

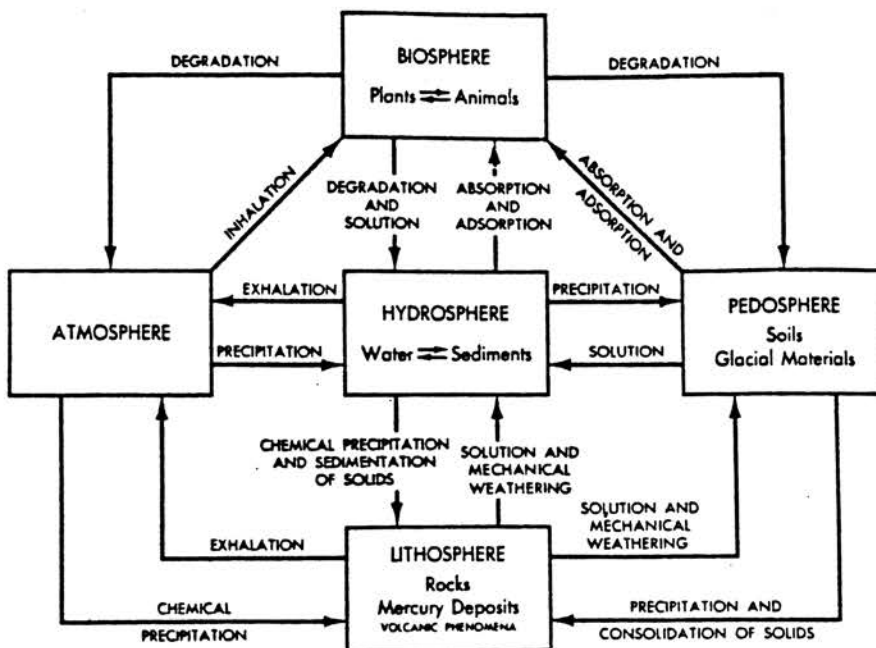
ปรอทในสิ่งแวดล้อม

2.1 ปรอทในสิ่งแวดล้อม

ปรอทสามารถพบได้ในสิ่งแวดล้อมเกือบทุกแห่ง ในธรรมชาติส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้นในรูปของสารประกอบซัลไฟด์ (ชินนาบาร์) และพบว่าเกิดขึ้นในปริมาณค่อนข้างสูงอยู่ในแร่ต่าง ๆ มากกว่า 30 ชนิด และประมาณว่ามีปรอทอยู่  $2.7 \times 10^{-6}$  เปอร์เซ็นต์ของเปลือกโลก

2.2 การปล่อยปรอทสู่สิ่งแวดล้อมโดยธรรมชาติและการทำงานของมนุษย์

พบว่ามีการหมุนเวียนของปรอทในสิ่งแวดล้อมตั้งแต่ศตวรรษที่ 16 โดยที่ละหมุนเวียนในส่วนของเปลือกโลกที่เป็นของแข็ง (lithosphere) ส่วนของบรรยากาศ (atmosphere) ส่วนที่เป็นน้ำ (hydrosphere) ส่วนของดิน (pedosphere) และในส่วนของสิ่งมีชีวิต (biosphere) และในปัจจุบันพบว่าวงจรการหมุนเวียนของปรอทสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรหมุนเวียนของปรอทในธรรมชาติ (D'Itri, 1975)

ปรอทถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมทั้งโดยธรรมชาติและการกระทำของมนุษย์ เช่นพบว่ามีการเผิงของแร่ปรอท 800 ตัน/ปี มีการปล่อยปรอทจากเชื้อเพลิงที่เป็นฟอสซิลในช่วงปี 1900-1970 จำนวน  $511 \times 10^3$  ตัน และในช่วงปี 1945-1958 จากการใช้ปรอทในอุตสาหกรรมของสหรัฐอเมริกาได้ทำให้สูญเสียปรอทไปในสิ่งแวดล้อมมากกว่า 10,000 ตัน และจากการใช้ถ่าน (coal) พบว่ามีการปลดปล่อยปรอทประมาณ 3000 ตันต่อปี

ปรอทที่ถูกปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมมีมากขึ้นตั้งแต่ปี 1960 และในการสำรวจการปล่อยปรอทสู่บรรยากาศเนื่องจากอุตสาหกรรมอยู่ในช่วงประมาณ 25,000 ตัน/ปี ถึง 150,000 ตัน/ปี

ปรอทที่ผลิตได้ จะใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ปรอทคือ

- โรงงานผลิตคลอรีนและโซดาไฟ ใช้ในขบวนการอิเล็กโทรไลซิส
- โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ ใช้ในการป้องกันแบคทีเรียและเชื้อราที่ทำลายเยื่อกระดาษ
- โรงงานอุตสาหกรรมพลาสติก ใช้เป็นคะตะลิสต์
- อุตสาหกรรมอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น ทำรีเลย์ลิวทซ์, แบตเตอรี่
- โรงงานเภสัชกรรม
- อุตสาหกรรมทำสี
- การหลอมโลหะโดยวิธีอิมัลชัน

สำหรับสารปรอทอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม พบว่าเนื่องจากผลของ

1. ของเสียจากขบวนการผลิตของโรงงานสารเคมี (methyl mercury)
2. สารเคมีที่ใช้กว้างขวางในทางเกษตรกรรม (methyl, ethyl และ phenyl mercury)
3. การใช้เป็นยาป้องกันการติดเชื้อ และฆ่าเชื้อราในทางการแพทย์ (ethyl mercury) และในเสื้อผ้า (phenyl mercury)

โดยส่วนมากนั้นโรงงานสารเคมีมักจะปล่อยของเสียที่มีปรอทอยู่ในรูปของปรอทอินทรีย์ แต่พบว่าในขบวนการผลิต acetaldehyde จาก acetylene ซึ่ง acetaldehyde จะถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยการ hydrogenation ของ acetylene ซึ่งใช้ mercuric oxide ที่ละลายในกรดซัลฟูริกเป็นคะตะลิสต์ จะทำให้เกิดการฟอร์มตัวของ methylmercuric chloride และในการผลิต Vinyl โดยใช้ mercuric chloride เป็นคะตะลิสต์ พบว่า methylmercuric chloride เกิดขึ้นเช่นกัน

### 2.3 การละลายของปรอทในดินตะกอน

ปรอทที่ละลายในดินตะกอนได้มาจากธรรมชาติและการกระทำของมนุษย์ ในอ่าวมิแนมาตาตะที่เกิดมลภาวะ พบปริมาณปรอทในดินตะกอนสูงถึง 2,010 ppm (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งในระดับปกติดินตะกอนในแหล่งน้ำทั้งแม่น้ำ ทะเลสาบ และมหาสมุทร มีปรอทต่ำกว่า 70-100 ppb

