บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สารประกอบดีบุกอินทรีย์ (Organotins)

สารประกอบดีบุกอินทรีย์มี 4 กลุ่ม คือ mono-, di-, tri-, และ Tetraorganotin ตัวอย่างเช่น $RSnX_3$, R_2SnX_2, R_3SnX และ R_4Sn โดยปกติ R จะเป็นกลุ่ม Butyl, Octyl, Cyclohexyl หรือ Phenyl ส่วน X จะเป็น Chloride, Fluoride, Oxide, Hydroxide, Carboxylate หรือ Thiolate

สารประกอบ Monoorganotin และ Tetraorganotin มีการใช้ในขอบเขตจำกัด สารประกอบ Diorganotin ใช้เป็น Stabilizers สำหรับสาร Polyvinylchloride (PVC) และใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysts) ในการผลิต Polyurethane Foams และในกระบวนการ Cold-Euring ของ Silicone Elastomers ส่วนสารประกอบ Triorganotin มีความสำคัญที่สุดในกลุ่มของสารดีบุกอินทรีย์เนื่องจากใช้เป็นสารฆ่าสิ่งมีชีวิต (Biocides) ที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง (กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

การใช้ประโยชน์จากสารประกอบดีบุกอินทรีย์

สารประกอบดีบุกอินทรีย์มีการนำมาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน ได้แก่

1. สารประกอบ Triorganotin เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารประกอบดีบุกอินทรีย์อื่นที่ใช้ในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม เช่น Monoorganotin, Diorganotin และ Triorganotin โดยนำมาใช้เป็นสารปราบศัตรูทางชีวภาพ (Biocide) (ทรงกฤษณ์ ประภักดี, 2538)

2. Triphenylhydroxide และ Triphenylacetate เป็นสารฆ่าเชื้อราในอุตสาหกรรมเพื่อป้องกันการเกิดโรคใบจุด (Photo Bright) ในพืชผักต่าง ๆ และเป็นสารกำจัดศัตรูพืชพวกหนอนชนิดต่าง ๆ ตลอดจนกำจัดแมลงสาบและยุงตามบ้านเรือนแต่ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย (ทรงกฤษณ์ ประภักดี, 2538)

3. Tributyltinoxide และ Tributyltinfluoride ใช้ในการกำจัดหอยทากน้ำจืด ซึ่งเป็น Intermediate Host ของหนอนจีนัส Shistosoma ในการแพร่เชื้อโรคพยาธิใบไม้ในตับ (Shistosomiasis) สู่มนุษย์ และนำมาใช้เป็นสารรักษาเนื้อไม้ ใช้เป็นยาปราบศัตรูพืชศัตรูสัตว์ที่เฉพาะเจาะจงกับสิ่งที่ต้องการต่อต้าน โดยใช้ความเข้มข้นที่ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์อื่น ๆ (ทรงกฤษณ์ ประภักดี, 2538)

4. Trimethyltin ใช้เป็นยาฆ่าแมลง (ทรงกฤษณ์ ประภักดี, 2538)

5. Tripropyltin, Tributyltin, Tripheynyltin ใช้เป็นยาปราบศัตรูพืชและแบคทีเรีย (ทรงกฤษณ์ ประภักดี, 2538)

6. Tricyclohexyltinhydroxide ใช้ปราบแมลงไรที่ตอมผลไม้ (ทรงกฤษณ์ ประภักดี, 2538)

7. Bis-Tributyltinoxide ใช้รักษาเนื้อไม้ ป้องกันเชื้อรา แมลง มอดกัดกินเนื้อไม้ และผสมสีทาเรือเพื่อป้องกันเพรียง (ทรงกฤษณ์ ประภักดี, 2538)

8. ใช้เป็นยาฆ่าเชื้อโรค (Disinfectants) (ประภัสสร ตันติพงศ์วิวัฒน์, 2538)

9. เป็นสารที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาในการผลิต Silicones และ Polyurethane Foams (ประภัสสร ตันติพงศ์วิวัฒน์, 2538)

10. ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแก้วและฟิล์ม (ประภัสสร ตันติพงศ์วิวัฒน์, 2538)

11. ใช้เป็นยาถ่ายพยาธิ โดยใช้ di-n-butyltin Oxide ในการถ่ายพยาธิตัวแบน (*Eubothrium crassum*) ในปลา Rainbow Trout (*Salmo gaimeri*) (ประภัสสร ตันติพงศ์วิวัฒน์, 2538)

12. ผสมใน PVC โดยทำหน้าที่เป็นสารทำให้เสถียรป้องกันการสลายตัวและทำให้ผลิตภัณฑ์โปร่งใส (ประภัสสร ตันติพงศ์วิวัฒน์, 2538)

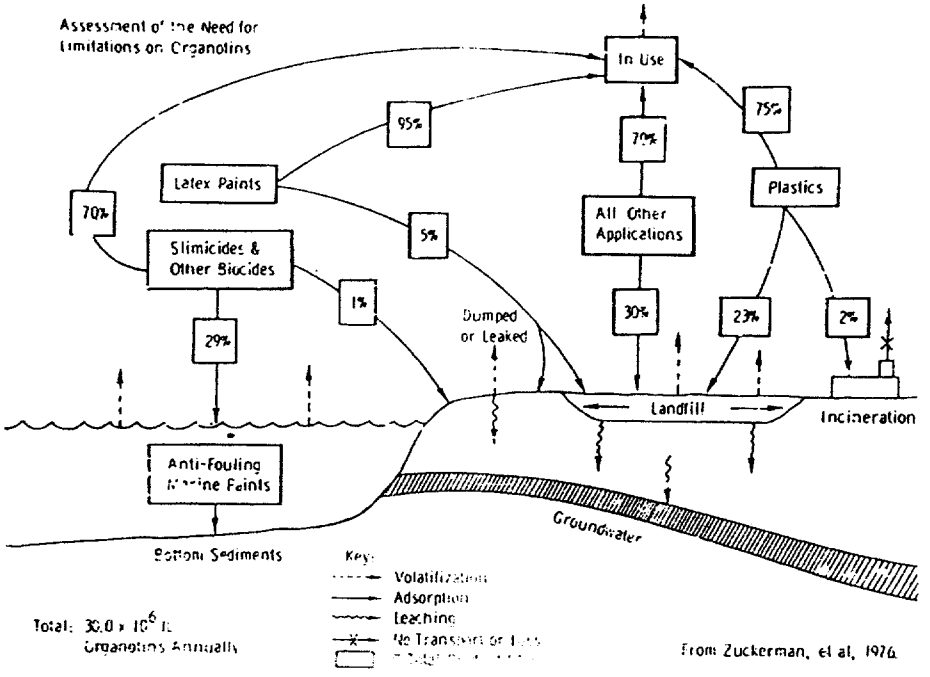
การปนเปื้อนของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม

จากการนำสารประกอบดีบุกอินทรีย์ไปใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น สารประกอบ Diorganotin ใช้เป็น Antioxidant ในผลิตภัณฑ์ Polyvinyl Chloride (PVC) ส่วนสารประกอบ Triorganotin มีการใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดเพราะเป็นสารฆ่าสิ่งมีชีวิตได้อย่างกว้างขวาง การนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของสีทาเรือแทนทองแดง (Cu) ซึ่งนับวันก็ยิ่งมีการขยายตัวเพิ่มปริมาณการใช้มากขึ้น ทำให้สารประกอบ Triorganotin ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้มากกว่าสารประกอบชนิดอื่นในกลุ่มของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ (Laughlin & Linden, 1985) แหล่งที่มาของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อมแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แหล่งของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม (ทรงกฤษณ์ ประภักดี, 2538)

