรือ โพลีฟอสเฟต ซึ่งชั้นส่วนเซลล์ประเภทนี้จะพบได้ในเซลล์แบคทีเรียทั่วไป สาหร่ายและรา ส่วนโปรตีนที่มีโครงสร้างสามารถจับกับโลหะได้จะพบในกลุ่มจุลินทรีย์ทุกประเภท โปรตีนเหล่านี้ได้แก่ metallothioneins และ metal γ -glutamyl peptides (phyto-chelatins) เป็นต้น metallothioneins นั้นมีขนาดเล็กประกอบด้วยสายโพลีเปปไทด์ประเภท cysteine-rich polypeptides ซึ่งมีความสามารถในการจับกับโลหะต่างๆ เช่น สามารถจับกับทองแดงและสังกะสีได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถจับกับแคดเมียมได้อีกด้วย ส่วน metal γ -glutamyl peptides นั้นมีขนาดสั้น ประเภทของเปปไทด์จะเป็นแบบปกติทั่วไป (γ Glu-Cys)_n-Gly โครงสร้างที่มี n=2 ถึง 5 จะพบมากที่สุด ซึ่งโครงสร้างลักษณะนี้มีความสำคัญในกลไกลดความเป็นพิษ พบในพวกสาหร่าย ราและยีสต์หลายชนิด จุลินทรีย์ประเภทยูคาริโอต จะสะสมไอออนโลหะพวกโคบอลต์ สังกะสีและแมงกานีสไว้ในแวคคิวโอล ที่เรียกว่า tonoplast จะมีกระบวนการขนถ่ายไอออนจาก cytosol เกิดขึ้น

การเปลี่ยนรูปของโลหะหนักโดยจุลินทรีย์ จะทำให้เกิดกลไกการลดความเป็นพิษของโลหะหนัก ตัวอย่างเช่น แบคทีเรียที่สร้างพลาสมิดจะรีดิวซ์ Hg^{2+} ไปเป็น Hg^0 ที่ระเหยได้ และจาก ตัวอย่างดังกล่าวสามารถพบได้ในแบคทีเรีย สาหร่ายและราได้อีกหลายปฏิกิริยา เช่น การรีดิวซ์ Au^{3+} ไปเป็น Au^0 , Ag^+ ไปเป็น Ag^0 และ Cr^{6+} ไปเป็น Cr^{3+} เป็นต้น การเติมหมู่ methyl ให้กับโลหะทำให้สามารถลดความเป็นพิษได้เช่นกัน โดยกลไกนี้จะเกิดขึ้นกับปรอทเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังสามารถเกิดกับโลหะและกึ่งโลหะบางชนิดด้วย เหตุที่กลไกนี้สามารถลดความเป็นพิษได้เนื่องจากว่าเมื่อโลหะอยู่ในรูปที่มีหมู่ methyl เป็น

สารประกอบจะทำให้โลหะในรูปนั้นระเหยได้และถูกกำจัดออกไปจากสิ่งแวดล้อม การเติมหมู่ methyl ให้กับ Hg^{2+} มีทั้งวิธีทางตรงและทางอ้อม โดย กระบวนการจะเกี่ยวข้องกับ methyl cobalamin , CH_3Hg^+ และ $(CH_3)_2Hg$ นอกจาก methyl cobalamin จะเกิดปฏิกิริยากับ Hg^{2+} แล้วยังเกิดปฏิกิริยาได้กับดีบุก ตะกั่ว พลาตาเดียม แพลทินัม ทองและเทลลูเรียม กลไกจะเกิดโดย S-adenosylmethionine (SAM) ซึ่งเป็นตัว methylating agent นำหมู่คาร์โบเนียมไอออน (CH_3^+) ไปจับกับโลหะ พบได้ในกลไกการเติมหมู่ methyl ให้กับอาร์ซีนิกและซีลีเนียม ซึ่งกระบวนการนี้มักเกิดในสภาวะมลพิษในสิ่งแวดล้อมทั่วไปที่มีอาร์ซีนิกและซีลีเนียมปนเปื้อนอยู่

การลดความเป็นพิษของโลหะในรูปของโลหะอินทรีย์นั้นจะเกิดโดยผ่านกลไกการย้ายหมู่ alkyl หรือ aryl ตัวอย่างเช่น สารประกอบอินทรีย์ของปรอทจะถูกเปลี่ยนรูปโดยเอนไซม์ organomercurial lyase ซึ่งกลไกมีลักษณะเหมือนกับกลไกการสลายสารประกอบอินทรีย์ของดีบุก โดยการย้ายหมู่อินทรีย์จากโครงสร้างอะตอมของดีบุกดังนี้



