บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชีววิทยาเบื้องต้นของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเล

สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเลเป็นสัตว์เลือดอุ่นที่มีขนละเอียดปกคลุมร่างกายเพื่อรักษาอุณหภูมิภายในร่างกาย พวกนี้จะออกลูกเป็นตัว (viviparous) เลี้ยงลูกด้วยนม ตัวเมียจะมีต่อมน้ำนมและสามารถปรับตัวเพื่อการอยู่รอดในน้ำได้ สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเลมีหลายชนิด แบ่งออกเป็น 4 อันดับ คือ (Castro & Huber, 1992)

1. อันดับพินนิพีเดีย (order pinnipedia) ได้แก่ แมวน้ำ (seals) สิงโตทะเล (sea lions) และวอลรัส (walrus)
2. อันดับคาร์นิวอร่า (order carnivora) ได้แก่ นากทะเล (sea otters)
3. อันดับซีรีเนียน (order sirenia) ได้แก่ พะยูน (dugongs) และมานาที (manatees)
4. อันดับซีตาเซีย (order cetacea) ได้แก่ วาฬ (whales) และ โลมา (dolphins)

ในประเทศไทย พบสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเล 2 อันดับ (order) ด้วยกันคือ

อันดับซีรีเนียน (order sirenia) พบเพียงครอบครัวเดียว คือ ครอบครัว Dugongidae ได้แก่ พะยูน (dugongs) ในประเทศไทยมีชื่อเรียกต่าง ๆ ชื่อที่รู้จักกันทั่วไปได้แก่ พะยูน เงือก หมูน้ำ วัวทะเล ทางจังหวัดชายทะเลภาคตะวันออก มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าหมูดุด ส่วนทางภาคใต้นิยมเรียกว่า ดูหยง หรือ ตูหยง สมัยก่อนคงมีพะยูนอาศัยอยู่ในน่านน้ำไทยมากพอสมควร ดังจะเห็นได้จากการนำชื่อเรียกพะยูนมาตั้งเป็นชื่อตำบล หรืออำเภอ เช่น บ้านหมูดุด ในจังหวัดจันทบุรี บ้านตูหยง และบ้านตุหยงในจังหวัดปัตตานี เป็นต้น พะยูนจัดเป็นสัตว์ทะเลที่มีขนาดใหญ่ เมื่อโตเต็มที่จะยาวประมาณ 3 – 4 เมตร น้ำหนักประมาณ 300 – 400 กิโลกรัม พะยูนมีรูปร่างคล้ายกระสวย คือ ป่องตรงกลางลำตัว แล้วเรียวเล็กไปทางหัวและหาง ลำตัวมีสีเทา หรือสีน้ำตาล มีตาและหูขนาดเล็กอย่างละ 1 คู่ เวลาหายใจพะยูนจะโผล่เฉพาะด้านหน้าของส่วนหัวขึ้นเหนือผิวน้ำ พะยูนมีหางเป็นแฉก คล้ายหางของวาฬ และมีเขี้ยว (tusks) 1 คู่ พะยูนว่ายน้ำโดยใช้การพัดโบกของครีบหาง ปกติว่ายน้ำช้าประมาณ 1.8 – 2.2 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีกระดูกที่มีโครงสร้างแน่น และหนักซึ่งเหมาะกับวิถีชีวิตของพะยูนที่อาศัยหากินอยู่ที่พื้น (กาญจนา อดุลยานุโกศล, 2541)

พะยูนอาศัยอยู่ในทะเลเขตร้อนและกึ่งเขตร้อน บริเวณเส้นละติจูด 27 องศาเหนือ ถึงละติจูดที่ 27 องศาใต้ หรือจากด้านตะวันออกของทวีปแอฟริกา ถึงทวีปออสเตรเลีย ปัจจุบันพบว่า

มีอยู่มากในรัฐควีนสแลนด์ และทางด้านตะวันตกของประเทศออสเตรเลีย และปาปัวนิวกินี ส่วนในประเทศอื่นจำนวนพะยูนลดลงอย่างรวดเร็วหรือสูญพันธุ์ไปแล้ว ในทวีปเอเชีย แหล่งแพร่กระจายของพะยูนเหนือสุดได้แก่ เกาะโอกินาวาของประเทศญี่ปุ่น ประเทศฟิลิปปินส์ อินโดนีเซีย ในประเทศไทยยังคงมีพะยูนอาศัยอยู่ทั้งสองฝั่งทะเล โดยมีอยู่ในจำนวนที่น้อยมาก ปัจจุบันพบที่จังหวัดตราด จันทบุรี ระยอง ชุมพร สุราษฎร์ธานี ในฝั่งอ่าวไทย ส่วนในฝั่งอันดามันมีพะยูนอาศัยอยู่ตลอดแนวชายฝั่งจากจังหวัดระนองถึงสตูล (Thornback & Jerkin, 1984 และ Marsh, 1979 อ้างถึงใน สุพจน์ จันทราภรณ์ศิลป และกาญจนา อดุลยานุโกศล, 2537)

พะยูนเป็นสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเลเพียงชนิดเดียวเท่านั้นที่กินพืชเป็นอาหาร (herbivores) อาหารของพะยูนได้แก่ หญ้าทะเล (seagrasses) ชนิดต่าง ๆ พะยูนใช้ชีวิตส่วนใหญ่ในการกินอาหารและอาศัยอยู่ในบริเวณที่มีหญ้าทะเลอุดมสมบูรณ์หรือไม่ไกลจากแหล่งอาหาร โดยจะเข้ามากินหญ้าทะเลในขณะที่น้ำขึ้น และหลบไปอาศัยอยู่ในร่องน้ำในช่วงน้ำลง พะยูนจะกินหญ้าทะเลมากถึงวันละ 30 กิโลกรัม จากการศึกษาของกาญจนา อดุลยานุโกศล และอุ่นจิต ปาติยเสวี (2537) พบว่า ลูกพะยูนที่เคยอนุบาลที่สถาบันวิจัยชีววิทยาประมงทะเล จังหวัดภูเก็ต กินหญ้าทะเลเฉลี่ยวันละ 6 – 7 กิโลกรัม และพบว่า พะยูน ชอบกินหญ้าทะเล ชนิด *Haliophila ovalis* หรือที่เราเรียกว่า หญ้าชะเงา หรือหญ้าใบมะกรูด ซึ่งหญ้าทะเลชนิดนี้มีการแพร่กระจายและพบมากเกือบทุกจังหวัดที่มีแหล่งหญ้าทะเล

อันดับซีตาเซีย (order cetacea) ได้แก่ โลมาและวาฬ (dolphins & whales, n.d.) จัดเป็นสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเล กลุ่มที่ใหญ่ที่สุด อยู่ในอันดับ Cetacea โลมาและวาฬมีการปรับตัวอย่างดี เพื่อดำรงชีวิตอยู่ในน้ำ คือ มีรูปร่างเพรียวคล้ายกับปลา มีกระดูกคอสั้นกลมกลืนไปกับส่วนหัวไม่มีขนที่ลำตัว ขาคู่หน้าเปลี่ยนไปเป็นครีบ ขาคู่หลังหดหายไป ส่วนใหญ่มีครีบหลัง หางแบนขนานไปกับพื้น รูจมูก 1 อัน หรือ 1 คู่ เปลี่ยนจากด้านหน้ามาอยู่ส่วนบนสุดของหัว เพื่อสะดวกในการหายใจขณะที่โผล่ขึ้นมาที่ผิวน้ำ มีสมองใหญ่ มีไขมันหนาเป็นชั้นหนา เรียกว่า Blubber ช่วยในการลอยตัวและรักษาความอบอุ่นให้แก่ร่างกาย โดยแบ่งโลมาและวาฬ ออกเป็น 2 กลุ่ม ใหญ่ ๆ คือ

วาฬชนิดที่ไม่มีฟัน (baleen whales) จัดอยู่ในกลุ่ม Suborder Mysticeti เป็นวาฬที่มีขนาดใหญ่ที่สุด วาฬในกลุ่มนี้ไม่มีฟัน แต่จะมีแผงกรอง (baleen plate) หรือแถวของบาลีนที่เหนียวและยืดหยุ่นได้ ห้อยแขวนอยู่ทั้งสองด้านของปากคล้ายกับเป็นม่าน ทำหน้าที่กรองอาหารโดยมันจะว่ายน้ำไปอย่างช้า ๆ พร้อมกับอ้าปากกว้าง ๆ น้ำจำนวนมากจะไหลเข้าไปในปากผ่านแถวของบาลีน อาหารจะถูกดักไว้ที่บาลีนในขณะที่น้ำไหลผ่านออกไปแล้ว ลิ้นของวาฬ

จะกวาดอาหารเหล่านี้จากบาลีน เข้าสู่หลอดอาหาร อาหารของวาฬชนิดที่ไม่มีฟัน ได้แก่ เคย (krills) และสัตว์น้ำขนาดเล็กอื่น ๆ ในประเทศไทยพบวาฬชนิดที่ไม่มีฟันนี้ 2 ชนิด คือ วาฬฟิน (fin whales) และ วาฬบรูด้า (brydes whales) (สุพจน์ จันทราภรณ์ศิลป, กาญจนา อดุลยานุโกศล และก้องเกียรติ กิตติวัฒนาวงศ์, 2539)

วาฬชนิดที่มีฟัน (toothed whales) จัดอยู่ในกลุ่ม Suborder Odontoceti โลมาและวาฬชนิดนี้ไม่มีบาลีน แต่มีฟันเรียงรายอยู่ที่ขากรรไกรบนและล่าง ส่วนของปากแคบและยาว อาหารของวาฬชนิดนี้ได้แก่ หมึก, ปลาฉลาม, และสัตว์ทะเลอื่น ๆ วาฬบางชนิด สามารถดำน้ำลงไปลึกมากกว่าครึ่งไมล์ เพื่อหาอาหารพวกหมึกกล้วยและหมึกยักษ์ บางครั้งอาจดำนานถึง 40 นาที ก่อนที่จะขึ้นมาที่ผิวน้ำเพื่อเป่าน้ำพ่นลม (Castro & Huber, 1992) ในประเทศไทยพบวาฬชนิดที่มีฟันทั้งหมด 21 ชนิด (กาญจนา อดุลยานุโกศล และก้องเกียรติ กิตติวัฒนาวงศ์, 2547) โดยโลมาก็ถือว่าเป็นวาฬชนิดที่มีฟันด้วย วาฬกลุ่มนี้ได้แก่ พวกวาฬเพชฌฆาต, โลมาปากขวด, โลมาหัวบาตร (สุพจน์ จันทราภรณ์ศิลป, กาญจนา อดุลยานุโกศล และก้องเกียรติ กิตติวัฒนาวงศ์, 2539)

การลดลงของประชากรสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเล

ในอดีตที่ผ่านมามีการล่าจับโลมา วาฬ และพะยูน กันมากเพื่อใช้บริโภคและแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ทำให้ปัจจุบันประชากรของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเลเหล่านี้ลดจำนวนลงอย่างมาก ซึ่งเป็นปัญหาที่หลายฝ่ายให้ความสำคัญ และจัดให้วาฬและโลมาเป็นสัตว์คุ้มครองโดยจัดเป็นสัตว์คุ้มครองตามบัญชี Appendix I และ II ในอนุสัญญาว่าด้วยการค้าระหว่างประเทศซึ่งสัตว์ป่าและพืชป่าที่ใกล้สูญพันธุ์ (CITES) ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่เป็นสมาชิกในอนุสัญญาฉบับนี้ และองค์กรสากลระหว่างประเทศได้จัดให้พะยูนอยู่ในสัตว์ประเภทหายากและใกล้สูญพันธุ์และในพระราชบัญญัติสงวนและคุ้มครองสัตว์ป่าของประเทศไทย ฉบับปี พ.ศ. 2534 ซึ่งเป็นกฎหมายฉบับล่าสุดได้บรรจุเอาพะยูนไว้ในบัญชีสัตว์สงวน (สุพจน์ จันทราภรณ์ศิลป, กาญจนา อดุลยานุโกศล และก้องเกียรติ กิตติวัฒนาวงศ์, 2539)

