บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สารประกอบดีบุกอินทรีย์ (Organotin)

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) และใช้เป็นตัวเร่งปฏิกริยา (Catalysts) ในการผลิต Polyurethane Foams และในกระบวนการ Cold-euring ของ Silicone Elastomers ส่วนสารประกอบ Triorgaotin มีความสำคัญที่สุดในกลุ่มของสารประกอบดีบุกอินทรีย์เนื่องจากใช้เป็นสารฆ่าสิ่งมีชีวิต (Biocides) ที่มีประสิทธิภาพและใช้กันอย่างกว้างขวาง (กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, 2541)

การใช้ประโยชน์จากสารประกอบดีบุกอินทรีย์

สารประกอบดีบุกอินทรีย์มีการนำมาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน (ทรงกฤษณ์ ประภักดี, 2538; ประภัสสร ตันติพงศ์วิวัฒน์, 2538) ได้แก่

- สาร Triorganotin เป็นสารประกอบดีบุกที่ใช้ในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม เช่น ใช้เป็นสารปราบศัตรูพืชทางชีวภาพ (Biocides)
- Tributyltinoxide และ Tributyltinfluoride ใช้ในการกำจัดหอยน้ำจืด ซึ่งเป็น Intermediate Host ของหนอนจีนัส Shistosoma ในการแพร่เชื้อโรคพยาธิใบไม้ในตับ (Shistosomiasis) สู่มนุษย์ และนำมาใช้เป็นสารรักษาเนื้อไม้ ใช้เป็นยาปราบศัตรูพืชศัตรูสัตว์ ที่เฉพาะเจาะจงกับสิ่งที่ต้องการต่อต้านโดยใช้ความเข้มข้นที่ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์อื่นๆ
- Trimethyltin ใช้เป็นยาฆ่าแมลง
- Tripropyltin, Tributyltin, Triphenyltin ใช้เป็นยาปราบศัตรูพืชและแบคทีเรีย
- Tricycohexyltinhydroxide ใช้ปราบแมลงไรที่ตอมผลไม้
- Bis-tributyltinoxide ใช้รักษาเนื้อไม้ ป้องกันเชื้อรา แมลง มอดกัดกินเนื้อไม้ และผสมสีทาเรือเพื่อป้องกันเพรียง
- ใช้เป็นยาฆ่าเชื้อโรค (Disinfectant)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

- เป็นสารที่ใช้ในการเร่งปฏิกริยาในการผลิต Silicones และ Polyurethane Foam
- ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแก้วและฟิล์ม
- ใช้เป็นยาถ่ายพยาธิ โดยใช้ Di-n-butyltin Oxide ในการถ่ายพยาธิตัวแบน (*Eubothrium crassum*) ในปลา Rainbow Trout (*Samo gaimeri*)
- ผสมใน PVC โดยทำหน้าที่เป็นสารทำให้เสถียรป้องกันการสลายตัวและทำให้ผลิตภัณฑ์โปร่งใส

การปนเปื้อนของสารประกอบอินทรีย์สู่สิ่งแวดล้อม

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

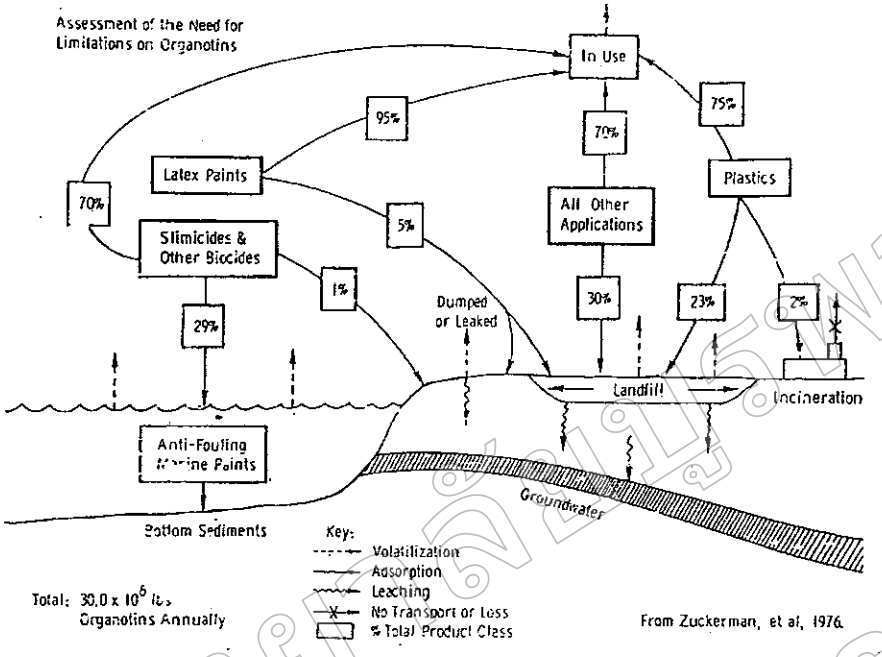
มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ตารางที่ 1 แหล่งของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม (ทรงกฤษณ์ ประภักดี, 2538)

ตัวกลาง	สาร	แหล่งที่มา
อากาศ	R_3SnX	-การฉีดพ่นใช้งานในภาคเกษตรกรรม -การระเหยออกจากการใช้เป็นสารปราบศัตรูพืชทางชีวภาพ
	R_3SnX, R_2SnXและ RSnX	-การฟุ้งกระจายจากการใช้งานในทางอุตาหกรรม -การพ่นสารประกอบดีบุกอินทรีย์เคลือบกระจกโดยการใช้อุณหภูมิและความดันสูงเพื่อให้เกิดฟิล์ม SnO_2
น้ำ	R_3SnX	-การใช้สีกันเพรียง -การฟุ้งกระจายมาจากการใช้งานทางภาคเกษตรกรรม -น้ำล้นผิวดินจากการเกษตรกรรม -ขบวนการทางอุตสาหกรรม -การใช้งานทางภาคเกษตรกรรม -สารรักษาสภาพเนื้อไม้
	R_3SnX และRSnX	-ชะล้างจากการใช้เป็นสารเสถียรในผลิตภัณฑ์ PVC
ดิน	R_3SnX	-การใช้งานทางภาคเกษตรกรรม -สารรักษาสภาพเนื้อไม้
	R_3SnX และ R_2SnX	-จากการทิ้งสารเหลือใช้ทางอุตสาหกรรม

การใช้สารประกอบดีบุกในด้านต่าง ๆ ทำให้ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้หลายทางทั้งทางน้ำ ดิน อากาศ ดังแสดงในภาพที่ 1

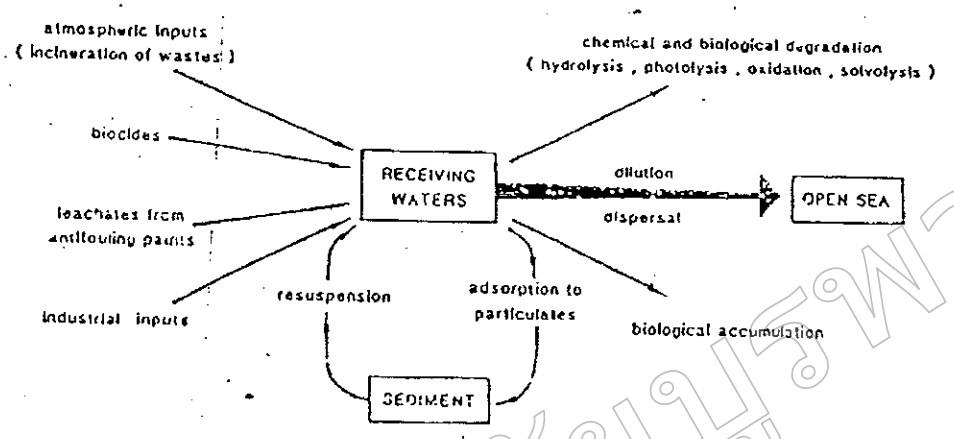
มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University



ภาพที่ 1 แหล่งที่มาและปริมาณการแพร่กระจายของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม (Laughlin & Linden, 1985)

การปนเปื้อนของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในแหล่งน้ำ

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



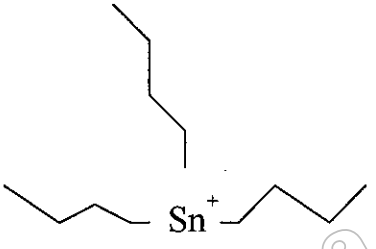
ภาพที่ 2 แหล่งที่มาและการแพร่กระจายของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในแหลงน้ำ (Stebbing, 1985)