ตัวกลาง	สาร	แหล่งที่มา
อากาศ	R_3SnX	- การฉีดพ่นใช้งานในภาคเกษตรกรรม - การระเหยออกจากการใช้เป็นสารปราบศัตรูพืชทางชีวภาพ
	R_3SnX, R_2SnX และ RSnX	- การฟุ้งกระจายจากการใช้งานในทางอุตสาหกรรม - การพ่นสารประกอบดีบุกอินทรีย์เคลือบกระจกโดยการใช้อุณหภูมิและความดันสูง เพื่อให้เกิดฟิล์ม SnO_2
น้ำ	R_3SnX	- การใช้สีกันเพรียง - การฟุ้งกระจายมาจากการใช้งานทางภาคเกษตรกรรม - น้ำล้นผิวดินจากการเกษตรกรรม - ขบวนการทางอุตสาหกรรม - การใช้งานทางภาคเกษตรกรรม - สารรักษาสภาพเนื้อไม้
	R_2SnX และ RSnX	- ชะล้างมาจากการใช้เป็นสารเสถียรในผลิตภัณฑ์ PVC
ดิน	R_3SnX	- การใช้งานทางภาคเกษตรกรรม - สารรักษาสภาพเนื้อไม้
	R_3SnX และ R_2SnX	- จากการทิ้งสารเหลือใช้ทางอุตสาหกรรม

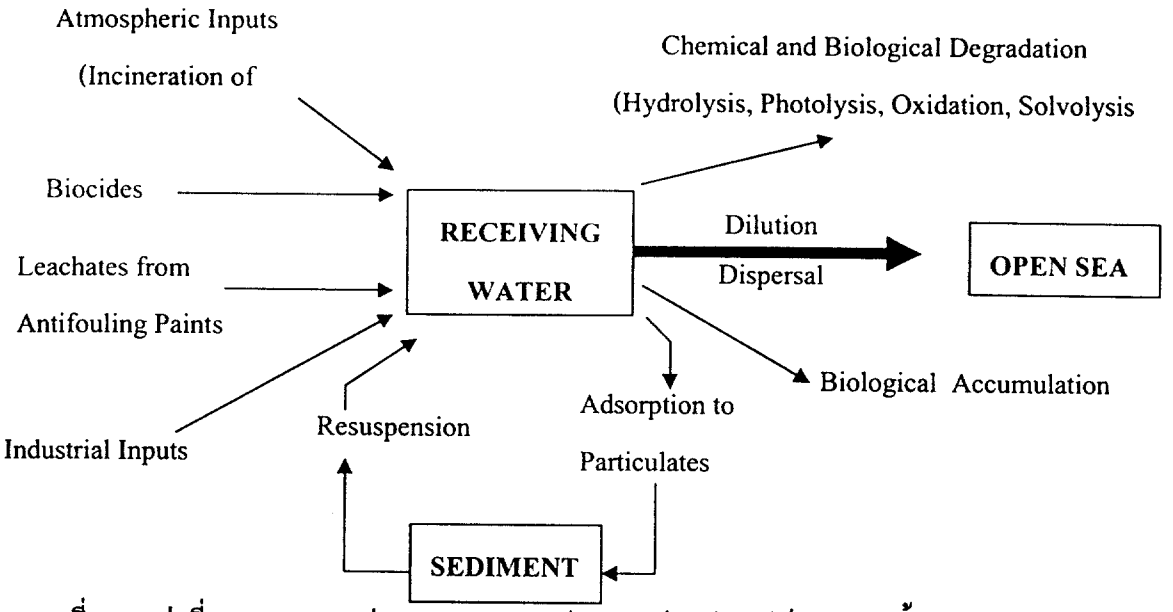
การใช้สารประกอบดีบุกอินทรีย์ในด้านต่าง ๆ ทำให้ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้หลายทาง ทั้งทางน้ำ ดิน อากาศ ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แหล่งที่มาและปริมาณการแพร่กระจายของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม (Laughlin & Linden, 1985)

การปนเปื้อนของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในแหล่งน้ำ

ปริมาณของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะแหล่งน้ำขึ้นอยู่กับจำนวนเรือที่ใช้สีทาเรือที่มี Tributyltin เป็นส่วนประกอบ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อปริมาณของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงทางสมุทรศาสตร์ (Hydrographic Variables) เช่น น้ำขึ้นน้ำลง มีผลทำให้ปริมาณของสารประกอบดีบุกอินทรีย์เจือจางและแพร่กระจายได้มากขึ้น การย่อยสลาย Tributyltin เป็น Dibutyltin และ Monobutyltin เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ปริมาณของ Tributyltin ลดลง ในบริเวณปากแม่น้ำซึ่งเป็นที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของน้ำ เพราะเป็นการผสมกันระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็ม มีผลต่อการดูดซับและปลดปล่อยสารประกอบดีบุกอินทรีย์ออกมาจากอนุภาคต่าง ๆ ในน้ำ ซึ่งหมุนเวียนเป็นวงจรทั้ง Sedimentation, Accumulation และ Resuspension มีผลต่อการสะสมในสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะสัตว์หน้าดินที่กินอาหารแบบ Filter Feeding จะได้รับผลกระทบมากที่สุด การแพร่กระจายของสารประกอบดีบุกอินทรีย์แสดงได้ดังภาพที่ 2 (Stebbing, 1985)



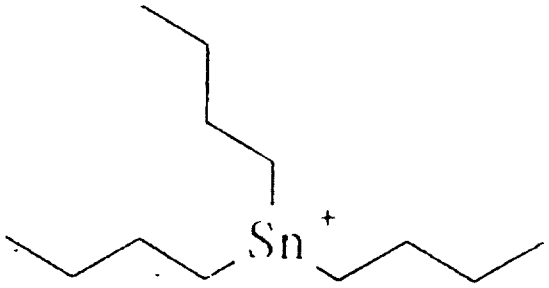
ภาพที่ 2 แหล่งที่มาและการแพร่กระจายของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในแหล่งน้ำ (Stebbing, 1985)

สารประกอบไตรบิวทิลทิน (Tributlytin Compounds: TBT)

Tributyltin (TBT) เป็นสารประกอบชนิดหนึ่งในกลุ่มของ Butyltins (BTs) ประกอบด้วย Dibutyltin (DBT), Monobutyltin (MBT) และสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดที่มีส่วนประกอบของดีบุกอยู่เรียกว่า Organotin (OTs) ซึ่งเป็นสารมลพิษที่สำคัญในระบบนิเวศวิทยาของแหล่งน้ำ (Fent & Looser, 1995) TBT ประกอบด้วยพันธะของคาร์บอน 3 พันธะจับอยู่กับอะตอมของดีบุก มีสูตรโมเลกุล $(C_4H_9)_3Sn$ ดังแสดงในภาพที่ 3 TBT เป็นส่วนประกอบของสีทาเรือป้องกันเพรียง, สาหร่ายหรือ Tunicate มาเกาะ และในตาข่ายที่ใช้เลี้ยงสัตว์น้ำ (Iwata, Tanabe, Miyazaki & Tatsukawa, 1994) แต่ TBT มีฤทธิ์ฆ่าสิ่งมีชีวิตได้อย่างกว้างขวางทั้ง Microalgae, Mollus, Crustaceans, ปลา และ Benthic (Evans et al., 1995) ดังนั้นจึงนำเอา TBT ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อรา (Fungicide) แบคทีเรีย (Bactericide) แมลง (Insecticide) สารที่ใช้ในการรักษาเนื้อไม้ (Wood Preservative) (Evan, Leksono & Mckinnell., 1995) และสารป้องกันราเมือก (Slimicide)

TBT มีคุณสมบัติเป็น Biocide จึงได้มีการนำ TBT ไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ทั้งด้านอุตสาหกรรมและการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของสีทาเรือ ซึ่งได้มีการนำมาใช้ตั้งแต่ปลายทศวรรษ 1960s (Minchin, Oehlmann, Duggan, Stroben & Keatinge, 1995) จนปัจจุบันมีการใช้สีทาเรือกันอย่างแพร่หลายถึง 3,000 ตันต่อปี (Fargasova & Kizlink, 1996) การรั่วซึมของสีทาเรือเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ TBT ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม

โดยเฉพาะในบริเวณท่าเรือและอ่าวทะเลหรือน่านน้ำที่เป็นเส้นทางเดินเรือที่สำคัญ มีกิจกรรมทางเรือมาก (Evan Leksono & Mckinnell, 1995)



ภาพที่ 3 โครงสร้างของ TBT (Verschueren, 1996)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของสารประกอบไตรบิวทิลทิน (TBT), ไดบิวทิลทิน (DBT) และโมโนบิวทิลทิน (MBT) (Lewis, 1993)

