



การปนเปื้อนและการเพิ่มกำลังทางชีวภาพของบิสฟีนอลเอ (Bisphenol A) ในหอยแมลงภู่น้ำที่
เพาะเลี้ยง บริเวณอ่าวตากวน นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง

พรวิภา กันเขตต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

การปนเปื้อนและการเพิ่มกำลังทางชีวภาพของบิสฟีนอลเอ (Bisphenol A) ในหอยแมลงภู่ที่
เพาะเลี้ยง บริเวณอ่าวตากวน นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง



พรวิภา กันเกตุ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

CONTAMINATION AND BIOMAGNIFICATION OF BISPHENOL A IN CULTURED
GREEN MUSSEL (*Perna viridis*) IN TAKUAN BAY, MAP TA PHUT INDUSTRIAL
ESTATE, RAYONG PROVINCE.



PRONWIPA KUNKATE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR MASTER DEGREE OF SCIENCE
IN ENVIRONMENTAL SCIENCE
FACULTY OF SCIENCE
BURAPHA UNIVERSITY

2024

COPYRIGHT OF BURAPHA UNIVERSITY

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ พรวิภา กันเกตุ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ถนอมศักดิ์ บุญศักดิ์)

..... ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากร แสงสง่า)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุปราณี แก้วภิรมย์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญรัตน์ ประทุมชาติ)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตานันท์ บุญศักดิ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ถนอมศักดิ์ บุญศักดิ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตานันท์ บุญศักดิ์)

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. อุษาวดี ตันดีวารานุกัย)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ของ
มหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทวัส แจ่มเยี่ยม)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

62910152: สาขาวิชา: วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม; วท.ม. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)
 คำสำคัญ: บิสฟีนอล เอ, การกระจาย, หอยแมลงภู่มุ, นิคมอุตสาหกรรม, การเพิ่มกำลังทาง
 ชีวภาพ, ห่วงโซ่อาหาร

พรวินา กันเกตุ : การปนเปื้อนและการเพิ่มกำลังทางชีวภาพของบิสฟีนอล เอ (Bisphenol A) ในหอยแมลงภู่มุที่เพาะเลี้ยง บริเวณอ่าวตากวน นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง. (CONTAMINATION AND BIOMAGNIFICATION OF BISPHENOL A IN CULTURED GREEN MUSSEL (*Perna viridis*) IN TAKUAN BAY, MAP TA PHUT INDUSTRIAL ESTATE, RAYONG PROVINCE.) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: ถนอมศักดิ์ บุญภักดี, สุปราณี แก้วภิรมย์, ชูตา บุญภักดี ปี พ.ศ. 2567.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณ รูปแบบการกระจายและการเพิ่มกำลังทางชีวภาพของบิสฟีนอล เอ (BPA) ในระบบนิเวศทางทะเลบริเวณบริเวณปากคลองชากหมากและอ่าวตากวน นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง พบว่าในน้ำทะเล ดินตะกอนและหอยแมลงภู่มุมีปริมาณ BPA อยู่ในช่วง 50-1060 ng/L, 33-240 ng/g และ 384 – 513 ng/g ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ความเข้มข้นของ BPA ในสิ่งมีชีวิตในน้ำ พบว่าปริมาณ BPA ในน้ำทะเลที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ($< 1.5 \mu\text{g/L}$) จากปริมาณ BPA ในน้ำทะเลและดินตะกอนที่พบแสดงให้เห็นว่ามีรูปแบบการปนเปื้อนและการกระจายของ BPA ลดลงเมื่อมีระยะห่างจากคลองชากหมาก และในงานวิจัยนี้ใช้ไอโซโทปเสถียรของคาร์บอน $\delta^{13}\text{C}$ และไนโตรเจน $\delta^{15}\text{N}$ เพื่อประเมินลำดับการกินในห่วงโซ่อาหาร ผลการศึกษาพบว่าปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ ในสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วงระหว่าง -22.08 ถึง -16.18% และ 6.48 ถึง 12.06% ตามลำดับ โดยปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ของสารอินทรีย์แขวนลอยต่ำสุดอยู่ที่ $-22.08 \pm 2.28\%$ และสูงสุดในหอยแมลงภู่มุที่ $-16.18 \pm 0.24\%$ ส่วนปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ ของสารอินทรีย์แขวนลอย $6.48 \pm 1.59\%$ และสูงสุดในหอยแมลงภู่มุ $12.06 \pm 0.52\%$ จากผลดังกล่าวสามารถแบ่งลำดับการกินในห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิต บริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง ได้ 3 ระดับชั้นอาหาร ดังนี้ ผู้ผลิต (แพลงก์ตอนพืช) ผู้บริโภคอันดับที่ 1 (แพลงก์ตอนสัตว์ และหอยแมลงภู่มุ) และผู้บริโภคอันดับที่ 2 (หอยแมลงภู่มุ) นอกจากนี้พบว่ามี การเพิ่มกำลังทางชีวภาพของสาร BPA เข้าสู่ห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศบริเวณอ่าวตากวน โดยผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการเฝ้าระวังการปนเปื้อนของ BPA ในระบบนิเวศทางทะเล

62910152: MAJOR: ENVIRONMENTAL SCIENCE; M.Sc. (ENVIRONMENTAL SCIENCE)

KEYWORDS: BISPHENOL A, DISTRIBUTION, INDUSTRIAL, BIOMAGNIFICATION, FOOD WEB

PRONWIPA KUNKATE : CONTAMINATION AND BIOMAGNIFICATION OF BISPHENOL A IN CULTURED GREEN MUSSEL (*PERNA VIRIDIS*) IN TAKUAN BAY, MAP TA PHUT INDUSTRIAL ESTATE, RAYONG PROVINCE.. ADVISORY COMMITTEE: THANOMSAK BOONPHAKDEE, Ph.D. SUPRANEE KAEWPIROM, Ph.D. CHUTA BOONPHAKDEE, Ph.D. 2024.

