บทที่ 1

บทนำ

ปัญหามลภาวะของโลหะหนัก มักจะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีการพัฒนาทางอุตสาหกรรม ซึ่งมีระบบการกำจัดของเสียต่าง ๆ ไม่ดีพอ โลหะหนักจึงได้แพร่กระจายเข้าสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น จนทำให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพและการดำรงชีวิตของมนุษย์ เช่น การเกิดโรค Itai-Itai และโรค Minamata ซึ่งเกิดจากการเปรอะเปื้อนแคดเมี่ยมและปรอทในร่างกายในปริมาณที่สูง (Walker, 1975)

ในประเทศไทย ป่าบริเวณสถานีวิจัยสิ่งแวดล้อมสะแกราช จังหวัดนครราชสีมา มีการเปรอะเปื้อนของโลหะหนักในน้ำและดินตะกอนในปริมาณที่ต่ำมาก นี่เป็นการเปรอะเปื้อนที่เกิดโดยธรรมชาติ แต่ในบริเวณอุตสาหกรรมมีการเปรอะเปื้อนของโลหะหนักเนื่องจากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอย่างเห็นได้ชัด (ชูจิตต์ เครือตราชู เกียรติอนันชัย 2523, อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ 2522) สุรพันธ์ บริสุทธิ์ (2522) ได้รายงานว่ามีการเปรอะเปื้อนของปรอทในน้ำและดินตะกอนจากโรงงานผลิตโซดาไฟ ซึ่งตั้งอยู่ในเขตอุตสาหกรรมพระประแดง นอกจากนี้ในบริเวณข้างถนนก็มีการเปรอะเปื้อนของตะกั่ว เนื่องจากมีการเติมสารประกอบตะกั่วลงในน้ำมันเบนซินประมาณ 0.6 – 0.67 กรัมต่อลิตร เพื่อป้องกันการกระตุกของเครื่องยนต์ หลังการสันดาปภายในเครื่องยนต์ ตะกั่วจะถูกปล่อยออกมาในรูปออกไซด์และเกลือ เข้าสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก (สุคนธ์ เจียสกุล, 2523) ต่อมาโลหะหนักต่าง ๆ ที่เปรอะเปื้อนในสิ่งแวดล้อมเหล่านี้จะถูกฝนชะล้างไหลลงสู่แม่น้ำ ทำให้มีปริมาณของโลหะหนักในน้ำและดินตะกอนสูงขึ้น (Menasveta, 1978) สิ่งมีชีวิตในน้ำจึงต้องเผชิญกับผลพิษของโลหะหนัก จนทำให้เกิดการสะสมขึ้นในเนื้อเยื่อของสัตว์ ทั้งชนิดที่มีกระดูกสันหลังและไม่มีกระดูกสันหลัง

(Menasveta & Cheevaparanapiwat, 1979 อรพินท์ จันทร์ผ่องแสง 2520, สิทธิพันธ์ ศิริรัตนชัย, 2522, กัลยา วัฒยากร และคณะ, 2522) การรับและสะสมโลหะหนักของสิ่งมีชีวิตนั้น ถ้ามีปริมาณเกินระดับหนึ่งก็จะเกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ในทันที การที่มีโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมในระดับต่ำ ก็อาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้ เพราะโลหะหนักบางชนิดมีพิษมากและสามารถถ่ายทอดไปตามขั้นของอาหาร โดยที่ความเข้มข้นจะสูงขึ้นไปเรื่อย ๆ (Menasveta, 1976)

หอยแมลงภู่ (Perna viridis (L.)) เป็นสัตว์ที่ประชาชนนิยมบริโภคชนิดหนึ่ง ซึ่งกินอาหารโดยวิธีกรอง (Bayne, 1976) และสามารถรับโลหะหนักจากสภาพแวดล้อมได้ Menasveta & Cheevaparanapiwat (1979) ได้ตรวจพบโลหะหนักบางชนิดโดยเฉพาะอย่างยิ่งตะกั่วในปริมาณที่สูงมาก ในหอยแมลงภู่ซึ่งเก็บได้จากบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาต่อไปในเรื่องขบวนการรับและสะสมโลหะหนักในหอยแมลงภู่ซึ่งอาศัยอยู่ในบริเวณดังกล่าว

วัตถุประสงค์

การวิจัยดังต่อไปนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษา

1. การรับโลหะหนัก (Cd, Cu, Pb, Zn) ตามขนาดของหอยแมลงภู่ (Perna viridis (L.)) ที่อาศัยอยู่ในบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา

2. การรับโลหะหนัก (Cd, Cu, Pb, Zn) ของหอยแมลงภู่ซึ่งอยู่ในระดับความลึกที่แตกต่างกัน

การศึกษาจากเอกสาร

ธรรมชาติของโลหะหนักในน้ำทะเล

น้ำจืดที่ไหลลงสู่ทะเลได้นำพาโลหะหนักเป็นจำนวนมาก เข้าสู่ระบบนิเวศน์ในทะเล โลหะหนักยังอาจถูกนำพาลงสู่ทะเลได้อีกรูปแบบหนึ่งคือ ถูกพัดพามากับลม (Schulz-Baldes & Iewin, 1976) โดยทั่วไปค่าเฉลี่ยของแคดเมี่ยม ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี ในมหาสมุทรจะมีค่า 0.05, 3, 0.03, 5 ppb ตามลำดับ (Bryan, 1976) Chester & Stoner (1974) พบว่าปริมาณแมงกานิส แคดเมี่ยม และสังกะสีในมหาสมุทรแอตแลนติคตอนใต้ และมหาสมุทรอินเดียมีค่าเท่ากัน ส่วนปริมาณของทองแดง และนิเกิลในมหาสมุทรอินเดียมีค่าสูงกว่า Zirino & Yamamoto (1972) พบว่าน้ำทะเลมีปฏิกริยาของ Cu กับ OH^-, CO_3^{2-}; Zn กับ OH^- ; Pb กับ CO_3^{2-} ; และ Cd กับ Cl^- ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ pH ของน้ำทะเล นอกจากนี้ไอออนของโลหะยังสามารถเข้าทำปฏิกริยาเป็นสารประกอบเชิงซ้อน เป็นสารประกอบอินทรีย์ หรือเข้ารวมกับวัตถุที่แขวนลอยในน้ำทะเลและถูกสะสมไว้ในแพลงค์ตอนพืช เช่น Ramamoorth & Kushner (1975) แสดงความสำคัญของ Fluvic acid และ Humic substance ในการเข้ารวมกับโลหะหนักในน้ำธรรมชาติในสหรัฐอเมริกาน้ำทะเลจากหลายบริเวณมีทองแดงอยู่รวมกับสารอินทรีย์ประมาณ 55.28 % ของทองแดงทั้งหมดในน้ำทะเล (Williams & Baldwin, 1969) ที่ British Isles ทองแดง แคดเมี่ยม ตะกั่ว และสังกะสี อยู่รวมกับวัตถุที่แขวนลอย 83, 18.3, 64, 44 เปอร์เซนต์ตามลำดับ (Preston, et. al., 1972) แม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างมีตะกั่วอยู่ในน้ำประมาณ 18.19 – 25.60 ppb ซึ่งรวมอยู่กับวัตถุแขวนลอยเสีย 85 %