สารประกอบไตรบิวทิลทิน (Tributyltin compound: 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, สาหร่าย หรือ Tunicate มาเกาะ และในตาข่ายที่ใช้เลี้ยงสัตว์น้ำ (Iwata, Tanabe, Miyazaki & Tatsukawa, 1994) แต่ TBT มีฤทธิ์ฆ่าสิ่งมีชีวิตได้อย่างกว้างขวางทั้ง Microalgae, Mollus, Crustaceans, ปลา และ Bentric (Evan, Dowson, Day, Frid, Gil, Pattisina & Porter, 1995) ดังนั้นจึงนำเอา TBT ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อรา (Fungicide), แบคทีเรีย (Bactericide), แมลง (Insecticide) สารที่ใช้ในการรักษาเนื้อไม้ (Wood Preservative) (Evan, Leksono & Mckinne., 1995) และสารป้องกันราเมือก (Slimicide)

TBT มีคุณสมบัติเป็น Biocide จึงได้มีการนำ TBT ไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ทั้งด้านอุตสาหกรรมและการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของสีทาเรือซึ่งได้มีการนำมาใช้ตั้งแต่ปลายทศวรรษ 1960s (Michin, Oehlmann, Duggan, Stroben & Keatinge, 1995) จนปัจจุบันมีการใช้สีทาเรือกันอย่างแพร่หลายถึง 3,000 ตันต่อปี (Fargasova &

Kizlink, 1996) การละลายของสีทาเรือเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ TBT ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในบริเวณท่าเรือและอ่าวทะเลหรือน่านน้ำที่เป็นเส้นทางเดินเรือที่สำคัญ มีกิจกรรมทางเรือมาก (Evan, Leksono & Mckinne, 1995b)



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
ไดบิวทิลทินคลอไรด์ (Dibutyltin Chloride)	$(C_4H_9)_2SnCl_2$	1.36	135 (10 มิลลิเมตรปรอท)	ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ไม่ละลายในน้ำเย็น
โมโนบิวทิลทินคลอไรด์ (Monobutyltin Chloride)	$C_4H_9SnCl_3$	1.71	102 (12 มิลลิเมตรปรอท)	ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารประกอบไตรบิวทิลทิน (TBT) ในดินตะกอน

TBT มีคุณสมบัติเป็น Hydrophobic จึงละลายน้ำได้น้อย สามารถจับกับอนุภาคหรือดินตะกอนได้ดี ดินตะกอนจึงเป็นแหล่งสะสมของ TBT ทำให้ทนทานต่อการย่อยสลาย จึงทำให้สะสมในดินตะกอนและปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตในน้ำเป็นระยะเวลานาน โดยพบว่าการปลดปล่อย TBT ออกมาจากดินตะกอนหรือ Desorption เกิดขึ้นได้ช้ากว่า Adsorption ดังนั้นทำให้ครึ่งชีวิตหรือการสะสมของ TBT ในดินตะกอนนานประมาณ 2.5 ปี ซึ่งมากกว่าค่าครึ่งชีวิตของ TBT ในน้ำที่เป็นระยะเวลาสั้น ๆ ประมาณ 1 สัปดาห์ (Kan-atirekap, Tanabe & Sanguansin, 1997) อย่างไรก็ตาม การดูดซับของ TBT ในดินตะกอนเป็นค่า K_d (Sediment/Water Distribution Coefficients) ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของดินตะกอน ปริมาณการปนเปื้อนของ TBT ในบริเวณนั้นๆ คือบริเวณท่าเรือซึ่งเป็นที่จอดเรือจำนวนมาก จะมีปริมาณของ TBT ในดินตะกอนสูง นอกจากนั้นความเค็ม pH และ Humic Substance ในน้ำทะเลยังมีผลต่อการดูดซับของสาร TBT ด้วยเช่นกัน (Langston & Pope, 1996)

สารประกอบ TBT ที่พบในดินตะกอนได้มีการสำรวจศึกษาวิจัยในหลายแห่งทั่วโลก ดังที่จะได้กล่าวคือ

ตารางที่ 3 สารประกอบ TBT ในดินตะกอนประเทศต่าง 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-atireklap et al., 1997
ฮ่องกง	500	Ko, Bradley, Neeller & Broom, 1995

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สารประกอบไตรบิวทิลทินในน้ำทะเล

การปนเปื้อนของ TBT ในน้ำทะเลมีแหล่งที่มาดังนี้ คือ (Gabrieides, Alzieu, Readman, Bacci, Abouldahab, & Salihoglu, 1990)

- จากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ TBT เป็นสารป้องกันการจับเกาะในท่อน้ำหล่อเย็น
- จากบริเวณท่าเรือที่มีการจอดและซ่อมบำรุงเรือบรรทุกสินค้า รวมทั้งที่จอดเรือสำหรับนักเล่นเรือ และเรือสำราญ
- แหล่งเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

การแพร่กระจายของ TBT ในน้ำทะเลมีความสัมพันธ์กับปริมาณของเรือที่ใช้สีทาเรือที่มีส่วนผสมของ TBT โดยมีการหมุนเวียนของน้ำได้น้อยกว่าชายฝั่งด้านมหาสมุทรแอตแลนติก น้ำทะเลชายฝั่งเมดิเตอร์เรเนียนจึงมีระดับการปนเปื้อนสูงกว่า (จุรีพร ล้อมเมตตา, 2544 อ้างถึงจาก Alzieu, Michel, Tolosa, Bacci, Mee & Readman, 1991)

TBT มีคุณสมบัติเป็น Hydrophobic โดยมีค่า Octano-water Partitioning (K_{ow}) = 5000 (de Mora, 1996) จึงละลายน้ำได้น้อย สามารถจับกับอนุภาคดินตะกอนและสะสมในสิ่งมีชีวิตได้ดีกว่าในชั้นน้ำจึงพบว่ามีความเข้มข้นของ TBT ในปริมาณที่น้อยกว่าดินตะกอนและในสิ่งมีชีวิต นอกจากนั้นปัจจัยที่ทำให้ปริมาณ TBT ที่พบในชั้นน้ำมีปริมาณน้อยเนื่องมาจากการย่อยสลายเป็น Dibutyltin (DBT) และ Monobutyltin (MBT) ตามลำดับ เกิดได้ทั้งกระบวนการทางชีวภาพคือการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์และทางกายภาพ คือ กระบวนการ Photochemical แต่ในทางกายภาพจะเกิดได้น้อยกว่า (Dowson, Bubb & Laster, 1992) นอกจากนี้ความเข้มข้นของ TBT ในชั้นน้ำก็ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น การปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคดินตะกอน (Desorption) และกระแสน้ำที่ไหลเวียน จะทำให้ความเข้มข้นของ TBT ในชั้นน้ำเจือจางลง ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะมีผลต่ออ่าวหรือชายฝั่งที่มีลักษณะปิดจะมีความเข้มข้นของ TBT มากพอที่จะทำให้เกิดผลกระทบต่อสัตว์น้ำ แต่ความเข้มข้นของ TBT จะเจือจางลงในอ่าวหรือชายฝั่งที่มีลักษณะเปิด

จากการสำรวจปริมาณ TBT ในชั้นน้ำ ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างในบริเวณท่าเทียบเรือ อู่ต่อเรือหรืออ่าวและชายฝั่งที่มีจำนวนเรือมาก ๆ มีรายงานดังแสดงในตารางที่ 4

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

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 & Ahmed Juma, 1992
อเล็กซานเดรีย อียิปต์ ตะวันออก ตะวันตก	27.8±12.0 นาโนกรัมต่อลิตร	Abd-Allah, 1995
ทะเลเมดิเตอร์เรเนียน	<2 - 3930 นาโนกรัมต่อลิตร	Gabrielides et al., 1990

ผลของสารประกอบไตรบิวทิลทินต่อสิ่งมีชีวิต

1. TBT มีผลต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ ในน้ำในระดับที่แตกต่างกัน ในสาหร่ายเซลล์เดียว เช่น *Pavona lutheri* และ *Dunaliella teriolecta* มีอัตราการเจริญเติบโตเพียงเล็กน้อยเมื่อได้รับ 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร แต่จะหยุดชะงักการเจริญเติบโตใน *Skeletonema costatum* เมื่อได้รับ TBT ในระดับเดียวกัน สำหรับสาหร่ายทั้ง 3 ชนิดจะมีการเจริญเติบโตลดลงอย่างรวดเร็วและตายภายใน 2 วันเมื่อได้รับ TBT 1 และ 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (จุรีพร ล้อมเมตตา, 2544 อ้างถึงจาก Beaumont & Newman, 1986)

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

2. TBT มีการสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อและอวัยวะของปลา โดยเฉพาะตับ พบว่ามีความเข้มข้นของ TBT สูงที่สุด รองลงมาคือ ไต และกล้ามเนื้อ ตลอดจนเนื้อเยื่อตามส่วนต่างๆ เช่น หัวใจ สมอง และเม็ดเลือดแดง (Erythrocyte) (Kannan & Falandysz, 1997; Takahashi, Lee, Saeki, Nakatani, Tanabe, Miyazaki & Fujise, 2000)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