This research focused on the distribution and biomagnification of Bisphenol A (BPA) in marine ecosystems at the Chakmak River mouth and Takuan Bay, Map Ta Phut Industrial Estate, Rayong Province. BPA concentrations were measured in seawater, sediments, and mussels, ranging from 50-1060 ng/L, 33-240 ng/g, and 384-513 ng/g, respectively. These levels indicate that BPA in seawater could potentially impact aquatic organisms at concentrations below 1.5 µg/L. A distinct contamination pattern was observed, with BPA levels in seawater and sediments decreasing with increasing distance from the Chak Mak canal. Stable isotopes of carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) were utilized to estimate the trophic positions of organisms within the food web. The $\delta^{13}\text{C}$ values ranged from -22.08 to -16.18‰, and $\delta^{15}\text{N}$ values ranged from 6.48 to 12.06‰ in aquatic biota and environmental samples. The lowest $\delta^{13}\text{C}$ value was found in particulate organic matter (-22.08±2.28‰), while the highest was in mussels (-16.18±0.24‰). For $\delta^{15}\text{N}$, the lowest values were in sediments (6.48±1.59‰), and the highest was in mussels (12.06±0.52‰). The trophic structure of Takuan Bay's marine ecosystem was categorized into three levels: producers (phytoplankton), primary consumers (zooplankton and mussels), and secondary consumers (mussels). Furthermore, BPA was found to increase in bioavailability as it moved up the food chain in the Takuan Bay area. This study underscores the critical need for continuous monitoring of BPA contamination in marine ecosystems to understand its ecological impacts better.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ถนอมศักดิ์ บุญภักดี อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชูดา บุญภักดี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วน และเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

งานวิจัยนี้ได้รับทุนจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านอนามัยสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านอนามัยสิ่งแวดล้อม และพิชิตวิทยา ประจำปีงบประมาณ 2562

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากหน่วยบริการนวัตกรรมทางวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (SIF-IN-62910152)

ขอขอบพระคุณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่สนับสนุนสถานที่ ห้องปฏิบัติการ และเครื่องมือในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาวาริชัยศาสตร์ ภาควิชาชีววิทยา และหลักสูตรบัณฑิตศึกษาศาखाวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อสมพร คุณแม่บุญเสริม กั้นเกตุ และคุณย่าอภิญญา บุญนาค ที่คอยเป็นกำลังใจและช่วยเหลือสนับสนุนส่งเสริมการศึกษาจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณ นางสาวจิรนนท์ ธรรมฉวีโสฬส นางสาวธัญญาภรณ์ บัวแดง นางสาววิศรา วัฒนวิโรจน์กุล และนางสาววิลาวัลย์ บุญปก ที่ช่วยเก็บตัวอย่างภาคสนามและให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยรวมถึงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูทเวทิตาแด่ บุพการีบูรพาอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษา และประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

พรวิภา กั้นเกตุ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ	ฅ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ฐ
บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ลักษณะชายฝั่งที่ศึกษา.....	4
2.3 สมบัติทางกายภาพของ BPA	5
2.4 แหล่งที่มาของ BPA ที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม	6
2.6 การสะสมทางชีวภาพและการถ่ายทอดทางห่วงโซ่อาหารของ BPA.....	8
2.7 ชีววิทยาหอยแมลงภู่ม.....	9
2.7.1 พฤติกรรมการกินอาหารของหอยแมลงภู่ม.....	9
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
3.1 พื้นที่ทำการศึกษา	16

3.2.1 ตัวอย่างน้ำทะเล.....	19
3.2.4 ตัวอย่างหอยแมลงภู่.....	20
3.3.1 วิเคราะห์ปริมาณไอโซโทปเสถียรของคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) และไนโตรเจน ($\delta^{15}\text{N}$) ในน้ำทะเล.....	20
3.3.3 ปริมาณไอโซโทปเสถียรของคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) และไนโตรเจน ($\delta^{15}\text{N}$) ในสิ่งมีชีวิต	21
3.3.4 ปริมาณ BPA ในดินตะกอน.....	21
3.3.5 ปริมาณ BPA ในน้ำทะเล.....	21
3.3.6 ปริมาณ BPA ในหอยแมลงภู่.....	21
3.3.7 การวิเคราะห์ตำแหน่งการกิน (Trophic Position).....	22
ผลการวิจัย.....	24
4.1 การวิเคราะห์ปริมาณ BPA ด้วยเทคนิค High-performance liquid chromatography (HPLC).....	24
4.1.1 ความถูกต้องของวิธีการวิเคราะห์	24
4.1.2 ปริมาณ BPA ในตัวอย่างน้ำทะเล.....	25
4.2 การกระจายของ BPA ในน้ำทะเลและดินตะกอน	28
4.3 การใช้ปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ ตามห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิตบริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง	30
4.4 การเพิ่มกำลังทางชีวภาพในห่วงโซ่อาหารของหอยแมลงภู่บริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง .	30
บทที่ 5.....	32
อภิปรายและสรุปผล	32
5.1 ปริมาณและการกระจายของ BPA บริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง	32
5.1.1 ปริมาณและการกระจายของ BPA ในน้ำทะเลบริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง.....	32
5.1.2 ปริมาณและการกระจายของ BPA ในดินตะกอนบริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง.....	33
5.1.3 ปริมาณของ BPA ในระบบทางเดินอาหารของหอยแมลงภู่.....	33