(พิชาญ สว่างวงศ์, 2520) ปริมาณสังกะสีบริเวณ La Spezia อยู่ในรูป Zn^{++} ประมาณ 10 – 15 %, ในวัตถุที่แขวนลอยประมาณ 35 – 40 % และส่วนที่เหลือ 50 % รวมอยู่กับสารประกอบเชิงซ้อน

โลหะหนักกับแพลงค์ตอนพืช

โลหะหนักบางชนิดในน้ำทะเลเป็นธาตุที่แพลงค์ตอนพืชจำเป็นต้องใช้ใน metabolism แต่บางชนิดก็เป็นพิษ ในทะเล Sargasso ปริมาณนิเกิล แคดเมี่ยม และทองแดงที่บริเวณผิวน้ำ มีความเข้มข้นน้อยกว่าในน้ำที่อยู่ลึกลงไป เนื่องจากสิ่งมีชีวิตบริเวณผิวน้ำสามารถรวบรวมโลหะหนักเหล่านี้ไว้ในเนื้อเยื่อ และเมื่อตายลงก็จะทำให้โลหะหนักจมลงสู่พื้นทะเล โลหะทองแดงและนิเกิลจึงเป็น Limiting nutrients (Bender & Gagner, 1976)

Dinoflagellates มีทองแดงต่อหน่วยมวลชีวภาพมากกว่าสาหร่ายชนิดอื่น ๆ (Mandelli, 1969) Manahan & Smith(1973) พบว่าทองแดงเป็น micronutrient สำหรับสาหร่าย ดังนั้นในการเลี้ยงสาหร่าย Chlorella vulgaris และ Oocytis marssonii จึงต้องเติมทองแดงในปริมาณ 30 ug/l และ 40 ug/l ตามลำดับ ถ้าเติม chelating agents ลงไปในบริเวณที่เกิดปรากฏการณ์น้ำผุด (upwelling) จะทำให้แพลงค์ตอนพืชเจริญดีขึ้นเพราะทองแดงในน้ำที่อยู่ลึกลงไปอยู่ในรูป Cu^{++} ซึ่งเป็นพิษต่อการสังเคราะห์แสงและการเจริญของพวกสาหร่ายเซลเดียว ทองแดงที่ละลายอยู่ในน้ำทะเลส่วนมากอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน เช่น polypeptides (Barber & Ryther, 1969 ; Nielsent & Wium-Andersen, 1970) นอกจากนี้แพลงค์ตอนพืชสามารถปล่อยสารประกอบ

อินทรีย์ออกมาภายนอกเซล (Hellebust, 1965) ซึ่งเป็นกลไกหนึ่งในการลดความเป็นพิษของ Cu^{++} โดยเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง Cu^{++} กับสารอินทรีย์ (Williams & Baldwin, 1976) Davey, et. al., (1973) สามารถใช้การตอบสนองต่อ Cu^{++} ของแพลงค์ตอนพืช Thalassiosira pseudomana ในการหาปริมาณ chelating agents ในน้ำทะเล

น้ำทะเลบริเวณชายฝั่งของ Montesey Bay, California มีปริมาณแคดเมี่ยมลดลงในขณะที่มี productivity สูง (Knauer & Martin, 1973)

ตะกั่วมีผลต่อแพลงค์ตอนพืช เซลของแพลงค์ตอนพืชจะรับตะกั่วไว้ด้วยวิธี absorption (Schulz-Baldes & Lewin, 1976 ตะกั่วมีผลต่อการเจริญและทำให้ผลผลิตของไดอะตอม Skeletonema costatum (Grev), Chaeodatylum tricornutum และสาหร่ายสีเขียว Platymonas rubcordiformis ลดลง (Rivkin, 1976 ; Dayton & Lewin, 1975)

แพลงค์ตอนพืชในทะเลบริเวณใกล้ฝั่งจะรับสังกะสีที่มาจากแม่น้ำ (Skes & Boney, 1970) การรับสังกะสีของ Phaeodactylum sp. เกิดขึ้นในเวลา 19 ชั่วโมงแรก หลังจากการเติมสังกะสีลงในน้ำ จากนั้นก็จะปล่อยสังกะสีออกมาเนื่องจากตำแหน่งที่จะจับกับสังกะสีลดลง (Davies, 1973)

ชีววิทยาของหอยแมลงภู่

หอยแมลงภู่เป็นสัตว์ที่มีการแพร่กระจายในบริเวณ Littoral และ Sublittoral ของเขตร้อนและเขตอบอุ่น ทั้งซีกโลกเหนือและใต้ หอยแมลงภู่

มีหลายสกุล เช่น Mytilus edulis เป็นหอยแมลงภู่ที่ศึกษากันมาก มีการแพร่กระจายตามชายฝั่งมหาสมุทรแปซิฟิกและมหาสมุทรแอตแลนติค โดยมีอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดเขตการแพร่กระจาย หอยแมลงภู่ในประเทศไทยคือ Perna viridis (L.) เป็น species ที่แพร่กระจายในบริเวณอินโดแปซิฟิค Linnaeus พบและกล่าวถึงลักษณะของหอยแมลงภู่ชนิดนี้เมื่อ ค.ศ. 1758 โดยตั้งชื่อว่า Mytilus viridis ต่อมาเมื่อได้ศึกษาทางด้านอนุกรมวิธาน จึงได้เปลี่ยนชื่อเป็น Mytilus smaragdinus Chemnitz, Mytilus opalus, Chloromya viridis (L.), Perna viridis (L.) ชื่อทั้งหมดนี้เป็น Synonyme กัน (Siddal, 1980) ลักษณะโดยทั่วไปของหอยแมลงภู่ Perna viridis (L.) คือมีเปลือกยาวเป็นรูปไข่ เปลือกทั้งสองข้างมีขนาดเท่ากัน ยึดติดกันตรงปลายด้านหน้า สีเปลือกด้านนอกสีเขียวเข้มและมีสีน้ำตาลแก่ปนเล็กน้อย บนเปลือกจะมีลายเป็นวงซ้อนกัน เปลือกด้านในมีสีขาว สังเกตเห็นรอยยึดติดของกล้ามเนื้อที่ใช้เปิดปิดฝาได้อย่างชัดเจน ระหว่างเปลือกด้านในทั้งสองข้างเป็นเนื้อเยื่อหอย หอยแมลงภู่เป็นสัตว์ที่อยู่กับที่ เมื่อตัวโตขึ้นตัวหอยจะผลิตเส้นใยสำหรับยึดเกาะ แต่มันก็สามารถเคลื่อนไหวตัวเพื่อจัดตำแหน่งให้เหมาะสมได้ หอยแมลงภู่มีคุณค่าทางอาหาร โดยประกอบด้วยโปรตีน 12 % ไขมัน 2 % ไวตามินและแร่ธาตุต่าง ๆ (Havinga, 1964)

