รายงานการวิจัย

การปนเปื้อนของสารออร์แกโนทินชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา

Contamination of Organotin on Songkhla Old-Town Coast

ธิวาริ โอภิธากร
ธันวดี สุขสาโรจน์
บรรจง วิทยวีรศักดิ์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากทุนงบประมาณแผ่นดิน (วช.)
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

ชื่องานวิจัย การปนเปื้อนของสารออร์แกโนทินชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา
ผู้วิจัย ธิวาริ โอภิธากร ธันวดี สุขสาโรจน์ บรรจง วิทยวีรศักดิ์
คณะ วิทยาลัยนวัตกรรมและการจัดการ
ปี 2560

บทคัดย่อ

การศึกษาปริมาณสารออร์แกโนทินในตะกอนดินและน้ำทะเลตามแนวชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา ทำการเก็บตัวอย่างน้ำและตะกอนจากจุดสำรวจ 5 จุด ในเดือนเมษายน 2559 ได้แก่ ท่าแพขนานยนต์สงขลา ท่าเรือตรงข้ามสหกรณ์ออมทรัพย์ตำรวจสงขลา ท่าเรือแหล่งพระราม ท่าเรือโรงสีแดง หับโห้หิ้น และท่าเรือข้างโรงแรมเลคอินน์ เตรียมน้ำตัวอย่างด้วย Liquid – liquid extraction และเตรียมตะกอนดินตัวอย่างด้วย Methanol-acid digestion ทำการวิเคราะห์ปริมาณสารออร์แกโนทินด้วย GC-MS ผลการวิเคราะห์ไม่พบการปนเปื้อนสารออร์แกโนทินในน้ำทะเลในทุกตัวอย่าง และผลการวิเคราะห์ด้วย ICP-OES ไม่ปรากฏค่า Sn ในน้ำทะเลทุกตัวอย่าง ปริมาณออร์แกโนทินในตะกอนดินไม่เกินค่าที่ยอมรับให้มีได้ในตะกอน องค์ประกอบของออร์แกโนทินในตะกอนดินเป็นไตรบิวทิลทินมากที่สุด (37-56%) และไดบิวทิลทินน้อยที่สุด (14-33%) การประเมินสภาพแวดล้อมตามปัจจัยทางกายภาพ-เคมีของน้ำทะเลในทะเลสาบสงขลาพบว่าค่าความเป็นกรดด่างเฉลี่ยของน้ำทะเลและอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำทะเลมีค่าสูงในเดือนเมษายนถึงสิงหาคม สารออร์แกโนทินจะมีการละลายน้ำได้ดีกว่าช่วงเดือนอื่นๆ โดยผลการตกจมและการแขวนลอยใหม่ด้วยไตรบิวทิลทินคลอไรด์และวิเคราะห์ด้วยสมการสมดุลมวลสารและแบบจำลองแผนภาพ พบว่าไตรบิวทิลทินมีการตกจมพร้อมการดูดติดตะกอนอย่างรวดเร็วเมื่อมีการละลายในน้ำ ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลระบบหลังจากเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง และมีการแขวนลอยใหม่ของไตรบิวทิลทินในอัตราที่ต่ำมาก ดังนั้นการปนเปื้อนของสารออร์แกโนทินตามแนวชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา จึงมีการชะละลายจากแหล่งกำเนิดในบริเวณที่สำรวจมาเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้ว และสารออร์แกโนทินมีการลดความเป็นพิษของไตรบิวทิลทินเป็นโมโนบิวทิลทิน นอกจากนี้สารออร์แกโนตินที่สะสมมีอยู่ปริมาณน้อยในตะกอนมีโอกาสแขวนลอยใหม่และแพร่กระจายได้ยาก

Research Title Contamination of Organotin on Songkhla Old-Town Coast
Researchers Thiwari Ophithakorn
Thunwadee Suksaroj
Banjong Vitayavirasuk
Faculty College of Innovation and Management
Year 2017

Abstract

This research study aims at studying the amount of organotin in sediment and seawater along Songkhla old-town coast. The samples of water and sediment were collected in April 2016 from five survey sites: Songkhla Ferry Port, port opposite Songkhla Police Saving Cooperative Limite, port of Hlang Phrarham, port at the Hub Ho Hin Rice Mill and the port next to the Lake Inn Hotel. The water samples were prepared by liquid-liquid extraction, and the sediment samples were prepared by Methanol-acid digestion. The amount of organotin was analyzed by GC-MS. The analysis results of seawater samples did not show any organotin contamination in all samples, and the results of organotin contamination analysis by ICP-OES did not present any Sn values in all seawater samples. The amount of organotin in sediment did not exceed the accepted values. The highest composition of the organotin in the sediment was tributyltin (37-56%), and the lowest one was dibutyltin (14-33%). Environmental assessment based on the physical - chemical factors of seawater in Songkhla Lake found average acidity and average temperatures of seawater that were high from April to August. The organotin was dissolved better in other months. The results of sinking and re-suspension with tributyltin chloride analyzed by mass balance equation and pictorial model found that the tributyltin sank and adsorbed sediment rapidly when it dissolved in water. The system will reach to steady state after 24 hours, and the re-suspension of tributyltin was in very low rate. Therefore, the contamination of organotin along the coast of Songkhla old-town has been leached out from its source in the surveyed area in such a period of time, and organotin reduced the toxicity of tributyltin, becoming monobutyltin. In addition, the low concentration of organotin in sediment has low chance of re-suspension and spreading.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย สัญญาเลขที่ 08/2559 ในการทำวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขงานวิจัยฉบับรายงานความก้าวหน้าและงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้บริหารและคณะทำงานของสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและประสานงานอย่างดีเยี่ยมเสมอมา

ขอขอบพระคุณ คุณรังษี รัตนปราการ คุณสืบสกุล ศรีสุข และภาคีคนรักเมืองสงขลาสมาคม ที่ให้การสนับสนุนพื้นที่เป็นฐานปฏิบัติการสำหรับงานวิจัยภาคสนาม และสนับสนุนการเผยแพร่งานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ซึ่งมิได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้

คุณค่าและประโยชน์จากงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอบูชาและระลึกถึงพระคุณของบิดามารดา และครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้

คณะผู้วิจัย
พฤษภาคม 2560

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ i
Abstract ii
กิตติกรรมประกาศ iii
สารบัญ iv
สารบัญตาราง vii
สารบัญภาพ ix
สัญลักษณ์และคำย่อ xi
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย 1
1.2 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย 2
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัย 2
1.6 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย 3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 ออร์แกโนทิน 5
2.2 การนำสารออร์แกโนทินมาใช้ประโยชน์ 5
2.3 แหล่งกำเนิดสารไตรบิวทิลทินในแหล่งน้ำ 7
2.4 อันตรายจากออร์แกโนทิน 8
2.5 การเปลี่ยนรูปและลำดับความเป็นพิษของออร์แกโนทิน 10
2.6 คุณสมบัติของออร์แกโนทิน 10
2.7 การถ่ายโอนออร์แกโนทินในสิ่งแวดล้อม 15
2.8 การย่อยสลายของออร์แกโนทินในสิ่งแวดล้อม 15
2.9 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของออร์แกโนทิน 16
2.10 ออร์แกโนทินในแหล่งน้ำต่างๆ ในประเทศไทย 16
2.11 ทะเลสาบสงขลา 19
2.12 ชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา 20
2.13 คุณภาพน้ำชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา 21
2.14 แบบจำลอง 22
2.15 ประโยชน์ของแบบจำลอง 22
2.16 โปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 23
2.17 แบบจำลองของออร์แกโนทินในแหล่งน้ำ 23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการวิจัย **26**

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี 26

3.1.1 วัสดุ 26

3.1.2 สารเคมี 26

3.1.3 อุปกรณ์ 27

3.2 วิธีการทดลอง 29

3.2.1 การสำรวจสภาพทางกายภาพของชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา 29

3.2.2 การเก็บตัวอย่าง 30

3.2.3 การขนส่งและการรักษาตัวอย่าง 30

3.2.4 การเตรียมเครื่องแก้วก่อนนำมาใช้ 31

3.2.5 การเตรียมสารเคมีและตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง 31

3.2.6 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วย Gas chromatography mass spectrophotometry 33

3.2.7 การศึกษาการตกจมและการแขวนลอยใหม่จากตะกอนดิน 36

3.2.8 การวิเคราะห์การสะสมและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง 38

3.3 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล 39

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล 40

4.1 สภาพทางกายภาพบริเวณชายฝั่งชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา 40

4.2 ปริมาณออร์แกโนทินในชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาในปัจจุบัน 43

4.3 การวิเคราะห์กลไกการตกจมและการแขวนลอยใหม่ของออร์แกโนทินโดยลักษณะทางกายภาพ-เคมีของน้ำ 53

4.4 การทดสอบการตกจมและการแขวนลอยใหม่ของออร์แกโนทิน 60

4.5 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสารออร์แกโนทินในชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา 74

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 76

5.1 สถานการณ์ปริมาณออร์แกโนทินในชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา 76

5.2 ข้อเสนอแนะ 77

บรรณานุกรม 78

ภาคผนวก 85

ภาคผนวก ก. รายละเอียดเครื่องมือและอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ 86

ภาคผนวก ข. เอกสารแสดงการเก็บพิกัดด้วย Smartphone Android 87

ภาคผนวก ค. ผลวิเคราะห์ GC-MS 92

ภาคผนวก ง. การนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการระดับชาติ 100

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ประวัติผู้เขียน 110

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1-1 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย 4
2-1 คุณภาพน้ำในพื้นที่ทะเลสาบสงขลาตอนล่าง 21
3-1 สารเคมี 26
4-1 จุดสำรวจสภาพน้ำชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา 40
4-2 ลักษณะทางกายภาพ-เคมีของจุดสำรวจ 41
4-3 รีเทนชันไทม์ของสารอนุพันธ์ออแกโนทินมิกซ์สแตนดาร์ด 44
4-4 ขีดจำกัดของการตรวจวัด (LOD) และขีดจำกัดของการวิเคราะห์ปริมาณ (LOQ) 46
4-5 ค่าพารามิเตอร์ของกราฟมาตรฐานอนุพันธ์ของสารออแกร์โนทินผสม 46
4-6 ปริมาณไตรบิวทิลทินชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาในแต่ละจุดสำรวจเทียบกับค่ามาตรฐาน 47
4-7 จุดตรวจสภาพน้ำตามรายงานคุณภาพน้ำพื้นที่ทะเลสาบสงขลาตอนล่าง 53
4-8 ความสามารถในการละลายน้ำและดูดติดตะกอนของไตรบิวทิลทินที่ช่วงเวลาต่างๆ ในทะเลสาบสงขลา 59
4-9 สัญลักษณ์ที่ใช้ในแบบจำลอง 61
4-10 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง 64
4-11 ร้อยละของไตรบิวทิลทินในน้ำและตะกอนที่เวลาต่างๆ ในการทดลองชุดที่ 1 65
4-12 มวลสารสะสมในระบบของไตรบิวทิลทินในเฟสน้ำและตะกอนในการทดลองชุดที่ 1 65
4-13 สภาวะระบบในการทดลองชุดที่ 1 66
4-14 ร้อยละของไตรบิวทิลทินในน้ำและตะกอนที่เวลาต่างๆ ในการทดลองชุดที่ 2 66
4-15 มวลสารสะสมในระบบของไตรบิวทิลทินในเฟสน้ำและตะกอนในการทดลองชุดที่ 2 67
4-16 สภาวะระบบในการทดลองชุดที่ 2 67
4-17 ร้อยละของไตรบิวทิลทินในน้ำและตะกอนที่เวลาต่างๆ ในการทดลองชุดที่ 3 68
4-18 มวลสารสะสมในระบบของไตรบิวทิลทินในเฟสน้ำและตะกอนในการทดลองชุดที่ 3 68
4-19 สภาวะระบบในการทดลองชุดที่ 3 69
4-20 ร้อยละของไตรบิวทิลทินในน้ำและตะกอนที่เวลาต่างๆ ในการทดลองชุดที่ 4 69
4-21 มวลสารสะสมในระบบของไตรบิวทิลทินในเฟสน้ำและตะกอนในการทดลองชุดที่ 4 70
4-22 สภาวะระบบในการทดลองชุดที่ 4 70
4-23 ร้อยละของไตรบิวทิลทินในน้ำและตะกอนที่เวลาต่างๆ ในการทดลองชุดที่ 5 71
4-24 มวลสารสะสมในระบบของไตรบิวทิลทินในเฟสน้ำและตะกอนในการทดลองชุดที่ 5 71
4-25 สภาวะระบบในการทดลองชุดที่ 5 72
4-26 ร้อยละของไตรบิวทิลทินในน้ำและตะกอนที่เวลาต่างๆ ในการทดลองชุดที่ 6 72
4-27 มวลสารสะสมในระบบของไตรบิวทิลทินในเฟสน้ำและตะกอนในการทดลองชุดที่ 6 73

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4-28 สภาวะระบบในการทดลองชุดที่ 6 73

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่ **หน้า**

1-1 จุดสำรวจและเก็บตัวอย่าง 3
2-1 โครงสร้างทางเคมีของออร์แกโนทิน 5
2-2 แหล่งกำเนิดออร์แกโนทินในแหล่งน้ำ 8
2-3 การรับสัมผัสสารออร์แกโนทินในมนุษย์ 9
2-4 การเปลี่ยนรูปของไตรบิวทิลทินและลำดับความเป็นพิษ 10
2-5 การดูดติดของไตรบิวทิลทินบนตะกอนชนิด Montmorillonite ในน้ำ Deionized water กับในน้ำทะเลสังเคราะห์ 11
2-6 การดูดซับของไตรบิวทิลทินบนตะกอนต่างชนิดที่ความเค็มต่างๆ 12
2-7 การดูดติดของไตรบิวทิลทินบนตะกอนต่างชนิดเมื่อมีสารอินทรีย์แขวนลอยในน้ำ 13
2-8 แบบจำลองการถ่ายโอนออร์แกโนทินในสิ่งแวดล้อม 15
2-9 ปริมาณไตรบิวทิลทินในน้ำทะเลและตะกอนดินในประเทศไทย 17
2-10 ปริมาณไตรบิวทิลทินในแม่น้ำสายหลักในประเทศไทย 18
2-11 ตำแหน่งที่ตั้งทะเลสาบสงขลา 19
2-12 ตำแหน่งที่ตั้งชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา 20
2-13 สารอินทรีย์ในตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนล่าง 22
2-14 แผนภาพแสดงการถ่ายโอนไตรบิวทิลทินในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเล 23
2-15 แบบจำลองการถ่ายโอนไตรบิวทิลทินในอ่าวอิเซ 24
2-16 แบบจำลองแผนภาพการถ่ายโอนไตรบิวทิลทินชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา 25
3-1 อุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างตะกอนดิน 27
3-2 เครื่อง Ultrasonic bath 28
3-3 เครื่อง ICP-OES 28
3-4 เครื่อง GC-ISQMS 28
3-5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย 29
3-6 การเก็บตัวอย่างดินโดยใช้ Ekman Birge grab sampler 30
3-7 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไตรบิวทิลทินในดิน 32
3-8 โปรแกรมอุณหภูมิในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ ที่ความเข้มข้นของไตรบิวทิลทิน 200 ppm ทำการวิเคราะห์ด้วย GC-MS 35
3-9 ชุดทดลองการตกจมและการแขวนลอยใหม่ 36
3-10 ขอบเขตของระบบและกลไกในการวิเคราะห์ปริมาณการสะสม 38
4-1 ภาพถ่ายสภาพทางกายภาพชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา 41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบที่ **หน้า**

4-2 โครมาโตแกรมการศึกษาโปรแกรมอุณหภูมิของอนุพันธ์สารมาตรฐาน ออแกร์โนทิน ความเข้มข้น 200 ppm 45
4-3 ปริมาณออร์แกโนทินในตะกอนดินในแต่ละจุดสำรวจ 48
4-4 ปริมาณของออร์แกโนทินในตะกอนอ่าวไทยตอนล่าง 50
4-5 ปริมาณไตรบิวทิลทินสะสมในทะเลสาบสงขลาตอนล่าง 51
4-6 ปริมาณของออร์แกโนทินในตะกอนดินชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา 52
4-7 ตำแหน่งจุดตรวจสภาพน้ำตามรายงานคุณภาพน้ำพื้นที่ทะเลสาบสงขลา 54
4-8 ตำแหน่งจุดตรวจสภาพน้ำโดยรอบชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา 55
4-9 การเปลี่ยนแปลงความเค็มของน้ำทะเลสาบสงขลาตอนล่างเฉลี่ยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึง 2557 56
4-10 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดด่างของน้ำทะเลสาบสงขลาตอนล่างเฉลี่ยตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2547 ถึง 2557 57
4-11 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำทะเลสาบสงขลาตอนล่างเฉลี่ยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึง 2557 57
4-12 แบบจำลองการถ่ายโอนของไตรบิวทิลทินในระบบจำลองที่เวลาเริ่มต้น 62
4-13 แบบจำลองการถ่ายโอนของไตรบิวทิลทินในระบบจำลองที่เวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง 62
4-14 แบบจำลองแผนภาพการถ่ายโอนของไตรบิวทิลทินในระบบจำลองที่เวลาต่างๆ 74

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

สัญลักษณ์และคำย่อ

GC-MS	= Gas Chromatograph-Mass Spectrometer
ICP-OES	= Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer
LOD	= ขีดจำกัดการตรวจวัด
LOQ	= ขีดจำกัดการวิเคราะห์ปริมาณ
TBT	= ไตรบิวทิลทิน
DBT	= ไดบิวทิลทิน
MBT	= โมโนบิวทิลทิน
BOD	= Biochemical Oxygen Demand
OT	= ออแกร์โนทิน
Sn	= ดีบุก
DO	= ออกซิเจนละลายน้ำ
re-suspension	= การแขวนลอยกลับสู่น้ำ
sinking	= การตกจม
retention time (t_R)	= เวลาที่ใช้ในการแยกสาร
adsorption	= การดูดติดกับตะกอน
salinity	= ความเค็ม
I_L	= มวลเข้าระบบในเฟสน้ำ
I_S	= มวลเข้าระบบในเฟสตะกอน
G_L	= มวลสารเกิดในระบบในเฟสน้ำ
G_S	= มวลสารเกิดในระบบเฟสตะกอน
O_L	= มวลสารออกระบบในเฟสน้ำ
O_S	= มวลสารออกระบบในเฟสตะกอน
R_S	= มวลสารหายไปจากระบบในเฟสตะกอน
$(\frac{d[TBT]_L}{dt})$	= มวลสารสะสมในระบบของไตรบิวทิลในเฟสน้ำ
$(\frac{d[TBT]_S}{dt})$	= มวลสารสะสมในระบบของไตรบิวทิลในเฟสตะกอน

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ออร์แกโนทินเป็นสารประกอบโลหะหนักกลุ่มดีบุกที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมทางน้ำ (Ansari et al., 1998) การปนเปื้อนของสารประกอบเหล่านี้ในแหล่งน้ำธรรมชาติ มีแหล่งกำเนิดจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ (Ansari et al., 1998; Bangkedphol et al., 2009) โดยมีผลกระทบโดยตรงต่อห่วงโซ่อาหารและสุขภาพของมนุษย์ผ่านทางการบริโภคอาหารทะเลที่มีการปนเปื้อน (Kan-atireklap et al., 1997a; Ayanda et al., 2012) สารออร์แกโนทินที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติ ส่วนใหญ่มักจะพบในสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตสีกันเพรียง (Ansari et al., 1998; Birchenough et al., 2002; Cooke et al., 2004; Antizar-Ladislao, 2008; Ayanda et al., 2013; Bravo et al., 2013) และจากการแพร่กระจายจากท่าเรือพาณิชย์ขนาดใหญ่เป็นสำคัญ (Yamamoto et al., 2009) ซึ่งพบว่าเกิดผลกระทบทั่วโลก ทั้งในในยุโรป อเมริกา แคนาดา นิวซีแลนด์ ออสเตรเลีย ญี่ปุ่น รวมถึงฮ่องกง ตั้งแต่ ปี 1980 ถึงปัจจุบัน (Ko et al., 1995; Ansari et al., 1998; Birchenough et al., 2002, Murai et al., 2005; Dafforn et al., 2011) และใน ปี 2003 ได้มีการประกาศยกเลิกการใช้สารประกอบออร์แกโนทิน โดยเฉพาะในเรือความยาวของลำเรือน้อยกว่า 25 เมตร (ประสาท วงษ์ทองคำ, 2552; Bech, 2002) และในปี 2008 ได้มีการบังคับการห้ามใช้สีที่มีส่วนประกอบของไตรบิวทิลทินกับเรือที่มีอยู่ในปัจจุบันโดยสิ้นเชิง (ประสาท วงษ์ทองคำ, 2552) เพื่อลดการสะสมของสารเหล่านี้ในแหล่งน้ำต่างๆ

สำหรับประเทศไทยเคยมีการนำเข้าไตรบิวทิลทินมาใช้ในการผลิตสีกันเพรียง สำหรับห้องปฏิบัติการ รวมถึงในอุตสาหกรรม (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2550) และตรวจพบการสะสมและผลกระทบของสารออร์แกโนทินในอ่าวไทยและท่าเรือสำคัญทั่วประเทศหลายแห่ง โดยเฉพาะบริเวณที่มีการจราจรทางน้ำหนาแน่น (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2550; Kan-atireklap et al., 1997a; Kan-atireklap et al., 1997b; Swennen et al., 2009) ในพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาตอนล่าง ซึ่งเป็นลุ่มน้ำที่สำคัญของชุมชนหลายชุมชนในพื้นที่จังหวัดสงขลา พบว่าเริ่มมีการสะสมของสารออร์แกโนทินในทะเลสาบสงขลา และตรวจพบการผิดปกติทางเพศของสัตว์ทะเลจำพวกหอยในพื้นที่ (Kan-atireklap et al., 1997a; Kan-atireklap et al., 1997b; Swenen et al., 2009; Hajisamoh, 2013) ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหาร และสุขภาพของประชนในพื้นที่จังหวัดสงขลา พื้นที่ใกล้เคียงที่อาศัยทะเลสาบเป็นแหล่งอาหารทะเลเพื่อการบริโภค

พื้นที่ของชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาซึ่งเป็นพื้นที่ใช้ประโยชน์ทั้งด้านการประมง การคมนาคม เชื่อมต่อกับพื้นที่ทะเลสาบซึ่งมีการใช้ประโยชน์ทั้งเป็นแหล่งน้ำใช้และแหล่งรองรับน้ำทิ้งจากชุมชนต่างๆ โดยรอบ และรวมทั้งท่าเรือสงขลาท่าเรือน้ำลึกเชิงพาณิชย์ขนาดใหญ่ที่บริเวณปากทะเลสาบ (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2548) มีความเสี่ยงต่อการได้รับผลกระทบจากสาเหตุเหล่านั้นในการปนเปื้อนและแพร่กระจายสารออร์แกโนทินลงสู่แหล่งน้ำทั้งสิ้น ดังนั้นการศึกษาการสะสมของสารออร์แกโนทินตามแนวชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา ซึ่งถือเป็นส่วนหนึ่งของทะเลสาบสงขลาตอนล่างในเขตพื้นที่จังหวัดสงขลา เป็นที่ตั้งของเขตเมืองเก่าสงขลา (ภาคีคนรัก

เมืองสงขลาสมาคม, 2557) จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นองค์ความรู้ที่จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อประชาชนในพื้นที่เมืองเก่าสงขลา และพื้นที่โดยรอบทะเลสาบสงขลา ที่จะได้ตระหนักและเฝ้าระวังอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากการปนเปื้อนของโลหะหนักเป็นพิษ ที่มีผลกระทบต่อสัตว์ทะเล มนุษย์ และสิ่งแวดล้อมโดยรอบพื้นที่ รวมไปถึงการเป็นองค์ความรู้เพื่อการสนับสนุนและการพัฒนาเขตเมืองเก่าสงขลาจากการเป็นมรดกชาติสู่การเป็นมรดกโลกในมิติด้านสิ่งแวดล้อมต่อไปด้วย

คำสำคัญ: ออร์แกโนทิน (organotin) ไตรบิวทิลทิน (Tributyltin) เมืองเก่าสงขลา (Songkhla Old-Town) ทะเลสาบสงขลา (Songkhla lake) การปนเปื้อน (Contamination)

1.2 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การเป็นพื้นที่ใช้ประโยชน์ในกิจกรรมการประมง การเป็นพื้นที่รองรับน้ำจากอุตสาหกรรม การเกษตรและชุมชน รวมถึงเป็นพื้นที่เชื่อมต่อกับทะเลสาบสงขลาและท่าเรือน้ำลึกสงขลา ซึ่งมีการคมนาคมทางน้ำเป็นสำคัญ มีผลต่อปริมาณการสะสมของสารออร์แกโนทินในตะกอนดินและน้ำทะเลจากอดีตจนถึงปัจจุบัน กลไกการตกจมและการแขวนลอยใหม่เป็นกลไกสำคัญในการบ่งชี้การสะสมและการแพร่กระจายของสารออร์แกโนทินในพื้นที่

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปริมาณการสะสมของสารออร์แกโนทินตามแนวชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา
2. เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารออร์แกโนทินตามแนวชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

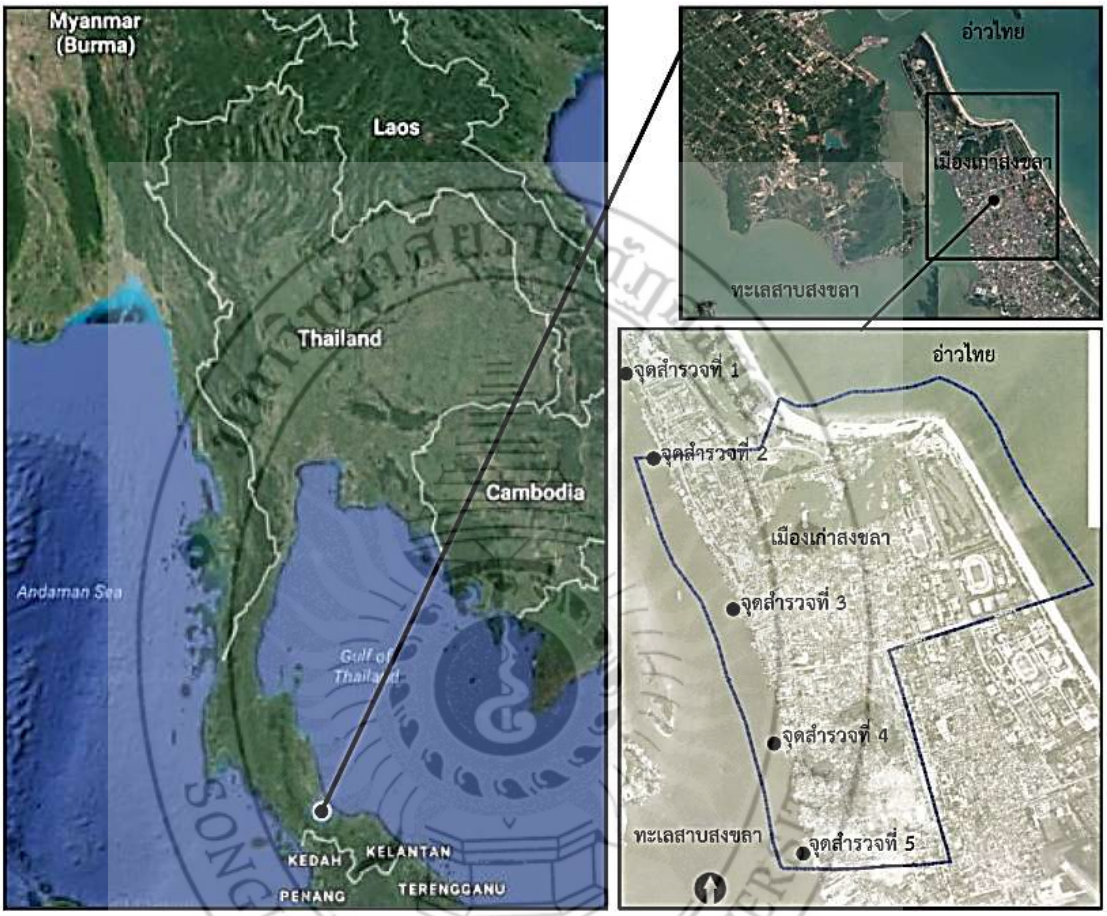
1. เป็นองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับการปนเปื้อนสารออร์แกโนทินเชิงพื้นที่สำหรับทะเลสาบสงขลาและชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาซึ่งปัจจุบันมีข้อมูลน้อยมาก และสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลต่อยอดในการวิจัยต่อไปได้
2. เป็นองค์ความรู้ในการสนับสนุนเชิงวิชาการ ในประเด็นการพัฒนาเมืองเก่าของพื้นที่จังหวัดสงขลาสู่เมืองมรดกโลก ภายใต้กรอบความร่วมมือสามเหลี่ยมเศรษฐกิจ IMT-GT เพื่อการเผยแพร่ในเชิงวิชาการสู่สากล ในมิติด้านสิ่งแวดล้อม การพัฒนา และการอนุรักษ์ทรัพยากรน้ำ
3. สร้างความตระหนักและเป็นการเฝ้าระวังมลพิษทางทะเลของสารออร์แกโนทินในทะเลสาบสงขลาตอนล่าง

1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ขอบเขตด้านพื้นที่

โครงการวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตพื้นที่สำรวจชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา โดยกำหนดจุดสำรวจทั้งหมด 5 จุดสำรวจ ได้แก่ จุดที่ 1 ท่าแพขนานยนต์สงขลา จุดที่ 2 ท่าเรือตรงข้ามสหกรณ์ออมทรัพย์

ตำรวจสงขลา จุดที่ 3 ท่าเรือแหล่งพระราม จุดที่ 4 ท่าเรือโรงสีแดงหับโห้หิ้น จุดที่ 5 ท่าเรือข้างโรงแรมเลคอินน์ ซึ่งตั้งอยู่ระหว่างจุด SK13 ถึง SK15 (อ้างอิงตามตำแหน่งเก็บตัวอย่างน้ำ SK13 ถึง SK15 ของสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 16) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1-1



ภาพประกอบที่ 1-1 จุดสำรวจและเก็บตัวอย่าง
ที่มา: ดัดแปลงจาก ภาคีคนรักเมืองสงขลาสมาคม, 2557

2. ขอบเขตด้านเนื้อหา

- การปนเปื้อนของสารออร์แกโนทินในน้ำทะเลตามแนวชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา
- การสะสมของสารออร์แกโนทินในตะกอนดินชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา
- การวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารออร์แกโนทินจากการตกจมและการแขวนลอยใหม่ในระดับห้องปฏิบัติการ

1.6 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

ระยะเวลาทำการวิจัย 2 ปี ตั้งแต่ 27 ตุลาคม 2558 ถึง 25 ตุลาคม 2560 สามารถแสดงแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัยได้ดังตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

กิจกรรม	เดือน											
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง												
จัดเตรียมอุปกรณ์และสารเคมี												
สำรวจและเก็บตัวอย่าง												
เตรียมตัวอย่างและวิเคราะห์												
วิเคราะห์กลไกตกจมและแขวนลอย												
วิเคราะห์และประเมินผล												
นำเสนอผลงานวิชาการ												
จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์												

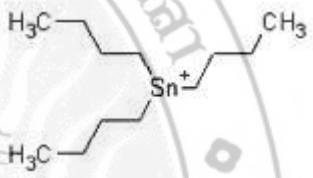
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

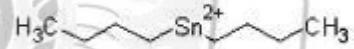
2.1 ออร์แกโนทิน

ออร์แกโนทิน (organotin: OT) เป็นสารประกอบอินทรีย์ของดีบุกที่สามารถพบได้ในสิ่งแวดล้อม (Rüdel, 2003; Antizar-Ladislao, 2008; Ayanda et al., 2012) สารประกอบเกิดจากองค์ประกอบของดีบุกอะตอมและคาร์บอนอะตอม (Antizar-Ladislao, 2008) โดยกลุ่มของออร์แกโนทินที่พบมากในสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ไตรบิวทิลทิน (tributyltin: TBT) ไดบิวทิลทิน (dibutyltin: DBT) และโมโนบิวทิลทิน (monobutyltin: MBT) (Rüdel, 2003; Antizar-Ladislao, 2008; Ayanda et al., 2012) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-1

ไตรบิวทิลทิน
สูตรเคมี $C_{12}H_{27}Sn^{+}$
น้ำหนักโมเลกุล 290.06



ไดบิวทิลทิน
สูตรเคมี $C_8H_{18}Sn^{2+}$
น้ำหนักโมเลกุล 232.94



โมโนบิวทิลทิน
สูตรเคมี $C_4H_9Sn^{3+}$
น้ำหนักโมเลกุล 175.83

ภาพประกอบที่ 2-1 โครงสร้างทางเคมีของออร์แกโนทิน
ที่มา: ดัดแปลงจาก Antizar-Ladislao, 2008

2.2 การนำสารออร์แกโนทินมาใช้ประโยชน์

การปฏิวัติอุตสาหกรรมทำให้เกิดการสังเคราะห์สารต่างๆ มากมาย ปี พ.ศ. 2392 สารประกอบในกลุ่มออร์แกโนทินพวกไดออร์แกโนทิน (Diorganotin) ชื่อ Diethyltin Diiodide (Et_2SnI_2) จึงถูกสังเคราะห์เพื่อนำมาใช้ประโยชน์เป็นครั้งแรก ต่อมาในปี พ.ศ. 2493 ได้มีการนำสารประกอบในกลุ่มออร์แกโนทินมาใช้เป็นสีกันเพรียงเรือ ผสมพลาสติก PVC ให้มีความคงตัว ผสมแก้วให้แข็งแรงมากขึ้น ใช้เป็นยาฆ่าราเมือก วัชพืช และสิ่งมีชีวิตต่างๆ (นพิดา คุณประเสริฐ, 2546) จากนั้นในปี พ.ศ. 2503 สารประกอบในกลุ่มออร์แกโนทินถูกนำมาใช้แพร่หลายมากขึ้นเพื่อการป้องกันเพรียงเกาะตามท้องเรือและชิ้นส่วนอื่นๆ ของเรือขนาดใหญ่ สารประกอบในกลุ่มออร์แกโนทิน

จึงเป็นที่รู้จักและนำไปสู่การใช้ผสมในสีกันเพรียงกับเรือขนาดเล็กในเวลาต่อมา (Jensen et al., 2004; Antizar-Ladislao, 2008) ในปี พ.ศ. 2518 สารประกอบในกลุ่มออร์แกโนทินมีการเพิ่มการผลิตเป็น 25,000 ตัน จากเดิมที่มีเพียงประมาณ 50 ตันในปี พ.ศ. 2493 เพิ่มเป็นผลิตประมาณ 50,000 ตันต่อปี ในปี พ.ศ. 2539 โดยสารประกอบในกลุ่มออร์แกโนทินเริ่มเป็นที่รู้จักมากขึ้น และเริ่มมีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางมากขึ้น จึงเริ่มมีการผลิตเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ สารประกอบในกลุ่มออร์แกโนทินได้ถูกนำไปพัฒนาใช้ในกิจกรรมอื่นๆ มากขึ้นทั้งในการเกษตรและอุตสาหกรรม (Antizar-Ladislao, 2008)