5.4 สรุปผลการศึกษา36

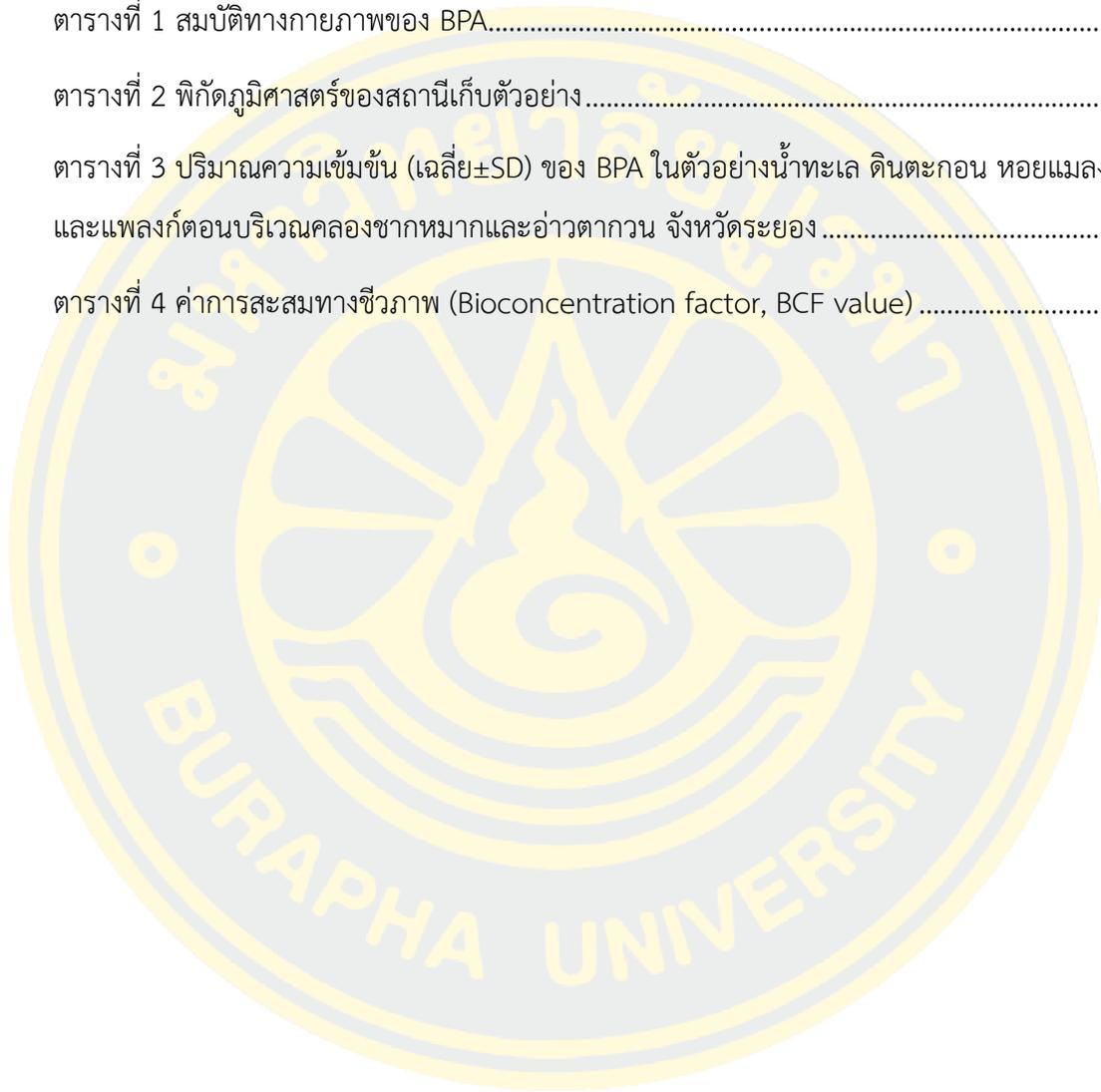
บรรณานุกรม38

ประวัติย่อของผู้วิจัย47



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของ BPA.....	6
ตารางที่ 2 พิบัติภูมิศาสตร์ของสถานีเก็บตัวอย่าง.....	16
ตารางที่ 3 ปริมาณความเข้มข้น (เฉลี่ย \pm SD) ของ BPA ในตัวอย่างน้ำทะเล ดินตะกอน หอยแมลงภู่ และแพลงก์ตอนบริเวณคลองซากหมากและอ่าวตากวน จังหวัดระยอง.....	26
ตารางที่ 4 ค่าการสะสมทางชีวภาพ (Bioconcentration factor, BCF value)	34



สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 โครงสร้างของ bisphenol A (2,2-bis[4-hydroxyphenyl]propane หรือ bisphenol A.5	
ภาพที่ 2 แหล่งที่มาของ BPA สู่สิ่งแวดล้อมทางน้ำ.....	7
ภาพที่ 3 การถ่ายทอดทางห่วงโซ่อาหารของ BPA จากแพลงก์ตอนพืชไปยังแพลงก์ตอนสัตว์.....	9
ภาพที่ 4 อวัยวะภายในของหอยแมลงภู (green mussel)	10
ภาพที่ 5 พื้นที่ศึกษาบริเวณคลองซากหมากและหาดตากวน ตำบลมาบตาพุด อำเภอเมือง จังหวัดระยอง	17
ภาพที่ 6 จุดเก็บตัวอย่างบริเวณคลองซากหมากและหาดตากวน ตำบลมาบตาพุด อำเภอเมือง จังหวัดระยอง โดยวงกลมแสดงจุดเก็บตัวอย่างน้ำทะเลและดินตะกอน สามเหลี่ยมทึบแสดงจุดเก็บตัวอย่างหอยแมลงภูและแพลงก์ตอน	17
ภาพที่ 7 พื้นที่เก็บตัวอย่างบริเวณปากคลองซากหมากและอ่าวตากวน	18
ภาพที่ 8 ลักษณะแพลงก์ตอนหอยแมลงภูบริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง	18
ภาพที่ 9 ลักษณะการเลี้ยงหอยแมลงภูแบบเชือกในอ่าวตากวน จังหวัดระยอง.....	19
ภาพที่ 10 โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐาน BPA ความเข้มข้น 1000 ng/mL ที่ความยาวคลื่น 280 nm เฟสคงที่คือ sunfire C18 column ขนาด 3.5 μm (3.0 \times 150 mm) เฟสเคลื่อนที่เป็นเมทานอลกับน้ำ (75:25) อัตราการไหลคงที่เท่ากับ 1 mL/min อุณหภูมิคอลัมน์ 30 $^{\circ}\text{C}$ ปริมาณการฉีดสารเข้าเครื่อง HPLC เท่ากับ 20 μl	24
ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐาน BPA ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐาน BPA ในช่วง 10, 20, 100, 200, 300, 400, 500 และ 1,000 ng/mL กับพื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)	25
ภาพที่ 12 ปริมาณของ BPA ในตัวอย่างน้ำทะเล ทั้ง 7 สถานี บริเวณคลองซากหมากและอ่าวตากวน จังหวัดระยอง ND = Not detectable (ไม่สามารถตรวจวัดได้ โดยมีปริมาณต่ำกว่าขีดจำกัดของการตรวจวัดโดยวิธี HPLC น้อยกว่า 1.46 ng/L).....	27