สารปรอทเมื่อถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ส่วนใหญ่จะถูกดูดซึม (absorb) เข้าไปอยู่ในอนุภาคของตะกอนที่แขวนลอยทั้งที่เป็นพวกสารอินทรีย์และอนินทรีย์ และตกตะกอนลงสู่พื้นที่ยังน้ำในเวลาต่อมา โดยพบว่าในน้ำที่มีสารประกอบอินทรีย์เช่น humate และ fulvate ละลายอยู่นั้น สารละลายของสารอินทรีย์ดังกล่าวสามารถรวมตัวกับสารปรอทได้เป็นสารปรอทเชิงซ้อนทั้งที่ละลายน้ำได้และไม่ได้ ส่วนของสารปรอทเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำจะตกตะกอนสู่ท้องน้ำทันที ส่วนที่ละลายน้ำได้ก็จะถูกดูดซึม โดยอนุภาคของตะกอนแขวนลอยและจะมีการตกตะกอน เกิดขึ้นเช่นกัน

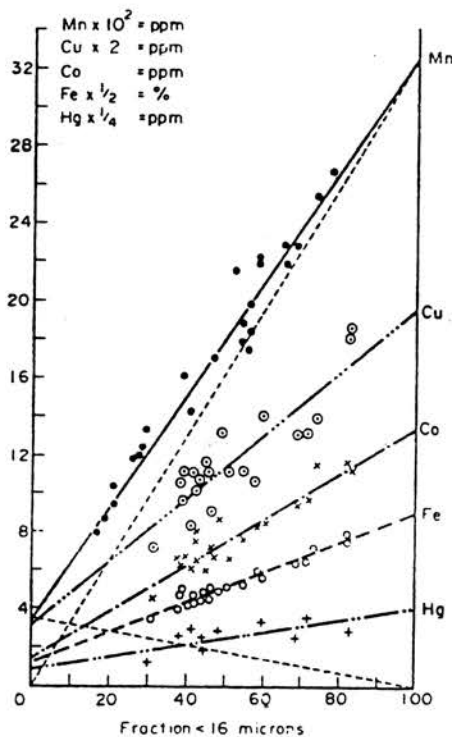
ความเข้มข้นของปรอทในดินตะกอนขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างด้วย โดยถ้าดินตะกอนมีลักษณะเป็นดินเหนียว (clay) และมีสารอินทรีย์อยู่มากจะมีปริมาณปรอทสูง และระดับปรอทขั้นพื้นฐาน (background level) ในสภาพดินต่างกันก็ไม่เท่ากันด้วย ในดินตะกอนที่มีลักษณะเป็นทรายมีปริมาณปรอทอยู่ในช่วงน้อยกว่า 0.01 ppm- 0.05 ppm ส่วนในดินตะกอนที่เป็นดินเหนียวที่มีสารอินทรีย์นั้นมีปริมาณปรอทอยู่ในช่วง 0.05 ppm-0.15 ppm (Konrad, 1970)

การเปลี่ยนปรอทในรูปแบบต่าง ๆ ให้เป็นปรอทในรูปเมธิล (methylmercury) นั้น พบว่าเกิดในชั้นของดินตะกอน แต่ถ้าปรอทอยู่ลึกลงไปชั้นดินตะกอนจะไม่มีผลต่อการ

เกิดเมธิลเมอร์คิวรีถ้าไม่ถูกรบกวน อย่างไรก็ตามการเคลื่อนไหวของกระแสน้ำ และปรากฏการณ์ทางกายภาพอื่น ๆ เช่น สัตว์เล็ก ๆ จำพวก worm สามารถรบกวนชั้นของดินตะกอนที่มีปรอทลึก 2 ซม. พวกสัตว์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเช่น หอยสามารถรบกวนชั้นดินตะกอนได้ลึกอย่างน้อย 9 ซม. และในบริเวณที่มีการขุดลอกผิวหน้าของดินตะกอนจะมีการรบกวนในระดับลึกหลาย ๆ ฟุต

### 2.3.1 ขนาดของดินตะกอนกับการสะสมปรอท

พบความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรง (Linear relationship) ระหว่างปรอทที่สะสมในดินตะกอนกับขนาดของดินตะกอน โดยที่การสะสมจะมีมากเมื่อดินตะกอนมีขนาดน้อยกว่า 16  $\mu\text{m}$  แต่ถ้าขนาดของดินตะกอนน้อยกว่า 2  $\mu\text{m}$  ก็จะมีความสัมพันธ์กันน้อยมาก หรือไม่มีความสัมพันธ์กันเลย (Krenkel, 1975)



Linear relationships between metal contents and percentage of fraction < 16  $\mu\text{m}$  (Ems sediment).

รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงระหว่างปริมาณปรอทกับจำนวนเปอร์เซ็นต์ของส่วนดินตะกอนที่มีขนาดน้อยกว่า 16  $\mu\text{m}$  (Krenkel, 1975)

### 2.3.2 สารอินทรีย์ในดินตะกอนกับการละลายปรอท

ปริมาณปรอทมีความสัมพันธ์กับสารอินทรีย์ในดินตะกอน โดยดินตะกอนที่มีความเข้มข้นของปรอทสูงจะมีปริมาณสารอินทรีย์อยู่มาก (Warren et al., 1966 และ Reimers & Krenkel, 1974) แต่ละสารอินทรีย์ทุกรูปแบบสามารถดูดซับปรอทอินทรีย์ได้ โดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่มีซัลเฟอร์ (sulfur) จะสามารถดูดซับได้มากที่สุด ในขณะที่เดียวกันปริมาณคลอไรด์มีผลต่อความสามารถในการดูดซับปรอทของสารอินทรีย์ในดินตะกอนโดยพบว่าความเค็ม (salinity) มีผลต่ออัตราการดูดซับปรอทของสารอินทรีย์กลุ่ม Carboxyl แต่มีผลน้อยมากต่อกลุ่ม sulphhydryl และ amine