ไตรบิวทิลทินถูกนำมาใช้ในการฆ่าสัตว์จำพวกหอย สีกันเพรียง รักษาเนื้อไม้ ยาฆ่าเชื้อสำหรับวัตถุ สารฆ่าสิ่งมีชีวิต ทาป้องกันตะไคร่ในเรือบด เรือทะเล สะพานหินสำหรับจอดเรือ ทุ่น กระชังดักปูแห และกรง แต่ไม่นิยมนำมาใช้ทางเกษตรกรรมเพราะว่ามีความเป็นพิษที่ส่งผลกระทบต่อพืช (Phytotoxicity) สูง ขณะที่ไตรฟีนิลทินนิยมนำมาใช้มากในสีกันเพรียงเรือร่วมกับไตรบิวทิลทิน และนิยมใช้ในทางการเกษตรกรรมมากกว่าไตรบิวทิลทิน เพื่อป้องกันการเกิดราเมือก หรือเป็นยาฆ่าราเมือกในผลิตผลการเกษตรหลายชนิด เช่น มันฝรั่ง ไม้ตระกูลขึ้นฉ่าย อ้อย กาแฟ และข้าว (นพิดา คุณประเสริฐ, 2546) การใช้สารประกอบในกลุ่มออร์แกโนทินในการป้องกันผิวเรือเพื่อไม่ให้เกิดความสกปรกนั้น หากพิจารณาถึงความจำเป็นในการใช้สารประกอบในกลุ่มออร์แกโนทินในการเป็นส่วนผสมของสีในส่วนของสารควบคุมจุลชีวะ (Biocide) แล้วนั้น ประเด็นของการนำมาใช้ประโยชน์คือการใช้เพื่อป้องกันการเกาะและลดการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตที่ผิวของเรือเป็นสำคัญ (มานะ นาคแนวดี, 2547; อนิวัตร ปัสสาโก, 2549) โดยเฉพาะเพรียงและสาหร่าย (ณัฐพล วะราโภ และคณะ, 2551) ซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาการผุกร่อนของลำเรือและอุปกรณ์ต่างๆ (มานะ นาคแนวดี, 2547; อนิวัตร ปัสสาโก, 2549; ณัฐพล วะราโภ และคณะ, 2551) และเป็นสาเหตุของการใช้เชื้อเพลิงที่สูงขึ้น (มานะ นาคแนวดี, 2547; อนิวัตร ปัสสาโก, 2549) ซึ่งกระทบต่อค่าใช้จ่ายในการใช้น้ำมัน (มานะ นาคแนวดี, 2547; อนิวัตร ปัสสาโก, 2549; ณัฐพล วะราโภ และคณะ, 2551) ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย (ณัฐพล วะราโภ และคณะ, 2551) ซึ่งเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของการเดินเรือที่ลดลงโดยตรง รวมถึงเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ต้องมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศเพิ่มขึ้นด้วย (มานะ นาคแนวดี, 2547; อนิวัตร ปัสสาโก, 2549)

การตรวจพบอันตรายจากสารประกอบในกลุ่มออร์แกโนทินในแหล่งน้ำต่างๆ ทั่วโลก โดยในปี พ.ศ. 2523 มีการตรวจพบทั้งในยุโรป อเมริกา แคนาดา นิวซีแลนด์ ออสเตรเลีย ญี่ปุ่น รวมถึงฮ่องกง (Ko et al., 1995; Ansari et al., 1998; Birchenough et al., 2002, Murai et al., 2005; Dafforn et al., 2011) ในปี พ.ศ. 2525 จึงได้มีการยกเลิกการใช้ไตรบิวทิลทินโดยเฉพาะในเรือที่ขนาดเล็ก มีความยาวของลำเรือน้อยกว่า 25 เมตร (การเดินเรือน้ำตื้นระวางน้ำลึกน้อยกว่า 25 เมตร) เพื่อลดการสะสมของสารเหล่านี้ในแหล่งน้ำต่างๆ (อนิวัตร ปัสสาโก, 2549; ประสาท วงษ์ทองคำ, 2552) ซึ่งภายหลังในปี พ.ศ. 2533 ได้มีข้อเรียกร้องโดยสนธิสัญญาองค์การความร่วมมือทางทะเลระหว่างประเทศ และองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมทางทะเล เพื่อที่จะลดการปล่อยไตรบิวทิลทินจากอู่เรือ (อนิวัตร ปัสสาโก, 2549; ประสาท วงษ์ทองคำ, 2552) ในอัตราการปล่อยไตรบิวทินอยู่ในค่าที่ไม่เกิน 4 $\mu g/cm^3 d$ (ประสาท วงษ์ทองคำ, 2552) หลายประเทศทั่วโลกได้มีการลงนามเพื่อความร่วมมือ

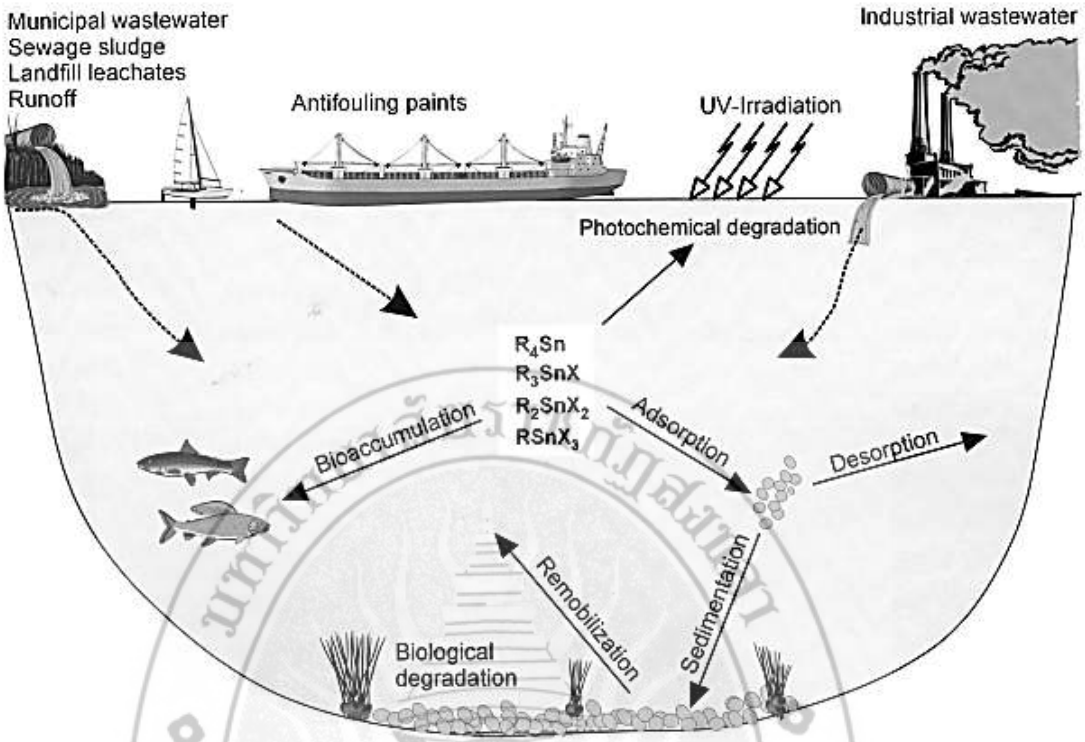
กันในการยกเลิกการใช้สารประกอบในกลุ่มออร์แกโนทิน ในปี พ.ศ. 2546 (Bech, 2002; Jensen et al., 2004) แต่การใช้สีกันเพรียงยังคงมีความต้องการมากและมีการใช้ในเรือพาณิชย์ เรือขนาดใหญ่ที่เป็นเรือที่อยู่ทางเอเชียแปซิฟิก ซึ่งยังเป็นภูมิภาคที่ใช้สารตัวนี้มากและอาจกลายเป็นมลพิษในอนาคต (นพิดา คุณประเสริฐ, 2546) ในปี พ.ศ. 2551 คณะกรรมการป้องกันสิ่งแวดล้อมทางทะเล (Marine Environment Protection Committee-MEPC) ประกาศอนุสัญญาระหว่างประเทศว่าด้วยระบบกันเพรียงของเรือได้มีการบังคับการห้ามใช้สีที่มีส่วนประกอบของไตรบิวทิลทินกับเรือที่มีอยู่ในปัจจุบันโดยสิ้นเชิง (ประสาท วงษ์ทองคำ, 2552; Jensen et al., 2004)

สำหรับประเทศไทยเคยมีการนำเข้าไตรบิวทิลทินมาใช้ในประมาณ 0.2 ตันต่อปี สำหรับการผลิตสี ห้องปฏิบัติการ และอุตสาหกรรม โดยปัจจุบันมีการกำหนดอนุพันธ์ของฟลูออไรด์ (Tributyltin fluoride, TBTF) เป็นวัตถุอันตรายประเภทที่ 3 หรือ 4 และมีการจัดทำมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสำหรับสีทากันเพรียงที่ไม่มีสารดีบุกและปรอท ซึ่งประเทศพัฒนาแล้วส่วนใหญ่มีการห้ามใช้ แต่ในกลุ่มประเทศสมาชิกสมาคมประชาชาติแห่งเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ยังไม่มีการดำเนินการในเรื่องดังกล่าวชัดเจน (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2550)

2.3 แหล่งกำเนิดสารไตรบิวทิลทินในแหล่งน้ำ

ออร์แกโนทินเป็นสารประกอบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายกิจกรรมทางอุตสาหกรรมและการเกษตร (Ansari et al., 1998) ออร์แกโนทินจึงสามารถแพร่กระจายและปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้อย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาไม่นานนัก ด้วยการที่ออร์แกโนทินเป็นส่วนประกอบในเคมีภัณฑ์หลายชนิด การปนเปื้อนของออร์แกโนทินในสิ่งแวดล้อมจึงมีทั้งจากแหล่งที่ระบุไม่ได้ เช่น ในน้ำเสียชุมชน (Hoch, 2001; Ophithakorn et al., 2016) และจากแหล่งที่สามารถระบุได้ เช่น ส่วนผสมที่ใช้ในการรักษาเนื้อไม้ (Cooke et al., 2004; Antizar-Ladislao, 2008; Bangkedphol et al., 2009) ขั้นตอนการควบคุมความหนาในการผลิตกระดาษ สารฆ่าเชื้อในการหมุนเวียนน้ำหล่อเย็นในโรงงานอุตสาหกรรม (Cooke et al., 2004; Antizar-Ladislao, 2008) การผลิตพลาสติก Vinyl Chloride Monomer (VCM) และ PolyVinyl Chloride (PVC) อุตสาหกรรมที่มีการใช้ยูรีเทน และซิลิโคน (Yamamoto et al., 2009) สีกันเพรียง (Ansari et al., 1998; Birchenough et al., 2002; Cooke et al., 2004; Antizar-Ladislao, 2008; Ayanda et al., 2013; Bravo et al., 2013) อวน (Inoue et al., 2006; Yamamoto et al., 2009) อุปกรณ์ที่มีการติดตั้งในทะเล (Swennen et al., 2009) อุปกรณ์นำทาง ท่าเรือพาณิชย์ขนาดใหญ่ (Yamamoto et al., 2009) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-2

ในประเทศไทยมีการใช้เป็นสารประกอบในการผลิตสีกันเพรียง ห้องปฏิบัติการ และการใช้ในการฆ่าตะไคร่น้ำในระบบหล่อเย็น (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2550)

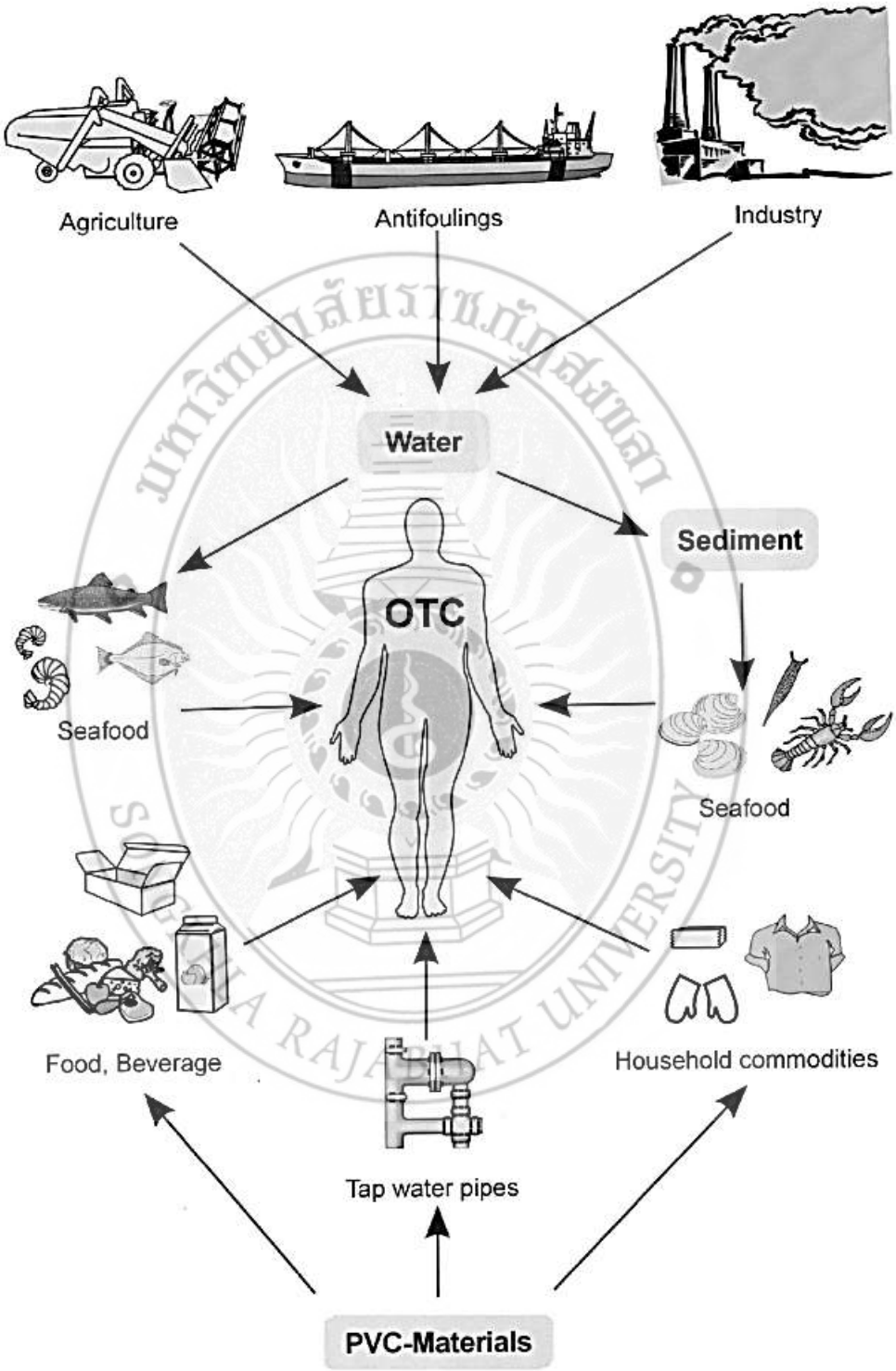


ภาพประกอบที่ 2-2 แหล่งกำเนิดออร์แกโนทินในแหล่งน้ำ
ที่มา: ดัดแปลงจาก Hoch (2001)

2.4 อันตรายจากออร์แกโนทิน

ออร์แกโนทินก่อให้เกิดผิดปกติทางเพศของสัตว์ทะเล สามารถละลายน้ำ สะสมได้ในตะกอนและสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ส่งผลกระทบต่อมนุษย์ผ่านทางห่วงโซ่อาหาร และการบริโภคอาหารทะเลที่มีการปนเปื้อน (Ayanda et al., 2012) จากการทดลองกับสัตว์ทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่าออร์แกโนทินมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางสุขภาพและทำให้สัตว์ทดลองตายได้ ทั้งยังปรากฏความชัดเจนด้านความเสี่ยงต่อสุขภาพที่จะเกิดขึ้นกับมนุษย์จากการรับสัมผัสด้วยการบริโภคอาหารทะเลที่ปนเปื้อนออร์แกโนทินเป็นประจำ (Hoch, 2001; Antizar-Ladislao, 2008) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-3 ที่ผ่านมาพบว่าออร์แกโนทินเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้หอยบางชนิดสูญพันธุ์จากการผิดปกติของระบบสืบพันธุ์ และผลกระทบต่อการวางไข่ของสัตว์ทะเลหลายชนิด รวมถึงมีผลต่อผู้บริโภคในเรื่องระบบฮอร์โมนและภูมิคุ้มกัน (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2550) โดยปริมาณออร์แกโนทินที่เป็นอันตราย พบว่า ไตรบิวทิลทินในน้ำทะเล 1-2 ng/L มีผลกระทบต่อสัตว์น้ำโดยเกิดความผิดปกติทางเพศของหอยฝาเดียว ไตรบิวทิลทินในตะกอนดินมากกว่า 2.5 μg/g มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของหอยแมลงภู่ (Hajisamoh, 2013) ไตรบิวทิลทินในหอย 20 ng/g ทำให้เกิดการผิดปกติทางเพศในหอย (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2550) และในมาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลได้กำหนดปริมาณสารในกลุ่มออร์แกโนทินชนิดไตรบิวทิล ด้วยการวิเคราะห์ด้วย Gas Chromatography with Flame Photometric Detector หรือ Gas Chromatography with Mass Spectrophotometry หรือ

Highly Performance Liquid Chromatography–ICPMS ไม่เกิน 10 ng/L (ราชกิจจานุเบกษา, 2550)



ภาพประกอบที่ 2-3 การรับสัมผัสสารออร์แกโนทินในมนุษย์
ที่มา: ดัดแปลงจาก Hoch (2001)

2.5 การเปลี่ยนรูปและลำดับความเป็นพิษของออร์แกโนทิน

ไตรบิวทิลทินสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นไดบิวทิลทินและโมโนบิวทิลทินได้ทั้งจากกระบวนการทางกายภาพเคมีและการย่อยสลายทางชีวภาพ (Antizar-Ladislao, 2008) และพบว่าความเป็นพิษของออร์แกโนทินกลุ่มต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยพบว่าในสิ่งแวดล้อมไตรบิวทิลทินจะมีความเป็นพิษมากกว่าไดบิวทิลทินและมากกว่าโมโนบิวทิลทินตามลำดับ (Rüdel, 2003) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-4

การเปลี่ยนรูป

$$TBT^{+} \rightarrow DBT^{2+} \rightarrow MBT^{3+} \rightarrow Sn^{4+}$$

ลำดับความเป็นพิษ

$$TBT^{+} > DBT^{2+} > MBT^{3+} > Sn^{4+}$$

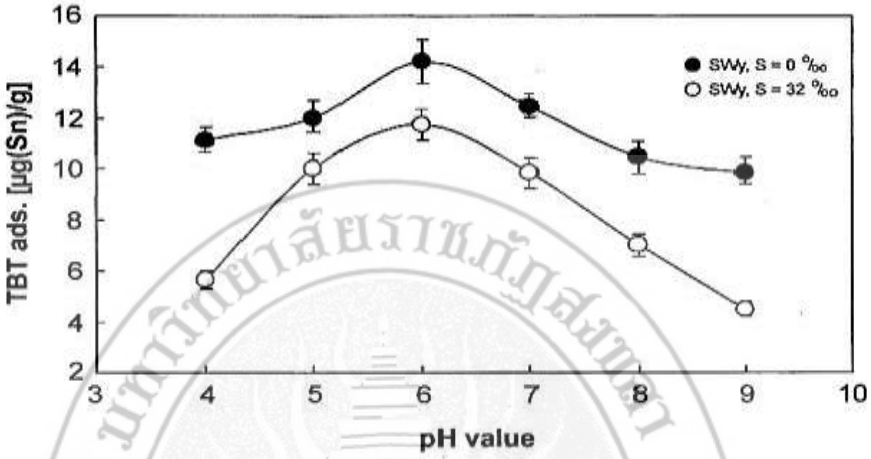
ภาพประกอบที่ 2-4 การเปลี่ยนรูปของไตรบิวทิลทินและลำดับความเป็นพิษ
ที่มา: ดัดแปลงจาก Antizar-Ladislao, 2008; Rüdel, 2003

2.6 คุณสมบัติของออร์แกโนทิน

ออร์แกโนทินเป็นสารที่สามารถตกตะกอนสู่ชั้นตะกอนได้ง่าย เนื่องจากมีค่าความถ่วงจำเพาะสูง (1.2 kg/L) มีความสามารถในการละลายต่ำ (10 mg/L) ที่ 20 องศาเซลเซียส pH = 7 และมีการสะสมทางชีวภาพสูง (log K_{ow} = 4.4 ที่ pH = 8) นอกจากนี้พบว่า pH และ ค่าความเค็มของแหล่งน้ำมีผลต่อความสามารถในการดูดซับและการชะละลายของออร์แกโนทินด้วย (Antizar-Ladislao, 2008) ดังนั้นการปนเปื้อนของออร์แกโนทินส่วนใหญ่จะพบได้ในตะกอนดินและเนื้อเยื่อของสัตว์ทะเลจำพวกหอย เนื่องจากคุณสมบัติการละลายน้ำที่ไม่ดีแต่มีคุณสมบัติละลายได้ดีในไขมัน (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2550)

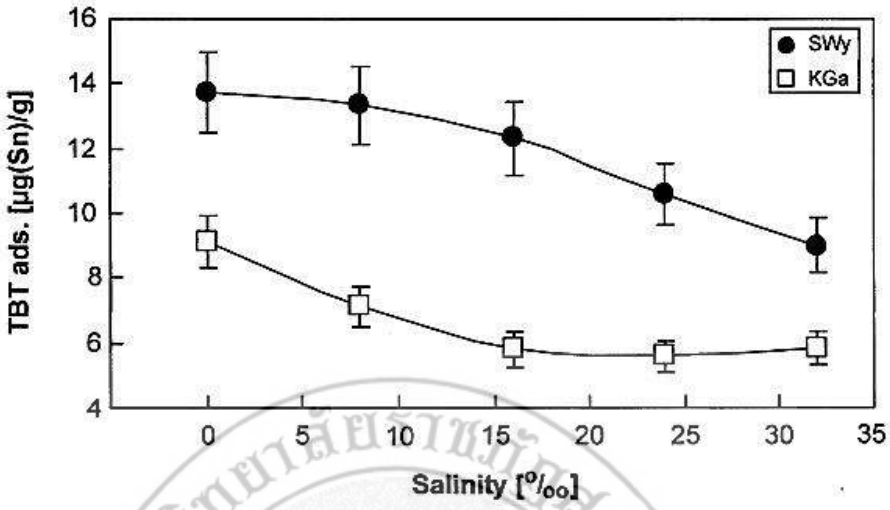
การศึกษาการดูดติดของไตรบิวทิลทินระหว่างเฟสของแข็งและน้ำจึงมีความสำคัญอย่างมาก ทั้งนี้เพื่อความเข้าใจในกลไกการถ่ายโอนและการสะสมของไตรบิวทิลทินในสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมใต้น้ำ (Behra et al., 2003) ในการศึกษาการดูดติดของไตรบิวทิลทินบนตะกอนชนิด Montmorillonite (SWy) ในน้ำ Deionized water (Salinity 0‰) เปรียบเทียบกับในน้ำทะเลสังเคราะห์ด้วย NaCl (Salinity 32‰) พบว่าไตรบิวทิลทินสามารถดูดติดตะกอนชนิด Montmorillonite ได้ดีในน้ำ Deionized water (Salinity 0‰) มากกว่าในน้ำทะเลสังเคราะห์ด้วย NaCl (Salinity 32‰) โดยเมื่อพิจารณา pH ของทั้งน้ำ Deionized water (Salinity 0‰) และน้ำทะเลสังเคราะห์ด้วย NaCl (Salinity 32‰) แล้วพบว่าที่ pH 6 เป็นตำแหน่ง pH ที่ไตรบิวทิลทินสามารถดูดติดบนตะกอนชนิด Montmorillonite ได้ดีที่สุดด้วย (Hoch, & Schwesig, 2004) จาก

ตัวอย่างผลการศึกษาดังกล่าว สรุปได้ว่าปัจจัยเรื่องความเค็มและ pH มีอิทธิพลต่อการดูดติดและสะสมของไตรบิวทิลทินในสิ่งแวดล้อม การดูดติดของไตรบิวทิลทินบนตะกอนชนิด Montmorillonite ในน้ำ Deionized water กับในน้ำทะเลสังเคราะห์สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 2-5



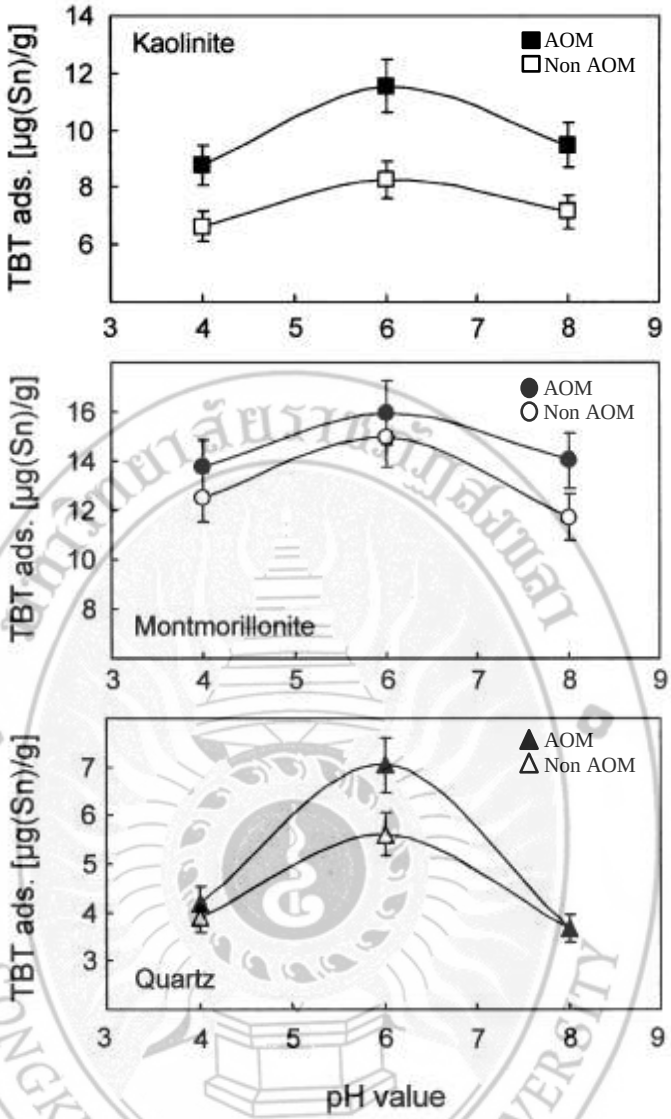
ภาพประกอบที่ 2-5 การดูดติดของไตรบิวทิลทินบนตะกอนชนิด Montmorillonite ในน้ำ Deionized water กับในน้ำทะเลสังเคราะห์
ที่มา: ดัดแปลงจาก Hoch, & Schwesig, 2004

ในการศึกษาการดูดติดของไตรบิวทิลทินบนตะกอนต่างชนิดกัน ได้แก่ Montmorillonite (SWy) และ Kaolinite (KGa) ในน้ำทะเลสังเคราะห์ด้วย NaCl ที่ความเค็มแตกต่างกัน พบว่าไตรบิวทิลทินสามารถดูดติดตะกอนชนิด Montmorillonite ได้ดีกว่าบนตะกอน Kaolinite โดยความเค็มต่ำๆ มีผลให้มีการดูดติดเกิดขึ้นได้ดีกว่าที่ความเค็มสูงขึ้น (Hoch, & Schwesig, 2004) จากตัวอย่างผลการศึกษาดังกล่าว สรุปได้ว่าปัจจัยเรื่องความเค็มและชนิดของตะกอนมีอิทธิพลต่อการดูดติดและสะสมของไตรบิวทิลทินในสิ่งแวดล้อม การดูดซับของไตรบิวทิลทินบนตะกอนต่างชนิดที่ความเค็มต่างๆ สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 2-6



ภาพประกอบที่ 2-6 การดูดซับของไตรบิวทิลทินบนตะกอนต่างชนิดที่ความเค็มต่างๆ
ที่มา: ดัดแปลงจาก Hoch, & Schwesig, 2004

ในการศึกษาการดูดติดของไตรบิวทิลทินบนตะกอนต่างชนิดกัน ได้แก่ Kaolinite Montmorillonite และ Quartz เมื่อมีการสารอินทรีย์แขวนลอยในน้ำ (สัญลักษณ์สีดำ) พบว่าไตรบิวทิลทินสามารถดูดติดตะกอนชนิด Montmorillonite ได้ดีกว่าบนตะกอน Kaolinite และ Quartz ตามลำดับ โดยเมื่อมีสารอินทรีย์แขวนลอยในน้ำมาก มีผลทำให้การดูดติดเกิดมากขึ้นได้เช่นกัน (Hoch, & Schwesig, 2004) จากตัวอย่างผลการศึกษาดังกล่าว สรุปได้ว่าปัจจัยเรื่องชนิดของตะกอนและการมีสารอินทรีย์แขวนลอยในน้ำมีอิทธิพลต่อการดูดติดและสะสมของไตรบิวทิลทินในสิ่งแวดล้อม การดูดติดของไตรบิวทิลทินบนตะกอนต่างชนิดเมื่อมีสารอินทรีย์แขวนลอยในน้ำสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 2-7



ภาพประกอบที่ 2-7 การดูดติดของไตรบิวทิลทินบนตะกอนต่างชนิดเมื่อมีสารอินทรีย์แขวนลอยในน้ำ
ที่มา: ดัดแปลงจาก Hoch, & Schwesig, 2004

หมายเหตุ ■ ● ▲ (สัญลักษณ์สีดำ) มีสารอินทรีย์แขวนลอยในน้ำ (Adsorbed organic matter: AOM)

เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะของไตรบิวทิลทินเป็นสารที่สามารถตกตะกอนสู่ชั้นตะกอนได้ง่าย เพราะมีค่าความถ่วงจำเพาะสูง มีความสามารถในการละลายต่ำ และมีการสะสมทางชีวภาพสูง รวมทั้ง pH และค่าความเค็มของแหล่งน้ำมีผลต่อความสามารถในการดูดติดและการชะละลายของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ด้วย (Antizar-Ladislao, 2008) ดังนั้นหากมีการปล่อยทิ้งไตรบิวทิลทินในแหล่งน้ำธรรมชาติ ในแหล่งน้ำจืดทั่วไปจะมีโอกาสปนเปื้อนไตรบิวทิลทินจนเกิดความเป็นพิษได้มากกว่าในน้ำทะเล (Inaba et al., 1995) และส่วนใหญ่จะพบได้ในตะกอนดินและเนื้อเยื่อของสัตว์ทะเลจำพวกหอย เนื่องจากคุณสมบัติการละลายได้ดีในไขมัน (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2550) โดยมี

การวิจัยของ คิมและคณะ และทาคาฮาชิและคณะ อ้างโดย นพิดา คุณประเสริฐ (2546) พบว่าในสิ่งมีชีวิตปริมาณการสะสมไตรบิวทิลทินยังมีความสัมพันธ์กับโปรตีนมากกว่าไขมันอีกด้วย (นพิดา คุณประเสริฐ, 2546)

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการละลาย (Solubility) ของไตรบิวทิลทินในแหล่งน้ำ ได้แก่ ความเค็ม (Salinity) ความเป็นกรดด่าง (pH) และอุณหภูมิ (Temperature) โดยพบว่าไตรบิวทิลทินคลอไรด์ (TBTCl) และสารประกอบดีบุกอินทรีย์อื่นๆ ได้แก่ ไตรบิวทิลทินออกไซด์ (TBTO) ไตรฟีนิลทินคลอไรด์ (TPTCl) และไตรฟีนิลทินออกไซด์ (TPTO) มีความสามารถในการละลายในน้ำลดลงเมื่อความเค็มเพิ่มขึ้น เป็นเหตุให้สารประกอบดีบุกอินทรีย์ละลายในน้ำทะเลได้น้อยกว่าในน้ำกลั่น นอกจากนี้ pH และอุณหภูมิก็มีผลต่อความสามารถในการละลายของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ร่วมด้วย โดยความสามารถในการละลายของสารประกอบดีบุกอินทรีย์เหล่านี้จะลดต่ำลงในช่วง pH 6-8 และเมื่ออุณหภูมิของน้ำลดต่ำลง จะมีผลให้ความสามารถในการละลายของสารประกอบดีบุกอินทรีย์เหล่านี้ในน้ำลดลงตามไปด้วย (Inaba et al., 1995)

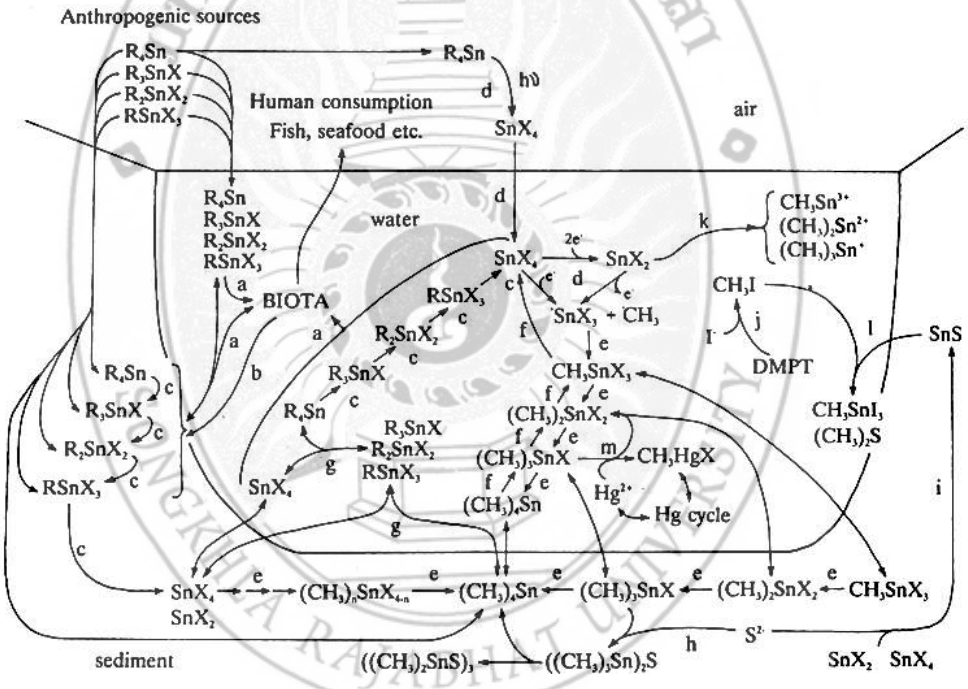
ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดกับตะกอน (Adsorption) ของไตรบิวทิลทินในแหล่งน้ำ ได้แก่ ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon) (Behra et al., 2003; Bangkedphol et al., 2009) ปริมาณแร่ดินเหนียว (Clay mineral) (Bangkerdphol et al., 2009) ความเค็ม (Salinity) (Jensen et al., 2004; Bangkerdphol et al., 2009) ความเป็นกรดด่าง (pH) และอุณหภูมิ (Temperature) (Bangkerdphol et al., 2009) โดยพบว่าไตรบิวทิลทินและสารประกอบดีบุกอินทรีย์ มีความสามารถในการดูดติด (Sorption) ที่ดี ในสภาพที่มีสารอินทรีย์คาร์บอนและแร่ดินเหนียวสูง (Hoch, & Schwesig, 2004; Bangkerdphol et al., 2009) หรือในสภาวะที่ pH = 7 และสามารถดูดติดกับตะกอนในน้ำจืดได้ดีกว่าในน้ำทะเล รวมถึงดูดติดกับตะกอนได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิน้ำสูงขึ้นด้วย (Bangkerdphol et al., 2009)

อัตราการชะละลาย (Leaching) ของไตรบิวทิลทินจากแหล่งกำเนิดและการแพร่กระจาย (Distribution) ระหว่างน้ำและตะกอน สัดส่วนระหว่างของเหลวและของแข็ง ชนิดของแร่ธาตุ เช่น Kaolinite Montmorillonite และ Quartz ยังเป็นปัจจัยที่สำคัญในการพิจารณาการสะสม การเคลื่อนย้ายของไตรบิวทิลทินในสิ่งแวดล้อม และความเสี่ยงต่อระบบนิเวศแห่งนั้นด้วย (Inaba et al., 1995; Hoch, & Schwesig, 2004)