ภาพที่ 13 ปริมาณของ BPA ในตัวอย่างดินตะกอน ทั้ง 7 สถานี บริเวณคลองซากหมากและอ่าวตากวน จังหวัดระยอง ND = Not detectable (ไม่สามารถตรวจวัดได้ โดยมีปริมาณต่ำกว่าขีดจำกัดของการตรวจวัดโดยวิธี HPLC น้อยกว่า 1.46 ng/L.....	27
ภาพที่ 14 ปริมาณของ BPA ในตัวอย่างหอยแมลงภู่มุ่ (n=5) ที่สถานี MP4 - MP6 บริเวณอ่าว ตากวน จังหวัดระยอง	28
ภาพที่ 15 การกระจายของ BPA ในตัวอย่างน้ำทะเลบริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง	29
ภาพที่ 16 การกระจายของ BPA ในตัวอย่างดินตะกอนบริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง	29
ภาพที่ 17 ปริมาณไอโซโทปเสถียรของคาร์บอนและไนโตรเจนในสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมบริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง	30
ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ของ $\delta^{15}\text{N}$ กับลำดับการกิน (Trophic level) ในบริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง	31

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา มีการผลิตพลาสติกและใช้ผลิตภัณฑ์ที่มี bisphenol A (BPA) เป็นส่วนประกอบจำนวนมากเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคจึงทำให้ BPA เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพลาสติก มีปริมาณการผลิตสูงสุด 8 ล้านตันต่อปี (Huang et al., 2012) และพบว่ามี การปนเปื้อนของ BPA ในระบบนิเวศทางทะเล จึงเป็นที่วิตกกังวลกันมาก เนื่องจากมีปริมาณ BPA ในแหล่งน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นโดยพบสาเหตุการปนเปื้อนมากกับการใช้สารเคมีในกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ เช่น น้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมผลิตพลาสติก และน้ำเสียที่มี BPA ปนอยู่จึงทำให้มีการปนเปื้อนของ BPA เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อมทั้งในดินตะกอน น้ำจืด และน้ำทะเล (Staples et al., 1998; Zhang et al., 2007) โดย BPA มีคุณสมบัติเป็นสารเคมีที่สามารถรบกวนการทำงานของ การสังเคราะห์ การขนส่ง และการสลายตัวของฮอร์โมนธรรมชาติ ในระบบต่อมไร้ท่อ (endocrine disruptor) โดยจะเลียนแบบการทำงานของฮอร์โมนเอสโตรเจน ส่งผลต่อพัฒนาการของเด็กทารก และสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นๆ (Alexander et al., 1988) และยังเป็นสารที่ละลายน้ำได้ยาก โดยมีค่า K_{ow} 3.64 ± 0.32 (Flint et al., 2012; Vega-Morales et al., 2010) พบการดูดซับของ BPA ในดินตะกอนมากกว่าในน้ำ (Kang & Kondo, 2006) ซึ่ง BPA สามารถรบกวนการทำงานของระบบต่อมไร้ท่อในสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง (Canesi & Fabbri, 2015; Flint et al., 2012) เนื่องจาก BPA มีคุณสมบัติที่ละลายได้ในไขมัน จึงสามารถสะสมในสหร่ายหรือผู้ผลิตขั้นต้นซึ่งเป็นลำดับแรกของการขยายตัวทางชีวภาพ (biomagnification) รวมถึงเกิดการถ่ายทอดทางห่วงโซ่อาหาร (Guo et al., 2017)

อ่าวตากวน (หมู่ที่ 4 ต.มาบตาพุด อ.เมือง จ.ระยอง) เป็นพื้นที่ที่มีการเพาะเลี้ยงหอยแมลงภู่ โดยชาวประมงที่เลี้ยงหอยแมลงภู่เป็นแพแขวนในทะเล (คมชัดลึกออนไลน์, 2554) และอ่าวตากวนยังเป็นพื้นที่รองรับน้ำทิ้งจากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จ.ระยอง ผ่านคลองชากหมาก (ชนชนก อรุณเลิศ และคณะ, 2557) ซึ่งนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด มีโรงงานอุตสาหกรรมมากกว่า 200 แห่ง โดยอุตสาหกรรมหลัก คือ อุตสาหกรรมปิโตรเคมีและพลาสติก ซึ่งอาจมีการปนเปื้อนของ BPA เข้าสู่ระบบนิเวศทางทะเลและอาจเกิดการสะสมภายในตัวหอยแมลงภู่ ทำให้เกิดการรบกวนการทำงานของต่อมไร้ท่อ (Flint et al., 2012) และอาจเกิดการถ่ายทอดทางห่วงโซ่อาหารซึ่งอาจเกิดความเสียหายต่อมนุษย์ซึ่งเป็นผู้บริโภคสุดท้ายของห่วงโซ่อาหาร (Barboza et al., 2020) การที่พบการปนเปื้อนของสารพิษหรือการปนเปื้อนของ BPA ในระบบนิเวศทางทะเลจะเกิดการถ่ายทอดทางห่วงโซ่อาหาร