การเปลี่ยนรูปโลหะหนักโดยจุลินทรีย์

จุลินทรีย์สามารถเปลี่ยนรูปสารโลหะและกึ่งโลหะได้โดยผ่านกระบวนการออกซิเดชัน รีดักชัน เมริลเลชันและดีเมริลเลชัน แบคทีเรียและจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ ที่มีความสามารถด้านทานพิษของปรอทได้ อาศัยเอนไซม์ mercuric reductase ในการรีดิวซ์ Hg^{2+} ไปเป็น Hg^0 ที่ระเหยได้และมีอัตราการกำจัด Hg^{2+} ที่ปนเปื้อนตามแหล่งมลพิษได้ประมาณ 2.5 มก./ลิตร/ชั่วโมง สารประกอบอินทรีย์ของปรอทจะถูกลดความเป็นพิษโดยเอนไซม์ organomercurial lyase ที่เซลล์ผลิตขึ้น ซึ่งจะปรีดิวิซ์ Hg^{2+} ไปเป็น Hg^0 เช่นกัน แบคทีเรียบางชนิดที่สามารถผลิตเอนไซม์ arsenite oxidase ได้จะช่วยกำจัดอาร์ซีนิกที่ปนเปื้อนอยู่ตามแหล่งมลพิษทั่วไปโดยเอนไซม์ชนิดนี้จะเปลี่ยนรูป As^{3+} ไปเป็น As^{5+} ซึ่งอาร์ซีนิกในรูป As^{5+} (arsenate) นี้สามารถเกิดสารประกอบกับ Fe^{3+} แล้วตกตะกอนได้ง่ายกว่า อาร์ซีนิกในรูป As^{3+} (arsenite) ทำให้ง่ายต่อการกำจัดอาร์ซีนิกออกจากน้ำเสีย อนุพันธ์ของโลหะที่มีหมู่ methyl เป็นองค์ประกอบ มักเกิดการระเหยและสูญเสียจากระบบกำจัดได้ ถึงแม้จะมีเอนไซม์ในปริมาณน้อย นอกจากกลไกดังกล่าวแล้วกระบวนการ dealkylation สารประกอบโลหะอินทรีย์ที่เกิดจากจุลินทรีย์ก็สามารถลดความเป็นพิษของโลหะหนักได้ ซึ่งในขั้นตอนสุดท้ายของ กลไกจะได้ไอออนโลหะในรูปที่สามารถกำจัดออกไปโดยผ่านกระบวนการดูดซับอีกขั้นขั้นตอนหนึ่งได้ (Gadd, 1992)

การกำจัดโลหะหนักโดยผลิตภัณฑ์จากเซลล์จุลินทรีย์

จุลินทรีย์สามารถสร้างสารบางชนิดเพื่อจับกับโลหะ สารเหล่านี้ได้แก่ metallothioneins และ phytochelatins เป็นต้น สารดังกล่าวจะผลิตในปริมาณที่มากเพียงพอเนื่องจากเซลล์ของจุลินทรีย์ต้องนำไปใช้ในเมตาบอลิซึมตามธรรมชาติ และส่วนหนึ่งต้องใช้จับกับโลหะที่แปลกปลอมเข้าสู่เซลล์ อย่างไรก็ตาม สารที่เซลล์ผลิตขึ้นสำหรับจับกับโลหะได้คือนั้น จะถูกสังเคราะห์ขึ้นในระหว่างการเจริญเติบโตของเซลล์และ

ใช้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์ด้วย นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการจับกับโลหะของสารดังกล่าวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของสารประกอบโลหะเหล่านั้น รวมทั้งธรรมชาติทางเคมี และความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของลิแกนด์ที่ใช้จับกับโลหะนั้นด้วย ตัวอย่างของสารที่เซลล์จุลินทรีย์สร้างขึ้น ได้แก่ Siderophores และ สาร โพลิเมอร์ที่เซลล์ผลิตออกนอกเซลล์

1. **Siderophores** คือ สารประกอบที่เกิดพันธะโคเวเลนต์กับ Fe^{3+} มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เป็นสารที่จับออกนอกเซลล์เมื่อปริมาณเหล็กมากเกินไป Siderophores จะมีประสิทธิภาพในการจับกับ Fe^{3+} ได้สูง ยังสามารถจับกับโลหะและสารกัมมันตรังสีชนิดอื่นได้อีกด้วย โดยจับให้อยู่ในรูป สารประกอบเชิงซ้อน เช่น $Pu(IV)$, $Ga(III)$, $Cr(III)$, Sc , In , Ni , U และ Th