สารประกอบ	สูตรโมเลกุล	ความหนาแน่น	จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	ตัวทำละลาย
ไตรบิวทิลทินคลอไรด์ (Tributyltin Chloride)	$(C_4H_9)_3SnCl$	1.20	145-147 (5 มิลลิเมตรปรอท)	ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ไม่ละลายในน้ำเย็น
ไดบิวทิลทินไดคลอไรด์ (Dibutyltin Dichloride)	$(C_4H_9)_2SnCl_2$	1.36	135 (10 มิลลิเมตรปรอท)	ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ไม่ละลายในน้ำเย็น
บิวทิลทินไตรคลอไรด์ (Butyltin Trichloride)	$C_4H_9SnCl_3$	1.71	102 (12 มิลลิเมตรปรอท)	ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์

สารประกอบไตรบิวทิลทิน (TBT) ในดินตะกอน

TBT มีคุณสมบัติเป็น Hydrophobic จึงละลายน้ำได้น้อย สามารถจับกับอนุภาคหรือดินตะกอนได้ดี ดินตะกอนจึงเป็นแหล่งสะสมของ TBT ทำให้ทนทานต่อการย่อยสลาย จึงทำให้สะสมในดินตะกอนและปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตในน้ำเป็นระยะเวลานาน โดยพบว่า การปลดปล่อย TBT ออกมาจากดินตะกอนหรือ Desorption เกิดขึ้นได้ช้ากว่า Adsorption ดังนั้นทำให้ครึ่งชีวิตหรือการสะสมของ TBT ในดินตะกอนนานประมาณ 2.5 ปี ซึ่งมากกว่าครึ่งชีวิตของ TBT ในน้ำที่เป็นระยะเวลาสั้น ๆ ประมาณ 1 สัปดาห์ (Kan-Atireklap, Tanabe & Sanguansin, 1997) อย่างไรก็ตาม การดูดซับของ TBT ในดินตะกอนเป็นค่า K_d (Sediment/Water Distribution Coefficients) ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของดินตะกอน ปริมาณการปนเปื้อนของ TBT ในบริเวณนั้น ๆ คือบริเวณท่าเรือซึ่งเป็นที่จอดเรือจำนวนมาก จะมีปริมาณของ TBT ในดินตะกอนสูง ความเค็ม pH และ Humic Substance (Langston & Pope, 1995)

สารประกอบ TBT ที่พบในดินตะกอนได้มีการสำรวจศึกษาวิจัยในหลายแห่งทั่วโลก ดังที่จะได้กล่าวคือ

ตารางที่ 3 สารประกอบ TBT ในดินตะกอนจากประเทศต่าง ๆ

สถานที่	TBT (นาโนกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	อ้างอิง
Puget Sound, สหรัฐอเมริกา	380	de Mora, Stewart & Phillips, 1995
Boston, สหรัฐอเมริกา	518	
Lucerne, สวิตเซอร์แลนด์	400	
Aukland, นิวซีแลนด์	100-450	
ประเทศไทย	4-4500	Kan-Atirelap, Tanbe & Sanguansin, 1997
ฮ่องกง	500	Ko, Bradley, Neller & Broom, 1995

สารประกอบไตรบิวทิลทินในน้ำทะเล

การปนเปื้อนของ TBT ในน้ำทะเลมีแหล่งที่มาดังนี้ คือ (Gabreilides et al., 1990)

1. จากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ TBT เป็นสารป้องกันการจับเกาะในท่อน้ำหล่อเย็น

2. จากบริเวณที่ท่าเรือมีการจอดและซ่อมบำรุงเรือบรรทุกสินค้า รวมทั้งที่จอดเรือสำหรับนักเล่นเรือ และเรือสำราญ

3. แหล่งเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

การแพร่กระจายของ TBT ในน้ำทะเลมีความสัมพันธ์กับปริมาณของเรือที่ใช้สีทาเรือที่มีส่วนผสมของ TBT โดยมีการหมุนเวียนของน้ำเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อระดับการปนเปื้อนของ TBT บริเวณชายฝั่งเมดิเตอร์เรเนียนในประเทศฝรั่งเศส มีการหมุนเวียนของน้ำได้น้อยกว่าชายฝั่งทางด้านมหาสมุทรแอตแลนติก น้ำทะเลชายฝั่งเมดิเตอร์เรเนียนจึงมีระดับการปนเปื้อนสูงกว่า (จุรีพร ล้อมเมตตา, 2544 อ้างอิงจาก Alzieu et al., 1991)

TBT มีคุณสมบัติเป็น Hydrophobic โดยมีค่า Octanol-Water Oartitioning (K_{ow}) = 5000 (de Mora, 1996) จึงละลายน้ำได้น้อย สามารถจับกับอนุภาคดินตะกอนและสะสมในสิ่งมีชีวิตได้ดีกว่า ในชั้นน้ำจึงพบว่ามีความเข้มข้นของ TBT ในปริมาณที่น้อยกว่าดินตะกอนและในสิ่งมีชีวิต นอกจากนั้นปัจจัยที่ทำให้ปริมาณ TBT ที่พบในชั้นน้ำมีปริมาณน้อยเนื่องมาจากการย่อยสลายเป็น Dibutyltin (DBT) และ Monobutyltin (MBT) ตามลำดับ เกิดได้ทั้งกระบวนการทางชีวภาพคือการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์และทางกายภาพ คือ กระบวนการ Photochemical แต่ในทางกายภาพจะเกิดได้น้อยกว่า (Dowson, Bubb & Lester, 1992) นอกจากนี้ความเข้มข้นของ TBT ในชั้นน้ำก็ยังขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น การปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคดินตะกอน (Desorption) และกระแสน้ำที่ไหลเวียน จะทำให้ความเข้มข้นของ TBT ในชั้นน้ำเจือจางลง ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะมีผลต่ออ่าวหรือชายฝั่งที่มีลักษณะปิดจะมีความเข้มข้นของ TBT มากพอที่จะทำให้เกิดผลกระทบต่อสัตว์น้ำ แต่ความเข้มข้นของ TBT จะเจือจางลงในอ่าวหรือชายฝั่งที่มีลักษณะเปิด

จากการสำรวจปริมาณ TBT ในชั้นน้ำ ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างในบริเวณท่าเทียบเรืออู่ต่อเรือหรืออ่าวและชายฝั่งที่มีจำนวนเรือมาก ๆ มีรายงานดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปริมาณ TBT ในชั้นน้ำจากรายงานการสำรวจจากสถานที่ต่าง ๆ

สถานที่	ความเข้มข้นของ TBT	เอกสารอ้างอิง
ปากแม่น้ำชายฝั่งตะวันออก ประเทศอังกฤษ	<3 – 71.2 นาโนกรัมต่อลิตร	Dowson et al., 1992
ประเทศบาร์หเรน	2.29 – 17.88 ไมโครกรัมต่อลิตร	Ali Hansan & Juma, 1992
อเล็กซานเดรีย อียิปต์ ตะวันออก ตะวันตก	 27.8 ± 12.0 นาโนกรัมต่อลิตร 39.6 ± 27.5 นาโนกรัมต่อลิตร	Abd-Allah, 1995
ฝรั่งเศสและตะวันออกเฉียงใต้ของอังกฤษ	76 – 5050 นาโนกรัมต่อลิตร	Ali Hansan & Juma, 1992
ทะเลเมดิเตอร์เรเนียน	<2 – 3930 นาโนกรัมต่อลิตร	Gabrielides et al., 1990

ผลของสารประกอบไตรบิวทิลทินต่อสิ่งมีชีวิต

1. TBT มีผลต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ ในน้ำในระดับที่แตกต่างกัน ในสาหร่ายเซลล์เดียว เช่น *Pavlona lutheri* และ *Dunaliella teriolecta* มีอัตราการเจริญเติบโตเพียงเล็กน้อยเมื่อได้รับ 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร แต่จะหยุดชะงักการเจริญเติบโตใน *Skeletonema costatum* เมื่อได้รับ TBT ในระดับเดียวกัน สำหรับสาหร่ายทั้ง 3 ชนิดจะมีการเจริญเติบโตลดลงอย่างรวดเร็วและตายภายใน 2 วัน เมื่อได้รับ TBT 1 และ 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (จุรีพร ล้อมเมตตา, 2544 อ้างอิงจาก Beaumont & Newman, 1986)

