บทที่ 5
สรุปและอภิปรายผล

สรุปผลการทดลอง

1. คุณภาพทั้ง 7 พารามิเตอร์ มีค่าเฉลี่ย คือ ค่าออกซิเจนละลายน้ำ 5.13 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-ด่าง 7.44 อุณหภูมิ 29.59 องศาเซลเซียส ความเค็ม 34.02 ส่วนในพันส่วน แอมโมเนีย 0.97 มิลลิกรัมต่อลิตร ไนไทรต์ 0.0091 มิลลิกรัมต่อลิตร ไนเทรต 4.58 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. เมื่อเติมสาร TBT ปริมาณ 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ลงในตู้ทดลองพบว่าในน้ำทะเลมีปริมาณสาร TBT ลดลงอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 0.08 วัน คือมี TBT ปริมาณ 0.39 และ 1.95 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในตู้ทดลองที่มีการเติมสาร TBT ปริมาณ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร พบว่ามีปริมาณสาร TBT หลงเหลืออยู่ในน้ำทะเลสูงกว่าตู้ทดลองที่มีการเติมสาร TBT ปริมาณ 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ในระยะเวลาทดลอง 77 วัน อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) และสาร TBT มีการสะสมอยู่ในดินตะกอนทั้งชั้นบนและชั้นล่างตั้งแต่ 0.08 วันเช่นกัน โดยที่ตู้ทดลองที่เติมสาร TBT ปริมาณ 5 ไมโครกรัมต่อลิตร มีการสะสมของสาร TBT ในดินตะกอนชั้นบนน้อยกว่าดินตะกอนชั้นล่างซึ่งแตกต่างจากตู้ทดลองที่เติมสาร TBT ปริมาณ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่มีการสะสมของสาร TBT ในดินตะกอนชั้นบนมากกว่าดินตะกอนชั้นล่าง แต่อย่างไรก็ตามในวันที่ 2 ของการทดลองเป็นต้นไป พบว่าการสะสมของสาร TBT ในดินตะกอนชั้นล่างมีแนวโน้มสูงกว่าดินตะกอนชั้นบนทั้งในตู้ทดลองที่เติมสาร TBT ทั้ง 2 ระดับความเข้มข้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

3. ในตู้ทดลองที่มีการเติมสาร DBT ปริมาณ 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร พบว่าในน้ำทะเลมีปริมาณสาร DBT ลดลงอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 0.08 วัน เช่นเดียวกับสาร TBT คือมีสาร DBT ปริมาณ 0.17 และ 0.92 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในตู้ทดลองที่มีการเติมสาร DBT ปริมาณ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร พบว่ามีปริมาณสาร DBT ในน้ำทะเลสูงกว่าตู้ทดลองที่มีการเติมสาร DBT ปริมาณ 5 ไมโครกรัมต่อลิตร แต่มีปริมาณลดลงจนตรวจไม่พบทั้ง 2 ความเข้มข้น ตั้งแต่วันที่ 22 จนสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 77 และสาร DBT มีการสะสมอยู่ในดินตะกอนทั้งชั้นบนและชั้นล่างตั้งแต่ 0.08 วันเช่นเดียวกับ TBT โดยที่ตู้ทดลองที่เติมสาร DBT ปริมาณ 5 ไมโครกรัมต่อลิตร มีการสะสมของสาร DBT ในดินตะกอนชั้นบนมากกว่าดินตะกอนชั้นล่างแต่ในวันที่ 2 เป็นต้นไปปริมาณสาร DBT ในดินตะกอนชั้นล่างเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมี

แนวโน้มเหมือนกับตู้ทดลองที่เติมสาร DBT ปริมาณ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่การสะสมของสาร DBT ในดินตะกอนชั้นล่างมีแนวโน้มสูงกว่าดินตะกอนชั้นบน ตลอดการทดลอง 77 วัน แต่อย่างไรก็ตามพบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

4. ในตู้ทดลองที่มีการเติมสาร MBT ปริมาณ 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร พบว่าในน้ำทะเลมีปริมาณสาร MBT ลดลงอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 0.08 วัน เช่นเดียวกับสาร TBT และ DBT คือมีสาร MBT ปริมาณ 2.59 และ 0.99 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในตู้ทดลองที่มีการเติมสาร MBT ปริมาณ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร พบว่ามีปริมาณสาร MBT ในน้ำทะเลน้อยกว่าตู้ทดลองที่มีการเติมสาร MBT ปริมาณ 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ในระยะเวลา 0.08 วัน แต่ยังคงตรวจพบอยู่จนสิ้นสุดการทดลอง 77 วัน ในขณะที่ตู้ทดลองที่มีการเติมสาร MBT ปริมาณ 5 ไมโครกรัมต่อลิตร มีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็วจนตรวจไม่พบในวันที่ 22 ของการทดลองเป็นต้นไป และสาร MBT มีการสะสมอยู่ในดินตะกอนทั้งชั้นบนและชั้นล่างตั้งแต่ 0.08 วันเช่นเดียวกับ TBT และ DBT โดยที่ตู้ทดลองที่เติมสาร MBT ปริมาณ 5 ไมโครกรัมต่อลิตร มีการสะสมของสาร MBT ในดินตะกอนชั้นบนมากกว่าดินตะกอนชั้นล่างแต่ในวันที่ 2 เป็นต้นไปปริมาณสาร MBT ในดินตะกอนชั้นล่างเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกับตู้ทดลองที่เติมสาร MBT ปริมาณ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่การสะสมของสาร MBT ในดินตะกอนชั้นล่างมีแนวโน้มสูงกว่าดินตะกอนชั้นบน ตลอดการทดลอง 77 วัน แต่อย่างไรก็ตามพบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

