

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คุณสมบัติของปรอท

ปรอท (Mercury) ได้มีการนำมาใช้ประโยชน์มากกว่า 3,500 ปี ภาษาละตินเรียกว่า “Hydragyrus” ปรอทเป็นโลหะหนักที่มีสีขาวคล้ายเงิน สามารถรวมกับโลหะทั่วไปได้เกือบทุกชนิด ในสถานะอุณหภูมิปกติ ปรอทบริสุทธิ์จะมีสถานะเป็นของเหลว มีสีขาวคล้ายเงินจึงเรียกว่า “Liquid Silver” หรือ “Quick Silver” เป็นโลหะชนิดเดียวที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ สถานะที่เป็นของแข็งจะมีความเปราะ และสามารถระเหยเป็นไอได้ นอกจากนี้ธาตุปรอท (Elemental Mercury) ยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ ดังนี้ อ้างถึงใน กรมควบคุมมลพิษ (2541)

1. เลขอะตอม (Atomic Number)	200.59 Atomic Mass Unit
2. ความหนาแน่น (Density) ที่ 20°C	13.546 g/cm ³ at 20 ^o C
3. จุดเดือด (Boiling Point)	356.9 °C
4. จุดเยือกแข็ง (Melting Point)	-38.87 °C
5. ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	13.545
6. ความสามารถในการละลายน้ำ (Solubility in Water)	ต่ำ
7. ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว	2.82 แคลอรีต่อกรัม
8. ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ	65 แคลอรีต่อกรัม

สาเหตุการปนเปื้อนของปรอทในสิ่งแวดล้อม

สาเหตุที่โลหะปรอทกระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมมี 2 ลักษณะคือ

1. การปลดปล่อยโลหะปรอทจากแหล่งธรรมชาติ (Natural Sources)

ในธรรมชาติมีการปลดปล่อยปรอทออกสู่สิ่งแวดล้อมอยู่ตลอดเวลา โดยปกติจะพบปรอทอยู่ในรูปของ Elemental Mercury (Hg^0), Mercurous Ion (Hg^+) และ Mercuric Ion (Hg^{2+}) ซึ่งถูกปลดปล่อยมาจาก พื้นโลก ชั้นหิน ดิน แร่ ที่มีโลหะปรอทเป็นส่วนประกอบ โดยสาเหตุจากธรรมชาติไม่ว่าจะเป็น การชะล้างโลหะปรอทจากกระแสน้ำ กระแสลม หรือการผุกร่อนของแร่ ทำให้มีการกระจายตัวของโลหะปรอทออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยมีการประมาณการว่ามีปรอทออกสู่สิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติประมาณปีละ 2,700 - 6,000 ตัน/ปี (Albert, 1990)

2. การปลดปล่อยโลหะปรอทจากกิจกรรมของมนุษย์ (Anthropogenic Sources)

ปัจจุบันมีการเพิ่มปริมาณโลหะปรอทในสิ่งแวดล้อมสูงขึ้นอย่างมาก สาเหตุหลักมาจากการพัฒนาอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ต้องนำโลหะปรอทมาใช้เป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมนั้น ๆ โดยในแต่ละปี จะมีการปลดปล่อยโลหะปรอทออกสู่สิ่งแวดล้อมจากอุตสาหกรรม และสาเหตุต่าง ๆ ดังนี้ (Peakall & Lovett, 1972)

อุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้า (Electrical Industry) ปรอทจะถูกใช้ในการผลิตหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ แบตเตอรี่ สวิตช์ไฟฟ้า ใช้เป็นแอโนดในเซลล์แห้งแบบอัลคาไลน์หลอดไฟฟ้า ตะเกียงชนิด Sunlamp เพื่อผลิตรังสีอัลตราไวโอเล็ต และเป็นอิเล็กตรอนที่ใช้ในกระบวนการแยกสลายด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) เพื่อผลิตคลอรีนและ Sodium Hydroxide จาก Sodium Chloride

การเผาไหม้ของถ่านหิน (Combustion of Coal) ปรอทจะมีอยู่ในถ่านหินตามธรรมชาติประมาณ 0.05 - 0.5 mg/kg เมื่อถ่านหินมีการเผาไหม้ปรอทจะออกมาพร้อมกับไอระเหยของถ่านหินเกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม

อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ และผลิตภัณฑ์กระดาษ (Paper and Pulp Industry) มีการใช้สารปรอทเป็นขั้วบวก (Cathode) ในกระบวนการ Electrolysis ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เพื่อผลิตโซดาไฟ และคลอรีน อีกทั้งสารปรอทมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการผลิต Phenyl Mercury Acetate ได้นำมาใช้ป้องกันในการเติบโตของเชื้อรา และ Bacteria บนเนื้อเยื่อไม้

ทันตกรรม (Dentistry) ปรอทใช้แพร่หลายในทางวิชาชีพทันตกรรม โดยใช้ผสมกับดีบุกเกิดโลหะอมัลกัมใช้ในการอุดฟัน

การเผาไหม้ของน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ (Combustion of Oil and Natural Gas) ปรอทเป็นส่วนประกอบอยู่ในน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ เมื่อมีการเผาไหม้ของน้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ ปรอทจะปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อม

อุตสาหกรรมซีเมนต์ (Cement Production) กระบวนการผลิตซีเมนต์เป็นส่วนสำคัญในการปลดปล่อยปรอทออกสู่สิ่งแวดล้อมเพราะจะต้องใช้ความร้อนถึง (1500 องศาเซลเซียส) ทำให้ปริมาณปรอทที่ผสมอยู่ในวัตถุดิบ ถูกปล่อยออกมาสู่ชั้นบรรยากาศได้

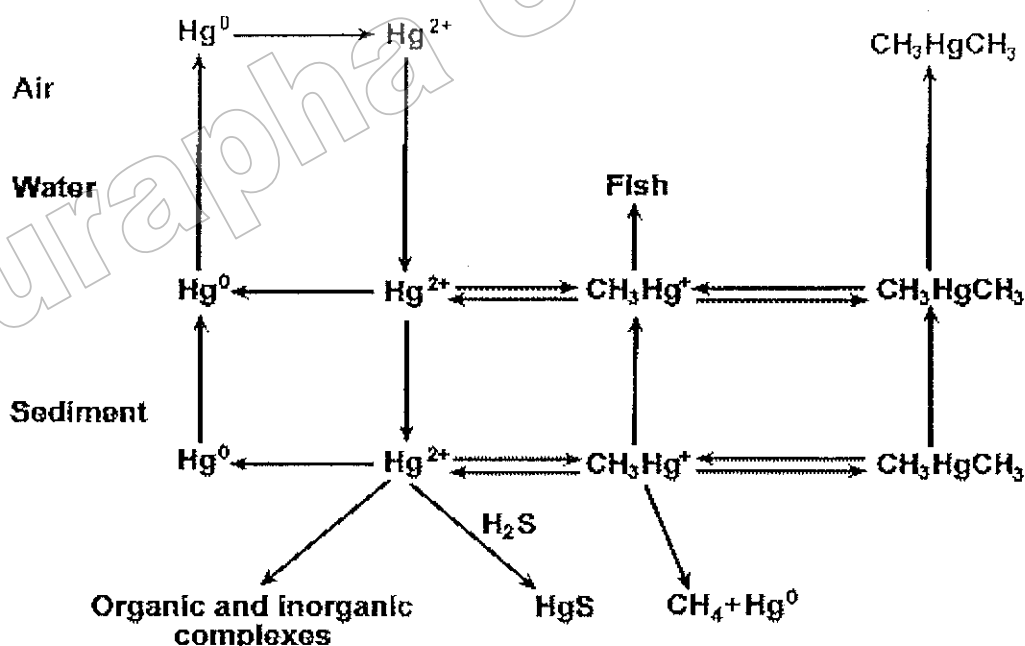
ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ในการผลิต PVC (Polyvinyl Chloride) และใช้เป็นสารตั้งต้นในสารประกอบอินทรีย์ที่ใช้เป็นยาขับปัสสาวะ (Diuretics)

รูปแบบของปรอทในสิ่งแวดล้อม

รูปแบบของปรอทในธรรมชาติมีทั้งหมด 5 รูปแบบ คือ (เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวด, 2539)

1. Divalent Mercury (Hg^{2+})
2. Metallic Mercury (Hg^0)
3. Phenylmercury ($\text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}^+$)
4. Methylmercury (CH_3Hg^+)
5. Alkoxyalkylmercury ($\text{CH}_3\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Hg}$)