จากการศึกษาในปลา Rainbow Trout พบว่าเมื่อ TBT เข้าร่างกายแล้วจะมีการแพร่กระจายในลักษณะของ Three-compartment โดย Compartnent แรกคือไขมันบริเวณหน้าท้อง (Peritoneal Fat) Compartnent ที่ 2 คือ ไต ตับ และถุงน้ำดี สำหรับ Compartnent ที่ 3 คือ เนื้อเยื่อในอวัยวะอื่นๆ นอกจากนี้ยังพบว่า TBT จะถูกเปลี่ยนแปลงในตับได้เมตาบอไลท์คือ DBT และ MBT ซึ่งจะถูกขับออกทางน้ำดี (Biliary-feca Excretion) (ประภัสสร ตันติพงศ์วิวัฒน์, 2538 อ้างถึงจาก Martin et al.,1989) TBT ยังมีพิษต่อระบบประสาทของปลา Rainbow Trout กล่าวคือ ปลาว่ายน้ำเร็วเป็นระยะทางยาว ว่ายไม่เป็นทิศทางแน่นอนและตอบสนองต่อสิ่งเร้าลดลง (ฐิติลาวัณย์ กลิ่นคล้ายกัน, 2539 อ้างถึงจาก Triebskom et al., 1994)

นอกจากนี้พบว่า TBT จะทำลายเยื่อหุ้มเหงือก (Gill Epithelium) เยื่อหุ้มไต (Bileduct Epithelia Cell) มีการบวมและแตกของผนังไมโตคอนเดรีย (Mitochondria) มีการขับเมือกออกมาทางผิวหนังมากขึ้นและคอร์เนีย (Cornea) ถูกทำลายในปลา Rainbow Trout (*Salmo gairdneri*) และปลานิล (*Tilapia rendalli* Boulenger) (จุรีพร ล้อมเมตตา, 2544 อ้างถึงจาก Chliamobitch & Kuhn, 1977)

3. TBT มีผลต่อสัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำ โดย Laughlin, Nordlund และ Linden (1984) ได้ทำการศึกษาในตัวอ่อนของสัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำชนิดหนึ่ง (*Garmmarus oceanius*) สัมผัสกับ TBT เวลาหนึ่งตัวเต็มวัยได้รับการสัมผัสในเวลา 1 สัปดาห์ โดยที่ 50 %จะตายในเวลา 3 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม ซึ่งจะมีอายุยืนกว่า ตัวอ่อนที่ได้รับ TBT มีจำนวนรอดน้อยกว่าตัวอ่อนในกลุ่มควบคุมเกือบครึ่ง การเจริญเติบโตของตัวอ่อนลดลงเห็นได้จากขนาดความยาวและน้ำหนักน้อยกว่าในกลุ่มควบคุม พฤติกรรมการว่ายน้ำของตัวอ่อนจะแตกต่างกัน ในกลุ่มที่สัมผัสกับ TBT ตัวอ่อนจะว่ายน้ำมากขึ้น หลังจากนั้นจะว่ายมาที่ผิวน้ำ ส่วนกลุ่มควบคุมจะอยู่นิ่งๆ และว่ายน้ำน้อยมากในเวลากลางวัน (ฐิติลาวัณย์ กลิ่นคล้ายกัน, 2539)

การเกิดพิษเฉียบพลันของสารประกอบไตรบิวทิลทิน

การเกิดพิษเฉียบพลันของ TBT ต่อสัตว์นั้นเกิดจากการที่สัตว์รับเอา TBT เข้าร่างกายแล้วเกิดการผิดปกติหรือตาย โดยขึ้นกับปริมาณของสาร ระยะเวลาในการสัมผัส ชนิดของสัตว์ และชนิดของ TBT ที่สัตว์แต่ละชนิดรับเข้าไป ดังแสดงในตารางที่ 5 (ทรงกฤษณ์ ประภักดี, 2538)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

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

สัตว์ทดลอง	สาร	ผลกระทบ	การทดลอง
Fish			
Oncorhynchus tshawytscha	TBTO	96 hr LC50= 1.5 ppb	Static renewal
Lepomis macrochirus	TBTO	96 hr LC50= 7.6 ppb (5.6 - 10 ppb)	Static
Salmo gairdneri	TBTO	96 hr LC50= 6.9 ppb (6.27 - 7.8 ppb)	Static
Ictalurus punctatus	TBTO	96 hr LC50= 12.0 ppb (7.3 - 20.0 ppb)	Static
Fundulus heteroclitus	TBTO	96 hr LC50= 24.0ppb	Static
Cyprinodon variegtus	TBTO (acetone-mehanol)	96 hr LC50= 0.96ppb total mortality at 3.2 ppb at 14 days	21 day flw-though 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 (5.6 - 10 ppb)	Static

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ตารางที่ 5 (ต่อ)

สัตว์ทดลอง	สาร	ผลกระทบ	การทดลอง
Gastropoda			
Biomphalaria and Bulinus	TBT	48 hr LC50= 10-100 ppb	Static
Biomphalaria glabrata		100% died at 10 ppb	
Crustaceans			
Crangon crangon	TBTO	Larvae96 hr LC50= 1.5 ppb	Static renewal every
		Adult 96 hr LC50= 141 ppb	24 hours
Acartia tonsa	TBTO	72 hr LC50= 2.1 ppb	Static renewal every
		96 hr LC50= 1.0 ppb	24 hours
		144 hr LC50= 0.4 ppb	
Acanthomysis sculpta	TBT as	96 hr LC50= 0.42 ppb	Static renewal every
	leachate		24 hours
Daphnia magna	TBTO	48 hr LC50= 1.67 ppb	Static
		(1.01-2.5 ppb)	

การเกิดพิษเรื้อรังของสารประกอบไตรบิวทิลทิน

TBT ในความเข้มข้นปริมาณน้อยสามารถก่อให้เกิดการผิดปกติขึ้นในสิ่งมีชีวิตได้ โดยที่สิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดมีขีดจำกัดในการทนต่อปริมาณสารพิษที่สะสมในร่างกาย เมื่อมีการรับสารพิษเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่ไม่มากเกินขีดของความทนก็จะแสดงอาการความผิดปกติออกมาในตารางที่ 6 (ทรงกฤษณ์ ประภักดี, 2538)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

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

สัตว์ทดลอง	สาร	ผลกระทบ	การทดลอง
Bivalve			
Crassostrea gigus (Spat)	TBT Methacryate Leachates	ลดการเจริญเติบโตอย่างนัยสำคัญที่ความเข้มข้น 0.24 ppb	Flow through
Mytilus edulis (Spat)	TBT Methacryate leachates	ลดการเจริญเติบโตอย่างนัยสำคัญที่ความเข้มข้น 0.24 ppb	Flow through
Venarupis decussata (Clam Spat)	TBT Methacryate leachates	ลดการเจริญเติบโตอย่างนัยสำคัญที่ความเข้มข้น 0.24 ppb	Flow through
Crustaceans			
Homarrus americaus Larvae	TBTO	ไม่มีการเจริญเติบโตที่ความเข้มข้น 0.1 ppb	Static renewal every 24 hours
Acanthomysis sculpta (Juveniles and Mature Females)	TBTO as leachate	ผลต่อการบพันธุ์ที่ความเข้มข้น 0.19 ppb ผลต่ออัตราการเจริญเติบโตที่ความเข้มข้น 0.25 ppb คาดการณ์พิษเรื้อรังที่ความ	Flow through for 63 days
Pa;aemonetea pugio	TBTO	เข้มข้น 0.14	Flow through
Rhithropanopeu harrisii	TBTO	ไม่เกิดการตอบโต้ที่ความเข้มข้น 2.3-30 ppb ผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ความเข้มข้น 10 ppb ของ TBTO และ 20 ppb ของ TBTS	Static renewal every 24 hours

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

หอยหวาน

การจัดลำดับทางอนุกรมวิธาน (Taxonomy)

หอยหวานมีชื่อสามัญว่า หอยตุ๊กแก หรือหอยเทพรส และมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Babylonai areoata* (Link, 1807) หอยหวานถูกจัดจำแนกตามหลักอนุกรมวิธาน ดังนี้

Phylum Mollusca

Class Gastropoda

Subclass Prosobranchia

Order Neogastropoda

Family Buccinidae

Genus *Babylonia*

Species *areolata*

นอกจากนี้ยังมีหอยหวานอีกสกุลหนึ่งที่มีชื่อสามัญว่า "หอยหมาก" และมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Babylonia spirata* Linn. แต่หอยหวานชนิดนี้เป็นที่นิยมบริโภคและมีความต้องการของตลาดต่ำกว่าหอยหวานในสกุล *Babylonia areolata* มาก