ในตัวอ่อนของกุ้ง Lobster (*Homarus americarus*) TBT มีผลกระทบต่อการเจริญที่ระดับ 1.0 ไมโครกรัมต่อลิตร และในกุ้ง mysid (*Acanthomysis sculpta*) ที่ระดับ 0.25 ไมโครกรัมต่อลิตร หอยสองฝา (*Ostrea edulis*) และ *Crassostrea gigas* ที่ระดับ 0.02-0.06 ไมโครกรัมต่อลิตร ส่วนในหอยแมลงภู่ (*Mytilus edulis*) ที่ระดับ 0.24 ไมโครกรัมต่อลิตร ในปลา Rainbow Trout (*Salmo gairdneri*) ที่ระดับ 0.02 ไมโครกรัมต่อลิตร

ใน Crustacean พบว่า TBT มีผลต่อการลอกคราบของปู Mud Crab (*Rhithroponopeus harrisii*) ภายหลังจากสัมผัสกับ TBT ที่ระดับ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ในปูก้ามดาบ (*Uea pugilator*) ที่ได้รับ TBT เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่ามีความผิดปกติของการ Regenerate ของส่วนขา (ประภัสสร ตันติพงศ์วิวัฒน์, 2538 อ้างอิงจาก กัลยา วัฒยากร, 2531)

2. TBT มีการสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อและอวัยวะของปลา โดยเฉพาะตับ พบว่ามีความเข้มข้นของ TBT สูงที่สุด รองลงมาคือ ไต และกล้ามเนื้อ ตลอดจนเนื้อเยื่อตามส่วนต่าง ๆ เช่น หัวใจ สมอง และเม็ดเลือดแดง (Erythrocytes) (Kannan & Falandysz, 1997) (Takahashi et al., 2000) เนื่องจาก TBT จะละลายได้ดีในชั้นไขมัน (Lipid-Rich Blubber) (Kannan & Falandysz, 1997) เพราะมีการจับกันระหว่าง Sylfohydryl Group (-SH) เช่น Glutathione หรือ Protein ในเนื้อเยื่อกับ TBT ที่เป็น Electrophilic Compounds (Kannan & Falandysz, 1997; Takahashi et al., 2000)

จากการศึกษาในปลา Rainbow Trout พบว่า TBT เมื่อเข้าสู่ร่างกายแล้วจะมีการกระจายในลักษณะของ Three-Compartnent โดย Compartnent แรกคือไขมันบริเวณหน้าท้อง (Peritoneal Fat) Compartnent ที่ 2 คือ ไต ตับและถุงน้ำดี สำหรับ Compartnent ที่ 3 คือ เนื้อเยื่อในอวัยวะอื่น ๆ นอกจากนี้ยังพบว่า TBT จะถูกเปลี่ยนแปลงในตับได้เมตาบอไลท์คือ DBT และ MBT ซึ่งจะถูกขับออกทางน้ำดี (Biliary-Fecal Excretion) (ประภัสสร ตันติพงศ์วิวัฒน์, 2538 อ้างอิงจาก Martin et al., 1989) TBT ยังมีพิษต่อระบบประสาทของปลา Rainbow Trout กล่าวคือ ปลาว่ายน้ำเร็วเป็นระยะทางยาว ว่ายไม่มีทิศทางแน่นอนและตอบสนองต่อสิ่งเร้าลดลง (ฐิติลาวัณย์ กลิ่นคล้ายกัน, 2539 อ้างอิงจาก Triebskom et al., 1994)

นอกจากนี้พบว่า TBT จะทำลายเยื่อหุ้มเหงือก (Gill Epithelium) เยื่อหุ้มท่อไต (Bileduct Epithelial Cell) มีการบวมและแตกของผนังไมโตคอนเดรีย (Mitochondria) มีการขับเมือกออกมาทางผิวหนังมากขึ้นและคอร์เนีย (Cornea) ถูกทำลายในปลา Rainbow Trout (*Salmo gairdmeri* Richardson) และปลานิล (*Tilapia rendalli* Boulenger) (จุรีพร ล้อมเมตตา, 2544 อ้างอิงจาก Chliamobitch & Kuhn, 1977)

3. TBT มีผลต่อสัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำ โดย Laughlin and Linden (1985) ได้ทำการศึกษาให้ตัวอ่อนของสัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำชนิดหนึ่ง (*Garmmarus oceanius*) สัมผัสกับ TBT เวลาหนึ่ง ตัวเต็มวัยได้รับการสัมผัสภายใน 1 สัปดาห์โดยที่ 50% จะตายภายใน 3 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมซึ่งจะมีอายุยืนกว่า ตัวอ่อนที่ได้รับ TBT มีจำนวนรอดน้อยกว่าตัวอ่อนในกลุ่มควบคุมเกือบครึ่ง การเจริญเติบโตของตัวอ่อนลดลงเห็นได้จากขนาดความยาวและน้ำหนักน้อยกว่าในกลุ่มควบคุม พฤติกรรมการว่ายน้ำของตัวอ่อนจะแตกต่างกัน ในกลุ่มที่สัมผัสกับ TBT ตัวอ่อนจะว่ายน้ำมากขึ้น หลังจากนั้นจะว่ายมาที่ผิวน้ำ ส่วนกลุ่มควบคุมจะอยู่นิ่ง ๆ และว่ายน้ำน้อยมากในเวลากลางวัน (ฐิติลาวัณย์ กลิ่นคล้ายกัน, 2539)

การเกิดพิษเฉียบพลันของสารประกอบไตรบิวทิลทิน

การเกิดพิษของ TBT ต่อสัตว์นั้นเกิดจากการที่สัตว์รับเอา TBT เข้าสู่ร่างกายแล้วเกิดการผิดปกติหรือการตาย โดยขึ้นกับปริมาณของสาร ระยะเวลาในการสัมผัส ชนิดของสัตว์ และชนิดของ TBT ที่สัตว์แต่ละชนิดรับเข้าไป ดังแสดงในตารางที่ 5 (ทรงกฤษณ์ ประภักดี, 2538)

ตารางที่ 5 การเกิดพิษเฉียบพลันของสารประกอบไตรบิวทิลทินต่อสัตว์ทะเล (ทรงกฤษณ์ ประภักดี, 2538 อ้างอิงจาก Michael, 1986)

สัตว์ทดลอง	สาร	ผลกระทบ	การทดลอง
Fish			
Oncorhynchus tshawytscha	TBTO	96 hr LC_{50} = 1.5 ppb	Static Renewal
Lepomis macrochirus	TBTO	96 hr LC_{50} = 7.6 ppb (5.6 – 10 ppb)	Static
Salmo gairdneri	TBTO	96 hr LC_{50} = 6.9 ppb (6.27 – 7.8 ppb)	Static
Ictalurus punctatus	TBTO	96 hr LC_{50} = 12.0 ppb (7.3 – 20.0 ppb)	Static
Fundulus heteroclitus	TBTO	96 hr LC_{50} = 24.0 ppb	Static
Cyprinodon variegtus	TBTO (Acetone-Methanol)	21 day LC_{50} = 0.96 ppb Total Mortality at 3.2 ppb at 14 days	21 Day Flow-Through Acute Testing
Mollusca			
Bivalve			
Crassostrea gigus	TBTO	48 hr LC50 = 1.5 ppb	Static Renewal Every 24 Hours
Mytilus edulis	TBTO	48 hr LC50 = 2.3 ppb	Static Renewal Every 24 Hours
Crassostrea gigas	TBTO	48 hr LC50 = 0.9 ppb (0.4-1.9 ppb)	Static
Gastropoda			
Biomphalaria and Bulinus	TBT	48 hr LC50 = 10-100 ppb	Static
Biomphalaria glabrata		100% died at 10 ppb	Static

ตารางที่ 5 (ต่อ)