การเลี้ยงหอยแมลงภู่ในประเทศไทยมีอยู่ตามจังหวัดชายทะเล เช่น สมุทรปราการ สมุทรสาคร สมุทรสงคราม และชลบุรี โดยปล่อยให้ลูกหอยแมลงภู่เข้าเกาะกับเสาโป๊ะ หอยแมลงภู่จะวางไข่ปีละ 2 ระยะ คือ ยายน – พฤศจิกายน และกุมภาพันธ์ – มีนาคม ตัวอ่อนของหอยจะล่องลอยไปตามกระแสน้ำ เติบโตและวิวัฒนาการจนอยู่ในขั้น Veliger ซึ่งใช้เวลาตั้งแต่เริ่มผสมพันธุ์ถึงระยะนี้ประมาณ 12 วัน (Hin, 1973) แล้วจึงลงเกาะกับเสาไม้ไผ่หรือวัตถุที่เหมาะสมอื่น ๆ จนกระทั่งหอยอายุประมาณ 8 เดือน ก็จะได้

ขนาดที่ส่งขายได้ ได้มีผู้พยายามทดลองหาวิธีเพาะเลี้ยงหอยแมลงภู่ เพื่อเพิ่มผลผลิต และให้มีกำไรมากที่สุด (ไพโรจน์ พรหมานนท์, 2519, บรรจง เทียนส่งรัศมี, 2520, ประดิษฐ์ ชมชื่นชอบ และคณะ, 2522, ประดิษฐ์ ชมชื่นชอบ, 2523, Tortell, et. al., 1978)

การเจริญเติบโตของหอยแมลงภู่ มีความสัมพันธ์กับอายุของหอยและอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมบริเวณใดมีอาหารอุดมสมบูรณ์ หอยจะกรองกินและเจริญเติบโตเร็ว ปราณี เนียมทรัพย์ (2518) พบว่าการใช้สาหร่ายสีเขียว Chlorella sp. เป็นอาหารเลี้ยงหอยแมลงภู่ ไม่ให้ผลที่แตกต่างกันและไม่ทำให้หอยแมลงภู่มีการเจริญเติบโตดีไปกว่าในสภาพธรรมชาติ เพราะหอยแมลงภู่ได้รับอาหารหลายชนิด

ความเค็มมีผลต่อการดำรงชีวิตของ M. viridis โดยมีค่า Lc_{50} ของความเค็มที่ 24 ppt และ 80 ppt ในเวลา 9 วัน และจะตายหมดที่ความเค็ม 10 ppt และ 70 ppt ในเวลา 96 ชั่วโมง, ที่ 0 ppt และ 84 ppt ในเวลา 60 ชั่วโมง (ปราณี, เนียมทรัพย์, 2518, Sivalingam, 1977) การลดความเค็มจะทำให้หอยแมลงภู่มีการกรองกินลดลง มีผลให้การเจริญเติบโตลดลงด้วย Bøhle (1972) พบว่าความเค็มมีต่อการกรองกินมากกว่าอุณหภูมิ เมื่อความเค็มเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว หอยแมลงภู่จะปิดเปลือกน้ำและอาหารก็ไม่สามารถผ่านเข้าออกได้ แต่ถ้าการเปลี่ยนแปลงความเค็มเป็นไปอย่างช้า ๆ หอยแมลงภู่สามารถรักษาความสมดุลย์ของแรงดันออสโมติกโดยการปล่อยกรดอมิโน (Gilles, 1972)

การใช้หอยแมลงภู่เป็นสิ่งมีชีวิตบ่งชี้สภาพมลภาวะของโลหะหนัก

การประเมินมลภาวะของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม เพื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับบริเวณอื่น ๆ อาจทำได้หลายวิธี เช่น การวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำ, ดินตะกอน, และสิ่งมีชีวิต การวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำเป็นวิธีที่เสียค่าใช้จ่ายสูง เพราะต้องใช้ตัวอย่างปริมาณมากและมีตัวการหลายประเภทที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะในน้ำอยู่เสมอ เช่น ฤดูกาล กระแสน้ำ น้ำขึ้นน้ำลง เป็นต้น การใช้ตะกอนเป็นตัวอย่างในการวิเคราะห์มักมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง เนื่องจากอัตราการตกตะกอนของวัตถุที่แขวนลอยในสถานที่แต่ละแห่งไม่เท่ากัน การใช้สิ่งมีชีวิตเป็นตัวบ่งชี้สภาพมลภาวะของโลหะหนักในทะเลให้ผลได้ดีกว่า เพราะไม่เพียงแต่สิ่งมีชีวิตจะรับโลหะหนักจากมวลน้ำเท่านั้น แต่จะเป็นตัวรวบรวมโลหะหนักบริเวณนั้นในช่วงเวลาที่ศึกษา จึงเป็นผลให้ระดับความเข้มข้นของโลหะหนักในเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต มากกว่าความเข้มข้นในน้ำทะเลถึง $10^3 - 10^6$ เท่า ทำให้สามารถวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักได้โดยตรง (Phillips 1976, 1977) Butler et. al., (1971), Haug, et. al., (1974) ได้รวบรวมคุณสมบัติของสิ่งมีชีวิตที่อาจใช้เป็นตัวบ่งชี้สภาพมลภาวะของสิ่งแวดล้อมในทะเลดังนี้

1. เป็นสิ่งมีชีวิตที่สะสมสารมลพิษโดยไม่ตายในระหว่างที่ศึกษา
2. เป็นสิ่งมีชีวิตเป็นตัวแทนในบริเวณพื้นที่ที่เก็บ
3. เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีอย่างชุกชุมในบริเวณที่ศึกษา
4. เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีอายุยืนพอควร เช่น มีช่วงชีวิตตลอดปี
5. เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดพอสมควร มีเนื้อเยื่อเพียงพอที่จะใช้ในการศึกษา
6. เป็นสิ่งมีชีวิตที่ถูกสุ่มตัวอย่างได้ง่าย และแข็งแรงพอที่จะนำกลับมาศึกษาในห้องปฏิบัติการ

7. เป็นสิ่งมีชีวิตที่ต้องทนต่อน้ำกร่อย

8. เป็นสิ่งมีชีวิตที่จะแสดงความเข้มข้นของสารพิษสูง เพื่อที่จะศึกษาได้โดยตรงโดยไม่ต้องทำ pre-concentration