5. สาร TBT DBT และ MBT ปริมาณ 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร มีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 0.08 วัน ทั้ง 3 สาร กล่าวคือเมื่อเติมสารลงไปในตู้ทดลองซึ่งมีน้ำทะเลและดินตะกอนอยู่พบว่ามีสารหลงเหลืออยู่ในน้ำทะเลน้อยมาก ซึ่งสารที่มีความเข้มข้นสูงกว่าคือ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ยังสามารถตรวจพบได้ในวันสุดท้ายของการทดลอง 77 วัน และสารทั้ง 3 ชนิดจะสะสมในดินตะกอนมากกว่าในน้ำทะเลอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยพบว่ามีการสะสมตั้งแต่ 0.08 วัน ซึ่งสารทั้ง TBT DBT และ MBT ทั้ง 2 ความเข้มข้นมีแนวโน้มการสะสมในดินตะกอนชั้นล่างสูงกว่าชั้นบนซึ่งพบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

6. ปริมาณสาร TBT DBT และ MBT ปริมาณ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่เติมลงในชุดควบคุม Bioball ในระยะเวลา 0.08 วัน มีปริมาณสารในน้ำทะเลอยู่ในช่วง 3.0-4.0 ไมโครกรัมต่อลิตร และค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง ยกเว้นสาร MBT มีปริมาณลดลงในวันที่ 2 ของการทดลองและมีค่าคงที่จนสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งปริมาณสารที่เหลืออยู่ในน้ำทะเลในชุดควบคุม Bioball มีปริมาณมากกว่าในชุดทดลองที่ไม่มี Bioball

7. ในชุดควบคุมที่ไม่มี Bioball และเติมสาร TBT ปริมาณ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ในช่วงแรกของการทดลอง ยังคงมีปริมาณสาร TBT ในน้ำทะเลและในดินตะกอนชั้นบน และมีปริมาณสาร TBT ในดินตะกอนชั้นบนมากกว่าในดินตะกอนชั้นล่าง ในวันต่อ ๆ มาปริมาณสาร TBT ในน้ำทะเลและดินตะกอนชั้นบนลดลง แต่ในดินตะกอนชั้นล่างมีปริมาณสาร TBT เพิ่มขึ้นและคงที่ตลอดการทดลอง

8. จุลินทรีย์ผสมจากดินตะกอนในตู้ทดลองที่มีการเติมสาร TBT DBT และ MBT เมื่อนำมาทดสอบการเจริญในสาร TBT DBT และ MBT พบว่าสามารถเจริญได้ที่ระดับความเข้มข้นของสาร TBT DBT และ MBT ปริมาณ 2.5 ไมโครกรัมต่อลิตร และสามารถแยกเชื้อบริสุทธิ์จากจุลินทรีย์ผสมได้ 3 สายพันธุ์ คือ *Neisseria* sp. *Azotobacter* sp. และ *Bacillus* sp.

อภิปรายผล

คุณภาพน้ำทะเล

คุณภาพน้ำทะเลทั้ง 7 พารามิเตอร์ คือ ค่าออกซิเจนละลายน้ำ ความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ความเค็ม แอมโมเนีย ไนไทรต์ และไนเทรต ในแต่ละตู้ทดลองที่เติมสาร TBT DBT และ MBT ปริมาณ 5 หรือ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร มีค่าโดยเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของมาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่ง ดังแสดงในตารางที่ 40 ถึงแม้ว่าบางพารามิเตอร์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นของการทดลองในครั้งนี้ แต่มีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน โดยรวมแล้วคุณภาพน้ำของทุกตู้ทดลองอยู่ในเกณฑ์ที่ดี การเติมสาร TBT DBT และ MBT ปริมาณ 5 หรือ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร จึงไม่มีผลต่อคุณภาพน้ำทะเล

ตารางที่ 40 มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง (กองจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ, 2538)

พารามิเตอร์	หน่วย	เกณฑ์กำหนดสูงสุด	คุณภาพน้ำในการทดลอง
ออกซิเจนละลาย	มิลลิกรัมต่อลิตร	4	5.13
ความเป็นกรด-ด่าง		7.0-8.5	7.44
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	33	29.59
ความเค็ม	ส่วนในพันส่วน	29-35	34.02
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน	มิลลิกรัมต่อลิตร	0.4	0.97
ไนไทรต์	มิลลิกรัมต่อลิตร	-	0.0091
ไนเทรต-ไนโตรเจน	มิลลิกรัมต่อลิตร	ธ	4.58