นอกจากนี้พบว่าฤดูกาลมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารไตรบิวทิลทินในแหล่งน้ำด้วย โดยสำนักจัดการคุณภาพน้ำได้ตรวจวัดความเข้มข้นของสารไตรบิวทิลทินในแหล่งน้ำจืดสำคัญในประเทศไทย ได้แก่ แม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำท่าจีน แม่น้ำแม่กลอง และแม่น้ำบางปะกง พบว่าในฤดูแล้งจะมีการปนเปื้อนของสารไตรบิวทิลทินสูงกว่าในฤดูฝน (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2552) ซึ่งฤดูกาลเป็นสาเหตุหนึ่งที่สำคัญที่ทำให้ปริมาณของสารประกอบอินทรีย์ไตรบิวทิลทิน และไดบิวทิลทิน ในทะเลไอซ์แลนด์ตอนใต้ในช่วงฤดูร้อนสูงกว่าช่วงฤดูหนาวถึง 5-10 เท่า โดยไม่มีนัยสำคัญจากกิจกรรมการขนส่งทางเรือในพื้นที่นั้นซึ่งมีความแตกต่างกันน้อยมากในสองฤดูกาลนั้นด้วย (Skarphédinsdóttir et al., 1996)

2.7 การถ่ายโอนออร์แกโนทินในสิ่งแวดล้อม

ออร์แกโนทินที่มีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมโดยส่วนใหญ่มาจากการใช้สารเคมีที่มีส่วนผสมของออร์แกโนทินโดยมนุษย์ ออร์แกโนทินเป็นสารกลุ่มไม่ชอบน้ำ มีลักษณะเป็นของแข็ง และสามารถตกตะกอนได้ (Ruiz et al., 1996; Rüdel, 2003; Hoch and Schwesig, 2004) โดยส่วนใหญ่จึงพบการสะสมของออร์แกโนทินอยู่ในชั้นตะกอนเป็นสำคัญ (Hoch and Schwesig, 2004; Yamamoto et al., 2009) การเปลี่ยนแปลงปริมาณของออร์แกโนทินในแหล่งน้ำ มาจากอิทธิพลของการดูดซับโดยตะกอน (sorption และ desorption) และการแพร่กระจายไปอยู่ในองค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ ชั้นตะกอน สารแขวนลอยในน้ำ และอากาศ รวมถึงการเปลี่ยนรูปของออร์แกโนทินในน้ำด้วย (Hoch and Schwesig, 2004; Yamamoto et al., 2009) สามารถแสดงภาพจำลองของการเปลี่ยนรูปและการสะสมของออร์แกโนทินในองค์ประกอบดิน น้ำ อากาศ และสิ่งมีชีวิตได้ดังภาพประกอบที่ 2-8



ภาพประกอบที่ 2-8 แบบจำลองการถ่ายโอนออร์แกโนทินในสิ่งแวดล้อม
ที่มา: ดัดแปลงจาก Gadd, 2000

2.8 การย่อยสลายของออร์แกโนทินในสิ่งแวดล้อม

กลไกทางกายภาพ เช่น การดูดซับของตะกอน กลไกทางเคมี เช่น สารเคมี และการย่อยสลายโดยแสง และกลไกทางชีวภาพ เช่น การดูดซับโดยพืช และการย่อยสลายทางชีวภาพ มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณของออร์แกโนทินที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม กลไกเหล่านี้มีส่วนในการกำจัดออร์แกโนทินที่สะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้ (สุบัณฑิต นิ่มรัตน์ และคณะ 2557; Luan et al., 2006; Ayanda et al., 2012) พบว่าการดูดซับเป็นกลไกที่สำคัญอย่างมากต่อการลดลงของออร์แกโนทินใน

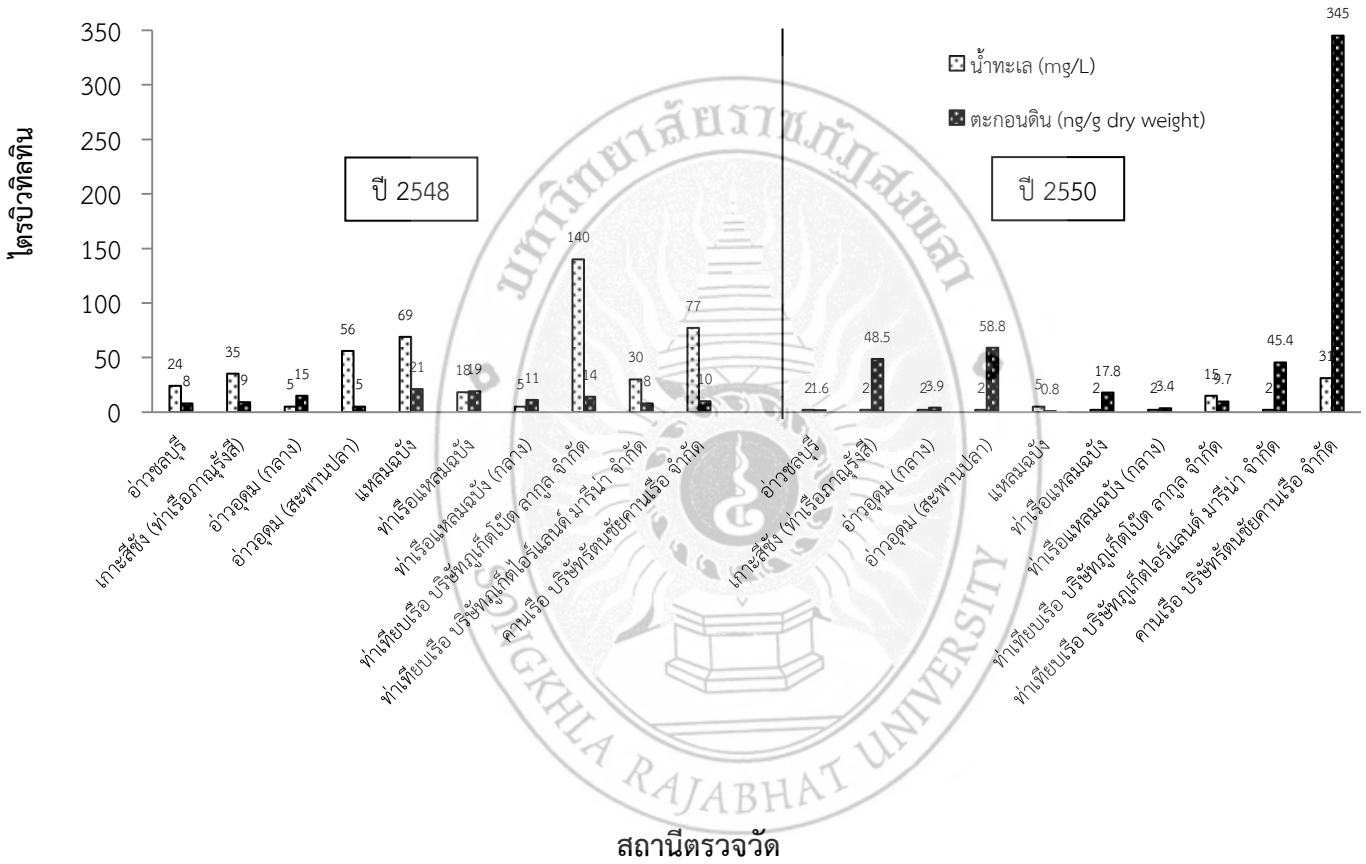
แหล่งน้ำ (Ayanda et al., 2012) และกลไกการย่อยสลายทางชีวภาพเป็นกลไกหลักที่สามารถลดความเป็นพิษด้วยการเปลี่ยนรูปไดบิวทิลทินและโมโนบิวทิลทินได้ (Ruiz et al., 1996) ออร์แกโนทินสามารถแยกตัวออกจากน้ำได้ง่าย และดูดติดแน่นกับอนุภาคแขวนลอยในน้ำและตะกอนดิน (Antizar-Ladislao, 2008, Ayanda et al., 2012) นอกจากนี้การย่อยสลายออร์แกโนทินโดยแสงในน้ำสามารถเกิดขึ้นได้เช่นกัน หากแต่ระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายใช้เวลานานมาก ส่วนใหญ่จะพิจารณาจากค่าครึ่งชีวิตของออร์แกโนทิน เช่น อาจใช้เวลาประมาณ 3 เดือนสำหรับครึ่งชีวิตของไตรบิวทิลทินโดยการย่อยสลายด้วยแสง มากกว่า 6 วันหรือยาวนานเป็นสัปดาห์สำหรับครึ่งชีวิตของไตรบิวทิลทินในน้ำทะเลหรือน้ำจืด หรือมากกว่า 2-10 ปีสำหรับเปลี่ยนรูปของไตรบิวทิลทินในชั้นตะกอนลึกในแบบไร้อากาศ เป็นต้น (Rüdel, 2003) ซึ่งสามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่าครึ่งชีวิตของไตรบิวทิลทินในตะกอน (ปี) ยาวนานกว่าในน้ำ (วันหรือสัปดาห์) (Ruiz et al., 1996)

2.9 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของออร์แกโนทิน

การวิเคราะห์ออร์แกโนทินในสิ่งแวดล้อมประกอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์หลายขั้นตอน ได้แก่ การวิเคราะห์อนุพันธ์ การสกัด การแยก และการตรวจวัด ซึ่งต้องอาศัยความถูกต้องและแม่นยำมาก เนื่องจากระดับของออร์แกโนทินที่ตรวจวัดมักอยู่ในระดับความเข้มข้นต่ำๆ เช่น ในน้ำทะเลตรวจสามารถตรวจวัดได้ที่ระดับ ng/L และผลกระทบจากเกลือซึ่งทำให้การวิเคราะห์ยากยิ่งขึ้นได้ การตรวจวัดปริมาณของออร์แกโนทินสามารถใช้วิธี Gas chromatography (GC) ร่วมกับ atomic absorption spectrometry (AAS) Flame photometric detection (FPD) Pulsed flame photometric detection (PFPD) หรือ Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) (Antizar-Ladislao, 2008) นอกจากนี้งานวิจัยบางชิ้นเลือกใช้การบ่งชี้อันตรายจากออร์แกโนทินด้วยการใช้ความผิดปกติทางเพศของสัตว์ทะเลเป็นตัวชี้วัดอันตรายแทนการวิเคราะห์อันตรายจากการวัดปริมาณของออร์แกโนทินในน้ำ ตะกอน และสัตว์ทะเล (Antizar-Ladislao, 2008)

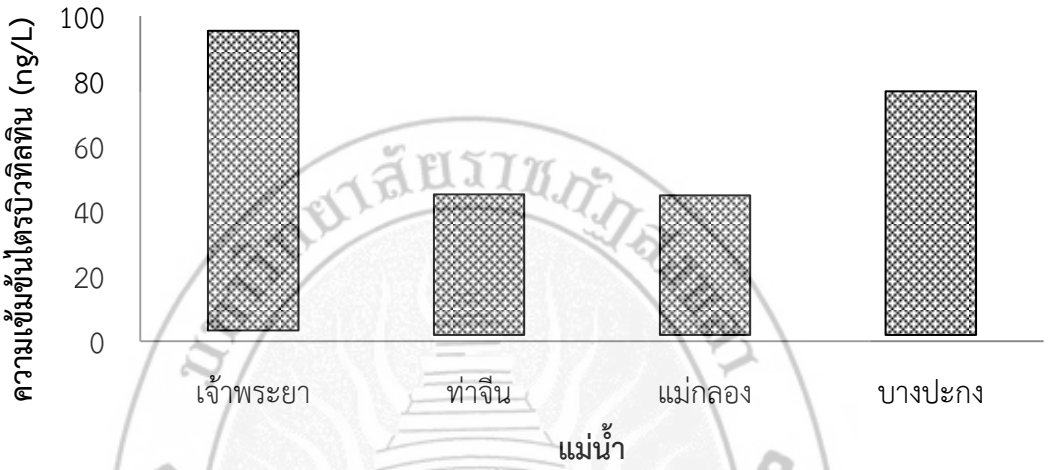
2.10 ออร์แกโนทินในแหล่งน้ำต่างๆ ในประเทศไทย

สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ ได้รายงานการตรวจวัดปริมาณไตรบิวทิลทินในน้ำทะเลและตะกอนดินในอ่าวและท่าเรือสำคัญในประเทศไทย ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-9



ภาพประกอบที่ 2-9 ปริมาณไตรบิวทิลทินในน้ำทะเลและตะกอนดินในประเทศไทย
ที่มา: ดัดแปลงจาก สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2550

นอกจากนี้ในปี 2552 สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ ยังสามารถตรวจพบสารไตรบิวทิลทินในแหล่งน้ำจืดที่เป็นแม่น้ำสายหลัก โดยแสดงปริมาณไตรบิวทิลทินในแม่น้ำสายหลักในประเทศไทยจากรายงานการจัดการมลพิษจากสารประกอบดีบุกอินทรีย์ชนิดไตรบิวทิลของสำนักจัดการคุณภาพน้ำ ปี 2552 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-10

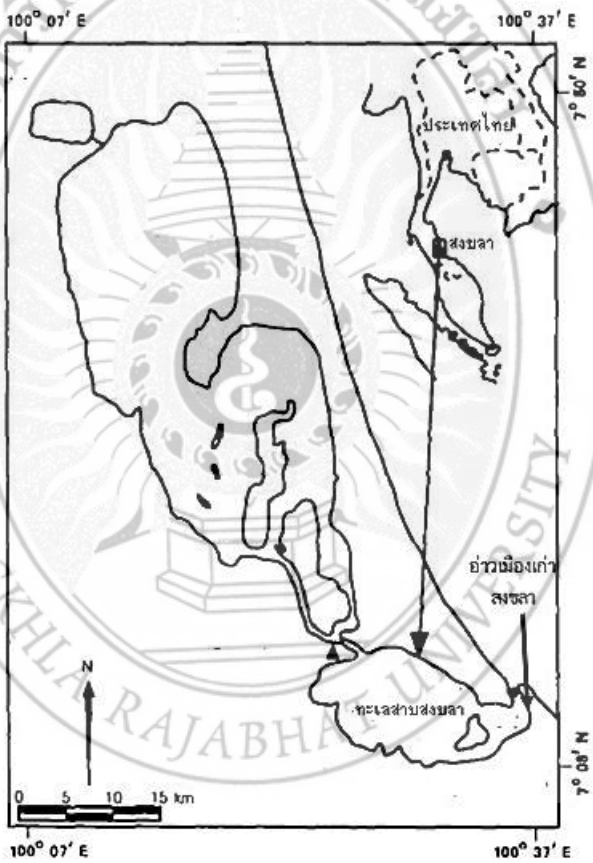


ภาพประกอบที่ 2-10 ปริมาณไตรบิวทิลทินในแม่น้ำสายหลักในประเทศไทย
ที่มา: ดัดแปลงจาก สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2552

การศึกษาปริมาณและผลกระทบของออร์แกโนทินในพื้นที่ทะเลสาบสงขลาตอนล่างยังคงมีการศึกษาน้อยมาก ใน ปี ค.ศ. 1995 ได้มีการวิเคราะห์ปริมาณของออร์แกโนทินในตะกอนดินและหอยแมงภู่ในพื้นที่ทะเลสาบสงขลาตอนล่าง พบว่าในตะกอนดินมีการสะสมของไตรบิวทิลทิน 36 ng/g ไดบิวทิลทิน 9 ng/g และโมโนบิวทิลทิน 7 ng/g การวิเคราะห์การสะสมของออร์แกโนทินในหอยแมลงภู่ในปีเดียวกัน พบว่ามีไตรบิวทิลทิน 27 ng/g ไดบิวทิลทิน 5 ng/g และโมโนบิวทิลทิน 3 ng/g (Kan-atireklap et al., 1997a; Kan-atireklap et al., 1997b) ต่อมาในปี ค.ศ. 2006 ได้มีการตรวจพบความผิดปกติทางเพศของสัตว์ทะเลจำพวกหอยฝาเดียวในพื้นที่ทะเลสาบสงขลา 4.7% (Swennen et al., 2009) และในปี ค.ศ. 2012 พบว่าปริมาณของออร์แกโนทินในทะเลสาบสงขลาเพิ่มสูงขึ้น สามารถวิเคราะห์ค่าสูงสุดของออร์แกโนทินในตะกอนดินในรูปไตรบิวทิลทิน 90 ng/g ไดบิวทิลทิน 32 ng/g และโมโนบิวทิลทิน 43 ng/g (Hajisamoh, 2013) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในพื้นที่ทะเลสาบสงขลาและอ่าวเมืองเก่าสงขลามีความเสี่ยงจากการได้รับอันตรายจากออร์แกโนทินอย่างมาก แม้ปริมาณของออร์แกโนทินที่วิเคราะห์ได้ยังไม่เกินจากมาตรฐานกำหนด (Hajisamoh, 2013) ด้วยเหตุผลที่ว่าการปนเปื้อนของออร์แกโนทินส่วนใหญ่จะพบได้ในตะกอนดินมากกว่าในน้ำทะเล เนื่องจากออร์แกโนทินมีคุณสมบัติการละลายน้ำที่ไม่ดี ตกจมและดูดซับในตะกอนตกตะกอนได้ง่าย ดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณที่สะสมอยู่ในตะกอนดิน กลไกการตกจมและกลไกการแขวนลอยใหม่จึงมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ผลกระทบและโอกาสแพร่กระจายในสิ่งแวดล้อม

2.11 ทะเลสาบสงขลา

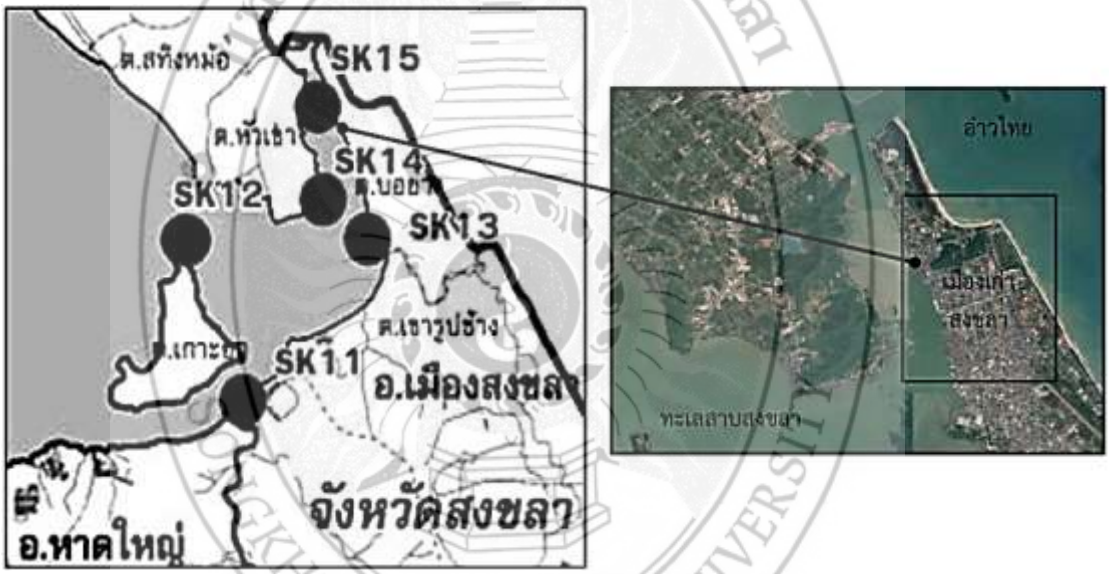
ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา เป็นลุ่มน้ำทะเลสาบที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย ตั้งอยู่ทางภาคใต้ของประเทศไทย (ภาพประกอบที่ 2-11) ติดต่อพื้นที่ 3 จังหวัด ได้แก่ สงขลา พัทลุง และนครศรีธรรมราช มีพื้นที่รวม 1,017 ตารางกิโลเมตร แบ่งเป็นทะเลสาบตอนบน (491 ตารางกิโลเมตร) ทะเลสาบตอนกลาง (336 ตารางกิโลเมตร) และทะเลสาบตอนล่าง (190 ตารางกิโลเมตร) (Chesoh and Lim, 2008) สภาพความเค็มของน้ำในทะเลสาบสงขลามีการเปลี่ยนแปลงความเค็มเป็นน้ำกร่อยขึ้นกับฤดูกาล ที่ความลึกเฉลี่ยประมาณ 1.2 เมตร (Angsupanich and Rakkheaw, 1997) ทะเลสาบสงขลาเป็นแหล่งนิเวศทางทะเลที่สำคัญ มีการทำประมง การเลี้ยงกุ้ง การทำการเกษตร การเลี้ยงสัตว์เพื่อการค้า โรงงานอุตสาหกรรม แหล่งท่องเที่ยว และที่ตั้งของชุมชนโดยรอบพื้นที่ (จิรารัตน์ เรี่ยมเจริญ และคณะ 2551; Chesoh and Lim, 2008)



ภาพประกอบที่ 2-11 ตำแหน่งที่ตั้งทะเลสาบสงขลา
ที่มา: ดัดแปลงจาก Angsupanich and Rakkheaw, 1997)

2.12 ชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา

ชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาอยู่ในพื้นที่ตอนกลางของทะเลสาบสงขลาตอนล่างก่อนถึงบริเวณปากทะเลสาบ พื้นที่ของชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาเป็นพื้นที่ต่อเนื่องของพื้นที่เมืองเก่าสงขลาตามประกาศคณะกรรมการอนุรักษ์และพัฒนากรุงรัตนโกสินทร์และเมืองเก่า พ.ศ. 2533 (ภาคีคนรักเมืองสงขลาสมาคม, 2557) ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่เป็นย่านธุรกิจ แหล่งท่องเที่ยว และย่านที่อยู่อาศัยที่มีประชากรความหนาแน่นตลอดแนวชายฝั่ง เป็นเส้นทางคมนาคมขนส่งทางน้ำ ท่าเทียบเรือ อู่ซ่อมเรือขนาดต่างๆ จำนวนมาก มีกิจกรรมที่ก่อให้เกิดของเสียที่ระบายทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ เช่น ชุมชน และการทำประมง (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2548) หากพิจารณาตำแหน่งอ้างอิงตามตำแหน่งการตรวจติดตามคุณภาพน้ำของสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 16 พบว่าชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาตั้งอยู่ภายในบริเวณจุด SK13 และ SK15 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-12



ภาพประกอบที่ 2-12 ตำแหน่งที่ตั้งชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา
ที่มา: ดัดแปลงจาก สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 16, 2552; ภาคีคนรักเมืองสงขลาสมาคม, 2557

2.13 คุณภาพน้ำชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการจัดทำแผนแม่บทการพัฒนาลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา ได้ทำการแบ่งพื้นที่ของทะเลสาบสงขลาตอนล่างไว้ 3 ส่วน ดังแสดงในตารางที่ 2-1 (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2548)

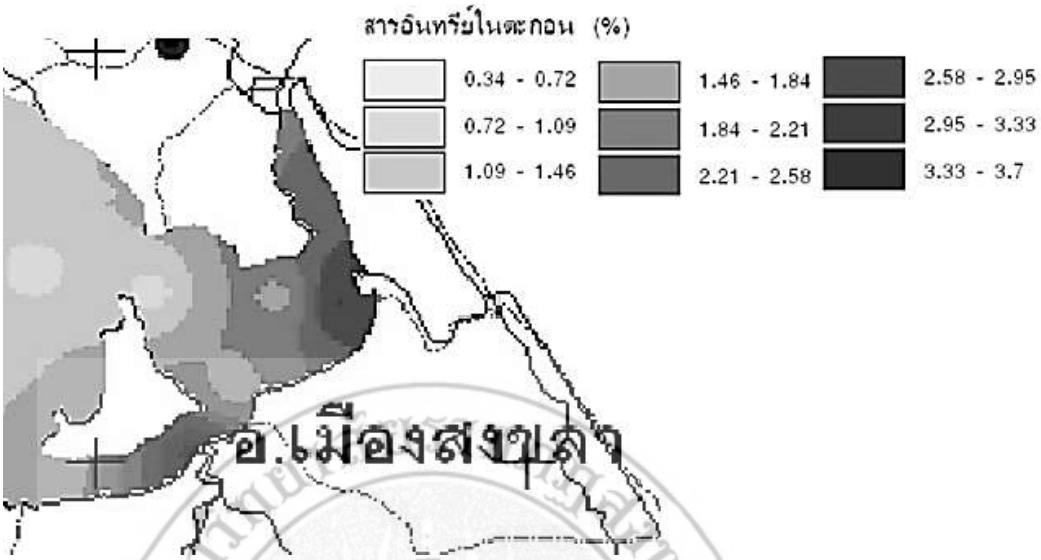
ตารางที่ 2-1 คุณภาพน้ำในพื้นที่ทะเลสาบสงขลาตอนล่าง

ส่วนที่	พื้นที่	ลักษณะกายภาพ	คุณภาพน้ำ
1	บริเวณชุมชนหัวเขาแดงและชุมชนเกาะยอ	แหล่งที่อยู่อาศัยหนาแน่นและมีการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจำนวนมาก โดยเฉพาะการเลี้ยงปลาในกระชังที่มีพื้นที่การเพาะเลี้ยงแออัด บางครั้งเกิดปัญหาการขาดแคลนออกซิเจน เมื่อน้ำนิ่งและมีการระบายที่ไม่เพียงพอ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ปลาในกระชังตายเป็นจำนวนมาก	พอใช้
2	เขตเมืองสงขลา	ย่านธุรกิจและย่านที่อยู่อาศัยที่หนาแน่นตลอดริมฝั่งทะเลสาบและมีกิจกรรมการขนส่งทางน้ำหนาแน่น มีท่าเทียบเรือขนส่งจำนวนมาก รวมทั้งอู่ซ่อมเรือขนาดต่างๆ กิจกรรมเหล่านี้มีส่วนก่อให้เกิดของเสียที่ระบายทิ้งสู่แหล่งน้ำ	พอใช้
3	บริเวณชายทะเล	ได้รับอิทธิพลของคลื่นลมจากทะเลที่ช่วยหมุนเวียนมวลน้ำและแลกเปลี่ยนออกซิเจน	คุณภาพน้ำต่ำกว่าน้ำทะเลทั่วไป

ที่มา: สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2548

พื้นที่บริเวณใกล้เคียงชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาในเขตพื้นที่ทะเลสาบสงขลาตอนล่างมีคลองสองสายที่ระบายลงสู่ทะเลสาบ ได้แก่ คลองสำโรง และคลองพะวง (จิรารัตน์ เรี่ยมเจริญ และคณะ 2551) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้คุณภาพน้ำทะเลสาบเสื่อมโทรมและทรัพยากรสัตว์น้ำลดลง (จิรารัตน์ เรี่ยมเจริญ และคณะ 2551; Chesoh and Lim, 2008) จากรายงานสถานการณ์คุณภาพแหล่งน้ำผิวดินในพื้นที่จังหวัดสงขลา ปี 2547-2551 พบว่าคลองสำโรง (SK13) เป็นหนึ่งในคลองที่มีสภาพเสื่อมโทรมมาก และพื้นที่โดยรอบอ่าวเมืองเก่าสงขลา (SK14 และSK15) เป็นพื้นที่ที่มีคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์พอใช้ (สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 16, 2552)

นอกจากนี้สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ได้รายงานปริมาณสารอินทรีย์ในตะกอนพื้นที่ทะเลสาบสงขลาตอนล่าง พบว่าพื้นที่อ่าวเมืองเก่าสงขลาจัดเป็นพื้นที่ที่มีผลกระทบจากปริมาณสารอินทรีย์ในตะกอนในระดับที่สูงกว่า 2.21% (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2548) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-13



ภาพประกอบที่ 2-13 สารอินทรีย์ในตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนล่าง
ที่มา: ดัดแปลงจาก สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2548

ดังนั้นจากข้อมูลคุณภาพน้ำและมลพิษในตะกอนข้างต้น แสดงให้เห็นว่าพื้นที่บริเวณชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนจากชุมชน การท่องเที่ยว การคมนาคมทางน้ำ ท่าเรือ และการทำประมงเป็นสำคัญ แต่เป็นการเฝ้าระวังปัญหามลพิษจากสารอินทรีย์ยังไม่มีการเฝ้าระวังปัญหามลพิษจากสารออร์แกโนทินในน้ำเสียชุมชนที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทางทะเลเหมือนในบางประเทศ

2.14 แบบจำลอง

แบบจำลองเป็นตัวแทนของระบบ มีวัตถุประสงค์เพื่อการคาดการณ์ หรือทำหน้าที่อธิบายระบบ ให้สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลง หรือผลกระทบได้ แบ่งได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ แบบจำลองเหมือนของจริง ซึ่งมีรูปแบบเหมือนของจริงทุกประการ แบบจำลองเลียนแบบของจริง ซึ่งมีองค์ประกอบตัวแทนเพียงชุดเดียว และแบบจำลองที่ใช้สัญลักษณ์ ซึ่งใช้สัญลักษณ์เป็นตัวแทน (นิพนธ์ ตั้งธรรม, 2539)

2.15 ประโยชน์ของแบบจำลอง

การใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของระบบนิเวศ วัฏจักรต่างๆ ในธรรมชาติ ความสัมพันธ์ระหว่างดิน น้ำ และพืช หรือการพึ่งพาอาศัยกันของสิ่งมีชีวิตมักถูกเลือกเป็นแนวทางหนึ่ง เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆ ของสิ่งแวดล้อม แบบจำลองสามารถอธิบายกระบวนการทำงานของระบบที่มีอย่างพื้นที่ลุ่มน้ำให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น สามารถจำแนกองค์ประกอบย่อยจำนวนมากได้และสามารถนำมารวมกันในรูปแบบที่เป็นลำดับ แสดงข้อเท็จจริงเกี่ยวกับระบบ และประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนต่างๆ ของระบบได้ นอกจากนี้ยังใช้เพื่อการตัดสินใจในการพัฒนาระบบ

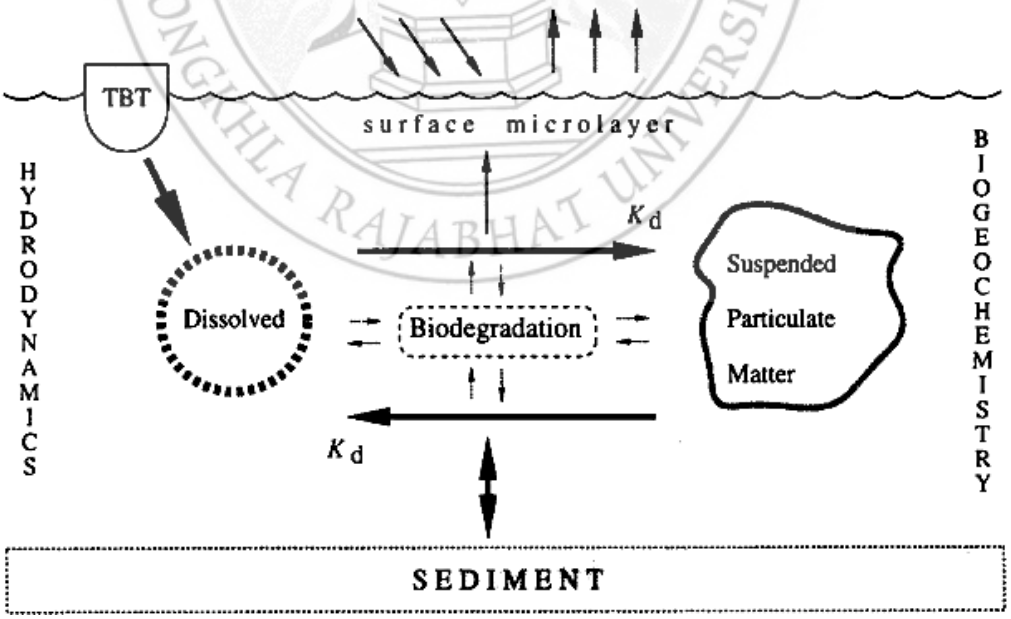
เกิดความคิดใหม่ และสามารถคาดการณ์สิ่งที่อาจเกิดขึ้นได้ (นิพนธ์ ตั้งธรรม, 2539) ดังนั้นการนำแบบจำลองมาใช้อาจเพื่อจำลองสถานการณ์ที่ไม่สามารถมองเห็นให้สามารถเข้าถึงได้

2.16 โปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง

ในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง โปรแกรมถือเป็นองค์ประกอบสำคัญ STELLA เป็นโปรแกรมหนึ่งที่นิยมใช้ในการศึกษา โดยการใช้ภาพสัญลักษณ์ที่เป็นตัวแทนการทำงานของระบบ โปรแกรมนี้ได้รับการพัฒนาโดยบริษัท High Performance Systems ซึ่งเดิมได้นำมาใช้เพื่อการวิเคราะห์ระบบทางเศรษฐศาสตร์ ต่อมาได้มีการนำมาประยุกต์ในการพัฒนาแบบจำลองเพื่อศึกษาชลศาสตร์ และพลวัตระบบของพื้นที่ชุ่มน้ำ (Zhang and Mitsch, 2005; Pimpan and Jindal, 2009; Kumar and Zhao, 2010)

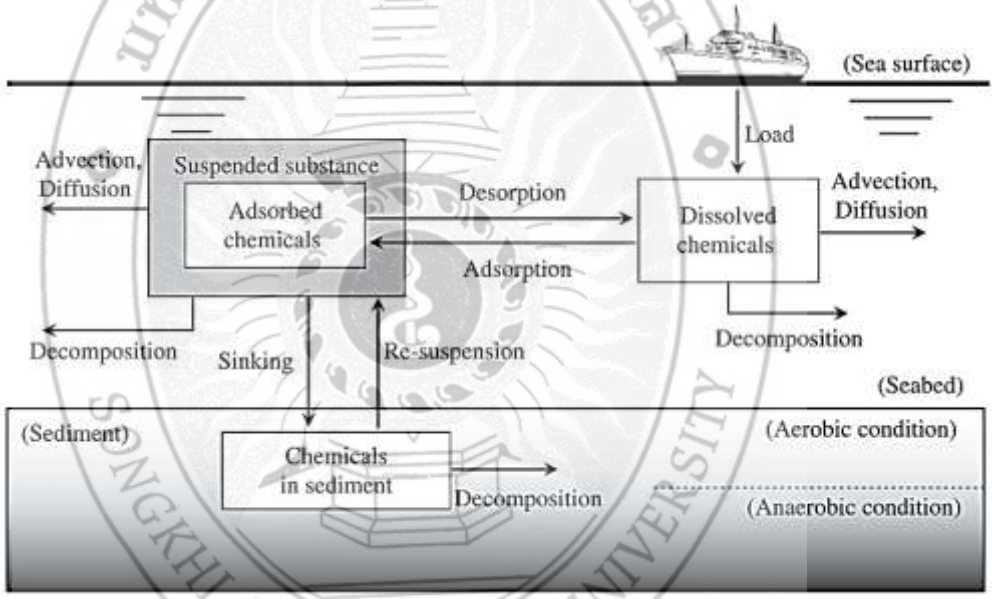
2.17 แบบจำลองของออร์แกโนทินในแหล่งน้ำ

Ruiz และคณะ (1996) ได้นำเสนอแผนภาพแสดงการถ่ายโอนไตรบิวทิลทินในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเล ดังภาพประกอบที่ 2-14 พบว่าไตรบิวทิลทินที่ชะละลายลงสู่แหล่งน้ำ โดยปกติทั่วไปมีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic character) แต่ก็สามารถที่จะละลายน้ำแขวนลอยในน้ำได้ โดยสามารถสะสมเป็นชั้นบางๆ (Surface microlayer, SMIC) ได้ที่ผิวหน้าของน้ำ (Air-water interface) และในขณะเดียวกันก็สามารถดูดติดกับอนุภาคแขวนลอยและถูกกำจัดจากองค์ประกอบน้ำได้ด้วยการตกจมในตะกอน รวมถึงสามารถละลายกลับสู่น้ำได้เช่นกัน โดยเป็นผลจากอิทธิพลของ pH สารอินทรีย์ละลาย ความเค็ม และสารแขวนลอย โดยกลไกที่มีอิทธิพลต่อการลดลงและเปลี่ยนรูปของไตรบิวทิลทินคือการย่อยสลายทางชีวภาพ การย่อยสลายด้วยแสง และการระเหย (Ruiz et al., 1996)