ซึ่งในการศึกษาลำดับการถ่ายทอดทางห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศทางทะเล โดยใช้ไอโซโทปเสถียรคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) และไนโตรเจน ($\delta^{15}\text{N}$) มาใช้ในการหาความสัมพันธ์ของสิ่งมีชีวิตโดยสามารถใช้ในการหาความสัมพันธ์ของผู้ผลิตและผู้บริโภคที่เกิดขึ้นภายในห่วงโซ่อาหารของระบบนิเวศทางทะเล (Fry & Sherr, 1989b) นอกจากนี้ไอโซโทปเสถียรของคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้แหล่งที่มาของสารอินทรีย์คาร์บอนได้ เนื่องจากเป็นสารประกอบหลักของสิ่งมีชีวิต ดังนั้นการศึกษารั้วนี้สามารถแสดงลักษณะการแพร่กระจายของ BPA และอธิบายการถ่ายทอด BPA เข้าสู่ห่วงโซ่อาหารของหอยแมลงภู่มิบริเวณคลองชากหมากและอ่าวตากวน จังหวัดระยอง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อบ่งชี้การปนเปื้อน การกระจาย และแหล่งที่มาของ BPA ในน้ำทะเล ดินตะกอน และหอยแมลงภู่มิจากพื้นที่เพาะเลี้ยงหอยแมลงภู่มิบริเวณอ่าวตากวน นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด
- 2) เพื่อศึกษาการสะสมและการถ่ายทอดสาร BPA ไปยังหอยแมลงภู่มิผ่านห่วงโซ่อาหารในอ่าวตากวน

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

- 1) มีการสะสมของ BPA ในน้ำทะเลและดินตะกอนในอ่าวตากวน
- 2) มีการเพิ่มกำลังทางชีวภาพของ BPA ของห่วงโซ่อาหารของหอยแมลงภู่มิในบริเวณอ่าวตากวน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถทราบถึงรูปแบบการแพร่กระจายของสาร BPA บริเวณคลองชากหมากและอ่าวตากวน
- 2) เพื่อประเมินความเสี่ยงการปนเปื้อนของ BPA ที่มีผลต่อระบบนิเวศชายฝั่ง
- 3) สามารถประเมินลำดับการกินของสิ่งมีชีวิต (หอยแมลงภู่มิ) บริเวณคลองชากหมากและอ่าวตากวน

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาการปนเปื้อน การกระจายของ และ BPA ในตัวอย่างน้ำทะเล ดินตะกอนและหอยแมลงภู่มิ รวมถึงศึกษาปริมาณอินทรีย์คาร์บอน อินทรีย์ไนโตรเจน อินทรีย์แขวนลอย ไอโซโทปเสถียรของคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) และไอโซโทปเสถียรของไนโตรเจน ($\delta^{15}\text{N}$) ในตัวอย่างน้ำทะเล ดิน

ตะกอนและสิ่งมีชีวิต (หอยแมลงภูและแพลงก์ตอน) บริเวณคลองซากหมากและอ่าวตากวน จังหวัดระยอง โดยทำการเก็บตัวอย่างทั้งหมด 7 สถานี แบ่งเป็นคลองซากหมาก 1 สถานี และอ่าวตากวน 6 สถานี โดยให้จุดเก็บตัวอย่างครอบคลุมพื้นที่เลี้ยงหอยแมลงภูและจุดอ้างอิง



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะชายฝั่งที่ศึกษา

พื้นที่ชายฝั่งทะเลมาบตาพุด อำเภอเมือง จังหวัดระยอง เป็นที่ตั้งโครงการพัฒนาชายฝั่งทะเลตะวันออก (Eastern Sea Board) ซึ่งประกอบด้วยนิคมอุตสาหกรรม ท่าเรือน้ำลึก และชุมชนมาบตาพุด โดยครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 2,000 ไร่ ซึ่งมีพื้นที่ข้างเคียงด้านทิศตะวันออกติดกับบ้านตากวน ซึ่งเป็นหมู่บ้านที่ตั้งบ้านเรือนอยู่บนหาดทรายเดิมและบางส่วนของหาดทรายใหม่ (Young beach Young sand) ที่เกิดขนานกับแนวชายฝั่ง (สิน สินสกุล & บรรเจิด อร่ามประยูร, 2541) และมีการใช้ประโยชน์จากพื้นที่ในด้านที่อยู่อาศัย เป็นแหล่งอาหาร ทำการประมง และการพัฒนาด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น ซึ่งพื้นที่อ่าวตากวนมีการเพาะเลี้ยงหอยแมลงภูเป็นหลักอาจพบการปนเปื้อนของ BPA ในหอยแมลงภู น้ำ และดินตะกอนได้เนื่องจากคลองขากหมากรองรับน้ำที่ปล่อยออกจากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดและไหลเข้าสู่หาน้ำชายฝั่งบริเวณอ่าวตากวน

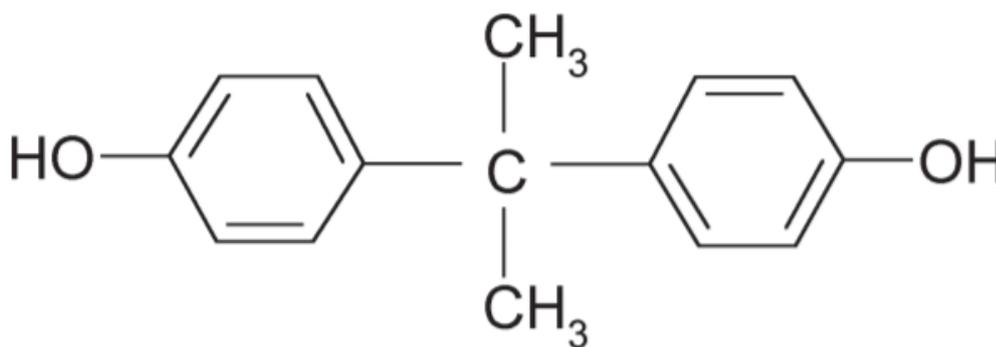
2.2 Bisphenol A (BPA)

บิสฟีนอล เอ หรือ BPA เป็นสารเคมีอุตสาหกรรมที่สำคัญในกระบวนการผลิตพลาสติกโพลีคาร์บอเนตและอีพอกซีเรซินด้วยอัตราการผลิตทั่วโลกกว่า 8 ล้านตันต่อปี (Huang et al., 2012) เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค โดยสามารถพบ BPA ได้ในผลิตภัณฑ์หลายชนิดรวมถึงเลนส์แว่นตา อุปกรณ์กีฬา อุปกรณ์ทางการแพทย์ ภาชนะบรรจุอาหารและเครื่องดื่ม ขวดพลาสติกแบบใส สารหน่วงไฟ กาว รวมถึงวัสดุและอุปกรณ์ไฟฟ้า (Rezg et al., 2014; Wang et al., 2015) ปัจจุบันมีการใช้ BPA อย่างกว้างขวางส่งผลให้มีการปล่อยสาร BPA ออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยมีที่มาจากหลายแหล่ง เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตพลาสติก อุตสาหกรรมเคมีที่ใช้ BPA เป็นสารตั้งต้น น้ำชะขยะ ขยะพลาสติก และสถานที่ฝังกลบ (Flint et al., 2012; Keri et al., 2007) ทำให้เกิดการปนเปื้อน BPA เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อมทั้งในดินตะกอน น้ำจืด และน้ำทะเล (Staples et al., 2018) โดย BPA จัดเป็นสารเคมีรบกวนต่อมไร้ท่อ (Endocrine-disrupting chemicals) คือสารเคมีที่ส่งผล