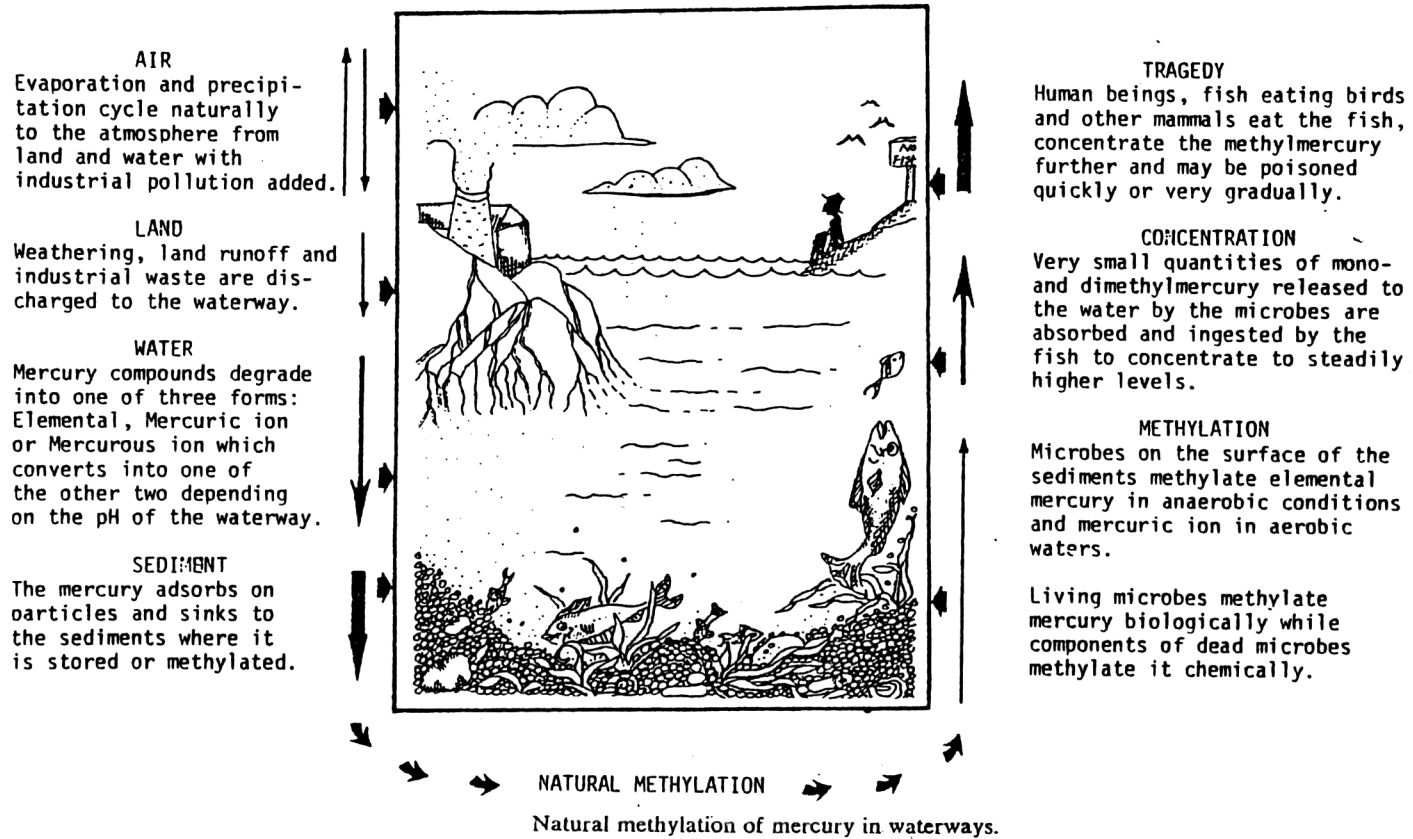
พบว่า pH มีผลต่อการดูดซับปรอทของสารอินทรีย์ในดินตะกอนจากธรรมชาติ โดยที่ pH ต่ำ จะสามารถดูดซับปรอทได้มาก (Reimers et al., 1975 Krenkel et. al, 1975)

### 2.4 การเกิดเมธิลเลชัน (Methylation) ของปรอทและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

ปรอทที่ถูกปล่อยสู่แหล่งน้ำ รูปแบบที่สำคัญมักจะอยู่ในรูปใดรูปหนึ่งดังนี้ (Jernelov, 1969)

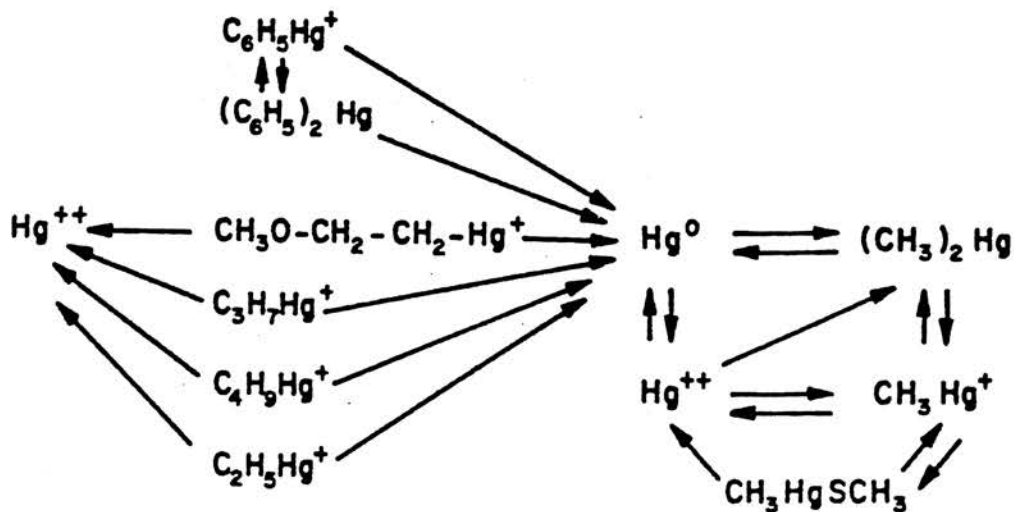
1. metallic mercury,  $Hg^0$
2. inorganic divalent mercury,  $Hg^{2+}$
3. phenylmercury,  $C_6H_5Hg^+$
4. methylmercury,  $CH_3Hg^+$
5. alkoxyalkylmercury,  $CH_3OCH_2CH_2Hg^+$

จากนั้นปรอทส่วนใหญ่จะถูกดูดซับ (adsorption) โดยอนุภาคตะกอนที่แขวนลอยและตกตะกอนลงไปสะสมอยู่ในชั้นของดินตะกอนที่มีสารอินทรีย์ (Organogenic sediment) ซึ่งในที่สุดปรอทส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของปรอทอินทรีย์ และพบว่าปรอทดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนให้เป็นปรอทอินทรีย์ได้ในรูปของปรอทเมธิล (methylmercury) ซึ่งเรียกขบวนการนี้ว่าการเกิดเมธิลเลชัน (Methylation)



รูปที่ 2.3 การเกิดเมธิลเลชันในแหล่งน้ำธรรมชาติ (D'Itri, 1977)

การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นโดยที่ปรอทในรูปโลหะ (metallic mercury) จะถูกออกซิไดส์ (oxidize) ส่วนปรอทฟีนิล (Phenylmercury) และปรอทอัลคิล (alkylmercury) จะถูกสลายพันธะ จากนั้นด้วยขบวนการทางชีววิทยา อีออนปรอท (mercuric ion) จะถูกเมทิลเลต (methylate) ได้เป็นปรอทโมโนเมทิล (monomethylmercury) หรือปรอทไดเมทิล (dimethylmercury) ซึ่งปรอทโมโนเมทิลจะถูกสะสมในสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ส่วนปรอทไดเมทิลมีแนวโน้มที่จะระเหยไปสู่บรรยากาศได้ง่าย แต่ถ้าในบรรยากาศมีสภาพเป็นกรดหรือได้รับแสงอุลตราไวโอเล็ตก็จะเปลี่ยนรูปเป็นปรอทโมโนเมทิลตกลงมาพร้อมกับฝนอีก และทั้งนี้ปริมาณสัมพัทธ์ของการเกิดปรอทโมโนเมทิลและปรอทไดเมทิลขึ้นอยู่กับชนิดของจุลชีพ ปริมาณสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของปรอท อุณหภูมิ และ pH ในแหล่งน้ำ (Jensen และ Jernelev, 1969 และ Wood et. al, 1968) ทั้งนี้การเกิดเมทิลเลชันและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น แสดงไว้ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4