หมายเหตุ ธ เป็นไปตามธรรมชาติ

การเปลี่ยนแปลงสภาพในน้ำทะเล

การเปลี่ยนแปลงสภาพในน้ำทะเลของสาร TBT DBT และ MBT มีความแตกต่างกันระหว่างสารที่มีความเข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อลิตร และ 5 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยในตู้ทดลองที่ใส่สารปริมาณสูงกว่ามีปริมาณสารเหลืออยู่มากกว่าและนานกว่าในตู้ทดลองที่ใส่สารปริมาณต่ำกว่า อย่างไรก็ตามในการทดลองครั้งนี้สารมีปริมาณลดลงในน้ำทะเลที่รวดเร็วในระยะเวลา 0.08 วัน พบว่ามีปริมาณสารหลงเหลืออยู่โดยเฉลี่ย 1-2 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรายงานของ Hattori, Kobayashi, Nonaka, Sugimae and Nakamoto (1988) ที่พบว่าครึ่งชีวิตของ TBT และ DBT ความเข้มข้นเริ่มต้น 5-7 ไมโครกรัมต่อลิตรในน้ำจืดประมาณ 11 และ 5 วัน ตามลำดับ และในน้ำเค็มประมาณ 13 และ 9 วัน ตามลำดับ รายงานของ Lee, Valkirs and Seligman (1989) ที่พบว่า TBT ความเข้มข้น 0.5-1.6 ไมโครกรัมต่อลิตรในน้ำบริเวณปากแม่น้ำมีครึ่งชีวิตตั้งแต่ 3-13 วัน

เหตุผลที่สารมีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็วในการทดลองครั้งนี้อาจจะเกิดจากการที่สารมีการเปลี่ยนแปลงสภาพโดยสามารถเกิดการดูดซับกับดินตะกอนและมีการย่อยสลายได้ในน้ำทะเล โดยที่ตรวจพบสารตัวกลางที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายได้อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เนื่องมาจากความเข้มข้นของ TBT ที่เติมลงไปในตู้ทดลองปริมาณ 5 หรือ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร อยู่ในปริมาณที่ต่ำและน่าจะที่ไม่เป็นพิษต่อแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลาย TBT ได้ สอดคล้องกับรายงานของ Kawai, Kurokawa, Harino and Fukushima (1998) ที่พบว่า TBT ความเข้มข้น 4

และ 8 ไมโครกรัมต่อลิตร TBT มีการย่อยสลายเร็วมากถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ภายในระยะเวลา 3 วัน และ TBT ความเข้มข้นมากกว่า 20 ไมโครกรัมต่อลิตร จะยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลาย TBT ได้ และในน้ำเค็ม TBT จะมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียหรือจุลินทรีย์ลดลง เพราะโซเดียมอิออนและคลอไรด์อิออน จะมีผลต่อส่วนประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ในการส่งผ่านหรือการละลายของสารเข้าไปในเซลล์ ซึ่งโซเดียมอิออนอาจเกิดการแข่งขันกับ TBT ในการจับกับเยื่อหุ้มเซลล์ เนื่องจากทั้งคู่ต่างก็เป็นแคทอิออนเช่นเดียวกัน ทำให้ TBT ผ่านเข้าไปในเซลล์ของแบคทีเรียได้น้อยลง แบคทีเรียในน้ำเค็มจึงสามารถทนต่อความเป็นพิษของ TBT ได้ (Gadd, 2000)

ในตู้ทดลองที่มีการเติม DBT หรือ MBT ปริมาณ 5 หรือ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร พบว่าในน้ำทะเลสารมีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับตู้ทดลองที่เติมสาร TBT เนื่องจากทั้ง DBT เป็นสารตัวกลางที่เกิดจากการย่อยสลาย TBT และ MBT เป็นสารตัวกลางที่เกิดจากการย่อยสลาย DBT ซึ่งมีความเป็นพิษน้อยลงตามลำดับ (Dobson, 1990) จึงไม่เป็นพิษต่อแบคทีเรียและเกิดการย่อยสลายในน้ำทะเลที่รวดเร็วเช่นเดียวกับ TBT

การเปลี่ยนแปลงสภาพและการสะสมสาร TBT ในดินตะกอนชั้นบน

สาร TBT ทั้ง 2 ความเข้มข้นคือ 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร มีการสะสมในดินตะกอนชั้นบนตั้งแต่ 0.08 วัน โดยที่ตู้ทดลองที่เติมสาร TBT ความเข้มข้นสูงกว่าคือ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร มีการสะสมของสาร TBT มากกว่าในตู้ทดลองที่เติมสาร TBT ความเข้มข้นต่ำกว่าคือ 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 77 ปริมาณการสะสมของสาร TBT ในดินตะกอนชั้นบนในตู้ทดลองที่เติมสาร TBT ความเข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ยังคงมีปริมาณการสะสม 0.15 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ในขณะที่ตู้ทดลองที่เติมสาร TBT ความเข้มข้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ตรวจไม่พบปริมาณสาร TBT อาจจะเนื่องมาจากมีการสะสมอยู่ในดินตะกอนชั้นล่างโดยการแพร่กระจายไปตามน้ำในช่องดิน (Pore Water) (Ma, Dai & Huang, 2000) และเกิดการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วในสภาวะมีออกซิเจน (Watanabe, Sakai & Takatsuki, 1995; Rudel, 2003) จึงทำให้มีปริมาณสารหลงเหลืออยู่ในดินตะกอนชั้นบนน้อย

การเปลี่ยนแปลงสภาพและการสะสมสาร DBT ในดินตะกอนชั้นบน

สาร DBT ทั้ง 2 ความเข้มข้นคือ 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร มีการสะสมในดินตะกอนชั้นบนตั้งแต่ 0.08 วันเช่นเดียวกับสาร TBT โดยที่ในวันที่ 77 ตู้ทดลองที่เติมสาร DBT ความเข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อลิตร มีปริมาณสารลดลงไปคงเหลือ 0.63 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) จนใกล้เคียงกับตู้ทดลองที่เติมสาร DBT ความเข้มข้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งมีปริมาณคงเหลือ 0.66 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) เนื่องจาก DBT มีความสามารถละลายน้ำ