ในธรรมชาติสารปรอทจะอยู่ในรูปแบบที่ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งอธิบายกระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี (Speciation) ของปรอท โดยเมื่อปรอทอยู่ในรูปของ Metallic Mercury (Hg^0) เปลี่ยนรูปแบบเป็น Divalent Mercury (Hg^{2+}) ผ่านกระบวนการ Methylation เปลี่ยนโครงสร้างจาก ปรอทอนินทรีย์เป็นปรอทอินทรีย์ในรูป Methylmercury (CH_3Hg^+) และ Dimethylmercury ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{Hg}^+$) ซึ่งสามารถสะสมในสิ่งมีชีวิต แต่ปรอทอินทรีย์ในรูป Dimethylmercury เป็นรูปแบบที่มีความสามารถในการระเหยสูง ส่วนใหญ่จะระเหยออกสู่บรรยากาศ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้ปรอทในแหล่งน้ำ กลับสู่ชั้นบรรยากาศ แล้วตกตะกอนลงสู่แหล่งน้ำอีกครั้ง หมุนเวียนเป็นวัฏจักร



ภาพที่ 1 การเปลี่ยนรูปแบบของปรอทในธรรมชาติ (Wood, 1975)

ตารางที่ 1 รูปแบบทางเคมีและความเป็นพิษของสารปรอท (De Anil, 1994)

รูปแบบ	ความเป็นพิษ
Hg	โลหะปรอท ค่อนข้างเฉื่อยและไม่เป็นพิษ แต่ไอจะเป็นพิษร้ายแรงเมื่อสูดเข้าไป
Hg ₂ ²⁺	ประจุเมอร์คิวรัส ไม่ละลายน้ำ ในรูปสารประกอบคลอไรด์ความเป็นพิษไม่ มากเช่น เมอร์คิวรัสคลอไรด์ (Hg ₂ Cl ₂)
Hg ²⁺	ประจุเมอร์คิวริก เป็นพิษแต่ไม่สามารถที่จะเคลื่อนย้ายข้ามเนื้อเยื่อ ซึ่งกั้นระหว่าง กระแสโลหิตกับเนื้อเยื่อสมอง (ช่วยป้องกันไม่ให้สารพิษผ่านจากกระแสโลหิต เข้าสู่ เนื้อเยื่อประสาทส่วนกลาง) สามารถสะสมและทำอันตรายต่อไต เช่น เมอร์คิวริกคลอ ไรด์ (HgCl ₂)
RHg ⁺	สารปรอทอินทรีย์เชิงเดี่ยว มีความเป็นพิษสูงโดยเฉพาะ CH ₃ Hg ⁺ (Methylmercury) ทำลายระบบประสาท และสมองอย่างถาวร สามารถเคลื่อนย้ายเนื้อเยื่อที่ป้องกันได้ เช่น BBB (Blood Brain Barrier) และสะสมได้ดีในเนื้อเยื่อไขมัน
R ₂ Hg	สารปรอทอินทรีย์เชิงคู่ มีความเป็นพิษต่ำ สามารถเปลี่ยนรูปแบบเป็น RHg ⁺ ได้ใน ตัวกลางที่เป็นกรดเช่น (CH ₃) ₂ Hg
HgS	สารประกอบซัลไฟด์ ไม่ละลายน้ำและไม่เป็นพิษ พบตามธรรมชาติในรูปของแร่ซิน นาบาร์ (Cinnabar)

โลหะปรอท มีความสามารถในการเคลื่อนย้ายไปในสภาวะต่างๆ ในสิ่งแวดล้อมไม่ว่าจะ
เป็น การสะสมตัวในน้ำ ดินตะกอน และสิ่งมีชีวิต โดยปรอทจะปรับเปลี่ยนรูปแบบทางเคมี
(ตารางที่ 1) ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่ปรอท ได้แพร่กระจายออกไป ดังนั้นการตรวจสอบ
การปนเปื้อนของปรอท ควรตรวจสอบให้ครอบคลุมในทุกสภาวะ ในสิ่งแวดล้อม รวมถึงปัจจัยที่
ทำให้เกิดการสะสมตัวของปรอทในสภาวะ เพื่อให้ได้แนวทางการศึกษาการแพร่กระจายของปรอท
ให้ครอบคลุม และเด่นชัด

การปนเปื้อนและการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของปรอทในแหล่งน้ำทะเล

การปนเปื้อนของปรอทสู่แหล่งน้ำทะเลเป็นสาเหตุหนึ่ง ที่ทำให้มีการปนเปื้อนของปรอทในสิ่งแวดล้อม การปนเปื้อนของปรอทในน้ำทะเลสาเหตุใหญ่ ๆ มาจากการปล่อยน้ำทิ้งที่มีปรอทเจือปนที่มาจากภาคอุตสาหกรรม ของเสียจากบ้านเรือน รูปแบบของปรอทในน้ำทะเลส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ ปรอทอนินทรีย์ (Inorganic Mercury) (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) การพบปรอทในน้ำทะเลจะพบมากที่สุดบริเวณ ผิวหน้า (Surface Layer) เมื่อระดับความลึกต่ำลง จะพบปริมาณปรอทในอัตราที่ลดลง (Susuki & Sugimura, 1985) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Williams (1974) ได้ศึกษาความเข้มข้นของปรอทในรูปของ ปรอทอนินทรีย์ (Inorganic Mercury) ที่ระดับความลึกที่แตกต่างกัน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับความลึกใน North Atlantic Ocean โดยพบว่าที่ระดับผิวหน้าน้ำทะเล จะมีความเข้มข้นของปริมาณปรอทสูงกว่าระดับน้ำทะเลที่อยู่ในระดับความลึก 60 เมตร โดยปริมาณปรอทที่ผิวหน้าน้ำ คือ 14 นาโนกรัมต่อลิตร ส่วนความลึกที่ 60 เมตร พบปริมาณปรอทประมาณ 5 นาโนกรัมต่อลิตร

การติดตามการปนเปื้อนของปรอทในน้ำทะเลบริเวณอ่าวไทย ได้มีการตรวจสอบดังแสดงข้อมูลใน ตารางที่ 2 โดยค่าการปนเปื้อนของปรอทที่ตรวจพบอยู่ในช่วง ไม่ตรวจพบจนถึง 0.86 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยบริเวณอ่าวไทยฝั่งตะวันออกพบการปนเปื้อนปรอทในน้ำทะเลสูงที่สุดอยู่ในช่วง $< 0.001 - 0.096$ ไมโครกรัมต่อลิตร (Kan-attireklap, 1994 อ้างถึงใน กรมควบคุมมลพิษ, 2543)

ปัจจุบันทั่วโลกได้ให้ความสนใจ ในการติดตามการปนเปื้อนของโลหะปรอทในสิ่งแวดล้อม โดยได้มีผู้ศึกษาการปนเปื้อนของปรอทในน้ำทะเล ดังแสดงข้อมูลใน ตารางที่ 3 ซึ่งแสดงการปนเปื้อนของปรอทในพื้นที่ต่างๆ ที่ทำศึกษา พบการปนเปื้อนของโลหะปรอทที่ตรวจสอบจากแหล่งน้ำในต่างประเทศ มีค่าอยู่ในช่วง 0.5 – 610 นาโนกรัมต่อลิตร ซึ่งบริเวณที่ตรวจพบว่าการปนเปื้อนของปรอทในน้ำทะเลต่ำที่สุด คือบริเวณทะเล North Iceland มีค่าการปนเปื้อนเท่ากับ 2.2 นาโนกรัมต่อลิตร และบริเวณที่ตรวจพบว่าการปนเปื้อนของปรอทที่สูงที่สุดคือบริเวณ ปากแม่น้ำ Ullas ประเทศ อินเดีย มีค่าการปนเปื้อนอยู่ในช่วง 40 - 610 นาโนกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 2 ปริมาณการปนเปื้อนของปรอทในน้ำทะเลบริเวณอ่าวไทยและบริเวณใกล้เคียง

ปีที่ศึกษา	บริเวณที่ศึกษา	ปริมาณการปนเปื้อน($\mu\text{g/L}$)	ผู้ทำการศึกษา
2533	อ่าวบ้านเพ จังหวัดระยอง	0.001 - 0.0024	Petpiroon and Abe (1991)
2535	ชายฝั่งทะเล จังหวัดตราด	0.001 - 0.045	Kan-atireklap (1994)
2536 - 2537	แม่น้ำบางปะกง	0.01 - 0.12	Chulalongkon University, 1994 อ้างถึงใน Thongra-ar, 2002
2537 - 2538	อ่าวไทยฝั่งตะวันออก	<0.001 - 0.096	Kan-atireklap (1994) อ้างถึงใน กรมควบคุมมลพิษ, 2543
2538 - 2541	นอกฝั่งกลางอ่าวไทย	<0.01 - 0.69	กรมควบคุมมลพิษ, 2543
2538 - 2541	นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด	0.002 - 0.48	กรมควบคุมมลพิษ, 2543
2538 - 2541	นิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง	<0.0 - 0.16	กรมควบคุมมลพิษ, 2543
2540 - 2541	นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด		กรมควบคุมมลพิษ, 2543
	ห่างชายฝั่ง 100 เมตร	<0.01 - 0.3	
	ห่างชายฝั่ง 500 เมตร	<0.01 - 1.11	
	ห่างชายฝั่ง 2,500 เมตร	<0.01 - 0.09	
2540 - 2541	อ่าวไทยฝั่งตะวันออก	ND - 0.026	EMDEC อ้างถึงใน กรมควบคุมมลพิษ, 2543
2540 - 2541	กลางอ่าวไทย	ND - 0.049	EMDEC อ้างถึงใน กรมควบคุมมลพิษ, 2543
2537 - 2542	อ่าวระยอง	<0.01 - 0.095	EMDEC อ้างถึงใน กรมควบคุมมลพิษ, 2543
2547	บริเวณแหลมฉบัง		ศุภวัตร, 2547
	-ช่วงเดือน เมษายน	0.007 - 0.024	
	-ช่วงเดือน ตุลาคม	0.001 - 0.013	