สาเหตุอย่างหนึ่งที่ทำให้จำนวนสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเลลดจำนวนลง คือ ปัจจัยจำกัดทางธรรมชาติ เช่น ในกรณีของพะยูน เนื่องจากพะยูนเป็นสัตว์ที่อายุยืนยาว มีอัตราการสืบพันธุ์ช้าและให้ลูกน้อย พะยูนตัวเมียตั้งท้องเมื่ออายุ 10 ปีขึ้นไป บางครั้งอาจสูงถึง 17 ปี มีระยะตั้งท้องนาน 13 – 14 เดือน ให้ลูกครั้งละ 1 ตัว มีช่วงเวลาการเลี้ยงลูกนานเกือบ 2 ปี และเนื่องจากพะยูนกินเฉพาะหญ้าทะเลเป็นอาหาร ทำให้ต้องมีระยะเวลาการสะสมอาหารให้สมบูรณ์ก่อนการตั้งท้องครั้งต่อไป พะยูนจึงทิ้งช่วงการตั้งท้องครั้งหนึ่ง ๆ นาน 3 – 5 ปี นั่นคือ หากพะยูนอาศัยอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมและมีแหล่งอาหารที่อุดมสมบูรณ์ พะยูนสามารถเพิ่มประชากรได้เพียง

ไม่เกินร้อยละ 5 เท่านั้น (กาญจนา อดุลยานุโกศล, 2541) ส่วนโลมาและวาฬโดยทั่วไปออกลูกครั้งละ 1 ตัว ตั้งท้องนาน 10 – 14 เดือน ขึ้นอยู่กับชนิด ลูกโลมาจะว่ายน้ำติดกับตัวแม่ และรับอาหารซึ่งคือน้ำนมจากเต้านมซึ่งซ่อนอยู่ในช่องท้อง 2 ข้างช่องเพศ ลูกโลมาและวาฬมีระยะการหย่านมนานมาก ในวาฬบางชนิดจะมีระยะการหย่านมนานถึง 2 ปี ซึ่งการขยายพันธุ์ช้าทำให้ไม่สามารถทดแทนประชากรที่ถูกทำลายได้

นอกจากปัจจัยจำกัดทางธรรมชาติแล้วมนุษย์ก็เป็นตัวการสำคัญที่ทำให้ทรัพยากรหลายอย่างหมดไปอย่างน่าเสียดาย เช่น ในปัจจุบันมีการพัฒนาเครื่องมือประมงไปมาก ตลอดจนเครื่องยนต์ติดเรือที่มีความเร็วสูง ทำให้มีประสิทธิภาพในการจับสัตว์น้ำมากขึ้น เช่น ในการล่าวาฬ หรือการที่พะยูนติดเครื่องมือประมงโดยบังเอิญและจมน้ำตาย รวมถึงมลภาวะที่ลงสู่ทะเลอันเนื่องมาจากการเจริญเติบโตของชุมชนชายฝั่งทะเล เช่น การลดลงของประชากรแมวน้ำ ในเขตทะเลบอลติค พบว่าสาเหตุหลักเนื่องมาจาก การที่เพศเมียไม่สามารถสืบพันธุ์ได้ มีการแท้งลูกเพิ่มขึ้น และตัวเมียส่วนใหญ่เป็นหมัน ผนังมดลูกถูกทำลาย เนื่องมาจากภูมิต้านทานบกพร่อง ระบบฮอร์โมนไม่สมดุล ระบบการทำงานของร่างกายผิดปกติ ซึ่งเชื่อว่ามีสาเหตุมาจากการได้รับมลสารที่เกิดจากมลภาวะที่ลงสู่ทะเล (Ollson et al., 1992; Walker et al., 2001)

การเกยตื้น สามารถจำแนกได้ดังนี้ (why do whales & dolphins strand. (2003). [online]. Available:/http:www. wdcs.org/dan/publishing.nsf/allweb/ 99E632F7502FCC3B 802568F20048794C)

การเกยตื้นแบบเดี่ยว ส่วนใหญ่ที่พบมักจะเป็นตัวอย่างที่มีอายุมาก, ป่วย หรือบาดเจ็บ มักจะเป็นการตายตามธรรมชาติหรือบางครั้งก็ติดเครื่องมือประมง เช่น อวน

การเกยตื้นแบบเป็นฝูงที่เป็น species เดียวกัน ในกรณีแบบนี้มักจะมี " จ่าฝูง " และเป็นพวกที่มีความสัมพันธ์ทางสังคมกันอย่างเหนียวแน่น เช่น Pilot Whales การเกยตื้นอาจเนื่องมาจากการนำทางที่ผิดพลาดของจ่าฝูง หรือมีตัวใดตัวหนึ่งในฝูงเกิดบาดเจ็บ หรือป่วย และนำไปสู่การพักครีบหางบนชายฝั่ง หรือบางทีจ่าฝูงต้องการนำฝูงเพื่อหนีการล่า ก็ตั้งใจที่จะพาทั้งฝูงหนีขึ้นฝั่ง เช่น ในกรณีของ Pilot Whales ที่เกยตื้นที่ Faroe Islands

การเกยตื้นแบบเป็นฝูงแต่ต่าง species กัน ในกลุ่มของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเลแต่ต่าง species กัน การเกยตื้นอาจเนื่องมาจากความผิดปกติหรือเกิดการถูกรบกวนอะไรบางอย่างทำให้การนำทางบกพร่อง เช่น ที่ Canary Islands เมื่อ Beak Whales หลาย species ขึ้นมาเกยตื้นเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการซ้อมรบของกองทัพเรือบริเวณนอกชายฝั่ง ทำให้กระแสแม่เหล็กโลกถูกรบกวนและระบบสัญญาณนำทางผิดพลาด และอีกสาเหตุหนึ่ง เนื่องมาจากผลกระทบจากการทำประมง

การเกยตื้นของสัตว์หลายชนิด หลาย species เช่น สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมทะเล ปลา สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังในทะเล สาเหตุของการเกยตื้นเนื่องมาจากการรั่วไหลของสารเคมี มักเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างปัจจุบันทันด่วน

จะเห็นได้ว่า การขึ้นมาเกยตื้นของโลมาและวาฬทีละหลาย ๆ ตัว ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการลดจำนวนลง สาเหตุที่ทำให้โลมาและวาฬขึ้นมาเกยตื้นนั้นมีหลายปัจจัย ทั้งเกิดจากสภาพธรรมชาติ โรคภัย และมนุษย์ บางแห่งมีการเกยตื้นของโลมาและวาฬติดต่อกันหลาย ๆ วัน หรือการที่โลมาและวาฬขึ้นมาเกยตื้นโดยกินเนื้อที่ความยาวของชายหาดหลาย ๆ ไมล์ ไม่ใช่เรื่องง่ายที่จะชี้ชัดว่าปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งทำให้สัตว์เหล่านี้เกยตื้น อย่างไรก็ตามปัจจัยที่มีผลทำให้โลมาและวาฬเกยตื้น มีดังนี้

1. สภาพภูมิประเทศชายฝั่งที่ซับซ้อนและสภาพของมหาสมุทร ทำให้พลัดเข้ามาเกยตื้น
2. มลภาวะของสิ่งแวดล้อมในทะเล หรือมลภาวะที่ได้รับจากห่วงโซ่อาหาร
3. สภาพภูมิอากาศ เช่น คลื่นลมแรง พายุ ทำให้ไม่สามารถรักษาทิศทางการเคลื่อนที่ได้
4. การหนีผู้ล่า ซึ่งอาจเป็นสัตว์อื่น เช่น ฉลาม วาฬขนาดใหญ่ที่กินเนื้อ หรือมนุษย์
5. พิษที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น การสะสมสารพิษจากสาหร่ายบางชนิดที่กินเข้าไปเป็นระยะเวลานาน ๆ
6. การรบกวนของกระแสแม่เหล็กโลกหรือการเดินทางที่ผิดพลาด อันเนื่องมาจากกระแสแม่เหล็กโลก
7. การไล่ล่าเหยื่อมายังชายฝั่งแล้วเกยตื้น เช่น วาฬเพชฌฆาตล่าแมวน้ำมาเกยตื้น
8. การเจ็บป่วยและโรคภัยธรรมชาติ เช่น ติดเชื้อไวรัส โรคพยาธิ เป็นต้น
9. ระบบสัญญาณซึ่งใช้ในการนำทางและการสื่อสาร (Echolocation) ถูกรบกวนเมื่อเข้าที่ตื้น
10. การติดตามฝูงแล้วหากมีตัวใดตัวหนึ่งหรือจ่าฝูงนำทางผิดพลาดก็อาจทำให้พลัดเข้าไปเกยตื้นได้ทั้งฝูง
11. การได้รับบาดเจ็บจากการกระทำของมนุษย์ เช่น ติดอวน อวนล้อมปลาทูน่า เป็นต้น

ในประเทศไทยตัวอย่างโลมาและวาฬที่พบเกยตื้นส่วนใหญ่มักจะเจ็บป่วยมา หรือไม่แข็งแรงและเป็นลูกที่อาจพลัดจากแม่ ส่วนพะยูนโดยมากมักติดอวนติดตา (gill net) โดยบังเอิญแล้วจมน้ำตาย หรือว่ายน้ำหากินแล้วเข้าไปติดในโป๊ะ มีบ้างที่ตายเพราะติดอวนลากใกล้ฝั่ง ถูกเรือชน หรือเจ็บป่วยตามธรรมชาติ (กาญจนา อดุลยานุโกศล, 2538; 2541, กาญจนา อดุลยานุโกศลและสุพจน์ จันทราภรณ์ศิลป, 2544)

ปรอทและความเป็นพิษในสิ่งแวดล้อม

1. คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ปรอทเป็นโลหะมีสถานะเป็นของเหลวในสภาวะอุณหภูมิปกติ มีสีขาวคล้ายเงิน จึงมีชื่อเรียกว่า " Liquid Silver " หรือ " Quick Silver " นับเป็นโลหะชนิดเดียวที่มีสภาพเป็นของเหลว ณ อุณหภูมิปกติ แต่ก็แปรสภาพเป็นของแข็งได้แต่จะมีความเปราะและจะระเหยเป็นไอได้ง่าย โดยปกติปรอทจะไม่เกาะติดวัตถุ ปรอทในสถานะของเหลวจะมีความเป็นพิษไม่มากนักแต่ไอปรอทจะเป็นพิษอย่างสูงเมื่อสูดดมเข้าไป จึงควรหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับไอปรอท ปรอทมีคุณสมบัติในการสะท้อนแสงได้ดี และเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปรอท (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight)	200.59
ความหนาแน่น (Density) ที่ 20 องศาเซลเซียส	13.546 กรัมต่อมิลลิลิตร
จุดเดือด (boiling point)	356.9 องศาเซลเซียส
จุดเยือกแข็ง (freezing point)	- 38.87 องศาเซลเซียส
ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)	13.545
ความสามารถในการละลายน้ำ (solubility in water)	ต่ำ

2. แหล่งที่มาของสารปรอทในสิ่งแวดล้อม สารปรอทเกิดได้ทั้งจากธรรมชาติและจากกิจกรรมของมนุษย์

2.1 แหล่งธรรมชาติ (natural sources) ปรอทที่พบในธรรมชาติ จะอยู่ในรูปของแร่อิสระหรือในรูปของซัลไฟด์ปะปนอยู่ในเนื้อหินประเภทต่าง ๆเช่น หินปูน หรือหินทราย เป็นต้น ซึ่งปรอทสามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมโดยการละลาย ระเหย ผุกร่อนของดิน หิน แร่ ที่มีสารปรอทเป็นส่วนประกอบอยู่ นอกจากนี้อาจปะปนออกมากับก๊าซภูเขาไฟ และระเหยจากมหาสมุทรอีกด้วย มีการประมาณว่าการแพร่กระจายของปรอทจากแหล่งธรรมชาติ 2,700 – 6,000 ตันต่อปี (World Health Organization [WHO], 1991) แต่การแพร่กระจายจากแหล่งธรรมชาตินี้ถือว่าเป็นปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของปรอทที่แพร่กระจายจากการกระทำของมนุษย์ ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งการปนเปื้อนหลักของปรอทที่ทำให้สมดุลย์ธรรมชาติเปลี่ยนแปลงไปก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ (Sadiq, 1992)