ได้ดีกว่า TBT (Hoch, Alonso-Azcarate & Lischick, 2003) และมีความเป็นพิษน้อยกว่า TBT นอกจากนี้สารที่มีโครงสร้างเป็นอะลิฟาติกดังเช่น TBT และ DBT จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ง่ายกว่าสารที่มีโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติกที่คงทนต่อการย่อยสลาย (Atlas & Bartha, 1993) สาร DBT มีจำนวนพันธะคีบุก-คาร์บอนเพียง 2 พันธะซึ่งน้อยกว่าสาร TBT ที่มี 3 พันธะ ดังนั้นจุลินทรีย์จึงสามารถย่อยสลาย DBT ได้จนทำให้ปริมาณการสะสมของสาร DBT ในดินตะกอนชั้นบนของทั้ง 2 ความเข้มข้นมีปริมาณใกล้เคียงกัน

การเปลี่ยนแปลงสภาพและการสะสมสาร MBT ในดินตะกอนชั้นบน

สาร MBT ทั้ง 2 ความเข้มข้นคือ 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร มีการสะสมในดินตะกอนชั้นบนตั้งแต่ 0.08 วันเช่นเดียวกับสาร TBT และ DBT โดยที่ตู้ทดลองที่เติมสาร MBT ความเข้มข้นสูงกว่าคือ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร มีการสะสมของสาร MBT มากกว่าในตู้ทดลองที่เติมสาร MBT ความเข้มข้นต่ำกว่าคือ 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ในช่วงแรกของการทดลองจนถึงวันที่ 10 แต่หลังจากนั้นถูกย่อยสลายไปจนมีปริมาณลดลงคงเหลือ 0.27 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ในขณะที่ตู้ทดลองที่เติมสาร MBT ความเข้มข้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ตรวจไม่พบสารในวันที่ 77 ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลองในตู้ทดลองที่เติมสาร TBT และ DBT ที่เกิดการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วในดินตะกอนชั้นบนซึ่งเป็นสภาวะที่มีออกซิเจน (Watanabe, Sakai & Takatsuki, 1995; Rudel, 2003)

จากการทดลองพบว่าสาร TBT DBT และ MBT ความเข้มข้น 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร มีการสะสมหรือเกิดการดูดซับในดินตะกอนชั้นบนอย่างรวดเร็วตั้งแต่ 0.08 วันหรือ 2 ชั่วโมงแรกหลังจากเติมสาร โดยที่ในช่วงแรกมีการสะสมอยู่ในดินตะกอนชั้นบนก่อน สอดคล้องกับรายงานของ Sarradin, Lapaquellerie, Astruc, Latouche and Astruc (1995) ที่พบว่าบริเวณดินตะกอนชั้นบนหรือพื้นผิวหน้าของดินตะกอนจะมีปริมาณ TBT มากกว่าในดินตะกอนชั้นลึกลงไป ซึ่งจากการทดลองพบว่าสาร TBT DBT และ MBT มีการสะสมในดินตะกอนตั้งแต่ 0.08 วันหรือ 2 ชั่วโมงแรกหลังจากมีการเติมสารทั้ง 3 ชนิดลงไป เนื่องมาจากคุณสมบัติที่สามารถจับกับดินตะกอนได้ดี หรือการดูดซับบนดินตะกอน (Adsorption) โดยอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนประจุ (Cation Exchange) กับประจุลบที่บริเวณพื้นผิวของดินตะกอน ซึ่งในธรรมชาติประกอบด้วย Clay Mineral คือ Silicate Clay ซึ่งมีประจุลบและไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอลูมินัม ที่จัดเป็นคอลลอยด์อนินทรีย์ นอกจากนี้คอลลอยด์อินทรีย์คือ ฮิวมัส หรือ Humic Substance มีความสามารถจับกับสารมลพิษที่เป็นแคทไอออนได้เช่นกัน (นัทธีรา สรรมณี, 2541; Hoch, Alonso-Azcarate & Lischick, 2003; Sun, Huang & Dai, 1996) ทำให้เกิดการดูดซับของสารบนดินตะกอนได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจากการทดลองครั้งนี้พบว่าสารทั้ง 3 ชนิดสามารถดูดซับกับดินตะกอนได้เป็นปริมาณ

60-70 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับรายงานของ Ma, Dai and Huang (2000) ที่ศึกษาการแพร่กระจายของ Tributyltin Chloride ในห้องปฏิบัติการจำลองสภาวะแวดล้อมบริเวณปากแม่น้ำ พบว่าอัตราการดูดซับสาร TBT ในดินตะกอนเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วภายใน 30 นาที และมีปริมาณถึง 98 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณสาร TBT ทั้งหมดที่ถูกดูดซับไว้บนดินตะกอน (ความเข้มข้น 30 ไมโครกรัมต่อลิตร) และรายงานของ แลงสตันและโปป (Langston & Pope, 1995) ศึกษาการตรวจวัดการดูดซับและการปลดปล่อยสาร TBT ในดินตะกอนปากแม่น้ำ จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าการดูดซับสาร TBT เกิดขึ้นได้รวดเร็วมาก ปริมาณ TBT 85.7 เปอร์เซ็นต์ จากความเข้มข้น 600 นาโนกรัมต่อลิตร จะดูดซับกับอนุภาคแขวนลอยและดินตะกอน ซึ่งจะถึงจุดสมดุลภายใน 2 ชั่วโมง นอกจากนี้จากรายงานของ Behra, Lecarme-Theobald, Bueno and Ehrhardt (2003) ศึกษาการดูดซับของ TBT บนทรายธรรมชาติ พบว่าความสามารถในการดูดซับของทรายธรรมชาติมีค่าสูง เนื่องจากมีไฮดรอกไซด์และคาโอลิไนท์ (Kaolinite) บนพื้นผิวซึ่งเป็นส่วนที่เกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับ TBT จากปัจจัยต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาจึงส่งเสริมให้ TBT เกิดการดูดซับบนดินตะกอนได้อย่างรวดเร็ว