ภาพประกอบที่ 2-14 แผนภาพแสดงการถ่ายโอนไตรบิวทิลทินในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเล
ที่มา: ดัดแปลงจาก Ruiz et al., 1996

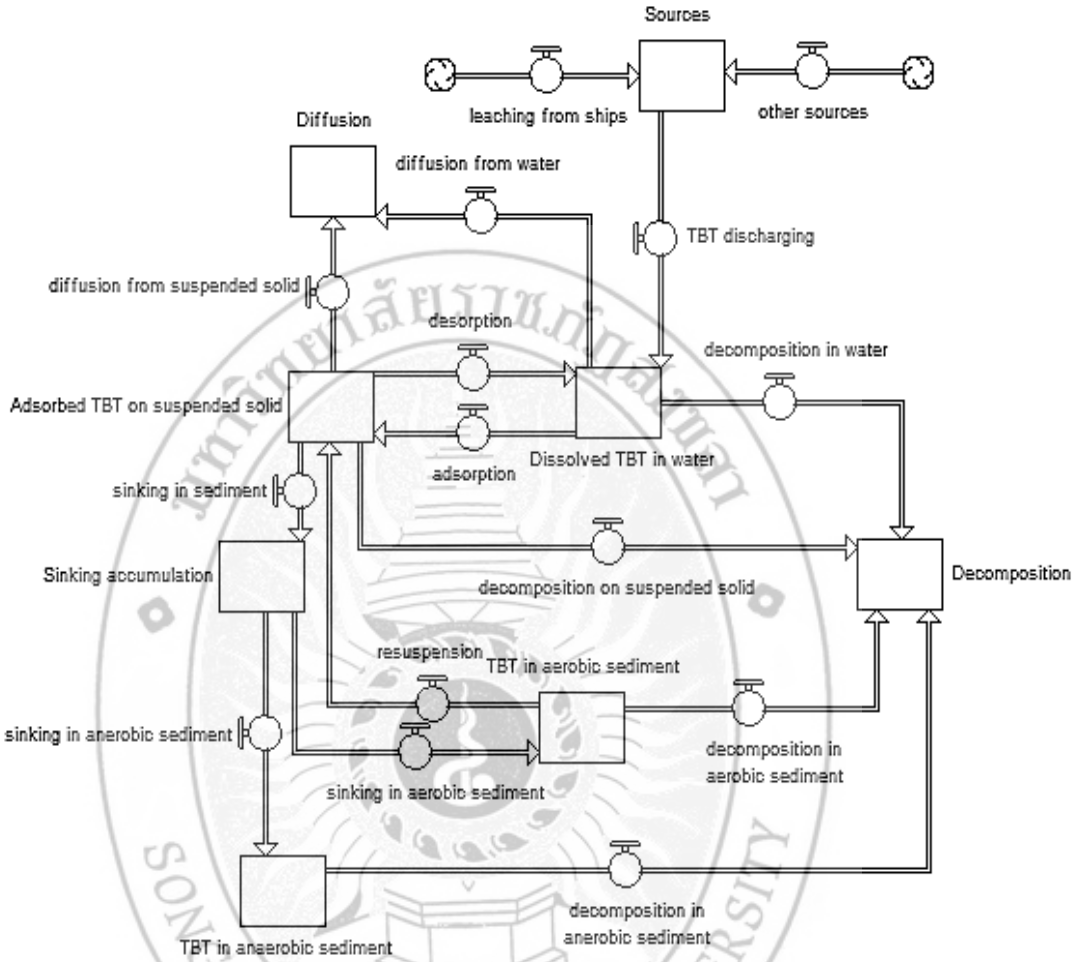
Yamamoto และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองเพื่อประเมินความเสี่ยงจากการปนเปื้อนไตรบิวทิลทินในพื้นที่อ่าวอิเซ (Ise Bay) ประเทศญี่ปุ่น พบว่าไตรบิวทิลทินมาจากการชะละลายจากสีกันเพรียงที่ใช้กับเรือขนส่ง ไตรบิวทิลทินมีความสามารถในการละลายน้ำ แขวนลอยในน้ำ ตกตะกอนอยู่ในดิน และแพร่กระจายสู่บริเวณข้างเคียงได้ (Yamamoto et al., 2009) สามารถแสดงรูปแบบของการถ่ายโอนไตรบิวทิลทินในอ่าวอิเซได้ดังภาพประกอบที่ 2-15 ซึ่งประเด็นหนึ่งที่สำคัญมากจากการพิจารณาด้วยแบบจำลองภาพ คือ การแขวนลอยใหม่ของไตรบิวทิลทินจากตะกอนดินกลับสู่น้ำ (re-suspension) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแม้จะไม่มีการปลดปล่อยออร์แกโนทินลงสู่น้ำ แต่ผลกระทบของการสะสมของออร์แกโนทินในชั้นดินในระยะเวลาที่ผ่านมายังคงอยู่เป็นระยะเวลานานเนื่องจากค่าครึ่งชีวิตของออร์แกโนทินยาวนาน และการแขวนลอยใหม่กลับสู่น้ำทำให้เกิดการแพร่กระจายไปสู่สิ่งแวดล้อมโดยรอบ รวมทั้งเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้การกำจัดออร์แกโนทินให้หมดสิ้นไปจากสิ่งแวดล้อมที่เคยมีการปนเปื้อนแล้วทำได้ยาก



ภาพประกอบที่ 2-15 แบบจำลองการถ่ายโอนไตรบิวทิลทินในอ่าวอิเซ
ที่มา: ดัดแปลงจาก Yamamoto et al., 2009

Ophithakorn และคณะ (2014) ได้แสดงแบบจำลองการถ่ายโอนของไตรบิวทิลทินในทะเลสาบสงขลาตอนล่างไว้ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-16 โดยแสดงโอกาสปนเปื้อนไตรบิวทิลทินในแหล่งน้ำจากแหล่งที่มาของสารไตรบิวทิลทินสองแหล่งคือเรือและจากน้ำเสียต่างๆ แบบจำลองยังให้ความสำคัญกับปริมาณของไตรบิวทิลทินในน้ำ สารแขวนลอย และตะกอนดินในการแสดงปริมาณรวมของไตรบิวทิลทินในแหล่งน้ำ และแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของไตรบิวทิลทินที่อาจเกิดขึ้นจากกลไกในสิ่งแวดล้อมต่างๆ เช่น การแพร่ การย่อยสลาย การตกจม การแขวนลอยใหม่ (Ophithakorn et al., 2014) โดยแบบจำลองแผนภาพที่นำเสนอยังเป็นเพียงแบบจำลองตามแนวคิด

และทฤษฎีสำหรับชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา ซึ่งยังไม่ได้ถูกพิสูจน์และวิเคราะห์การถ่ายโอนของไตรบิวทิลทินชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาในเชิงปริมาณจากการตรวจวัดปริมาณไตรบิวทิลทินโดยตรง



ภาพประกอบที่ 2-16 แบบจำลองแผนภาพการถ่ายโอนไตรบิวทิลทินชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา
ที่มา: ดัดแปลงจาก Ophithakorn et al., 2014

บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 วัสดุ

1. ตะกอนดินและน้ำตัวอย่างจากจุดเก็บตัวอย่าง 5 จุดบริเวณชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา
2. เครื่องแก้วที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ
3. ขวด Polycarbonate
4. ถุงพลาสติก
4. เชือกไนลอน
5. หลอด vial ขนาด 1.5 ml

3.1.2 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมเครื่องแก้ว การเตรียมสารละลายไตรบิวทิลทิน การเตรียมอนุพันธ์ไตรบิวทิลทินและการเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไตรบิวทิลทินในน้ำและตะกอนดิน ดังแสดงในตารางที่ 3-1

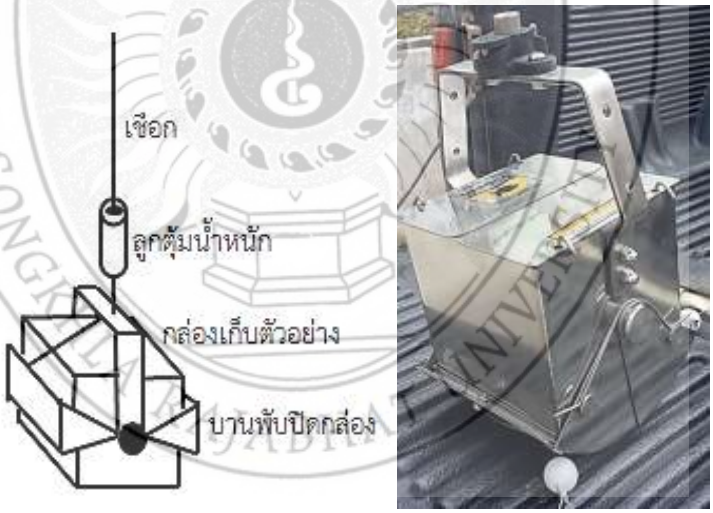
ตารางที่ 3-1 สารเคมี

ลำดับที่	สารเคมี	CAS number
1	Acetic acid	CAS-64-19-7 (USEPA, 1989; Sigma-Aldrich, 2015a)
2	Acetone	CAS-67-64-1 (Sigma-Aldrich, 2015b)
3	Formaldehyde	CAS-50-00-0 (Sigma-Aldrich, 2015c)
4	Hexane	CAS-110-54-3 (Sigma-Aldrich, 2015d)
5	Hexylmagnesium bromide	CAS-3761-92-0 (Sigma-Aldrich, 2015e)
6	Hydrochloric acid	CAS-7647-01-0 (USEPA, 1989; Sigma-Aldrich, 2015f)
7	Methanol	CAS-67-56-1 (USEPA, 1989; Sigma-Aldrich, 2015g)
8	Nitric acid	CAS-7697-37-2 (Sigma-Aldrich, 2015h)
9	Butyltin Chlorides Calibration Mixture - n-Butyltin trichloride - Di-n-Butyltin dichloride - Tri-n-Butyltin chloride	(USEPA, 1989; RESTEK) CAS-1118-46-3 CAS-683-18-1 CAS-1461-22-9
10	Tributyltin chloride (liquid 95-96%)	CAS-1461-22-9 (USEPA, 1989; Sigma-Aldrich, 2015i)
11	Deionized water	CAS-7732-18-5 (USEPA, 1989; Sigma-Aldrich, 2015j)

3.1.3 อุปกรณ์

1. อุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างตะกอนดิน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-1
2. เครื่อง Ultrasonic bath ยี่ห้อ Citizen รุ่น YJ 5200-DT ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-2
3. เครื่องชั่ง ยี่ห้อ Citizen รุ่น CY 320
4. pH meter ยี่ห้อ Hanna รุ่น HI98128
5. ไมโครปิเปต ยี่ห้อ Capp Bravo
6. ตู้อบ ยี่ห้อ Memmert
7. Rotary evaporator
8. เครื่อง Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer รุ่น 3460, Applied Research Laboratories: OES (ICP-OES) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-3
9. เครื่อง 6 Gas Chromatography–Mass Spectrometer รุ่น Trace GC Ultra/ ISQMS, Thermo Scientific (GC-ISQMS) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-4

รายละเอียดเครื่องมือและอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ในภาคผนวก ก



ภาพประกอบที่ 3-1 อุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างตะกอนดิน

ภาพประกอบที่ 3-2 เครื่อง Ultrasonic bath

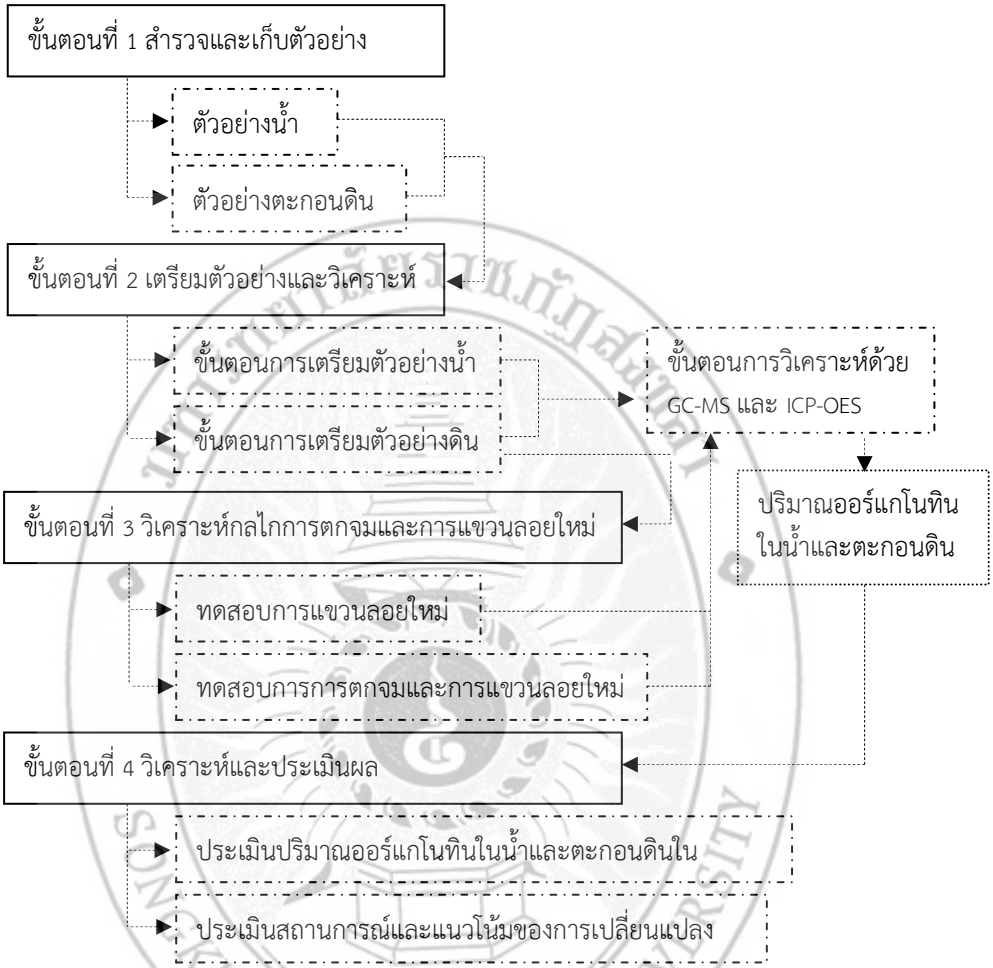
ภาพประกอบที่ 3-3 เครื่อง ICP-OES

ภาพประกอบที่ 3-4 เครื่อง GC-ISQMS

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

3.2 วิธีการ

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 3-5



ภาพประกอบที่ 3-5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

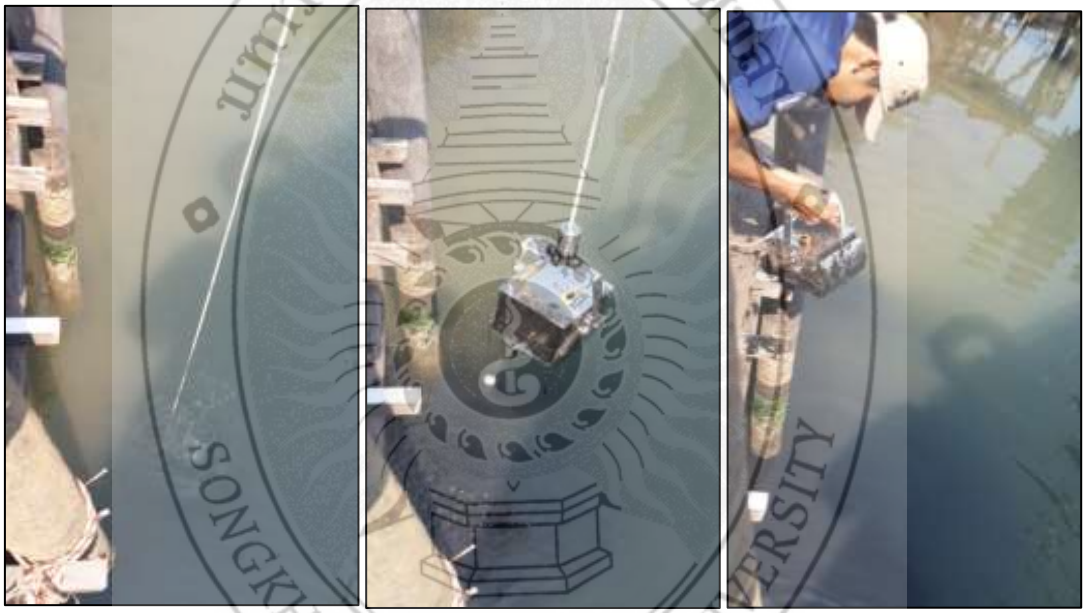
3.2.1 การกำหนดจุดสำรวจ

ทำการกำหนดจุดสำรวจตามแนวชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา โดยแบ่งตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างครอบคลุมระยะทางจากถนนชลเจริญถึงถนนกำแพงเพชร อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา เป็น 5 ตำแหน่ง ได้แก่ท่าแพขนานยนต์สงขลา ท่าเรือตรงข้ามสหกรณ์ออมทรัพย์ตำรวจสงขลา ท่าเรือแหล่งพระราม ท่าเรือโรงสีแดงหับโห้หิ้นและท่าเรือข้างโรงแรมเลคอินน์ ตรวจวัดสมบัติทางกายภาพ-เคมีของน้ำทะเล ได้แก่ ค่าความเป็นกรดด่าง และอุณหภูมิ บันทึกภาพถ่าย และตำแหน่ง GPS โดยใช้สมาร์ทโฟนแอนดรอยด์ ดังแสดงในภาคผนวก ข

3.2.2 การเก็บตัวอย่าง

ตัวอย่างน้ำทะเลและตะกอนดินสามารถเก็บในภาชนะแก้ว หรือพลาสติกชนิด Polycabonate (USEPA, 1989; APHA, 2012) การเก็บตัวอย่างน้ำทะเลชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาทำโดยวิธีการแบบจ้วง (Grab sampling) ที่ความลึกประมาณ 1-1.5 เมตรจากผิวน้ำทะเล โดยเก็บน้ำปริมาณ 90% ของปริมาตรขวด (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2549) โดยขวดเก็บตัวอย่างน้ำผ่านการกลั้วด้วย HCl แล้ว (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2553; Murai et al., 2005) ทำการปิดฝาขวดให้สนิท

สำหรับการเก็บตัวอย่างตะกอนดินชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาทำโดยวิธีการใช้ Ekman Birge grab sampler (Kan-atireklap et al., 1997a; Suehiro et al., 2007; Hajisamoh, 2013) บรรจุตัวอย่างตะกอนดินลงถุงพลาสติก ทำการปิดปากถุงให้สนิท โดยในการเก็บตัวอย่างดินใช้อุปกรณ์สำหรับการเก็บตัวอย่างทำจากสแตนเลส ดังภาพประกอบที่ 3-6



ภาพประกอบที่ 3-6 การเก็บตัวอย่างดินโดยใช้ Ekman Birge grab sampler

3.2.3 การขนส่งและการรักษาตัวอย่าง

ระหว่างการขนส่งให้เก็บรักษาตัวอย่างไว้ในน้ำแข็งหรือภายใต้อุณหภูมิการเก็บ 4°C จนกระทั่งถึงห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างน้ำทะเลและตะกอนดินสามารถเก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิการเก็บ 4°C จนกระทั่งทำการวิเคราะห์ (Burton et al., 2006; Liu et al., 2011) โดยเก็บรักษาตัวอย่างภายใต้อุณหภูมิการเก็บ 4°C ในที่มืด (Michel & Averty, 1999) สำหรับตัวอย่างตะกอนดินใช้สารละลาย 37% Formaldehyde 50 mL ต่อตะกอนดิน 500 g (Kan-atireklap et al., 1997a; Hajisamoh, 2013) ในการรักษาสภาพตัวอย่างด้วย โดยตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างแล้วสามารถเก็บไว้ได้ประมาณ 1 เดือน (USEPA, 1989)

3.2.4 การเตรียมเครื่องแก้วก่อนนำมาใช้

ล้างด้วยน้ำยาล้างเครื่องแก้ว ล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปแช่กรดไนตริก : น้ำ (นพิดา คุณประเสริฐ, 2546; USEPA; 1989) ในการศึกษาใช้อัตราส่วน 10 : 90 (v/v) กรดไนตริก : น้ำกลั่น เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ก่อนนำไปล้างด้วยน้ำ Deionized water และทำให้แห้งก่อนนำมาใช้ (นพิดา คุณประเสริฐ, 2546)

3.2.5 การเตรียมสารเคมีและตัวอย่าง

3.2.5.1 การเตรียมสารละลายไตรบิวทิลทิน

ละลาย 11.2 มิลลิกรัม ไตรบิวทิลทินคลอไรด์ ใน Acetone 1,000 µL เจือจางสารละลาย 100 µL ด้วย Acetone 1,000 µL ได้สารละลายความเข้มข้น 1.0 µg/µL (APHA, 2012) ดูดสารละลาย 5 µL ละลายใน Hexane 1,000 µL ได้สารละลายไตรบิวทิลทินความเข้มข้น 5 µg/mL (5 mg/L = 5 ppm) (ดัดแปลงจาก APHA, 2012)

3.2.5.2 การเตรียมอนุพันธ์ไตรบิวทิลทิน

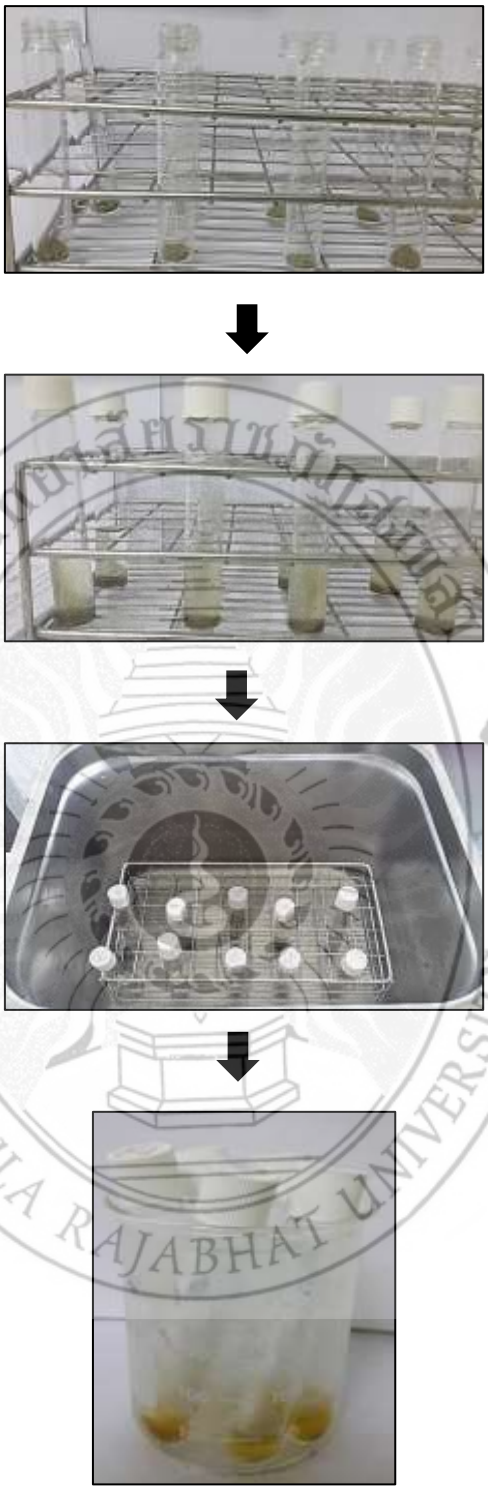
ดูดสารละลายไตรบิวทิลทิน 5 ppm ใน Hexane ลงในขวดตัวอย่าง 1 mL เติม Hexylmagnesium bromide (Grignard reagent) 0.5 mL นำไปแช่ในอ่างน้ำแข็ง 30 นาที เขย่าเป็นครั้งคราว เติม Hydrochloric acid ความเข้มข้น 2M ปริมาตร 2 mL ทิ้งไว้ 5 นาที นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas chromatography mass spectrophotometry (ณัฐพล วะราโภ และคณะ, 2551)

3.2.5.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไตรบิวทิลทินในน้ำ (Liquid - liquid extraction)

นำตัวอย่างน้ำ 400 mL ใส่กรวยแยก เติม Hexane 20 mL เติม Hydrochloric acid จนมี pH 1.7 ทำการสกัด 1 ชั่วโมง แยกชั้น Hexane เก็บไว้ในขวดก้นกลม ทำการระเหยด้วยเครื่อง Rotary evaporator จนเกือบแห้ง ชะด้วย Hexane 2 mL นำสารละลายที่สกัดได้ 1 mL ไปทำอนุพันธ์ เก็บใส่ขวดเก็บตัวอย่าง นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas chromatography mass spectrophotometry (ณัฐพล วะราโภ และคณะ, 2551)

3.2.5.4 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไตรบิวทิลทินในดิน (Methanol - acid - digestion และ Acid - sonication)

นำตัวอย่างดิน 0.2 g ใส่ขวด เติม 3 : 1 Acetic acid : Methanol โดยเติม Acetic acid 3 mL เติม Methanol 1 mL (Centineo et al., 2007; Okoro et al., 2012) จากนั้นนำไป sonication ด้วย Ultrasonic bath ที่ 240 W เป็นเวลา 10 นาที นำสารละลายที่สกัดได้ 1 mL ไปทำอนุพันธ์ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-7 เก็บใส่ขวดเก็บตัวอย่าง นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas chromatography mass spectrophotometry (Okoro et al., 2012)



ภาพประกอบที่ 3-7 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไตรบิวทิลทินในดิน

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

3.2.6 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วย Gas chromatography mass spectrophotometry

3.2.6.1 สภาวะเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองด้วยเครื่อง Gas chromatography mass spectrophotometry (GC-MS) คือ

- คอลัมภ์	Capillary column ยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.32 มิลลิเมตร เคลือบฟิล์มหนา 0.25 ไมโครเมตร (TR5-MS)
- ปริมาตรที่ฉีด	1 ไมโครลิตร (นพิดา คุณประเสริฐ, 2546; APHA, 2012; Okoro et al., 2012)
- แก๊สพา	ฮีเลียม (นพิดา คุณประเสริฐ, 2546; USEPA, 1989; Centineo et al., 2007; APHA, 2012) อัตราการไหล 1.0 mL/min (นพิดา คุณประเสริฐ, 2546)
- เทคนิคการฉีด	Splitless (นพิดา คุณประเสริฐ, 2546; USEPA, 1989; Centineo et al., 2007; APHA, 2012)
- EM Voltage	2106 (นพิดา คุณประเสริฐ, 2546)
- อิเลคตรอนมัลติฟายเออร์	70eV (นพิดา คุณประเสริฐ, 2546; Centineo et al., 2007; APHA, 2012)
- ช่วงมวล	45-450 amu (APHA, 2012)
- Dwell time	100 (นพิดา คุณประเสริฐ, 2546)
- Cycle/sec	2.86 (นพิดา คุณประเสริฐ, 2546)
- Selected ion monitoring (TBT)	305 303 301 m/z (นพิดา คุณประเสริฐ, 2546)
- Method detection level (MDL)	2 ng/L (APHA, 2012)

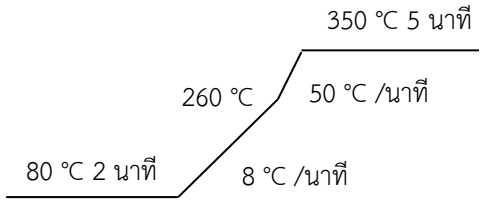
3.2.6.2 หาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบโปรแกรมอุณหภูมิในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS โปรแกรมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ

1) โปรแกรมอุณหภูมิ เริ่มต้นที่ 80 องศาเซลเซียส คงที่ 2 นาที เพิ่มขึ้น 8 องศาเซลเซียสต่อนาที ถึง 260 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้น 50 องศาเซลเซียสต่อนาที ถึง 350 องศาเซลเซียส คงที่ 5 นาที อุณหภูมิช่องฉีดสาร 230 องศาเซลเซียส อุณหภูมิดีเทคเตอร์ 200 องศาเซลเซียส (APHA, 2012)
2) โปรแกรมอุณหภูมิ เริ่มต้นที่ 100 องศาเซลเซียส คงที่ 5 นาที เพิ่มขึ้น 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ถึง 300 องศาเซลเซียส คงที่ 5 นาที อุณหภูมิช่องฉีดสาร 250 องศาเซลเซียส อุณหภูมิดีเทคเตอร์ 200 องศาเซลเซียส (ณัฐพล วะราโภ และคณะ, 2551)
3) โปรแกรมอุณหภูมิ เริ่มต้นที่ 60 องศาเซลเซียส คงที่ 1.5 นาที เพิ่มขึ้น 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ถึง 290 องศาเซลเซียส คงที่ 10 นาที อุณหภูมิช่องฉีดสาร 280 องศาเซลเซียส อุณหภูมิดีเทคเตอร์ 250 องศาเซลเซียส (นพิดา คุณประเสริฐ, 2546)
4) โปรแกรมอุณหภูมิ เริ่มต้นที่ 60 องศาเซลเซียส คงที่ 1 นาที เพิ่มขึ้น 30 องศาเซลเซียสต่อนาที ถึง 300 องศาเซลเซียส อุณหภูมิช่องฉีดสาร 270 องศาเซลเซียส อุณหภูมิดีเทคเตอร์ 230 องศาเซลเซียส (Centineo et al., 2007)

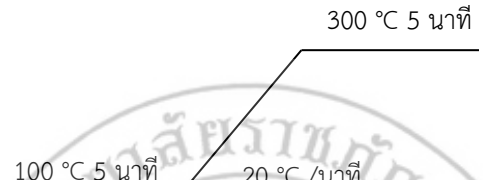
โปรแกรมอุณหภูมิทั้ง 4 แบบ แสดงดังภาพประกอบที่ 3-8 ตั้งค่าอุณหภูมิช่องฉีดสาร (Injection port) อุณหภูมิเริ่มต้นของ Oven อุณหภูมิของดีเทคเตอร์ (Detector) ตั้งค่า Source temperature ตั้งค่า MS quard temperature พิจารณาความถูกต้องสัมพัทธ์ (Mean accuracy or percentage of true value) ค่าที่ดีควรอยู่ในช่วง 92-108% แต่ไม่ควรเกิน 75-125% และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, %RSD) ค่าที่ดีควร ≤ 8% และไม่ควรเกินค่า ≤ 25%

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

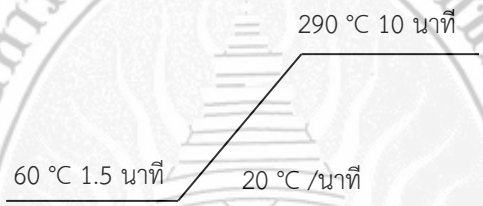
แบบ 1)



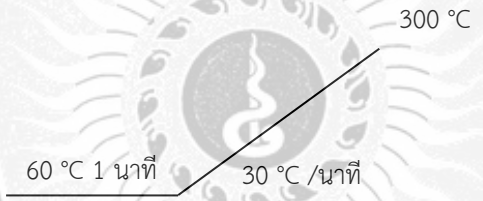
แบบ 2)



แบบ 3)



แบบ 4)



ภาพปะกอบที่ 3-8 โปรแกรมอุณหภูมิในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ ที่ความเข้มข้นของไตรบิวทิลทิน 200 ppm ทำการวิเคราะห์ด้วย GC-MS

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

3.2.7 การศึกษาการตกจมและการแขวนลอยใหม่จากตะกอนดิน

นำตะกอนดินที่อบแห้งและวิเคราะห์ปริมาณออร์แกโนทินแล้ว มาแบ่งเป็น 6 ชุดทดลอง ดังนี้

การศึกษาการแขวนลอยใหม่จากตะกอนดินในปริมาณออร์แกโนทินที่มีอยู่ในธรรมชาติ โดยนำตัวอย่างตะกอนดินผสมน้ำ DI กวนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยแท่งแก้วคน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน และเก็บตัวอย่างต่อเนื่อง โดยรินน้ำและแยกตะกอนดินออกจากกัน ทำการวิเคราะห์ปริมาณไตรบิวทิลทินในตัวอย่างน้ำ (mg Sn/L) และตะกอนดิน (mg Sn/g) วิเคราะห์อัตราการแขวนลอยใหม่ในหน่วย mg Sn/L.h โดยแบ่งเป็นการทดลองเพื่อศึกษาการแขวนลอยใหม่เป็นการทดลองชุดที่ 1 และ 2 (ภาพประกอบที่ 3-9) ดังนี้

การทดลองชุดที่ 1 ศึกษาการแขวนลอยใหม่จากตะกอนดินที่มีปริมาณไตรบิวทิลทินตามธรรมชาติที่เวลา 168 ชั่วโมง โดยนำตัวอย่างตะกอนดินน้ำหนักตัวอย่างละ 15 g ทดสอบโดยการผสมตะกอนดินในน้ำ DI 1 L กวนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยแท่งแก้วคน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เป็นเวลา 30 นาที และทำการเก็บต่อเนื่องทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 168 ชั่วโมง โดยรินน้ำและแยกตะกอนดินออกจากกัน ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและตะกอนดิน

การทดลองชุดที่ 2 ศึกษาการแขวนลอยใหม่จากตะกอนดินที่มีปริมาณไตรบิวทิลทินตามธรรมชาติที่เวลา 24 ชั่วโมง โดยนำตัวอย่างตะกอนดินน้ำหนักตัวอย่างละ 15 g ทดสอบโดยการผสมตะกอนดินในน้ำ DI 1 L กวนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยแท่งแก้วคน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการเก็บต่อเนื่องทุก 4 ชั่วโมง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยรินน้ำและแยกตะกอนดินออกจากกัน ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและตะกอนดิน

ภาพประกอบที่ 3-9 ชุดทดลองการตกจมและการแขวนลอยใหม่

การศึกษาการตกจมและการแขวนลอยใหม่จากตะกอนดินในปริมาณออร์แกโนทินความเข้มข้นสมมุติ โดยนำตัวอย่างตะกอนดินผสมในสารละลายออร์แกโนทิน 1 L กวนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยแท่งแก้วคน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน และเก็บตัวอย่างต่อเนื่อง โดยการรินน้ำและแยกตะกอนดินออกจากกัน ทำการวิเคราะห์ปริมาณไตรบิวทิลทินในตัวอย่างน้ำ (mg Sn/L) และตะกอนดิน (mg Sn/g) วิเคราะห์อัตราการแขวนลอยใหม่ในหน่วย mg Sn/L.h โดยแบ่งเป็นการทดลองเพื่อศึกษาการตกจมเป็นการทดลองชุดที่ 3 และ 4 และการทดลองเพื่อศึกษาการแขวนลอยใหม่เป็นการทดลองชุดที่ 5 และ 6 ดังนี้

การทดลองชุดที่ 3 ศึกษาการตกจมจากตะกอนดินที่มีปริมาณไตรบิวทิลทินความเข้มข้นสมมุติที่เวลา 168 ชั่วโมง โดยนำตัวอย่างตะกอนดินน้ำหนักตัวอย่างละ 15 g ผสมในสารละลายไตรบิวทิลทินคลอไรด์ 1 L กวนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยแท่งแก้วคน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เป็นเวลา 30 นาที และเก็บตัวอย่างทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 168 ชั่วโมง โดยรินน้ำและแยกตะกอนดินออกจากกัน ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและตะกอนดิน

การทดลองชุดที่ 4 ศึกษาการตกจมจากตะกอนดินที่มีปริมาณไตรบิวทิลทินความเข้มข้นสมมุติที่เวลา 24 ชั่วโมง โดยนำตัวอย่างตะกอนดินน้ำหนักตัวอย่างละ 15 g ผสมในสารละลายไตรบิวทิลทินคลอไรด์ 1 L กวนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยแท่งแก้วคน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการเก็บต่อเนื่องทุก 4 ชั่วโมง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยรินน้ำและแยกตะกอนดินออกจากกัน ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและตะกอนดิน

การทดลองชุดที่ 5 ศึกษาการการแขวนลอยใหม่จากตะกอนดินที่มีปริมาณไตรบิวทิลทินความเข้มข้นสมมุติที่เวลา 168 ชั่วโมง โดยนำตัวอย่างตะกอนดินน้ำหนักตัวอย่างละ 15 g ผสมในน้ำ DI 1 L กวนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยแท่งแก้วคน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เป็นเวลา 30 นาที และเก็บตัวอย่างทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 168 ชั่วโมง โดยรินน้ำและแยกตะกอนดินออกจากกัน ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและตะกอนดิน

การทดลองชุดที่ 6 ศึกษาการการแขวนลอยใหม่จากตะกอนดินที่มีปริมาณไตรบิวทิลทินความเข้มข้นสมมุติที่เวลา 24 ชั่วโมง โดยนำตัวอย่างตะกอนดินน้ำหนักตัวอย่างละ 15 g ผสมในน้ำ DI 1 L กวนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยแท่งแก้วคน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เป็นเวลา 30 นาที และเก็บตัวอย่างทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 168 ชั่วโมง โดยรินน้ำและแยกตะกอนดินออกจากกัน ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและตะกอนดิน

ในการทดลองการตกจมหรือแขวนลอยใหม่ ใช้สารละลายไตรบิวทิลทินคลอไรด์เป็นสารที่เติมเข้าไปในระบบจำลอง โดยการวิเคราะห์ปริมาณไตรบิวทิลทินในห้องปฏิบัติการจะทำการวิเคราะห์ด้วย ICP-OES และรายงานผลปริมาณไตรบิวทิลทินที่ตรวจวัดได้ในตะกอนและในน้ำในรูปของ Sn (mg/L) (Mathurasa et al., 2012; Ophithakorn et al., 2016) เนื่องจาก

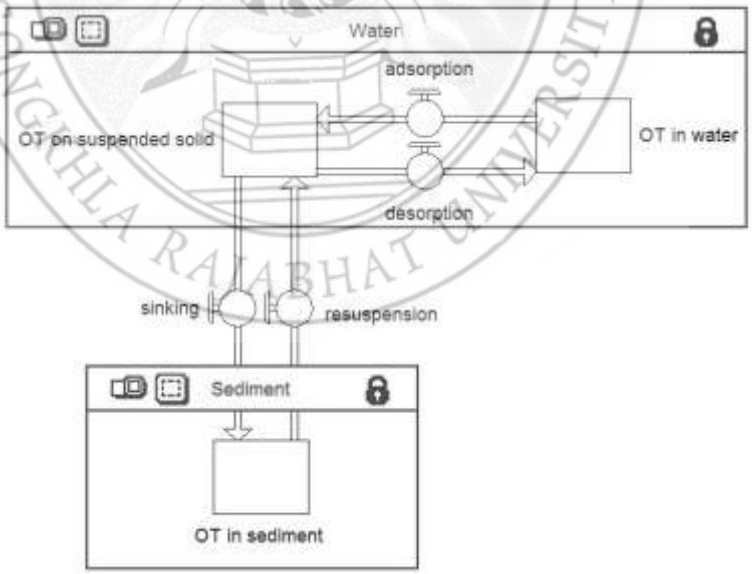
1) ในการทดลองมีขั้นตอนการเตรียมตะกอนก่อนนำมาทดลองและการเตรียมตะกอนก่อนวิเคราะห์ซึ่งต้องใช้ความร้อนในการอบแห้ง มีระยะเวลานานในการเตรียม และมีการใช้แรงกลในการบดตะกอนไม่ให้จับตัวเป็นก้อน ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนรูปและสลายตัวของไตรบิวทิลทินเป็นไดบิวทิลทิน โมโนบิวทิลทิน และดีบุก

2) ในการทดลองมีการตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิบรรยากาศ และมีแสงสว่างซึ่งไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้เป็นอุณหภูมิการจัดเก็บที่เหมาะสมที่ 4 องศาเซลเซียส และควบคุมให้ไม่มีแสงสว่างได้ ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนรูปและสลายตัวของ ไตรบิวทิลทินเป็นไดบิวทิลทิน โมโนบิวทิลทิน และดีบุก

ดังนั้นการตรวจวัดไตรบิวทิลทินโดยตรงด้วย GC-MS จะมีความคลาดเคลื่อนจากการเปลี่ยนรูปของไตรบิวทิลทินเป็นไดบิวทิลทิน โมโนบิวทิลทิน และดีบุกในระหว่างการทดลอง การวิเคราะห์ปริมาณไตรบิวทิลทินคลอไรด์ในรูปของดีบุก (Sn) ด้วย ICP-OES จึงมีความเหมาะสม และสมมุติเป็นตัวแทนของสารออร์แกโนทินในการวิเคราะห์ผลทดลอง

3.2.8 การวิเคราะห์การสะสมและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง

การวิเคราะห์การสะสมและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสารออร์แกโนทินตามแนวชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา ทำโดยการนำข้อมูลจากเอกสาร ข้อมูลภาคสนามที่ได้จากการสำรวจ สังเกต และผลวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการมาทำการวิเคราะห์ปริมาณการสะสมในสภาพปัจจุบันและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสารออร์แกโนทินตามแนวชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา ทำการวิเคราะห์โดยการจำลองความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นอ้างอิงตามแบบจำลองแผนภาพของ Yamamoto และคณะ (2009) และ Ophithakorn และคณะ (2014) และทำการวิเคราะห์การตกจมและแขวนลอยของออร์แกโนทินในน้ำโดยประยุกต์ใช้สมการดุลมวลสารในระบบตามวิธีของ Ophithakorn และคณะ (2016) ในการศึกษากำหนดขอบเขตของวิเคราะห์ออร์แกโนทินเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนเฟสน้ำประกอบด้วยน้ำทะเลและสารแขวนลอย และส่วนที่สองเฟสตะกอนดิน โดยวิเคราะห์เฉพาะกลไกตกจม (sinking) และการแขวนลอยกลับสู่น้ำ (re-suspension) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-10



ภาพประกอบที่ 3-10 ขอบเขตของระบบและกลไกในการวิเคราะห์ปริมาณการสะสม

3.3 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

- ชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา
- มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
- คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 สภาพทางกายภาพบริเวณชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา

จากรายงานการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ชายฝั่งทะเลที่มีความลึกไม่มากและมีการคมนาคมทางน้ำหนาแน่น มักมีการแพร่กระจายของไตรบิวทิลทินอยู่ทั่วพื้นที่และมีผลต่อการผิดปกติทางเพศของสัตว์ทะเลจำพวกหอยได้โดยง่าย เช่น การพบการปนเปื้อนไตรบิวทิลทินและผลกระทบต่อหอยทะเลและพืชทะเลในพื้นที่ชายฝั่ง Odense Fjord ในประเทศเดนมาร์ก ซึ่งมีพื้นที่ประมาณ 60 ตารางกิโลเมตร มีความลึกเฉลี่ย 2.25 เมตร ความเค็มประมาณ 12.5 ppt โดยตรวจพบไตรบิวทิลทินปนเปื้อนในตะกอน 57 μg/kg (Jensen et al., 2004) ดังนั้นพื้นที่ชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาจึงจัดได้ว่าเป็นหนึ่งในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนไตรบิวทิลทินโดยตรง มีโอกาสเป็นแหล่งสะสมของไตรบิวทิลทิน จากการเป็นแหล่งรองรับน้ำเสียชุมชน อุตสาหกรรม ประมง การเกษตร และการคมนาคมทางน้ำเป็นสำคัญ และมีโอกาสเป็นแหล่งแพร่กระจายของไตรบิวทิลทินสู่พื้นที่อื่นๆได้

ในโครงการวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตพื้นที่สำรวจตามแนวชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา โดยกำหนดจุดสำรวจทั้งหมด 5 จุด ได้แก่ ท่าแพขนานยนต์สงขลา ท่าเรือตรงข้ามสหกรณ์ออมทรัพย์ตำรวจสงขลา ท่าเรือแหล่งพระราม ท่าเรือโรงสีแดงหับโห้หิ้นและท่าเรือข้างโรงแรมเลคอินน์ โดยอ่านพิกัดเก็บพิกัดด้วย Smartphone android ตามวิธีการเสนอแนะโดยสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน กระทรวงศึกษาธิการ ซึ่งมีการอนุญาตให้ใช้ในงานในหน่วยงานราชการในสังกัดกระทรวงศึกษาธิการ (ภาคผนวก ข) ดังแสดงตามตารางที่ 4-1 และมีลักษณะทางกายภาพ-เคมีของจุดสำรวจดังตารางที่ 4-2 โดยมีค่าความเป็นกรดด่างที่จุดสำรวจทั้ง 5 จุดเท่ากับ 7.69 และค่าอุณหภูมิน้ำทะเลเฉลี่ยเท่ากับ 32.44 องศาเซลเซียส โดยมีค่าความเป็นกรดด่างต่ำสุดที่ท่าเรือแหล่งพระรามและสูงสุดที่ท่าเรือข้างโรงแรมเลคอินน์ มีค่าอุณหภูมิน้ำทะเลต่ำสุดที่ท่าแพขนานยนต์สงขลาและสูงสุดที่ท่าเรือข้างโรงแรมเลคอินน์

ตารางที่ 4-1 จุดสำรวจสภาพน้ำชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา

จุดสำรวจ	สถานที่	พิกัด GPS (Lat-Lon)	
		Latitude	Longitude
1	ท่าแพขนานยนต์สงขลา	7°13.133´N	100°34.771´E
2	ท่าเรือตรงข้ามสหกรณ์ออมทรัพย์ตำรวจสงขลา	7°12.797´N	100°34.913´E
3	ท่าเรือแหล่งพระราม	7°12.292´N	100°35.168´E
4	ท่าเรือโรงสีแดงหับโห้หิ้น	7°11.894´N	100°35.291´E
5	ท่าเรือข้างโรงแรมเลคอินน์	7°11.498´N	100°35.383´E

ตารางที่ 4-2 ลักษณะทางกายภาพ-เคมีของจุดสำรวจ

จุดสำรวจ	สถานี	pH	อุณหภูมิ (°C)
1	ท่าแพขนานยนต์สงขลา	7.80	32.0
2	ท่าเรือตรงข้ามสหกรณ์ออมทรัพย์ตำรวจสงขลา	7.64	32.2
3	ท่าเรือแหล่งพระราม	7.40	32.3
4	ท่าเรือโรงสีแดงหับโห้หิ้น	7.70	32.7
5	ท่าเรือข้างโรงแรมเลคอินน์	7.90	33.0

สามารถแสดงภาพถ่ายทางกายภาพของชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา และพิกัด GPS ดังภาพประกอบที่ 4-1

ท่าแพขนานยนต์สงขลา

ภาพประกอบที่ 4-1 ภาพถ่ายสภาพทางกายภาพชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา
(เมื่อวันที่ 2 เมษายน 2559)

ท่าเรือตรงข้ามสหกรณ์ออมทรัพย์ตำรวจสงขลา

ท่าเรือแหล่งพระราม

ท่าเรือโรงสีแดงหับโห้หิ้น

ภาพประกอบที่ 4-1 ภาพถ่ายสภาพทางกายภาพชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา (ต่อ)
(เมื่อวันที่ 2 เมษายน 2559)

ท่าเรือข้างโรงแรมเลคอินน์

ภาพประกอบที่ 4-1 ภาพถ่ายสภาพทางกายภาพชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา (ต่อ)
(เมื่อวันที่ 2 เมษายน 2559)

4.2 ปริมาณไตรบิวทิลทินในตะกอนดินตามแนวชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาในปัจจุบัน

สภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์สารไตรบิวทิลทินศึกษาโดยฉีดสารประกอบดีบุกอินทรีย์ความเข้มข้น 200 ppm ที่สภาวะของเครื่อง Gas chromatography mass spectrophotometry (GC-MS) ดังต่อไปนี้

- คอลัมภ์	Capillary column ยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.32 มิลลิเมตร เคลือบฟิล์มหนา 0.25 ไมโครเมตร (TR5-MS)
- ปริมาตรที่ฉีด	1 ไมโครลิตร
- แก๊สพา	ฮีเลียม อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตร/นาที
- เทคนิคการฉีด	Splitless
- EM Voltage	2106
- อิเลคตรอนมัลติฟายเออร์	70eV
- ช่วงมวล	45-450 amu
- Dwell time	100
- Cycle/sec	2.86
- Selected ion monitoring (TBT)	305 303 301 m/z
- Method detection level (MDL)	1 มิลลิกรัม/ลิตร

ผลการศึกษาโปรแกรมอุณหภูมิแบบ 1 2 3 และ 4 ผลของโครมาโตแกรมแสดงดังภาพประกอบที่ 4-2 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการแยกสารไตรบิวทิลทินคือโปรแกรมอุณหภูมิแบบที่ 2 ที่อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 100 องศาเซลเซียส คงที่ 5 นาที เพิ่มขึ้น 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ถึง 300 องศาเซลเซียส คงที่ 5 นาที อุณหภูมิช่องฉีดสาร 250 องศาเซลเซียส อุณหภูมิดีเทคเตอร์ 200 องศาเซลเซียส (ผลการวิเคราะห์ GC-MS ดูในภาคผนวก ค)

โดยใช้สภาวะโปรแกรมอุณหภูมิที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ไตรบิวทิลทินความเข้มข้น 200 ppm จากการศึกษาข้างต้นเพื่อดูความจำเพาะของสารพิจารณาจากค่าการแยก Retention time (t_R) ของสารแต่ละชนิดดังแสดงในตารางที่ 4-3 โดยมีค่า Retention time เฉลี่ยของโมโนบิวทิลทิน 9.57±0.01 นาที ไดบิวทิลทิน 11.88±0.01 นาที และไตรบิวทิลทิน 10.43±0.01 นาที

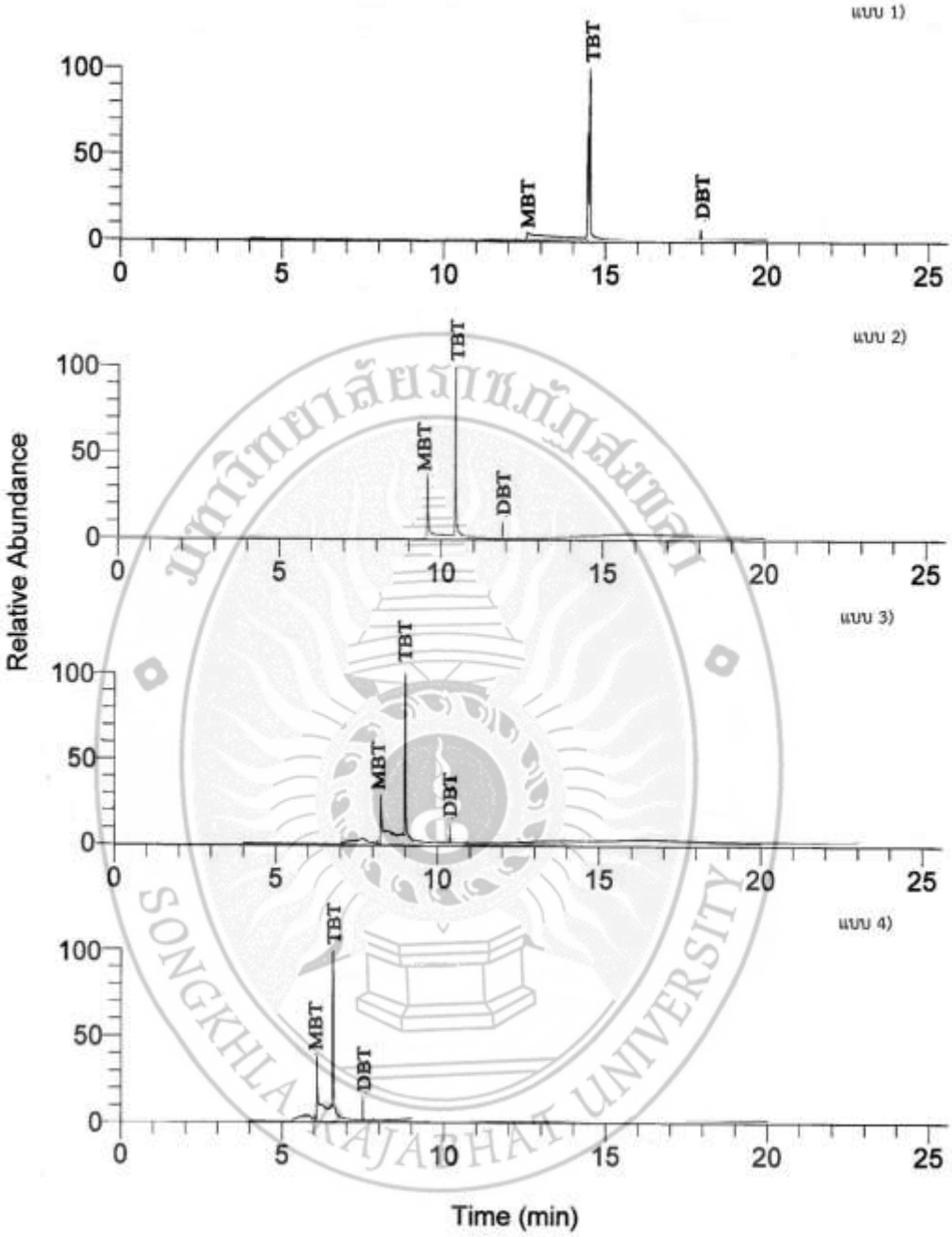
ขีดจำกัดของการตรวจวัด (LOD) และขีดจำกัดของการวิเคราะห์ปริมาณ (LOQ) ผลการศึกษาจากการฉีดสารละลายไตรบิวทิลทิน ความเข้มข้น 1 100 200 1,000 2,000 และ 20,000 ppb นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS ค่า LOD และ LOQ ของสารแต่ละชนิดดังแสดงในตารางที่ 4-4 โดยมีค่าขีดจำกัดของการตรวจวัดของโมโนบิวทิลทิน ไดบิวทิลทิน และไตรบิวทิลทิน เท่ากับ 0.3 0.3 และ0.2 ตามลำดับ และมีค่าขีดจำกัดของการวิเคราะห์ปริมาณของโมโนบิวทิลทิน ไดบิวทิลทิน และไตรบิวทิลทิน เท่ากับ 3.0 3.0 และ2.0 ตามลำดับ

สร้างกราฟมาตรฐานของสารไตรบิวทิลทินช่วงความเข้มข้น 1 100 200 1,000 2,000 และ 20,000 ppb นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS โดยฉีดความเข้มข้นละ 3 ครั้ง ได้สมการและค่าพารามิเตอร์ต่างๆของกราฟมาตรฐานแสดงดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-3 รีเทนชันไทม์ของสารอนุพันธ์ออแกโนทินมิกซ์สแตนดาร์ด

สาร	Retention time (นาที)	SD
โมโนบิวทิลทิน (MBT)	9.57	0.01
ไดบิวทิลทิน (DBT)	11.88	0.01
ไตรบิวทิลทิน (TBT)	10.43	0.01

หมายเหตุ ความเข้มข้น 200 ppm โปรแกรมอุณหภูมิที่ใช้ คืออุณหภูมิเริ่มต้นที่ 100 องศาเซลเซียส คงที่ 5 นาที เพิ่มขึ้น 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ถึง 300 องศาเซลเซียส คงที่ 5 นาที อุณหภูมิช่องฉีดสาร 250 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊สพา 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิดีเทคเตอร์ 200 องศาเซลเซียส (n=3)



ภาพประกอบที่ 4-2 โครมาโตแกรมการศึกษาโปรแกรมอุณหภูมิของอนุพันธ์สารมาตรฐานออร์แกโนทิน ความเข้มข้น 200 ppm

ตารางที่ 4-4 ขีดจำกัดของการตรวจวัด (LOD) และขีดจำกัดของการวิเคราะห์ปริมาณ (LOQ)

สาร	LOD (ppb)	LOQ (ppb)
โมโนบิวทิลทิน (MBT)	0.3	3.0
ไดบิวทิลทิน (DBT)	0.3	3.0
ไตรบิวทิลทิน (TBT)	0.2	2.0

หมายเหตุ ที่ความเข้มข้น 1 100 200 1,000 2,000 และ 20,000 ppb (n=7)

ตารางที่ 4-5 ค่าพารามิเตอร์ของกราฟมาตรฐานอนุพันธ์ของสารออร์แกโนทินทินผสม

สาร	m	b	R^2
โมโนบิวทิลทิน (MBT)	16187	0.0000	0.9957
ไดบิวทิลทิน (DBT)	12342	0.0000	0.9964
ไตรบิวทิลทิน (TBT)	23793	0.0000	0.9995

หมายเหตุ ที่ความเข้มข้น 1 100 200 1,000 2,000 และ 20,000 ppb
ที่จุดตัดแกน y เท่ากับศูนย์ (n=3)

กำหนดให้ m = ความชันของกราฟ B = จุดตัดแกน y ของกราฟมาตรฐาน
R^2 = ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

วิเคราะห์ปริมาณไตรบิวทิลทินโดยใช้สภาวะโปรแกรมอุณหภูมิที่เหมาะสมจากผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์อนุพันธ์ของของสารไตรบิวทิลทิน คือ อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 100 องศาเซลเซียส คงที่ 5 นาที เพิ่มขึ้น 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ถึง 300 องศาเซลเซียส คงที่ 5 นาที อุณหภูมิช่องฉีดสาร 250 องศาเซลเซียส อุณหภูมิดีเทคเตอร์ 200 องศาเซลเซียส

มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลได้กำหนดปริมาณสารดีบุกอินทรีย์ชนิดไตรบิวทิลทินด้วยการวิเคราะห์ด้วย Gas chromatography with flame photometric detector หรือ Gas chromatography with mass spectrophotometry หรือ Highly performance liquid chromatography–ICPMS ไม่เกิน 10 ng/L (ราชกิจจานุเบกษา, 2550) และค่าที่ยอมรับได้กำหนดสารไตรบิวทิลทินในตะกอนไม่ควรเกินที่ 2.5 μg/g ซึ่งมีรายงานแล้วว่ามีผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโตของหอย (Hajisamoh, 2013) จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมาระบุว่าแม้ปริมาณของไตรบิวทิลทินที่วิเคราะห์ได้ในทะเลสาบสงขลาในอดีตจะยังไม่เกินจากค่าที่ยอมรับได้ของสารไตรบิวทิลทินในตะกอนที่ 2.5 μg/g แต่ก็สามารถตรวจพบการสะสมและความผิดปกติในสัตว์ทะเลเป็นเบื้องต้นแล้ว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในพื้นที่ทะเลสาบสงขลาและชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาอาจมีความเสี่ยงจากการได้รับอันตรายจากไตรบิวทิลทินและสารประกอบดีบุกอินทรีย์อื่นได้ (Ophithakorn et al., 2014) พื้นที่ทะเลสาบสงขลาจึงต้องมีการเฝ้าระวัง

ในการสำรวจชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา โดยที่จุดสำรวจทั้งหมด 5 จุด ได้แก่ ท่าแพขนานยนต์สงขลา ท่าเรือตรงข้ามสหกรณ์ออมทรัพย์ตำรวจสงขลา ท่าเรือแหล่งพระราม ท่าเรือโรงสีแดง หับโห้หิ้นและท่าเรือข้างโรงแรมเลคอินน์ พบว่าผลการวิเคราะห์ปริมาณไตรบิวทิลทินในน้ำทะเลด้วย

GC-MS ในการศึกษานี้ไม่พบว่ามีสารไตรบิวทิลทิน จึงได้ทำการทวนสอบโดยการวิเคราะห์ปริมาณสารไตรบิวทิลทินด้วย ICP-OES โดยทดสอบวัดสารไตรบิวทิลทินในรูปของธาตุดีบุก (Sn) แทนการวัดสารไตรบิวทิลทินโดยตรงเพื่อการทวนสอบซ้ำ พบว่าตรวจไม่พบ Sn ในตัวอย่างน้ำทะเลทุกจุดที่ทำการเก็บตัวอย่างเช่นกัน ดังนั้นปริมาณไตรบิวทิลทินในน้ำทะเลจึงไม่เกินค่ามาตรฐาน

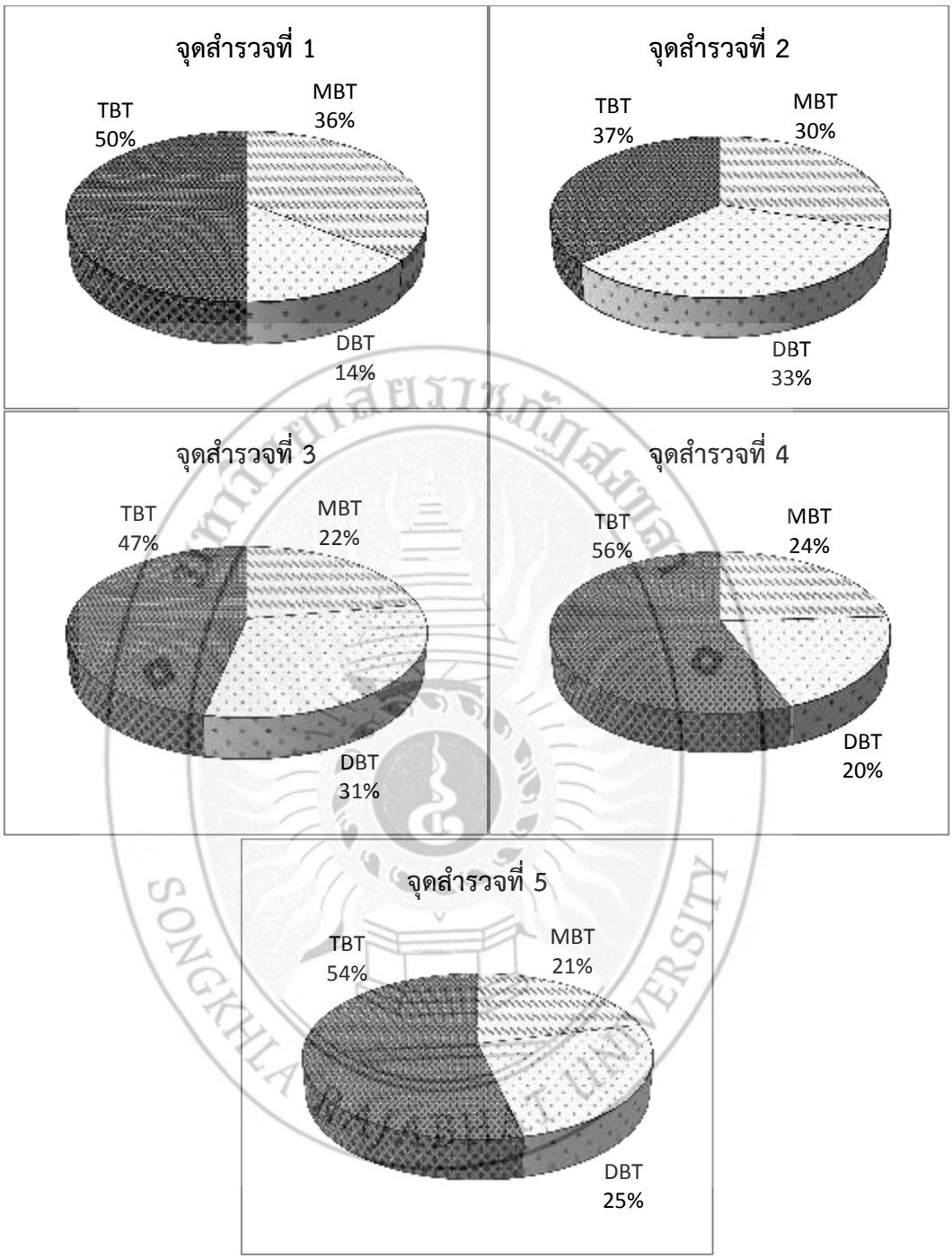
โดยผลการตรวจวัดปริมาณไตรบิวทิลทินในตะกอนดินชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา โดยการประเมินเปรียบเทียบกับค่าที่ยอมรับได้ในน้ำทะเลและในตะกอนดิน พบว่ามีปริมาณไตรบิวทิลทินในตะกอนดินชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาสูงสุดที่จุดท่าเรือโรงสีแดงหับโห้หิ้นและต่ำสุดที่จุดท่าแพขนานยนต์สงขลา แต่ไม่มีปริมาณไตรบิวทิลทินในตะกอนดินจุดสำรวจใดมีค่าเกินค่าที่ยอมรับได้ในดิน ปริมาณไตรบิวทิลทินชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาในแต่ละจุดสำรวจเทียบกับค่ามาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ปริมาณไตรบิวทิลทินชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาในแต่ละจุดสำรวจเทียบกับค่ามาตรฐาน

จุดสำรวจ	สถานที่	ปริมาณไตรบิวทิลทินเทียบกับค่ามาตรฐาน			
		น้ำทะเล (ng/L)		ตะกอนดิน (µg/g)	
		ค่าที่วัดได้	ค่ามาตรฐาน	ค่าที่วัดได้	ค่ายอมรับได้
1	ท่าแพขนานยนต์สงขลา	-	10	0.07	2.50
2	ท่าเรือตรงข้ามสหกรณ์ออมทรัพย์ตำรวจสงขลา	-	10	0.11	2.50
3	ท่าเรือแหล่งพระราม	-	10	0.10	2.50
4	ท่าเรือโรงสีแดงหับโห้หิ้น	-	10	0.14	2.50
5	ท่าเรือข้างโรงแรมเลคอินน์	-	10	0.13	2.50

หมายเหตุ - ตรวจวัดไม่พบทั้งการวิเคราะห์ไตรบิวทิลทินด้วย GC-MS และการวิเคราะห์ดีบุกด้วย ICP-OES

การวิเคราะห์ออร์แกโนทินในตะกอนดิน พบว่าส่วนใหญ่เป็นไตรบิวทิลทินมากที่สุด (37-56%) รองลงมาคือโมโนบิวทิลทิน (21-36%) และมีไตรบิวทิลทินในรูปไดบิวทิลทินน้อยที่สุด (14-33%) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-3



ภาพประกอบที่ 4-3 ปริมาณออร์แกโนทินในตะกอนดินในแต่ละจุดสำรวจ

การศึกษาปริมาณการสะสมไตรบิวทิลทินในทะเลสาบสงขลาตอนล่างและแนวชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาที่ผ่านมายังคงมีน้อยมาก จากการตรวจเอกสารพบว่าผลงานวิจัยส่วนใหญ่ในพื้นที่ทะเลสาบสงขลาตอนล่างเป็นการตรวจวัดปริมาณการสะสมของไตรบิวทิลในตะกอนดิน (Kan-atireklap et al., 1997a; Hajisamoh, 2013) ในหอย (Kan-atireklap et al., 1997b; Tanabe et al., 2000;

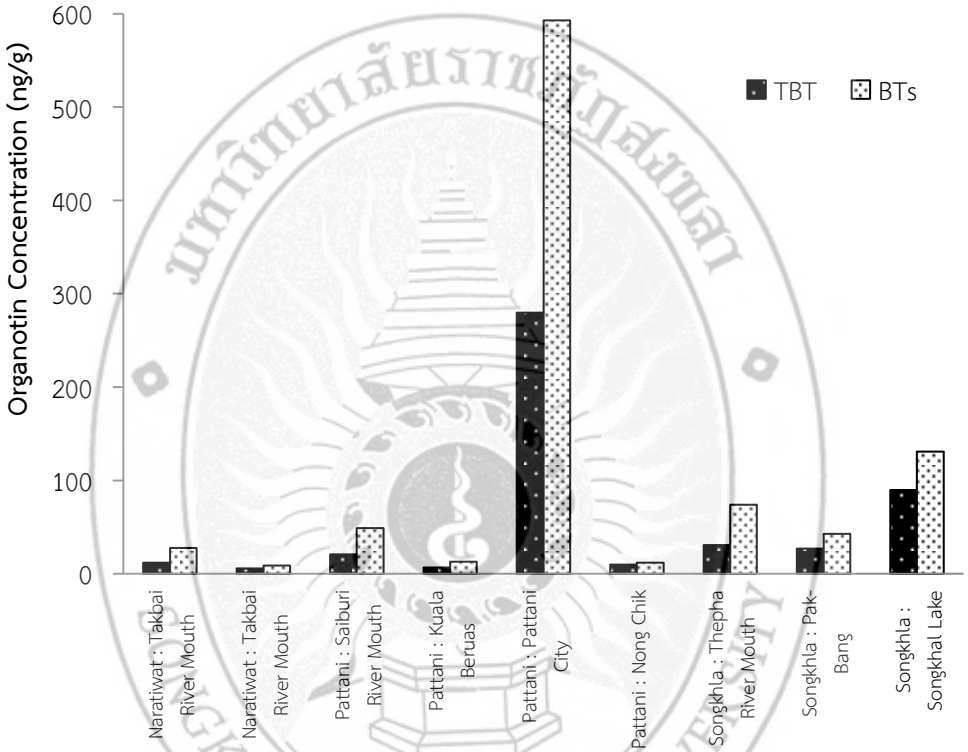
Swennen et al., 2009) และเป็นการคำนวณแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของไตรบิวทิลทินตามแนวชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาโดยการอ้างอิงจากข้อมูลทุติยภูมิ (Ophithakorn et al., 2014) ซึ่งปัจจุบันยังขาดการพิสูจน์ด้วยการตรวจวัดปริมาณจริง นอกจากนี้การศึกษาที่ผ่านมามีการสุ่มเก็บตัวอย่างที่ตำแหน่งปากทะเลสาบสงขลา (ไม่ระบุพิกัด GPS) (Hajisamoh, 2013) และตำแหน่งในทะเลสาบสงขลาที่ห่างไกลจากท่าเรือ (ไม่ระบุพิกัด GPS) (Kan-atireklap et al., 1997a) โดยในปี พ.ศ. 2538 ได้มีการวิเคราะห์ปริมาณของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในตะกอนดินและหอยแมลงภู่ในพื้นที่ทะเลสาบสงขลาตอนล่าง พบว่าในตะกอนดินมีการสะสมของไตรบิวทิลทิน 36 ng/g ไดบิวทิลทิน 9 ng/g และโมโนบิวทิลทิน 7 ng/g (Kan-atireklap et al., 1997a) การวิเคราะห์การสะสมของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในหอยแมลงภู่ในปีเดียวกัน พบว่ามีไตรบิวทิลทิน 27 ng/g ไดบิวทิลทิน 5 ng/g และโมโนบิวทิลทิน 3 ng/g (Kan-atireklap et al., 1997b; Tanabe et al., 2000) ต่อมาในปี พ.ศ. 2549 ได้มีการตรวจพบการความผิดปกติทางเพศของสัตว์ทะเลจำพวกหอยฝาเดียวในพื้นที่ทะเลสาบสงขลา 4.7% (Swennen at al., 2009) และในปี พ.ศ. 2555 พบว่าปริมาณของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในทะเลสาบสงขลาเพิ่มสูงขึ้น สามารถวิเคราะห์ค่าสูงสุดของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในตะกอนดินในรูปไตรบิวทิลทิน 90 ng/g ไดบิวทิลทิน 32 ng/g และโมโนบิวทิลทิน 43 ng/g (Hajisamoh, 2013)