2.2 แหล่งที่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ (anthropogenic sources) เนื่องจากมนุษย์นำปรอทมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตต่าง ๆ มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกิจกรรมทางด้านเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม เช่น การทำเหมืองแร่ มีการใช้ปรอทในกิจกรรมเหมืองแร่ทั่วโลกประมาณ 10,000 ตันต่อปี (WHO, 1991) โดยมีการปลดปล่อยสารปรอทจากการเทหางแร่ทิ้ง และการปล่อยสารปรอทโดยตรงสู่บรรยากาศ, อุตสาหกรรมผลิตคลอรีนและโซดาไฟ โดยใช้ปรอทเป็นขั้วลบ (cathode) ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งจะมีความสำคัญต่อการผลิตเยื่อกระดาษ, สารปรอทยังถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมไฟฟ้า อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ การผลิตเหล็กและเหล็กกล้า นอกจากนี้สารปรอทยังถูกใช้อย่างแพร่หลายในสาขาวิชาชีพทันตกรรม โดยใช้ปรอทผสมกับโลหะอื่นในการอุดฟัน ยารักษาโรคและผลิตเครื่องสำอาง (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) ซึ่งกิจกรรมต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้เกิดการกระจายของปรอทเข้าสู่สิ่งแวดล้อมทั้งในอากาศ แหล่งน้ำและพื้นดินได้อีกด้วย ตัวอย่างที่สำคัญที่ถือเป็นกรณีศึกษาในการแพร่กระจายของปรอทออกสู่สิ่งแวดล้อมจนเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตคือ การปล่อยสารเมอคิวริกคลอไรด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกริยาจากโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่อ่าวมินามาตะ ทำให้สิ่งมีชีวิตบริเวณรอบอ่าวมินามาตะรวมถึงมนุษย์ที่ได้รับผลกระทบจากการบริโภคอาหารทะเลที่มีปริมาณของสารปรอทอินทรีย์ (methylmercury) สูง ทำให้ล้มป่วยและตายเป็นจำนวนมาก (Gerbersmann et al., 1997)

2.3 แหล่งที่มาของปรอทจากการผลิตก๊าซธรรมชาติ ก๊าซธรรมชาติ ถือเป็นแหล่งพลังงานหลักของประเทศ ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 39 ของพลังงานที่ผลิตได้ทั้งหมด แต่กว่าจะได้เป็นก๊าซนั้น จะต้องผ่านกระบวนการผลิตหลายขั้นตอน ซึ่งแน่นอนว่าจะต้องมีการทิ้งของเสียจากกิจกรรมนี้ นั่นคือ น้ำจากขบวนการผลิต (produced water) ซึ่งมีสารปรอทในธรรมชาติประกอบอยู่ด้วย โดยปรอทที่พบในก๊าซธรรมชาติ จะอยู่ในรูปของไอปรอท และปะปนมากับก๊าซธรรมชาติจากแหล่งกักเก็บปิโตรเลียม เมื่อขึ้นสู่ปากหลุมหรือผ่าน Dew Point Control Unit (DPCU คือจุดลดอุณหภูมิของก๊าซ เพื่อแยกของเหลวออกจากก๊าซ อุณหภูมิที่ใช้ต้องคำนวณโดยอาศัย Equilibrium ของก๊าซ) ปรอทจะแยกตัวออก ไอปรอทที่พบในก๊าซธรรมชาติมีอยู่ 2 รูป คือ อยู่ในรูปของธาตุปรอทและสารประกอบปรอท โดยสารประกอบปรอทที่พบในก๊าซธรรมชาติส่วนมาก ได้แก่ dimethylmercury และ diethylmercury นอกจากนี้ยังพบว่า dimethylmercury และ diethylmercury มีจุดเดือดใกล้เคียงกับไฮโดรคาร์บอนในก๊าซธรรมชาติ ทำให้สารปรอทเหล่านี้มีโอกาสปะปนไปกับก๊าซได้มาก ถ้าหากไม่มี Mercury Absorber สำหรับจับปรอทก่อนเข้าสู่โรงแยกก๊าซ อาจจะทำให้ระบบท่อและอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้รับความเสียหายได้ (มารยาท วีรวิกรม, 2541)

ดังนั้น หากการผลิตก๊าซธรรมชาติซึ่งมีแท่นผลิตอยู่นอกชายฝั่ง ไม่มีการควบคุมการผลิตที่ดี อาจทำให้มีการปนเปื้อนของสารปรอทออกสู่สิ่งแวดล้อม จึงมีความเป็นไปได้สูงที่สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเลซึ่งมีแหล่งที่อยู่อาศัยอยู่ในบริเวณใกล้เคียง จะมีโอกาสได้รับสารปรอทด้วย

รูปแบบของสารปรอท ปรอทที่พบในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของปรอทซัลไฟด์ (HgS) หรือที่เรียกว่า แร่ซินนาบาร์ (cinnabar) ซึ่งมีสีแดงและไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้ยังพบปรอทในรูปปรอทอินทรีย์ (organic mercury) และปรอทอนินทรีย์ (inorganic mercury) ซึ่งปรอทอนินทรีย์สามารถเปลี่ยนรูปเป็นปรอทอินทรีย์ได้ด้วยการทำงานของจุลินทรีย์และในสภาวะที่เหมาะสม สารปรอทเมื่อถูกออกซิไดส์ จะมีอยู่ 3 รูป คือ Hg^0 (ปรอท), Hg^+ (mercurous) และ Hg^{2+} (mercuric) (Hartung & Dinman, 1972)

Hg^+ สามารถรวมตัวกับคลอไรด์เกิดเป็น เมอร์คิวรัสคลอรไรด์ (Hg_2Cl_2) มีลักษณะเป็นตะกอนสีขาวเรียกว่า คาโลเมล (Calomel) ไม่ละลายน้ำ ใช้ประโยชน์เป็นอิเลกโทรดในเซลล์ไฟฟ้า สารนี้มีความเป็นพิษไม่มากนักแต่ถ้าสารนี้ถูกกับแสงสว่างโดยตรงสามารถสลายให้ Hg และ $HgCl_2$ ซึ่งสาร $HgCl_2$ นี้จะมีความเป็นพิษสูง ส่วนประจุเมอร์คิวริก (Hg^{2+}) จะมีความเป็นพิษสูง เนื่องจากมีสัมพรรคภาพ (affinity) กับหมู่ไทออล (-SH) สามารถจับตัวกับซัลเฟอร์ในเม็ดเลือดแดง เซรั่ม และโปรตีนชนิดต่าง ๆ ในร่างกายได้แต่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายผ่านเนื้อเยื่อ Blood Brain Barrier (BBB) ในสิ่งมีชีวิตได้ (วรวิทย์ ชีวาพร, 2543)

ซึ่ง Hg^{2+} สามารถทำปฏิกริยา Cl^- เกิดเป็น เมอร์คิวริกคลอไรด์ ($HgCl_2$) ซึ่งมีความเป็นพิษมากแต่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายผ่านเนื้อเยื่อ BBB ได้ แต่เมอร์คิวริกคลอไรด์สามารถเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบอินทรีย์ของปรอท เช่น เมทิลเมอร์คิวรี่ (Methylmercury) ไดเมทิลเมอร์คิวรี่ (Dimethylmercury) ได้โดยการกระทำของจุลินทรีย์ และภายใต้สภาวะที่เป็นกรด ไดเมทิลเมอร์คิวรี่จะสามารถเปลี่ยนรูปเป็นเมทิลเมอร์คิวรี่ ซึ่งมีความเป็นพิษสูงมากเนื่องจากมีคุณสมบัติละลายได้ดีในไขมันจึงทำให้สามารถเคลื่อนย้ายผ่านเนื้อเยื่อ BBB เข้าไปขัดขวางการทำงานของระบบประสาท ทำให้เกิดการทำงานที่ผิดปกติไป (ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์, 2525)

รูปแบบทางเคมีของสารปรอท Lindquist (1994) ได้เสนอรูปแบบของสารประกอบปรอท แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ Volatile (V), Reactive (R), and Non- Reactive (NR) โดยกำหนดให้

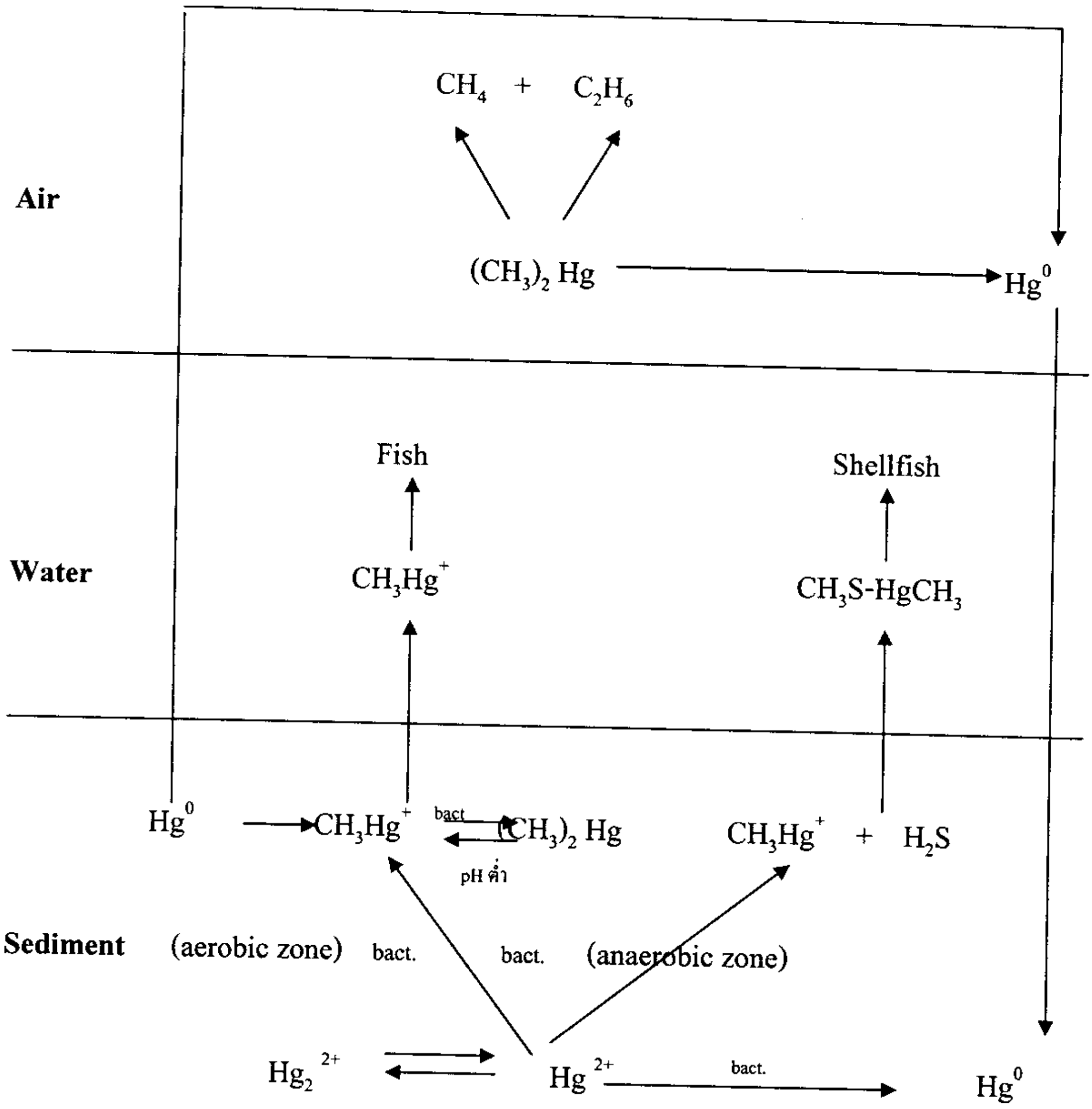
Volatile (V) = ปรอทที่ระเหยกลายเป็นไอ เช่น Hg^0 , $(CH_3)_2Hg$

Reactive (R) = ปรอทที่ละลายในน้ำหรือสารแขวนลอย ซึ่งอยู่ในรูป Reactive เช่น Hg^{2+} , HgX_2 , HgX_3^- , HgX_4^{2-} (โดยที่ X = OH^-, Cl^- หรือ Br^-) , Hg^0 ในไอน้ำแขวนลอย, Hg^{2+} ที่รวมตัวกับกรดอินทรีย์