กระทบต่อโครงสร้างหรือหน้าที่ของระบบต่อมไร้ท่อ โดยจะเลียนแบบการทำงานของฮอร์โมนเอสโตรเจน ส่งผลต่อพัฒนาการของเด็กทารก และสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นๆ (Alexander et al., 1988)

2.3 สมบัติทางกายภาพของ BPA

BPA สังเคราะห์มาจาก อะซิโตนกับฟีนอล (phenol, PH) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีความสำคัญโดยใช้เป็นสารเติมแต่งในการผลิต อีพอกซีเรซิน (Chapin et al., 2008; Cooper et al., 2011) โดยโครงสร้างของ BPA (2,2-bis [4-hydroxyphenyl] propane หรือ bisphenol A) ประกอบด้วย วงแหวนฟีนอล (phenol ring) จำนวน 2 วงเชื่อมต่อกัน และเมทิล 2 หมู่เชื่อมอยู่ (ภาพที่ 1) BPA เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง 2 โมล ฟีนอล และ 1 โมลอะซิโตน โดยมีลักษณะเป็นผงหรือเกล็ดสีขาว สมบัติทางกายภาพของ BPA แสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างของ bisphenol A (2,2-bis[4-hydroxyphenyl]propane หรือ bisphenol A) ที่มา : (Cousins et al., 2002)

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของ BPA

Parameter	Value
Molecular weight	228.29 g/mol
Melting point °C	155 °C
Boiling point	220 °C / 493 K
Specific gravity	1.20 gm/cm ³
Vapor pressure	5.3×10 ⁻⁶ Pa
Log K _{ow}	2.20-3.82
Log K _{oc}	314-1524
Henry law constants	4.30 × 10 ⁻⁶ Pa/M ³ /mol

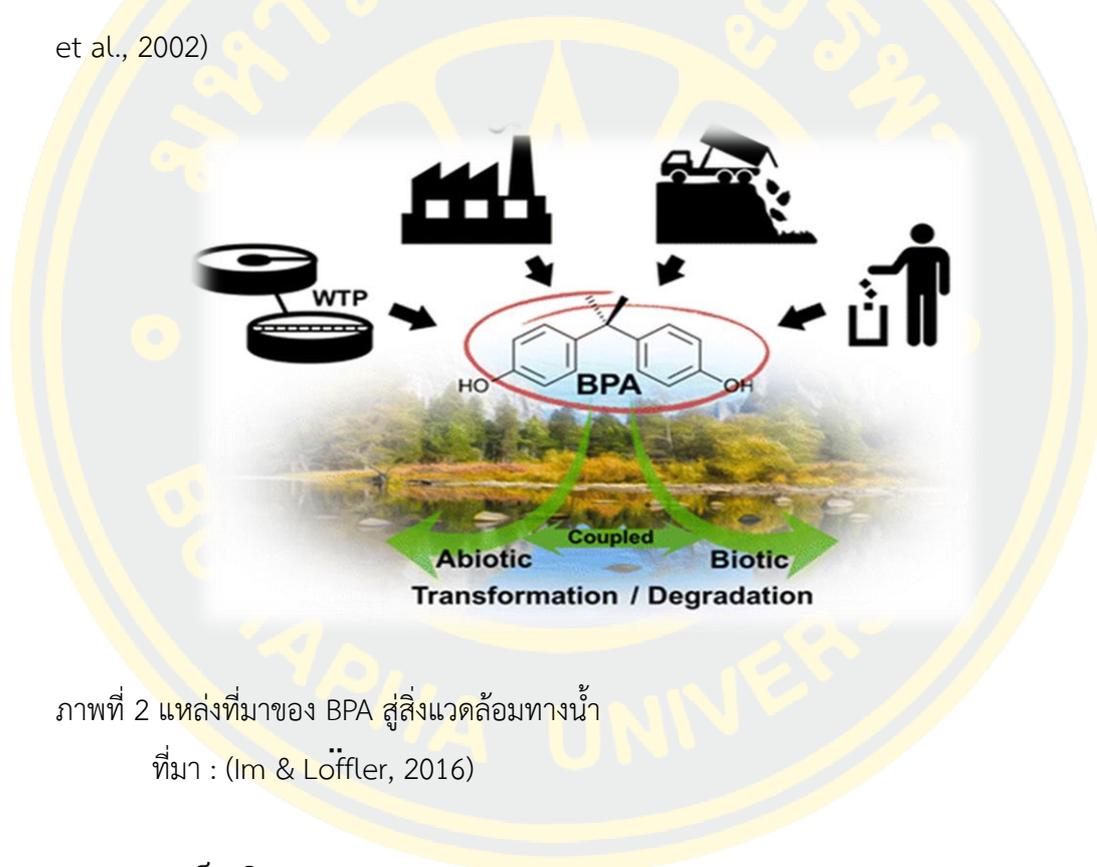
ที่มา : (Cousins et al., 2002; Staples et al., 1998)