ND = Non-detectable

EMDEC หมายถึง ศูนย์พัฒนาประมงทะเลอ่าวไทยฝั่งตะวันออก

ตารางที่ 3 ปริมาณการปนเปื้อนของปรอทในแหล่งน้ำที่ทำการศึกษาในต่างประเทศ

บริเวณที่ศึกษา	Hg (ng/L)	ผู้ทำการศึกษา
North Iceland Sea	2.2	Olafsson (1983)
Mediterranean Sea	0.5-2.5	Aston (1985)
Jakarta Bay	10 - 16	Hutagalung (1987)
Bay of Biscay (France)	0.5 - 5.5	Cossa (1988)
Gironde Estuary	2.3 - 7.6	Cossa (1987)
Baltic Sea	2.1 - 2.4	Brugman (1988)
Indian Ocean India	30 - 130	Sanzgiry et al.(1988)
St.Lawrence Estuary	24 - 121	Cossa (1988)
Amazonian, Brazil	2.24 - 6.99	Laurence (2000)
Southwestern, China	5.5 - 70.2	Guangle (2004)
Coastal, New Jersey	10 - 380	Julia (2004)
Ullhas estuary, India	40 - 61	Ram et al. (2004)

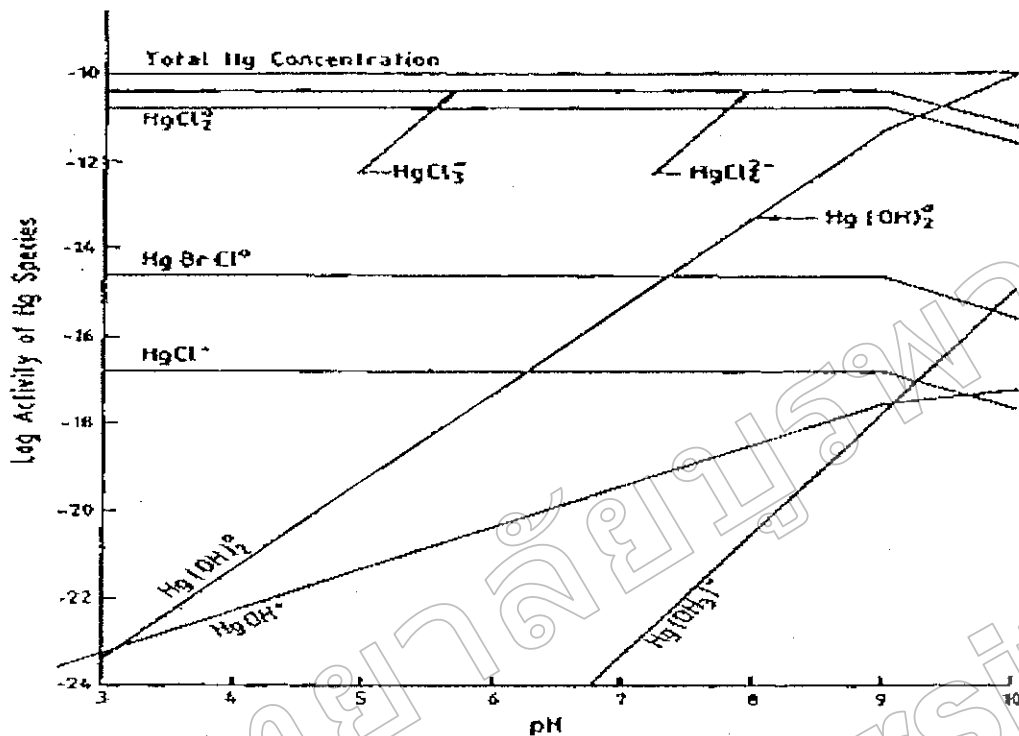
ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของปรอทในน้ำทะเล

ความเป็นกรด - ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด - ด่างในน้ำทะเล มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบทางเคมี ของปรอทในน้ำทะเล (Species in Seawater) โดยเมื่อความเป็น กรด - ด่างต่ำในน้ำทะเลจะพบสารประกอบเชิงซ้อนกับปรอทในน้ำทะเล ในรูปแบบ HgCl_2 , HgCl^+ , HgCl_2^- ซึ่งตรงกันข้าม เมื่อความเป็นกรด - ด่าง ในน้ำเพิ่มขึ้นจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างปรอทในรูปแบบของ Hydroxylated Species เช่น HgOH^+ , $\text{Hg}(\text{OH})_2$, $\text{Hg}(\text{OH})_3^-$ ดังภาพที่ 2 (Florence, 1980)

ความเค็ม (Salinity)

ปริมาณของ HgCl_2 ในน้ำทะเลจะพบมากในน้ำทะเลที่มีความเค็มสูง โดยในน้ำทะเลที่มีความเค็มสูงจะมีปริมาณคลอไรด์ไอออน ในน้ำทะเลที่สูงซึ่ง คลอไรด์ไอออนจะมีความสามารถในการจับตัวกับ ประจุของปรอท (Hg^{2+}) ได้ดี เกิดเป็นสารประกอบ HgCl_2 ในน้ำทะเล (Lion & Leckie, 1981)



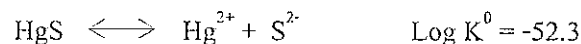
ภาพที่ 2 อิทธิพลของค่าความเป็น กรด - ด่าง ต่อรูปแบบทางเคมีของปรอทในน้ำทะเล
(Florence, 1980)

กระบวนการรีดอกซ์

กระบวนการรีดอกซ์ ในน้ำทะเลจะอธิบายถึง การเกิดรูปแบบต่างๆ ในน้ำทะเล

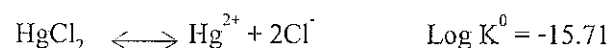
(Speciation) ในสถานะที่ไม่มีออกซิเจน (Anoxic) และมีออกซิเจน (Oxic) (Skylberg, 2000)

ในน้ำทะเลจะมีรูปแบบปรอทใหญ่ ๆ อยู่สองรูปแบบคือ ปรอทในรูป HgS (Cinnabar) มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ ($\text{Log } K^0 = -52.3$) จะเกิดในสถานะที่ไม่มีออกซิเจน (Anoxic) สมดุลของกระบวนการรีดอกซ์ ในน้ำทะเลของ HgS เกิดได้ดังนี้



อีกรูปแบบหนึ่งคือ ปรอทในรูป HgCl_2 มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี

($\text{Log } K^0 = -15.71$) กระบวนการรีดอกซ์ ในน้ำทะเลจะเกิดได้ดี จะเกิดในสถานะที่มีออกซิเจน (Oxic) สมดุลของกระบวนการรีดอกซ์ ในน้ำทะเลของ HgCl_2 เกิดได้ดังนี้



การปนเปื้อนและการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของปรอทในดินตะกอน

การปนเปื้อนของปรอทในดินตะกอนจะมีปริมาณการสะสมตัวของปรอทสูง โดยปริมาณการสะสมตัวในดินตะกอน จะมีปริมาณสูงกว่าการสะสมตัวในน้ำ ถึง 3 - 5 เท่า (Bryan & Langston, 1992 อ้างถึงใน กรมควบคุมมลพิษ, 2543) โดยดินตะกอนสามารถดูดซับปรอทได้สูงถึง 82 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการสะสมตัวของปรอทในดินตะกอนเป็นตัวบ่งชี้ถึงการปนเปื้อนซึ่งมาจากกิจกรรมของมนุษย์ ที่มีความแตกต่างกัน (Guy, 1973 อ้างถึงใน กรมควบคุมมลพิษ, 2543) เพราะการสะสมตัวของปรอทในดินตะกอน สามารถสะสมตัวได้ระยะนาน โลหะปรอทมีระยะเวลาคงตัว (Residence Time) อยู่ภายในดินได้นานถึง 1,000 ปี (UNEP, 1984) ทำให้ทราบถึงการปนเปื้อนจากบริเวณที่ศึกษาได้อย่างชัดเจน

ปิยะรัตน์ อุตสาหกรรม (2548) พบว่าดินตะกอนมีความสามารถดูดซับปรอทมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของดินตะกอน และความเข้มข้นของปรอทในสิ่งแวดล้อม

ค่ามาตรฐานการสะสมตัวของปรอทในดินตะกอนของประเทศไทย ยังไม่มีค่ากำหนดไว้ แต่สามารถเทียบกับค่ามาตรฐาน ของประเทศออสเตรเลีย และนิวซีแลนด์ ซึ่ง กำหนดให้มีค่าระหว่าง 0.15 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (ค่าความเข้มข้นที่ไม่มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต) ถึง 1 ไมโครกรัมต่อน้ำหนักต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (ค่าความเข้มข้นที่อาจเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต) (กรมควบคุมมลพิษ, 2542)