สถานการณ์ของไตรบิวทิลทินในแหล่งน้ำในประเทศไทย จากรายงานของสำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ ได้ตรวจพบปริมาณไตรบิวทิลทินในน้ำทะเลและตะกอนดินในชายฝั่งและท่าเรือสำคัญในประเทศไทย โดยพบว่ามีการสะสมของไตรบิวทิลทินในน้ำทะเลและตะกอนดินในท่าเรือทุกแห่ง (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2550) และจากรายงานที่มีการสำรวจสถานการณ์การปนเปื้อนของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ชนิดไตรบิวทิลทินในประเทศไทยพบว่าการปนเปื้อนมีปริมาณมากโดยเฉพาะพื้นที่ที่มีการคมนาคมทางน้ำหนาแน่นและพื้นที่ที่มีการจอดเรือเป็นสำคัญ (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2550) ทั้งในน้ำ ตะกอนดิน (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2550) และสัตว์น้ำ โดยการปนเปื้อนในน้ำทะเลยังคงมีแนวโน้มสูงขึ้นจากช่วงปี 2547-2549 ด้วย โดยในปี 2548 ค่าสูงสุดที่ตรวจพบในน้ำทะเลพบที่ท่าเทียบเรือ บริษัทภูเก็ตโบ๊ตลากูล จำกัด 140 mg/L ในตะกอนที่แหลมฉบัง 21 ng/g dry weight ต่อมาในปี 2550 ค่าสูงสุดที่ตรวจพบในน้ำทะเลพบที่คานเรือ บริษัทรัตนชัยคานเรือ จำกัด 33 mg/L ในตะกอนที่คานเรือบริษัทรัตนชัยคานเรือ จำกัด 345 ng/g dry weight (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2550)

นอกจากนี้ในปี 2552 สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ ยังสามารถตรวจพบสารไตรบิวทิลทินในแหล่งน้ำจืดที่เป็นแม่น้ำสายหลัก ได้แก่ แม่น้ำเจ้าพระยา มีความเข้มข้นในช่วง 3.4-95.5 ng/L แม่น้ำท่าจีน มีความเข้มข้นในช่วง 2.0-45.2 ng/L แม่น้ำแม่กลองมีความเข้มข้นในช่วง 2.0-44.9 ng/L และแม่น้ำบางปะกง มีความเข้มข้นในช่วง 2.0-76.9 ng/L โดยพบว่ามีแหล่งกำเนิดหลัก ได้แก่ โรงงานอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และชุมชน เป็นสำคัญด้วย (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2552)

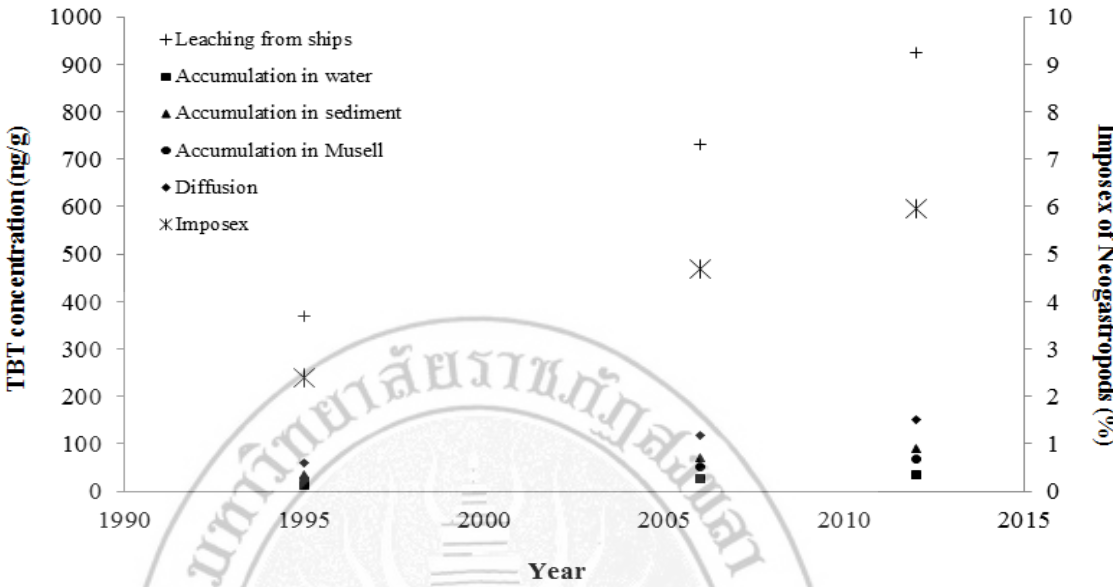
การศึกษาปริมาณของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในพื้นที่ชายฝั่งไทยตอนล่างในเขตจังหวัดสงขลา ปัตตานี และนราธิวาส พบว่าปริมาณของไตรบิวทิลทินในตะกอนดินมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของการคมนาคมทางน้ำในพื้นที่โดยเฉพาะการปลดปล่อยสารประกอบดีบุกอินทรีย์จาก

ลำเรือของเรือประมงขนาดเล็ก ท่าเรือขนาดเล็ก และชายฝั่งที่มีการทำประมงเป็นสำคัญ โดยพื้นที่ทะเลสาบสงขลาและชายฝั่งเมืองปัตตานีมีสารประกอบดีบุกอินทรีย์ปนเปื้อนในปริมาณที่สูงกว่าบริเวณศึกษาอื่นๆ และพบว่าปริมาณของไตรบิวทิลทินมีองค์ประกอบอยู่ประมาณ 45.05-70.88% จากองค์ประกอบรวมของไตรบิวทิลทิน ไดบิวทิลทินและโมโนบิวทิลทินในตะกอนพื้นที่ชายฝั่งไทยตอนล่าง (Hajisamoh, 2013) โดยสามารถแสดงปริมาณการปนเปื้อนสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในพื้นที่อ่าวไทยตอนล่างดังภาพประกอบที่ 4-4



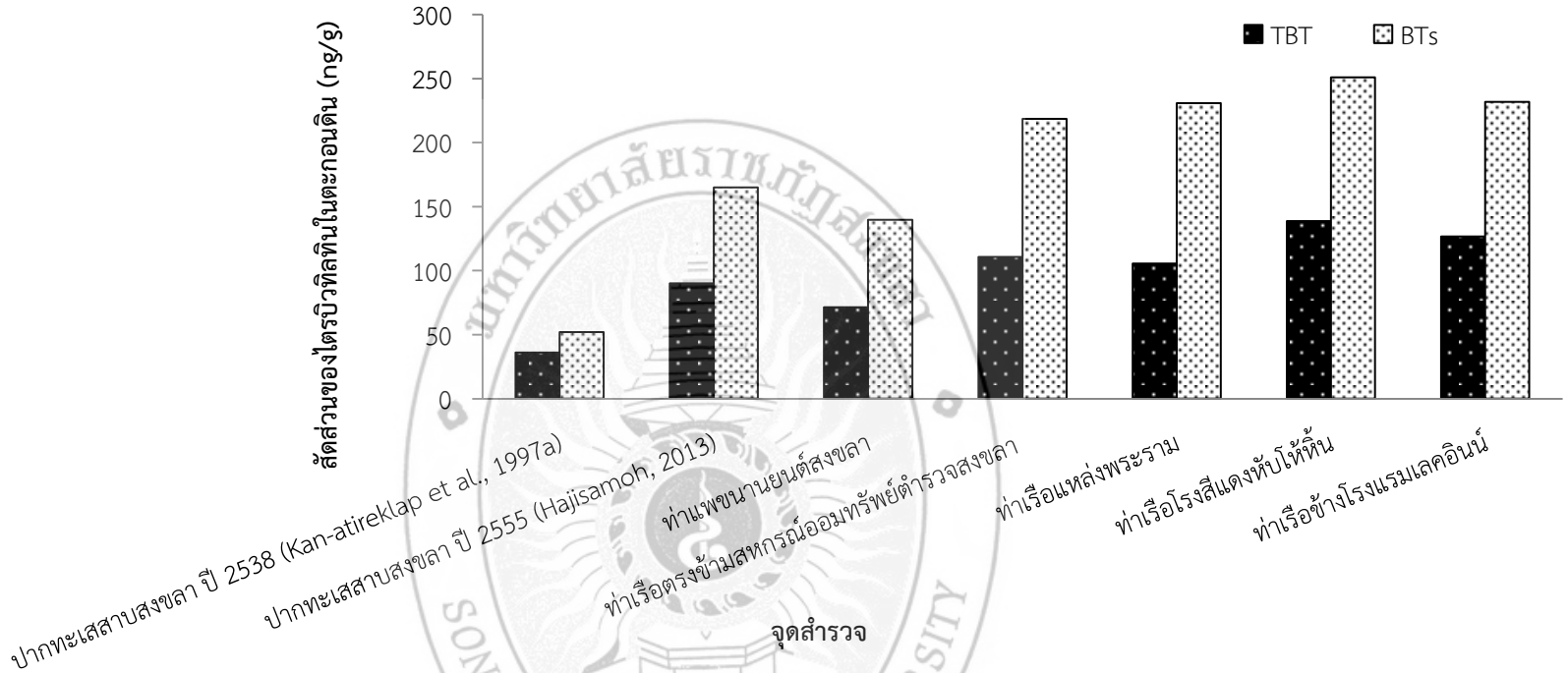
ภาพประกอบที่ 4-4 ปริมาณของออร์แกโนทินในตะกอนอ่าวไทยตอนล่าง
ที่มา: ดัดแปลงจาก Hajisamoh, 2013

Ophithakorn และคณะ (2014) ได้ประเมินแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของไตรบิวทิลทินในทะเลสาบสงขลาตอนล่างไว้ โดยพบว่าปริมาณการสะสมของไตรบิวทิลทินในทะเลสาบสงขลาตอนล่างมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2538 จนถึงปี พ.ศ. 2555 และมีโอกาสเพิ่มสูงขึ้นในอนาคตหากไม่มีการเฝ้าระวัง โดยมีความสัมพันธ์แบบแปรตามกันของการสะสมของไตรบิวทิลทินในตะกอนดิน ในน้ำและการเปลี่ยนแปลงในสัตว์ทะเล ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-6



ภาพประกอบที่ 4-5 ปริมาณไตรบิวทิลทินสะสมในทะเลสาบสงขลาตอนล่าง
ที่มา: ดัดแปลงจาก Ophithakorn et al., 2014

ดังนั้นการประเมินการสะสมของไตรบิวทิลทินซึ่งมีความเป็นพิษสูงและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมโดยผลการตรวจวัดตามแนวชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาในปัจจุบันเปรียบเทียบกับค่าในทะเลสาบสงขลาในอดีตพบว่ามีปริมาณเฉลี่ย 5 จุดสำรวจ (110 ng/g) มากกว่าบริเวณปากทะเลสาบสงขลาในปี 2538 และปี 2555 แสดงในภาพประกอบที่ 4-6



ภาพประกอบที่ 4-6 ปริมาณของออร์แกโนทินในตะกอนดินชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา

4.3 การวิเคราะห์การสะสมและการแพร่กระจายของสารไตรบิวทิลทินตามแนวชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาโดยลักษณะทางกายภาพ-เคมีของน้ำ

การวิเคราะห์การสะสมและการแพร่กระจายของสารไตรบิวทิลทินตามแนวชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาโดยลักษณะทางกายภาพ-เคมีของน้ำ ใช้การวิเคราะห์กลไกการตกจมและการแขวนลอยใหม่ของไตรบิวทิลทินโดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความเค็ม ค่าความเป็นกรดด่าง และอุณหภูมิซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการสะสมของไตรบิวทิลทินในแหล่งน้ำ

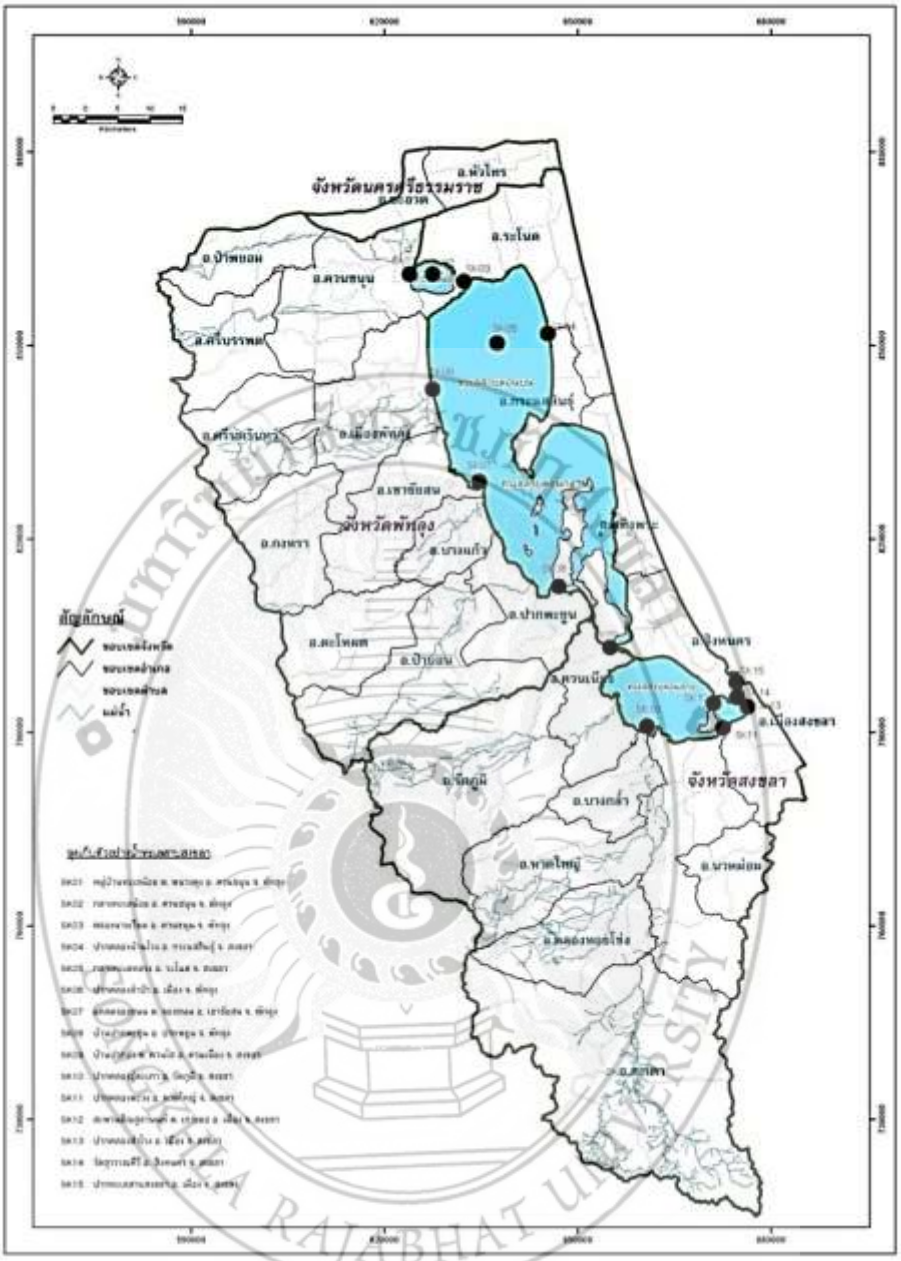
จากข้อมูลคุณภาพน้ำของสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 16 ที่ได้กำหนดพื้นที่ทะเลสาบสงขลาตอนล่างตามรายงานคุณภาพน้ำ เพื่อการตรวจวัดและเฝ้าระวังคุณภาพทะเลสาบสงขลา โดยสามารถแสดงตำแหน่งของจุดตรวจสภาพน้ำได้ดังภาพประกอบที่ 4-7 โดยได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลแผนที่โดยตรงจากสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 16 ตามหนังสือมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ ศธ 0560/1336 เรื่อง ขอความอนุเคราะห์ข้อมูลคุณภาพน้ำย้อนหลังตั้งแต่ปี 2547-2557 แผนที่และตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่าง

โดยพื้นที่สำคัญที่ครอบคลุมชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา มี 5 จุด ได้แก่ ปากคลองพะวง (SK11) สะพานเกาะยอ (SK12) ปากคลองสำโรง (SK13) วัดสุวรรณคีรี (SK14) และปากทะเลสาบสงขลา (SK15) ดังแสดงตามตารางที่ 4-7 และตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่างและแสดงตำแหน่งจุดตรวจคุณภาพน้ำได้ดังภาพประกอบที่ 4-8

ตารางที่ 4-7 จุดตรวจสภาพน้ำตามรายงานคุณภาพน้ำพื้นที่ทะเลสาบสงขลาตอนล่าง

จุดตรวจ	สถานที่	รหัสจุดตรวจ	พิกัด GPS (UTM)	
			X	Y
1	ปากคลองพะวง	SK11	672474	790145
2	สะพานเกาะยอ	SK12	672582	790645
3	ปากคลองสำโรง	SK13	646071	794258
4	วัดสุวรรณคีรี	SK14	674394	794764
5	ปากทะเลสาบสงขลา	SK15	674599	797580

ที่มา: สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 16, 2556



ภาพประกอบที่ 4-7 ตำแหน่งจุดตรวจสภาพน้ำตามรายงานคุณภาพน้ำพื้นที่ทะเลสาบสงขลา
ที่มา: สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 16, 2556

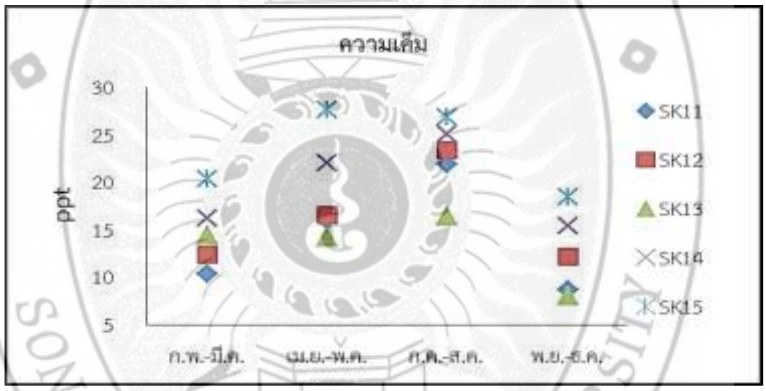
ภาพประกอบที่ 4-8 ตำแหน่งจุดตรวจสภาพน้ำโดยรอบชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา
ที่มา: ดัดแปลงจากสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 16, 2556

ทะเลสาบสงขลาตอนล่างจัดได้ว่าเป็นบริเวณที่มีการคมนาคมทางน้ำและกิจกรรมต่างๆ ในแหล่งน้ำหนาแน่น สามารถวิเคราะห์ข้อมูลคุณภาพน้ำตามช่วงเวลาตามการเก็บตัวอย่างเพื่อการตรวจวิเคราะห์ เป็น 4 ช่วงเวลาตามที่สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 16 กำหนดไว้ คือ (1) ฤดูแล้งเดือนกุมภาพันธ์ถึงมีนาคม (2) ก่อนฤดูฝน เดือนเมษายนถึงพฤษภาคม (3) ก่อนฤดูฝนเดือนกรกฎาคมถึงสิงหาคม และ(4) ฤดูฝนเดือนพฤศจิกายนถึงธันวาคม ด้วยข้อมูลย้อนหลังตั้งแต่ปี 2547 ถึง 2557 โดยวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการละลาย (Solubility) ของไตรบิวทิลทินในแหล่งน้ำ ได้แก่ ความเค็ม (Salinity) ความเป็นกรดด่าง (pH) และอุณหภูมิ (Temperature) (Inaba et al., 1995)

ดังนั้นการละลายน้ำได้ดีของไตรบิวทิลทินหมายถึงการมีโอกาสแพร่กระจายได้ง่ายในสิ่งแวดล้อม และการดูดติดตะกอนได้ดีหมายถึงการมีโอกาสสะสมในตะกอนและสัตว์ทะเลได้โดยง่าย หากมีแหล่งกำเนิดที่ไม่ได้รับการควบคุมในพื้นที่ก็จะทำให้มีการปนเปื้อนของไตรบิวทิลทินในทะเลสาบสงขลา เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศและมนุษย์ได้ การวิเคราะห์ตัวแปรทางกายภาพ-เคมีของน้ำทะเล ได้แก่ ความเค็ม ความเป็นกรดด่าง และอุณหภูมิของน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการละลายของไตรบิวทิลทินในแหล่งน้ำ (Inaba et al., 1995) จึงมีความสำคัญต่อการประเมินความสามารถในการละลายน้ำของไตรบิวทิลทินในทะเลสาบสงขลา โดยสามารถนำมาใช้เป็นฐานข้อมูลในการคาดการณ์การสะสมและการแพร่กระจายในทะเลสาบสงขลาในกรณีที่มีการชะละลายของไตรบิวทิลทินลงสู่ทะเลสาบสงขลาได้

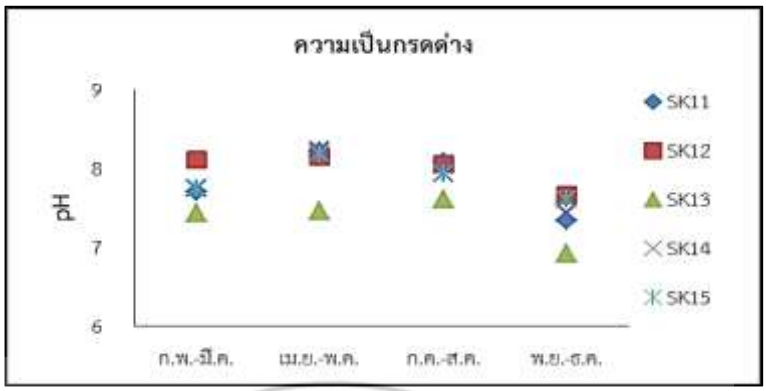
การวิเคราะห์ความสามารถในการละลายน้ำของไตรบิวทิลทิน โดยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในการสำรวจคุณภาพน้ำที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการละลายของไตรบิวทิลทินในแหล่งน้ำ ได้แก่ ความเค็ม ความเป็นกรดด่าง และอุณหภูมิพบว่า

1) ตามทฤษฎีแล้วไตรบิวทิลทินมีความสามารถในการละลายในน้ำลดลงเมื่อความเค็มเพิ่มขึ้น เป็นเหตุให้ละลายในน้ำทะเลได้น้อยกว่าในน้ำกลั่น (Inaba et al., 1995) สำหรับการศึกษาการดูดติดของไตรบิวทิลทินบนตะกอนต่างชนิดกันในน้ำทะเลสังเคราะห์ด้วย NaCl ที่ความเค็มแตกต่างกัน พบว่าไตรบิวทิลทินสามารถดูดติดตะกอนได้ดีที่ความเค็มต่ำกว่า 15 ppt (Hoch and Schwesig, 2004) จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลทุติยภูมิทั้ง 5 จุดสำรวจ ตั้งแต่ปี 2547-2557 พบว่าค่าความเค็มเฉลี่ยของน้ำทะเลในทะเลสาบสงขลา อยู่ในช่วง 8.07-27.69 ppt โดยช่วงเดือนที่มีค่าความเค็มเฉลี่ยสูงสุด คือ ก่อนฤดูฝนตั้งแต่เดือนกรกฎาคมถึงสิงหาคมและลดลงต่ำสุดในช่วงฤดูฝนตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงธันวาคม จุดสำรวจที่มีค่าความเค็มเฉลี่ยสูงสุด คือ บริเวณปากทะเลสาบสงขลา (SK15) ในช่วงเดือนเมษายนถึงพฤษภาคม 27.69 ppt และต่ำสุดบริเวณปากคลองสำโรง (SK13) ในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงธันวาคม 8.07 ppt ดังภาพประกอบที่ 4-9



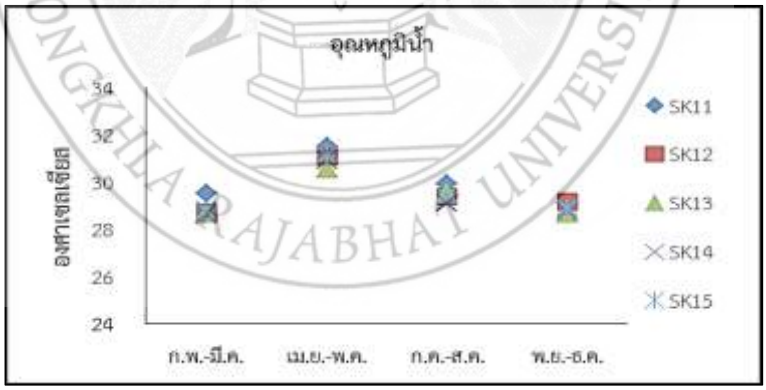
ภาพประกอบที่ 4-9 การเปลี่ยนแปลงความเค็มของน้ำทะเลสาบสงขลาตอนล่าง เฉลี่ยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึง 2557

2) ตามทฤษฎีแล้วไตรบิวทิลทินมีความสามารถในการละลายลดต่ำลงในช่วงความเป็นกรดด่าง 6-8 (Inaba et al., 1995) และมีความสามารถในการดูดติดที่ดีในสภาวะที่ความเป็นกรดด่างเท่ากับ 7 (Bangkerdphol et al., 2009) จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลทุติยภูมิทั้ง 5 จุดสำรวจ ตั้งแต่ปี 2547-2557 พบว่าความเป็นกรดด่างเฉลี่ยของน้ำในทะเลสาบสงขลาอยู่ในช่วง 6.92-8.24 โดยช่วงเดือนที่มีค่าความเป็นกรดด่างเฉลี่ยของน้ำทะเลสูงสุด คือ ช่วงก่อนฤดูฝนในเดือนเมษายนถึงพฤษภาคมและลดลงต่ำสุดในช่วงฤดูฝนเดือนพฤศจิกายนถึงธันวาคม จุดสำรวจที่มีค่าความเป็นกรดด่างเฉลี่ยสูงสุด คือ บริเวณวัดสุวรรณคีรี (SK14) ในช่วงเดือนเมษายนถึงพฤษภาคม 8.24 และต่ำสุดบริเวณตำแหน่งปากคลองสำโรง (SK13) ในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงธันวาคม 6.92 ดังภาพประกอบที่ 4-10



ภาพประกอบที่ 4-10 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดด่างของน้ำทะเลสาบสงขลาตอนล่าง เฉลี่ยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึง 2557

3) ตามทฤษฎีแล้วไตรบิวทิลทินมีความสามารถในการละลายลดลงเมื่ออุณหภูมิของน้ำลดต่ำลง (Inaba et al., 1995) และมีความสามารถในการดูดติดที่ดีเมื่ออุณหภูมิน้ำสูงขึ้น (Bangkerdphol et al., 2009) จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลทุติยภูมิทั้ง 5 จุดสำรวจ ตั้งแต่ปี 2547-2557 พบว่าอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงตลอดปีในช่วง 28.63-31.50 องศาเซลเซียส โดยช่วงเดือนที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำทะเลสูงสุด คือ ช่วงก่อนฤดูฝนในเดือนเมษายนถึงพฤษภาคมและลดลงต่ำสุดในฤดูแล้งช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงมีนาคม จุดสำรวจที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด คือ บริเวณปากคลองพะวง (SK11) ในช่วงเดือนเมษายนถึงพฤษภาคม 31.50 องศาเซลเซียส และต่ำสุดบริเวณตำแหน่งวัดสุวรรณคีรี (SK14) ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงมีนาคม 28.63 องศาเซลเซียส ดังภาพประกอบที่ 4-11



ภาพประกอบที่ 4-11 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำทะเลสาบสงขลาตอนล่าง เฉลี่ยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึง 2557

ดังนั้นจึงสรุปโดยการวิเคราะห์โดยการใช้ข้อมูลทางกายภาพ-เคมีของน้ำทะเลได้ว่า

1) การวิเคราะห์ความสามารถในการละลายน้ำจากค่าความเป็นกรดด่าง โดยใช้เกณฑ์พิจารณาว่าไตรบิวทิลทินมีโอกาสละลายน้ำได้ดีตรงจุดสำรวจที่มีค่าความเป็นกรดด่างเฉลี่ยสูงกว่า 8 พบว่าจุดสำรวจที่ไตรบิวทิลทินมีอาสละลายน้ำได้ดี ได้แก่ ปากคลองพะวง (SK11) ในเดือนเมษายนถึง

สิงหาคม สะพานเกาะยอ (SK12) ในเดือนกุมภาพันธ์ถึงสิงหาคม วัดสุวรรณคีรี (SK14) ในเดือนเมษายนถึงสิงหาคม และปากทะเลสาบสงขลา (SK15) ในเดือนเมษายนถึงพฤษภาคม (ไม่ปรากฏข้อมูลทุติยภูมิว่าค่าความเป็นกรดด่างเฉลี่ยของน้ำทะเลต่ำกว่า 6 จึงไม่นำเกณฑ์ความสามารถในการละลายน้ำจากค่าความเป็นกรดด่างต่ำกว่า 6 มาวิเคราะห์) โดยช่วงเดือนเมษายนถึงพฤษภาคมปรากฏข้อมูลว่าน้ำในทะเลสาบสงขลามีค่าความเป็นกรดด่างเฉลี่ยสูงกว่า 8 ครอบคลุมจุดสำรวจในพื้นที่ทะเลสาบสงขลามากที่สุด (SK11 SK12 SK14 และ SK15) คิดเป็น 80% ของพื้นที่สำรวจ รองลงมาเป็นช่วงเดือนกรกฎาคมถึงสิงหาคม คิดเป็น 60% ของพื้นที่สำรวจ และช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงมีนาคม 20% ของพื้นที่สำรวจ โดยค่าความเค็มและอุณหภูมิของน้ำทะเลไม่มีเกณฑ์บ่งชี้ความสามารถในการละลายน้ำที่แน่นอนจึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4-8

2) การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดติดตะกอนจากค่าความเค็ม โดยใช้เกณฑ์พิจารณาว่าไตรบิวทิลทินมีโอกาสดูดติดตะกอนได้ดีตรงจุดสำรวจที่มีค่าความเค็มเฉลี่ยน้อยกว่า 15 ppt พบว่าจุดสำรวจที่ไตรบิวทิลทินมีการละลายน้ำได้ดี ได้แก่ ปากคลองพะวง (SK11) ในเดือนพฤศจิกายนถึงมีนาคม สะพานเกาะยอ (SK12) ในเดือนพฤศจิกายนถึงมีนาคม และปากคลองสำโรง (SK13) ในเดือนพฤศจิกายนถึงพฤษภาคม โดยช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงธันวาคมและช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงมีนาคมปรากฏข้อมูลว่าน้ำในทะเลสาบสงขลามีค่าความเค็มเฉลี่ยต่ำกว่า 15 ppt ครอบคลุมจุดสำรวจในพื้นที่ทะเลสาบสงขลาตอนในทั้งหมด (SK11 SK12 และ SK13) คิดเป็น 60% ของพื้นที่สำรวจ รองลงมาเป็นช่วงเดือนเมษายนถึงพฤษภาคม คิดเป็น 20% ของพื้นที่สำรวจ โดยค่าความเป็นกรดด่างและอุณหภูมิของน้ำทะเลไม่มีเกณฑ์บ่งชี้ความสามารถในการดูดติดตะกอนที่แน่นอนจึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4-8

3) เมื่อพิจารณาฤดูกาลและความสามารถในการละลายน้ำ พบว่าช่วงก่อนฤดูฝนในเดือนเมษายนถึงสิงหาคมเป็นช่วงที่มีค่าความเป็นกรดด่างเฉลี่ยของน้ำทะเลสูงกว่า 8 คิดเป็น 87.5% ของความถี่ที่ตรวจพบค่าความเป็นกรดด่างเฉลี่ยสูงกว่า 8 ทุกจุดสำรวจในรอบปี และจากการวิเคราะห์ความสามารถในการละลายน้ำพบว่าช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงที่ไตรบิวทิลทินละลายน้ำได้ดีและน้ำทะเลมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าช่วงเดือนอื่นๆ ด้วยเช่นกัน โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำทะเลในช่วงเดือนเมษายนถึงพฤษภาคม 31.04 องศาเซลเซียส และกรกฎาคมถึงสิงหาคม 29.48 องศาเซลเซียส

4) เมื่อพิจารณาฤดูกาลและความสามารถในการดูดติดตะกอน พบว่าช่วงฤดูฝนถึงฤดูแล้งในเดือนพฤศจิกายนถึงมีนาคม เป็นช่วงที่มีค่าความเค็มเฉลี่ยของน้ำทะเลต่ำกว่า 15 ppt คิดเป็น 85.7% ของความถี่ที่ตรวจพบค่าความเค็มเฉลี่ยต่ำกว่า 15 ppt ทุกจุดสำรวจในรอบปี และจากการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดติดตะกอนพบว่าช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงที่ไตรบิวทิลทินดูดติดตะกอนได้ดีและน้ำทะเลมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่าช่วงเดือนอื่นๆ ด้วยเช่นกัน โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำทะเลในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงธันวาคม 28.91 องศาเซลเซียส และกุมภาพันธ์ถึงมีนาคม 28.86 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4-8 ความสามารถในการละลายน้ำและดูดติดตะกอนของไตรบิวทิลทินที่ช่วงเวลาต่างๆ ในทะเลสาบสงขลา

จุดสำรวจ	ก.พ.-มี.ค.			เม.ย.-พ.ค.			ก.ค.-ส.ค.			พ.ย.-ธ.ค.		
	ความเค็ม	กรดด่าง	อุณหภูมิ	ความเค็ม	กรดด่าง	อุณหภูมิ	ความเค็ม	กรดด่าง	อุณหภูมิ	ความเค็ม	กรดด่าง	อุณหภูมิ
SK11	A (10.38)	-	-	-	S (8.22)	-	-	S (8.09)	-	A (8.71)	-	-
SK12	A (12.43)	S (8.11)	-	-	S (8.15)	-	-	S (8.05)	-	A (12.17)	-	-
SK13	A (14.46)	-	-	A (14.20)	-	-	-	-	-	A (8.07)	-	-
SK14	-	-	-	-	S (8.24)	-	-	S (8.04)	-	-	-	-
SK15	-	-	-	-	S (8.19)	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ – ค่าไม่อยู่ในเกณฑ์วิเคราะห์

S ละลายน้ำได้ดีที่ค่าความเป็นกรดด่างสูงกว่า 8 (ค่าความเป็นกรดด่างเฉลี่ย)

A ดูดติดตะกอนได้ดีที่ค่าความเค็มต่ำกว่า 15 ppt (ค่าความเค็มเฉลี่ยในหน่วย ppt)

จากการวิเคราะห์พบว่าความสามารถในการดูดติดตะกอนภายหลังการละลายในน้ำเกิดได้ง่ายในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงมีนาคม ซึ่งเป็นช่วงที่ค่าความเค็มเฉลี่ยต่ำกว่า 15 ppt และเป็นช่วงฤดูฝนและฤดูร้อนที่อุณหภูมิน้ำทะเลสาบมีค่าต่ำกว่าช่วงอื่นๆ ในรอบปี สอดคล้องกับสมบัติของไตรบิวทิลทินซึ่งเป็นสารที่สามารถตกตะกอนสู่ชั้นตะกอนได้ง่ายและหากมีการปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติ จะมีโอกาสปนเปื้อนในแหล่งน้ำจืดจนเกิดความเป็นพิษได้มากกว่าในน้ำทะเล (Inaba et al., 1995)