รูปที่ 2.4 การแปรเปลี่ยนรูปของปรอทในแหล่งน้ำ (D'Itri, 1975)

เป็นที่น่าสังเกตว่า แบคทีเรียเป็นสาเหตุในการเปลี่ยนแปลงปรอทรูปต่าง ๆ ให้เป็นปรอทเมธิลในธรรมชาติ เพราะสามารถเปลี่ยนรูปสารปรอทได้หลายทาง บางประเภทจะดูดซึมปรอทภายนอกของผนังเซลล์ และเปลี่ยนให้เป็นไอปรอทโดยตรงบางชนิดเช่น Escherichia coli จะดูดซึมปรอทไว้แล้วไอออนปรอท (mercuric ion) จะรวมตัวกับของเหลวภายในเซลล์ (Cytoplasm) และสลายตัวเป็นสารประกอบอื่นหรืออยู่ในรูปที่ระเหยได้ และพบว่าแบคทีเรียชนิด Clostridium cochlearium สามารถสร้างปรอทเมธิลจากปรอทอนินทรีย์ สำหรับ Pseudomonas aeruginosa proteus สามารถเปลี่ยนเมอคิวริกไอออนให้เป็นปรอทในรูปโลหะได้ ซึ่งต่อมา Jensen และ Jernelov (1969) สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าสิ่งมีชีวิตในดินตะกอนสามารถเมธิลเลตปรอทอนินทรีย์

#### 2.4.1 การออกซิเดชันของ metallic mercury ( $Hg^0$ ) เป็นเมอคิวริกไอออน ( $Hg^{++}$ )

การออกซิเดชัน  $Hg^0$  ให้เป็น  $Hg^{++}$  ในดินตะกอนเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อมี Redox potential เพียงพอซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E = 850 + 30 \log \frac{(Hg^{++})}{\alpha}$$

โดยที่ E = redox potential ที่จำเป็นในการออกซิไดซ์  $Hg^0$  เป็น  $Hg^{++}$

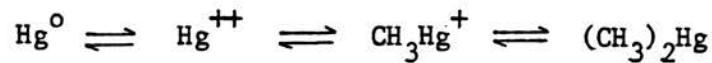
$\alpha$  = ค่าประมาณแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง  $Hg^{++}$  กับสารอินทรีย์

30 = Nernst constant

850 = standard reduction potential

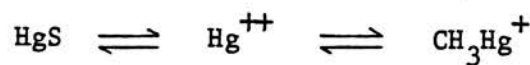
ในการศึกษาของ Werner (1969) ได้ค่า  $\alpha$ -coefficient  $10^{21}$  ฉะนั้นถ้ามีการเกิดขึ้นของ  $Hg^{++}$  2 มล./ล ( $\sim 10^{-5}M$ ) การออกซิเดชันจะต้องการ redox potential น้อยกว่า 80 มิลลิโวลต์ ซึ่งในธรรมชาติถ้าแหล่งน้ำมีออกซิเจนเพียงพอ และ pH เป็นกลางหรือใกล้จะเป็นกลาง จะมี redox potential อยู่ในช่วงประมาณ 520 มิลลิโวลต์ ซึ่งพบว่า การออกซิเดชันจะเกิดขึ้นในทันทีที่แหล่งน้ำมีสารอินทรีย์และออกซิเจน ซึ่งจะมีผลต่อเฟื่องในการเกิดเมธิลเลชัน





#### 2.4.2 เมธิลเลชั่นของเมอคิวริคัลไฟต์ (Mercuric sulfide)

เมอคิวริคัลไฟต์ ( $\text{Hg S}$ ) เป็นรูปแบบหนึ่งของ  $\text{Hg}^{++}$  จะถูกออกซิไดส์ ก่อนที่เมธิลเลชั่นจะเกิดขึ้น โดยที่เมอคิวริคัลไฟต์เกือบจะไม่ละลายอยู่ในน้ำ (solubility product =  $10^{-53}$ ) เมื่อในแหล่งน้ำมีออกซิเจน เมอคิวริคัลไฟต์จะถูกออกซิไดส์เปลี่ยนเป็น เมอคิวริคัลเฟต (Mercuric sulfate,  $\text{HgSO}_4$ ) และขบวนการทางชีววิทยาจะทำให้เกิด เมธิลเลชั่นขึ้น



พบว่าอัตราส่วนของอัตราการเกิดเมธิลเลชั่นเปรียบเทียบกับระหว่าง ionic divalent mercury และเมอคิวริคัลไฟต์อยู่ในช่วงประมาณ  $1 : 10^{-3}$

#### 2.4.3 ผลของ pH ในการเกิดเมธิลเลชั่น

อัตราการเกิดขึ้นของเมธิลเลชั่นขึ้นอยู่ pH โดยการเกิดขึ้นของปรอท โมโนเมธิล และปรอทไดเมธิลขึ้น ที่ pH ต่ำจะเกิดปรอทโมโนเมธิล ที่ pH สูงกว่าคือ ในสภาวะที่เป็นกลางหรือด่าง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดปรอทไดเมธิล ซึ่งจะระเหย ไปในอากาศได้ง่าย ไม่สะสมในสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ซึ่งในธรรมชาติที่ pH ต่ำเกิดขึ้นได้ บากมากจึงมีการเกิดปรอทไดเมธิลที่ไม่อยู่ในสภาวะถาวร

#### 2.4.4 สภาวะการมีออกซิเจนและขาดออกซิเจนกับการเกิดเมธิลเลชั่น

มีการศึกษาทางชีวเคมีเกี่ยวกับการเมธิลเลชั่นของปรอทโดยการใช้น้ methanogenic bacteria ซึ่งเป็น anaerobic bacteria ทำให้เกิดความคิดว่า biological methylation ในน้ำและดินตะกอนที่มีปรอทปนเปื้อนครวจะเกิดในสภาวะที่ ขาดออกซิเจน (anaerobic condition) แต่ในน้ำและดินตะกอนในธรรมชาติ ในสภาวะ ที่ขาดออกซิเจนจะมีไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ และจะเกิดการรวมตัวกับปรอทเป็นปรอทซัลไฟด์