2. สารโพลิเมอร์ที่เซลล์ผลิตออกนอกเซลล์ โพลิเมอร์หลายชนิดที่เซลล์สร้างขึ้นแล้วปล่อยออกมา นอกเซลล์ มีสมบัติจับกับโลหะได้เป็นอย่างดี ส่วนใหญ่ที่พบเป็นพวก polysaccharides ซึ่งโพลิเมอร์ประเภทนี้อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับโปรตีนและผลิตภัณฑ์ที่เซลล์จับออกนอกเซลล์ การจับกับไอออนโลหะให้อยู่ในรูปสารโพลิเมอร์นั้นจะเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนประจุกับหมู่ที่มีประจุบวก ได้แก่ หมู่คาร์บอกซิล, หมู่สารประกอบอินทรีย์ของฟอสเฟต, หมู่สารประกอบอินทรีย์ของซัลเฟต และหมู่ phenolic hydroxyl การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนและ/หรือการเปลี่ยนรูปโลหะให้อยู่ในรูปทางเคมีที่แตกต่างไปจากเดิมดังเช่น ในตะกอนดิน แบคทีเรีย *Zoogloea ramigera* มีความสำคัญต่อการรวมตัวเป็นตะกอน และการกำจัดโลหะออกจากตะกอนดิน เนื่องจากมีการผลิตสาร ประกอบพวก exopolysaccharides นอกจากโพลิเมอร์ประเภทดังกล่าวแล้ว โพลิเมอร์ที่ผลิตออกมาเป็นแคปซูลก็มีความสำคัญเช่นกัน กลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตสารโพลิเมอร์ได้ ได้แก่ *Klebsiella (Enterobacter) aerogenes*, *Pseudomonas* sp. และ *Arthrobacter viscosus* แต่ในพวกสาหร่าย polysaccharides ที่เซลล์ผลิตขึ้น มีบางประเภทเท่านั้นที่สามารถจับกับโลหะได้ โดยความสามารถในการจับให้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนจะสัมพันธ์กับขนาดประจุลบที่มีปริมาณสูง ในแบคทีเรียที่มีการสร้าง emulsifying agent หรือ emulsan จะมีความสามารถจับกับยูเรเนียมในปริมาณสูง แบคทีเรียกลุ่มนี้ ได้แก่ *Arthrobacter*, *Pseudomonas* และ *Acinetobacter* sp. เมื่อ emulsan กระจายอยู่ในน้ำแล้วจะเกิดเป็น emulsanosol ซึ่งมีความสามารถในการกำจัดยูเรเนียมได้มากกว่า 800 มก.ยูเรเนียม / กรัม (Gadd, 1992)

ความสามารถในการต้านทานต่อโลหะหนักของจุลินทรีย์

โลหะหนักส่วนใหญ่มีความเป็นพิษต่อเซลล์จุลินทรีย์ ไม่ว่าโลหะนั้นจะอยู่ในรูปประจุบวกและประจุลบ หรือโลหะนั้นจะไม่สามารถถูกรีดิวซ์ได้ซึ่งเป็นรูปที่มีความเฉื่อย ล้วนเป็นพิษต่อเซลล์ โลหะหนักบางตัวเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ต่าง ๆ ที่เซลล์ผลิตขึ้น ดังนั้นเซลล์จึงจำเป็นต้องได้รับโลหะหนักเหล่านั้นในปริมาณเพียงเล็กน้อยสำหรับการมีชีวิตอยู่ โลหะที่มีความจำเป็นในการดำรงชีวิตของเซลล์ได้แก่ โคบอลต์ แมงกานีส นิกเกิล และสังกะสี ส่วนโลหะหนักที่เซลล์ไม่จำเป็นต้องใช้และมีความเป็นพิษต่อเซลล์สูงได้แก่ แอนติโมนี อาร์ซีนิก บิสมัท แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว พรอท และเทลลูเรียม โดยทั่วไปในสิ่งแวดล้อมที่มีการปนเปื้อน สารประกอบโลหะหนักที่มีความเป็นพิษสูง เช่น ในดินและน้ำ จะพบ

แบคทีเรียที่มีความสามารถในการต้านทานต่อการเป็นพิษในปริมาณมากเช่นกัน สารประกอบโลหะหนัก บางตัวมักใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา วัตถุกันเสียในอุตสาหกรรมเมทัลคัพและผลิตภัณฑ์ที่ทำจากไม้เพื่อป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ ยาฆ่าแมลงและวัชพืช หรือเป็นสารฆ่าเชื้อตามคลินิก โรงพยาบาลและตามบ้านเรือน ซึ่งทำให้โลหะหนักมีโอกาสนับเป็นสภาวะแวดล้อมทั่วไปมากขึ้น