การติดตามการปนเปื้อนของปรอทในดินตะกอนบริเวณอ่าวไทย ได้มีการตรวจสอบดังแสดงข้อมูลใน ตารางที่ 4 โดยค่าการปนเปื้อนของปรอทที่ตรวจพบ อยู่ในช่วง ไม่ตรวจพบจนถึง 4.93 ไมโครกรัมต่อกรัม โดยบริเวณทะเลภาคตะวันออก พบการปนเปื้อนของปรอทในดินตะกอนสูงที่สุด อยู่ในช่วง 1.79 - 4.93 ไมโครกรัมต่อกรัม (Piyakarnchana, 1974 อ้างถึงใน กรมควบคุมมลพิษ, 2543)

ทั่วโลกได้ให้ความสนใจในการติดตามการปนเปื้อนของโลหะปรอท ได้มีผู้ศึกษาการปนเปื้อนของปรอทในดินตะกอน ดังแสดงในข้อมูลใน ตารางที่ 5 พบการปนเปื้อนของโลหะปรอทที่ตรวจสอบจากดินตะกอนในต่างประเทศ มีค่าอยู่ในช่วง 0.02 - 6.43 ไมโครกรัมต่อกรัม โดยพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของปรอทในดินตะกอนต่ำที่สุด ดินตะกอน บริเวณมหาสมุทรอินเดีย มีค่าการปนเปื้อนของปรอทมีค่าอยู่ในช่วง 0.04 - 0.08 ไมโครกรัมต่อกรัม และดินตะกอนบริเวณพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของปรอทในดินตะกอน สูงที่สุดคือดินตะกอนบริเวณปากแม่น้ำยูซัด (Uthas) ประเทศอินเดีย มีค่าการปนเปื้อนของปรอทอยู่ในช่วง 1.13 - 3.46 ไมโครกรัมต่อกรัม

ตารางที่ 4 ปริมาณการปนเปื้อนของปรอทในดินตะกอนบริเวณอ่าวไทย

ปีที่ศึกษา	บริเวณที่ศึกษา	ปริมาณการปนเปื้อน ($\mu\text{g/g dry wt.}$)	ผู้ทำการศึกษา
2521	อ่าวไทยตอนบน	1.79 - 4.93	Piyakarnchana, 1974 อ้างถึงใน กรมควบคุมมลพิษ, 2543
	อ่าวไทยตอนล่าง	ND - 4.39	
2538 - 2541	นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด	<0.005 - 0.13	กรมควบคุมมลพิษ, 2543
2536 - 2541	นิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง	<0.005 - 0.03	กรมควบคุมมลพิษ, 2543
2539 - 2541	นอกฝั่งทะเลอ่าวไทย	0.01 - 0.12	กรมควบคุมมลพิษ, 2543
2542	อ่าวไทยตะวันออก	ND - 0.072	EMDEC อ้างถึงใน กรมควบคุมมลพิษ, 2543
	-ชายฝั่ง	ND - 0.06	
	-ห่างฝั่ง	ND - 0.072	
2542	อ่าวระยอง	ND - 0.048	EMDEC อ้างถึงใน กรมควบคุมมลพิษ, 2543
	-ชายฝั่ง	0.0178 - 0.0193	
	-ห่างฝั่ง	ND - 0.048	
2543	นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด		แววตา ทองระอา, 2547
	- เคื่อนมีนาคม	0.006 - 0.13	
	-เคื่อนตุลาคม	<0.0023 - 0.224	
2548	นิคมอุตสาหกรรมบางปู	0.019 - 0.149	ปิยะรัตน์ อุตสาหกรรม, 2548

ND= Non-detectable

EMDEC หมายถึง ศูนย์พัฒนาประมงทะเลอ่าวไทยฝั่งตะวันออก

ตารางที่ 5 ปริมาณการปนเปื้อนของปรอทดินตะกอนบริเวณที่ทำการศึกษานานาชาติ

บริเวณที่ศึกษา	ไมโครกรัมต่อกรัม ($\mu\text{g/g}$ dry wt.)	ผู้ทำการศึกษา
Plym Estuary	0.02 - 2.61	Millward (1981)
Haifa Bay, Israel	0.06 - 0.99	Hornung (1984)
Argentina Sea	0.04 - 0.69	Marcovecchio et al. (1986)
Baltic Sea	0.08 - 0.80	Brugmann (1988)
Indian Ocean, India	0.04 - 0.08	Sanzir (1988)
Para, Brazil	0.059 - 0.30	Lika (1994)
Coast, Norway	0.2 - 19	Eva (1994)
Tapajos River, Brazil	0.09 - 0.21	Roulet (1998)
Mediterranean sea	0.053 - 0.176	Christine (1998)
Yatsushiro Sea, Japan	0.086 - 3.46	Takshi (2000)
Gold Mining, South America	0.04 - 0.33	Jan (2000)
North Mississippi Lakes	0.088 - 0.133	Huggett (2001)
Land fill, Southeast Brazil	0.12 - 0.89	Machado (2001)
Six Lake, UK	0.38 - 0.84	Handong (2003)
Gold Mining, Brazil	0.14 - 0.207	Pestana (2003)
Uthas Estuary, India	1.13 - 6.43	Ram et al. (2004)

ปัจจัยในการดูดซับและเปลี่ยนแปลงรูปแบบทางโครงสร้างของปรอทในดินตะกอน

ความเค็ม (Salinity)

ค่าความเค็มในน้ำทะเลจะส่งผลต่อการดูดซับสารปรอท มีผลให้ความสามารถในการจับยึด (Affinity) ระหว่างปรอทและดินตะกอนลดลง โดยที่ระดับความเค็มสูงการดูดซับสารปรอทในดินตะกอน จะสัมพันธ์กับปริมาณออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส เพราะเมื่อความเค็มสูง คลอไรด์ไอออนจะจับตัวกับออกไซด์ของเหล็ก และแมงกานีสที่ผิวหน้าดินตะกอน ซึ่งส่งผลให้สารปรอทที่ถูกดูดซับ อยู่ผิวหน้าดินตะกอนหลุดออกมาด้วย (Wang, 1991)

ความเป็นกรด - ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด - ด่าง มีความสัมพันธ์กับกระบวนการการดูดซับโปรตอนบนผิวหน้าดินตะกอน เมื่อค่าความเป็นกรด - ด่าง เท่ากับ 3 - 5 การดูดซับโปรตอนในดินตะกอนจะสามารถดูดซับได้มากที่สุด (ประมาณ 86 - 98 เปอร์เซ็นต์) แต่เมื่อค่าความเป็นกรด - ด่าง เพิ่มขึ้นอัตราการดูดซับจะลดลง เพราะเมื่อความเป็นกรดสูงขึ้น Humic Substance ที่จับอยู่บริเวณผิวหน้าของดินตะกอนจะละลายน้ำออกมา และเกิดสารเชิงซ้อนกับโปรตอน ทำให้การดูดซับสารโปรตอนในดินตะกอนลดลง (Yin et al, 1996 cited in Thonga-ar, 2001)

ขนาดอนุภาคของดินตะกอน (Grain Size)

ทางด้านปฐพีวิทยา เนื้อดินตะกอนถูกแบ่งเป็นหลายประเภท ซึ่งที่กำหนดประเภทเนื้อดิน ด้ส่วนโดยมวลของอนุภาคของเนื้อดิน (Soil Separates) มีการแบ่งกลุ่มเป็น 3 ขนาดคือ

1. อนุภาคทราย (Sand) จัดเป็นกลุ่มโคที่ที่สุดในดิน
2. อนุภาคทรายแป้ง (Silt) จัดเป็นกลุ่มขนาดกลาง
3. อนุภาคดินเหนียว (Clay) จัดเป็นกลุ่มขนาดเล็กที่สุดในดิน

การที่เรียกว่า กลุ่มอนุภาค (Separate) เป็นเพราะแต่ละกลุ่มจะประกอบด้วยอนุภาคหลายขนาด จัดได้เป็นช่วงซึ่งกำหนดโดยพิคัดของขนาด พิกัดของขนาดนี้มีทั้งพิคัดบน (Upper Limit) และพิคัดล่าง (Lower Limit) ซึ่งอนุภาคทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว มีพิคัดของขนาดที่แตกต่างกัน

กลุ่มขนาดของอนุภาค (Sediment Separates) ของดินตะกอน มีระบบจำแนกที่นิยมใช้ 2 ระบบ คือระบบสหรัฐอเมริกา (United States Department of Agriculture, USDA) และระบบสากล (International of Soil Science, ISSS) ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การจำแนกกลุ่มขนาดของดินตะกอน ตามระบบของ สหรัฐอเมริกา (USDA)
เปรียบเทียบกับระบบสากล (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2541)