9. เป็นตัวสหสัมพันธ์ระหว่างสารพิษในเนื้อเยื่อกับค่าเฉลี่ยของสารพิษในบริเวณนั้น

10. สิ่งมีชีวิตทั้งหมดต้องมีสหสัมพันธ์อย่างเดิม ระหว่างสารพิษในเนื้อเยื่อกับในน้ำโดยรอบทุกสถานที่และภายใต้สภาวะทุกสภาพ

หอยทะเลหลายชนิดมีปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักสูงกว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำทะเล (Segar, et. al., 1977 ; Bertine & Goldberg, 1972) สำหรับหอยแมลงภู่นั้นได้เริ่มใช้เป็นสิ่งมีชีวิตที่บ่งชี้มลภาวะของสารกัมมันตรังสีของโลหะหนักในทะเล ซึ่งเปรอะเปื้อนเนื่องจากการทดลองระเบิดปรมาณู และได้ใช้กับโลหะหนักที่ไม่เป็นสารกัมมันตรังสีในเวลาต่อมา (Bryan, 1973 ; Schulz-Baldes, 1973 ; Pentreath, 1973 ; Chow, 1976 ; Phillips, 1978).

Goldberg (1975) ได้เสนอให้มีการใช้หอยแมลงภู่เป็นตัวบ่งชี้มลภาวะทั่วโลก Simpson (1979) ได้ยืนยันว่าหอยแมลงภู่มีความเหมาะสมจริง เนื่องจากมีการแพร่กระจายกว้างขวางง่ายต่อการรวบรวมตัวอย่าง กินอาหารโดยวิธีการกรอง และระดับของโลหะหนักในเนื้อเยื่อมีความสัมพันธ์กับระดับของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม Bayne (1976) พบว่าการสะสมโลหะหนักของหอยแมลงภู่เป็นผลจากการตอบสนองด้านชีวเคมีและสรีรของหอยแต่ละตัวต่อสภาพแวดล้อมทางกายภาพของระบบนิเวศนั้น

การรับโลหะหนักของหอยแมลงภู่

การรับโลหะหนักของหอยทะเลมี 3 วิธี (Brook, 1965) คือ

1. จากสารละลายในรูปของไอออนและสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะหนักในน้ำทะเล

2. จากการกรองกินวัตถุที่แขวนลอยในน้ำทะเล

3. จากอาหารที่ได้เพิ่มความเข้มข้น (Preconcentration) ของโลหะหนักสูงขึ้นมากกว่าสิ่งแวดล้อม เช่น แพลงค์ตอน

Simpson (1979) รายงานว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณของโลหะหนักในเนื้อเยื่อได้แก่ สิ่งแวดล้อม และการเปลี่ยนแปลงของตัวสัตว์เอง ต่อไปนี้จะเป็นการอธิบายถึงผลของตัวการต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการรับและการสะสมโลหะหนักในหอยแมลงภู่

1. ปริมาณโลหะหนักในน้ำทะเล

น้ำทะเลเป็นตัวกลางที่นำโลหะหนักมาสู่หอยแมลงภู่ Bertine (1972) วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในเปลือกหอยแมลงภู่ที่เก็บไว้ในพิพิธภัณฑ์ พบว่าในช่วง 100 ปีที่ผ่านมาองค์ประกอบของน้ำทะเลไม่เปลี่ยนแปลง ปริมาณตะกั่วและแคดเมี่ยมในชั้น Periostracum ของเปลือกหอยแมลงภู่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำทะเลสูงขึ้น (Sturesson 1976, 1978) การรับทองแดง แคดเมี่ยม และสังกะสี เข้าไปสะสมในเนื้อเยื่อของ M. viridis L. มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับเวลาที่อยู่กับโลหะหนัก (D' Silva & Kureishy, 1978 ; George & Coombs, 1977)

Ritz (1982) พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรับโลหะหนักของ M. edulis กับเวลาเป็นเส้นตรงและใช้ผลนี้ประมาณปริมาณโลหะหนักในน้ำทะเล ได้สะดวกกว่าการหาปริมาณโลหะหนักในน้ำทะเลโดยตรง และพบว่าเมื่อนำหอยแมลงภู่จากแหล่งอื่นมาเลี้ยงในน้ำทะเลที่ต้องการหาปริมาณโลหะหนักเป็นเวลา 40 วัน ก็จะหาปริมาณโลหะหนักในน้ำทะเลได้ แต่มีข้อจำกัดคือ อุณหภูมิ ความเค็ม และปริมาณโลหะหนักในน้ำทะเลต้องไม่เปลี่ยนแปลง

สัตว์ทะเลต่าง ๆ สามารถสะสมโลหะหนักได้ต่างกันเช่น Artemia salina สามารถสะสมแคดเมี่ยมจากอาหารที่กินได้มากกว่า จากรูปของสารละลาย แสดงว่า ชั้นของอาหารมีความสำคัญในการสะสมแคดเมี่ยม (Jennings & Rainbow, 1979) M. edulis และ Balanus balanoids มีกลไกการกินอาหารคล้ายคลึงกันและพบอยู่ในบริเวณเดียวกัน แต่ B. balanoids สะสมสังกะสีได้มากกว่า M. edulis แสดงให้เห็นว่าสัตว์ต่างชนิดกันสามารถสะสมโลหะหนักได้ต่างกัน (Ireland, 1973) หอยแมลงภู่ M. edulis ขนาดเล็กจะกินอาหารได้มากกว่าและต้องการออกซิเจนมากกว่าหอยแมลงภู่ขนาดใหญ่ (Thompson & Bayne, 1974) ทำให้คาดว่าหอยขนาดเล็กจะรับโลหะหนักมากกว่าหอยขนาดใหญ่

Phillips (1978) พบว่า M. edulis บริเวณชายฝั่ง Swedish west มีโลหะหนักสะสมอยู่มากโดยผ่านทางชั้นของอาหาร Schulz-Baldes (1974) พบว่า M. edulis สามารถรับตะกั่วจากสารละลายและจาก Dunalliella marina ซึ่งใช้เป็นอาหารได้เท่ากับที่ความเค็ม 25 ‰ และความเข้มข้นของตะกั่วในเนื้อเยื่อมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับเวลาที่ได้รับตะกั่ว โดยที่อัตราการรับตะกั่วเข้าไว้ในเนื้อเยื่อมากกว่าอัตราการกำจัดออกเป็นผลให้มีการสะสมอย่างถาวร