การเปลี่ยนแปลงสภาพและการสะสมสาร TBT ในดินตะกอนชั้นล่าง

สาร TBT ที่เติมลงในตู้ทดลองทั้ง 2 ความเข้มข้นคือ 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ต่างก็มีการสะสมในดินตะกอนชั้นล่างตั้งแต่ 0.08 วันเช่นเดียวกับการสะสมของสาร TBT ในดินตะกอนชั้นบน เนื่องจากสาร TBT สามารถไหลเข้าสู่น้ำที่อยู่ในช่องว่างของดินตะกอน (Pore Water) ได้รวดเร็วจึงเกิดการแพร่กระจายลงสู่ดินตะกอนชั้นล่างได้ (Ma, Dai & Huang, 2000) โดยที่ในวันที่ 77 สาร TBT ความเข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อลิตรมีปริมาณการสะสมในระดับ 1.04 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งมีปริมาณมากกว่าสาร TBT ความเข้มข้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่มีปริมาณคงเหลือ 0.77 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง)

การเปลี่ยนแปลงสภาพและการสะสมสาร DBT ในดินตะกอนชั้นล่าง

สาร DBT ที่เติมลงในตู้ทดลองทั้ง 2 ความเข้มข้นคือ 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ต่างก็มีการสะสมในดินตะกอนชั้นล่างตั้งแต่ 0.08 วันเช่นเดียวกับการสะสมของสาร TBT และ DBT ในดินตะกอนชั้นบนและชั้นล่าง โดยที่สาร DBT ความเข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมของสาร DBT ใกล้เคียงกับสาร DBT ความเข้มข้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร มีปริมาณ 1.98 และ 1.70 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ ในวันที่ 77 ซึ่งสิ้นสุดการทดลอง

การเปลี่ยนแปลงสภาพและการสะสมสาร MBT ในดินตะกอนชั้นล่าง

สาร MBT ที่เติมลงในตู้ทดลองทั้ง 2 ความเข้มข้นคือ 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ต่างก็มีการสะสมในดินตะกอนชั้นล่างตั้งแต่ 0.08 วันเช่นเดียวกับการสะสมของสาร TBT และ DBTในดินตะกอนชั้นบนและชั้นล่าง โดยที่ในวันที่ 77 สาร MBT ความเข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อลิตรมีปริมาณการสะสมของสาร MBT ในระดับ 0.81 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ในขณะที่สาร MBT ความเข้มข้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสม 0.40 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง)

จากผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงสภาพและการสะสมของสารทั้ง 3 ชนิดในดินตะกอนชั้นล่าง ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันนั้นดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เนื่องจาก TBT สามารถเคลื่อนย้ายจากชั้นน้ำ (Aqueous Phase) ไปสู่ชั้นของแข็ง (Solid Phase) ได้อย่างรวดเร็ว เมื่อสารเกิดการดูดซับกับดินตะกอนชั้นบนแล้ว สาร TBT จะไหลเข้าสู่น้ำที่อยู่ในช่องว่างของดินตะกอน (Pore Water) ได้เร็วเช่นกันเพราะเกิดการผสมกันกับน้ำบริเวณพื้นผิวของดินตะกอน และแพร่กระจายไปตามน้ำในช่องดินตามชั้นดินตะกอนที่อยู่ลึกลงไป จึงเกิดการดูดซับได้อย่างรวดเร็วและมีการแพร่กระจายลงสู่ดินตะกอนชั้นล่างได้ตั้งแต่ 0.08 วัน นอกจากนี้กิจกรรมของจุลินทรีย์ยังเป็นปัจจัยที่ส่งเสริมให้เกิดการแพร่กระจายของสารในดินตะกอนชั้นล่างได้ ดังรายงานของ Ma, Dai and Huang (2000) ที่ศึกษาเปรียบเทียบการแพร่กระจายของ TBT ในระดับชั้นดินตะกอนต่าง ๆ คือ 0-1, 1-2, 2-4 ซม. ระหว่างดินตะกอนที่ฆ่าเชื้อแล้วกับดินตะกอนที่ไม่ได้ฆ่าเชื้อ พบว่าดินตะกอนที่ฆ่าเชื้อในระดับ 0-1 ซม. มีปริมาณ TBT สูงที่สุดและมีปริมาณลดลงในดินตะกอนระดับลึกลงไปตามลำดับ ในขณะที่ดินตะกอนที่ไม่ได้ฆ่าเชื้อในระดับที่ลึกลงไปคือ 1-2 และ 2-4 ซม. มีปริมาณ TBT เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินตะกอนชั้นบน (0-1 ซม.) แสดงว่าจุลินทรีย์สามารถทำให้เกิดการแพร่กระจายของ TBT ในดินตะกอนระดับชั้นต่าง ๆ จึงสามารถพบสาร TBT DBT และ MBT อยู่ในชั้นของดินตะกอนที่ลึกลงไปได้ แต่อย่างไรก็ตามสาร TBT DBT และ MBT ในดินตะกอนชั้นบนจะถูกย่อยสลายได้เร็วกว่าเพราะเป็นสภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic Condition) (Watanabe, Sakai & Takatsuki, 1995; Rudel, 2003) ส่วนในดินตะกอนชั้นล่างเป็นสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (Anaerobic Condition) จึงเกิดการย่อยสลายได้ช้า ทำให้สาร TBT DBT และ MBT มีความคงทนอยู่ในดินตะกอนชั้นล่าง ดังนั้นจึงพบปริมาณสาร TBT DBT และ MBT ในดินตะกอนชั้นล่างมากกว่าและคงทนกว่าในดินตะกอนชั้นบน