สัตว์ทดลอง	สาร	ผลกระทบ	การทดลอง
Crustaceans			
Crangon crangon	TBTO	Larvae 96 hr LC_{50} = 1.5 ppb	Static Renewal Every
		Adult 96 hr LC_{50} = 141 ppb	24 Hours
Acartia tonsa	TBTO	72 hr LC_{50} = 2.1 ppb	Static Renewal Every
		96 hr LC_{50} = 1.0 ppb	24 Hours
		144 hr LC_{50} = 0.4 ppb	
Acanthomysis sculpta	TBT as	96 hr LC_{50} = 0.42 ppb	Static Renewal Every
	Leachate		24 Hours
Daphnia magna	TBTO	48 hr LC_{50} = 1.67 ppb	Static
		(1.01-2.5 ppb)	

การเกิดพิษเรื้อรังของสารประกอบไตรบิวทิลทิน

TBT ในความเข้มข้นปริมาณน้อยสามารถก่อให้เกิดการผิดปกติขึ้นในสิ่งมีชีวิตได้ โดยที่สิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดมีขีดจำกัดในการทนต่อปริมาณของสารพิษที่สะสมในร่างกาย เมื่อมีการรับสารพิษเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่ไม่มากเกินขีดของความทนก็จะแสดงอาการความผิดปกติออกมา ในตารางที่ 6 (ทรงกฤษณ์ ประภักดี, 2538)

ตารางที่ 6 การเกิดพิษเรื้อรังของสารประกอบไตรบิวทิลทินต่อสัตว์ทะเล (ทรงกฤษณ์ ประภักดี, 2538 อ้างอิงจาก Michael, 1986)

สัตว์ทดลอง	สาร	ผลกระทบ	การทดลอง
Crustaceans			
Homarrus americanus Larvae	TBTO	ไม่มีการเจริญเติบโตที่ความเข้มข้น 0.1 ppb	Static Renewal Every 24 Hours
Acanthomysis sculpta (Juveniles and Mature Females)	TBTO as Leachate	ผลต่อการสืบพันธุ์ที่ความเข้มข้น 0.19 ppb ผลต่ออัตราการเจริญเติบโตที่ความเข้มข้น 0.25 ppb คาดการพิษเรื้อรังที่ความเข้มข้น 0.14 ppb	Flow-Through for 63 Days
Palaemonetes pugio	TBTO	ไม่เกิดการตอบโต้ที่ความเข้มข้น 2.3-30 ppb	Flow Through
Rhithropanopeu harrisii	TBTO	ผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ความเข้มข้น 10 ppb ของ TBTO และ 20 ppb ของ TBTS	Static Renewal Every 24 Hours
Bivalve			
Crassostrea gigas (spat)	TBT Methacrylate Leachates	ลดการเจริญเติบโตอย่างนัยสำคัญที่ความเข้มข้น 0.24 ppb	Flow Through
Mytilus edulis (spat)	TBT Methacrylate Leachates	ลดการเจริญเติบโตอย่างนัยสำคัญที่ความเข้มข้น 0.24 ppb	Flow Through
Venerupis decussata (Clam Spat)	TBT Methacrylate Leachates	ลดการเจริญเติบโตอย่างนัยสำคัญที่ความเข้มข้น 0.24 ppb	Flow Through

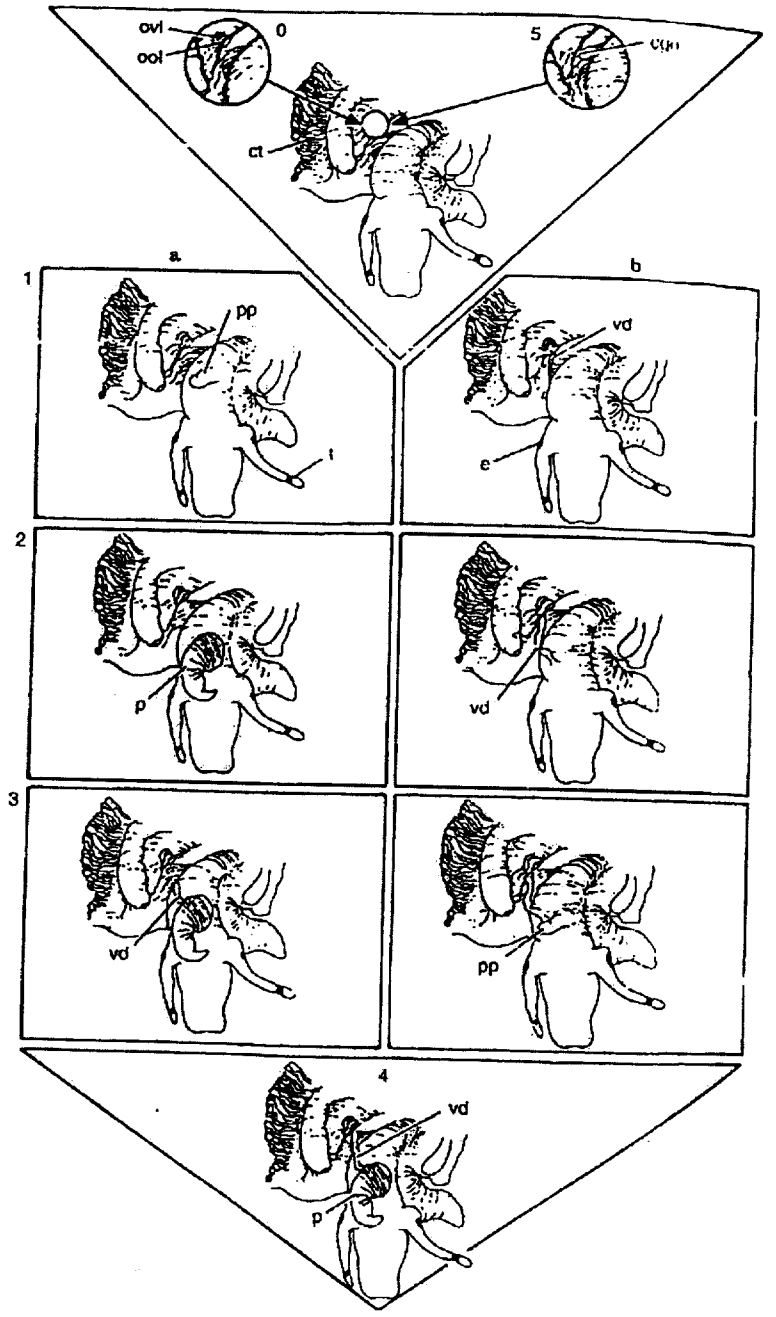
Imposex

Imposex เป็นปรากฏการณ์เนื่องจากพิษเรื้อรังของ TBT เหนี่ยวนำให้หอยเพศเมียแสดงลักษณะของหอยเพศผู้ มี Pseudopenis และ Vas Deferens (ท่อนำสเปิร์ม) เกิดขึ้น เนื่องจาก TBT จะกระตุ้นการขับ Penial Morphogenetic Factor จาก Pedal Ganglia ซึ่งอยู่ภายใต้การควบคุมของ Cerebropleural ทำให้ปล่อย Testosterone ออกมาเพิ่มขนาดของ Penis ในหอยเพศเมีย (Foale, 1993) อวัยวะที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะไปขวางท่อนำไข่ ทำให้ท่อนำไข่อุดตัน หอยเพศเมียจึงเป็นหมันเพราะไม่สามารถวางไข่ได้ เมื่อไข่มีการสะสมมากขึ้น ทำให้ท่อนำไข่แตก เป็นสาเหตุของการตายของหอยและจำนวนประชากรของหอยชนิดนั้น ๆ ลดลง (Gibbs & Bryan, 1996) เป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างประชากรในระบบนิเวศน์ ดังที่มีรายงานถึงการลดลงของจำนวนประชากร Dogwhelks *Nucella lapillus* ในภาคใต้ด้านตะวันตกของอังกฤษในช่วงทศวรรษ 1980 (Evans et al., 1995)