กลุ่มขนาด	เส้นผ่าศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	
	USDA	ISSS
ทราย (Very Coarse Sand)	2.00 - 1.00	-
ทรายหยาบ (Coarse Sand)	1.00 - 0.50	2.00 - 0.20
ทรายขนาดปานกลาง (Medium Sand)	0.50 - 0.25	-
ทรายละเอียดมาก (Vary Fine Sand)	0.01 - 0.05	-
ทรายแป้ง (Silt)	0.05 - 0.002	0.02 - 0.002
ดินเหนียว (Clay)	< 0.002	< 0.002

ขนาดของอนุภาคในดินตะกอนมีผลต่อการสะสมปรอท ดินตะกอนประกอบด้วย โคลน ซิลิกา สารอินทรีย์ ออกไซด์ของโลหะซัลไฟด์และแร่ธาตุต่าง ๆ ดินตะกอนที่มีอนุภาคเล็กที่เป็นพวก ดินเหนียว (Clay) คุณสมบัติของพื้นที่ผิวจะมีประจุลบมาก มีความสามารถในการดูดซับอนุภาคของปรอทกับสารอินทรีย์สูง (Herbert, 1981) ซึ่งสอดคล้องการศึกษาของ Konard (1974) ได้ศึกษาหาความแตกต่างของการดูดซับปรอทในดิน โคลน และทราย พบการสะสมตัวของโลหะปรอทในดินทรายจะอยู่ในช่วง 0.01 - 0.05 ไมโครกรัมต่อกรัม ส่วนในดินโคลนจะพบค่าปรอทที่สูงกว่าคือ อยู่ในช่วง 0.05 - 0.15 ไมโครกรัมต่อกรัม

ปริมาณสารอินทรีย์ในดินตะกอน (Sediment Organic Matter)

สารอินทรีย์ในดินตะกอนประกอบด้วย

1. สารประกอบพวกคาร์โบไฮเดรต ประมาณ 10 – 20 เปอร์เซ็นต์
2. สารที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น กรดอะมิโนและน้ำตาลอะมิโน (Amino Sugar) ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์
3. สารประกอบ Aliphatic Fatty Acid, Alkane ประมาณ 10 – 20 เปอร์เซ็นต์
4. ที่เหลือเป็นสารประกอบพวก Aromatic Compound

ปริมาณสารอินทรีย์มีผลต่อการปริมาณดูดซับของปรอทในดินตะกอน เพราะสารอินทรีย์เช่น พวกกรดอิมิก จะจับปรอทที่ไม่ละลายน้ำเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Hg(II) - Organic Complexation) โดยการดูดซับสารปรอทได้สูงสุดจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณสารอินทรีย์ในดินตะกอน (Yin, 1996) ภายในดินตะกอนแหล่งต่างๆ โดยทั่วไปจะพบสารอินทรีย์

เป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน ปริมาณสารอินทรีย์ที่ตรวจพบ อาจมีค่าต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ในบริเวณพื้นที่ท้องน้ำที่เป็นทราย หรืออาจมีค่าสูงกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ในพื้นที่เป็นเลน บริเวณพื้นที่สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันจะมีผลต่อปริมาณสารอินทรีย์ในดินตะกอน โดยในดินตะกอนใกล้ฝั่งอาจมีกรดฮิวมิกสูงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ของสารอินทรีย์รวม แต่ในดินตะกอนทะเลลึก อาจมีกรดฮิวมิกไม่ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ ของสารอินทรีย์รวม (จารุมาศ เมฆสัมพันธ์, 2548)

ดินตะกอนที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ที่เป็นของแข็ง (Solid Phase) โดยเฉพาะ S-Containing Groups เมื่อจับกับอนุภาคของปรอทบนผิวหน้าดินตะกอน การปลดปล่อยปรอทออกสู่สิ่งแวดล้อมจะลดลง เนื่องจาก สารประกอบปรอทที่จับกับสารอินทรีย์ด้วย S-Containing Groups จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Complexes) ที่มีคุณสมบัติเฉื่อยทางเคมี (Chemically Inert) การแข่งขันแย่งที่กับไอออนบวก (Cations) ชนิดอื่นจะไม่เกิดขึ้น และสารปรอทจะถูกปล่อยออกจากสารประกอบเชิงซ้อนนี้ได้ง่าย (Wallschläger et al., 1998)

ปริมาณสารอินทรีย์ในดินตะกอนในเขตอ่าวไทยพบว่า มีค่าค่อนข้างต่ำอยู่ที่ระดับประมาณ 1 - 2 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในแหล่งที่เป็นตะกอนทราย อาจพบปริมาณสารอินทรีย์สารน้อยกว่า 0.3 เปอร์เซ็นต์ (Pearson & Rosenberg, 1978)

การเกิดกระบวนการ Methylation ในดินตะกอน

กระบวนการการเกิด Methylation ในดินตะกอนคือกระบวนการสังเคราะห์ทางชีวภาพ (Biological Synthesizing) การเปลี่ยนรูปแบบทางเคมีของปรอทอินทรีย์ให้เป็นโครงสร้างแบบปรอทอินทรีย์ ซึ่งมีความสามารถในการเคลื่อนย้ายเข้าสู่เนื้อเยื่อ และสะสมในร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) การเกิด Methylation จะต้องใช้กระบวนการทาง เคมี และชีววิทยามาเกี่ยวข้อง เพื่อใช้ในการทำให้เกิดพันธะระหว่าง ปรอท กับ หมู่ Methyl (CH_3) กระบวนการดังกล่าวนี้ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงในดินตะกอน (Andren & Harris, 1973) โดยเมื่อปรอทที่อยู่ในรูปที่เป็นไอ Hg^0 ตกตะกอนลงสู่แหล่งน้ำเกิดการเปลี่ยนรูปแบบ จาก Hg^0 เป็น Hg^{2+} จากนั้นปรอทส่วนใหญ่จะถูกดูดซับโดยอนุภาคตะกอนที่แขวนลอย แล้วตกตะกอนลงไปสะสมอยู่ในชั้นดินตะกอนที่มีสารอินทรีย์ (Organogenic Sediment) ซึ่งตะกอนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของปรอท อินทรีย์ (D'Itri, 1977 อ้างถึงใน ปิยะรัตน์ อุตสาหกรรม, 2548) แบคทีเรียในรูปแบบ Methanogenic Bacteria ซึ่งเป็นแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Bacteria) จะมีความสามารถเปลี่ยนรูปแบบของปรอท Hg^{2+} ให้เป็นปรอทในรูปแบบ CH_3Hg (Methylmercury) และ $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ (Dimethylmercury) (Windom et al., 1976)

การปนเปื้อนของปรอทและปัจจัยการปนเปื้อนสู่สิ่งมีชีวิต

การปนเปื้อนของปรอทสู่สิ่งมีชีวิตเมื่อปรอทปนเปื้อนลงสู่ น้ำ และดินตะกอนจนมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบทางโครงสร้างให้อยู่ในรูปของ Methylmercury ซึ่งเป็นรูปแบบที่สามารถเคลื่อนย้าย และสะสมในสิ่งมีชีวิตได้ (Marcovecchio, 1986)

ร่างกายสิ่งมีชีวิต สามารถดูดซึม Methylmercury ในทางเดินอาหารได้สูงถึง 95–98 เปอร์เซ็นต์ แต่ขับออกมาในรูปของเสียได้น้อยมาก เนื่องจากเป็นสารที่เสถียร ไม่แตกตัวเป็นสารอินทรีย์ Methylmercury สามารถยึดติดกับเม็ดเลือดแดง และแพร่กระจายไปยังทุกส่วนของร่างกาย และประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ จะสะสมอยู่ในสมอง ส่วนสารประกอบอินทรีย์ของปรอทมีความเป็นพิษน้อยที่สุด เพราะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายโดยทางเดินอาหาร ได้น้อย (ไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์) และยังถูกขับออกจากร่างกายได้ง่าย (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

การสะสมของปรอทในสิ่งมีชีวิตนั้นจะเป็นการแพร่กระจายในห่วงโซ่อาหาร (Food Chain) สำหรับปริมาณการสะสมของสารปรอทในสัตว์น้ำ จะขึ้นกับชนิดของสัตว์น้ำ อาหารการกิน อัตราการเจริญเติบโต และอุณหภูมิ แหล่งใหญ่ของการสะสมของปริมาณปรอท จะเกิดจากการกินอาหาร การสะสมของปรอทในห่วงโซ่อาหารจะมีการเพิ่มขึ้น ตามลำดับของ ผู้บริโภคในห่วงโซ่อาหาร จากการศึกษาปริมาณการสะสมตัวกันของปรอทอินทรีย์ ในห่วงโซ่อาหาร สาหร่ายซึ่งอยู่ในห่วงโซ่อาหารที่ต่ำที่สุด และปลา ซึ่งอยู่ในห่วงโซ่อาหารที่สูงที่สุด จะมีปริมาณการสะสมเป็นไปตามลำดับขั้น (Hansen & Riisgard, 1990) ดังภาพที่ 2 ที่แสดงการสะสมของปรอทในสายใยอาหาร (Marine Food Web) ระดับการสะสมใน Plankton ซึ่งอยู่ในลำดับห่วงโซ่อาหารที่ต่ำที่สุด จะมีปริมาณการสะสมน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับพวก Carnivore ซึ่งอยู่ในลำดับห่วงโซ่อาหารที่ถัดไป จะมีการสะสมของปรอทที่สูงกว่า