จากการศึกษาทางพันธุกรรมของจุลินทรีย์แต่ละชนิดเกี่ยวกับกลไกการต้านทานไอออนโลหะที่เป็นพิษแต่ละตัว พบว่ากลไกการต้านทานมีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือ ไอออนโลหะจะเข้าสู่เซลล์โดยผ่านกระบวนการขนส่งไอออนโลหะตามปกติของเซลล์ ตัวอย่างเช่น เซลล์จะขนส่งอาร์ซีเนต (AsO_4^{3-}) เข้าสู่เซลล์โดยผ่านกระบวนการขนส่งฟอสเฟต (phosphate transport system) หรือขนส่ง Cd^{2+} เข้าสู่เซลล์โดยผ่านกระบวนการขนส่งแมงกานีสหรือสังกะสี (manganese or zinc transport system) และโครเมต (CrO_4^{2-}) เข้าสู่เซลล์โดยผ่านกระบวนการขนส่งซัลเฟต (sulfate transport system) ส่วนการขนส่งเมอร์คิวริกไอออน (Hg^{2+}) เข้าสู่เซลล์นั้นจะต้องผ่านกระบวนการ active transport โดยใช้โปรตีนที่สังเคราะห์จากยีนเป็นตัวกลางในการนำเข้าสู่เซลล์ ยีนดังกล่าวจะเกี่ยวข้องกับการลดความเป็นพิษของ Hg^{2+}

กลไกพื้นฐาน 2 ลักษณะในการต้านทานพิษของไอออนโลหะเซลล์ ได้แก่

1. การเปลี่ยนแปลงความจำเพาะในการขนส่งไอออนของเซลล์เพื่อยอมให้ไอออนที่เป็นพิษเข้าออกเซลล์แตกต่างไปจากเดิม

2. การดัดแปลงทางเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเซลล์ที่ใช้จับกับโลหะเกิดเป็นรูปแบบที่ไม่เป็นพิษต่อเซลล์

ยีนที่ทำให้เซลล์มีความต้านทานต่อโลหะหนักมักจะเป็นสารทางพันธุกรรมที่สามารถอยู่อย่างอิสระภายในเซลล์ได้ เช่น พลาสมิดและทรานสปอซอน (transposon) ในพลาสมิดหนึ่งๆ ประกอบด้วยยีนที่ทำหน้าที่ต้านทานไอออนโลหะและยีนทำหน้าที่ต้านทานสารปฏิชีวนะที่แตกต่างกันอยู่ร่วมกันเป็นส่วนใหญ่ จากข้อดีดังกล่าวทำให้เกิดการคัดค้านในการเปลี่ยนแปลง พันธุกรรมระหว่างสายพันธุ์ ชนิดและสกุลขึ้น โดยอาศัยชิ้นส่วนของ extrachromosomal ขนาดเล็กทำให้เกิดการจัดเรียงตัวที่ซับซ้อนภายในโครโมโซม จากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะเห็นได้ชัดว่า ยีนที่มีความสามารถต้านทานไอออนโลหะต่างๆ ได้ ส่วนใหญ่เกิดขึ้นโดยการชักนำจากไอออนโลหะเหล่านั้นเองเกือบทั้งหมด เมื่อแบคทีเรียได้รับปริมาณไอออนของโลหะชนิดใด ๆ ถึงระดับมากพอ ยีนเหล่านั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้มีการแสดงออกถึงความสามารถต้านทานโลหะชนิดนั้นๆ ได้ กระบวนการนี้จะถูกควบคุมอย่างมีประสิทธิภาพโดยกลุ่มเอนไซม์และโปรตีนต่างๆที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงรูปแบบทางเคมีและการขนส่งไอออนที่มีพิษต่าง ๆ ซึ่งสารที่เซลล์ใช้ในการควบคุมกระบวนการเหล่านี้จะถูกผลิตขึ้นเมื่อเซลล์อยู่ในสภาวะแวดล้อมมีการปนเปื้อนเท่านั้น โดยไอออนที่เป็นพิษจะชักนำให้ยีนมีความสามารถในการต้านทานไอออนนั้นอย่างจำเพาะ (Misra, 1992)

2.5 การวิจัยที่เกี่ยวข้องและคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่ทำ

อารี (2533) ได้ศึกษาการแพร่กระจายสารหนูในสภาพแวดล้อม อำเภออ่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยใช้เครื่อง AAS แบบ Hydride generation และวัดความเป็นกรดเบส ด้วยเครื่อง pH-meter ผล