ลักษณะโดยทั่วไป

หอยหวาน (*Babylonia areolata*) เป็นหอยทะเลฝาเดียวมีเปลือกค่อนข้างหนา ทรงไข่ (Ovate) ผิวเรียบ เปลือกมีพื้นสีขาวและมีแต้มสี่เหลี่ยมสีน้ำตาลดำขนาดใหญ่เรียงเป็นแถวสามแถวบนวงลำตัว (Body Whorl) บริเวณปลายสุดของส่วนเปลือกจะแหลมโดยส่วนหัวจะขดเป็นเกลียว (Spire) และมีร่องที่ไม่ลึกมากนัก ฝาปิด (Operculum) เป็นรูปทรงไข่ที่สามารถปิดช่องเปิดลำตัวได้อย่างสนิทหอยหวานมีหนวด 1 คู่ และมีตา 1 คู่ (ภาพที่ 4)

ภาพที่ 4 หอยหวาน (*Babylonia areolata*) (นิลนาจ ชัยธนาวิสุทธิ์, 2545)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

การแพร่กระจาย

หอยหวาน (*Babylonia areolata*) อาศัยอยู่บริเวณพื้นทะเลที่เป็นทรายหรือทรายปนโคลน ที่ระดับความลึกประมาณ 5-20 เมตร หอยหวานแพร่กระจายอยู่ทั่วไปบริเวณชายฝั่งทะเลของอ่าวไทยและทะเลอันดามัน ได้แก่ ระยอง จันทบุรี ตราด เพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์ สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช กระบี่ ระนอง และสตูล

การสืบพันธุ์

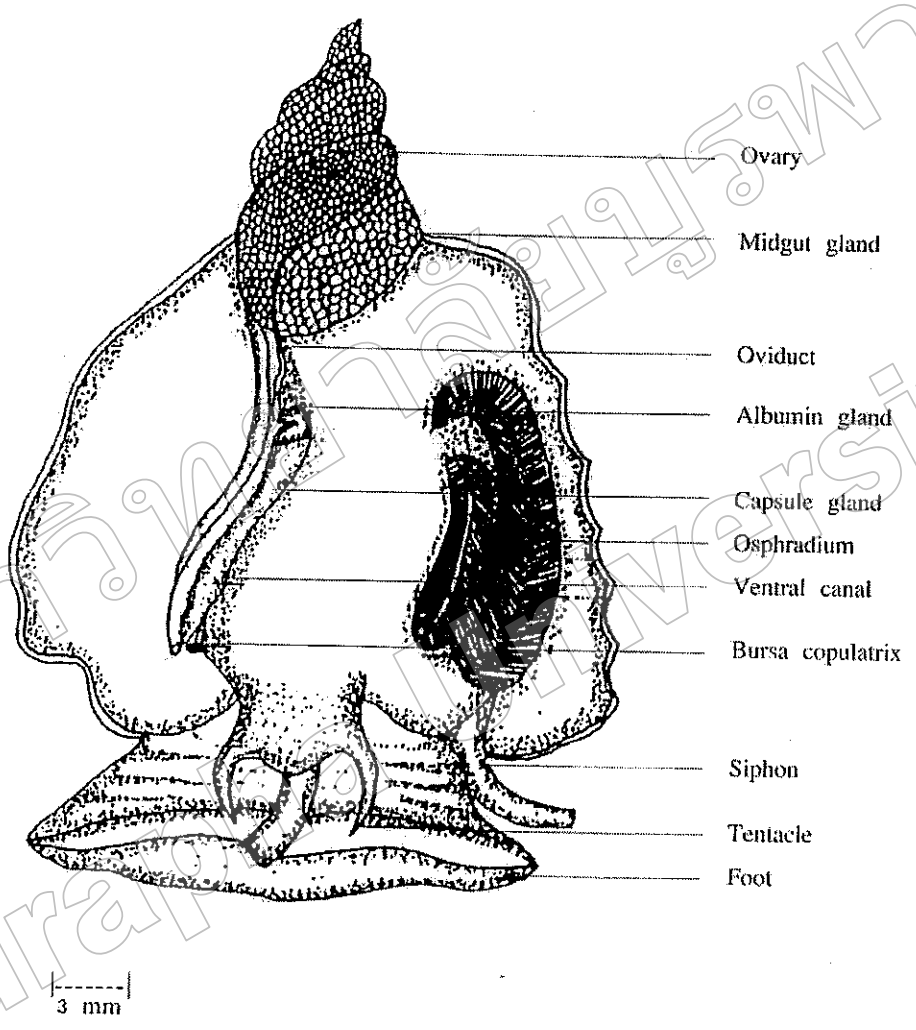
หอยหวานจัดว่าเป็นสัตว์ที่มีเพศแยกกัน (Dioecious) คือ เพศผู้และเพศเมียไม่ได้อยู่ในตัวเดียวกัน และไม่สามารถจำแนกเพศของหอยหวานได้จากลักษณะเปลือกภายนอก

การจำแนกเพศของหอยหวาน สามารถทำได้เมื่อหอยยืดตัวออกมาจากเปลือก กล่าวคือ ในเพศผู้สามารถเห็นอวัยวะสืบพันธุ์ ที่เรียกว่า Penis ซึ่งมีรูปร่างคล้ายติ่งรูปใบไม้ (Leaflet Shape) มีสีเหลืองอ่อนบริเวณโคนหนวดด้านขวาสำหรับเพศเมียจะไม่พบอวัยวะเพศใดๆ ในตำแหน่งเดียวกัน (ภาพที่ 5)

ภาพที่ 5 ลักษณะภายนอกที่ใช้แสดงลักษณะหอยเพศผู้ (นิลนาจ ชัยธนาวิสุทธิ์, 2545)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

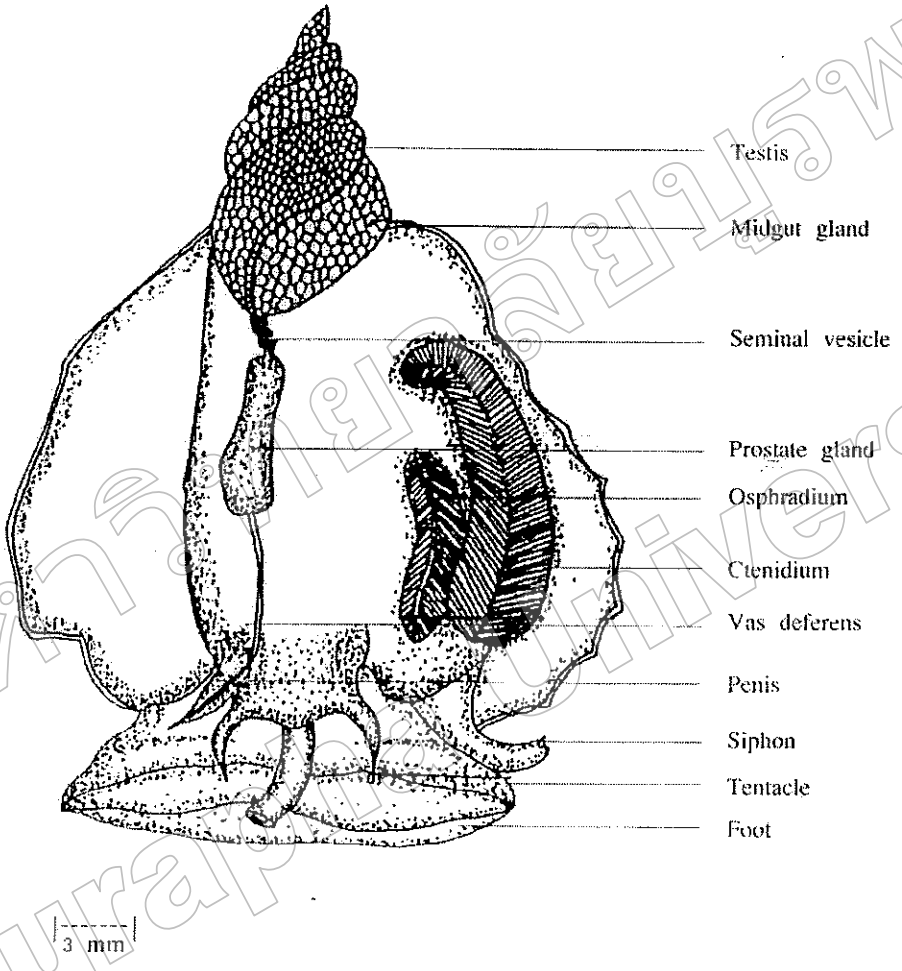
ระบบสืบพันธุ์ของเพศเมียประกอบด้วย รังไข่ (Ovary) อยู่บริเวณปลายสุดของส่วนเปลือก ต่อมสร้างไข่ขาว (Albumin Gland) และต่อมสร้างเปลือก (Capsule Gland) ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ไดอะแกรมแสดงระบบสืบพันธุ์ของหอยหวานเพศเมีย (นิลนาจ ชัยธนาวิสุทธิ์, 2545)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