Fate ของสาร TBT DBT และ MBT ในน้ำทะเลและดินตะกอน

จากผลการทดลองพบว่าสาร TBT DBT และ MBT มีปริมาณหลงเหลืออยู่ในน้ำทะเลน้อยมาก แต่มีการสะสมอยู่ในดินตะกอนทั้งชั้นบนและชั้นล่างมากกว่าในน้ำทะเล เนื่องจาก TBT

มีคุณสมบัติเป็น Hydrophobic และมีค่า Octanol-Water Partitioning (Kow) ประมาณ 1000-5000 หรืออาจสูงถึง 55000 (dc Mora, 1996; Ma, Dai & Huang, 2000; Sarradin, Lapaquellerie, Astruc, Latouche & Astruc, 1995) TBT จึงมีความสามารถจับกับดินตะกอนได้สูง รวมทั้งอินทรียวัตถุและอนุภาคแขวนลอยได้ดี (Ma, Dai & Huang, 2000; Langston & Pope, 1995) สาร TBT จึงสามารถดูดซับกับดินตะกอนชั้นบนได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้การแพร่กระจายไปตามน้ำในช่องดินและกิจกรรมของจุลินทรีย์ ยังเป็นปัจจัยส่งเสริมให้สารทั้ง 3 ชนิด TBT DBT และ MBT เกิดการสะสมในดินตะกอนชั้นล่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังนั้นจึงพบการแพร่กระจายของ TBT DBT และ MBT ได้ทั้งในดินตะกอนชั้นบนและชั้นล่าง โดยที่มีการสะสมอยู่ในดินตะกอนชั้นล่างได้เป็นระยะเวลานานกว่าดินตะกอนชั้นบน ในระยะเวลาทดลอง 77 วัน ซึ่งสามารถเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนของสารที่คงเหลืออยู่ในน้ำทะเล ดินตะกอนชั้นบนและชั้นล่างได้ดังแสดงในตารางที่ 41

ตารางที่ 41 แสดงอัตราส่วนของ TBT DBT และ MBT ในน้ำทะเล ดินตะกอนชั้นบนและชั้นล่าง

วันที่	แหล่งสะสม	อัตราส่วน (เปอร์เซ็นต์)		
		TBT	DBT	MBT
77	น้ำทะเล	0.0	0.0	0.0
	ดินตะกอนชั้นบน	0.0	6.3	0.0
	ดินตะกอนชั้นล่าง	15.4	19.8	8.0

ความเป็นกรด-ด่างเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งของการดูดซับและการปลดปล่อยสาร (Desorption) เช่นกัน ที่ความเป็นกรด-ด่างมีค่าเท่ากับ 6 การดูดซับจะมีค่ามากที่สุด และมีการปลดปล่อยมากที่สุดที่ความเป็นกรด-ด่างมีค่าเท่ากับ 8 เมื่อความเป็นกรด-ด่างมีค่าน้อยกว่า 7 จะเกิดประจุของ DBT^{2+} มากกว่า TBT^{+} การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีกับอิออนที่มีจำนวนประจุมากกว่า DBT จึงเกิดการดูดซับได้ดีกว่า TBT นอกจากนี้ความเป็นกรด-ด่างที่ลดลงทำให้ประจุบวกของ MBT เพิ่มมากขึ้นและสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับ Kaolinite ได้ดี (Hoch & Bandara, 2005) เมื่อความเป็นกรด-ด่างมีค่ามากกว่า 7 การดูดซับจะเกิดขึ้นกับจำนวนหมู่อินทรีย์ที่จับกับอะตอมของดีบุก ดังนั้น TBT จึงถูกดูดซับได้ดีกว่า DBT (Hoch, Alonso-Azcarate & Lischick, 2003) ในการทดลองนี้มีความเป็นกรด-ด่างของน้ำทะเลมีค่าอยู่ในช่วง 6.69-8.15 และมีค่าเฉลี่ย 7.44 ซึ่งในช่วงความเป็นกรด-ด่าง 7-8 ค่า K_d คือ Sediment-Water Partition Coefficients มีค่า

40,000-110,000 (Lanngston & Pope, 1995) จะเห็นได้ว่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วงที่ส่งเสริมให้เกิดการดูดซับของสารต่าง ๆ ที่เติมลงไปในตู้ทดลองได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามการดูดซับเป็นกระบวนการที่สามารถเกิดการย้อนกลับได้ (Reversible Process) ทำให้โมเลกุลของสารที่จับอยู่กับดินตะกอนถูกปลดปล่อยออกมา โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยของสภาพแวดล้อม เช่น ความเป็นกรด-ด่าง และความเค็ม (Hoch & Bandara, 2005; Rudel, 2003) ดังนั้นในบางช่วงของการทดลองครั้งนี้ ความเป็นกรด-ด่างหรือความเค็มอาจเป็นปัจจัยที่เอื้ออำนวยให้เกิดการปลดปล่อยสารออกมาจากดินตะกอนทำให้ปริมาณสารในน้ำทะเลสูงขึ้นได้