2.4 แหล่งที่มาของ BPA ที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม

จากคุณสมบัติทางกายภาพของ BPA แสดงให้เห็นว่า เมื่อ BPA ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมจะมีค่าครึ่งชีวิตที่แตกต่างกันในแต่ละสภาพแวดล้อม หากถูกปล่อยสู่แหล่งน้ำจืด มีค่าครึ่งชีวิต 3-5 วัน ปล่อยลงสู่ทะเลจะมีค่าครึ่งชีวิตที่นานกว่าแหล่งน้ำจืด คือ 30 วัน (Kang & Kondo, 2005) เมื่อ BPA ถูกปล่อยสู่อากาศจะมีค่าครึ่งชีวิต 0.74-7.4 ชั่วโมง (Staples et al., 1998) ค่าครึ่งชีวิตของการปนเปื้อน BPA ในดินจะมีน้อยกว่า 3 วัน (Fent et al., 2003) ในดินตะกอน(ทะเล) อยู่ที่ 340 วัน (Corrales et al., 2015)

ในปัจจุบันมีการใช้ BPA อย่างแพร่หลายทำให้เกิดการปนเปื้อนของ BPA ในสิ่งแวดล้อม พบว่ามาจากการชะของน้ำบริเวณหลุมฝังกลบขยะและน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยในน้ำชะขยะหลุมฝังกลบนั้นเกิดจากการย่อยสลายหรือการเกิดปฏิกิริยาเคมีของขยะพลาสติก

(ยูภาพร อำนาจ, 2018) ความเข้มข้นของ BPA ที่พบสามารถเกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ นอกจากนี้ยังสามารถพบได้จากน้ำทิ้ง ระบบน้ำเสียจากโรงบำบัด น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม พลาสติก รวมถึงวัสดุที่มี BPA เป็นส่วนประกอบ (Fürhacker et al., 2000; Kang & Kondo, 2006; Keri et al., 2007; Yamamoto et al., 2001) รวมถึงสิ่งปลูกิจจากบ้านเรือน (Zhao et al., 2009) ดังนั้นการฝังกลบขยะมูลฝอย น้ำเสียและน้ำทิ้งจึงเป็นแหล่งปลดปล่อย BPA ให้ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ตรวจพบการปนเปื้อนของ BPA ในแหล่งน้ำจืดและแหล่งน้ำทะเล (Staniszewska et al., 2014a) และในเนื้อเยื่อสัตว์น้ำ (Corrales et al., 2015) รวมถึงตรวจพบในแหล่งน้ำผิวดิน (Belfroid et al., 2002)



ภาพที่ 2 แหล่งที่มาของ BPA สู่อสิ่งแวดล้อมทางน้ำ

ที่มา : (Im & Löffler, 2016)

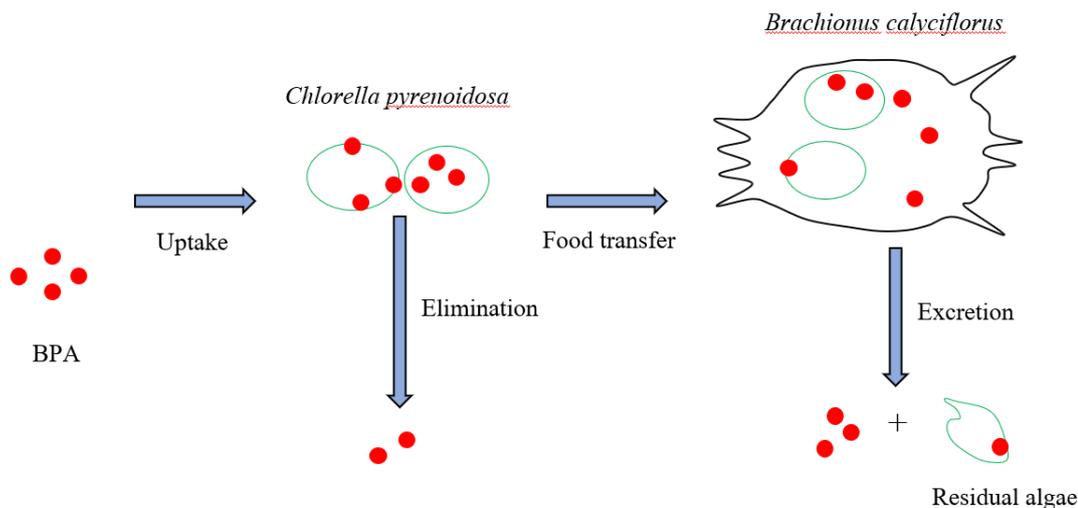
2.5 ความเป็นพิษของ BPA

ด้านความเป็นพิษของ BPA พบว่ามีระดับความเป็นพิษปานกลาง และเป็นหนึ่งในสารกลุ่ม endocrine-disrupting chemicals (EDCs) ซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถคล้ายกับฮอร์โมนและสามารถรบกวนการทำงานและการสังเคราะห์ของฮอร์โมนเอสโตรเจน รวมถึงการขนส่ง และการสลายตัวของฮอร์โมนธรรมชาติในระบบต่อมไร้ท่อ (Zoeller et al., 2012) เนื่องจาก BPA สามารถเลียนแบบการทำงานของฮอร์โมนเอสโตรเจนได้จึงทำให้มีผลต่อการพัฒนาสมองของเด็กทารก และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ พบว่าขณะที่แม่ตั้งครรภ์อยู่นั้นได้รับ BPA จะส่งผลกระทบต่อสมองของเด็กทารกอาจทำให้

เซลล์สมองหยุดพัฒนารวมถึงมีอาการผิดปกติในเรื่องของน้ำหนักตัวที่อาจมีน้อยกว่าเกณฑ์ หรืออาจทำให้ทารกในครรภ์เสียชีวิตได้ พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของ BPA ที่สามารถก่อให้เกิดมะเร็งเต้านมในผู้หญิงได้ อยู่ในช่วง 2.28×10^{-6} - 2.28×10^{-8} มิลลิกรัมต่อลิตร (Takahashi et al., 2001) และยังส่งผลทำให้ภูมิคุ้มกันบกพร่อง การเริ่มเป็นหนุ่มสาวเร็วเกินไป โรคอ้วน โรคเบาหวาน ไฮเปอร์ (hyperactivity) และอื่นๆ (Lang et al., 2008; Rubin & Soto, 2009; ศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ที่ 3 นครสวรรค์, 2563) และมีความเป็นพิษต่อปลาและสัตว์น้ำชนิดอื่นๆ (Alexander et al., 1988) สัตว์มีกระดูกสันหลังและไม่มีกระดูกสันหลัง ซึ่งในสัตว์มีกระดูกสันหลังพบว่า BPA ส่งผลต่อการพัฒนาและระบบการสืบพันธุ์ รวมทั้งยังรบกวนการทำงานของระบบภูมิคุ้มกันและเมแทบอลิซึม (Canesi & Fabbri, 2015) และในสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง BPA สามารถรบกวนการทำงานของระบบต่อมไร้ท่อ (Canesi & Fabbri, 2015) นอกจากนี้ BPA ส่งผลต่อสัตว์น้ำทำให้เกิดการยับยั้งการฟักไข่ของสัตว์น้ำ นอกจากนี้ยังส่งผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตของตัวอ่อนปลาเรนโบว์เทราต์ (*Oncorhynchus mykiss*) (Aluru et al., 2010; Bonefeld-Jørgensen et al., 2007)