การศึกษาพบว่าปริมาณสารหนูในตัวอย่างดินอยู่ในช่วง 50 ถึง 5,300 mg/kg ค่าเฉลี่ย 5,253.29 mg/kg สำหรับสารหนูในตัวอย่างตะกอนท้องน้ำมีค่าสูงกว่า คืออยู่ในช่วง 120 ถึง 6,700 mg/kg มีค่าเฉลี่ย 2,168 mg/kg ส่วนในตัวอย่างน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 0.026 ถึง 1.45 mg/L มีค่าเฉลี่ย 0.24 mg/L

อารมย์ (2534) ศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนักในตะกอนธารน้ำจากการทำเหมืองแร่ตะกั่วโดยศึกษาในบริเวณการทำเหมืองแร่ตะกั่วจังหวัดพัทลุง จากการเก็บตัวอย่างตะกอนธารน้ำในคลอง 4 สาย จำนวน 39 ตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์หา Cu, Pb, Zn, Mn, Cr และ Ni โดยใช้เครื่อง AAS พบว่าปริมาณโลหะตะกั่วมีค่าสูงในบริเวณต้นน้ำใกล้แหล่งแร่ตะกั่วและลดค่าลงไปตามทะเลสาบสงขลา มีค่าสูงอยู่ในช่วง 15.29 – 21.91 mg/kg (ในดินปกติทั่วไป 15 mg/kg) แต่ปริมาณตะกั่วส่วนใหญ่ต่ำกว่า 15 mg/kg (85% ของตัวอย่างที่ศึกษา)

เดโช (2537) ได้ศึกษาการปนเปื้อนของสารหนู แคดเมียม ทองแดง เหล็ก แมงกานีส ตะกั่วและสังกะสีในกลุ่มอนุภาคขนาดทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวจากตะกอนธารน้ำและแม่น้ำปัตตานีในจังหวัดยะลา พบว่า ปริมาณโลหะเหล่านี้ มีค่าสูงในตะกอนธารน้ำบริเวณที่มีการทำเหมืองแร่ในทุกกลุ่มอนุภาค นอกจากนี้ได้เก็บตัวอย่างตะกอนโคลน จากโรงกรองน้ำประปาเทศบาลเมืองยะลาและปัตตานี เพื่อศึกษาปริมาณของสปีชี (species) ของโลหะด้วย พบว่าในตะกอนโคลนจากโรงกรองน้ำประปาเทศบาลเมืองยะลา มีการปนเปื้อนของแคดเมียม 1.17 – 1.36 mg/kg สารหนู 226.40 mg/kg สังกะสี 180.08 – 213.72 mg/kg ทองแดง 74.67-86.36 mg/kg เหล็ก 33.18 – 39.52 mg/kg แมงกานีส 1,280 – 1,385 mg/kg ตะกั่ว 475 – 541.91 mg/kg ซึ่งสูงกว่าในตัวอย่างตะกอนโคลนจากโรงกรองน้ำประปาเทศบาลเมืองปัตตานีประมาณ 2 เท่า ในตะกอนธารน้ำแม่น้ำปัตตานีปริมาณโลหะหนักเหล่านี้มีค่าสูง และมีโอกาสที่จะละลายน้ำได้มากขึ้น ถ้าพีเอชมีค่าต่ำลง ซึ่งเป็นอันตรายต่อประชาชนทั้งทางตรงและทางอ้อม ผลการศึกษาสปีชีของโลหะและสารหนูพบว่า วัดค่าได้ทุกสปีชี และสปีชีหลักเริ่มมีค่ามากกว่าสปีชีอื่น ๆ คือมีค่า 98.16 – 119.16 mg/kg

วรพิน (2537) ได้ศึกษาการปนเปื้อนสารหนู แคดเมียม และตะกั่วในกลุ่มแม่น้ำปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราชเป็นการศึกษาถึงปริมาณการปนเปื้อนสารหนู แคดเมียมและตะกั่วในน้ำ ตะกอนท้องน้ำตลอดจนปริมาณที่สะสมในดินโดยใช้ AAS ซึ่งเก็บตัวอย่าง 2 ครั้ง คือ ครั้งแรกช่วงเดือนเมษายน-พฤษภาคม 2536 และครั้งที่ 2 ช่วงเดือนมกราคม 2537 ผลการศึกษาพบปริมาณการปนเปื้อนของแคดเมียม และตะกั่วทั้งในน้ำและตะกอนท้องน้ำ บริเวณดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับแหล่งน้ำอื่น ๆ และจัดอยู่ในเกณฑ์ปกติ ยกเว้นปริมาณสารหนูที่พบมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำดื่มที่องค์การอนามัยโลกกำหนดไว้ (0.01 ppm) โดยปริมาณสารหนูที่ตรวจพบมีค่าพิสัยระหว่าง 6.89 - 381.24 mg/kg สำหรับปริมาณการปนเปื้อนของโลหะทั้ง 3 ชนิดในดินมีค่าสูงกว่าค่าในดินปกติทั่วไปโดยสารหนู แคดเมียม และตะกั่ว มีค่าพิสัยระหว่าง 2.85 - 5.80, 2.67-11.67 และ 16.04 - 27.37 mg/kg ตามลำดับ