นอกจากในดินตะกอนจะเกิดปฏิกิริยาที่สำคัญคือการดูดซับที่สามารถลดปริมาณ TBT ในแหล่งน้ำได้แล้ว ในดินตะกอนยังสามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในการลดความเป็นพิษของ TBT โดยการกำจัดหมู่อินทรีย์ออกไปทีละหมู่ (Debutylation) ได้สารตัวกลาง DBT และ MBT ซึ่งมีพิษลดลงตามลำดับ (Dobson, 1990) และการเกิด Biosorption โดยสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Cyanobacteria) และสาหร่ายเซลล์เดียว (Microalgae) (Avery, Codd & Gadd, 1993) สาร TBT สามารถสะสมและผ่านเข้าไปในเซลล์ของจุลินทรีย์ได้ เพราะสามารถละลายในไขมันซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของผนังเซลล์ได้สูง (Gadd, 2000) และจุลินทรีย์จะใช้ TBT เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานเกิดการย่อยสลายเป็น DBT MBT และ Inorganic Tin (Ma, Dai & Huang, 2000) จึงสามารถพบสารตัวกลางได้ตามดินตะกอนทั้งชั้นบนและชั้นล่าง

ปริมาณของสาร TBT DBT และ MBT ในชุดควบคุมที่มีและไม่มี Bioball

ในชุดควบคุม Bioball พบว่าในน้ำทะเลมีปริมาณ TBT DBT และ MBT ลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการย่อยสลายหรือการเกิด Biosorption โดยจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่บนผิวของ Bioball จึงทำให้ปริมาณสารลดลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตู้ทดลองที่มีดินตะกอนพบว่าในชุดควบคุม Bioball มีปริมาณสารตั้งต้นเหลืออยู่มากกว่า เนื่องจากไม่มีการดูดซับกับดินตะกอน ซึ่งมีอัตราเร็วกว่าการย่อยสลายทางชีวภาพ ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองของชุดควบคุมที่มีดินตะกอนแต่ไม่มี Bioball ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งการดูดซับและการย่อยสลายทางชีวภาพ ปริมาณ TBT จึงหายไปจากชั้นน้ำได้อย่างรวดเร็ว และเกิดการสะสมของสารที่ดินตะกอนชั้นล่างมากขึ้นตามระยะเวลาที่ผ่านไป สอดคล้องกับปริมาณของ TBT DBT และ MBT ในชุดการทดลองที่พบว่ามีการสะสมของสารอยู่ในดินตะกอนชั้นล่างมากเช่นกัน

การเจริญของจุลินทรีย์และการจำแนกสกุล

จุลินทรีย์ผสมจากดินตะกอนสามารถเจริญได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีสาร TBT DBT และ MBT ปริมาณ 2.5 ไมโครกรัมต่อลิตรได้ ซึ่งเป็นปริมาณที่ต่ำกว่าปริมาณของสารที่ใส่ในตู้ทดลอง

เนื่องจากจุลินทรีย์ในอาหารเลี้ยงเชื้อจะสัมผัสกับสารได้โดยตรงและมีสภาพแวดล้อมที่แตกต่างจากในตู้ทดลองหรือในธรรมชาติค่อนข้างมาก จุลินทรีย์จึงสามารถทนต่อสารได้ในปริมาณที่ต่ำกว่าในตู้ทดลอง นอกจากนี้เป็นวิธีการ Enrichment Culture ซึ่งจุลินทรีย์ในสิ่งแวดล้อมมีจำนวนมากมายและหลากชนิดปะปนกัน การที่จะเพิ่มจำนวนชนิดใดชนิดหนึ่งจึงต้องมีการใส่สารอาหารที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ที่ต้องการเร่งการเจริญเติบโต และนำไปสู่การแยกเชื้อที่ต้องการให้เป็นเชื้อเดี่ยวหรือเชื้อบริสุทธิ์ได้ (Alexander, 1994)

เมื่อนำจุลินทรีย์ผสมมาแยกเชื้อบริสุทธิ์พบว่าสามารถจำแนกได้ 3 สายพันธุ์ คือ *Neisseria* sp. *Azotobacter* sp. และ *Bacillus* sp. ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่ยังไม่มีรายงานการจำแนกจากแหล่งที่มีการปนเปื้อนของสาร TBT หรือเป็นความสามารถในการย่อยสลายสาร TBT ซึ่งจุลินทรีย์ที่มีบทบาทในการย่อยสลายสาร TBT ดังที่มีรายงาน เช่น แบคทีเรีย *Pseudomonas aeruginosa*, *Alcaligenes faecalis* (Barug, 1981) *P. diminta* (Kawai, Kurokawa, Harino & Fukushima, 1998) สาหร่ายสีเขียว *Chlorella* sp. *C. vulgaris* (Tsang, Lau, Tam & Wong, 1999) *C. miniata* *C. sorokiniana Senedesmus dimorphus* และ *S. platydiscus* (Tam, Chong & Wong, 2002) ราเมือก *Aureobasidium pollulans* สาหร่ายทะเล *Pavlova lutheri* (Gadd, 2000)