(mercuric sulphide) ซึ่งจะเกิดการเมธิลเลชันได้้น้อยมาก โดยโอกาสที่จะเกิดการออกซิเดชันเปลี่ยนซัลไฟด์ (sulphide) เป็นซัลเฟต (sulphate) เพื่อให้ได้  $Hg^{++}$  ในการเมธิลเลชันน้อยมาก ซึ่งหมายความว่าในระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำที่อยู่ในสภาวะขาดออกซิเจน และมีไฮโดรเจนซัลไฟด์จะมีผลในการยับยั้งการเกิดเมธิลเลชันของปรอท

## 2.5 ระยะเวลาในการกลับสู่สภาพเดิมของดินตะกอนที่มีปรอทสะสม

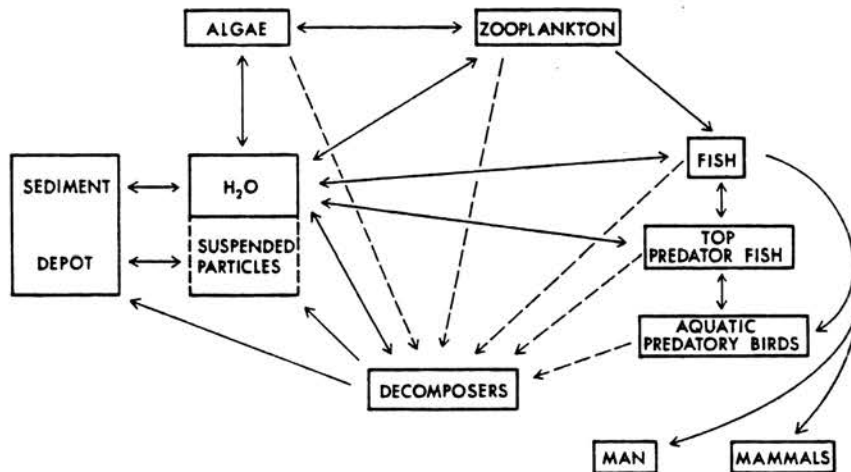
มีการศึกษาผลระยะยาวของปรอทที่สะสมในดินตะกอน (Jernelov , 1974) โดยที่มีการปิดโรงงาน chloralkali ในปี 1925 และเมื่อทำการวัดหาปริมาณปรอทในดินตะกอนและใน organisms ในปี 1974 ยังคงพบความเข้มข้นของปรอทในปริมาณสูง และพบว่าการศึกษาจะรอคอยให้แหล่งน้ำขุดลอกกลับสู่สภาพเดิมด้วยตัวเองนั้นต้องใช้เวลาานมากกว่า 45 ปี และถ้าแหล่งน้ำอยู่ในลักษณะที่มีธาตุอาหารน้อย (Oligotrophic) ก็จะมีอัตราของการตกและสะสมตะกอนเข้ามาอีก ชั้นของดินตะกอนที่มีปรอทจะถูกปกคลุมอย่างช้า ๆ พบว่าบางพื้นที่ที่การปลดปล่อยปรอทหยุดลงเมื่อ 25-30 ปีมาแล้วในปัจจุบันยังมีการพบปรอทอยู่ลึกลงไปในดินตะกอนลึกหลายสิบเซนติเมตร

ในลวีเตนมีการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการที่จะเพิ่มความสามารภในการขุดลอกกลับสู่สภาพเดิมของดินตะกอนที่มีปรอทสะสมโดยมีทางเลือก 4 วิธี

1. ทำการครอบคลุมชั้นของดินตะกอนที่มีปรอทด้วย inert material เช่น clay
2. ทำการครอบคลุมด้วยวัสดุที่สามารถดูดซับปรอทไว้ได้ เช่น freshly ground silica
3. พยายามเปลี่ยนรูปของปรอทให้เป็นปรอทซัลไฟด์ โดยทำให้แหล่งน้ำเกิดมลภาวะด้วยซัลไฟด์ ซึ่งอาจทำได้โดยการเติม  $H_2S$  หรือ  $FeS$  แต่จะก่อให้เกิดผลเสียที่สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำจะถูกทำลายชีวิตด้วย
4. พยายามเปลี่ยนขบวนการเกิดเมธิลเลชัน ให้เป็นไปในทางที่จะก่อให้เกิดปรอทโตเมธิล ซึ่งทำได้โดยทำให้ pH ของแหล่งน้ำสูงขึ้น

## 2.6 การสะสมปรอทในสิ่งมีชีวิต

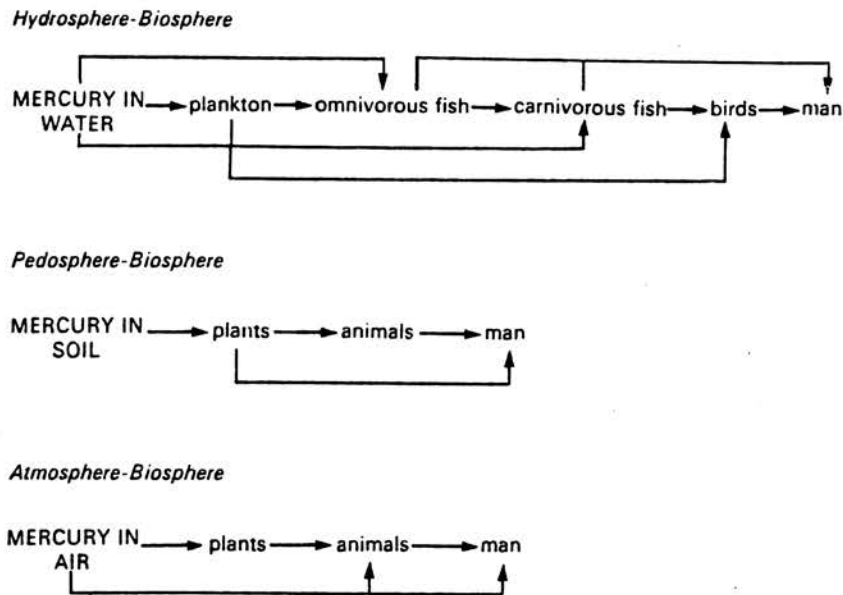
สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำจะได้รับปรอทโดยตรงจากน้ำและจากการสะสมตามลำดับชั้นในห่วงโซ่อาหาร เมื่อปรอทมีความเข้มข้นมากกว่า 10-20 ppb จะมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ปรอทจะถูกดูดซึมและสะสมต่อไปตามลำดับชั้นของสิ่งมีชีวิต ซึ่งการสะสมเป็นผลเนื่องมาจากได้รับโดยตรงจากน้ำผ่านผิวหนังหรือผ่านทางช่องเหงือกระหว่างการหายใจ และการสะสมจะขึ้นอยู่กับชนิดของสัตว์น้ำ (species), ช่วงเวลาที่ได้รับ (exposure interval), ลักษณะนิสัยการกินอาหาร (feeding habit), อัตราเมตาบอลิซึม (metabolic rate), อายุหรือขนาดของสิ่งมีชีวิต คุณภาพน้ำและปริมาณปรอท (D'Itri, 1975)



รูปที่ 2.5 วงจรปรอทในห่วงโซ่อาหารของแหล่งน้ำ (Hartung, 1974)