วนิดา (2538) ได้ศึกษาการปนเปื้อนของปรอท ตะกั่ว และแคดเมียมในน้ำและตะกอนดินคลองอู่ตะเภา อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา โดยการเก็บตัวอย่างน้ำและตะกอนดินระหว่างเดือนตุลาคม 2535 ถึงเดือนเมษายน 2536 วิเคราะห์หาโลหะหนักในน้ำโดยใช้เครื่อง Inductively Couple Plasma Emission Spectrophotometer แบบ direct aspiration นอกจากปรอทซึ่งใช้ AAS แบบ Cold vapor generation technique

ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นเฉลี่ยของปรอท ตะกั่ว และแคดเมียมในน้ำมีค่าไม่เกินมาตรฐาน และปริมาณแคดเมียมในน้ำมีค่าไม่เกินมาตรฐานคุณภาพน้ำ ในแหล่งน้ำผิวดินบริเวณสะพานถนนเลี้ยวเมืองใหญ่ สถานีสูบน้ำเพื่อผลิตน้ำประปา สะพานตัดใหม่ สะพานบ้านหาร สะพานวัดคู่เต่า และบ้านแหลมโพธิ์นอกของคลองอู่ตะเภา ส่วนในตะกอนดิน ความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมในบริเวณเดียวกันของคลองอู่ตะเภา มีค่าเกินกว่าความเข้มข้นของแคดเมียมในดินปกติทั่วไป นอกจากปรอทมีค่าไม่เกินความเข้มข้นของปรอทในดินปกติทั่วไป

ตรีรัตน์ (2540) ได้ศึกษาการปนเปื้อนของสารหนูในพืชน้ำและสัตว์น้ำบริเวณตำบลร้อนพิบูลย์ถึงลุ่มน้ำปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยการหาปริมาณสารหนูในพืชน้ำ สัตว์น้ำ น้ำ และตะกอนดิน ด้วยเครื่อง AAS แบบ Graphite Furnace ผลการศึกษาพบว่าปริมาณสารหนูในพืชมีค่าระหว่าง 0.23 - 2.97 mg/kg wet weight โดยพืชน้ำที่พบสารหนูสูงสุดคือ ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) ส่วนปริมาณสารหนูในสัตว์น้ำมีค่าระหว่างตรวจไม่พบ - 2.45 mg/kg wet weight โดยพบสูงสุดในหอยขม (*Sinotaia ingallsiana*) ปริมาณสารหนูในน้ำมีค่าระหว่าง ตรวจไม่พบ - 0.246 mg/L และปริมาณสารหนูในตะกอนดินมีค่าระหว่าง 100.70 - 1,854.84 mg/kg dry weight พบปริมาณสารหนูในน้ำและตะกอนดินสูง บริเวณที่อยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดการแพร่กระจายสารหนูในตำบลร้อนพิบูลย์

บรรจงและตรีรัตน์ (2540) ศึกษาการแพร่กระจายของสารหนูในบ่อน้ำตื้น น้ำคลอง ดินตะกอนในลำคลอง พืชน้ำและสัตว์น้ำในตำบลร้อนพิบูลย์และพื้นที่ใกล้เคียงระหว่างปี 2539-2540 โดยเก็บตัวอย่างในลำคลองร้อนพิบูลย์ออกไปยังที่ราบลุ่มน้ำปากพนัง วิเคราะห์หาปริมาณสารหนูด้วย AAS แบบ graphite furnace พบว่า ตัวอย่างน้ำบ่อน้ำตื้น น้ำคลอง และตะกอนดินในลำคลองมีปริมาณสารหนูในช่วง ตรวจไม่พบ - 3.34 mg/L, 1.3 - 245.5 µg/L, และ 193.9 - 1,854.8 mg/kg (น้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ

ปรีญาและคณะ (2541) ได้ตรวจสอบการปนเปื้อนโลหะหนัก 4 ชนิดคือ ทองแดง สังกะสี แคดเมียม และ ตะกั่วในน้ำ ตะกอนดินและพืชทะเลขนาดใหญ่ เพื่อประเมินคุณภาพอ่าวปัตตานี พบว่า อ่าวปัตตานีรวมทั้งแม่น้ำปัตตานีและแม่น้ำยะหริ่ง มีการปนเปื้อนโลหะหนักในตะกอนดินและในพืชทะเลสูงกว่าในน้ำมาก โดยในน้ำไม่พบแคดเมียม แต่พบทองแดง สังกะสีและตะกั่ว ซึ่งมีค่าเกินมาตรฐานคุณภาพน้ำทะเล คือพบทองแดงสูงสุด 0.22 ppm ที่บ้านรูสะมิแล พบสังกะสีสูงสุด 0.92 ppm ที่บ้านตันหยงลูโละ และตะกั่ว 0.41 ppm ที่สะพานเดชาอนุชิตในตะกอนดินจะพบโลหะหนักทุกชนิดระหว่าง 55 - 225 ppm ในสาหร่ายพบในช่วง 0.85 - 22.00 ppm

ณัฐกมล (2541) ศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนัก 2 ชนิด คือ สังกะสี และทองแดงในสาหร่ายผสมนางที่เก็บจากบ้านดาโต๊ะอ่าวปัตตานี พบว่า สาหร่ายผสมนางสามารถจะดูดซับโลหะหนักสังกะสี 0.668 ppm และทองแดง 0.053 ppm และสาหร่ายมีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับโลหะหนักที่ดี โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีกว่าซิลิกาเจล และผงถ่านกัมมันต์

สมศักดิ์ และเสาวภา (2542) ได้ศึกษาความเข้มข้นของสารหนูและโลหะหนักในตะกอนและสัตว์น้ำจากทะเลสาบสงขลาตอนนอก โดยเก็บตัวอย่างผิวดิน 7 ตัวอย่าง จากทะเลสาบสงขลาตอนนอก 6 ตัวอย่าง จากคลองพะวง และ 8 ตัวอย่าง จากคลองอู่ตะเภา นำมาวิเคราะห์สารหนูทั้งหมด เหล็กในรูปออกไซด์อิสระ

และสารหนู เหล็ก แมงกานีส ทองแดง สังกะสี นิกเกิล ตะกั่ว โครเมียม และแคดเมียม ที่ละลายได้ในกรดเกลือความเข้มข้น 1 โมลาร์ ตัวอย่างร่วมของปลา กุ้ง หอย ที่เก็บจากแหล่งน้ำดังกล่าวนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุต่าง ๆ ผลการวิเคราะห์ตะกอนพบว่า ความเข้มข้นของธาตุต่าง ๆ ที่ศึกษาดังกล่าวระดับที่เป็นพิษ และไม่พบการสะสมอย่างมีนัยสำคัญ การสะสมของสารหนูมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความเข้มข้นของเหล็ก และไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนที่บ่งชี้การปนเปื้อนของสารหนูและโลหะหนักอื่นเนื่องมาจากของเสียชุมชนเมืองที่ทิ้งลงสู่ทะเลสาบ ความเข้มข้นของสารหนูในปลา กุ้ง และหอย ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ความเข้มข้นของโลหะหนักกุ้งและหอยสูงกว่าปลา ความเข้มข้นของสารหนูและโลหะหนักที่พบในสัตว์น้ำซึ่งจับได้ในพื้นที่ศึกษาอยู่ในระดับปกติ ดังนั้นการบริโภคสัตว์น้ำที่จับได้ในพื้นที่ดังกล่าวจึงถือว่าปลอดภัย

วารงคณาและคณะ (2543) ได้สำรวจปริมาณสารพิษ และโลหะหนักในแหล่งน้ำเพื่อการพักผ่อนหย่อนใจที่สำคัญที่อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 4 แหล่ง คือ บึงแก่นนคร บึงทุ่งสร้าง บึงหนองโคตร และบึงสีฐาน ผลการวิจัยพบว่าคุณภาพในแหล่งน้ำทั้ง 4 แหล่งมีการปนเปื้อนของสารมลพิษและโลหะหนัก โดยมีปริมาณสารแขวนลอย ปริมาณความสกปรกในรูปสารอินทรีย์และแคดเมียมสูงกว่ามาตรฐานแหล่งน้ำผิวดิน การปนเปื้อนในเดือนมกราคม พฤษภาคม และกันยายน มีปริมาณใกล้เคียงกันยกเว้นบึงหนองโคตรมีการปนเปื้อนปริมาณสารแขวนลอยมากในเดือนกันยายนซึ่งเป็นช่วงฤดูฝน

Fourest and Roux (1992) รายงานว่า พีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับนิกเกิลและสังกะสีโดย *Rhizopus arrhizus* คือ พีเอชที่เป็นกลาง แต่เมื่อค่าพีเอชลดลงความสามารถในการจับกับโลหะจะถูกยับยั้งมากขึ้น เนื่องจากเกิดการแข่งขันระหว่างไอออนของโลหะและโปรตอนในการจับกับเซลล์บริเวณผนังเซลล์ที่มีความจำเพาะในการดูดซับนั่นเอง