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อสาร TBT DBT และ MBT ปนเปื้อนลงสู่ทะเล จะมีการสะสมอยู่ในดินตะกอนซึ่งเป็นแหล่งที่เกิดปฏิกิริยาสำคัญ เช่น การดูดซับ (Adsorption) การตกตะกอน (Precipitation) การเกิดสารเชิงซ้อน (Complexation) การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) และการรับสารเข้าสู่สิ่งมีชีวิต (Uptake) (Ma, Dai & Huang, 2000) การสะสมของสารในดินตะกอนจึงเป็นจุดเริ่มต้นของการสะสมต่อสิ่งมีชีวิตที่มีผลต่อห่วงโซ่อาหาร เช่น สิ่งมีชีวิตพวก Grazing, Filter-Feeding และ Deposit Feeding เช่น หอยกาบ *Scrobicularia plana* (Langston & Pope, 1995) การสะสมของสารและสารตัวกลางในดินตะกอนเป็นเวลานาน แม้ในปริมาณที่น้อย แสดงว่าสารมีความคงทนในดินตะกอน เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง นอกจากนั้นยังทำให้เกิดความเสี่ยงต่อสิ่งมีชีวิตที่ดำรงชีวิตอยู่หน้าดินเพราะอาจจะมีการปลดปล่อยสาร TBT และสารตัวกลางออกมาจากดินตะกอนได้ทำให้น้ำทะเลมีปริมาณสารพิษดังกล่าวสูงขึ้น สามารถสะสมอยู่ในสาหร่ายและแพลงก์ตอน ซึ่งเป็นผู้ผลิตขั้นต้น (Primary Production) ของห่วงโซ่อาหาร ปริมาณสาร TBT DBT และ MBT ที่ยังคงหลงเหลือและสะสมอยู่ในดินตะกอนจากการทดลองนี้เป็นปริมาณที่อยู่ในระดับที่มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต เช่น การเกิด Imposex ในหอย เนื่องจากการศึกษาของ Bryn and Gibbs (1991) ปริมาณสาร TBT เพียงเล็กน้อยสามารถทำให้เกิด Imposex มีความผิดปกติในหอยและตัวอ่อนตายได้ ที่ปริมาณ TBT <0.5 นาโนกรัมต่อลิตร ก็มีความสามารถทำให้เกิดผลกระทบดังกล่าว และยังมีปริมาณที่เกินกว่าค่ามาตรฐานที่ US EPA

และอาเซียนกำหนดให้มีค่าในน้ำทะเลคือให้มีปริมาณ TBT ไม่เกิน 10 นาโนกรัมต่อลิตร ในที่สุดแล้วก็จะมีผลกระทบต่อมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม ดังเช่นที่พบในรายงานของ Nielsen and Strand (2002) ซึ่งพบ DBT และ MBT ในตับมนุษย์ 9.0 และ 1.6 นาโนกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เปรียบเทียบกับค่า TDI (Tolerable Daily Intake) ของ TBT ในหนูมีค่า 0.25 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ถึงแม้ว่าจะยังมีค่าต่ำ แต่เป็นสิ่งที่ควรเฝ้าระวังต่อความเสี่ยงของมนุษย์ นอกจากสาร TBT จะเกิดผลกระทบกับสิ่งแวดล้อมทางทะเลแล้ว ในแหล่งน้ำจืดก็เป็นที่ซึ่งพึงระวังด้วยเช่นกัน เพราะพฤติกรรมและการแพร่กระจายและการเปลี่ยนแปลงของ TBT เกี่ยวเนื่องกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ปัจจัยทางเคมี-กายภาพ รวมทั้งความเค็มด้วย เมื่อความเค็มลดลง การละลายน้ำของ TBT จะมากขึ้น ในน้ำจืดสารจะมีการละลายได้ดีกว่าในน้ำทะเล จึงมีการแพร่กระจายได้ดีกว่า (Inaba, Shiraishi & Soma, 1995) การปนเปื้อนของ TBT จึงเป็นพิษวิทยาต่อสิ่งแวดล้อมทั้งให้แหล่งน้ำจืดและทะเล การเฝ้าระวังและติดตามผลกระทบอย่างต่อเนื่องเป็นสิ่งที่จำเป็น เพื่อตระหนักถึงพิษภัยของสารเคมีต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ เป็นการผลักดันให้มีการควบคุมการใช้สาร TBT ในประเทศไทยต่อไปในอนาคต ก่อนที่สิ่งแวดล้อมจะถูกทำลายและท้ายที่สุดมนุษย์ก็จะเป็นผู้ได้รับผลจากการกระทำนั้นโดยตรง

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบชนิดของดินตะกอนบริเวณชายหาด ท่าเรือน้ำตื้นและท่าเรือน้ำลึก ว่ามีส่วนประกอบและคุณสมบัติแตกต่างกันอย่างไรที่มีผลต่อสารสะสมของสาร TBT

2. ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบการปนเปื้อนของสาร TBT ในดินตะกอนบริเวณชายหาด ท่าเรือน้ำตื้นและท่าเรือน้ำลึก เพื่อให้ทราบว่ามีการแพร่กระจายแตกต่างกันอย่างไร

3. ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบการแพร่กระจายของสารในน้ำจืดและน้ำทะเล

4. ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารของจุลินทรีย์สายพันธุ์ต่าง ๆ

5. ควรมีการศึกษาถึงการนำจุลินทรีย์ไปใช้ได้ในสถานการณ์จริง โดยเฉพาะการบำบัดน้ำทะเลบริเวณที่เป็นแหล่งเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