การใช้ปรอทกันอย่างกว้างขวางและเป็นจำนวนมากไม่แต่เพียงก่อให้เกิดการสะสมของปรอทในแหล่งน้ำ (hydrosphere) เท่านั้น ในบรรยากาศ (atmosphere) และในชั้นของดิน (pedosphere) ก็มีปรอทสะสมอยู่ ซึ่งในที่สุดก็จะเข้าสู่ตัวคนได้โดยขบวนการต่าง ๆ ที่ซับซ้อนและมีความสัมพันธ์กับอากาศ น้ำ ดิน การบริโภคผลผลิตและอาหาร เป็นต้น

อาหารเป็นแหล่งสำคัญสำหรับมนุษย์ในการรับเอาปรอทเข้าสู่ร่างกาย ปรอทจากแหล่งต่าง ๆ สามารถสะสมอยู่ในอาหารโดยขบวนการต่าง ๆ เช่น ปรอทส่วนที่ใช้ทางการเกษตรกรรมและตกค้างอยู่ในดิน อาจถูกดูดซึมไปสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืชที่เพาะปลูกได้ ปรอทจากโรงงานอุตสาหกรรมจะมีบางส่วนถูกปล่อยไปในอากาศหรือสะสมอยู่ในดินและอากาศจะอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติได้ ซึ่งจะก่อให้เกิดการสะสมปรอทในสิ่งมีชีวิตกันต่อไปตามลำดับขั้นของห่วงโซ่อาหารได้



รูปที่ 2.6 วงจรปรอทในห่วงโซ่อาหารจากสิ่งแวดล้อม (Lenihan, 1977)

การสะสมปรอทของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำนั้น ยังสัมพันธ์กับอุณหภูมิด้วย เมื่อในแหล่งน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีผลดังนี้

1. กระตุ้นให้อัตรา metabolism เพิ่มขึ้นและเพิ่ม activity ซึ่งเป็น การช่วยเสริมการสะสมปรอทในแหล่งน้ำด้วยอัตราเร่ง
2. เร่งการเจริญเติบโตของพืชน้ำที่เป็นอาหารสัตว์ และยังขยายเวลาของ การหาอาหารเข้าไปในช่องฤดูกาลที่อากาศหนาวเย็น การสะสมปรอทจึงสูงขึ้นพร้อมกับสัตว์ มีขนาดเพิ่มขึ้นด้วย
3. เร่งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปรอทเป็น เมธิลเมอควิวรีในทางชีวภาพสูงขึ้น

4. การเปลี่ยนรูปแบบต่าง ๆ ของปรอทเป็นเมอคิวริก (II) อีออน มักเกิดขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิลึก ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการเกิดเมธิลเลชัน

5. ทุกรูปแบบของปรอทโดยเฉพาะเมธิลเมอคิวริกละลายน้ำได้ดีเมื่อมีอุณหภูมิลึก ทำให้สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำดูดซับสะสมได้ง่ายและมากขึ้น

## 2.7 ความเป็นพิษของปรอท

ความเป็นพิษของปรอทขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบปรอท โดยที่ปรอทในรูปโลหะ (Metallic mercury) เมื่อเข้าสู่ร่างกายทางปากมีความเป็นพิษไม่มากนัก แต่ถ้าได้รับไอปรอทเป็นระยะเวลานานจะเป็นอันตรายมากกว่า เกสโปรทออินทรีย์ที่ละลายน้ำได้จะส่งผลกระทบต่อความเป็นพิษในระยะยาว ส่วนสารปรอทอินทรีย์จะเป็นพิษต่อมนุษย์มากกว่า เกสโปรทออินทรีย์ แต่สารปรอทอินทรีย์ก็มีระดับความเป็นพิษแตกต่างกัน เช่น สารประกอบพวก Alkoxyalkylmercury มีความเป็นพิษต่ำมาก ส่วน Alkylmercury โดยเฉพาะ methylmercury มีความเป็นพิษสูงที่สุด

ปรอทจะส่งผลกระทบต่อระบบต่าง ๆ ในร่างกายดังนี้

1. ผลทางระบบประสาท พิษของปรอทมีผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง (Central nervous system) ทำให้เกิดการสลายของเซลล์ (cell degeneration) โดยเฉพาะใน granular layer ของสมองส่วนบน (Cerebellum) ม้านสมองส่วนนอกของ สिरษะ ด้านหลัง (Cortex of Occipital) และที่ parietal lobes

2. ผลทางเอนไซม์ โดยที่  $Hg^{++}$  และ  $R-Hg^+$  สามารถทำปฏิกิริยากับโปรตีน โดยเฉพาะกับ Sulphydryl groups เช่น enzymes phosphohexose phosphoglucose isomerase และ glutathiol reductase และพบว่าการยับยั้งของ 2, 3 diphosphoglyceryl dehydrogenase โดยปรอทเป็นสาเหตุในการลดความสามารถในการนำพาออกซิเจนของฮีโมโกลบิน

การยับยั้งของเอนไซม์ที่ประกอบด้วย thiol groups โดยสารประกอบปรอทอินทรีย์นั้นก็เกิดขึ้นด้วยใน เซลล์สมอง เช่นการยับยั้งของเอนไซม์ succinic dehydrogenase ในวัฏจักรของ citric acid และ pyruvate oxidase การยับยั้งของ thiol enzymes เป็นผลจากการรวมตัวจาก mercaptides กับ thiol group.

การยับยั้งอาจเกิดขึ้นที่หลอดไต (renal tubules) เมื่อเอนไซม์ที่ประกอบด้วย mercapto groups ใน membrane ถูกจับโดยสารประกอบของปรอททำให้ ลดการดูดซึมของ โซเดียมไอออน ( $\text{Na}^+$ ) ของน้ำ เพราะว่าการซึมผ่านของหลอดไตขึ้นอยู่กับ mercapto groups ใน membrane

3. ผลทางกรรมพันธุ์ สารประกอบของปรอทสามารถทำให้โครโมโซม (chromosome) แตกออกได้และยังมีผลทางการแบ่ง เซลโดยยับยั้งขบวนการ mitotic spindle ทำให้เกิด polyploidy หรือการแพร่กระจายของโครโมโซมเดี่ยวที่ผิดปกติ และพบว่าสารประกอบเมธิลและฟีนิลเมอควิวรี สามารถทำให้เกิด spindle inhibitor ได้ดีกว่าสารอื่น

จากผลความเป็นพิษต่อระบบของร่างกาย จะทำให้เกิดอาการของโรคไตดังนี้ (นงนุช, 2519)