Non – Reactive = ปรอทในรูป Non – Reactive เช่น CH_3Hg^+, CH_3HgCl, CH_3HgOH และสารประกอบปรอทอินทรีย์อื่น ๆ $Hg(CN)_2$, HgS และ Hg^{2+} ที่จับตัวกับหมู่ซัลเฟอร์

เมื่อสารปรอทแพร่กระจายลงสู่สิ่งแวดล้อมในน้ำแล้ว บางส่วนจะเข้าไปติดอยู่ (adsorb) กับอินทรีย์วัตถุที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ซึ่งสารแขวนลอยในน้ำเหล่านี้จะทำหน้าที่คล้ายกับตัวกำจัดปรอทออกไปจากมวลน้ำ โดยการเหนี่ยวนำให้ปรอทไอออน เช่น Hg^{2+} มาเกาะติดกับสารแขวนลอยแล้วเกิดการตกตะกอนลงสู่พื้นแหล่งน้ำในเวลาต่อมา สารปรอทอนินทรีย์ที่ตกตะกอนอยู่ในแหล่งน้ำสามารถเปลี่ยนเป็นสารปรอทอินทรีย์ในรูปของ Methylmercury (CH_3Hg^+) ได้โดยการทำงานของจุลินทรีย์ประเภท Methanogenic bacteria ซึ่งทำให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปของปรอทที่เรียกว่า Methylation ซึ่งการเกิดกระบวนการ Methylation สามารถเกิดได้ทั้งในดิน ในน้ำจืด และในน้ำทะเล ที่มี Reducing Bacteria ที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการ Methylation อาศัยอยู่ (Gilmour & Henry, 1991)

การเปลี่ยนรูปของปรอทนี้จะทำให้เกิดปรอทอินทรีย์ทั้งสองรูปแบบ คือ Methylmercury และDimethylmercury ซึ่ง Methylmercury เป็นรูปของปรอทที่สามารถคงสภาพอยู่ในน้ำได้และสามารถสะสมในปลา สาหร่าย และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ในน้ำ แต่ Dimethylmercury เป็นรูปของปรอทที่มีความสามารถในการระเหยสูง ดังนั้นส่วนใหญ่จึงมีแนวโน้มที่จะระเหยจากแหล่งน้ำไป ปรอทที่อยู่ในน้ำอาจถูกขจัดออกจากน้ำได้โดยการระเหยเป็นไอในรูปของ Dimethylmercury ซึ่งจะกระจายในอากาศต่อไป แต่จะสลายตัวเมื่อถูกแสงอุลตร้าไวโอเลต บางส่วนที่เป็น Methylmercury จะตกลงมาและบางส่วนที่เป็นธาตุ Hg ก็อาจจะตกลงมากับฝนเหมือนกันหรือถูกกระแสลมพัดพาไป (global circulation) (Jenelov, 1974) ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงวัฏจักรทางชีวภาพของสารปรอทในสิ่งแวดล้อม (Wood, 1975)

ความเป็นพิษของสารปรอทต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ความเป็นพิษของสารปรอทในแต่ละรูปจะไม่เท่ากัน ร่างกายของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมสามารถดูดซึม Methyl mercury ในทางเดินอาหารได้สูงถึง 95 – 98 % แต่ขับออกมาในรูปของเสียได้น้อยมาก เนื่องจากเป็นสารที่เสถียร ไม่ค่อยแตกตัวเป็นสารอนินทรีย์ ปรอทรูปนี้สามารถยึดติดกับเม็ดเลือดแดงและแพร่กระจายไปยังทุกส่วนของร่างกาย โดยพบว่า ประมาณ 15 % จะสะสมอยู่ในสมอง ส่วนปรอทในรูปโลหะสามารถถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนัง และลมหายใจได้ง่าย ปรอทรูปที่อันตรายต่อชีวิตมนุษย์มากที่สุด คือ ในรูปไอระเหยซึ่งสามารถทำให้เกิดพิษเฉียบพลัน ถ้าหายใจเข้าไปในช่วง 1,200 – 8,500 ไมโครกรัม

ต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนสารประกอบอนินทรีย์ของปรอทมีความเป็นพิษน้อยที่สุด เพราะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายโดยทางเดินอาหารได้น้อยมากไม่เกิน 2 % และยิ่งกว่านั้นยังถูกขับออกจากร่างกายได้ง่าย (กรมควบคุมมลพิษ, 2543)

ปรอทที่สะสมอยู่ในร่างกายก่อให้เกิดผลเสียต่อระบบภูมิคุ้มกัน (immune system), ระบบพันธุกรรม (alters genetic), ระบบเอนไซม์ (enzyme system) และระบบประสาท (nervous system) และ ปรอทในรูป Methyl mercury สามารถทำลายการพัฒนาของตัวอ่อน (embryos) ซึ่งตัวอ่อน (embryos) จะมีความไว (sensitive) ต่อ Methyl mercury มากกว่าในผู้ใหญ่ 5 – 10 เท่า ปรอทสามารถแทรกซึมผ่านเยื่อหุ้มสมองเข้าสู่ระบบประสาทส่วนกลาง ปรอทส่วนใหญ่จะสะสมอยู่ในสมองส่วนเซเลเบลลัม (cerebellum) และเซเลเบลคอร์เท็คซ์ (cerebral cortex) ซึ่งทำอันตรายต่อเนื้อเยื่อสมองส่วนที่ควบคุมการมองเห็นและความรู้สึก ทำให้ผู้รับสารปรอทมีอาการผิดปกติเกี่ยวกับระบบประสาทการมองเห็นและความรู้สึก นอกจากนี้พิษของปรอทสามารถทำลายเนื้อเยื่อของอวัยวะต่าง ๆ ที่กระจายไปถึง เช่น ทำลายเนื้อเยื่อตับ ไฟเบอร์ของกล้ามเนื้อ หัวใจ หลอดไต กระเพาะและลำไส้ส่วนดูโอดินัม (duodenum) และทำให้การผลิตเซลล์เม็ดเลือดแดงของไขกระดูกลดลง เมื่อปรอทเข้าสู่ร่างกายจะทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ประเภทที่มีกลุ่มซัลไฮดริล (sulhydril) โดยมีผลขัดขวางหรือยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (enzyme) เช่น ทำให้ฮีโมโกลบิน (haemoglobin) ลำเลียงออกซิเจนไปสู่เซลล์น้อยลง หรือทำให้การเผาผลาญอาหารในไมโตคอนเดรีย (mitochondria) ไม่เกิดขึ้น เป็นต้น (Mercury in the environment. (2003). [online]. Available: http://minerals.usgs.gov/mercury) อาการพิษจากการรับสารปรอทมากเกินไป สามารถแบ่งออกได้เป็นแบบ เฉียบพลัน กับแบบเรื้อรัง

แบบเฉียบพลัน อาจมีอาการดังนี้คือ

1. กระหายน้ำ
2. การรับรสเปลี่ยนไป
3. ปัสสาวะน้อยลง
4. น้ำลายออกมากกว่าปกติ
5. แผลในปาก
6. ความดันโลหิตต่ำ
7. บวมภายในลำคอ และทำให้เกิดภาวะหายใจลำบาก
8. ปวดท้องอย่างรุนแรง
9. อาเจียน
10. ถ่ายเหลวมีเลือดปน
11. นอนไม่หลับ กระวนกระวาย

แบบเรื้อรัง คือค่อย ๆ ได้รับสารปรอทและสะสมในร่างกาย มีอาการดังนี้

1. ปากเป็นแผล อักเสบเรื้อรัง
2. มีเส้นสีน้ำเงินที่ขอบเหงือก
3. เหงือกบวมและเลือดออกง่าย
4. ฟันโยก
5. มือสั่น
6. น้ำลายออกมาก การรับรสเปลี่ยนไป

อาการพิษจากสารปรอท ทำให้เกิดปัญหาที่รุนแรง ในหญิงตั้งครรภ์และในเด็กเล็ก ที่บริโภคอาหารปนเปื้อนสารปรอทเข้าไป โดยพบว่า สารปรอท จะไปทำลายระบบประสาทของเด็ก ทำให้กลายเป็นเด็กปัญญาอ่อน ความสามารถในการเรียนรู้ลดลง เกิดอาการชัก ตาบอด หูหนวกได้ ซึ่งพยาธิสภาพเหล่านี้ เมื่อเกิดขึ้นแล้ว จะเป็นแบบถาวร ไม่สามารถรักษาให้กลับมาดีได้เหมือนเดิม (สารปรอท พิษร้ายใกล้ตัวคุณ. (2002). [online]. Available:http: //www. bangkokhealth. com/topic_print .asp?Number=5576)

การสะสมและการแพร่กระจายของสารปรอท

1. การสะสมของสารปรอทในดินตะกอน และน้ำ ปรอทในทะเลมักจะถูกดูดซับอยู่กับสารแขวนลอยมากกว่าที่จะพบอยู่ในรูปที่ละลายน้ำ ดังนั้น ดินตะกอนในทะเลจึงเป็นที่สะสมของปรอทมากกว่าในมวลน้ำ อย่างไรก็ตาม ปริมาณการสะสมของปรอทในดินโดยทั่วไปจะมีค่าไม่มากนัก กล่าวคือ มีความเข้มข้นในระดับค่อนข้างต่ำ โดยเฉลี่ยประมาณ 0.07 ไมโครกรัมต่อกรัม ในดินที่ไม่มีการปนเปื้อน ส่วนดินบริเวณที่มีการทำเหมืองแร่หรือมีการปนเปื้อน (polluted Soils) จะมีความเข้มข้นของปรอทสูงเกินกว่า 500 ไมโครกรัมต่อกรัม และมีระยะเวลาการคงตัว (residence time) อยู่ภายในดินนานถึง 1,000 ปี สำหรับในประเทศไทยได้มีการรายงานการสำรวจเกี่ยวกับการสะสมของสารปรอทในตะกอนดิน โดยเริ่มตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2516 และต่อมาได้มีการศึกษาการสะสมของสารปรอท บริเวณอ่าวไทยตอนบน พบว่า มีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 1.79 – 4.93 ไมโครกรัมต่อกรัม และในบริเวณอ่าวไทยตอนล่างอยู่ในช่วง 0-4.39 ไมโครกรัมต่อกรัม (Piyakarnchana, 1974 อ้างถึงใน กรมควบคุมมลพิษ, 2541) Chongprasith & Wilairatanadilok (1999) พบการปนเปื้อนของปรอทรวมในดินตะกอนชายฝั่งอยู่ในช่วง 0.05 – 2.13 ไมโครกรัมต่อลิตร น้ำหนักแห้ง โดยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.14 ไมโครกรัมต่อลิตร น้ำหนักแห้ง ค่าที่สูงมักพบในดินตะกอนบริเวณปากแม่น้ำ แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการใช้สารปรอทในกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์บนชายฝั่ง ซึ่งเมื่อระบายน้ำทิ้งลงสู่แหล่งธรรมชาติ ปรอทจึงถูกพัดพาสู่ทะเลโดยน้ำในแม่น้ำและตกตะกอนทับถมอยู่ในดิน

ตะกอนปากแม่น้ำ จากรายงานของ TOTAL MEMEP Report, 1997 (อ้างถึงใน Hungspreugs, Utoomprurkpornk, Cossa & Siriratanachai, 1998) พบว่า ดินตะกอนในอ่าวไทยมีปรอทปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง (1.5 ไมโครกรัมต่อลิตร) กว่าค่าเฉลี่ยของปรอทที่พบในดินตะกอนในทะเลทั่วไป (< 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร) และดินตะกอนรอบ ๆ แท่นขุดเจาะก๊าซธรรมชาติมีการปนเปื้อนของปรอทสูงกว่านี้มาก ซึ่ง Tetra Tech (2000) รายงานค่าปรอทรวมในดินตะกอนรอบ ๆ แท่นเอราวัณ และปลาทอง มีค่าระหว่าง 4.7 – 1,080 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง โดยพบว่าปรอทส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแร่ Metacinnabar (HgS) ซึ่งสิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำไปใช้ได้ ส่วนปรอทอินทรีย์ (methylmercury) ซึ่งสิ่งมีชีวิตนำไปใช้ได้ พบว่ามีสัดส่วนที่น้อยมาก (ความเข้มข้นโดยเฉลี่ย < 0.20 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง) หรือประมาณ 0.002 – 0.7 % ของปริมาณปรอทรวมทั้งหมดและการศึกษาของ Siriratanachai (2001) ที่ทำการศึกษาปริมาณปรอทที่ชั้นผิวของตะกอนจากเอสทูรีของแม่น้ำเจ้าพระยา พบว่า มีความเข้มข้นในช่วง 0.2 – 0.77 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง และพบว่าความเข้มข้นของปรอทที่ชั้นผิวหน้าแรก (ประมาณ 10 เซนติเมตรแรก) มีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นของปรอทเมื่อ 20 ปีก่อน ถึง 3 – 5 เท่า ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการใช้ปรอทในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมบางประเภทในขณะนั้น

การสะสมของปรอทในน้ำ โดยสารปรอทสามารถระบายลงสู่แหล่งน้ำในรูปของสารประกอบที่มีสารปรอทเป็นองค์ประกอบได้ทั้ง 3 รูปแบบ คือ ธาตุปรอท (elemental mercury), ปรอทอนินทรีย์ (inorganic mercury) และปรอทอินทรีย์ (methylated forms) ซึ่งทั้ง 3 รูปแบบนี้สามารถเปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมาโดยอาศัยกระบวนการทางฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพ ภายในระบบนิเวศวิทยา ดังที่ได้อธิบายตามรูปที่ 1 แล้ว โดยทั่วไปจะพบธาตุปรอท (elemental mercury) ในบรรยากาศ ส่วน ปรอทอนินทรีย์ (inorganic mercury) จะพบในน้ำและดินตะกอนมากที่สุด สำหรับในประเทศไทย พบว่า มีการแพร่กระจายของสารปรอทอยู่ในแม่น้ำหลายสาย ซึ่งจากการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ จากแม่น้ำ 17 สาย อ่างเก็บน้ำ 4 แห่ง และเขื่อนอีก 3 แห่ง รวมทั้งสิ้น 1,039 ตัวอย่าง ในปี พ.ศ. 2516 – 2520 ปรากฏว่ามีปริมาณปรอทในแหล่งน้ำดังกล่าวอยู่ระหว่างไม่สามารถหาค่าได้ (ND) – 37.7 นาโนกรัมต่อกรัม โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.47 นาโนกรัมต่อกรัม และ ในจำนวนแหล่งน้ำที่สำรวจทั้งหมดนั้น พบว่า แม่น้ำเจ้าพระยา ท่าจีน แม่กลอง และปราณบุรี มีตัวอย่างน้ำที่ตรวจพบค่าปรอทสูงกว่า 5.0 นาโนกรัมต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าที่พบในแหล่งน้ำตามธรรมชาติอื่น ๆ (สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม, 2521) ในระยะหลัง พบว่า น้ำทะเลที่ปนมากับกระบวนการผลิตก๊าซธรรมชาติ (produced water) ในอ่าวไทย มีปริมาณปรอทปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง โดยมีปริมาณปรอทในรูป Reactive (Hg_R) อยู่ในช่วง 0.06 – 1.6 นาโนกรัมต่อลิตร และในรูปปรอทรวม (Hg_T) อยู่ในช่วง 0.2 – 2.2 นาโนกรัมต่อลิตร ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะ

ทางธรณีวิทยาของแหล่งก๊าซธรรมชาติในอ่าวไทยทำให้เป็นเช่นนั้น อย่างไรก็ตามค่าความเข้มข้นของปรอทในน้ำทะเลบริเวณแท่นขุดเจาะก๊าซ (บงกช) บริเวณอ่าวไทยตอนล่างส่วนใหญ่ยังอยู่ในช่วงปกติของค่าความเข้มข้นของปรอทที่พบในน้ำทะเลทั่ว ๆ ไปของโลก (< 1 นาโนกรัมต่อลิตร) (TOTAL MEMEP Report, 1997 cited in Hungspreugs et al., 1998) นอกจากนี้ กรมควบคุมมลพิษ (Chongprasith & Wilairatanadilok, 1999) ได้ตรวจเฝ้าระวังปริมาณการปนเปื้อนของสารปรอทในน้ำทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามันตั้งแต่ปี พ.ศ.2535 – 2541 ค่าปรอทรวมที่พบในน้ำทะเลอยู่ในช่วง < 0.01 – 0.54 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.03 – 0.06 ไมโครกรัมต่อลิตร ค่าที่พบส่วนใหญ่ (> 90%) ยังอยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐานคุณภาพน้ำชายฝั่งที่อนุญาตให้มีได้ คือ ไม่เกิน 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นที่สูง (0.11 – 0.54 ไมโครกรัมต่อลิตร) มักพบในน้ำทะเลชายฝั่งบริเวณท่าจอดเรือ หรือใกล้แหล่งอุตสาหกรรม และใกล้แท่นขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ จากการศึกษาของภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2544) ได้ทำการศึกษาความเข้มข้นของปรอทรวมและปรอทอินทรีย์ในน้ำ จากบริเวณชายฝั่งทะเลจังหวัดสมุทรปราการและบริเวณชายฝั่งทะเล นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด พบว่า ความเข้มข้นของปรอทอยู่ระหว่าง 0.01 1.37 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยความเข้มข้นของปรอทที่ละลายน้ำ บริเวณสมุทรปราการมีค่าต่ำสุดสูงกว่าที่มาบตาพุด ซึ่งค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของปรอทที่ละลายอยู่ในน้ำที่บริเวณสมุทรปราการจะสูงกว่าบริเวณมาบตาพุดเล็กน้อย

2. การสะสมและการแพร่กระจายของสารปรอทในสิ่งมีชีวิต จากการที่น้ำและดินตะกอนมีความสามารถในการเป็นที่สะสมของสารปรอท ทำให้สิ่งมีชีวิตลำดับต้น ๆ ในห่วงโซ่อาหารสามารถรับปรอทเข้าสู่ร่างกาย เช่น แพลงก์ตอนพืชสามารถดึงปรอทในน้ำเข้ามาสะสมไว้ภายในตัวหรือบริเวณผนังเซลล์ได้โดยตรง (Matilda et al., อ้างถึงใน เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต, 2539) และสามารถถ่ายทอดผ่านสู่สิ่งมีชีวิตที่เป็นผู้ล่า หรืออยู่ในระดับการกินอาหารที่สูงขึ้นไป ลำดับขั้นตามห่วงโซ่อาหารมีความสำคัญต่อความเข้มข้นของปรอทที่พบในสิ่งมีชีวิตและมีความสัมพันธ์กับปริมาณปรอทที่พบในน้ำและดินตะกอน (ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545) ซึ่งสิ่งมีชีวิตที่เป็นผู้ล่าเหล่านี้จะไม่ได้รับผลกระทบโดยตรงจากความเข้มข้นของปรอทในน้ำ แต่จะได้รับผ่านทางการกินอาหาร และผ่านทางห่วงโซ่อาหาร

สารปรอทที่แพร่กระจายหรือปนเปื้อนอยู่ในดินและแหล่งน้ำจะมีการถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตต่าง ๆ รวมทั้งมนุษย์ได้ 3 ทาง คือ (Routes of entry. (1993). [online]. Available: http: //pmep.cce.cornell.edu/profiles/extoxnet/TIB/entry.html).

1. โดยทางการหายใจ โดยสูดหายใจเอาผงหรือไอระเหยของปรอทเข้าสู่ปอด ซึ่งส่วนใหญ่จะตกค้าง บริเวณจมูก และทำอันตรายแก่กระดูกอ่อนที่กั้นระหว่างจมูก เมื่อไอของปรอทเข้าสู่

ร่างกายทางการหายใจ จะถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดและแพร่กระจายอย่างรวดเร็ว แล้วไปสะสมในเนื้อเยื่อส่วนต่าง ๆ มากกว่าร้อยละ 75 – 80

2. โดยทางปาก โดยการรับประทานปรอทที่ปนเปื้อนมากับอาหาร สำหรับสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเล สามารถรับมลสารเข้าสู่ร่างกายได้หลายทาง แต่เส้นทางที่สำคัญคือจากอาหาร (Luoman, 1983 cited in David & Philip, 1992) เนื่องจาก สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเลเหล่านี้ มีผิวหนังที่ค่อนข้างหนา และนาน ๆ จะโผล่ขึ้นมาหายใจที่ผิวน้ำ การที่มลสารจะเข้าสู่ร่างกายโดยทางผิวหนังและทางการหายใจ จึงเป็นไปได้อย่างยากลำบาก นอกจากนี้อีกเส้นทางหนึ่งก็คือ การรับสารปรอทผ่านทางรก (transplacental) และทางน้ำนม (transmammary) (Sepulveda et al., 1997, Andre et al., 1990)

การรับสารปรอทผ่านทางน้ำนม เนื่องจาก น้ำนมมี ความเป็นกรด – ด่าง ประมาณ 6.5 ซึ่งค่อนข้างที่จะเป็นกรด ดังนั้น สารพิษที่ขับออกมาในน้ำนมจะเป็นส่วนประกอบที่เป็นด่างเป็นส่วนใหญ่ ในน้ำนมจะมีไขมันเป็นส่วนประกอบประมาณ 3 – 5 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น สารพิษที่ละลายได้ดีในไขมันจะพบว่า มีการแพร่กระจายอยู่ในน้ำนมในปริมาณมาก เช่น ปรอท สามารถถูกส่งผ่านทางน้ำนมได้ในปริมาณมาก การส่งผ่านของสารปรอททางน้ำนมจากแม่ สามารถทำให้เกิดพิษได้ในลูกที่อยู่ระหว่างดื่มนม

การรับมลสารผ่านทางรก (placenta) รกเป็นสิ่งกีดขวางหรือป้องกันสารพิษที่จะทำอันตรายต่อลูกที่อยู่ในครรภ์ แต่ขณะเดียวกันรกเป็นที่นำอาหาร เป็นที่แลกเปลี่ยนก๊าซ นำของเสียจากลูก และยังเป็นที่สร้างฮอร์โมนบางชนิดเพื่อการตั้งครรภ์จนครบกำหนดคลอด เป็นต้น สารอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของลูกในครรภ์นั้นจะผ่านจากรกเข้าสู่ลูกโดยวิธีพิเศษแบบแอคทีฟ เช่น วิตามิน เกลือแร่ กรดอะมิโน และน้ำตาล เป็นต้น แต่ในทางตรงกันข้ามสารพิษส่วนใหญ่จะผ่านจากรกเข้าสู่ลูกแบบการแพร่กระจาย สารแปลกปลอมหลายชนิดซึ่งสามารถผ่านรกได้มีหลายชนิด นอกจากนี้รกยังมีความสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงสารพิษบางชนิดให้เป็นสารที่ไม่เป็นพิษได้อีกด้วย (แก้ว กังสดาลอำไพ, 2537)

3. โดยทางผิวหนัง จะได้รับฝุ่นละออง หรือไอระเหยของปรอท จะเกิดปฏิกริยาต่อผิวหนังได้ ปรอททำให้เกิดการระคายเคือง นอกจากนี้ยาที่มีสารปรอทเป็นส่วนประกอบจะถูกพาโดยการซึมเข้าทางผิวหนัง เมื่อดูดซึมผ่านเข้าไปในกระแสเลือดก็จะกระจายตัวไปตามเนื้อเยื่อต่าง ๆ ทั่วร่างกาย

การเคลื่อนที่ของสารจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสาร เช่น (Walker et al, 2001) ความมีขั้ว (polarity) และความสามารถในการละลายในน้ำ (water solubility) สารบางชนิดเช่น ปรอทมีความสามารถละลายในน้ำต่ำ และค่า Partition coefficien (K_{ow}) ซึ่งหมายถึง ความสามารถในการ

ละลายของสารในไขมัน และในน้ำ คุณสมบัตินี้มีความสำคัญมาก เนื่องจากผนังชีวภาพ เช่น เซลล์ของสิ่งมีชีวิตชั้นสูงประกอบด้วยโมเลกุลของไขมันเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นการที่สารเคมีจะซึมผ่านผนังเซลล์ได้ คุณสมบัติหนึ่งที่จะต้องมีก็คือ สามารถละลายได้ในไขมัน