2. สถานที่

เมื่อใช้หอยแมลงภู่เป็นสิ่งมีชีวิตที่บ่งชี้มลภาวะของโลหะหนักในทะเลนั่นคือ ปริมาณของโลหะหนักในเนื้อเยื่อจะต้องมีความสัมพันธ์กับปริมาณโลหะหนักในสถานที่นั้น เช่น Chow (1976) ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณตะกั่วในสัตว์ทะเลหลายชนิดบริเวณชายฝั่งแคลิฟอร์เนีย พบว่ามีตะกั่วอยู่ในช่วง 0.014 – 15 ppm ปริมาณตะกั่วนี้ขึ้นอยู่กับสถานที่ที่สัตว์อยู่ Phillips (1976) Popham, et. al., (1980) ศึกษาปริมาณแคดเมี่ยม ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี ใน M. edulis บริเวณอ่าว Port Phillip เทียบกับที่ตั้งของแหล่งที่ปล่อยโลหะหนักลงสู่ทะเล พบว่าปริมาณโลหะหนักที่สะสมในหอยแมลงภู่สูงในบริเวณที่ปล่อยโลหะหนักลงสู่ทะเล ยกเว้นทองแดง เพราะปริมาณการสะสมในหอยแมลงภู่แปรปรวนมาก Phillips (1978) พบว่าชายฝั่งด้านตะวันออกของประเทศสวีเดนมีมลภาวะของตะกั่วอย่างมากเมื่อเทียบกับที่อื่น ๆ ทั่วโลก

3. ความเค็มและอุณหภูมิ

การรับแคดเมี่ยมของ M. edulis, Mya arenaria เพิ่มขึ้นที่ความเค็มต่ำและอุณหภูมิสูง (Jackim, et. al., 1977) ความเค็มที่มากกว่า 25 ppt จะไม่มีผลต่อองค์ประกอบของเปลือกหอย (Pilkey & Goodel, 1963) Phillips (1976) พบว่าความเค็มในช่วง 15 – 35 ppt และอุณหภูมิ 10 – 18 °ซ ไม่มีผลต่อการรับสังกะสีของ M. edulis เมื่อลดความเค็มลงหรือลด osmolarity ทำให้การรับแคดเมี่ยมมากขึ้น (George, et. al., 1977) Ireland (1973) พบว่า M. edulis ที่บริเวณอ่าว Cardigan Wales มีปริมาณสังกะสีภายในเนื้อเยื่อมากกว่าบริเวณใกล้เคียง เพราะมีอิทธิพลของน้ำจืดจากแม่น้ำมาเกี่ยวข้องซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Phillips (1977)

4. ฤดูกาล น้ำหนัก และขนาด

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณน้ำที่ไหลลงทะเล มีความสัมพันธ์กับน้ำหนักหอยในทางทฤษฎีการเก็บตัวอย่างหอยในช่วงเวลาเดียวกันของแต่ละปี จะลดการผันแปรของปริมาณโลหะหนักในเนื้อเยื่อหอยเนื่องจากฤดูกาล M. edulis จะมีน้ำหนักแห้งต่อตัวสูงที่สุดในฤดูร้อนและฤดูใบไม้ร่วง หลังจากนั้นจะลดลงตลอดฤดูหนาว และมีน้ำหนักตัวน้อยที่สุดในฤดูใบไม้ผลิการสูญเสียน้ำหนักในฤดูหนาวเนื่องจากการใช้คาร์โบไฮเดรทและการลดลงของโปรตีนและไขมัน (Dare & Ewards, 1975) Simpson (1979) และ Cossa, et. al., (1979) พบว่าการรับและสูญเสียโลหะหนักใน M. edulis เป็นผลมาจากน้ำหนักนั้นเนื่องจากวัฏจักรของการสืบพันธุ์ Phillips (1976, 1977) พบความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงของ log น้ำหนักของ M. edulis กับความเข้มข้นของโลหะหนักในเนื้อเยื่อ Boyden (1974, 1977) เปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักใน M. edulis กับน้ำหนักเนื้อเยื่อของหอยแต่ละตัว ได้ค่า Regression Coefficients ของสังกะสี ตะกั่ว ทองแดง เหล็ก ประมาณ 0.75 และสำหรับแคดเมี่ยม

ขนาดของเปลือกหอยมีความสัมพันธ์กับอายุและน้ำหนัก ประดิษฐ์ ชมชื่นชอบ (2523), Hin (1973) แสดงสมการเส้นตรงของความยาวเปลือกกับน้ำหนักเนื้อเยื่อ และความยาวเปลือกกับน้ำหนักรวม (เปลือก + เนื้อเยื่อ) พบว่าเมื่อเปลือกยาวขึ้นน้ำหนักเนื้อเยื่อและน้ำหนักรวมเพิ่มขึ้น Schulz-Baldes (1973) พบว่า M. edulis ที่มีความยาวเปลือก 15, 25, 35 มม. จะมีปริมาณตะกั่วแตกต่างกัน 10 – 20 % และหอยแมลงภู่ขนาดเล็กจะมีปริมาณตะกั่วต่อน้ำหนักตัวมากกว่าหอยแมลงภู่ขนาดใหญ่ แต่ Chow, et. al., (1976) ไม่พบ

ความสัมพันธ์เช่นนี้ Latouche & Mix (1982) พบว่าในการทำความสะอาด M. edulis ด้วยน้ำทะเลที่สะอาดก่อนส่งสู่ตลาดนั้น หอยแมลงภู่ขนาดใหญ่จะมีนิเกิลทองแดง และแคดเมี่ยมในเนื้อเยื่อร่างกายสูง ในขณะที่หอยแมลงภู่ขนาดเล็กมีแมงกานิสในเนื้อเยื่อร่างกายสูง และไม่พบความแตกต่างของปริมาณโลหะหนักในอวัยวะสืบพันธุ์ของหอยทั้งสองขนาด

5. ความลึกของน้ำ

Nielsen (1974) วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักใน Perna canaliculus ที่ระดับความลึกต่าง ๆ กัน โดยใช้หอยแมลงภู่ที่เลี้ยงด้วยวิธีแขวนกับทุ่น เก็บตัวอย่างทุก ๆ ความลึก 1 เมตร พบว่าที่ Kenepuri Sound เมื่อความลึกเพิ่มขึ้นปริมาณแคดเมี่ยมและตะกั่วเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณสังกะสีลดลง ส่วนที่ Waiheke Island นั้นพบว่าไม่มีความสัมพันธ์กับความลึก Edanhouse & Young (1978) ไม่พบความสัมพันธ์ของปรอทกับความลึกใน Mytilus californianus จากบริเวณตะวันตกเฉียงเหนือของ Los Angeles Phillips (1976) ได้ศึกษาปริมาณของโลหะหนักใน M. edulis ซึ่งอาศัยอยู่ในบริเวณที่มีโรงไฟฟ้า พบว่า ความลึกไม่เกิน 3 เมตร มีปริมาณโลหะหนักมากกว่าในหอยที่อยู่ลึกลงไป