การติดตามการปนเปื้อนของปรอทในสิ่งมีชีวิตบริเวณอ่าวไทย ได้มีการตรวจสอบดังแสดงข้อมูลใน ตารางที่ 7 โดยค่าการปนเปื้อนของปรอทที่ตรวจพบ อยู่ในช่วง 0.001 - 0.434 ไมโครกรัมต่อกรัม โดยบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด พบการปนเปื้อนของปรอทสูงที่สุดในตัวอย่างปลาทรายแดง อยู่ในช่วง 0.07 - 0.43 ไมโครกรัมต่อกรัม (กรมควบคุมมลพิษ, 2547)

ตารางที่ 7 ปริมาณการปนเปื้อนของปรอทในเนื้อเยื่อสัตว์ทะเล บริเวณอ่าวไทย
(กรมควบคุมมลพิษ, 2547)

ปีที่ศึกษา	บริเวณที่ศึกษา	ชนิดสิ่งมีชีวิต	ปริมาณปรอท ($\mu\text{g/g}$ wet wt.)	ผู้ทำการศึกษา
1983	ชายฝั่งทะเลอ่าวไทย	หอยนางรม	0.001 - 0.153	กรมควบคุมมลพิษ, 2547
1987	อ่างศิลา ชลบุรี	หอยแมลงภู่	0.017	
1996	ชายฝั่งตะวันออกอ่าวไทย	ปลากะตัก	0.027	
		ปลากะรัง	0.016	
		ปลาข้างเหลือง	0.019	
		ปลาแซ่ไก่	0.020	
		ปลาจวด	0.019	
		ปลาข้างเห็บ	0.032	
		ปลาตาขาว	0.019	
		ปลาตาหวาน	0.023	
		ปลาสาก	0.025	
		ปลาปากคม	0.019	
		ปลาแป้น	0.013	
		ปลาหลังเขียว	0.19	
2002	ชายฝั่งทะเลสมุทรปราการ	ปลาทุ	0.010 - 0.016	
		ปลาทุเร	0.065 - 0.195	
	ชายฝั่งทะเลนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด	ปลาทุ	0.005 - 0.006	
		ปลาอินทรีขี้บั้ง	0.145	
		ปลาทรายแดง	0.070 - 0.434	
		หอยแมลงภู่	0.007 - 0.009	
	ชายฝั่งทะเลจังหวัดสมุทรปราการ	หอยแมลงภู่	0.005 - 0.008	

วรวิทย์ ชีวาพร (2543) ได้ทำการศึกษาระดับการปนเปื้อนปรอทในสิ่งมีชีวิตที่ทำการเก็บตัวอย่างจากจังหวัดชลบุรีคือ แพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ ปลา กุ้ง และหอย โดยแบ่งเป็นระดับห่วงโซ่อาหารได้ 4 ระดับคือ

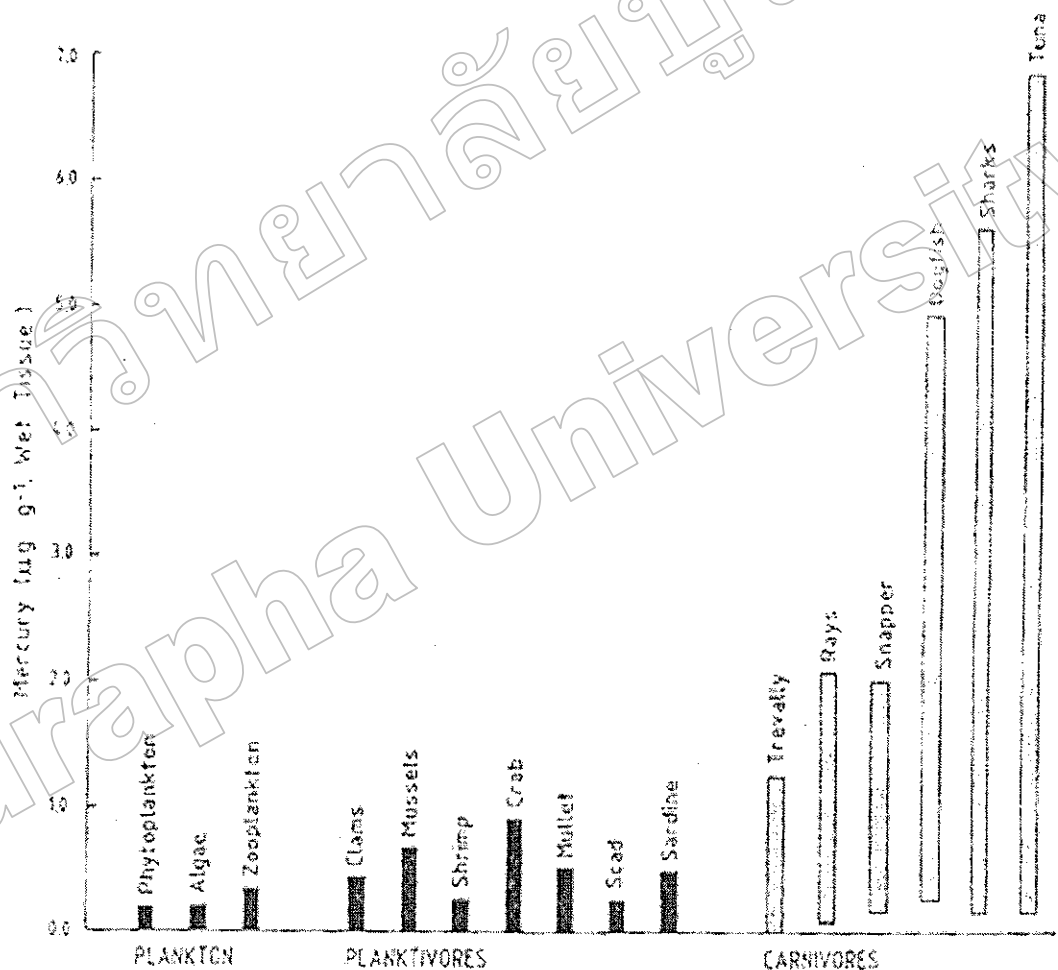
ระดับที่ 1 คือ พวกผู้ผลิต (Producer)

ระดับที่ 2 คือ พวกกินพืช (Primary Consumer Level)

ระดับที่ 3 คือ พวกกินสัตว์กินพืชเป็นอาหาร (Secondary Consumer Level)

ระดับที่ 4 คือ พวกกินสัตว์ที่กินสัตว์กินพืชเป็นอาหาร (Tertiary Consumer Level)

จากการศึกษาพบว่าระดับที่ 1 และ 2 จะมีปริมาณปรอทอยู่ในช่วง 1.8 - 4.6 นาโนกรัมต่อกรัม ในระดับที่ 3 จะมีปริมาณปรอทอยู่ในช่วง 5.1 - 6.1 นาโนกรัมต่อกรัม และในสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในระดับ 4 จะมีปริมาณปรอทสะสมอยู่ในช่วง 23.4 - 90.4 นาโนกรัมต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าในระดับของสิ่งมีชีวิตในชีวนาฬิกา พวกที่อยู่ในห่วงโซ่อาหารที่สูงกว่า จะมีอัตราการสะสมตัวของปรอทมากกว่าในระดับสิ่งมีชีวิตที่ต่ำกว่า



ภาพที่ 3 การสะสมของปรอทในสายใยอาหาร (Marine Food Web) (Marcovecchio, 1986)

ปัจจัยและภาพรวมของการเกิด Biomagnification ในสิ่งมีชีวิต

1. ลำดับชั้นของสิ่งมีชีวิต ที่อยู่ในลำดับชั้นของห่วงโซ่อาหาร (Marine Food Web) การสะสมของปรอทในสิ่งมีชีวิตจะพบปริมาณของปรอทมากที่สุดในพวกสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเล เช่น แมวน้ำ พะยูน และวาฬ (WHO, 1986)