สำหรับปรอท ค่า K_{ow} มีค่าสูง หมายถึงการที่ปรอทมีความสามารถในการละลายในออคทานอล (octanol)หรือในไขมันได้ดีกว่าในน้ำ ซึ่งแสดงว่า ปรอทสามารถแพร่ผ่านเข้าไปได้ดีใน lipoprotein และสะสมในสิ่งมีชีวิตได้ดี

ความเสถียรของโมเลกุล (molecular stability) สารบางชนิดเช่น โลหะ ไม่สลายตัว แต่สามารถเปลี่ยนรูปได้และการเปลี่ยนรูปของโลหะก็มีผลต่อการเคลื่อนที่ไปยัง เช่น ปรอท (Hg^{2+}) ในตะกอนดิน จะเปลี่ยนรูปเป็นปรอทอินทรีย์ (methylmercury) ซึ่งสะสมได้ในสิ่งมีชีวิตได้โดยการกระทำของแบคทีเรีย ซึ่งการเปลี่ยนรูปทางเคมีของสารปรอทเป็นบอกได้ถึงระดับความเป็นพิษของปรอทอีกด้วย (Beck et al., 1997)

นอกจากคุณสมบัติทางเคมีของสารแล้ว คุณสมบัติของผู้ได้รับสารยังมีผลต่อความเป็นไปของสารในร่างกายอีกด้วย เช่น อายุ, เพศ, ภูมิหลังทางพันธุกรรม, ระยะเวลาการสัมผัสกับสาร, อาหาร และปัจจัยอื่น ๆ ที่มีบทบาทสำคัญต่อการที่ร่างกายจะทำปฏิกิริยากับสารเคมี และได้รับผลที่เกิดขึ้น (An Individual's Characteristics. (1993). [online]. Available: http: // pmep.cce.cornell.edu/profiles/extoxnet/TIB/entry.html).

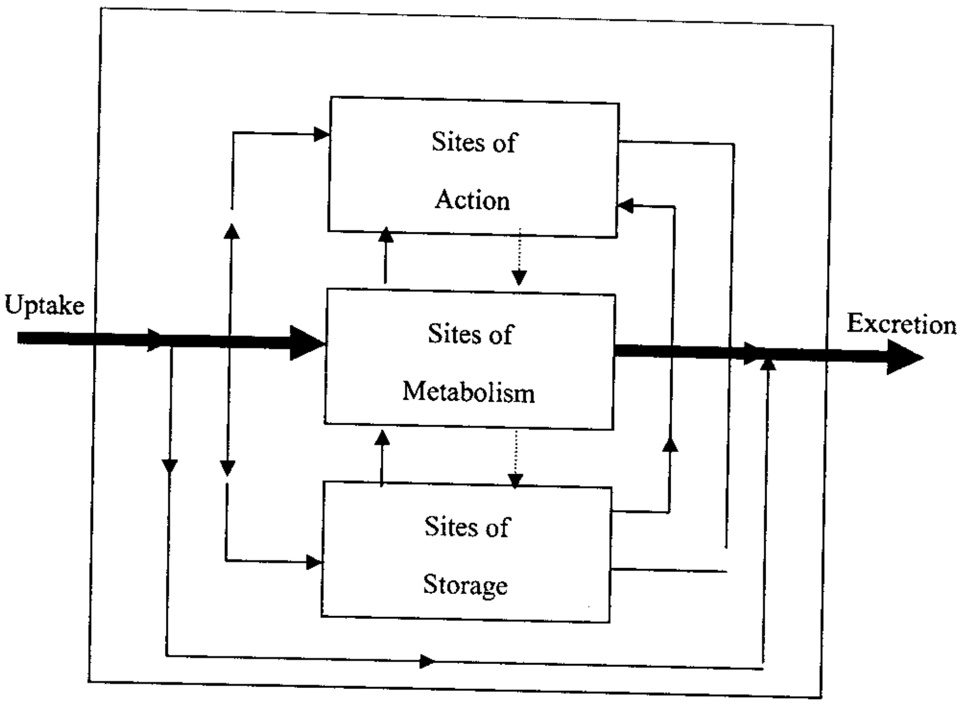
หลังจากการได้รับสารเข้าสู่ร่างกาย (uptake) แล้ว มลสารจะเคลื่อนที่ไปยังส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย เช่น กระแสเลือด, น้ำเหลือง, หรือ Haemolymph (ในแมลง) แล้วไปยังอวัยวะจำเพาะต่าง ๆ ต่อสารพิษ ในร่างกาย แบ่งออกได้เป็น 4 กระบวนการใหญ่ ๆ คือ

1. กระบวนการดูดซึมสารพิษจากบริเวณต่าง ๆ ของร่างกายเข้าสู่กระแสโลหิต (absorption of toxic substances) ตำแหน่งการดูดซึม ได้แก่ ทางเดินอาหาร, ปอด, ทางเข้าทางอื่นโดยการฉีด (ทางหลอดเลือดดำ, ทางช่องท้อง, ทางใต้ผิวหนัง, ทางกล้ามเนื้อ และทางการทา

2. กระบวนการกระจายสารพิษไปยังอวัยวะและส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย (distribution) เช่น กระแสโลหิตและน้ำเหลือง และอวัยวะต่าง ๆ รวมถึงกระดูกและไขมัน

3. กระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (metabolism หรือ biotransformation)

4. กระบวนการกำจัดสารพิษออกจากร่างกาย (excretion) เช่น การกำจัดออกทางน้ำดีโดยตับลงไปในทางเดินอาหาร และอุจจาระในที่สุด, การกำจัดออกทางปัสสาวะโดยไต, การกำจัดออกทางอากาศที่หายใจออกโดยถุงลมและปอด และการกำจัดออกทางต่อมสร้างน้ำย่อยในทางเดินอาหาร (ต่อมน้ำลายและตับอ่อน) และต่อมเหงื่อ เป็นต้น ซึ่งสามารถอธิบายเป็นรูปแบบได้ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงการที่สารพิษเข้าสู่ร่างกายแล้วจะไปยังส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย

1. Sites of (toxic) Action ซึ่งเป็นบริเวณที่สารออกฤทธิ์หรือสารเคมีทำปฏิกริยากับโมเลกุล เช่น โปรตีน หรือดีเอ็นเอ และนำไปสู่การแสดงอาการของพิษ ในกรณีของสารปรอท Sites of Action เช่น ระบบประสาทส่วนกลาง โดยสามารถแพร่ผ่าน Blood Brain Barrier ได้

2. Sites of Metabolism ที่บริเวณนี้จะมีเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารแปลกปลอมเพื่อทำให้เกิดการลดความเป็นพิษ (detoxification) และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบ (biotransformation) เพื่อทำให้ง่ายต่อการพยายามที่จะขับสารพิษออกไป

3. Sites of Excretion การขับสารพิษที่บริเวณนี้อาจจะขับตั้งแต่เริ่มต้นที่ได้รับสารนี้เข้าไปหรือต้องผ่านการเปลี่ยนแปลงรูปแบบ (biotransformation) ก่อน แล้วจึงค่อยถูกขับออกมา ในหลักการแล้วถ้าเป็นสารที่มีการแสดงขั้วประจุไฟฟ้าสูงอยู่แล้วจะถูกขับออกได้ง่ายกว่าสารที่มีการแสดงขั้วประจุไฟฟ้าที่ต่ำ อย่างไรก็ตาม สิ่งมีชีวิตชั้นสูง เช่น สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเลจะมีขบวนการปรับให้สารเคมีมีการแสดงขั้วประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เพื่อสะดวกในการขับออกจากร่างกาย

4. Sites of Storage ที่บริเวณนี้ สารพิษอาจจะยังคงอยู่ในร่างกาย แต่ร่างกายจะทำให้อยู่ในสภาวะที่เฉื่อย (inert) ไม่ก่อให้เกิดพิษหรือลดความเป็นพิษ (detoxification) กับร่างกาย โดยอาจจะอยู่ในรูปที่รวมตัวกับโปรตีนบางชนิดก็ได้ หรือสะสมอยู่ในไขมัน อวัยวะที่มีความสามารถ

ในการสะสมสารพิษได้ดี เช่น ตับ ไต ซึ่งอวัยวะทั้งสองนี้เป็นแหล่งที่มีศักยภาพสูงในการจับตัวกับสารเคมีต่าง ๆ กลไกการดังนั้นในการศึกษาเกี่ยวกับการสะสมสารเคมีใด ๆ ในสัตว์ทดลอง นักวิจัยมักจะคาดว่า ตับ และไตเป็นอวัยวะที่มีการสะสมมากที่สุด (แก้ว กังสดาลอำไพ , 2537)

Wageman and Muir (1984) ได้เสนอว่าระดับความอดทนของเนื้อเยื่อตับที่มีต่อปริมาณปรอทจะอยู่ในช่วง 100 – 400 ไมโครกรัมต่อกรัม แต่ Rawson, Patton, Hofman, Pietra and Johns, (1993) ทำการศึกษา ความสัมพันธ์ระหว่างโรคที่เกิดที่ตับ และปริมาณความเข้มข้นของปรอท โดยพบว่า อาการที่สังเกตได้ที่ตับจะเริ่มปรากฏเมื่อพบปรอทมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 50 – 61 ไมโครกรัมต่อกรัม

จากผลการศึกษาของ Marcovecchio, Gerpe, Basita, Rodrigues, and Moron, ในปี 1990 ซึ่งทำการศึกษาระดับการสะสมของปรอทใน *Kogia breviceps* ในประเทศอาร์เจนตินา พบว่า ระดับการสะสมของปรอทในตับมีปริมาณสูงกว่าในไต และกล้ามเนื้อ (11.7 , 10.5 และ 4.2 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ) Itano, Kawai, Miyazaki, Tatsukawa and Fujiyama. ในปี 1984 ได้ทำการศึกษาหาปริมาณสารปรอทใน *Stenella coeruleoalba* ซึ่งเป็นโลมา (วาฬชนิด ที่มีฟัน) ที่เป็นวัยอ่อนและตัวเต็มวัย ในประเทศญี่ปุ่น พบว่า ระดับการสะสมของปรอทในอวัยวะต่างๆ คือ ตับ ไต ม้าม และกล้ามเนื้อ มีปริมาณแตกต่างกัน โดย ตับมีระดับการสะสมของสารปรอทสูงที่สุด คือ 5.81 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ในวัยอ่อน และ 205 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในตัวเต็มวัย อวัยวะที่มีการสะสมของปรอทรองลงมา คือ ไต กล้ามเนื้อ และม้าม ในตัวอ่อน และ ม้าม กล้ามเนื้อ และ ไต ในตัวเต็มวัย และพบว่า ระดับความเข้มข้นของปรอทในอวัยวะต่าง ๆ จะเพิ่มขึ้นตามอายุ และค่าจะคงที่เมื่ออายุประมาณ 20 – 25 ปี ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Mackey et al. (1996) ที่ทำการศึกษาโลหะ จำนวน 38 ธาตุ ในเนื้อเยื่อตับของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ในทะเลที่ได้จาก National Biomonitoring Specimen Bank (NBSB) พบว่า ในวาฬ Beluga (*Delphinapterus leucas*) ความเข้มข้นของปรอท, วานาเดียม, ซีลีเนียม , เงิน และแคดเมียม จะมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอายุ และสำหรับแมวน้ำ ringed seal (*Phoca hispada*) ความเข้มข้นของปรอท, วานาเดียม , ซีลีเนียม และแคดเมียม จะมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับขนาดความยาวของลำตัว Endo, Sakata and Haraguchi (2000) ได้ทำการศึกษาปริมาณ ของปรอทและแคดเมียม ในเนื้อวาฬที่วางขายในตลาดในประเทศญี่ปุ่น โดยทำการศึกษาในอวัยวะต่าง ๆ คือ ตับ, ไต, ปอด และหัวใจ พบว่าอวัยวะต่าง ๆ มีการสะสมของปรอทในปริมาณที่แตกต่างกัน โดย ตับมีปริมาณการสะสมของปรอทสูงถึง 275 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักเปียก รองลงมาคือ ปอด ไต และหัวใจ (47, 35 และ 16 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักเปียก ตามลำดับ) จะเห็นได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบระดับการปนเปื้อนของปรอทในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเลในอวัยวะต่าง ๆ จะมีความแตกต่างกัน โดยตับจะเป็นอวัยวะ ที่มีความสามารถในการสะสม