สำหรับเพศผู้ประกอบด้วยอัณฑะ (Testis) อยู่บริเวณปลายสุดของเปลือกเช่นกัน ต่อมสร้างฮอร์โมนเพศ (Porstrate Gland) ท่อส่งสเปิร์ม (Sperm Duct) และช่องเปิดออกทาง Penis (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 7 ไดอะแกรมแสดงระบบสืบพันธุ์ของหอยหวานเพศผู้ (นิลนาจ ชัยธนาวิสุทธิ์, 2545)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

Imposex

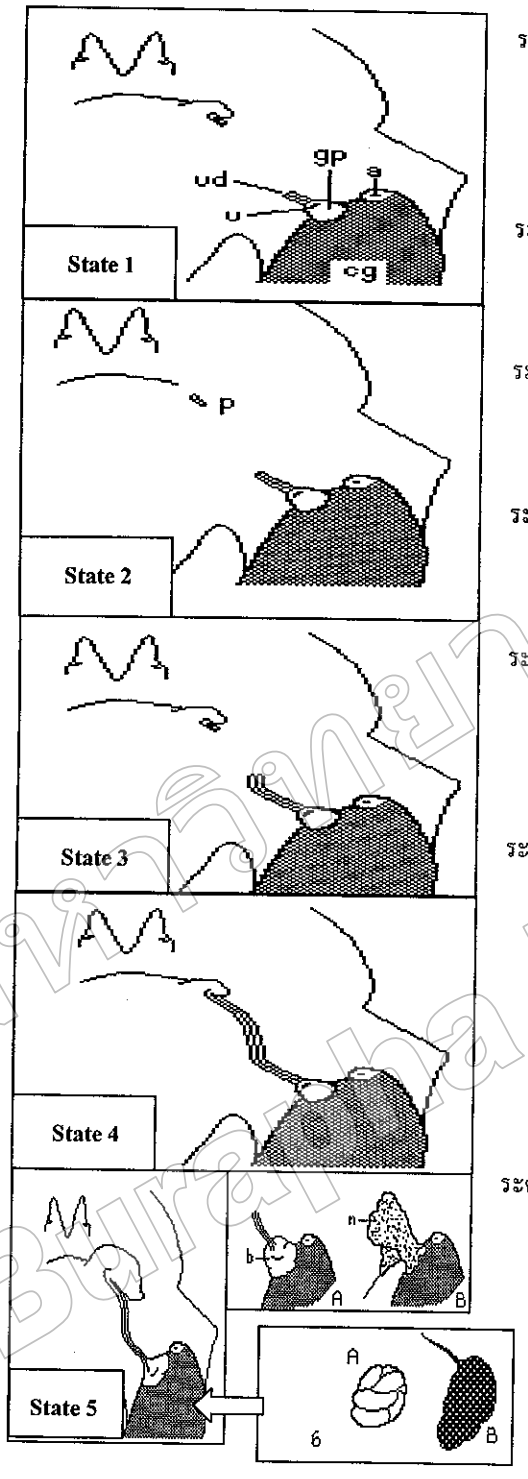
Imposex เป็นปรากฏการณ์เนื่องจากพิษเรื้อรังของ TBT เหนี่ยวนำให้หอยเพศเมียแสดงลักษณะของหอยเพศผู้ Pseudopenis และ Vas Deferens (ท่อนำสเปิร์ม) เกิดขึ้น เนื่องจาก TBT จะกระตุ้นการขับ Penial Morphogetic Factor จาก Pedal Glanglia ซึ่งอยู่ภายใต้การควบคุมของ Cerebropleura ทำให้ปล่อย Testosterone ออกมาเพิ่มขนาดของ Penis ในหอยเพศเมีย (Foale, 1993) อวัยวะที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะไปขวางท่อนำไข่ ทำให้ท่อนำไข่อุดตัน หอยเพศเมียจึงเป็นหมันเพราะไม่สามารถวางไข่ได้ เมื่อไข่มีการสะสมมากขึ้น ทำให้ท่อนำไข่แตก เป็นสาเหตุของการตายของหอย และจำนวนประชากรของหอยชนิดนั้นๆ ลดลง (Gibb & Bryan, 1996) เป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างประชากรในระบบนิเวศน์ ดังที่มีรายงานถึงการลดลงของจำนวนประชากร Dogwhelks *Nucella lapilus* ในภาคใต้ด้านตะวันตกของอังกฤษในช่วงทศวรรษ 1980 (Evans et al., 1995)

Imposex เกิดขึ้นได้ที่ความเข้มข้นของ TBT ปริมาณน้อยๆแต่ความยาวของ 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) ดังแสดงได้จากการศึกษาหอยฝาเดียว *Lepsiella vinosa* ในภาคใต้ของออสเตรเลีย

ตารางที่ 7 การเกิด Pseudopenis ใน *Lepsiella vinosa* ที่ความเข้มข้นของ TBT ต่าง ๆ กัน (Nias et al., 1993)

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

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University



ระดับที่ 0: ระดับที่เพศเมียปกติไม่มีลักษณะของหอยเพศผู้ปรากฏที่สามารถมองเห็นได้ บริเวณปากท่อนำไข่ของหอยทากเพศเมียไม่มีเนื้อเยื่อมาอุดตันหรือช่องคลอดอยู่ส่วนบนเห็นเด่นชัด

ระดับที่ 1: เริ่มมีการพัฒนาส่วนที่คล้ายกับท่อนำอสุจิห่อหุ้มเนื้อเยื่อปากช่องคลอดภายในช่องท้องถึงตุ่มอวัยวะสืบพันธุ์

ระดับที่ 2: การพัฒนาอวัยวะเพศผู้ในขั้นเริ่มต้นโดยการสร้างเป็นอวัยวะเพศผู้เล็ก ๆ บริเวณหลังหนวดข้างขวา

ระดับที่ 3: อวัยวะเพศผู้มีขนาดเล็กและเริ่มมีการพัฒนาตรงส่วนปลายของท่อนำอสุจิบริเวณฐานของอวัยวะเพศผู้

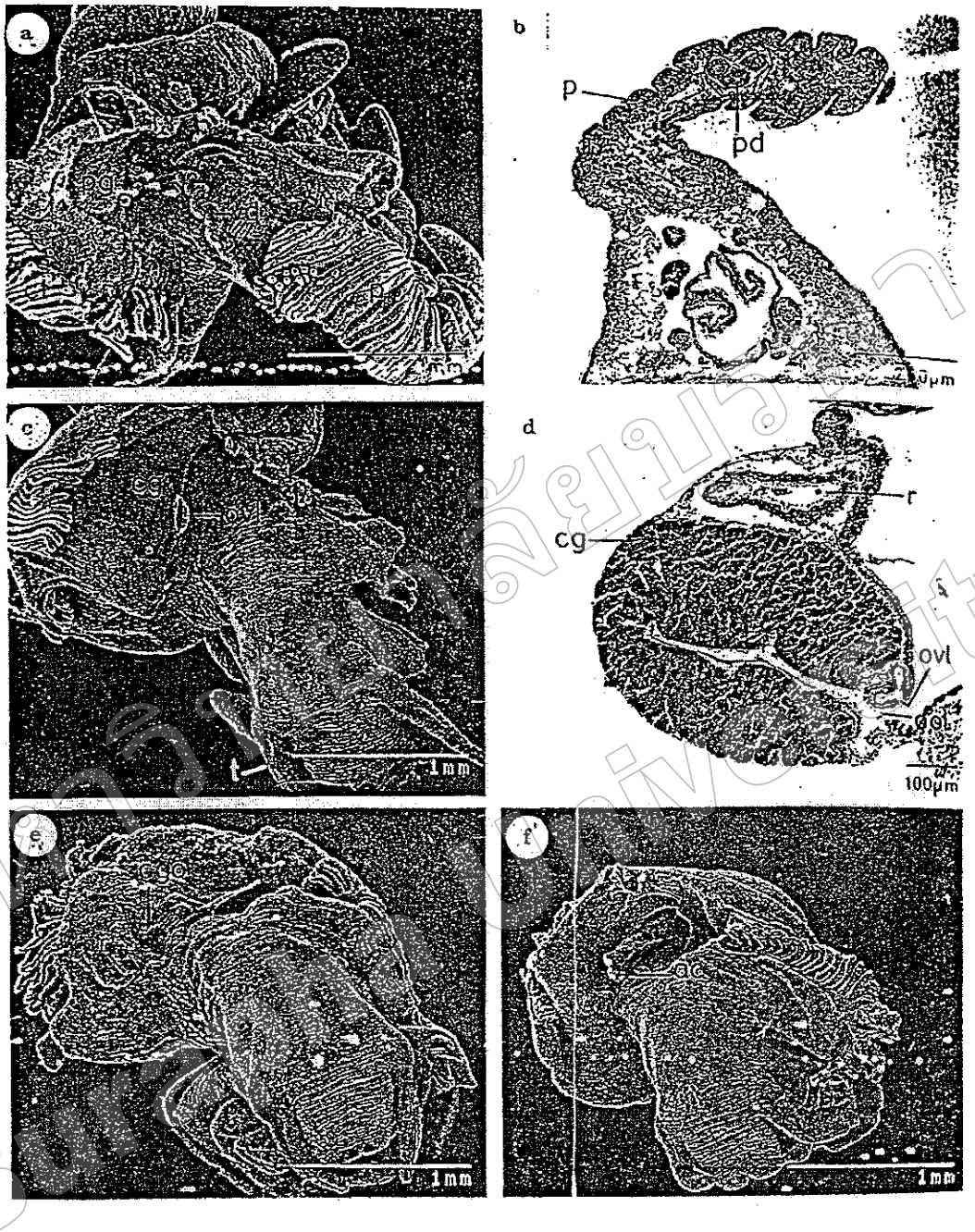
ระดับที่ 4: ส่วนปลายท่อนำอสุจิบริเวณอวัยวะสืบพันธุ์เพศเมียและอวัยวะเพศผู้มารวมกันและขนาดของอวัยวะเพศผู้มีขนาดใหญ่ใกล้เคียงกับอวัยวะเพศผู้ในหอยตัวผู้