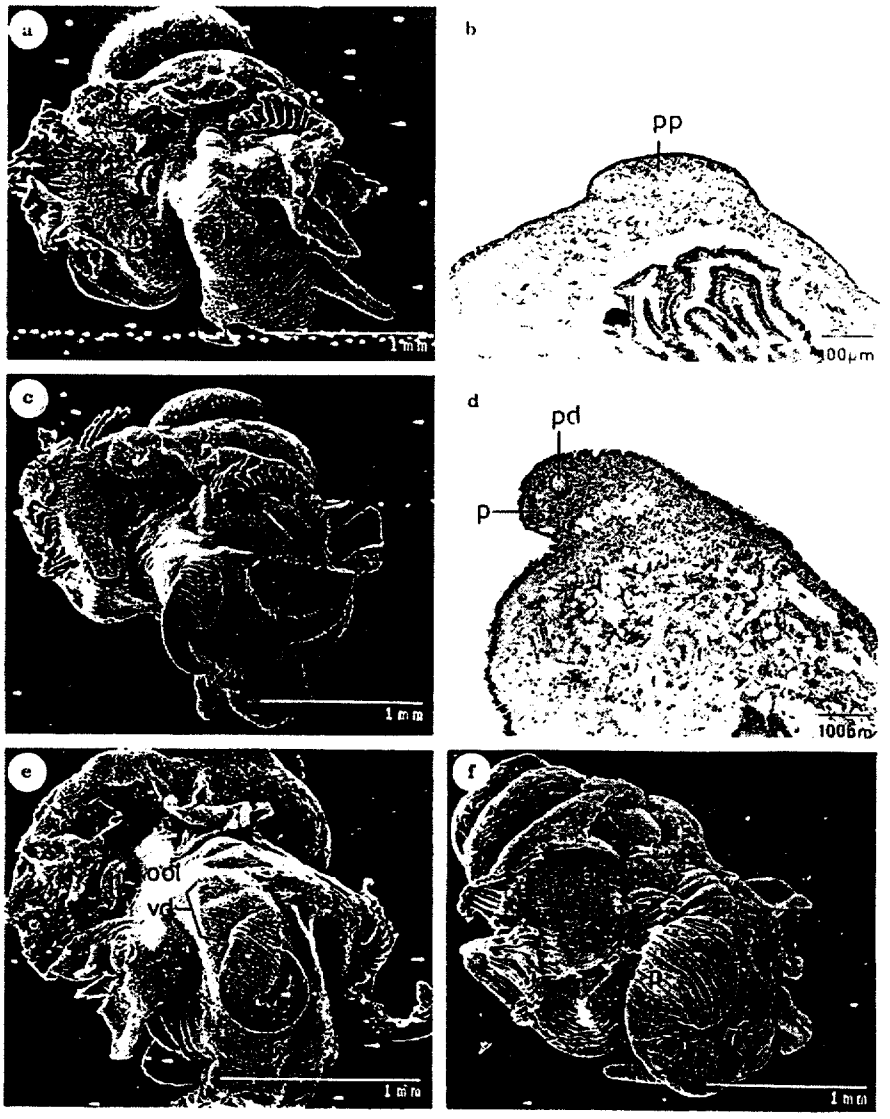
Imposex เกิดขึ้นได้ที่ความเข้มข้นของ TBT ปริมาณน้อย ๆ แต่ความยาวของ Penis ในหอยเพศเมียจะสั้น (< 0.25 มิลลิเมตร) ที่ความเข้มข้นของ TBT 0.5-1 นาโนกรัมต่อลิตร เมื่อมีความเข้มข้นของ TBT สูงขึ้น (> 5 นาโนกรัมต่อลิตร) Penis จะมีขนาดยาวขึ้น (Nias, McKillup & Edyvane, 1993) (Tan, 1997) ซึ่ง Penis ที่ยาวที่สุดที่เคยวัดได้คือ 18 mm ใน *Buccinum undatum* ใน North Sea (Ten Hallers-Tjabbes, Kemp & Boon, 1994) ดังแสดงได้จากผลการศึกษาหอยฝาเดียว *Lepsiella vinosa* ในภาคใต้ของออสเตรเลีย

ตารางที่ 7 การเกิด Penis ใน *Lepsiella vinosa* ที่ความเข้มข้นของ TBT ต่าง ๆ กัน (Nias, Mckillup & Edyvane, 1993)

TBT (นาโนกรัมต่อลิตร)	ความยาวเฉลี่ยของ Penis ในหอยเพศเมียที่เกิด Imposex (มิลลิเมตร)
1	< 0.25
10	0.36
100	0.36
500	0.84



ภาพที่ 4 การเกิด Imposex 4 ลำดับขั้นของหอย *Hydrobia ulvae* หมายเลข 5 เป็นโครงสร้างปกติของหอยเพศเมีย a: เกิด Penis Primordium (pp) ก่อน Vas Deferens (vs) b: เกิด Vas Deferens ก่อน Penis Primordium (Schulte-Oehlmann, Oehlmann, Fioroni & Bauer, 1997)



ภาพที่ 5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงการเกิด Imposex ของหอย *Hydrobia ulvae* ในลำดับขั้นต่าง ๆ กัน (a-f) b และ d เป็นภาพตัดขวางของ Penis Primordium (Schulte-Oehlmann, Oehlmann, Fioroni & Bauer, 1997)

การวัด Imposex มีดัชนีที่บ่งชี้ได้ 2 วิธี คือ (Wilson, Ahsanullah & Thompson, 1993)

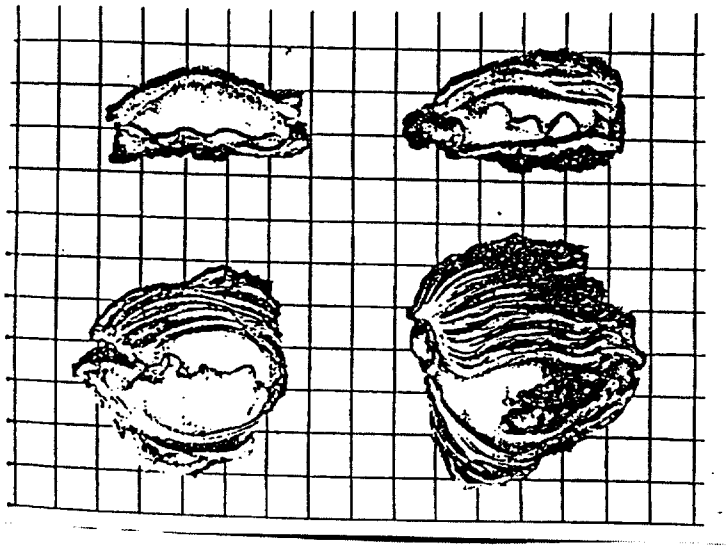
1. เปอร์เซ็นต์ของหอยเพศเมียที่เกิดผลกระทบ

2. Relative Penis Size Index (RPS) ซึ่ง Wilson, Ahsanullah and Thompson (1993 citing Bryan et al., 1991) เป็นผู้นำดัชนีนี้มาใช้ในการประเมินผลการเกิด Imposex เป็นคนแรก RPS มีสูตรดังนี้คือ

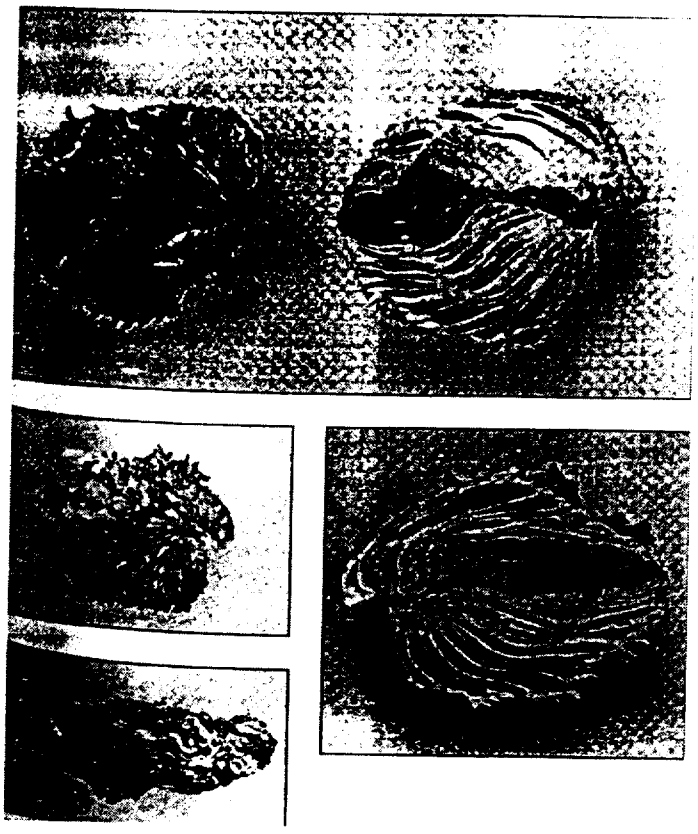
$$\frac{\text{ความยาวเฉลี่ยของ Penis ในหอยเพศเมีย}}{\text{ความยาวเฉลี่ยของ Penis ในหอยเพศผู้}} \times 100$$