ปรอทได้มากกว่าอวัยวะอื่น ๆ เนื่องจากตับมีบทบาทในการเป็นอวัยวะสำหรับการลดพิษ (detoxification) และเก็บสะสม (storage) ทำให้เมื่อมีการวัดความเข้มข้นของปริมาณปรอทจะพบปริมาณปรอทมากที่ตับ (Augier, Park & Ronneau, 1993, Thomson, 1990) แต่ทั้งนี้ทั้งนั้น ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงด้วยก็คือระดับของสารปรอทในอาหารที่สัตว์เหล่านี้กินเป็นอาหาร, ครึ่งชีวิตทางชีวภาพที่ยาวนานของสารปรอท (long biological half – life), ผลจากกระบวนการสะสมทางชีวภาพรวมถึงการเปลี่ยนรูปของสารปรอทด้วย (Sanpera, Capelli, Minganti & Jover, 1993)

การถ่ายทอดผ่านทางห่วงโซ่อาหาร

สารปรอทโดยเฉพาะในรูป Methyl mercury สามารถสะสมผ่านทางห่วงโซ่อาหาร (biomagnification) และจะมีความเป็นพิษสูงขึ้นในสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในระดับการกินที่สูงขึ้นไป (David & Philip, 1992) เมื่อปรอทเข้าไปอยู่ในห่วงโซ่อาหาร จะเพิ่มปริมาณความเข้มข้นสูงขึ้นตามผู้บริโภคลำดับที่สูงขึ้น จากการศึกษาปริมาณการสะสมปรอทอินทรีย์และปรอทอนินทรีย์ในห่วงโซ่อาหาร โดยสาหร่าย Phaeodactylum triornutum ซึ่งจัดอยู่ในระดับการบริโภคล่างสุดของห่วงโซ่อาหาร ลำดับต่อมาของห่วงโซ่อาหารคือ หอยแมลงภู่ (mytilus edulis) และปลา Flounders (platichthys flegus) เป็นผู้บริโภคลำดับสุดท้าย พบว่าปริมาณการสะสมปรอทอินทรีย์และปรอทอนินทรีย์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงตามระดับขั้นของผู้บริโภคลำดับต่าง ๆ (Hansen & Riisgard, 1990) โดยเมื่อแพลงก์ตอนพืช และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ที่อยู่ในระดับการกินอาหารลำดับต้น ๆ ถูกแพลงก์ตอนสัตว์กินเข้าไป ก็เป็นการรับเอาปรอทเข้าไปด้วย สัตว์ชนิดอื่นที่กินแพลงก์ตอนเป็นอาหาร เช่น หอย, หอยฝาเดียว และสัตว์จำพวกกุ้ง, ปู ก็จะได้รับปรอทเข้าไปด้วย พร้อมกับการกินแพลงก์ตอนซึ่งเป็นอาหารของมัน และสัตว์พวกนี้ก็จะถูกกินโดยสัตว์ที่กินเนื้อเป็นอาหาร เช่น ปลา สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเลส่วนใหญ่จะเป็นสัตว์ที่กินเนื้อเป็นอาหาร และมักจะเป็นผู้บริโภคลำดับสูงสุด ซึ่งจะมีการสะสมของปรอทสูงที่สุดด้วย เช่น ใน Beluga whales พบว่าปริมาณปรอทในร่างกายของวาฬ มาจาก การกินอาหารที่มีปริมาณปรอทสะสมอยู่ เช่น ปลา และ หมึก ซึ่งเป็นอาหารหลักของวาฬ (Mackey et al., 1996)

Caurant and Amiard (1995) ได้ทำการศึกษาการปนเปื้อนของแคดเมียม ใน Pilot whales (*Globicephala melas*) พบว่า ในบรรดาสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเล Pilot whales ถือเป็นสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเล ชนิดหนึ่งที่มีปริมาณแคดเมียมในเนื้อเยื่ออยู่ในระดับที่สูง และพบว่าอาหารหลักของวาฬชนิดนี้ ก็คือ หมึก ซึ่งมีผลสำคัญต่อการรับ (intake) แคดเมียมเข้าสู่ร่างกาย เนื่องจากเชื่อว่าหมึกเป็นสิ่งมีชีวิตที่สะสมแคดเมียมได้ดี (Martin & Flegal, 1975 , Honda & Tatsukawa, 1983)

เมื่อวาฬบริโภคหมึกเข้าไปในปริมาณมากก็สามารถเกิดการสะสมแคดเมียมผ่านทางห่วงโซ่อาหารได้

Chongprasith and Wilairatanadilok (1999) ได้ศึกษาการปนเปื้อนของปรอทในเนื้อเยื่อสัตว์ทะเลหลายกลุ่มจากอ่าวไทย พบว่า ปลาหน้าดินและปู มีค่าเฉลี่ยของปรอทสะสมอยู่เนื้อเยื่อสูงกว่าสัตว์ทะเลกลุ่มอื่น Windom & Cranmer (1998) ศึกษาการสะสมของปรอทและปรอทอินทรีย์ในปลา 3 ชนิด ที่เก็บจากบริเวณรอบ ๆ แท่นขุดเจาะก๊าซบงกช จำนวนหนึ่งและซื้อจากตลาดขายปลา จังหวัดสงขลา จำนวนหนึ่ง พบว่า ปริมาณปรอทที่สะสมในเนื้อเยื่อปลายังมีค่าต่ำและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดสำหรับการบริโภค และไม่พบว่ามีความแตกต่างของปริมาณปรอทที่สะสมในปลาทั้งสองกลุ่มอย่างชัดเจน โดยประมาณ 90 % ของปรอทที่สะสมในเนื้อปลาเป็นปรอทอินทรีย์ Mason, Robert, Reinfelder, Francois & Morel (1996) ได้ศึกษาการถ่ายทอดของปรอทตามห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิตในทะเล และสรุปว่า แพลงก์ตอนสามารถใช้ปรอททั้งในรูปปรอทอินทรีย์และปรอทอนินทรีย์ ส่วนการที่พบปรอทอินทรีย์หรือปรอทเมทิล ในปลาสูงเนื่องจากประสิทธิภาพของการถ่ายทอดของปรอทเมทิลตามห่วงโซ่อาหารสูงกว่า รวมถึงการถูกกำจัดออกจากสิ่งมีชีวิตของปรอทอนินทรีย์ที่ง่ายกว่า ทำให้ปรอทเมทิลสะสมในปลาสูง ส่วนหอยสองฝามีความสามารถในการกำจัดปรอทอนินทรีย์ และปรอทเมทิลได้ใกล้เคียงกัน

วรวิทย์ ชีวาพร (2543) ได้ทำการศึกษาปริมาณสารปรอทในสิ่งมีชีวิตที่ทำการเก็บตัวอย่างจาก จังหวัดชลบุรี คือ แพลงก์ตอนพืช, แพลงก์ตอนสัตว์, ปลา, กุ้ง และหมึกโดยแบ่งเป็นระดับห่วงโซ่ต่าง ๆ ได้ 4 ระดับ คือ พวกผู้ผลิต (producer) คือ พืช, พวกกินพืช (primary consumer level) , พวกกินสัตว์ที่กินพืช (secondary consumer level) และพวกกินสัตว์ที่กินสัตว์เป็นอาหาร (tertiary consumer level) ตามลำดับ พบว่า สิ่งมีชีวิตที่อยู่ในระดับห่วงโซ่อาหารที่ 1 และ 2 มีปริมาณปรอทสะสมอยู่ในช่วง 1.8 – 4.6 นาโนกรัมต่อกรัม ในขณะที่สิ่งมีชีวิตที่อยู่ในห่วงโซ่อาหารระดับที่ 3 มีปริมาณปรอทสะสมอยู่ในช่วง 6.1 – 55.1 นาโนกรัมต่อกรัม และในสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในห่วงโซ่อาหารระดับที่ 4 มีปริมาณปรอทสะสมอยู่ในช่วง 23.4 – 90.4 นาโนกรัมต่อกรัม แสดงให้เห็นถึงการขยายตัวทางชีวภาพ ของสารปรอทในห่วงโซ่อาหารอย่างชัดเจน คือ สิ่งมีชีวิตที่มีการกินอาหารที่ซับซ้อนกว่าคือ อยู่ในห่วงโซ่อาหารลำดับที่สูงกว่าจะพบการสะสมของสารปรอทมากกว่าในสิ่งมีชีวิตที่กินอาหารที่อยู่ในห่วงโซ่อาหารที่ต่ำกว่า สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Miyazaki, Itano, Fukushima, Kawai & Honda, (1979) ที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณปรอทในกล้ามเนื้อของพะยูน (*Dugong dugon*)จากเกาะ Sulawesi พบว่า มีปริมาณปรอท 0.005 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ในตัวเต็มวัย และ 0.002 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง ในตัวอ่อน และ Sanpera et al., (1993) ที่ทำการวิเคราะห์หาปริมาณปรอทใน *Baleanoptera physalus* ในประเทศสเปน พบว่า มีปริมาณ

ของปรอท 456 – 1944 นาโนกรัมต่อกรัม ซึ่งความแตกต่างระหว่างระดับความเข้มข้นของปรอทในพวกบาลีนเวล (baleen whales) และพะยูน กับ วาฬที่มีฟัน (toothed whales) คือ วาฬที่ไม่มีฟันซึ่งกินพวกเคยเป็นอาหารและพะยูนซึ่งกินพืชเป็นอาหารจะมีระดับความเข้มข้นของปรอทต่ำกว่าวาฬที่มีฟัน ซึ่งกินพวกหมึก, ปลา และสัตว์ทะเลชนิดอื่น ๆ เป็นอาหารเนื่องจากวาฬที่ไม่มีฟันและพะยูนมีห่วงโซ่อาหารที่สั้นกว่า (เกี่ยวข้องกับความสามารถในการสะสมอาหารที่ต่ำกว่า) และชนิดของอาหารที่มันกินเข้าไปซึ่งอยู่ในส่วนต้น ๆ ของห่วงโซ่อาหาร

แคดเมียม

1. ความเป็นพิษของแคดเมียมและแหล่งที่มา เป็นโลหะหนักที่พบแพร่กระจายอยู่ในเปลือกโลก และพบปะปนอยู่กับโลหะอื่น ๆ โดยเฉพาะสังกะสี แคดเมียมเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเบา อ่อน ดัดงอได้ง่าย และทนต่อการกัดกร่อน แคดเมียมจะถูกปลดปล่อยจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น อุตสาหกรรมเคลือบผิว หรือชุบโลหะ, อุตสาหกรรมตะกั่วและสังกะสี, จากกากตะกอนน้ำทิ้ง, ใช้ผสมกับปรอท เพื่ออุดฟัน และจากการสูบบุหรี่ ฯลฯ แคดเมียมจะไม่ถูกย่อยสลายในสิ่งแวดล้อม แคดเมียมไม่ใช่ธาตุที่จำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต และสามารถละลายได้ในสภาวะที่เป็นกรดและจากคุณสมบัติข้อนี้ แคดเมียมจึงเป็นอันตรายต่อสัตว์ เลี้ยงลูกด้วยนมแบบเฉียบพลันเมื่อพิษเข้าสู่ร่างกาย (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) และเมื่อให้แคดเมียมแก่สัตว์ทดลอง พบว่าจะทำให้เกิดถุงอัณฑะฝ่อ หรือเกิดเนื้องอกที่อัณฑะ ทำลายมดลูก ทำให้แท้ง ทารกในครรภ์พิการหรือมีรูปร่างผิดปกติ เช่น แขนขากุด นอกจากนี้พิษของแคดเมียม ยังทำลายท่อไต และตับ กระดูกฟันเสียหายและทำให้ร่างกายขาดธาตุแคลเซียม เหล็ก ทองแดง และสังกะสี มีผลทำให้กระดูกโครงร่างของร่างกายขาดแคลเซียม เกิดภาวะโลหิตจาง ปอดบวม ถุงลมโป่งพอง และในบางสภาวะสามารถละลายในน้ำและดิน โดยที่พืชสามารถรับแคดเมียม จากดินได้ (นิธิยา รัตนาปนนท์ และวิบูลย์ รัตนาปนนท์, 2543)