ระดับที่ 5: ขนาดของท่อนำอสุจิขยายมากขึ้นปกคลุมอวัยวะสืบพันธุ์เพศเมียทำให้ช่องคลอดมีขนาดเล็กลงหรือไม่สามารถมองเห็นได้
A: พบตุ่มเนื้อยื่นออกมาซึ่งอาจพบอยู่รอบอวัยวะสืบพันธุ์เพศเมีย
B: ตุ่มเนื้อเล็กๆ มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ

ระดับที่ 6: ช่องภายในรังไข่ประกอบไปด้วยไข่ฝ่อ ซึ่งส่วนประกอบนี้อาจประกอบไปด้วยไข่เพียงใบเดียวหรือหลายใบซึ่งถูกอัดแน่นจนทำให้มีลักษณะที่เป็นฝ้าหรือเป็นเนื้อสีน้ำตาล

ภาพที่ 8 การเกิด Imposex 6 ลำดับขั้นของหอย *Nucella lapilus* (Gibbs, Bryan, Pascoe & Burt, 1987)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University



ภาพที่ 9 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงการเกิด Imposex ของหอย *Hydrobia ulvae* ในลำดับขั้นต่างๆ กัน (a-f) b และ d เป็นภาพตัดขวางของ Penis Primordium (Schulte-Oehlmann et al., 1997)

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

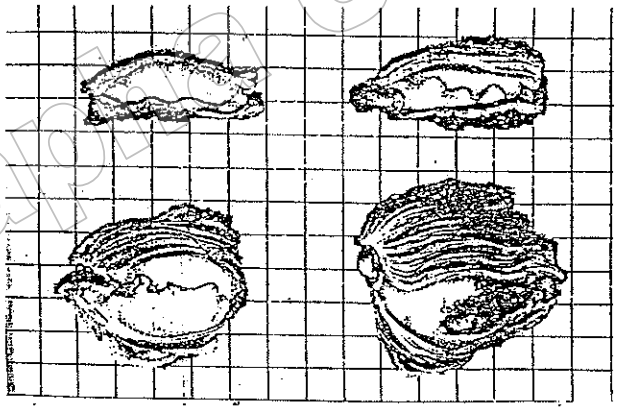
1. เปอร์เซ็นต์ของหอยเพศเมียที่เกิดผลกระทบ

2. Relative Penis Size Index (RPS) ซึ่ง Wilson et al.(1993) ได้อ้างถึงจาก Bryan et al. (1987) เป็นผู้นำดัชนีมาใช้ในการประเมินผลการเกิด Imposex เป็นคนแรก RPS มีสูตรดังนี้คือ

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

ความผิดปกติของเปลือกหอย

TBT มีพิษเรื้อรังต่อหอยอีกประการหนึ่งคือ ทำให้เปลือกหนาขึ้น จากการศึกษาครั้งแรกของ Key et al. (1976) ในหอยนางรม *Crassostrea gigas* พบว่ามีการแบ่งชั้นของเปลือกหอยเกิดขึ้นใหม่มากกว่า 10 ชั้น เปลือกหอยจึงมีรูปร่างลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจนเป็นก้อนกลมเรียกว่า Ball จนทำให้โพรงหรือช่องว่าง ที่อยู่ด้านในเล็กลง เนื้อเยื่อหอยที่อยู่ในเปือกจึงมีขนาดเล็ก มีน้ำหนักน้อย และมีมูลค่าทางเศรษฐกิจลดลง ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อการเพาะเลี้ยงหอย ซึ่งหอยนางรม *C. gigas* ที่พบว่าเปลือกมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปพบที่ฝรั่งเศษ, อังกฤษ, ออสเตรเลีย และนิวซีแลนด์ หอยชนิดอื่นที่พบว่ามีรายงานได้แก่ *C. glomerata* ที่นิวซีแลนด์ และ *Saccostrea commercialis* (Stebbing, 1985; de Mora, 1996)

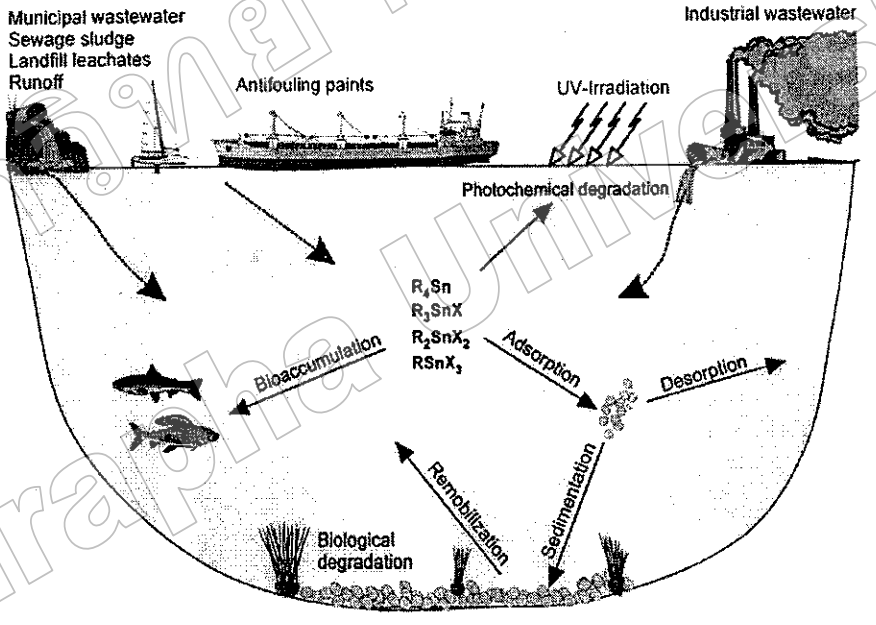


ภาพที่ 10 การเปลี่ยนรูปของเปลือกที่หนาขึ้นใน Pacific Oysters *Crassostrea gigas* ที่พบในประเทศนิวซีแลนด์ (de Mora, 1996)

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

การย่อยสลายของสารประกอบไตรบิวทิลทิน

การย่อยสลายของสารไตรบิวทิลทินเกิดขึ้นได้ทั้งทางกายภาพ (Hydrolysis, Photodegradation, Volatilization การดูดซับและการตกตะกอนในอ่าวหรือชายฝั่งที่มีลักษณะเปิด ทางเคมี (เช่น การเกิดสารเชิงซ้อน) และทางชีวภาพ (การย่อยลายโดยจุลินทรีย์และสิ่งมีชีวิต) เกิดสารตัวกลาง Dibutyl-, Monobutyl- และสุดท้ายเป็น Inorganic Tin ที่ความเป็นพิษลดลงตามลำดับ (Stewart & de Mora, 1990) ดังแสดงในภาพที่ 11 แต่การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพด้วยแสงในธรรมชาติเกิดขึ้นได้ช้ามากโดยสารไตรบิวทิลทินจะมีครึ่งชีวิตนานถึง 89 วันเนื่องจากความจำกัดของการส่องทะลุของแสงในชั้นน้ำนั้นเอง นอกจากนั้นพบว่ากระบวนการ Volatilization ในสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นการย่อยสลายทางกายภาพโดยเฉพาะการย่อยสลายด้วยแสงจึงไม่ใช่ปัจจัยหลักในการย่อยสลายสารไตรบิวทิลทินในสิ่งแวดล้อม (Stewart & de Mora, 1990)



ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงสภาพของสารไตรบิวทิลทินในสิ่งแวดล้อม (Stewart & de Mora, 1990)

กระบวนการ Adsorption และ Desorption

สารไตรบิวทิลทินที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมสามารถเคลื่อนย้ายจากชั้นน้ำ (Aqueous Phase) ไปสู่ชั้นของแข็ง (Solid Phase) ได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากมีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ เมื่อสารไตรบิวทิลทินเกิดการดูดซับกับดินตะกอนชั้นบนแล้วสารไตรบิวทิลทินจะไหลเข้าสู่น้ำที่อยู่ใน

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ช่องว่างของดินตะกอน (Pore Water) ได้เร็วเช่นกันเพราะเกิดการผสมกันกับน้ำบริเวณพื้นผิวของดินตะกอนและแพร่กระจายไปตามน้ำในช่องดินตามชั้นดินตะกอนที่อยู่ลึกลงไป บริเวณดินตะกอนชั้นบนหรือพื้นผิวหน้าของดินตะกอนจะมีปริมาณสารไตรบิวทิลทินมากกว่าในดินตะกอนชั้นลึกลงไป (Sarradin, Lapaquellerie, Astruc, Latouche & Astruc, 1995) การดูดซับของสารไตรบิวทิลทินบนดินตะกอน (Adsorption) อาศัยหลักการแลกเปลี่ยนประจุ (Cation Exchange) กับประจุลบที่บริเวณพื้นผิวของดินตะกอน ซึ่งในธรรมชาติดินตะกอนจะประกอบด้วย Clay Mineral คือ Silicate Clay ซึ่งมีประจุลบและไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอลูมินัมที่จัดเป็นคอลลอยด์อนินทรีย์ นอกจากนั้นยังสามารถจับกับคอลลอยด์อินทรีย์คือ ฮิวมัส (นัทธีรา สรรมณี, 2541; Hoch, Alonso-Azcarate & Lischick, 2003; Sun, Huang & Dai, 1996) จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงทำให้เกิดการดูดซับของสารไตรบิวทิลทินบนดินตะกอนได้อย่างรวดเร็ว

จากรายงานของมาและคณะ (Ma, Dai & H, G., 2000) ที่ศึกษาการแพร่กระจายของ Tributyltin Chloride ในห้องปฏิบัติการจำลองสภาวะแวดล้อมบริเวณปากแม่น้ำพบว่า อัตราการดูดซับสารไตรบิวทิลทินในดินตะกอนเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วภายใน 30 นาทีและมีปริมาณถึง 98 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณสารไตรบิวทิลทินทั้งหมดที่ถูกดูดซับไว้บนดินตะกอน (ความเข้มข้น 30 ไมโครกรัมต่อลิตร) และรายงานของแลนสโตนและป๊อบ (Langston & Pope, 1995) ศึกษาการตรวจวัดการดูดซับและการปลดปล่อยสารไตรบิวทิลทินในดินตะกอนปากแม่น้ำ จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าการดูดซับสารไตรบิวทิลทินเกิดขึ้นได้รวดเร็วมาก ปริมาณสารไตรบิวทิลทิน 85.7 เปอร์เซ็นต์จากความเข้มข้น 600 นาโนกรัมต่อลิตร โดยจะดูดซับกับอนุภาคแขวนลอยและดินตะกอนซึ่งจะถึงจุดสมดุลภายใน 2 ชั่วโมง นอกจากนี้จากรายงานของบีฮราและคณะ (Behra, Lecarme-Theobald, Bueno & Ehrhardt, 2003) ศึกษาการดูดซับของสารไตรบิวทิลทินบนทรายธรรมชาติพบว่าความสามารถในการดูดซับของทรายธรรมชาติมีค่าสูงเนื่องจากมีไฮดรอกไซด์และคาโอลิไนท์ (Kaolinite) บนพื้นผิวซึ่งเป็นส่วนที่เกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับสารไตรบิวทิลทิน ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของสุบัณฑิตและคณะ (2547) รวมทั้งมนทกานต์ (2548) ที่พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารไตรบิวทิลทินที่เติมสารไตรบิวทิลทินความเข้มข้น 5 และ 10 ug/L ในตู้ทดลองที่ใส่น้ำทะเลและดินตะกอนจากทะเลพบว่าสารไตรบิวทิลทินทั้ง 2 ความเข้มข้นเกิดการย่อยสลายในดินตะกอนโดยพบสารไตรบิวทิลทินในชั้นดินตะกอนตั้งแต่ 2 ชั่วโมงและ 2 วันตามลำดับหลังจากเติมสารไตรบิวทิลทินในน้ำทะเลดังแสดงในตารางที่ 2

แต่อย่างไรก็ตามการดูดซับเป็นกระบวนการที่สามารถเกิดการย้อนกลับได้ (Reversible Process) ทำให้โมเลกุลของสารที่จับอยู่กับดินตะกอนถูกปลดปล่อยออกมา โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยของสภาพแวดล้อม เช่น ความเป็นกรดด่างและความเค็ม (Hoch & Bandara, 2005; Rudel., 2003)

กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ

การย่อยสลาย สารไตรบิวทิลทิน ทางชีวภาพเป็นปัจจัยสำคัญในการลดปริมาณและความเป็นพิษในสิ่งแวดล้อม จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารไตรบิวทิลทินโดยเฉพาะแบคทีเรีย อัตราเร็วของการย่อยสลายเป็น First-order Kinetics และขึ้นกับสภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ออกซิเจน ความเป็นกรดด่าง ปริมาณของแร่ธาตุและความเข้มข้นของสารไตรบิวทิลทินที่จะไม่ยับยั้งหรือทำให้แบคทีเรียตาย เช่น ที่อุณหภูมิต่ำๆ จะไม่เกิดการย่อยสลาย เนื่องจากอุณหภูมิต่ำยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ ยกตัวอย่าง Proposed Pathway (Sheldon, 1975) ของการย่อยสลายของ Triorganotin คือ

R_3SnX -----> $(R_3Sn)_2O$ -----> $(R_3Sn)_2CO_3$

|

| UV or Microorganisms **ขั้นตอนที่ 1**

v

$(R_2SnO)_n$

|

| UV or Microorganisms **ขั้นตอนที่ 2**

v

$(RSnO^-)_n$

|

| UV or Microorganisms **ขั้นตอนที่ 3**

v

SnO_2

สารตัวกลางที่เกิดขึ้นคืออนุพันธ์ของ Hydroxylate ซึ่งเป็นสารที่เกิดขึ้นในที่มีแสงสว่างแต่ไม่เสถียร สลายตัวเร็ว การย่อยสลายนี้เกิดจากกระบวนการ Debutylization จะกำจัดพันธะคาร์บอน-ดีบุกออกไปเกิดเป็นอนุพันธ์ของ Dibutyl ที่ถูกย่อยสลายต่อไปในอัตราที่รวดเร็วกว่าการเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนที่ 1 ให้เปลี่ยนเป็น Monobutyl ซึ่งมีความเป็นพิษน้อยลงตามลำดับคือ สารไตรบิวทิลทิน > ไดบิวทิลทิน > โมโนบิวทิลทิน

สารตัวกลางที่เกิดขึ้นคืออนุพันธ์ของ Hydroxylate ซึ่งเป็นสารที่เกิดขึ้นในที่มีแสงสว่างแต่ที่ไม่เสถียร สลายตัวเร็ว กระบวนการ Debutylization โดยกำจัดพันธะคาร์บอน-ดีบุกออกไปเกิด

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

เป็นอนุพันธ์ของ Dibutyl ที่ถูกย่อยสลายต่อไปได้เร็วกว่า Tributyl และ Monobutyl ซึ่งเป็นอนุพันธ์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลาย Dibutyl และมีพิษน้อยลงตามลำดับ

มีรายงานว่าจุลินทรีย์หลายชนิดสามารถย่อยสลาย TBT ได้คือ

- Microalgae เช่น Diatom, Phytoplanton, Dinoflageate และสาหร่ายสีเขียว (Lee, Valkirs & Seligman, 1989)

- *Pseudomonas* เป็นแบคทีเรียที่พบในดินตะกอนปากแม่น้ำ

- Wood-degradation Fungi เช่น *Coniophora puteana* และ *Chaetomium globosum* (Dobson, 1990)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไบรอันและคณะ (Bryan, Gibbs, Hummerstone & Burt, 1986) ศึกษาพบการเกิด Imposex ในหอยทาก (*Nucella lapius*) บริเวณพื้นที่ที่อยู่ใกล้ท่าเรือ หรือบริเวณที่มีกิจกรรมทางเรือ ซึ่งจากรายงานเป็นที่น่าสนใจของนักวิทยาศาสตร์และนักสิ่งแวดล้อม ในการศึกษาผลกระทบของสารประกอบบิวทิลทินและพิษของสารต่อหอยทะเลและสัตว์อื่น ๆ กันมากขึ้น