ความผิดปกติของเปลือกหอย

TBT มีพิษเรื้อรังต่อหอยอีกประการหนึ่งคือ ทำให้เปลือกหนาขึ้น จากการศึกษาครั้งแรกของ Key et al. (1976 cited in de Mora, 1996)) ในหอยนางรม *Crassostrea gigas* พบว่ามีการแบ่งชั้นของเปลือกหอยเกิดขึ้นใหม่มากกว่า 10 ชั้น เปลือกหอยจึงมีรูปร่างลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจนเป็นก้อนกลามเรียกว่า Ball จนทำให้โพรงหรือช่องว่างที่อยู่ด้านในเล็กลง เนื้อเยื่อหอยที่อยู่ในเปลือกจึงมีขนาดเล็ก มีน้ำหนักน้อย และมีมูลค่าทางเศรษฐกิจลดลง ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อการเพาะเลี้ยงหอย ซึ่งหอยนางรม *C. gigas* ที่พบว่าเปลือกมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปพบที่ฝรั่งเศส, อังกฤษ, ออสเตรเลีย และนิวซีแลนด์ หอยชนิดอื่นที่พบว่ามีรายงานได้แก่ *C. glomerata* ที่นิวซีแลนด์ และ *Saccostrea commercialis* (Stebbing, 1985; de Mora, 1996)



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนรูปของเปลือกที่หนาขึ้นใน Pacific Oysters *Crassostrea gigas* ที่พบในประเทศนิวซีแลนด์ (de Mora, 1996)



ภาพที่ 7 เปลือกหอยนางรม *C. gigas* ที่ได้รับผลกระทบจาก TBT จากประเทศอังกฤษ (Laughlin & Linden, 1985)

การย่อยสลายไตรบิวทิลทิน

การย่อยสลาย TBT เป็นกระบวนการ Debutylation โดยการกำจัดพันธะคาร์บอน-ดีบุกออกไปทีละ 1 พันธะ เกิดสารตัวกลาง Dibutyl-, Monobutyl- และสุดท้ายเป็น Inorganic Tin ที่ความเป็นพิษลดลงตามลำดับ (Stewart & de Mora, 1990) การย่อยสลายเกิดขึ้นได้ทั้งทางกายภาพ (Hydrolysis, Photodegradation, Volatilisation และการดูดซับบนสารแขวนลอย) และทางชีวภาพ (การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์) แต่การย่อยสลายทางกายภาพด้วยแสงในธรรมชาติเกิดขึ้นได้ช้ามาก TBT จะมีครึ่งชีวิตนานถึง 89 วัน เนื่องจากการที่แสงไม่สามารถส่องทะลุเข้าไปในชั้นน้ำที่ลึกกว่าได้ และกระบวนการ Volatilisation ก็เกิดขึ้นได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นการย่อยสลายทางกายภาพโดยเฉพาะการย่อยสลายด้วยแสงจึงไม่ใช่ปัจจัยหลักในการย่อยสลาย TBT ในสิ่งแวดล้อม (Stewart & de Mora, 1990)

การย่อยสลายทางชีวภาพ

การย่อยสลาย TBT ทางชีวภาพเป็นปัจจัยสำคัญในการลดปริมาณและความเป็นพิษในสิ่งแวดล้อม จุลินทรีย์สามารถย่อยสลาย TBT ได้โดยเฉพาะแบคทีเรีย อัตราเร็วของการย่อยสลายเป็น First-Order Kinetics และขึ้นกับสภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ, ออกซิเจน, pH, ปริมาณของแร่ธาตุและความเข้มข้นของ TBT ที่จะไม่ยับยั้งหรือทำให้แบคทีเรียตาย เช่น ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ จะไม่เกิดการย่อยสลาย เนื่องจากอุณหภูมิต่ำยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ Pathway ของการย่อยสลายคือ

$$R_3SnX \longrightarrow (R_3Sn)_2O \longrightarrow (R_3Sn)_2CO_3$$

$$\downarrow \text{ microorganisms}$$

$$(R_2SnO)_n$$

$$\downarrow \text{ microorganisms}$$

$$(RSnO^-)_n$$

$$\downarrow \text{ microorganisms}$$

$$SnO_2$$

สารตัวกลางที่เกิดขึ้นคืออนุพันธ์ของ Hydroxylate ซึ่งเป็นสารที่เกิดขึ้นในที่มีแสงสว่างแต่ที่ไม่เสถียร สลายตัวเร็ว กระบวนการ Debutylization โดยกำจัดพันธะคาร์บอน-ดีบุกออกไปเกิดเป็นอนุพันธุ์ของ Dibutyl ที่ถูกย่อยสลายต่อไปได้เร็วกว่า Tributyl และ Monobutyl ซึ่งเป็นอนุพันธ์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลาย Dibutyl และมีพิษน้อยลงตามลำดับ

จุลินทรีย์หลายชนิดมีรายงานว่าสามารถย่อยสลาย TBT ได้คือ

1. Microalgae เช่น Diatom, Phytoplanton, Dinoflagellate และสาหร่ายสีเขียว (Lee, Valkirs & Seligman, 1989)

2. *Pseudomonas* เป็นแบคทีเรียที่พบในดินตะกอนปากแม่น้ำ

3. Wood-Degrading Fungi เช่น *Coniophora puteana* และ *Coriolus polystictus,* (Dobson, 1990 citing Henshaw et al., 1978) และ *Trametes versicolor, Chaetomium globosum* (Dobson, 1990 citing Barug, 1981)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

de Mora, Stewart and Phillips (1995) เก็บตัวอย่างดินตะกอนจากท่าเรือใกล้กับ Auckland ประเทศนิวซีแลนด์ เพื่อหาอัตราการย่อยสลาย TBT พบว่า TBT มีความคงทนอยู่ในดินตะกอนเป็นเวลานาน ใช้เวลาในการย่อยสลายช้ากว่าในน้ำ และมีอัตราการย่อยสลายเป็น First-Order Kinetics มีค่าครึ่งชีวิตในดินตะกอนประมาณ 2.5 ปี

Harino, Fukushima, Kurokawa and Kawai (1997 a) ศึกษาการย่อยสลาย TBT โดยใช้จุลินทรีย์จากน้ำและดินตะกอนที่เก็บตัวอย่างมาจากท่าเรือเมืองโอซาก้า ประเทศญี่ปุ่น พบว่าการย่อยสลาย TBT โดยใช้จุลินทรีย์จากดินตะกอนเหมือนกับในน้ำ TBT จะถูกย่อยสลายไปเป็น DBT และ MBT เช่นเดียวกัน และ MBT เพิ่มขึ้นในขณะที่ TBT ลดลง เปรียบเทียบอัตราการย่อยสลาย TBT ในน้ำและในดินตะกอนพบว่าจุลินทรีย์ในน้ำจะย่อยสลาย TBT ได้เร็วกว่าจุลินทรีย์ในดินตะกอน

Harino, Fukushima, Kurokawa and Kawai (1997 b) ได้ทำการทดลองเพื่อทดสอบการย่อยสลาย TBT ในน้ำ โดยใช้วิธี River Die-Away Method ใส่ TBT และ DBT ใน DMSO ที่ความเข้มข้น 10 หรือ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ใช้ Estuarine water ที่ฆ่าเชื้อแล้วเป็นชุดควบคุม ทำการทดลองโดยเขย่าที่ 30 องศาเซลเซียส ในที่มืด วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำในวันที่ 4, 9, 12, 15, 22, 30, 40, 50 และ 60 วัน พบว่า TBT ลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 20 วันแรก และตรวจไม่พบหลังจาก 40 วัน ส่วน DBT จะลดลงอย่างช้า ๆ ภายใน 15 วันแรก และยังคงตรวจพบอยู่จนกระทั่งหลังจาก 30 วันไปแล้ว นอกจากนี้พบว่า MBT เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในระหว่างวันที่ 12 ถึงวันที่ 60 จึงสรุปได้ว่า TBT เกิดการย่อยสลายโดย Debutylated เป็น DBT และ MBT ตามลำดับ โดยที่อัตราการย่อยสลายของ DBT จะเกิดเร็วกว่า TBT เนื่องจาก TBT 9.3 ไมโครกรัมต่อลิตร มีครึ่งชีวิต 15 วัน สูงกว่า DBT 8 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งมีครึ่งชีวิต 10 วัน ในชุดควบคุม TBT ลดลงเช่นกันซึ่งอาจเกิดจากการย่อยสลายทางเคมีหรือมีการระเหยไป