จากผลการศึกษาของ ธิวาริ โอภิธากร และสุทธิสา ยาอีด (2559) พบว่าพื้นที่ทะเลสาบสงขลาอาจมีการละลายน้ำของไตรบิวทิลทินได้ดีในบางฤดูกาล ซึ่งหมายถึงหากมีการชะละลายลงสู่ทะเลสาบสงขลาหรือมีการละลายคืนกลับจากตะกอนดินสู่น้ำทะเล จะมีโอกาสแพร่กระจายได้ง่ายด้วยเช่นกัน รวมถึงอาจมีการดูดติดตะกอนได้ดีในบางฤดูกาล ซึ่งหมายถึงหากมีการชะละลายลงสู่ทะเลสาบสงขลาหรือมีการละลายในน้ำทะเลอยู่ก่อนนั้น จะมีโอกาสสะสมในตะกอนดินและสัตว์ทะเลจำพวกหอยได้ง่ายด้วยเช่นกัน ในกรณีที่มีแหล่งกำเนิดไตรบิวทิลทินในพื้นที่ทะเลสาบสงขลาจะทำให้มีการแพร่กระจาย การสะสม เกิดผลกระทบต่อสัตว์ทะเล ระบบนิเวศ และมนุษย์ได้ คาดการณ์โดยผลการศึกษาได้ว่าไตรบิวทิลทินสามารถละลายอยู่ในน้ำทะเลสาบสงขลาได้ง่ายในช่วงเดือนเมษายนถึงสิงหาคม ซึ่งเป็นช่วงที่ค่าความเป็นกรดด่างเฉลี่ยมีค่าสูงกว่า 8 และเป็นช่วงก่อนฤดูฝนที่อุณหภูมิน้ำทะเลสาบมีค่าสูงกว่าช่วงอื่นๆ ในรอบปี นอกจากนี้งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการตรวจพบปริมาณสารไตรบิวทิลทินในแหล่งน้ำในแม่น้ำสำคัญในประเทศไทยในฤดูแล้งสูงกว่าในฤดูฝน (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2552) และตรวจพบปริมาณไตรบิวทิลทินในทะเลไอซ์แลนด์ตอนใต้ในช่วงฤดูร้อนสูงกว่า

ช่วงฤดูหนาว 5-10 เท่า โดยไม่มีนัยสำคัญจากกิจกรรมการขนส่งทางเรือในพื้นที่ด้วย (Skarphédinsdóttir et al., 1996) (ผลงานตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับชาติ ดูในภาคผนวก ง)

4.4 การทดสอบการตกจมและการแขวนลอยใหม่ของไตรบิวทิลทิน

การวิเคราะห์การตกจมและแขวนลอยของไตรบิวทิลทิน โดยประยุกต์ใช้สมการดุลมวลสารในระบบ ซึ่งเดิมเป็นการสมมุติระบบทดสอบประกอบไปด้วยเฟสน้ำและเฟสสารแขวนลอยสำหรับพิจารณากลไกการดูดติดและละลายน้ำของไตรบิวทิลทินตามวิธีของ Ophithakorn และคณะ (2016) โดยในการศึกษานี้จะทำการสมมุติระบบทดสอบประกอบไปด้วยเฟสน้ำและเฟสตะกอน พิจารณาสมการในเฟสน้ำดังสมการที่ 1 และเฟสตะกอนดังสมการที่ 2

$$I_L + G_L = O_L + R_L + \frac{d[TBT]_L}{dt} \quad (1)$$

โดย TBT คือ ไตรบิวทิลทิน

I_L คือ มวลเข้าระบบในเฟสน้ำ

G_L คือ มวลสารเกิดในระบบในเฟสน้ำ

O_L คือ มวลสารออกจากระบบในเฟสน้ำ

R_L คือ มวลสารหายไปจากระบบในเฟสน้ำ

$\frac{d[TBT]_L}{dt}$ คือ มวลสารสะสมในระบบในเฟสน้ำ

$$I_S + G_S = O_s + R_S + \frac{d[TBT]_S}{dt} \quad (2)$$

โดย TBT คือ ไตรบิวทิลทิน

I_S คือ มวลเข้าระบบในเฟสตะกอน

G_S คือ มวลสารเกิดในระบบในเฟสตะกอน

O_S คือ มวลสารออกจากระบบในเฟสตะกอน

R_S คือ มวลสารหายไปจากระบบในเฟสตะกอน

$\frac{d[TBT]_S}{dt}$ คือ มวลสารสะสมในระบบในเฟสตะกอน

สำหรับไตรบิวทิลทินนั้นสามารถใช้สมการดุลมวลสารที่พิจารณาเงื่อนไขของการไม่เกิดขึ้นเองของไตรบิวทิลทินในระบบและไม่มีมวลสารไตรบิวทิลทินส่วนใดหายไปจากระบบ *($G_S = 0$ และ $R_S = 0$)* (Ophithakorn et al., 2016) ซึ่งในความเป็นจริงนั้นอาจมีมวลของไตรบิวทิลทินบางส่วนเปลี่ยนรูปไปเป็นไดบิวทิลทินหรือโมโนบิวทิลทินได้ และอาจมีมวลของไตรบิวทิลทินบางส่วนหายไปในระหว่างการทดลองโดยอาจติดไปกับภาชนะ ระเหย หรือสลายตัวไปโดยปัจจัยอื่นๆ เช่น ความร้อน แสงสว่างได้เช่นกัน โดยในการศึกษาจะพิจารณาว่าการหายไปจะเกิดขึ้นน้อยมากๆ หรือไม่เกิดขึ้นเลย และพิจารณาให้การถ่ายโอนของไตรบิวทิลทินในน้ำและในตะกอนมีความสัมพันธ์กันโดยตรง ($O_L = I_S$

และ $O_S = I_L$) (Ophithakorn et al., 2016) โดยการพิจารณาความสามารถในการถ่ายโอนไตรบิวทิลทินจากน้ำไปสู่ตะกอน ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ดังสมการที่ 3

$$\frac{d[TBT]_L}{dt} + \frac{d[TBT]_S}{dt} = -R_L \qquad (3)$$

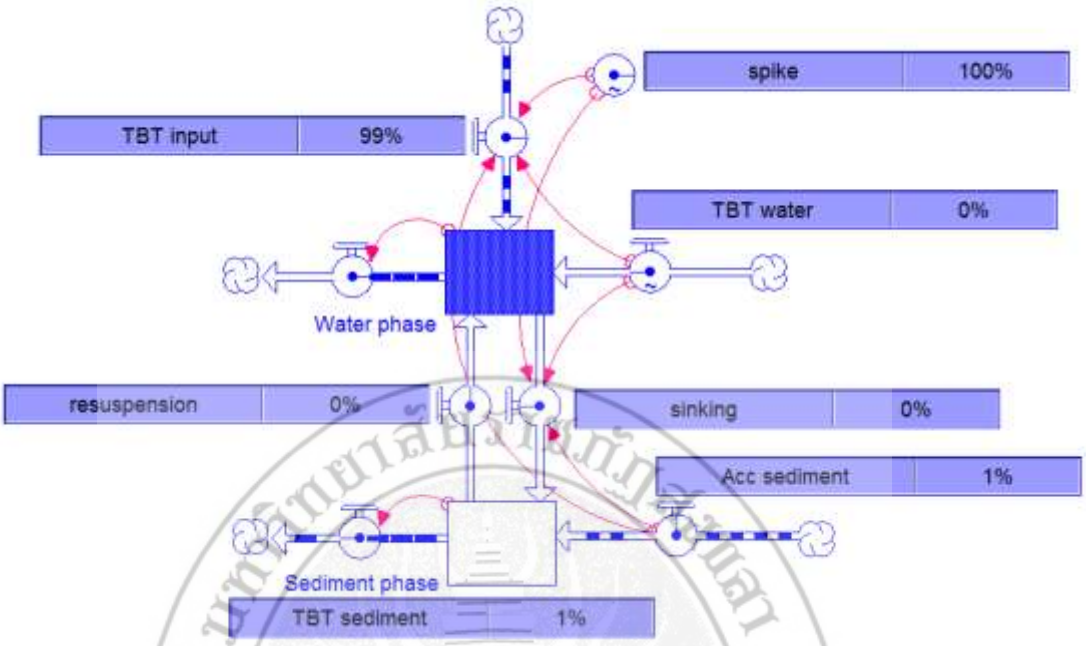
ในการประเมินการเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่างๆ ว่าเกิดสถานะตกจมหรือแขวนลอยใหม่ ทำโดยการสร้างแบบจำลองแผนภาพด้วยโปรแกรม STELLA และใช้สมการสมดุลมวลสารในระบบในการคำนวณ โดยนำผลที่ได้จากการตรวจวัดปริมาณไตรบิวทิลทินในตะกอนก่อนทดลองและปริมาณของไตรบิวทิลทินคลอไรด์ที่ใส่เข้าไปในระบบมาทำการคำนวณ เพื่อประเมินการตกจมและการแขวนลอยใหม่ของไตรบิวทิลทินในรูปของ Sn (mg/L)

โดยวิเคราะห์ปริมาณไตรบิวทิลทินในห้องปฏิบัติการด้วย ICP-OES สัญลักษณ์และค่าคงที่ที่ใช้ในแบบจำลองแสดงได้ดังตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 สัญลักษณ์ที่ใช้ในแบบจำลอง

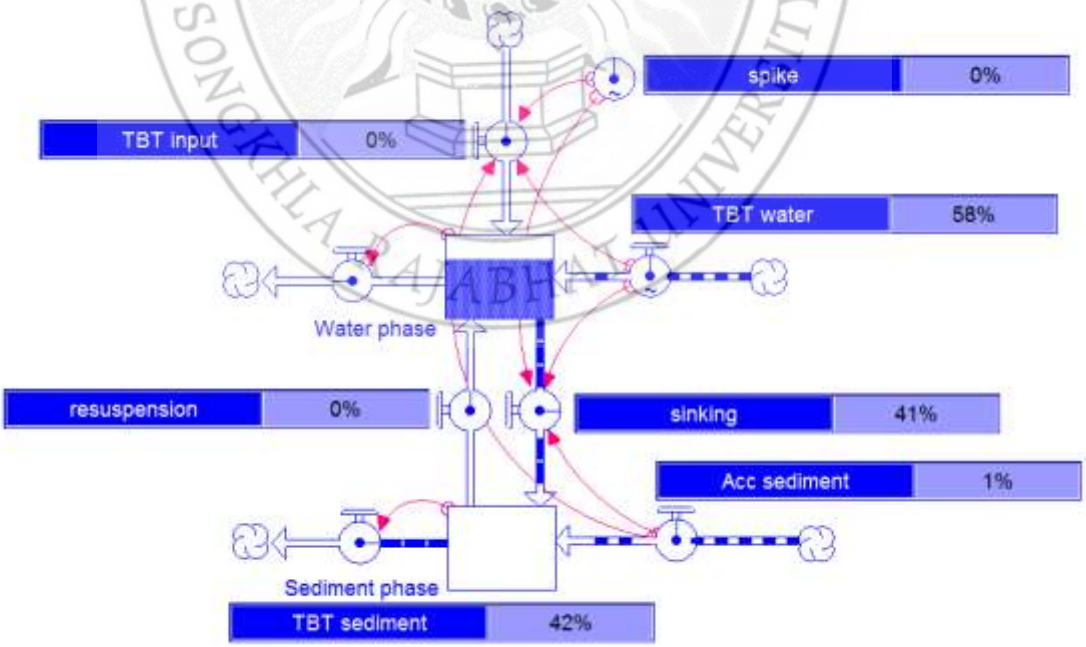
สัญลักษณ์ในแบบจำลอง	สัญลักษณ์ในสมการ	คำอธิบาย
TBT Input	I_L	ไตรบิวทิลทินเข้าในเฟสน้ำ
sinking	$I_S = O_L$	ไตรบิวทิลทินเข้าในเฟสตะกอน ไตรบิวทิลทินออกจากเฟสน้ำ
resuspension	O_S	ไตรบิวทิลทินออกจากเฟสตะกอน
TBT water	$d[TBT]_L/dt$	ไตรบิวทิลทินทั้งหมดในเฟสน้ำ
TBT Sediment	$d[TBT]_S/dt$	ไตรบิวทิลทินทั้งหมดในเฟสตะกอน
spike	-	ไตรบิวทิลทินที่เติมลงไปในระบบ
Acc sediment	-	ไตรบิวทิลทินสะสมในเฟสตะกอน
Water phase	-	เฟสน้ำ
Sediment phase	-	เฟสตะกอน

จากการศึกษาด้วยแบบจำลองแผนภาพและการคำนวณด้วยสมการสมดุลมวลสารระบบของ Ophithakorn และคณะ (2016) พบว่าเมื่อทำการเติมไตรบิวทิลทินในน้ำ (spike 100%) โดยในน้ำไม่มีปริมาณของไตรบิวทิลทินแขวนลอยอยู่เลย (TBT water 0%) แต่มีปริมาณของไตรบิวทิลทินที่ตรวจวัดได้ในดินอยู่ก่อนแล้ว (Acc sediment 1%) ที่เวลาเริ่มต้นไตรบิวทิลทินจะแขวนลอยอยู่ในเฟสน้ำ (TBT Input 99%) โดยยังไม่มีการตกจมเกิดขึ้น (sinking 0%) ปริมาณของไตรบิวทิลทินในตะกอนจึงเท่ากับปริมาณไตรบิวทิลทินที่มีอยู่เดิมในตะกอน (TBT sediment 1%) ดังภาพประกอบที่ 4-12



ภาพประกอบที่ 4-12 แบบจำลองการถ่ายโอนของไตรบิวทิลทินในระบบจำลองที่เวลาเริ่มต้น

หลังจากทำการทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อทำการตรวจวัดไตรบิวทิลทินในน้ำและในตะกอนพบว่ายังคงมีไตรบิวทิลทินส่วนหนึ่งแขวนลอยอยู่ (TBT water 58%) โดยไตรบิวทิลทินในน้ำจะตกจม (sinking 41%) และดูดติดอยู่ในดิน (TBT sediment 42%) ดังภาพประกอบที่ 4-13



ภาพประกอบที่ 4-13 แบบจำลองการถ่ายโอนของไตรบิวทิลทินในระบบจำลอง
ที่เวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง

ในการทดลองการตกจมและการแขวนลอยใหม่จากตะกอนดินแบ่งการทดลองออกเป็น 6 ชุด ดังนี้

การทดลองชุดที่ 1 ศึกษาการแขวนลอยใหม่จากตะกอนดินที่มีปริมาณไตรบิวทิลทินตามธรรมชาติที่เวลา 168 ชั่วโมง โดยนำตัวอย่างตะกอนดินน้ำหนักตัวอย่างละ 15 g ทดสอบโดยการผสมตะกอนดินในน้ำ DI 1 L กวนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยแท่งแก้วคน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เป็นเวลา 30 นาที และทำการเก็บต่อเนื่องทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 168 ชั่วโมง โดยรินน้ำและแยกตะกอนดินออกจากกัน ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและตะกอนดิน

การทดลองชุดที่ 2 ศึกษาการแขวนลอยใหม่จากตะกอนดินที่มีปริมาณไตรบิวทิลทินตามธรรมชาติที่เวลา 24 ชั่วโมง โดยนำตัวอย่างตะกอนดินน้ำหนักตัวอย่างละ 15 g ทดสอบโดยการผสมตะกอนดินในน้ำ DI 1 L กวนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยแท่งแก้วคน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการเก็บต่อเนื่องทุก 4 ชั่วโมง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยรินน้ำและแยกตะกอนดินออกจากกัน ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและตะกอนดิน

การทดลองชุดที่ 3 ศึกษาการตกจมจากตะกอนดินที่มีปริมาณไตรบิวทิลทินความเข้มข้นสมมุติที่เวลา 168 ชั่วโมง โดยนำตัวอย่างตะกอนดินน้ำหนักตัวอย่างละ 15 g ผสมในสารละลายไตรบิวทิลทินคลอไรด์ 1 L กวนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยแท่งแก้วคน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เป็นเวลา 30 นาที และเก็บตัวอย่างทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 168 ชั่วโมง โดยรินน้ำและแยกตะกอนดินออกจากกัน ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและตะกอนดิน

การทดลองชุดที่ 4 ศึกษาการตกจมจากตะกอนดินที่มีปริมาณไตรบิวทิลทินความเข้มข้นสมมุติที่เวลา 24 ชั่วโมง โดยนำตัวอย่างตะกอนดินน้ำหนักตัวอย่างละ 15 g ผสมในสารละลายไตรบิวทิลทินคลอไรด์ 1 L กวนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยแท่งแก้วคน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการเก็บต่อเนื่องทุก 4 ชั่วโมง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยรินน้ำและแยกตะกอนดินออกจากกัน ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและตะกอนดิน

การทดลองชุดที่ 5 ศึกษาการการแขวนลอยใหม่จากตะกอนดินที่มีปริมาณไตรบิวทิลทินความเข้มข้นสมมุติที่เวลา 168 ชั่วโมง โดยนำตัวอย่างตะกอนดินน้ำหนักตัวอย่างละ 15 g ผสมในในน้ำ DI 1 L กวนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยแท่งแก้วคน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เป็นเวลา 30 นาที และเก็บตัวอย่างทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 168 ชั่วโมง โดยรินน้ำและแยกตะกอนดินออกจากกัน ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและตะกอนดิน

การทดลองชุดที่ 6 ศึกษาการการแขวนลอยใหม่จากตะกอนดินที่มีปริมาณไตรบิวทิลทินความเข้มข้นสมมุติที่เวลา 24 ชั่วโมง โดยนำตัวอย่างตะกอนดินน้ำหนักตัวอย่างละ 15 g ผสมในในน้ำ DI 1 L กวนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยแท่งแก้วคน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เป็นเวลา 30 นาที และเก็บตัวอย่างทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 168 ชั่วโมง โดยรินน้ำและแยกตะกอนดินออกจากกัน ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและตะกอนดิน

สามารถแสดงสภาวะในการทดลองทั้ง 5 ชุดได้ดังตารางที่ 4-10

ตาราง 4-10 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

การทดลอง	ตะกอนจุดสำรวจ	สารละลายเฟสน้ำ (1 L)	น้ำหนักตะกอน (g)	TBT (mg Sn/kg) เริ่มต้นในตะกอน	TBT (mg Sn/L) ที่เติมในน้ำ
1	1	น้ำ DI	15.040	35.45	0
	2	น้ำ DI	15.090	28.66	0
	3	น้ำ DI	15.080	28.88	0
	4	น้ำ DI	15.042	30.33	0
	5	น้ำ DI	15.090	25.03	0
2	1	น้ำ DI	15.010	12.99	0
3	1	TBTCl	15.078	24.22	50.18
	2	TBTCl	15.060	20.75	50.18
	3	TBTCl	15.066	22.80	50.18
	4	TBTCl	15.033	22.72	50.18
	5	TBTCl	15.069	21.10	50.18
4	1	TBTCl	15.041	17.17	50.18
5	1	น้ำ DI	15.092	68.90	0
	2	น้ำ DI	15.050	57.11	0
	3	น้ำ DI	15.064	53.97	0
	4	น้ำ DI	15.040	55.75	0
	5	น้ำ DI	15.060	52.33	0
6	1	น้ำ DI	15.077	50.77	0

ผลการทดลองชุดที่ 1

ผลการทดลองพบว่าไม่มีการแขวนลอยใหม่เกิดขึ้นในระบบจำลอง โดยไม่มีปริมาณไตรบิวทิลทิน (mg Sn/L) ในน้ำที่เวลาใดๆ ในการตั้งทิ้งไว้ 168 ชั่วโมง สามารถแสดงร้อยละของไตรบิวทิลทินในเฟสน้ำและเฟสตะกอนที่เวลาต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4-11 จากผลการศึกษาสามารถคำนวณมวลสารสะสมในระบบของไตรบิวทิลในเฟสน้ำ ($\frac{d[TBT]_L}{dt}$) และในเฟสตะกอน ($\frac{d[TBT]_S}{dt}$) ซึ่งไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปของไตรบิวทิลไปเป็นไดบิวทิลทินหรือโมโนบิวทิลทินหรือไม่มีมวลของไตรบิวทิลหายไปจากระบบตามที่กำหนดไว้ ($-R_L$ = 0) ได้ดังตารางที่ 4-12 และแสดงสภาวะระบบได้ดังตารางที่ 4-13

ตาราง 4-11 ร้อยละของไตรบิวทิลทินในน้ำและตะกอนที่เวลาต่างๆ ในการทดลองชุดที่ 1

เวลา (ชั่วโมง)	จุดสำรวจ									
	1 (%)		2 (%)		3 (%)		4 (%)		5 (%)	
	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน
0	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
0.5	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
24	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
48	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
72	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
96	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
120	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
144	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
168	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100

ตาราง 4-12 มวลสารสะสมในระบบของไตรบิวทิลทินในเฟสน้ำและตะกอนในการทดลองชุดที่ 1

เวลา (ชม.)	จุดสำรวจ									
	1		2		3		4		5	
	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]]_S/dt$
0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
96	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
144	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
168	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ตาราง 4-13 สภาวะระบบในการทดลองชุดที่ 1

เวลา (ชั่วโมง)	จุดสำรวจ									
	1		2		3		4		5	
	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น
0.5	0	สภาวะสมดุลระบบ	0	สภาวะสมดุลระบบ	0	สภาวะสมดุลระบบ	0	สภาวะสมดุลระบบ	0	สภาวะสมดุลระบบ
24	0		0		0		0		0	
48	0		0		0		0		0	
72	0		0		0		0		0	
96	0		0		0		0		0	
120	0		0		0		0		0	
144	0		0		0		0		0	
168	0		0		0		0		0	

ผลการทดลองชุดที่ 2

ผลการทดลองพบว่าไม่มีการแขวนลอยใหม่เกิดขึ้นในระบบจำลอง โดยไม่มีปริมาณไตรบิวทิลทิน (mg Sn/L) ในน้ำที่เวลาใดๆ ในการตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง สามารถแสดงร้อยละของไตรบิวทิลทินในเฟสน้ำและเฟสตะกอนที่เวลาต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4-14 จากผลการศึกษาสามารถคำนวณมวลสารสะสมในระบบของไตรบิวทิลในเฟสน้ำ ($\frac{d[TBT]_L}{dt}$) และในเฟสตะกอน ($\frac{d[TBT]_S}{dt}$) ซึ่งไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปของไตรบิวทิลไปเป็นไดบิวทิลทินหรือโมโนบิวทิลทินหรือไม่มีมวลของไตรบิวทิลหายไปจากระบบตามที่กำหนดไว้ ($-R_L$ = 0) ได้ดังตารางที่ 4-15 และแสดงสภาวะระบบได้ดังตารางที่ 4-16

ตาราง 4-14 ร้อยละของไตรบิวทิลทินในน้ำและตะกอนที่เวลาต่างๆ ในการทดลองชุดที่ 2

เวลา (ชั่วโมง)	จุดสำรวจ									
	1 (%)		2 (%)		3 (%)		4 (%)		5 (%)	
	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน
0	0	100	-	-	-	-	-	-	-	-
1	0	100	-	-	-	-	-	-	-	-
4	0	100	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0	100	-	-	-	-	-	-	-	-
12	0	100	-	-	-	-	-	-	-	-
16	0	100	-	-	-	-	-	-	-	-
20	0	100	-	-	-	-	-	-	-	-
24	0	100	-	-	-	-	-	-	-	-

ตาราง 4-15 มวลสารสะสมในระบบของไตรบิวทิลทินในเฟสน้ำและตะกอนในการทดลองชุดที่ 2

เวลา (ชม.)	จุดสำรวจ									
	1		2		3		4		5	
	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$
1	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
4	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
12	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
16	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
20	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
24	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-

ตาราง 4-16 สภาวะระบบในการทดลองชุดที่ 2

เวลา (ชั่วโมง)	จุดสำรวจ									
	1		2		3		4		5	
	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น
1	0	สภาวะสมดุลระบบ	0	สภาวะสมดุลระบบ	0	สภาวะสมดุลระบบ	0	สภาวะสมดุลระบบ	0	สภาวะสมดุลระบบ
4	0		0		0		0		0	
8	0		0		0		0		0	
12	0		0		0		0		0	
16	0		0		0		0		0	
20	0		0		0		0		0	
24	0		0		0		0		0	

ผลการทดลองชุดที่ 3

ผลการทดลองพบว่ามีการตกจมอย่างรวดเร็วและมีอัตราสูง 54-88 mg Sn/L.h ที่ 30 นาทีแรกของการทดลอง มีการแขวนลอยใหม่และตกจมที่อัตราต่ำ 0-2 mg Sn/L.h ที่ช่วงเวลาอื่นอย่างไม่สม่ำเสมอในทุกตัวอย่าง โดยระบบมีสถานะเข้าสู่สภาวะสมดุลระบบภายหลัง 24 ชั่วโมงผ่านไป เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการตกจมและแขวนลอยใหม่น้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราการตกจมเริ่มต้น สามารถแสดงร้อยละของไตรบิวทิลทินในเฟสน้ำและเฟสตะกอนที่เวลาต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4-17 จากผลการศึกษาสามารถคำนวณมวลสารสะสมในระบบของไตรบิวทิลในเฟสน้ำ ($\frac{d[TBT]_L}{dt}$) และในเฟสตะกอน ($\frac{d[TBT]_S}{dt}$) ซึ่งไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปของไตรบิวทิลไปเป็นไดบิวทิลทิน

หรือโมโนบิวทิลทินหรือไม่มีมวลของไตรบิวทิลหายไปจากระบบตามที่กำหนดไว้ ($-R_L = 0$) ได้ดังตารางที่ 4-18 และแสดงสภาวะระบบได้ดังตารางที่ 4-19

ตาราง 4-17 ร้อยละของไตรบิวทิลทินในน้ำและตะกอนที่เวลาต่างๆ ในการทดลองชุดที่ 3

เวลา (ชั่วโมง)	จุดสำรวจ									
	1 (%)		2 (%)		3 (%)		4 (%)		5 (%)	
	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน
0	99	1	99	1	99	1	99	1	99	1
0.5	31	69	12	88	34	66	20	80	46	54
24	58	42	35	65	62	38	6	94	20	80
48	60	40	25	75	33	67	14	86	53	47
72	63	37	64	36	36	64	28	72	54	46
96	49	51	16	84	47	53	90	10	55	45
120	59	41	12	88	24	76	8	92	36	64
144	36	64	24	76	71	29	31	69	21	79
168	45	55	10	90	19	81	44	56	32	68

ตาราง 4-18 มวลสารสะสมในระบบของไตรบิวทิลทินในเฟสน้ำและตะกอนในการทดลองชุดที่ 3

เวลา (ชม.)	จุดสำรวจ									
	1		2		3		4		5	
	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$
0.5	-136	136	-175	175	-131	131	-159	159	-107	107
24	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
48	0	0	0	0	-1	1	0	0	1	-1
72	0	0	2	-2	0	0	1	-1	0	0
96	-1	1	-2	2	0	0	3	-3	0	0
120	0	0	0	0	-1	1	-3	3	-1	1
144	-1	1	0	0	2	-2	1	-1	-1	1
168	0	0	-1	1	-2	2	1	-1	0	0

ตาราง 4-19 สภาวะระบบในการทดลองชุดที่ 3

เวลา (ชั่วโมง)	จุดสำรวจ									
	1		2		3		4		5	
	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น
0.5	69	ตกจม	88	ตกจม	66	ตกจม	80	ตกจม	54	ตกจม
24	-1	สภาวะสมดุลระบบ	0	สภาวะสมดุลระบบ	-1	สภาวะสมดุลระบบ	0	สภาวะสมดุลระบบ	1	สภาวะสมดุลระบบ
48	0		0		1		0		-1	
72	0		-1		0		0		0	
96	0		1		0		-1		0	
120	0		0		0		2		0	
144	0		0		-1		0		0	
168	0		0		1		0		0	

ผลการทดลองชุดที่ 4

ผลการทดลองพบว่ามีการตกจมอย่างรวดเร็วและมีอัตราสูง 26 mg Sn/L.h ที่ 1 ชั่วโมงแรกของการทดลอง มีการแขวนลอยใหม่และตกจมที่อัตราต่ำ 0-3 mg Sn/L.h ที่ช่วงเวลาอื่น โดยระบบกำลังเข้าสู่สภาวะสมดุลระบบ เนื่องจากยังคงมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการตกจมและแขวนลอยใหม่ในอัตราน้อยๆ สามารถแสดงร้อยละของไตรบิวทิลทินในเฟสน้ำและเฟสตะกอนที่เวลาต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4-20 จากผลการศึกษาสามารถคำนวณมวลสารสะสมในระบบของไตรบิวทิลในเฟสน้ำ ($\frac{d[TBT]_L}{dt}$) และในเฟสตะกอน ($\frac{d[TBT]_S}{dt}$) ซึ่งไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปของไตรบิวทิลไปเป็นไดบิวทิลทินหรือโมโนบิวทิลทินหรือไม่มีมวลของไตรบิวทิลหายไปจากระบบตามที่กำหนดไว้ ($-R_L = 0$) ได้ดังตารางที่ 4-21 และแสดงสภาวะระบบได้ดังตารางที่ 4-22

ตาราง 4-20 ร้อยละของไตรบิวทิลทินในน้ำและตะกอนที่เวลาต่างๆ ในการทดลองชุดที่ 4

เวลา (ชั่วโมง)	จุดสำรวจ									
	1 (%)		2 (%)		3 (%)		4 (%)		5 (%)	
	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน
0	99	1	-	-	-	-	-	-	-	-
1	48	52	-	-	-	-	-	-	-	-
4	54	46	-	-	-	-	-	-	-	-
8	57	43	-	-	-	-	-	-	-	-
12	63	37	-	-	-	-	-	-	-	-
16	44	56	-	-	-	-	-	-	-	-
20	55	45	-	-	-	-	-	-	-	-
24	28	72	-	-	-	-	-	-	-	-

ตาราง 4-21 มวลสารสะสมในระบบของไตรบิวทิลทินในเฟสน้ำและตะกอนในการทดลองชุดที่ 4

เวลา (ชม.)	จุดสำรวจ									
	1		2		3		4		5	
	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$
1	-52	52	-	-	-	-	-	-	-	-
4	2	-2	-	-	-	-	-	-	-	-
8	1	-1	-	-	-	-	-	-	-	-
12	1	-1	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-5	5	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3	-3	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-7	7	-	-	-	-	-	-	-	-

ตาราง 4-22 สภาวะระบบในการทดลองชุดที่ 4

เวลา (ชั่วโมง)	จุดสำรวจ									
	1		2		3		4		5	
	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น
1	26	ตกจม	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-1	สภาวะสมดุลระบบ	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0		-	-	-	-	-	-	-	-
12	-1		-	-	-	-	-	-	-	-
16	2		-	-	-	-	-	-	-	-
20	-1		-	-	-	-	-	-	-	-
24	3		-	-	-	-	-	-	-	-

ผลการทดลองชุดที่ 5

ผลการทดลองพบว่ามีการแขวนลอยใหม่เกิดขึ้นในระบบจำลองที่เวลาผ่านไป 30 นาที ในอัตราที่น้อยมากเพียง 0-1 mg Sn/L.h ทั้งยังไม่เกิดขึ้นในทุกตัวอย่าง และมีปริมาณไตรบิวทิลทิน (mg Sn/L) ในน้ำคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง สามารถแสดงร้อยละของไตรบิวทิลทินในเฟสน้ำและเฟสตะกอนที่เวลาต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4-23 จากผลการศึกษาสามารถคำนวณมวลสารสะสมในระบบของไตรบิวทิลในเฟสน้ำ ($\frac{d[TBT]_L}{dt}$) และในเฟสตะกอน ($\frac{d[TBT]_S}{dt}$) ซึ่งไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปของไตรบิวทิลไปเป็นไดบิวทิลทินหรือโมโนบิวทิลทินหรือไม่มีมวลของไตรบิวทิลหายไปจากระบบตามที่กำหนดไว้ ($-R_L$= 0) ได้ดังตารางที่ 4-24 และแสดงสภาวะระบบได้ดังตารางที่ 4-25

ตาราง 4-23 ร้อยละของไตรบิวทิลทินในน้ำและตะกอนที่เวลาต่างๆ ในการทดลองชุดที่ 5

เวลา (ชั่วโมง)	จุดสำรวจ									
	1 (%)		2 (%)		3 (%)		4 (%)		5 (%)	
	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน
0	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
0.5	31	69	12	88	34	66	20	80	46	54
24	58	42	35	65	62	38	6	94	20	80
48	60	40	25	75	33	67	14	86	53	47
72	63	37	64	36	36	64	28	72	54	46
96	49	51	16	84	47	53	90	10	55	45
120	59	41	12	88	24	76	8	92	36	64
144	36	64	24	76	71	29	31	69	21	79
168	45	55	10	90	19	81	44	56	32	68

ตาราง 4-24 มวลสารสะสมในระบบของไตรบิวทิลทินในเฟสน้ำและตะกอนในการทดลองชุดที่ 5

เวลา (ชม.)	จุดสำรวจ									
	1		2		3		4		5	
	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$
0.5	62	-62	24	-24	68	-68	39	-39	92	-92
24	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
48	0	0	0	0	-1	1	0	0	1	-1
72	0	0	2	-2	0	0	1	-1	0	0
96	-1	1	-2	2	0	0	3	-3	0	0
120	0	0	0	0	-1	1	-3	3	-1	1
144	-1	1	0	0	2	-2	1	-1	-1	1
168	0	0	-1	1	-2	2	1	-1	0	0

ตาราง 4-25 สภาวะระบบในการทดลองชุดที่ 5

เวลา (ชั่วโมง)	จุดสำรวจ									
	1		2		3		4		5	
	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น
0.5	-1	สภาวะสมดุลระบบ	0	สภาวะสมดุลระบบ	-1	สภาวะสมดุลระบบ	0	สภาวะสมดุลระบบ	-1	สภาวะสมดุลระบบ
24	0		0		0		0		0	
48	0		0		0		0		0	
72	0		0		0		0		0	
96	0		0		0		0		0	
120	0		0		0		0		0	
144	0		0		0		0		0	
168	0		0		0		0		0	

ผลการทดลองชุดที่ 6

ผลการทดลองพบว่าไม่มีการแขวนลอยใหม่เกิดขึ้นในระบบจำลองที่เวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง โดยมีปริมาณไตรบิวทิลทิน (mg Sn/L) ในน้ำคงที่ตลอดการทดลอง สามารถแสดงร้อยละของไตรบิวทิลทินในเฟสน้ำและเฟสตะกอนที่เวลาต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4-26 จากผลการศึกษาสามารถคำนวณมวลสารสะสมในระบบของไตรบิวทิลในเฟสน้ำ ($\frac{d[TBT]_L}{dt}$) และในเฟสตะกอน ($\frac{d[TBT]_S}{dt}$) ซึ่งไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปของไตรบิวทิลไปเป็นไดบิวทิลทินหรือโมโนบิวทิลทินหรือไม่มีมวลของไตรบิวทิลหายไปจากระบบตามที่กำหนดไว้ ($-R_L$ = 0) ได้ดังตารางที่ 4-27 และแสดงสภาวะระบบได้ดังตารางที่ 4-28

ตาราง 4-26 ร้อยละของไตรบิวทิลทินในน้ำและตะกอนที่เวลาต่างๆ ในการทดลองชุดที่ 6

เวลา (ชั่วโมง)	จุดสำรวจ									
	1 (%)		2 (%)		3 (%)		4 (%)		5 (%)	
	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน	น้ำ	ตะกอน
0	0	100	-	-	-	-	-	-	-	-
1	48	52	-	-	-	-	-	-	-	-
4	45	55	-	-	-	-	-	-	-	-
8	52	48	-	-	-	-	-	-	-	-
12	61	39	-	-	-	-	-	-	-	-
16	55	45	-	-	-	-	-	-	-	-
20	52	48	-	-	-	-	-	-	-	-
24	55	45	-	-	-	-	-	-	-	-

ตาราง 4-27 มวลสารสะสมในระบบของไตรบิวทิลทินในเฟสน้ำและตะกอนในการทดลองชุดที่ 6

เวลา (ชม.)	จุดสำรวจ									
	1		2		3		4		5	
	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$	$[d[TBT]_L/dt$	$[d[TBT]_S/dt$
1	48	-48	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
8	2	-2	-	-	-	-	-	-	-	-
12	2	-2	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-2	2	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
24	1	-1	-	-	-	-	-	-	-	-