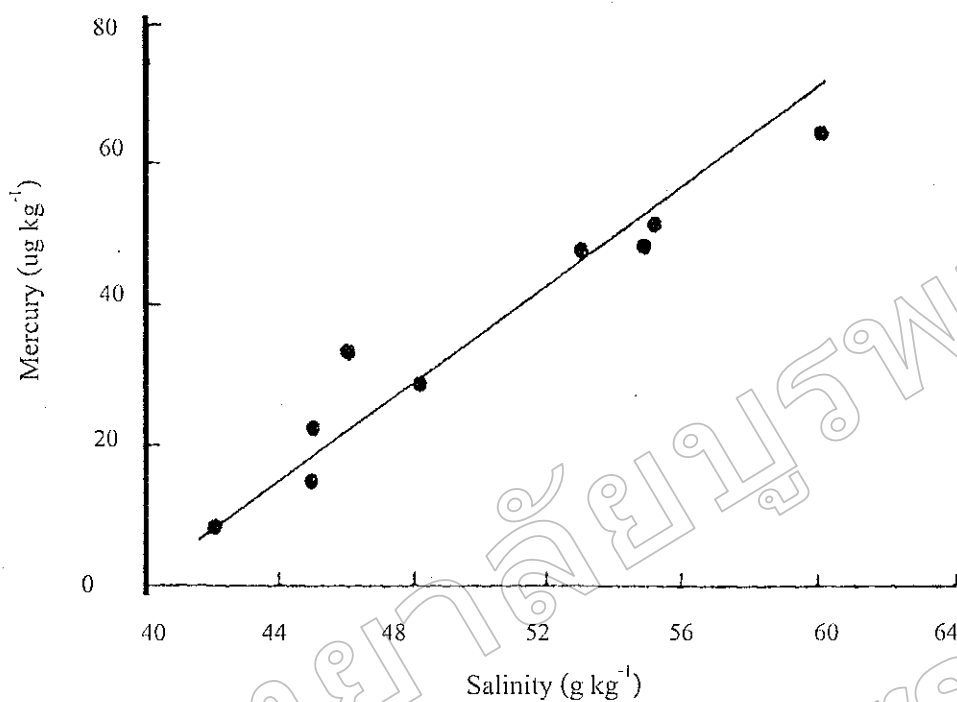
2. ปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมตัวของปรอทที่เกี่ยวข้องคือ อายุ เพศ และน้ำหนัก (Cushall, 1987) รวมทั้งถิ่นที่อยู่อาศัยซึ่งมีผลต่อการสะสมของปริมาณปรอทที่แตกต่างกัน (Hakanson, 1988) สอดคล้องกับศึกษาของ Langston (1986) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์การสะสมของปรอท กับอายุของปลา Trout จากการศึกษพบว่า ปริมาณการสะสมตัวของปรอท จะสูงขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้นของปลา Trout

3. ระดับการสะสมตัว ของปรอทในสิ่งมีชีวิตมีความสัมพันธ์กับปริมาณความเค็มในน้ำทะเล (Pentreath, 1976) ดังแสดงใน ภาพที่ 4

4. การเกิด Methylation อาจเกิดในร่างกายของสิ่งมีชีวิต โดยพบเมื่อปรอทในรูป Hg^{2+} ทำปฏิกิริยากับ Methyl Radical จะเกิดปฏิกิริยา Methylation ขึ้นในร่างกายของตัวปลา หรือสัตว์ในระดับที่ต่ำกว่าใน Trophic Level ส่วนการเกิดปฏิกิริยา Demethylation ในสิ่งมีชีวิตจะพบในสัตว์ทะเล เช่น สัตว์ทะเล

กรมควบคุมมลพิษ (2548) ได้ทำการประเมินความเสี่ยงการปนเปื้อนของปรอท ในปลาแต่ละชนิด (Ecological Risk Due to Hg Contamination) โดยใช้ข้อมูลการปนเปื้อนของปรอทในสัตว์น้ำบริเวณอ่าวไทย ปี 2538 จำนวน 9 ชนิด 135 ตัวอย่าง มีค่าการปนเปื้อนของปรอทในช่วง 0.39 - 4.70 ไมโครกรัมต่อกรัม เป็นฐานในการคำนวณความเสี่ยงทางระบบนิเวศวิทยาพบว่าร้อยละ 67 ของปลามีความเสี่ยงต่อผู้บริโภคที่จะได้รับสารปรอทเกินค่า Reference Dose (ค่าความเข้มข้นของปรอทสูงสุด ที่อนุญาตให้มีในสัตว์น้ำ เพื่อการบริโภคเท่ากับ 0.0001 mg/kg/day ของ US.EPA) ดังแสดงในตารางที่ 8

ข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 8 ค่าร้อยละของความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนปรอท ในปลาแต่ละชนิดจะมีค่าที่แตกต่างกัน สืบเนื่องจาก พฤติกรรมการกิน ถิ่นที่อยู่อาศัย จึงทำให้โอกาสที่จะได้รับสารปรอทจึงมีความแตกต่างกัน



ภาพที่ 4 ปัจจัยของความเข้มข้นการสะสมตัวของปรอทในหอยกาบ (Pentreath, 1976)

ตารางที่ 8 ร้อยละความเสี่ยง (Risk Percentage) ต่อการปนเปื้อนของสารปรอทในปลาแต่ละชนิด (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

ชนิดปลา	ร้อยละ
ปลาทู	0
ปลาทูลายแดง	100
ปลาอินทรี	67
ปลาจะละเม็ดดำ	0
ปลาเก๋า	100
ปลากะพงแดง	33
ปลาทูลายขาว	100
ปลาคาบเงิน	100
ปลาคาบขาว	100

ความเป็นพิษของปรอท

ปรอทในรูปธาตุอิสระพบไม่มากนัก แต่ไอของปรอทเป็นพิษอย่างร้ายแรง สารประกอบอินทรีย์ของปรอท ที่ละลายน้ำได้ จะมีโอกาสเข้าสู่ร่างกายได้ง่าย โดยปะปนเข้ากับอาหาร และน้ำดื่ม เช่น $HgCl_2$ เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะไปสะสมในทางเดินอาหารและไตได้ อย่างไรก็ตามสารประกอบอินทรีย์ของปรอทเป็นพิษไม่ร้ายแรงนัก เมื่อเปรียบเทียบกับสารประกอบอินทรีย์ของปรอทพิษอันเนื่องมาจากสารปรอทที่เช่นเดียวกับพิษที่เกิดจากโลหะหนักอื่น ๆ เช่น ตะกั่ว และแคดเมียม เป็นพิษจากการสะสมซึ่งหมายความว่า เมื่อสารเข้าสู่ร่างกายสามารถคงอยู่ในร่างกายได้นาน ระยะเวลาที่สารพิษคงอยู่ในร่างกาย ได้ยาวหรือสั้นนั้นเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดของสารพิษ ในกรณีของสารอินทรีย์ของปรอทมีค่าครึ่งชีวิตทางชีววิทยา (Biological Half Life) ประมาณ 75 วัน หมายความว่าถ้าสารที่เข้าสู่ร่างกายจำนวนหนึ่ง เช่น 1 กรัม ครั้งหนึ่ง หรือ $\frac{1}{2}$ กรัม จะสามารถขับออกไปจากร่างกายได้ภายใน 75 วัน เหลือ $\frac{1}{2}$ กรัม และเมื่อเวลาผ่านไปอีก 75 วันร่างกายก็จะขับสารนี้ออกไปอีกครึ่งหนึ่งของจำนวนที่เหลือ ($\frac{1}{2}$) ดังนั้นหลังจากเวลา 150 วัน สารนี้จะเหลือในร่างกายเพียง $\frac{1}{4}$ กรัม ($\frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$ กรัม) ของจำนวนที่ร่างกายไปนับตั้งแต่ (1 กรัม) การลดลงในลักษณะนี้จะดำเนินไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสารพิษนั้นจะถูกขับออกจากร่างกายหมด (นิธิวรรัตนานันท์, 2543)

สารประกอบอินทรีย์ของปรอท เช่น แอลคิลเมอร์คิวรี มีความเป็นพิษมากกว่าเอริธเมอร์คิวรี ตัวอย่างเช่น เมทิลเมอร์คิวรี ถูกดูดซึมได้ดีในระบบทางเดินอาหารเมื่อเข้าสู่ร่างกายแล้วจะเปลี่ยนเป็นเกลืออินทรีย์ ซึ่งร่างกายสามารถขับทิ้งได้ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ของที่ได้รับเข้าไป โดยประมาณว่า 50 เปอร์เซ็นต์จะถูกขับออกทางอุจจาระ และอีก 5 - 20 เปอร์เซ็นต์ จะถูกขับออกทางปัสสาวะ และมีการเปลี่ยนรูปจากสารอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์ ในอุจจาระโดยแบคทีเรียในระบบทางเดินอาหาร ตัวอย่างเช่น หนูที่ได้รับเมทิลเมอร์คิวรีกลอไรด์ (10 เปอร์เซ็นต์) จะขับออกทางน้ำดีภายใน 24 ชั่วโมง โดยรวมอยู่กับอะมิโนซิสเตอีน หรือกลูตาไทโอน และปริมาณจะลดลงเหลือ 5 เปอร์เซ็นต์ ภายในหลังจาก 10 วัน เนื่องจากการดูดซับกลับได้ที่ต่ำ (นิธิวรรัตนานันท์, 2543)