Tsang, Lau, Tam and Won (1999) ทำการทดลองย่อยสลาย TBT โดยใช้สาหร่ายสีเขียว *Chlorella* 2 สายพันธุ์ซึ่งมีความทนต่อ TBT ได้ คือ *Chlorella vulgaris* และ *Chlorella* sp. โดยสาหร่ายใช้หลักการ Biosorption เป็นหลักในการดูดซึม TBT เข้าไปในเซลล์ ทำให้ปริมาณ TBT ในอาหารเลี้ยงเชื้อลดลงถึง 40% ใน 2 วันแรก ครึ่งชีวิตของ TBT ใน *C. vulgaris* และ *Chlorella* sp. คือ 60 และ 80 ชั่วโมง ตามลำดับ และตรวจพบ DBT ในวันที่ 1 ของการเพาะเลี้ยง เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ามี DBT และ MBT 27 และ 41% ในการเพาะเลี้ยง *C. vulgaris* แต่ในการเพาะเลี้ยง *Chlorella* sp. พบแต่ DBT เท่านั้น ดังนั้น *C. vulgaris* จึงมีความสามารถในการย่อยสลาย TBT ได้มากกว่า *Chlorella* sp.

Kawai, Kurokawa, Harino and Fukushima (1998) ศึกษาการย่อยสลาย TBT โดยแบคทีเรียสายพันธุ์ที่คัดแยกได้จากแหล่งน้ำจืดที่ปนเปื้อนในเมืองโอซาก้าคือ *P. diminuta* โดยทดสอบที่ความเข้มข้นของ TBT 3.2 ไมโครกรัมดีบุกต่อลิตร และมีจำนวนแบคทีเรีย 5×10^6 CFU/ml คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายได้ 3, 21 และ 53% ในเวลา 7, 17 และ 25 วันตามลำดับ DBT เกิดขึ้นในวันที่ 7 และลดลงเล็กน้อยในวันที่ 25 ที่เกิด MBT ขึ้น แสดงว่าแบคทีเรียสายพันธุ์นี้สามารถย่อยสลาย TBT ได้ นอกจากนี้การใส่อาหารเสริมอินทรีย์ เช่น Peptone และ Beef Extract 0.2 กรัมต่อลิตร จะเพิ่มอัตราการย่อยสลายดีขึ้น เมื่อนำแบคทีเรียมาย่อยสลาย TBT ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กันคือ 4, 8 และ 20 ไมโครกรัมดีบุกต่อลิตร พบว่าที่ระดับ 4 และ 8 ไมโครกรัมดีบุกต่อลิตร TBT มีการย่อยสลายเร็วมากถึง 90% หลังจาก 3 วันแล้ว ในขณะที่ระดับ 20 ไมโครกรัมดีบุกต่อลิตร ยังคงมี TBT เหลืออยู่ 30% แสดงว่า TBT มากกว่า 20 ไมโครกรัมดีบุกต่อลิตร ขึ้นไปจะยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลาย TBT ได้

Lee, Valkirs and Seligman (1989) ศึกษาการย่อยสลาย TBT โดยสาหร่ายเซลเดียว (Microalgae)ในตัวอย่างน้ำที่เก็บมาจากปากแม่น้ำ Skidaway River เติม TBT 0.4 – 1.6 ไมโครกรัมต่อลิตร มีครึ่งชีวิตตั้งแต่ 3 – 13 วัน อัตราการย่อยสลายในที่แสงสว่างจะเร็วกว่าในที่มืด เนื่องจากเมตาบอลิซึมของสาหร่าย เมื่อเติมไนเตรทในน้ำตัวอย่างก่อนนำไปตั้งไว้ในที่มีแสงสว่าง อัตราการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นโดย TBT จะมีครึ่งชีวิตเพียง 1-2 วัน สาหร่ายที่มีบทบาทสำคัญคือ Diatom *Skeletonema costatum* หรือ *Skeletonema tropicum* Phytoplankton *Chaetoceros curvisetus* และ Dinoflagellate ในขณะที่สาหร่ายสีเขียว *Dunaliella tertiolecta* และ Chrysophytes *Isochrysis glabana* และ *Cricosphaera ricoco* มีการย่อยสลาย TBT เพียงเล็กน้อย สารตัวกลาง (Hydroxybutyl) Dibutyltin จะเกิดขึ้นในการย่อยสลาย TBT ในแสงสว่างซึ่งในที่มืดจะไม่เกิดสารนี้

Hattori, Kobayashi, Nanaka Sugimae and Nakamoto (1988) ศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของ TBT และ DBT เปรียบเทียบกันในน้ำจืดและน้ำทะเล โดยเติม TBT และ DBT ลงในน้ำตัวอย่างที่เก็บมาจาก 4 สถานีบริเวณอ่าวโอซาก้า นำไปเขย่าในที่มืด อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และวิเคราะห์ปริมาณของ butyltin ด้วยแกสโครมาโตกราฟฟีโฟโตเมตริกดีเทคเตอร์ พบว่าการย่อยสลาย TBT และ DBT ในน้ำจืดและน้ำเค็มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ปริมาณ TBT ลดลง เปรียบเทียบโครมาโตแกรมของ TBT ในวันแรก กับวันที่ 3 และวันที่ 14 พบว่าลดลง ครึ่งชีวิตของ TBT ในน้ำจืดประมาณ 11 วัน ส่วนปริมาณของ DBT ก็ลดลงเช่นกัน และมีครึ่งชีวิตประมาณ 5 วัน ในน้ำเค็มปริมาณของ TBT และ DBT ลดลงในสถานี Sakaisenboku Harbour ซึ่งเป็นสถานีที่มีมลพิษมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับโครมาโตแกรมของ Inorganic Tin ที่เพิ่มขึ้น แสดงว่า TBT และ DBT ถูกย่อยสลายทางชีวภาพ ครึ่งชีวิตของ TBT ในน้ำเค็มประมาณ 13 วัน

Dowson, Bubb, Williams and Lester (1993) ศึกษาการย่อยสลาย TBT ในดินตะกอนแม่น้ำจาก Robertson's Boatyard ใน River Deben (น้ำจืด) และดินตะกอนปากแม่น้ำจาก Tollesbury Marina และ River Blackwater (ปากแม่น้ำ) ประเทศอังกฤษ พบว่าปริมาณ TBT ในดินตะกอนมีค่าระหว่าง 449-1290 นาโนกรัมต่อกรัม ดินตะกอนในสภาวะไร้ออกซิเจนไม่พบว่า TBT ลดลงหรือมีสารตัวกลางใด ๆ เกิดขึ้น คาดว่าอาจใช้เวลาในการย่อยสลายเป็นสิบปี เนื่องจากในชั้นดินตะกอนที่ลึกลงไปไม่มีแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลาย TBT หรือมีสารมลพิษตัวอื่นที่ยับยั้งกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ จะพบการย่อยสลายของ TBT ในชั้นหน้าดิน TBT ซึ่งมีครึ่งชีวิตมากกว่า 330 วันขึ้นไป โดยที่ปริมาณของ TBT ลดลงDBT และ MBT เพิ่มขึ้น ในชุดควบคุมที่เป็นดินตะกอนที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว เมื่อเวลาผ่านไป 12 เดือน ปริมาณ TBT ไม่ลดลงแสดงว่าการย่อยสลายโดยแบคทีเรียเป็นกลไกหลักของการลดปริมาณสารปนเปื้อน และ TBT ในปริมาณสูง ๆ จะไปยับยั้งการย่อยสลายโดยแบคทีเรีย