แคดเมียมเป็นสารที่มีคุณสมบัติในแง่ของพิษสะสมสูง เนื่องจากมีวงจรครึ่งชีวิต (half life) มากกว่า 10 ปี การสะสมจะมากขึ้นตามอายุ (จะแสดงผลอย่างช้าสุด เมื่ออายุ 50 – 60 ปี) ปริมาณครึ่งหนึ่งของแคดเมียมในร่างกายจะถูกเก็บสะสมที่ไตและตับ และสิ่งมีชีวิตเกือบทุกชนิดมีโอกาสมากในการที่จะเก็บสะสมแคดเมียม เนื่องจากแคดเมียมมีคุณสมบัติที่คล้ายกับสังกะสีทำให้แคดเมียมสามารถเข้าไปแทนที่สังกะสีในเอนไซม์บางชนิด ด้วยเหตุนี้ทำให้การทำหน้าที่ในการ metabolic ถูกทำให้เปลี่ยนไปจากปกติ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) การสะสมของแคดเมียมในน้ำทะเลและสัตว์น้ำมักจะสะสมในแพลงก์ตอนพืชในรูปแคดเมียมฟอสเฟต และเข้าสู่สัตว์น้ำทางห่วงโซ่อาหารเมื่อร่างกายมีการสะสมแคดเมียมเกินขีดความปลอดภัยจะมีอาการที่สังเกตได้คือ

พบโปรตีน เช่น อัลบูมิน ในปัสสาวะ เนื่องจากระบบการทำงานของไตถูกทำลาย ปัสสาวะมีสีน้ำตาล และพบกรดอะมิโนและแคดเมียมสูง ทำให้เกิดการเสียสมดุลของแคดเมียมในร่างกาย และถ้าร่างกายของสิ่งมีชีวิตมีการสะสมในปริมาณที่สูงมาก ๆ คือ ทำให้เกิดความผิดปกติของกระดูกและข้อต่อ ความดันโลหิตสูง เกิดความผิดปกติของไต อาจเป็นสาเหตุของโรคมะเร็ง และอาจมีผลทางพันธุกรรมด้วย (สุชาดา มะแส, 2540)

2. การสะสมแคดเมียมในสิ่งมีชีวิต ระดับการปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งมีชีวิต เช่น สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเล จะพบมากที่ไต มากกว่าอวัยวะส่วนอื่น ๆ Wageman และคณะ ในปี 1993 พบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมจะเพิ่มขึ้นตามอายุและมีการสะสมมากที่ไตและตับ นอกจากนี้การที่สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเลบางชนิดมีระดับการปนเปื้อนของแคดเมียมสูงกว่าสัตว์ชนิดอื่น ๆ อาจเนื่องมาจากชนิดของอาหารและปริมาณที่มันกินเข้าไปในแต่ละวัน เช่น อาหารหลักของวาฬชนิด *Globicephala melas* คือ หมึก ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่า หมึกมีความสามารถในการสะสมแคดเมียมสูง (Honda & Tatsukawa, 1983) Caurant & Amiard (1995) ได้ทำการหาปริมาณแคดเมียมในหมึก พบว่ามีปริมาณเฉลี่ย 134 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง และพบว่าวาฬมีปริมาณแคดเมียมในไต 78 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักเปียก และในตับ 50 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักเปียก และจากการศึกษาของ Honda และคณะ 1987 ได้ทำการวัดความเข้มข้นของโลหะหนักหลายตัวใน Antarctic kirll ที่ได้จากในท้องของ Southern Minke whale พบปริมาณแคดเมียม 0.04 – 8.35 ไมโครกรัมต่อกรัม, ตะกั่ว 0.01 – 2.74 ไมโครกรัมต่อกรัม และปรอท 0.04 – 0.091 ไมโครกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ Schnider (1986) แนะนำว่า krill ประกอบไปด้วย แคดเมียมในปริมาณที่สูงกว่าในปลาที่เป็นอาหารของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเลทั่วไป แหล่งที่มาของโลหะเหล่านี้ในสิ่งแวดล้อมยังไม่เป็นที่ทราบกันมากนัก แต่เป็นไปได้ว่า แคดเมียมมีแหล่งที่มาจากในธรรมชาติมากกว่ามาจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น ปรากฏการณ์น้ำผุด (upwelling) ที่มีแคดเมียมอยู่ในกระแสน้ำมาก โดยเกิดจากกระแสน้ำในมหาสมุทร

ตะกั่ว

สารประกอบตะกั่วมีอยู่ในสิ่งของที่คนเรานำมาใช้ในชีวิตประจำวันทั่วไป เช่น แบตเตอรี่ พลาสติก กระจกเงา น้ำมันเชื้อเพลิง และอุตสาหกรรมเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ คนเรายังอาจได้รับตะกั่วจากอาหารและน้ำดื่ม จากฝุ่นละอองในอากาศบริเวณที่มีงานก่อสร้าง และเด็กอาจได้รับจากของเล่นที่มีสีต่าง ๆ ในประเทศอังกฤษพบว่าคนจะมีโอกาสได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายประมาณวันละ 200 – 250 ไมโครกรัม ร่างกายผู้ใหญ่จะดูดซึมตะกั่วได้เพียง 5- 10 % เท่านั้น แต่เด็กที่มีอายุ 3 เดือน ถึง 8.5 ปี จะดูดซึมได้ประมาณ 50 % และเหลือค้างอยู่ในร่างกายประมาณ 18 %

1. ความเป็นพิษของตะกั่วต่อสิ่งมีชีวิต ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่สามารถรวมตัวกับกลุ่มของสารอินทรีย์ เช่น Tetra-ethyl lead ตะกั่วเกิดได้ในธรรมชาติ และถูกปลดปล่อยมาจากกิจกรรมของมนุษย์ ตะกั่วในรูปของสารอนินทรีย์จะมีความเป็นพิษน้อยกว่า ตะกั่วในรูปของสารประกอบอินทรีย์ (organolead compound) ตะกั่วสามารถละลายได้ในน้ำ ในรูปของไอออน และสามารถรวมตัวกับสารเคมีอื่น ๆ เปลี่ยนรูปเป็น เกลือ ตะกั่ว (lead salts) ตะกั่วในทะเลจะมีความเป็นพิษน้อยกว่า โลหะหนักตัวอื่น ๆ ตะกั่วไนเตรต (lead nitrate) ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของไดอะตอมบางชนิด ตะกั่วสามารถมีการสะสมได้ในสัตว์บางชนิด (Clark, 2001) ตะกั่วมีความเป็นพิษสูงในสัตว์และมนุษย์ เช่น ตะกั่วจะไปยับยั้งการสังเคราะห์ฮีม (heme) ในเม็ดเลือดแดง โดยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ฮีม เช่น ALAD และตะกั่วจะรบกวนการสังเคราะห์โปรตีนโกลบิน โดยตะกั่วจะเข้าไปจับกับหมู่ไทออลในโมเลกุลของเอนไซม์ การวัดเอนไซม์ ALAD ในเลือดเพื่อตรวจปริมาณตะกั่ว พบว่า เมื่อมีระดับตะกั่วในร่างกายเพิ่มขึ้นจะทำให้เอนไซม์ลดน้อยลง

2. ตะกั่วในสิ่งแวดล้อม การปนเปื้อนของตะกั่วในสิ่งแวดล้อม เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมและรถยนต์ เนื่องจากในน้ำมันที่ใช้กับรถยนต์มีการเติมสารตะกั่วอินทรีย์ คือ ตะกั่วเตตระเอทิล (tetraethyl lead) เป็นสารต้านการน็อค (antiknocking) เพื่อเพิ่มค่าออกเทนของน้ำมันให้สูงขึ้น เมื่อน้ำมันถูกเผาผลาญจะได้ตะกั่วออกไซด์ ตะกั่วคลอไรด์ และสารประกอบตะกั่วอนินทรีย์อื่น ๆ สารเหล่านี้จะแพร่กระจายอยู่ในอากาศบริเวณสองข้างถนนที่มีรถยนต์วิ่ง ในระยะห่างจากถนนไม่เกิน 30 เมตร หากระยะห่างกว่านี้ระดับของตะกั่วจะลดลง สารตะกั่วจะปนเปื้อนอยู่ในดินและพืช อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าในสิ่งแวดล้อมจะมีการปนเปื้อนของตะกั่วมาก แต่ปริมาณตะกั่วที่พบในอาหารไม่ได้เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เพราะตะกั่วที่อยู่ในดินเคลื่อนที่ไม่ได้ ดังนั้นปริมาณตะกั่วที่พบในพืชจะน้อยกว่าที่พบในดิน สำหรับผักที่มีพื้นใบกว้างอาจมีระดับของตะกั่วมากหากปลูกอยู่ใกล้แหล่งที่ปล่อยตะกั่ว เช่น บริเวณข้างถนน เมื่อสัตว์กินพืชที่มีตะกั่วเข้าไป ร่างกายไม่สามารถดูดซึมตะกั่วได้มากนัก ส่วนใหญ่จะถูกขับออกทางอุจจาระ

สังกะสี

1. แหล่งที่มา สังกะสีที่พบปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม มาจากน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม โรงงานถลุงแร่ และจากการใช้ยาปราบศัตรูพืช นอกจากนี้ การชะล้างของน้ำฝนจากบ้านที่มุงหลังคาเคลือบด้วยโลหะสังกะสีก็มีโอกาสที่สังกะสีจะปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำได้ดีและส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ในแหล่งน้ำด้วย (เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต, 2539) และถึงแม้

สังกะสีจะจัดเป็นธาตุที่มีความจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต แต่สิ่งมีชีวิตก็ต้องการในปริมาณที่ไม่มากนัก และในสิ่งมีชีวิตพบสังกะสีมาก ที่ ตา และผิวหนัง รองลงมาคือ ตับและไต และจะถูกขับออกมาทางอุจจาระ ปัสสาวะและเหงื่อ เนื่องจากสังกะสีเป็นส่วนประกอบสำคัญของเอนไซม์หลายชนิด เช่น carbonic anhydrase, carboxy peptides และ dehydrogenase ซึ่งพบได้ในตับและเรตินา จึงมีผลทำให้อวัยวะเหล่านี้มีสังกะสีอยู่มากกว่าส่วนอื่น ๆ ของร่างกาย (Robert, 1989 อ้างถึงใน ฌวนาฎ ศุขสุนทร, 2547)

2. การปนเปื้อนและผลต่อสภาพแวดล้อม สังกะสีเป็นธาตุที่มีการละลายได้ดีในสภาวะที่เป็นกรด และเนื่องจากสังกะสีมีความสามารถละลายได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุอื่น ๆ โอกาสปนเปื้อนสู่สภาพแวดล้อมอื่นจึงมีอยู่สูง เช่น ในออสเตรเลีย ตะกอนในอ่าวสเปนเซอร์ (spencer gulf) ใกล้โรงงานถลุงแร่มีสังกะสีปนเปื้อนอยู่สูงกว่าปริมาณปกติถึง 30 เท่า (ศุภมาศ พณิชศักดิ์พัฒนา, 2539)

อุตสาหกรรมโลหะที่มิใช่แร่เหล็ก และการใช้กากตะกอนน้ำโสโครก เป็นแหล่งปนเปื้อนที่สำคัญ เช่น การใช้กากตะกอนน้ำโสโครกในดินทรายร่วน (loamy sand) พีเอช 6.1 และอินทรียวัตถุ 1.25 % สามารถทำให้สังกะสีในรูปที่ละลายง่ายและรูปที่แลกเปลี่ยนได้ จากปริมาณที่มีอยู่เดิม 3 และ 13% เพิ่มเป็น 21 และ 34 % ตามลำดับ ซึ่งนับเป็นสัญญาณอันตรายเพราะสังกะสีในกากตะกอนดังกล่าวส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพละลายให้พืชดูดกินได้ และสามารถถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้เช่นกัน (ศุภมาศ พณิชศักดิ์พัฒนา, 2539)