Aderhold et al. (1996) รายงานความสามารถในการดูดซับโลหะหนักโดยสาหร่ายทะเลชนิดต่าง ๆ 3 ชนิด ภายใต้สภาวะมาตรฐานของห้องปฏิบัติการ สาหร่ายสีน้ำตาล 3 ชนิดนี้ คือ *Ecklonia maxima*, *Lessonia flavicans*, *Durvillea potatorum* และอนุพันธ์ของสาหร่ายที่ผลิตทางการค้า คือ เส้นใยสาหร่ายและน้ำสาหร่าย แล้วเปรียบเทียบคุณสมบัติการแยกไอออนของทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียมในสภาวะสารละลายโดยอัตราการกวนคงที่ ผลจากการมีไอออนหลายตัวในน้ำจะทำให้การจับของไอออนเป็นแบบแข่งขัน และพบว่าความสามารถในการดูดซับสามารถใช้ได้ในระดับอุตสาหกรรม

Matheickal and Yu (1996) ศึกษาการดูดซับทางชีวภาพของตะกั่วในสภาวะสารละลายโดยสาหร่ายทะเล *Ecklonia radiata* พบว่า *E. radiata* สามารถดูดซับโลหะหนักตะกั่วได้ดีในช่วง pH 4.5 - 5.5 โดยสามารถดูดซับตะกั่วได้ 282 mg/g ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าผงถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์ธรรมชาติ การดูดซับตะกั่วนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH เพิ่มขึ้นจนถึง pH 5 การดูดซับจะคงที่ อัตราการดูดซับเป็นไปอย่างรวดเร็วในช่วงแรกภายใน 10 นาที (60%) ซึ่งอธิบายได้โดยใช้วิธี Continuous flow system

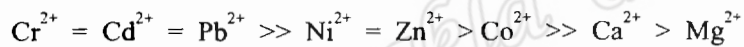
Chang et al. (1997) ศึกษาการดูดซับโลหะตะกั่ว ทองแดง และแคดเมียม โดยแบคทีเรีย *Pseudomonas aeruginosa* และสภาวะการดูดซับโลหะหนัก พบว่าเซลล์แบคทีเรียสามารถดูดซับโลหะตะกั่วได้ถึง 110 mg/g dry cell ที่ pH 5.5 และดูดซับทองแดง และแคดเมียมได้น้อยกว่า คือ ดูดซับทองแดง

วิไล
กมล
พูน
...

ได้ 23 mg/g (pH 5.0) และแคดเมียม 58 mg/g (pH 6.0) นอกจากนี้ปริมาณของปรอทที่อยู่ใน growth media (0-50 mg/L) พบว่าไม่มีผลต่อการดูดซับโลหะทั้งสามชนิด และ%recovery ของโลหะตะกั่ว ทองแดง และแคดเมียม เท่ากับ 98, 98 และ 82 ตามลำดับ

Matheickal และ Yu (1997) ศึกษาการดูดซับสารละลายตะกั่วโดยเชื้อรา *Phellinus badius* พบว่า *P. badius* ดูดซับโลหะหนักได้มากที่พีเอช 5 โดยดูดซับได้ 0.82 mmol/g ซึ่งสูงกว่า Activated carbon, Zeolite ธรรมชาติ และมวลชีวภาพอื่น ๆ ที่สภาวะคงที่ (Steady state) ซึ่งสามารถอธิบายการดูดซับด้วย Langmuir isotherm และพบว่า 10% ของการดูดซับตะกั่วเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะ ส่วนอีก 90% จะถูกดูดซับเร็วที่สุดในกระบวนการ fixed bed

Kim et al. (1999) ศึกษาการดูดซับโลหะตะกั่วโดยสาหร่ายสีน้ำตาลแกมเหลือง *Undaria pinnatifida* พบว่า หมู่เซลล์ที่อยู่บนพื้นผิวของ *U. pinnatifida* สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วได้ ซึ่งเซลล์ที่พบ (13.8% w/w) ทำให้บริเวณผนังเซลล์เป็นสีเหลือง *U. pinnatifida* สามารถดูดซับไอออนตะกั่วได้ประมาณ 1,000 mg/g โดยเกิดการสร้างพันธะระหว่างเซลล์เฟอร์กับโลหะได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนประเภทคาร์บอนิล และความสามารถในการดูดซับนี้จะแปรตามค่าพีเอช นอกจากนี้ *U. pinnatifida* ยังสามารถดูดซับโลหะอื่น ๆ เรียงตามลำดับ ดังนี้



Prince of Songkla University
Pattani Campus