6. เพศ

ในเขตร้อน หอยแมลงภู่ขนาดเล็กมักจะเจริญเติบโตถึงขั้นเจริญพันธุ์ (sex mature) เร็ว Alexander & Young (1976) พบว่า

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

M. californianus ต่างเพศกัน มีปริมาณของทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี ในอวัยวะสืบพันธุ์ต่างกัน อัตราส่วนของปริมาณโครเมี่ยม นิเกิล และเงินในตัวผู้ต่อตัวเมีย เป็น 0.5, 1.7, 0.6 ตามลำดับ Latouche, et. al., (1982) พบว่า M. edulis ตัวเมียมีปริมาณแมงกานิสและสังกะสีในอวัยวะสืบพันธุ์สูงกว่าในเนื้อเยื่อร่างกาย แต่ปริมาณแคดเมี่ยมในเนื้อเยื่อร่างกายสูงกว่าในอวัยวะสืบพันธุ์ Orren (1980) พบว่าในฤดูใบไม้ผลิ ความเข้มข้นของโลหะหนักใน Choromytilus meridionalis เพิ่มขึ้นทั้งในตัวผู้และตัวเมียดังนี้คือ

ตัวผู้	ทองแดง เหล็ก ตะกั่ว	(ระดับนัยสำคัญ 99%)
	แมงกานีส	(ระดับนัยสำคัญ 95%)
ตัวเมีย	เหล็ก ตะกั่ว	(ระดับนัยสำคัญ 99%)
	ทองแดง สังกะสี	(ระดับนัยสำคัญ 95%)

การที่หอยแมลงภู่เพศผู้และเพศเมียมีการสะสมโลหะหนักได้ไม่เท่ากันจะมีความสำคัญต่อการใช้หอยแมลงภู่เป็นตัวบ่งชี้มลภาวะของโลหะหนัก ถ้าอัตราส่วนระหว่างตัวผู้กับตัวเมียไม่เท่ากับ 1 Hin (1973) พบว่า M. viridis มีอัตราส่วนระหว่างตัวผู้ต่อตัวเมียเท่ากับ 1 ต่อ 1.03 นั่นคือจำนวนหอยตัวผู้เท่ากับตัวเมีย

ผลของโลหะหนักต่อหอยแมลงภู่

โลหะหนักหลายชนิดเป็นธาตุที่จำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต มักจะอยู่รวมกับโปรตีนเพื่อทำหน้าที่เป็นเอนเซม์ สารขนถ่ายออกซิเจนในเลือดเป็นต้น น้ำทะเลมีโลหะหนักละลายอยู่หลายชนิด ดังนั้นสัตว์ทะเลจึงไม่แสดงอาการขาดธาตุเหล่านี้ Pequegnat, et. al., (1969) พบว่าสัตว์ทะเลต้องการสังกะสีประมาณ 2.7 ppm ต่อน้ำหนักสด

007153

สำหรับเป็นองค์ประกอบในเอนไซม์ Scott & Major (1972) กล่าวว่าทองแดงเป็นธาตุที่สำคัญสำหรับหอยแมลงภู่เพราะเป็นส่วนประกอบของโปรตีนในเลือด (Haemocyanin)

โลหะหนักบางชนิดเช่น ปรอท แคดเมี่ยม ไม่เป็นธาตุที่จำเป็นต่อสัตว์ ความเป็นพิษของโลหะหนักต่อหอยแมลงภู่เมื่อพิจารณาจากค่า Lc_{50} พบว่า ปรอท แคดเมี่ยม ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว หอยแมลงภู่สามารถรับรู้ Cu^{++} ได้โดยปิดเปลือกเมื่อเติม Cu^{++} ลงในน้ำทะเล ในขณะที่ความเค็มยังมีค่าเท่าเดิม อัตราการกรองของหอยมีความสัมพันธ์กับตัวประกอบหลายอย่างเช่น ความเค็มและอุณหภูมิ (Abel, 1976) การเติม Cu^{++} 500 ppm ลงไปในน้ำจะมีผลไปหยุดการเคลื่อนไหว cilia ของ M. edulis ในเวลา 1 – 2 ชั่วโมง (Brown & Newell, 1972) นอกจากนี้ยังทำให้การใช้ออกซิเจนลดลงอีกด้วย (Scott & Major, 1972) การตายของหอยแมลงภู่ Mytilus galloprovincialis (Lamark) ที่ La Spezia, Italy ไม่ทราบสาเหตุแน่นอน แต่บริเวณนั้นมีออกซิเจนในน้ำลดลง BOD สูง และทองแดงในตะกอนกลับขึ้นมาแขวนลอยในน้ำ (Collinson & Rees, 1978) Hrs-Brenko (1977) พบว่าอุณหภูมิและความเค็มในสภาพธรรมชาติบริเวณชายฝั่ง Northern Adriatic sea ทำให้พิษของตะกั่วต่อการเจริญเติบโตของตัวอ่อน M. galloprovincialis มีค่าน้อยที่สุด การเติมโลหะหนักลงในน้ำทะเลทำให้การสร้าง Byssal thread ลดลง ลำดับความเป็นพิษเป็นไปดังนี้คือ ปรอท > ทองแดง > แคดเมี่ยม > สังกะสี > ตะกั่ว > โครเมี่ยม > (Winkle, 1970 ; Martin, et. al., 1975)

กลไกและเมตาโบลิซึมของหอยแมลงภู่ที่มีต่อโลหะหนัก

การสะสมโลหะหนักในหอยแมลงภู่ขึ้นอยู่กับการรับโลหะหนัก การขนถ่ายไปสู่อวัยวะอื่น ๆ ที่ไม่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอกโดยตรง การกำจัด ซึ่งมีทั้งการขับโลหะหนักออกจากร่างกาย และการกำจัดพิษของโลหะหนักภายในร่างกาย โลหะหนักในรูปสารละลายอาหารที่หอยแมลงภู่ได้รับจะเข้าไปสะสมในเนื้อเยื่อของอวัยวะต่างกัน เพราะกลไกอัตราการรับและวิธีการเก็บโลหะหนักแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน (Pentreath, 1973 ; Schulz-Baldes, 1974 ; George & Coombs, 1977) เช่น M. edulis

อัตราการรับตะกั่วจากสารละลายพบใน Kidney >>> Gills > Adductor muscle >> Digestive gland >> Foot >>> Mantle

อัตราการกำจัดตะกั่วที่ได้รับจากสารละลายพบใน Kidney >>> Adductor muscle > Digestive gland > Gills >> Foot > Mantle

อัตราการรับตะกั่วจากอาหารพบใน Kidney >>> Gills > Digestive gland > Adductor muscle >>> Foot > Mantle