อัลซิอุสและคณะ (Alzieu, Sanjuan, Michel, Borel & Dreno, 1989) ได้ทำการศึกษาติดตามเฝ้าระวังและประเมินผลกระทบของปริมาณสารบิวทิลทินบริเวณชายฝั่งแอตแลนติกของประเทศฝรั่งเศษในปี ค.ศ. 1986-1987 พบว่าในบริเวณท่าเรือและบริเวณพื้นที่ที่ทำการเพาะเลี้ยงหอยนางรมมีปริมาณ TBT ตั้งแต่น้อยกว่า 1-194 ng/l และ MBT ตั้งแต่น้อยกว่า 1-200 ng/l และในบริเวณอ่าว Area Chon ก็พบปริมาณ TBT ทั้งในน้ำทะเลและในหอยนางรมเช่นกัน

ลิเลียนลูและอูเจียนซู (Li-Lian Liu & Iu-Jiuan Suen, 1996) ได้ทำการศึกษาการเกิด Imposex ใน *Thais clavigera* โดยทำการทดลองด้วยสาร Bis(tributyltin)-oxide 2nd และ Triphenyltin Acetate เป็นเวลา 90 วัน พบว่าเกิด Imposex ใน Bis(tributyltin)-oxide 60 ng Sn/l (TBT060) และ Triphenyltin Acetate 20 ng Sn/l (TPhT 20) โดย TBT060 มีอัตราการเจริญของ Penis ในหอยเพศเมีย (RPS) เป็น 19.3% เมื่อเปรียบเทียบกันชุดควบคุมในระยะเวลา 90 วัน และ TPhT 20 มีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญถึง 14.2% จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถบอกได้ว่า Tributyltin และ Triphenyltin สามารถทำให้เกิด Imposex ใน *Thais clavigera* ได้

สวีเนนและคณะ (Swennen, Ruttanadakl, Ardseungnern, Singh, Mensink & Ten Hallers-Tjabbes, 1997) ทำการสำรวจขอบเขตและการเกิด Imposex ในหอยฝาเดียวบริเวณชายฝั่งที่มีความสัมพันธ์ต่อการคมนาคมทางเรือในอ่าวไทยและช่องแคบมะละกา พบว่าหอยฝาเดียวเพศเมียหลายสกุลเกิด Imposex ถึง 100% ในหลายสถานีที่เก็บตัวอย่าง ซึ่งหอยเพศเมียจะมี Penis หลาย

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University

ขนาดและมีท่อนำสเปิร์ม สาเหตุการเกิด Imposex ในหอยนั้นเกิดจากสาร TBT ที่พบในสีทาเรือ ซึ่งการเกิด Imposex มีความสัมพันธ์กับเส้นทางที่เป็นเส้นทางเดินเรือหลักแต่ไม่มีความสัมพันธ์กับความลึกของน้ำหรืออาหารของหอยฝาเดียว และพบว่า TBT แพร่ไปในบริเวณกว้างจากพื้นที่หลักและมีอิทธิพลต่อสัตว์น้ำ นอกจากนี้หอยฝาเดียวที่ได้จากการเพาะเลี้ยงและที่ขายในตลาดยังพบว่ามี Imposex

กาญ อติเรกลาภและคณะ (Kan-atiraklap et al., 1997) ได้ทำการศึกษาตั้งแต่ปี 1994-1995 พบว่ามีการปนเปื้อนสารประกอบบิวทิลทินและออแกโนคลอรีนในหอยแมลงภู่ (*Perna viridis*) จากชายฝั่งทะเลไทย พบสารประกอบ TBT, DBT, MBT ในหอย 2 ฝา ปริมาณ 4-800 ng/g (wet weight) ซึ่งมีปริมาณ TBT > DBT > MBT และพบปริมาณออแกโนคลอรีนในหอยแมลงภู่ แต่มีปริมาณน้อยกว่าสารประกอบบิวทิลทิน

แทนและคณะ (Tan et al., 1997) ได้รายงานพบการเกิด Imposex ในหอยถึง 3 Species ในประเทศสิงคโปร์ คือ *Thais bitubercularis*, *T. clavigera* และ *T. jubilea* สาเหตุของการเกิด Imposex เกิดจากได้รับสารประกอบบิวทิลทินเข้าไปจำนวนหนึ่งเป็นเวลานานทำให้เกิดความผิดปกติมี Pseudopenis ในหอยเพศเมีย

บีช สแตน และจาคอบเซน (Bech, Strand & Jacobsen, 2002) ได้รายงานว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณสารประกอบบิวทิลทินทำให้เกิด Imposex ในหอยฝาเดียวที่เกาะภูเก็ต ประเทศไทย บริเวณที่ทำการติดตามผลคือ บริเวณท่าเรือ ซึ่งจากการติดตามเฝ้าระวังตั้งแต่ปี ค.ศ. 1996-1998 ได้ทำการเก็บตัวอย่างมาศึกษาทั้งหมด 21 สถานี พบการเกิด Imposex 10 สถานีที่เก็บตัวอย่างซึ่งห่างจากท่าเรือ 3.5 กม. แต่ในปี ค.ศ.1998 พบการเกิด Imposex เพิ่มขึ้นเป็น 18 สถานี ซึ่งเป็นบริเวณที่ห่างจากท่าเรือ 7.5 กม. หอยที่ใช้เป็น Indicator คือ *Thais bitubercularis* และ *Morua misira*

ซานโตสและคณะ (Santos, Ten Hallers-Tjabbes, Santos & Vieira, 2002) ได้ทำการสำรวจการเกิด Imposex ใน *Nucela lapillus* ที่ชายฝั่งโปรตุเกตในปี 2000 หลังจากที่ทำการสำรวจครั้งแรกเมื่อ 5 ปีที่แล้ว พบว่าความเข้มข้นของ TBT เพิ่มขึ้นส่งผลในมีอัตราการเกิด Imposex เพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราการเพิ่มของ Imposex ที่บริเวณอ่าวเพิ่มขึ้นน้อยกว่าบริเวณที่มีการคมนาคมทางเรือ

บีช (Bech, 2002) ได้ทำการสำรวจการเกิด Imposex ในหอยฝาเดียวจากชายฝั่งตะวันตกของประเทศไทย พบว่า *Thais distinguenda* เกิด Imposex เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จากปี 1996-2000 ที่ 21 สถานีในอ่าวพังงา การเพิ่มขึ้นของ Imposex จากบริเวณ 3.5 กิโลเมตรจากฝั่งในปี 1996 เป็น 10 กิโลเมตรจากฝั่งในปี 1999-2000 และพบว่า *Morula musiva*, *Morula granulata*, *Morula margariticola* และ *Thais rufutincta* เกิด Imposex น้อย คือพบเพียง 3 สถานีหลักในพื้นที่ที่มี

กิจกรรมทางเรือ และใช้ *Thais distinguenda* และ *Thias distinguenda* เป็นตัวบ่งชี้ของ TBT เนื่องจากมีความไวต่อสารและพบได้ทั่วไป

อีวาและพาทริเชีย (Eva & Patricia, 2002) ศึกษาพบว่า TBT และ Organotin ตัวอื่นที่ปริมาณน้อยกว่า 2 ng/l เป็นสาเหตุชักนำให้เกิด Imposex ได้ โดยอาจเกิดจากหลายกลไกด้วยกัน อย่างแรก เกิดจากการที่ TBT เป็นสาร Neurotoxic และเกิดการสะสมในปมประสาทของหอย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ Peptide Hormone ซึ่งเป็น Hormone ควบคุมการเปลี่ยนแปลงเพศในหอยฝาเดียว และพบว่า PMF neuropeptide APG Wamide ชักนำให้เกิด Imposex อย่างมีนัยสำคัญใน *Ilyanassa obsoleta* ที่ 0.1 โมล โดยทำการฉีดเข้าไปที่ Sub-cutaneous เป็นเวลามากกว่า 2 สัปดาห์ และสามารถเป็น Penis Morphogenic Factor ในหอยสกุลนี้ กลไกการเกิด Imposex ที่ 2 คือ TBT ยับยั้ง Aromatase Activity นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของระดับ Testosterone และระดับ Estradiol ลดลง ในการศึกษาด้วย Snail Digestive Gland Microsome แสดงให้เห็นว่า ระดับของ TBT ที่ไม่ทำให้หอยแสดง Imposex แต่ทำให้มีการลดลงของ Aromatase Activity ถึง 52% ถึงแม้จะยังไม่มีข้อมูลของ Vertebrate Sex Steriods ในหอยฝาเดียว แต่เป็นไปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของ Peptide ร่วมกับ Steroid Hormone อาจนำไปสู่การชักนำการเกิด Imposex ใน TBT ปริมาณต่ำได้

มหาวิทยาลัยบูรพา Burapha University