1. อาการทางจิต โดยทั่วไปมักจะพบเป็นอาการนำมาก่อนอาการอื่น โดยเฉพาะชนิดที่เป็นเรื้อรังอาจจะเริ่มตั้งแต่มีความรู้สึกหัวมึนไหว ประหม่าง่าย ขาดความเชื่อมั่นในตนเองทั้ง ๆ ที่เคยมีสภาพจิตปกติ ขาดความสนใจต่อสิ่งแวดล้อม และในที่สุด จะมีอาการของสติปัญญาเสื่อมโทรม และมีอาการโรคจิตได้
2. อาการทางสัมผัสและประสาท อาการสั่นเป็นอาการที่พบบ่อย ระยะแรก อาจจะมีมือสั่น ระยะต่อมาอาจจะสั่นทั้งตัว เดินเซ มีอาการชาตามปลายมือ ปลายเท้า เนื่องจากปลายประสาทถูกทำลาย แขนขาอ่อนแรง พุดไม่ชัด ถ้าเป็นรุนแรง หูอาจจะมีเสียงหววก และมีอาการอัมพาตครึ่งซีก
3. อาการทางสายตา สภาวะการมองเห็นอาจจะลดน้อยกว่าปกติ อาจจะมีตาบอดจากผลของการเป็นพิษต่อประสาทตาโดยตรง
4. อาการทางผิวหนัง อาจพบในลักษณะของผื่นคัน ซึ่งแยกจากโรคผิวหนังอย่างอื่นลำบาก
5. อาการระบบทางเดินอาหาร เริ่มตั้งแต่ปาก และเหงือกอักเสบ กระเพาะอาหาร และลำไส้อักเสบ ทำให้มีอาการท้องเดิน และปวดท้อง
6. อาการทางระบบขับถ่ายปัสสาวะ เป็นอาการสำคัญและอาจทำให้ผู้ได้รับพิษ ถึงแก่ความตายได้รวดเร็ว โดยเฉพาะในรายที่มีไตวายอย่างเฉียบพลัน (acute renal

failure) ซึ่งมักจะเกิดหลังจากได้รับปรอทในปริมาณสูง และแม้ว่าจะได้รับการรักษาให้ดีขึ้นแล้ว ก็จะมีอาการของไตพิการเรื้อรังเกิดแทรกซ้อนได้ภายหลัง กรณีที่อาการไม่รุนแรงอาจพบอาการบวมทั้งตัวและมีไข่ขาวออกมาทางปัสสาวะ (Nephrotic syndrome)

## 2.8 มาตรฐานปรอทในสิ่งแวดล้อม (Environmental standard for mercury)

### มาตรฐานปรอทในน้ำ

#### น้ำดื่ม (Drinking water)

สหภาพโซเวียตเป็นประเทศแรกที่ตั้งมาตรฐานปรอทในน้ำดื่มขึ้นในราวปี 1950 โดยกำหนดให้มีปรอทในน้ำดื่มได้ 0.005 mg/l (0.005 ppm) หรือ 5 ppb ในสหรัฐอเมริกา มีการกำหนดปริมาณปรอทในน้ำดื่มโดยไม่เป็นทางการให้มีได้ 0.002 mg/l หรือ 2 ppb และในปี 1971 WHO (World Health Organization) กำหนดมาตรฐานปรอทให้มีในน้ำดื่มได้สูงสุด 1.0 µg/l หรือ 1.0 ppb

#### น้ำทิ้ง (Waste water)

ญี่ปุ่นเป็นประเทศแรกในการตั้งมาตรฐานปรอทในน้ำทิ้ง (effluent standard) ในปี 1969 ให้มีปรอท (เมิร์คิว) ได้ 10 µg/l และรัฐอิลลินอยส์ สหรัฐอเมริกา กำหนดมาตรฐานปรอทในน้ำทิ้งโดยให้มีการกำจัดปรอททั้งหมดที่สามารถวัดได้

#### มาตรฐานปรอทในอาหาร

ในปี 1938 US Food and Drug กำหนดให้สารปรอทจากยาฆ่าแมลงตกค้างในอาหารเป็นศูนย์

ปี 1963 FAO และ WHO กำหนดระดับ tolerable ของสารปรอทรวมในอาหาร 0.05 ppm

ปี 1966 Swedish National Institute of Public Health กำหนดระดับปลอดภัยของปริมาณปรอทในปลา 0.5 ppm (น้ำหนักสด) ซึ่งหลังจากนั้น 2-3 เดือนพบว่าในปลาที่มีปรอทมากกว่า 0.5 ppm ดังนั้นในปี 1967 จึงเพิ่มระดับปรอทที่ยอมให้มีได้ในปลาล้างขึ้นเป็น 1.0 ppm และแนะนำว่าไม่ควรรับประทานปลามากกว่า 1 ครั้งต่อสัปดาห์

ก่อนปี 1970 Food and Drug Directorate ของ Canadian Department of National Health and Welfare กำหนดระดับปรอทสูงสุดในปลา 0.05 ppm (น้ำหนักสด)

ปี 1970 สหรัฐอเมริกา ได้นำเอามาตรฐานปรอทมาใช้ตามแบบของประเทศแคนาดา คือ 0.5 ppm ในปลา

ปี 1972 FAO ร่วมกับ WHO ได้กำหนดให้ปริมาณสารปรอทรวมสูงสุดในคนรับประทานต่อสัปดาห์ 0.3 มิลลิกรัม และมีปรอทเมธิล (เมธิลเมอควิวรี) ได้ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัม (เท่ากับ 0.005 และ 0.0033 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ของน้ำหนักคน)

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานปรอทในอาหารบางประเทศ (Lenihan, 1977)

ประเทศ	ชนิดของอาหาร	ระดับ Tolerance
ออสเตรเลีย		
วีกทอเรีย	ทุกประเภท	0.1 ppm
เขาคือออสเตรเลีย	ทุกประเภท	0.1 ppm
เวสต์ออสเตรเลีย	ทุกประเภท	0.01 ppm
เบนลัคส์	ทุกประเภท	0.03 ppm
บราซิล	ทุกประเภท	0.05 ppm
แคนาดา	ปลา	0.5 ppm
เดนมาร์ก	ทุกประเภท	0.05 ppm
เยอรมัน	ผลไม้, ผัก	0
ญี่ปุ่น	ปลา	1.0 ppm
นิวซีแลนด์	ผลไม้, ผัก	0.05 ppm
สวีเดน	ปลา,	1.0 ppm
	อาหารอื่น	0.05 ppm
สหรัฐอเมริกา	ผลไม้, ผัก	0
	ปลา	0.5 ppm
WHO	ทุกประเภท	0.3 มก/สัปดาห์ (สารปรอทรวม) 0.2 มก/สัปดาห์ (ปรอทเมธิล)