อัตราการกำจัดตะกั่วที่ได้รับจากอาหารพบใน Kidney >>> Digestive gland >> Adductor muscle > Foot > Gills > Mantle

หมายเหตุ > หมายถึง 1 – 2 เท่า,
>> หมายถึง 2 – 3 เท่า
>>> หมายถึง 3 เท่าขึ้นไป

ปริมาณความเข้มข้นสัมพัทธ์ของโลหะหนักในอวัยวะต่าง ๆ (> หมายถึง มากกว่า)

ทองแดง : Mantle > Stomach and Digestive gland > Gonad > Foot > Gills > Adductor muscle

สังกะสี : Stomach and Digestive gland > Adductor musele > Gonad > Mantle > Gills > Foot

ปริมาณโลหะหนักในอวัยวะที่สัมผัสกับน้ำเปลี่ยนแปลงได้ง่ายเช่น Chow, et. al., (1976) พบว่าตะกั่วมีปริมาณมากที่สุดที่ Gills ในขณะที่ Sivalingam & Bhaskaran (1980) พบว่าตะกั่วมีปริมาณมากที่สุดที่ Mantle

Coombs & George (1977) สรุปว่าเนื้อเยื่อของสัตว์ทะเลรับโลหะหนักเข้าไว้แล้วก็มีการสร้างถุงเล็ก ๆ ในเซลล้อมรอบโลหะหนักที่อยู่ภายใน เพื่อป้องกันไม่ให้สิ่งมีชีวิตสัมผัสกับโลหะในปริมาณที่เกินกว่าประสิทธิภาพของกลไกการลดความเป็นพิษ หรือเพื่อส่งไปยังเนื้อเยื่ออื่น และได้เสนอวิธีการขนถ่ายโลหะหนักภายในร่างกายของสัตว์ทะเลดังนี้ (รูปที่ 1)

ก. ผ่านเยื่อหุ้มเซลทาง ionophores

ข. โลหะหนักที่อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน ผ่านเยื่อหุ้มเซลเข้าไปโดยตรง

ค. โลหะหนักที่อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน มีการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวที่เยื่อหุ้มเซลแล้วจึงผ่านเยื่อหุ้มเซลเข้าไป

ง. สารมลพิษจะรวมตัวกับสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ แล้วจึงผ่านเข้าภายในไซโตพลาสซึม

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Noel - Lambot (1976)รายงานว่า M. edulis สามารถกำจัดแคดเมี่ยมโดยโปรตีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำจาก cytosol สามารถจับกับแคดเมี่ยมได้ Coombs & George (1977)พบว่าการใช้สารประกอบเชิงซ้อน Cd-EDTA จะเพิ่มอัตราการรับแคดเมี่ยมใน M. edulis เป็น 2 เท่า แคดเมี่ยมที่รับเข้ามาส่วนมากอยู่ในไต อัตราการกำจัดแคดเมี่ยมออกช้ากว่าการรับถึง 18 เท่า เพราะแคดเมี่ยมรวมตัวกับ Thionein เป็น Metallothionein ซึ่งเป็นวิธีกำจัดพิษของแคดเมี่ยมในเนื้อเยื่อ และพบแคดเมี่ยมกระจายอยู่ในไซโตพลาสซึมโดยไม่อยู่ในถุงเล็ก ๆ (Membrane Bound Vesicle) Coombs & Pirie (1979) พบว่า 85 % ของ Cd^{2+} อยู่รวมกับโครงสร้าง (Membrane - Limited Granularโครงสร้างนี้ประกอบด้วยกำมะถันและฟอสฟอรัส และไอออนและโลหะ Ca^{2+}, Fe, Zn^{2+} และ metallothionein ซึ่งสามารถลดความเป็นพิษของแคดเมี่ยมที่มีต่อเซล

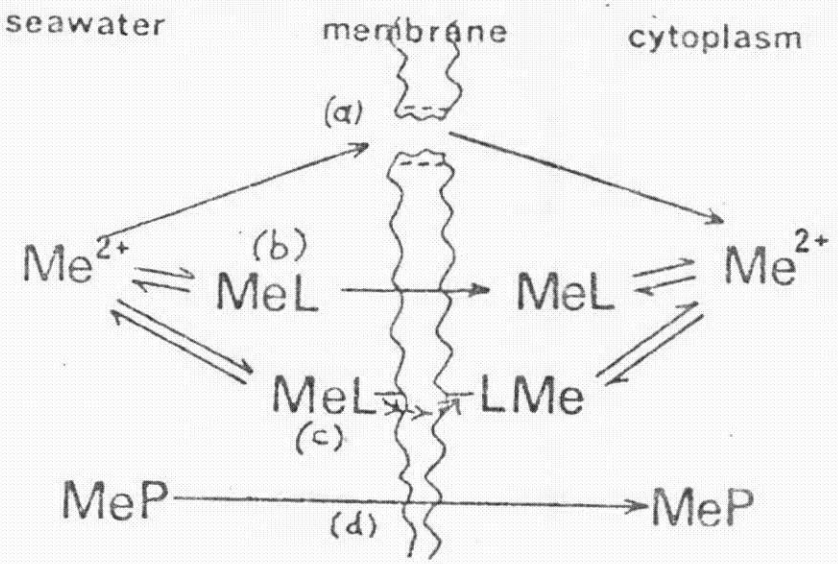
Keckes, et. al., (1968) ศึกษา M. galloprovincialis ที่รับ Zn^{65} ไว้ในตัว เมื่อนำไปเลี้ยงในน้ำสะอาดพบว่าอัตราการปล่อย Zn^{65} ออกจากเปลือกเร็วกว่าจากเนื้อเยื่อ อัตราการปล่อย Zn^{65} ขึ้นอยู่กับเวลาที่ได้รับ Zn^{65} ซึ่งจะเร็วในระยะแรก แสดงให้เห็นว่า Zn^{65} ถูกปล่อยออกจาก Multicompartment Lowe & Moore (1979) พบว่า การกระจายของ Zn^{2+} ในเซล M. edulis ทั้งสองเพศต่างกันกล่าวคือหอยแมลงภู่ตัวผู้จะมีปริมาณ Zn^{2+} ในไตมากกว่าตัวเมีย และหอยตัวเมียสามารถกำจัด Zn^{2+} ออกทางไข่ได้อีกทางหนึ่งและการลดความเป็นพิษจะเกิดขึ้นใน Lysosomal-Vacuolar system

George & Pirie (1979, 1980) ศึกษาการรับ การขนถ่าย การเก็บสะสมและการกำจัดสังกะสีใน M. edulis (รูปที่ 3) พบว่าการสะสมในเนื้อเยื่อเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นในน้ำทะเล ในขณะที่ความเข้มข้นในน้ำเลือดต่ำกว่าความเข้มข้นใน