การเกิดพิษปรอทในมนุษย์

พิษปรอทอย่างเฉียบพลัน (Acute Mercury Poisoning) ปรอทเมื่อเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ แล้วก่อให้เกิดอันตรายโดยการแตกตัวเป็นไอออนซึ่งมีประจุไฟฟ้า ไอออนดังกล่าวจะไปขัดขวางกระบวนการทางชีวเคมีของร่างกายที่ทำให้เกิดพลังงาน ร่างกายจึงจำเป็นต้องหาวิธีอื่นเพื่อให้ได้พลังงาน โดยใช้วิธีทำให้เกิดกรดแลกติกเป็นผลพลอยได้ และกรดชนิดนี้เป็นผลร้ายต่อร่างกาย โดยเซลล์ส่วนที่เกิดจะแสดงอาการผิดปกติในรูปต่าง ๆ กรณีนี้มักจะเกิดกับผู้ได้รับสารประกอบของปรอทที่เป็นพิษเข้าไปโดยอุบัติเหตุ หรืออัศวินาตรกรรมโดยรับประทานเกลือของ

ปรอทที่ละลายน้ำเข้าไป เช่น Mercuric Chloride อาการโรคที่เกิดคือ มีอาการอักเสบอย่างรุนแรงตามทางเดินอาหาร มีอาการเกร็งของผนังหน้าท้อง ถ่ายเป็นเลือด ปรอทจะซึมซาบเข้าไปสะสมอยู่ในไต และทำอันตรายต่อไต เป็นเหตุให้ถ่ายปัสสาวะน้อยลง จนถึงที่สุดหยุดถ่ายทำให้ของเสียต่างๆ ในร่างกายมากขึ้นที่สุดจะเสียชีวิตในเวลาอันรวดเร็ว เกิดผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลาง โดยทำให้ระบบประสาทเกี่ยวกับการได้ยิน สูญเสียการมองเห็นไป นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางจิตใจ ความจำเสื่อม ในบางรายจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านพฤติกรรม และบุคลิกภาพทั้งมีอาการตกใจง่าย มีความรู้สึกเศร้าสลด และชอบทะเลาะวิวาท (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

อาการเริ่มต้นของพิษจากปรอทในรูปสารอนินทรีย์คือ ไตขับปัสสาวะไม่ได้ (Anuria) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากส่วนของทิวบูล (Tubules) ของไตอุดตัน หรือเกิดการแพร่ของสารในทิศทางตรงกันข้ามจากเดิม (Back Diffuse) อาการต่อมาที่พบคือปัสสาวะผิดปกติ (Polyuria) ซึ่งคาดว่าเกิดจากกระบวนการดูดกลับ (Reabsorp) ของโซเดียมในบริเวณทิวบูลถูกขัดขวาง สำหรับคนที่ได้รับสารปรอทเข้าไปมากๆ เป็นเวลานานจะมีการสูญเสียโปรตีนในปัสสาวะสูงจนเกิดอาการบวมที่ข้อเท้า (มลิวรรณ บุญเสนอ, 2544) ส่วนปริมาณของปรอทที่ทำให้คนตายโดยเฉลี่ยประมาณ 0.02 กรัม ส่วนผู้ที่ทนทานอาจต้องมีปริมาณถึง 0.2 - 0.1 กรัม

พิษปรอทเรื้อรัง (Chronic Mercury Poisoning) กรณีนี้เกิดกับผู้ที่ต้องสัมผัสกับไอปรอทอยู่เป็นประจำ โดยหายใจที่มีไอปรอทฝุ่นผงที่ที่สารประกอบของปรอท อาการของโรคพิษปรอทที่ปรากฏได้คือ มีน้ำลายมากกว่าปกติ เกิดอาการอักเสบที่เยื่อช่องปาก ฟันโยกคลอน น้ำหนักตัวลด

ความเป็นพิษของปรอทต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ

กรมควบคุมมลพิษ (2542) ได้ทำการศึกษาความเป็นพิษของปรอทในรูปแบบต่าง ๆ กับสิ่งมีชีวิตในน้ำดังนี้

การศึกษาความเป็นพิษเฉียบพลัน (Acute Toxicity) จากการศึกษาค่าความเป็นพิษเฉียบพลันกับปลา 5 ชนิด ซึ่งมีถิ่นกำเนิดในประเทศแถบอาเซียนและในเขตอบอุ่น พบว่าความเข้มข้นของปรอทที่ทำให้ปลาตาย 50 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 96 ชั่วโมง ($96 - h LC_{50}$) มีค่าอยู่ในช่วง 67 - 650 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยปลาที่มีค่า $96 - h LC_{50}$ ต่ำที่สุด คือ ระยะเวลา Embryo ของ Killifish

ส่วนการศึกษากับสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง 28 ชนิด ซึ่งมีอยู่ 9 ชนิดที่มีถิ่นกำเนิดแถบประเทศอาเซียน พบว่าค่าความเป็นพิษเฉียบพลันอยู่ระหว่าง 4.2 ไมโครกรัมต่อลิตร (ค่าความเข้มข้นที่ทำให้ Pacific Oyster ในระยะ Embryo ตาย 50 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 48 ชั่วโมง) ถึง 32,000 ไมโครกรัมต่อลิตร (ค่าความเข้มข้นที่ทำให้ระยะตัวเต็มวัยของ mudsnails ตาย 50 เปอร์เซ็นต์ ใน

เวลา 24 ชั่วโมง) โดยสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังที่ทำการศึกษาทั้งหมดจะแสดงความเป็นพิษเฉียบพลันที่ความเข้มข้นของปรอทน้อยกว่า 500 ไมโครกรัมต่อลิตร

การศึกษาความเป็นพิษเรื้อรัง (Chronic Toxicity) ในการศึกษาความเป็นพิษเรื้อรังกับปลา Killifish ในเวลา 32 วัน พบว่าค่าความเข้มข้นของปรอทที่มีผลต่อความสำเร็จของการฟัก (Hatching Success) และความสามารถของการรอดชีวิต (Viability) ของตัวอ่อน 50 เปอร์เซ็นต์ มีค่าประมาณ 37 ไมโครกรัมต่อลิตร และ 32 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ไม่มีผลต่อความสำเร็จของการฟัก และความสามารถของการรอดชีวิตต่อตัวอ่อนของปลา

(NOEC: No-Observed-Effect-Concentration) มีค่าเท่ากับ 10 และ 30 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ส่วนค่าความเข้มข้นของปรอทที่มีความเป็นพิษเรื้อรังต่อสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง มีค่าอยู่ในช่วง 0.8 ไมโครกรัมต่อลิตร (ค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ไม่มีผลต่อการสืบพันธุ์ของ Mysid Shrimp ในระยะเวลา 35 วัน) ถึง 90 ไมโครกรัมต่อลิตร (ค่าความเข้มข้นที่มีผลต่ออัตราการตาย 50 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 28 วัน ($28 - h LC_{50}$) ของ Polychaetes ระยะ Juvenile)

สำหรับการศึกษาความเป็นพิษเรื้อรังกับพืชและสาหร่ายทะเล 5 ชนิด ซึ่งบางชนิดเป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดในแถบเอเชีย พบว่าความเข้มข้นของปรอท ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช และสาหร่ายในระยะเวลา 48 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 15 - 280 ไมโครกรัมต่อลิตร

อันตรายของปรอทที่เคยเกิดต่อมนุษย์

อันตรายของปรอทที่เคยก่อให้เกิดผลกระทบต่อร่างกายของมนุษย์นั้น เคยเกิดในปี ค.ศ. 1956 ในประเทศญี่ปุ่นมีการเกิดโรคที่เรียกว่า มินามาตะ (Minamata Disease) โดยเรียกชื่อตามอำเภอ มินามาตะ ซึ่งเป็นแหล่งที่เกิดโรคนี้ สาเหตุของโรคดังกล่าวเกิดจากคนในบริเวณนี้รับประทานอาหารจำพวกปลา และหอยในบริเวณอ่าวมินามาตะซึ่งมีสารประกอบปรอทเจือปนอยู่ สาเหตุของการสะสมของปรอทเกิดจากน้ำทิ้งของโรงงานทำพลาสติก ที่มีปรอทในรูปของ Methylmercury ลงสู่อ่าวเป็นเวลานานทำให้ผู้ได้รับสารปรอทเป็นจำนวนถึง 1,000 - 3,500 คน อาการของผู้ป่วยโรคมินามาตะคือมีอาการชามือและเท้าตลอดจน แขน ขา และริมฝีปาก ต่อจากนั้นจะมีอาการอื่น ๆ ตามมา คือ ม่านตาหรี่เล็ก อารมณ์หงุดหงิด กระวนกระวาย พูดซ้ำไม่เป็นภาษา กล้ามเนื้อแขนขาไม่สามารถควบคุมตัวเองได้ (สมอาจ วงษ์ขมทอง, 2538)

ยังมีเหตุการณ์เนื่องจากพิษของปรอทเกิดขึ้นในอิรักอีกเมื่อปี ค.ศ. 1971 - 1972 โดยมีผู้รับประทานขนมปังที่ทำจากเมล็ดข้าวสาลี ซึ่งมีสารกำจัดเชื้อราที่มี Alkylmercury เป็นองค์ประกอบตกค้างอยู่ทำให้ผู้เสียชีวิตกว่า 500 คน