## 2.9 ชีววิทยาของหอยกะพง ; สิ่งมีชีวิตที่บ่งชี้สภาพมลภาวะของปรอทในดินตะกอน

หอยกะพง (Horse Mussel : Musculus senhousia) เป็นหอยสองฝาขนาดเล็ก เปลือกบางเปราะแตกง่าย เปลือกมีสีน้ำตาลอมเหลือง ความยาวประมาณ 4-5 เซนติเมตร สภาพพื้นที่อาศัยอยู่ตามพื้นที่ทะเลที่เป็นโคลน ซึ่งบริเวณนี้อาจจะมีสัตว์หน้าดินเมื่อน้ำลงต่ำสุด หอยจะฝังตัวโดยจมส่วนท้ายไว้บนผิวหน้าของโคลน แต่โผล่ส่วนหน้าอยู่เหนือผิวโคลนเล็กน้อยเพื่อกรองรับอาหารจากมวลน้ำเมื่อระดับน้ำท่วมถึง ตามปกติหอยกะพง จะอยู่รวมกันโดยมีเส้นใยยึดติดกันเป็นกลุ่มเกาะกระจายปกคลุมผิวหน้าหาด (patching colony)

หอยกะพง ที่พบในประเทศไทยมี 2 ชนิดคือ ชนิดเปลือกบาง และเปลือกแข็ง ชนิดเปลือกบางใช้เป็นอาหารเปิดเป็นส่วนใหญ่ พบมากในจังหวัดชลบุรี ฉะเชิงเทรา สมุทรปราการ และสุราษฎร์ธานี ส่วนชนิดเปลือกแข็งใช้เป็นอาหารบริโภค พบมากในจังหวัดภูเก็ต และพังงา

หอยกะพง ประมาณร้อยละ 46 ของผลผลิตหอยกะพงได้มาจากการเพาะเลี้ยง ผลผลิตของหอยชนิดนี้มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด คือจาก 29,913 ตัน ในปี 2513 เหลือเพียง 9,065 ตัน ในปี 2523 และในช่วงเวลาเดียวกัน เนื้อที่เพาะเลี้ยงลดลงจาก 1,150 ไร่ เป็น 561 ไร่ และลดลงเหลือ 326 ไร่ ในปี 2524

สภาวะเสื่อมโทรมของสภาพแวดล้อมชายฝั่ง เนื่องจากบริเวณชายฝั่งที่เป็นที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรม แหล่งเกษตรกรรม แหล่งชุมชน เป็นเหตุให้สิ่งปฏิกูลและสารพิษต่าง ๆ ที่ไหลลงสู่แหล่งน้ำ ก่อให้เกิดปัญหาความเสื่อมโทรมของสภาพแวดล้อม ซึ่งผลทำให้ผลผลิตสัตว์น้ำลดลง หรือไม่เจริญเติบโตในระยะเวลานานสมควร นอกจากนั้น อาจเป็นไปได้ว่า สารพิษต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำอาจจะสะสมอยู่ในสัตว์น้ำอันอาจจะเป็นอันตรายต่อมนุษย์ที่บริโภคสัตว์น้ำนั้นได้ แม้ว่าอันตรายที่อาจเกิดขึ้นนั้นอาจจะไม่เห็นผลในระยะสั้น แต่ในระยะยาวอาจมีผลร้ายแรงที่คาดไม่ถึงเกิดขึ้นได้

ตารางที่ 2.2 แสดงปริมาณของผลผลิตและมูลค่าของหอยกะพง ตั้งแต่ปี 2518-2524

ปี พ.ศ.	ปริมาณผลผลิต (ตัน)	%	มูลค่า (พันบาท)	%
2518	29,913	27.6	55,215	36.3
2519	43,233	25.6	21,617	10.9
2520	15,711	10.6	15,711	6.0
2521	17,313	15.5	19,044	5.6
2522	15,373	12.6	20,446	7.1
2523	9,065	8.9	11,862	2.5
2524	18,562	-	-	-

ตารางที่ 2.3 แสดงจำนวนผู้เลี้ยงหอยกะพง เนื้อที่ใช้เพาะเลี้ยงและราคาเฉลี่ย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2513-2524

ปี	จำนวนราย	เนื้อที่ (ไร่)	ราคาเฉลี่ย (บาท/กก.)
2518	575	1,150	1.85
2519	553	1,080	0.50
2520	558	1,122	1.00
2521	446	911	1.10
2522	284	600	1.10
2523	262	564	1.31
2524	150	326	-

### 2.9.1 การใช้หอยกะพง เป็นสิ่งมีชีวิตบ่งชี้สภาพมลภาวะของปรอท

เนื่องจากหอยทะเลจะมีการรับโลหะหนัก 3 วิธีคือ (จรมัน, 2525)

1. จากสารละลายในรูปของอิออนและสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะหนักในน้ำ
2. จากการกรองกินวัตถุที่แขวนลอยในน้ำทะเล
3. จากอาหารที่ได้เพิ่มความเข้มข้น (preconcentration) ของโลหะหนักสูงยิ่งมากกว่าสิ่งแวดล้อม เช่น แผลงตอน

จากสภาพทางชีววิทยาของหอยกะพงซึ่งเป็นสัตว์หน้าดิน (benthos) จะทำให้มีการรับโลหะหนักด้วยวิธีต่าง ๆ ดังกล่าวนั้นจากบริเวณดินตะกอนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งถ้าในดินตะกอนมีโลหะหนักปริมาณสูง หอยกะพงซึ่งอาศัยอยู่บริเวณนั้น ๆ ก็ย่อมมีโอกาสที่จะได้รับและสะสมโลหะหนักในปริมาณสูงด้วย และหอยกะพงก็มีคุณสมบัติของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยเป็นตัวบ่งชี้มลภาวะของสิ่งแวดล้อมในน้ำได้โดย

1. เป็นสิ่งมีชีวิตที่สะสมสารมลพิษโดยไม่ตายในระหว่างที่ศึกษา
2. เป็นสิ่งมีชีวิตที่เป็นตัวแทนในบริเวณที่พื้นที่เก็บ
3. เป็นสิ่งมีชีวิตที่ผูกขุมในบริเวณที่ศึกษา
4. เป็นสิ่งมีชีวิตที่อายุยืนพอควร เช่นมีช่วงชีวิตตลอดปี
5. เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดพอสมควร มีเนื้อเยื่อเพียงพอที่จะใช้ในการศึกษา
6. เป็นสิ่งมีชีวิตที่ถูกกลุ่มตัวอย่างได้ง่ายและแข็งแรงพอที่จะนำกลับมาศึกษาในห้องปฏิบัติการ

ห้องปฏิบัติการ

7. เป็นสิ่งมีชีวิตที่ต้องทนต่อน้ำกร่อย
8. เป็นสิ่งมีชีวิตที่จะแสดงความเข้มข้นของสารพิษสูง เพื่อจะศึกษาได้โดยตรง

โดยไม่ต้องทำ pre-concentration

9. เป็นตัวลหสัมพันธ์ระหว่างสารพิษในเนื้อเยื่อกับค่าเฉลี่ยของสารพิษในบริเวณนั้น
10. สิ่งมีชีวิตต้องมีลหสัมพันธ์อย่างเต็มที่ระหว่างสารพิษในเนื้อเยื่อกับในน้ำโดยรอบ

ทุกสถานที่ และภายใต้สภาวะทุกสภาพ