ตาราง 4-28 สภาวะระบบในการทดลองชุดที่ 6

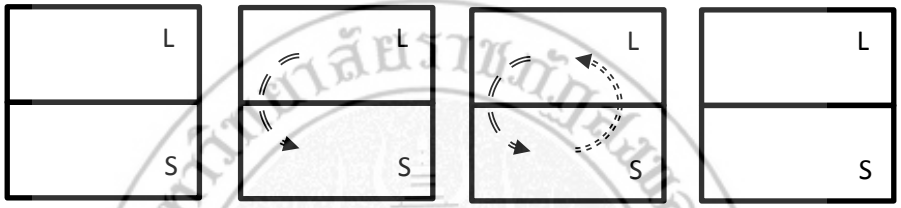
เวลา (ชั่วโมง)	จุดสำรวจ									
	1		2		3		4		5	
	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น	mg Sn/L.h	กลไกที่เกิดขึ้น
1	0	สภาวะสมดุลระบบ	-	-	-	-	-	-	-	-
4	0		-	-	-	-	-	-	-	-
8	0		-	-	-	-	-	-	-	-
12	0		-	-	-	-	-	-	-	-
16	0		-	-	-	-	-	-	-	-
20	0		-	-	-	-	-	-	-	-
24	0		-	-	-	-	-	-	-	-

จากการศึกษาการดูดติดตะกอนของไตรบิวทิลทินของ Ophithakorn และคณะ (2016) พบว่าเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งจะมีสถานะสมดุลระบบเกิดขึ้น ซึ่งจะเกิดพฤติกรรมการถ่ายโอนของไตรบิวทิลทินในน้ำสู่ตะกอนหรือจากตะกอนสู่น้ำอีกก็ได้ในภายหลังเพื่อรักษาสถานะสมดุลระบบนั้น โดยกลไกการดูดติดและการชะละลายจะเกิดขึ้นในช่วงแรกประมาณ 0-2 ชั่วโมง ของการทดลอง และเกิดได้ทั้งในการทดลองที่มีการสะสมของไตรบิวทิลทินในตะกอนก่อนทดสอบชะละลายในน้ำหรือในการทดลองที่มีการเติมไตรบิวทิลทินเพิ่มลงไปในระบบ

ในการศึกษาเมื่อพิจารณาที่เฟสตะกอนเป็นเฟสอ้างอิง (เนื่องจากในการศึกษาทำการเติมไตรบิวทิลทินลงในเฟสน้ำ) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของไตรบิวทิลทินในเฟสตะกอนเกิดขึ้นที่เวลาผ่านไป 30 นาที ภายหลังการเติมไตรบิวทิลทินลงไปในน้ำ โดยมีการตกจมและดูดติดตะกอนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากในเวลาอันสั้น ระบบจะเกิดสภาวะสมดุลระบบขึ้นหลังจาก 24 ชั่วโมง และตะกอนจะไม่

เกิดการชะละลายของไตรบิวทิลทินกลับสู่น้ำหรือหากมีการถ่ายโอนเกิดขึ้นทั้งจากตะกอนไปสู่น้ำหรือจากน้ำไปสู่ตะกอนก็จะเกิดในอัตราที่น้อยมาก

ดังนั้นในการประเมินการแขวนลอยใหม่จากตะกอนดินตามธรรมชาติ สามารถคาดการณ์ได้ว่าไตรบิวทิลทินในธรรมชาติจะตกตะกอนอย่างรวดเร็วเมื่อมีการชะละลายลงสู่แหล่งน้ำ โดยอาจเกิดสภาวะสมดุลระบบระหว่างเฟสน้ำและเฟสตะกอนเมื่อเวลาผ่านไปไม่นานนักและมีโอกาสแขวนลอยใหม่ได้ในอัตราที่ต่ำมาก โดยสามารถแสดงแบบจำลองแผนภาพอธิบายการถ่ายโอนของไตรบิวทิลทินในระบบจำลองที่เวลาต่างๆ ได้ดังภาพประกอบที่ 4-14



0 ชั่วโมง 0.5 ชั่วโมง 0.5-24 ชั่วโมง 24-168 ชั่วโมง

โดยที่ L คือ เฟสน้ำ

ตกจม แขวนลอยใหม่ S คือ เฟสตะกอน

ภาพประกอบที่ 4-14 แบบจำลองแผนภาพการถ่ายโอนของไตรบิวทิลทินในระบบจำลองที่เวลาต่างๆ

4.5 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสารออร์แกโนทินชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา

1) ไตรบิวทิลเป็นสารที่ไม่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติแต่มาจากการสังเคราะห์ขึ้นภายหลังการปฏิวัติอุตสาหกรรม ดังนั้นด้วยเหตุที่ไตรบิวทิลทินไม่สามารถเกิดขึ้นเองในธรรมชาติทั้งในเฟสน้ำและตะกอน การปนเปื้อนที่ตรวจวัดได้ต้องมีการชะละลายจากแหล่งกำเนิดผ่านชั้นน้ำลงไปสู่ชั้นตะกอนและตามลักษณะของสภาพแวดล้อมชายฝั่งที่เป็นชุมชน ท่าเรือ และแหล่งทำการประมงซึ่งมีความเสี่ยงในการปนเปื้อนไตรบิวทิลทินได้ ในการสำรวจไม่พบปริมาณไตรบิวทิลทินในน้ำทะเลแต่สามารถตรวจวัดปริมาณน้อยได้ในตะกอนดิน จึงมีโอกาสเป็นไปได้ว่าเคยมีแหล่งกำเนิดปริมาณน้อยในบริเวณนั้นก่อนการสำรวจ

2) ในการตรวจวัดปริมาณออร์แกโนทินพบว่ามีโมโนบิวทิลทินเป็นองค์ประกอบมากถึง 21-36% ซึ่งมีความเป็นพิษน้อยที่สุดและเป็นรูปที่มีการสลายตัวจากไตรบิวทิลทินและไดบิวทิลทินมาแล้ว โดยปกติค่าครึ่งชีวิตของการสลายตัวของไตรบิวทิลทินในน้ำทะเลมากกว่า 6 วัน หรือ 2-10 ปี สำหรับในตะกอนลึก (Rudel, 2003) ดังนั้นจึงมีโอกาสเป็นไปได้ว่าออร์แกโนทินที่ตรวจวัดได้ในตะกอนมีการสะสมมาแล้วระยะเวลาหนึ่งโดยอาจมาจากแหล่งกำเนิดในบริเวณนั้นก่อนการสำรวจและมีการย่อยสลายและลดความเป็นพิษลงโดยเกิดการเปลี่ยนรูปจากไตรบิวทิลทินเป็นไดบิวทิลทินและโมโนบิวทิลทินแล้วเป็นส่วนใหญ่

3) บริเวณที่สำรวจและเก็บตัวอย่างเป็นท่าเรือที่มีความลึก และมีปัจจัยทางกายภาพ-เคมีอื่นๆ เช่น กระแสน้ำ สารแขวนลอย เป็นต้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้ต้องใช้เวลาในการตกจมมากกว่าเวลาที่ใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นจึงมีโอกาสเป็นไปได้ว่าเคยมีการชะละลายและสะสม ทั้งนี้การ

ตรวจไม่พบสารออร์แกโนทินในน้ำทะเลทุกจุดสำรวจ อาจไม่มีการชะละลายลงสู่แหล่งน้ำในช่วงที่มีการสำรวจ

4) การชะละลายและแขวนลอยใหม่เมื่อตกจมและดูดติดตะกอนแล้วเกิดขึ้นได้ยาก แม้ว่าในการทดลองจะใช้น้ำ DI ในการควบคุมการทดสอบ ซึ่งค่าความเค็ม ความเป็นกรดด่าง และอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดตะกอนและละลายน้ำของไตรบิวทิลทินด้วย ตามทฤษฎีแล้วไตรบิวทิลทินมีความสามารถในการละลายในน้ำลดลงเมื่อความเค็มเพิ่มขึ้น เป็นเหตุให้ละลายในน้ำทะเลได้น้อยกว่าในน้ำกลั่น (Inaba et al., 1995) ไตรบิวทิลทินมีความสามารถในการละลายลดต่ำลงในช่วงความเป็นกรดด่าง 6-8 (Inaba et al., 1995) และไตรบิวทิลทินมีความสามารถในการละลายลดลงเมื่ออุณหภูมิของน้ำลดต่ำลง (Inaba et al., 1995) โดยในการศึกษาได้ใช้น้ำ DI ที่ปราศจากสารปนเปื้อนอื่นใดที่อาจมีผลต่อการละลายและดูดติดตะกอนได้และไม่มีค่าความเค็ม (ละลายได้ดีกว่าน้ำทะเล) มีค่าความเป็นกรดด่าง 6-8 (ใกล้เคียงสภาพน้ำทะเลธรรมชาติ) และทดสอบในอุณหภูมิน้ำ 29-30 องศาเซลเซียส (ใกล้เคียงสภาพน้ำทะเลธรรมชาติ) โดยทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากแสงแดดที่มีผลต่อการย่อยสลายของไตรบิวทิลทิน ผลที่ได้ปรากฏว่าไม่พบการแขวนลอยใหม่ของไตรบิวทิลทินจากตัวอย่างตะกอนที่มีปริมาณไตรบิวทิลตามธรรมชาติและพบการแขวนลอยใหม่ของไตรบิวทิลทินจากตัวอย่างตะกอนที่มีการเติมไตรบิวทิลลงไปน้อยมาก รวมทั้งในการสำรวจและเก็บตัวอย่างได้ดำเนินการในช่วงฤดูร้อนในเดือนเมษายน ซึ่งในการประเมินตามผลในการวิเคราะห์ปัจจัยทางกายภาพ-เคมีของน้ำ พบว่าช่วงก่อนฤดูฝนในเดือนเมษายนถึงสิงหาคมเป็นช่วงที่มีค่าความเป็นกรดด่างเฉลี่ยของน้ำทะเลสูง และน้ำทะเลมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าช่วงเดือนอื่นๆ ซึ่งน่าจะมีการละลายน้ำได้ดี ดังนั้นการชะละลายและแขวนลอยใหม่เมื่อตกจมและดูดติดตะกอนแล้วจึงเกิดขึ้นได้ยาก ตามสภาพแวดล้อมชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาจึงมีโอกาสน้อยมากในการแขวนลอยใหม่และเกิดการแพร่กระจายไปบริเวณอื่นๆ ด้วยเช่นกัน

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สถานการณ์ปริมาณออร์แกโนทินในชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา

1) สภาวะที่เหมาะสมในการแยกสารออร์แกโนทินในการวิเคราะห์ด้วย GC-MS คือโปรแกรมอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 100 องศาเซลเซียส คงที่ 5 นาที เพิ่มขึ้น 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ถึง 300 องศาเซลเซียส คงที่ 5 นาที อุณหภูมิช่องฉีดสาร 250 องศาเซลเซียส อุณหภูมิดีเทคเตอร์ 200 องศาเซลเซียส ด้วย Capillary column ยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.32 มิลลิเมตร เคลือบฟิล์มหนา 0.25 ไมโครเมตร (TR5-MS) ปริมาตรที่ฉีด 1 ไมโครลิตร แบบ Splitless mode แก๊สพาฮีเลียมที่อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตร/นาที

2) ผลการตรวจวัดออร์แกโนทินตามแนวชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาพบว่ามีปริมาณออร์แกโนทินในตะกอนดินอ่าวเมืองเก่าสงขลาสูงสุดที่จุดท่าเรือโรงสีแดงหับโห้หิ้นและต่ำสุดที่จุดท่าแพขนานยนต์สงขลา โดยไม่เกินค่าที่ยอมรับได้ในดิน และตรวจไม่พบปริมาณออร์แกโนทินและดีบุกในน้ำทะเล โดยมีองค์ประกอบเป็นไตรบิวทิลทินมากที่สุด (37-56%) และเป็นไดบิวทิลทินน้อยที่สุด (14-33%) ปริมาณไตรบิวทิลทินเฉลี่ย 5 จุดสำรวจตามแนวชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาในปัจจุบันมีค่าสูงกว่าค่าที่เคยตรวจวัดได้ในอดีตบริเวณปากทะเลสาบสงขลา

3) การวิเคราะห์การสะสมและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสารออร์แกโนทินตามแนวชายฝั่งเมืองเก่าสงขลาโดยลักษณะทางกายภาพ-เคมีของน้ำ ใช้การวิเคราะห์กลไกการตกจมและการแขวนลอยใหม่ของออร์แกโนทิน ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความเค็ม ค่าความเป็นกรดด่าง และอุณหภูมิของน้ำทะเลซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการสะสมของไตรบิวทิทินในแหล่งน้ำ พบว่าพื้นที่ทะเลสาบสงขลาอาจมีการละลายน้ำของไตรบิวทิลทินได้ดีในบางฤดูกาล โดยคาดการณ์ว่าไตรบิวทิลทินสามารถละลายน้ำทะเลสาบสงขลาได้ดีในช่วงเดือนเมษายนถึงสิงหาคม ซึ่งเป็นช่วงที่ค่าความเป็นกรดด่างเฉลี่ยมีค่าสูงกว่า 8 และเป็นช่วงก่อนฤดูฝนที่อุณหภูมิน้ำทะเลสาบมีค่าสูงกว่าช่วงอื่นๆ ในรอบปี ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวหากมีการชะละลายลงสู่ทะเลสาบสงขลาหรือมีการละลายคืนกลับจากตะกอนดินสู่น้ำทะเล จะมีโอกาสแพร่กระจายได้ง่ายกว่าช่วงเวลาอื่นในรอบปี

4) ในการศึกษาการตกจมและแขวนลอยใหม่พบว่ามีการตกจมและดูดติดตะกอนดินของไตรบิวทิลทินเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อัตรา 54-88 mg Sn/L.h ที่เวลาผ่านไป 30 นาที ภายหลังจากเติมไตรบิวทิลทินคลอไรด์ลงไปในน้ำ โดยระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุลระบบที่เวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง และในการทดลองตะกอนไม่เกิดการชะละลายของไตรบิวทิลทินกลับสู่น้ำ การถ่ายโอนเกิดขึ้นภายหลัง 24 ชั่วโมง ทั้งจากตะกอนไปสู่น้ำหรือจากน้ำไปสู่ตะกอนจะเกิดในอัตราที่น้อยมากเพียง 0-3 mg Sn/L.h ดังนั้นในการประเมินแนวโน้มการแขวนลอยใหม่จากตะกอนดินตามธรรมชาติ สามารถคาดการณ์ได้ว่าไตรบิวทิลทินจะตกตะกอนอย่างรวดเร็วเมื่อมีการชะละลายลงสู่แหล่งน้ำ โดยอาจเกิดสภาวะสมดุลระบบระหว่างเฟสน้ำและเฟสตะกอนเมื่อเวลาผ่านไปไม่นานนัก สารออร์แกโนทินที่สะสมอยู่ปริมาณน้อยในตะกอนมีโอกาสแขวนลอยใหม่และแพร่กระจายได้ยาก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในการสำรวจยังคงมีการสำรวจเฉพาะชายฝั่งเพียง 5 จุดสำรวจ การประเมินปริมาณการสะสมของไตรบิวทิลทินในทะเลสาบสงขลาโดยรวมจึงไม่สามารถทำได้ จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยการเพิ่มจุดสำรวจในพื้นที่ทะเลสาบสงขลาตอนล่างให้มากขึ้น ทั้งนี้เพื่อเป็นการเฝ้าระวังการปนเปื้อนสารออร์แกโนทินในอนาคต

2) การเปลี่ยนแปลงของฤดูกาลอาจมีผลต่อการชะละลายและการสะสมของไตรบิวทิลทินในทะเลสาบสงขลาและอาจเกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของการคมนาคมทางน้ำในพื้นที่ในฤดูมรสุมและฤดูการทำประมง จึงควรมีการสำรวจปริมาณไตรบิวทิลทินในฤดูที่แตกต่างกันและความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของการคมนาคมทางน้ำในพื้นที่ร่วมด้วย

3) ในการศึกษาไม่ได้มีการตรวจสอบแหล่งกำเนิดของสารออร์แกโนทิน ทำให้ไม่สามารถบ่งชี้แหล่งกำเนิดสำคัญของสารออร์แกโนทินในพื้นที่ได้ จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าในปัจจุบันยังมีแหล่งกำเนิดสารออร์แกโนทินอยู่หรือไม่ จึงควรมีการตรวจวัดตามท่าเรือทุกจุดและแหล่งน้ำเสียชุมชนที่ปล่อยลงสู่ทะเลสาบสงขลาเพิ่มด้วย

4) ประเด็นน้ำเสียชุมชนซึ่งมีรายงานการวิจัยในต่างประเทศพบว่าน้ำเสียชุมชนเป็นสาเหตุหนึ่งของการปนเปื้อนสารออร์แกโนทินในน้ำทะเล และรายงานการวิจัยคุณภาพน้ำในทะเลสาบสงขลาพบว่าน้ำเสียชุมชนเป็นสาเหตุหลักของมลพิษในทะเลสาบสงขลาเป็นสำคัญ ทั้งนี้ยังมีงานวิจัยที่ตรวจวัดออร์แกโนทินในน้ำเสียชุมชนน้อยมาก ในการพัฒนาการวิจัยจึงควรมีการสำรวจการปนเปื้อนของสารออร์แกโนทินในน้ำเสียชุมชนและในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเพิ่มด้วย

5) ในการทดลองการตกจมและการแขวนลอยใหม่ในระบบจำลอง ยังไม่มีการศึกษาปัจจัยทางชลศาสตร์ เช่น อัตราการไหล กระแสน้ำ ชนิดตะกอน เป็นต้น ซึ่งมีผลต่อพฤติกรรมการตกจมและแขวนลอยตามธรรมชาติ ในการพัฒนาการศึกษาเพื่อให้แบบจำลองสามารถวิเคราะห์ได้ใกล้เคียงสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติมากยิ่งขึ้น จึงควรมีการพัฒนากระบวนการทดลองและเก็บข้อมูลของปัจจัยเหล่านี้ เพื่อการพัฒนาแบบจำลองต่อไป

6) การทดลองการตกจมและการแขวนลอยใหม่ในระบบจำลอง ควรมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ เช่น ค่าความเค็ม ค่าความเป็นกรดด่าง และอุณหภูมิของน้ำ ซึ่งมีความสำคัญต่อกลไกการตกจมและการแขวนลอยใหม่ของไตรบิวทิลทินในแหล่งน้ำ ทั้งนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตกจมและการแขวนลอยใหม่ที่เปลี่ยนไปในสภาวะที่แตกต่างกันและสอดคล้องกับสภาพการเปลี่ยนแปลงที่มีตามธรรมชาติด้วย

บรรณานุกรม

จิรารัตน์ เรี่ยมเจริญ, จงกล บุญครองชีพ, วิชาญ ชูสุวรรณ์, และเพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล. (2551). คุณภาพน้ำและตะกอนดินอ่าวปากพนังและบริเวณนอกปากทะเลสาบสงขลา. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. สถาบันวิจัยและพัฒนาทรัพยากรทางทะเลชายฝั่งทะเลและป่าชายเลน. เอกสารวิชาการฉบับที่ 24/2551.

ณัฐพล วะราโภ, สรณ์นรินทร์ บังเกิดผล, ธนัยนันท์ สุนทรวัฒนศิริ, และอภิสิฏฐ์ ศงสะเสน. (2551). การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบอินทรีย์ของดีบุกจากตัวอย่างน้ำ. **คลังความรู้ดิจิทัล มก**. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46, 29 มกราคม - 1 กุมภาพันธ์ 2551, กรุงเทพฯ. สืบค้นวันที่ 9 กันยายน 2558, จาก: http://kukr.lib.ku.ac.th/ku_proceed/KUCON/search_detail/result/10955

ธิวาริ โอภิธากร และสุทธิสา ยาอีด. (2559). ปัจจัยทางกายภาพ-เคมีและความสามรถในการละลายน้ำของไตรบิวทิลทินในทะเลสาบสงขลา. การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาครั้งที่ 6. 15-16 สิงหาคม 2559.

นพิดา คุณประเสริฐ. (2546). **การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบดีบุกอินทรีย์ในหอยแมลงภู่โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตรกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี**. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยบูรพา, บัณฑิตวิทยาลัย, สาขาวิชาเคมี

นิพนธ์ ตั้งธรรม. 2539. Environmental impact assessment modeling. เอกสารจัดทำเพื่อประกอบการฝึกอบรม หลักสูตรการวางแผนการจัดการสิ่งแวดล้อม ณ ศูนย์วิจัยฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม. 11-15 มีนาคม 2539. หน้า 189-232.

ประสาท วงษ์ทองคำ. (2552). สุขอนามัยของเรือประมง. **กลุ่มงานพัฒนาเรือประมง**. สถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีประมงทะเล. สืบค้นวันที่ 18 มิถุนายน 2557, จาก : http://smprovince.fishquarantine.org/images1/%E0%B8%AA%E0%B8%B8%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%99%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%B1%E0%B8%A2%E0%B9%80%E0%B8%A3%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%A1%E0%B8%87.pdf

ภาคีคนรักเมืองสงขลาสมาคม. 2557. ความเป็นมาของโครงการพัฒนาเมืองเก่าสงขลา. **สารภาคีคนรักเมืองสงขลาสมาคม**, ฉบับที่ 1 (เดือนพฤษภาคม).

มานะ นาคแนวดี. (2547). สีกันเพรียง. **Naval Science Departmen**t. สืบค้นวันที่ 18 มิถุนายน 2557, จาก : http://www.navy.mi.th/science/Webpage/newdocument/antifouling_mana.htm

ราชกิจจานุเบกษา. (2550). กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทะเล. **ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 27 (พ.ศ. 2549)**, เลม 124, ตอนที่ 11 ง, หน้า 123-133.

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2548). ทรัพยากรน้ำ. **รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการจัดทำแผนแม่บทการพัฒนาลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา เล่มที่ 5**. โครงการจัดทำแผนแม่บทการพัฒนาลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา.

สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 16. 2552. สถานการณ์คุณภาพแหล่งน้ำผิวดินในพื้นที่จังหวัดสงขลา.

สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 16. (2556). แผนที่และตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่าง. ข้อมูลอนุเคราะห์ตามหนังสือมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ ศธ 0560/1336 เรื่อง ขอความอนุเคราะห์ข้อมูลคุณภาพน้ำย้อนหลังตั้งแต่ปี 2547-2557 แผนที่และตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่าง.

สำนักจัดการคุณภาพน้ำ. (2549). มาตรการและแผนปฏิบัติการจัดการการใช้สารประกอบดีบุกอินทรีย์ชนิดไตรบิวทิลทินสำหรับประเทศไทย เล่ม 4/4. โครงการติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำทะเล. กรมควบคุมมลพิษ. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

สำนักจัดการคุณภาพน้ำ. (2550). การจัดการมลพิษจากสารประกอบดีบุกอินทรีย์ชนิดไตรบิวทิลหรือสารไตรบิวทิลทิน (Tributyltin, TBT). **รายงานประจำปีสำนักจัดการคุณภาพน้ำ 2550.** กรมควบคุมมลพิษ. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

สำนักจัดการคุณภาพน้ำ. (2552). สารประกอบดีบุกอินทรีย์ประเภทไตรบิวทิลทิน (Tributyltin, TBT) ในแม่น้ำสายหลัก. **รายงานประจำปีสำนักจัดการคุณภาพน้ำ 2552.** กรมควบคุมมลพิษ.

สำนักจัดการคุณภาพน้ำ. (2553). วิธีปฏิบัติสำหรับการเก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำ. กรมควบคุมมลพิษ. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

สุบัณฑิต นิ่มรัตน์, ปานจิต มีเพียร, และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย. (2557). การย่อยสลายสารไตรบิวทิลทินและสารอนุพันธ์ด้วยแบคทีเรียเดี่ยวและแบคทีเรียผสมภายใต้สภาวะที่มีซัลเฟตสูง. **วารสารวิทยาศาสตร์แห่งมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี**, 11(1), 5-15.

อนิวัตร ปัสสาโก. (2549). **เทคโนโลยีของสีกันเพรียง (Technology of Antifouling paint)**. กรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ, กองวิเคราะห์และทดสอบ, แผนกเคมีวิเคราะห์.

American Public Health Association (APHA), (Ed.), American Water Works Association (AWWA), and Water Environment Federation (WEF). (2012). **Standard methods for the examination of water and wastewater.** (22nd edition). Washington DC.

Angsupanich, S., and Rakkheaw, S. (1997). Seasonal variation of phytoplankton community in Thale Sap Songkhla, A lagoonal lake in southern Thailand. **Netherlands Journal of Aquatic Ecology**, 30(4), 297-307.

Ansari, A. A., Singh, I. B., and Tobschall, H. J. (1998). Organotin compounds in surface and pore waters of Ganga Plain in the Kanpur-Unnao industrial region, India. **The Science of the Total Environment**, 223, 157-166.

Antizar-Ladislao, B. (2008). Environmental levels, toxicity and human exposure to tributyltin (TBT)-contaminated marine environment, A review. **Environmental International**, 34, 292-308.

Ayanda. O. S., Fatoki, O. S. Adekola, F. A., and Ximba, B. J. (2012). Fate and remediation of organotin compounds in seawaters and soils. **Chemical Science Transactions**, 1(3), 470-481.

Ayanda, O. S., Fatoki, O. S., Adekola, F. A., and Ximba, B. J. (2013). Kinetics and equilibrium models for the sorption of tributyltin to nZnO, activated carbon and nZnO/activated carbon composite in artificial seawater. **Marine Pollution Bulletin**, 72, 222-230.

Bangkerdphol, S., Keenan, H. E., Davidson, C., Sakultantimetha, A., and Songsasen, A. (2009). The partition behaviour of tributyltin and prediction of environmental fate, persistence and toxicity in aquatic environments. **Chemosphere**, 77, 1326-1332.

Bech, M. (2002). A survey of imposex in Muricids from 1996 to 2000 and identification of optimal indicators of tributyltin contamination along the east coast of Phuket Island, Thailand. **Marine Pollution Bulletin**, 44, 887-896.

Behra, P., Lecarme-Theobald, É., Bueno, M., and Ehrhardt, J. J. (2003). Sorption of tributyltin onto a natural quartz sand. **Journal of Colloid and Interface Science**, 263, 4-12.

Birchenough, A. C., Barnes, N., Evans, S. M., Hinz, H., Kronke, I., and Moss, C. (2002). A review and assessment of tributyltin contamination in the North Sea, based on surveys of butyltin tissue burdens and imposex/intersex in four species of neogastropods. **Marine Pollution Bulletin**, 44, 534-543.

Bravo, M, Aguilar, L. F. Quiroz, W., Olivieri, A. C., and Escandar, G. M. (2013). Determination of tributyltin at parts-per-trillion levels in natural water by second-order multivariate calibration and fluorescence spectroscopy. **Microchemical Journal**, 106, 95-101.

Burton, E. D., Phillips, I. R., and Hawker, D. W. (2006). Tributyltin partitioning in sediments: Effect of aging. **Chemosphere**, 63(1), 73–81. doi:10.1016/j.chemosphere.2005.07.048

Centineo, G., Rodriguez-González, P., and Alonso, J. I. G. (2007). **Determination of butyltin compounds in environmental samples by isotope dilution GC-MS**. Agilent Technologies, July 23. USA.

Chesoh, S., and Lim, A. (2008). Forecasting fish catches in the Songkhla Lake basin. **ScienceAsia**, 34, 335-340.

Cooke, G. M., Tryphonas, H., Pulido, O., Caldwell, D., Bondy, G. S., and Forsyth, D. (2004). Oral (gavage), in utero and postnatal exposure of Sprague-Dawley rats to low doeses of tributyltin chloride. Part I: Toxicology, histopathology and clinical chemistry. **Food and Chemical Toxicology**, 42, 211-220.

Dafforn, K. A., Lewis, J. A., and Johnston, E. L. (2011). Antifouling strategies: History and regulation, ecological impacts and mitigation. **Marine Pollution Bulletin**, 62, 453-465.

Gadd, G. M. (2000). Microbial interaction with tributyltin compounds: detoxification, accummulation, and environmental fate. **The Science of the Total Environment**, 258, 119-127.

Hajisamoh, A. N. (2013). Contamination of organotin conpounds in coastal water of southern Thailand. **Journal of Science and Technology**, 17(1), 11-19.

Hoch, M. (2001). Organotin conpounds in the environment- an overview. **Applied Geochemistry**, 16, 719-743.

Hoch, M., and Schwesig, D. (2004). Parameters controlling the partitioning of tributyltin (TBT) in aquatic systems. **Applied Geochemistry**, 19, 323-334.

Inaba, K., Shiraishi, H., and Soma, Y. (1995). Effects of salinity, pH and temperature on aqueous solubility of four organotin compounds. **Water Research**, 29(5), 1415-1417.

Inoue, S., Oshima, Y., Usuki, H., Hamaguchi, M., Hanamura, Y., Kai, N., Shimasaki, Y., and Honjo, T. (2006). Effects of tributyltin maternal and/or waterborne exposure on the embryonic development of the Manila clam, *Ruditapes philippinarum*. **Chemosphere**, 63, 881-888.

Jensen, H. F., Holmer, M., and Dahllöf, I. (2004). Effects of tributyltin (TBT) on the seagrass ruppia maritime. **Marine Pollution Bulletin**, 49, 564-573.

Kan-atireklap, S., Tanabe, S., and Sanguansin, J. (1997a). Contamination by butyltin compounds in sediment from Thailand. **Marine Pollution Bulletin**, 34(11), 894-899.

Kan-atireklap, S., Tanabe, S., Sanguansin, J., Tabucanon, M. S., and Hungspreugs, M. (1997b). Contamination by butyltin compounds and organochlorine residues in Green Mussel (*Perna viridis*, L) from Thailand coastal waters. **Environmental Pollution**, 97(1-2), 79-89.

Ko, M. M. C., Bradley, G. C., Neller, A. H., and Broom, M. J. (1995). Tributyltin contamination of marine sediments of Hong Kong. **Marine Pollution Bulletin**, 31(4-12), 249-253.

Kumar, J. L. G. and Zhao, Y.Q. 2011. A review on numerous modeling approaches for effective, economical and ecological treatment wetlands. **Journal of Environmental Management**. 92(3), 400-406.

Liu, L.-L., Wang, J.-T., Chung, K.-N., Leu, M.-Y., and Meng, P.-J. (2011). Distribution and accumulation of organotin species in seawater, sediments and organisms collected from a Taiwan mariculture area. **Marine Pollution Bulletin**, 63(5-12), 535–540. doi:10.1016/j.marpolbul.2011.02.003

Luan, T. G., Jin, J., Chan, S. M. N., Wong, Y. S., and Tam, N. F. Y. (2006). Biosorption and biodegradation of tributyltin (TBT) by alginate immobilized chlorella vulgaris beads in several treatment cycles. **Process Biochemistry**, 1560-1565.

Mathurasa, L., Tongcumpou, C., Sabatini, D. S. and Luepromchai, E. (2012). Anionic surfactant enhanced bacterial degradation of tributyltin in soil. **International Biodeterioration & Biodegradation**, 75, 7-14.

Michel, P., and Averty, B. (1999). Contamination of French coastal waters by organotin compounds: 1997 update. **Marine Pollution Bulletin**, 38(4), 268-275.

Murai, R., Takahashi, S., Tanabe, S., and Takeuchi, I. (2005). Status of butyltin pollution along the coasts of western Japan in 2001, 11 years after partial restrictions on the usage of tribultin. **Marine pollution Bulletin**, 51, 940-949.

Okoro, H. K., Fatoki, O. S., Ximba, B. J., Adekola, F. A., and Snyman, R. G. (2012). Development of an analytical method for determining tributyltin and triphenyltin in seawater, sediment, and mussel samples using GC-FPD and GC-MS-TOF. **Polish Journal of Environmental Studies**, 21(6), 1743-1753.

Ophithakorn, T., Yaeed, S., and Suksaroj, T. T. (2014). **Harmful Effects of Tributyltin in Songkhla Old-Town Bay**. The 3rd Annual Prince of Songkla University Phuket International Conference (PSU PIC 2014): Multidisciplinary Studies on Sustainable Development, 13–14 November 2014, Phuket, Thailand.

Ophithakorn, T., Sabah, A., Delalonde, M., Bancon-Montigny, C., Suksaroj, T. T., and Wisniewski, C. (2016). Organotins' fate in lagoon sewage system: dealkylation and sludge sorption/desorption. **Environmental Science and Pollution Research**. 23(22), 22832-22842.

Pimpan, P. and Jindal, R. 2009. Mathematical modeling of cadmium removal in free water surface constructed wetlands. **Journal of Hazardous Materials**. 163 : 1322-1331.

Rudel, H. (2003). Case study: bioavailability of tin and tin compounds. **Ecotoxicology and Environmental Safty**, 56, 180-189.

Ruiz, J. M., Bachelet, G., Caumette, P., and Donard, O. F. X. (1996). Three decades of tributyltin in the coastal environment with emphasis on Arcachon Bay, France. **Environmental Pollution**, 93(2), 195-203.

Sigma-Aldrich, (2015a). Acetic acid. Retrieved September 21, 2015, from: http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/537020?lang=en&region=TH

Sigma-Aldrich, (2015b). Acetone. Retrieved September 21, 2015, from: http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/320110?lang=en&region=TH

Sigma-Aldrich, (2015c). Formaldehyde solution. Retrieved September 21, 2015, from: http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/252549?lang=en&region=TH

Sigma-Aldrich, (2015d). Hexane. Retrieved September 21, 2015, from: http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/296090?lang=en&region=TH

Sigma-Aldrich, (2015e). Hexylmagnesium bromide. Retrieved September 21, 2015, from: http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/255025?lang=en&region=TH

Sigma-Aldrich, (2015f). Hydrochloric acid. Retrieved September 21, 2015, from: http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/258148?lang=en&region=TH

Sigma-Aldrich, (2015g). Methanol. Retrieved September 21, 2015, from: http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/322415?lang=en&region=TH

Sigma-Aldrich, (2015h). Nitric acid. Retrieved September 21, 2015, from: http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/438073?lang=en&region=TH

Sigma-Aldrich, (2015i). Tributyltin chloride. Retrieved September 21, 2015, from: http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/t50202?lang=en&region=TH

Sigma-Aldrich, (2015j). Water deionized. Retrieved September 21, 2015, from: http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/99053?lang=en&region=TH

Skarphédinsdóttir, H., Ólafsdóttir†, K., Svavarsson, J., and Jóhannwsson, T. (1996). Seasonal fluctuations of Tributyltin (TBT) and Dibutyltin (DBT) in the Dogwhelk, *Nucella lapillus* (L.), and the Blue Mussel, *Mytilus edulis* L., in Icelandic Waters. **Marine Pollution Bulletin**, 32(4), 358-361.

Suehiro, F., Mochizuki, H., Nakamura, S., Iwata, H., Kobayashi., T., Tanabe, S., Fujimori, Y., Nishimura, F., Yuyen, B. C., Tana, T. S., and Suzuki, S. (2007). Occurrence of tributyltin (TBT)-resistant bacteria is not related to TBT pollution in Mekong River and coastal sediment: With a hypothesis of selective pressure from suspended solid. **Chemosphere**, 68, 1459-1464.

Swennen, C., Sampantarak, U., and Rattanadakul, N. (2009). TBT-pollution in the Gulf of Thailand: a re-inspection of imposex incidence after 10 years. **Marine Pollution Bulletin**, 58, 526-532.

Tanabe, S., Prudente, M. S., Kan-atireklap, S., and Subramanian, A. (2000). Mussel watch: marine pollution monitoring of butyltins and organochlorines in coastal waters of Thailand, Philippines and India. **Ocean & Coastal Management**, 43, 819-839.

U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). (1989). **Method 282.3 the determination of tributyltin chloride in marine and fresh waters by liquid-solid extraction (LSE) and gas chromatography with electron-capture detection (GC/ECD): version 1.0**. Environmetal Monitoring Systems Laboratory, Office of Research and Development. Cincinnati, Ohio.

Yamamoto, J., Yonezawa, Y., Nakata, K., and Horiguchi, F. (2009). Ecological risk assessment of TBT in Ise Bay. **Journal of Environmental Management**, 90, 541-550.

Zhang, L. and Mitsch, W. J. 2005. Modelling hydrological processes in created freshwater wetlands: an integrated system approach. **Environmental Modelling & Software**. 20 : 935-946.

SONGKHLA RAJABHAT UNIVERSITY