สิ่งแวดล้อมเล็กน้อย การรับนั้นจะกระทำโดยผ่านทางท่อทางเดินอาหาร เยื่อหุ้มตัวหอย และเหงือก จากนั้นมีการขนส่งจากเหงือกและท่อทางเดินอาหาร ($t_{\frac{1}{2}}$ ~ 8 วัน) ผ่านไปยังไตทางเลือด โดยเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น หรืออยู่ในเซลที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (Amoebocyte) สังกะสีส่วนใหญ่จะอยู่ในเซลรูปร่างไม่แน่นอนในท่อทางเดินอาหารและในไต ที่ไตนั้นพบว่าเป็นอวัยวะที่มีการสะสมโลหะหนักหลายชนิด โดยมีสังกะสีอยู่ถึง 30 % ของสังกะสีในร่างกายที่ความเข้มข้นประมาณ 1,000 $\mu g/g$ สังกะสีที่พบอยู่ในลักษณะของก้อนแข็งที่ไม่ละลายน้ำในถุงเล็ก ๆ ที่มีเยื่อหุ้มล้อม (Membrane Limited vesicle) ซึ่งมี 20 % ของปริมาตรเซล การกำจัดสังกะสีทำได้โดยการขับถ่ายออกมาในรูปอุจจาระ (Defaecation), ขับถ่ายผ่านทางไตปนกับปัสสาวะและในรูปของเซลที่มีรูปร่างไม่แน่นอน

Schulz-Baldes (1977) รายงานว่า M. edulis รับตะกั่วเข้าที่เหงือกและอวัยวะภายในแล้วแพร่กระจายเข้าไปในเลือด สุดท้ายจะสะสมในถุงเล็ก ๆ ที่มีผนังล้อมรอบภายในเซลของไตที่ทำหน้าที่ขับถ่าย

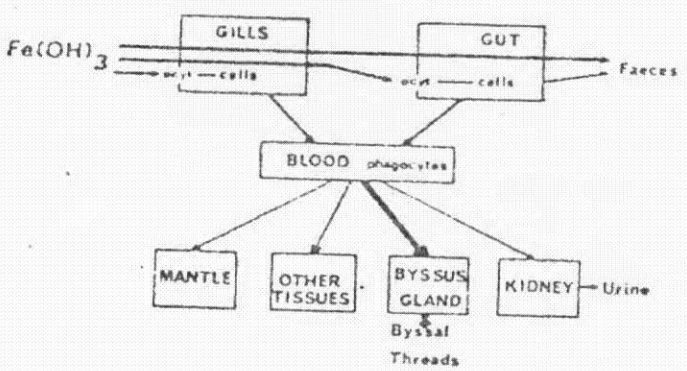
George, et. al., (1976) พบว่า M. edulis มีอัตราส่วนความเข้มข้นของเหล็กในอวัยวะต่าง ๆ กันดังนี้คือ Viscera : Kidney : Gills : Muscle = Mantle = 25 : 6 : 4 : 1 ตามลำดับ (รูปที่ 2) อนุภาคเหล็กจะอยู่ในถุง Pinocytosis ในเซลพิเศษของ Epithelial cell ที่เหงือก และไม่พบว่ามีเหล็กอิสระในไซโตพลาสซึมเหล็กประมาณ 30 % ถูกปล่อยออกพร้อมอุจจาระ ส่วนที่เหลือถูกดูดซับแล้วส่งไปที่เซลรูปร่างไม่แน่นอน (Amoebocyte cell) ในเลือด (Haemolymph) เพื่อส่งต่อไปยังเซลอื่น และกำจัดออกทาง Byssal threads



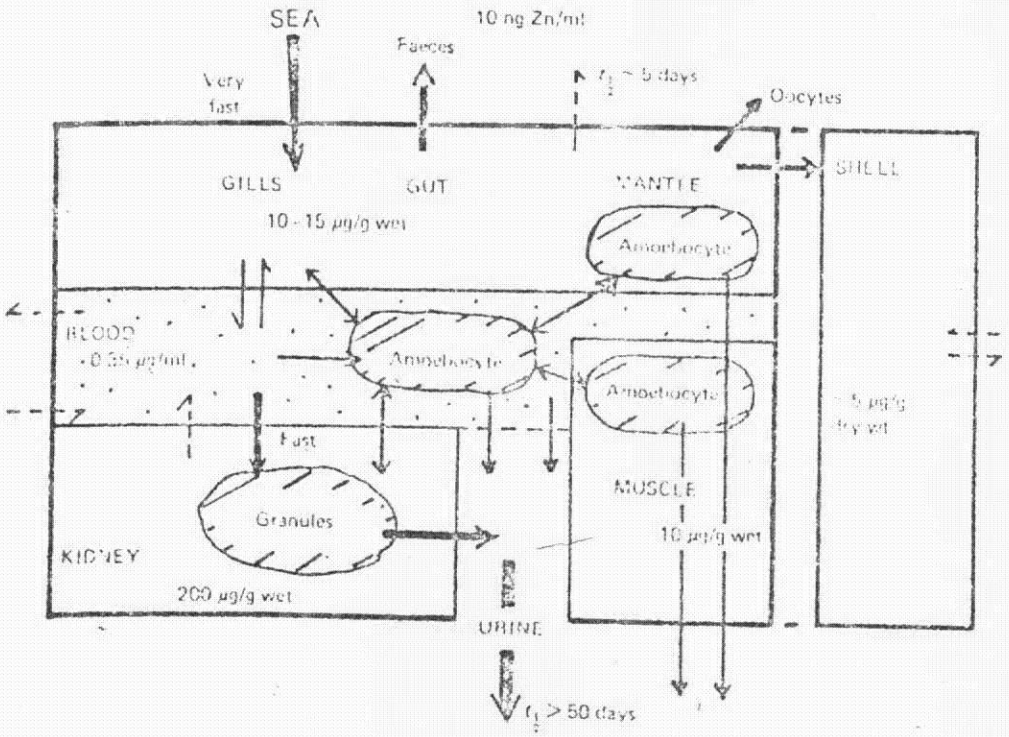
รูปที่ 1 แสดงกลไกการขนส่งไอออนของโลหะผ่านเยื่อหุ้มเซล

L = ligand ตามธรรมชาติ

P = สารมลพิษซึ่งมีโลหะรวมอยู่ด้วย



รูปที่ 2 แสดงแผนผังการรับและเมตาโบลิซึมของเฟอริกไฮดรอกไซด์ใน M. edulis (ความกว้างของลูกศรเป็นสัดส่วนกับปริมาณที่ขนส่ง, pcyt = pinocytosis)



รูปที่ 3 แสดงการรับ, การขนส่ง และการขับถ่ายของสังกะสีใน M. edulis
ลูกศรทึบแสดงเส้นทางที่ได้ศึกษาแล้ว
ลูกศรประแสดงเส้นทางที่เป็นไปได้