2.6 การสะสมทางชีวภาพและการถ่ายทอดทางห่วงโซ่อาหารของ BPA

การสะสมของสารปนเปื้อนในกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำในผู้ผลิตขั้นต้น (primary producer) ซึ่งถือว่าเป็นขั้นแรกในการขยายตัวทางชีวภาพหรือการขยายทางชีวภาพ (biomagnification) คือ ความเข้มข้นของสารพิษใดๆ เช่น ยาฆ่าแมลง EDCs ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในห่วงโซ่อาหาร (Guo et al., 2017) เมื่อผู้ผลิตขั้นต้น สาหร่าย หรือ แพลงก์ตอนพืช ได้สัมผัสกับน้ำที่ปนเปื้อน อาจเกิดการสะสมทางชีวภาพของ BPA เข้าสู่เนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต และถ่ายทอดทางห่วงโซ่อาหารจากแพลงก์ตอนพืชไปยังแพลงก์ตอนสัตว์เมื่อเกิดการกินของผู้บริโภคที่อยู่ในระดับที่สูงกว่า (Berglund et al., 2000)



ภาพที่ 3 การถ่ายทอดทางห่วงโซ่อาหารของ BPA จากแพลงก์ตอนพืชไปยังแพลงก์ตอนสัตว์
ที่มา : (Guo et al., 2017)

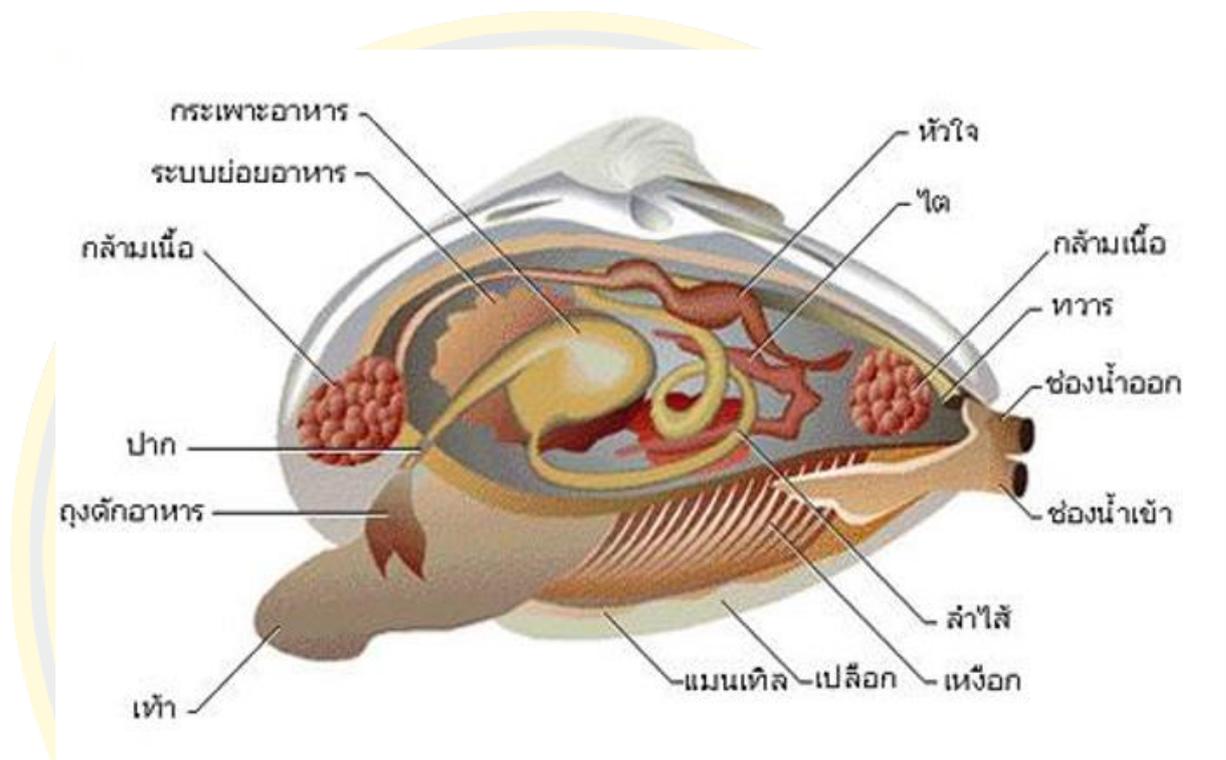
2.7 ชีวิตวิทยาหอยแมลงภู

หอยแมลงภู ชื่อวิทยาศาสตร์: *Perna viridis* Linneaus มีชื่อสามัญว่า green mussel จัดอยู่ใน Phylum: Mollusca เป็นหอยสองฝา สีของเปลือกเปลี่ยนไปตามสภาพการอยู่อาศัย กล่าวคือถ้าอยู่ในน้ำตลอดเวลาจะมีสีเขียวอมดำ ถ้าอยู่บริเวณน้ำขึ้นน้ำลง ถูกแดดบ้างเปลือกจะออกเหลือง เปลือกด้านนอกมีสีเขียว ส่วนท้ายจะกว้างกว่าส่วนหน้า เนื้อหอยมีสีเหลืองนวลหรือสีส้ม มีหนวดหรือเส้นใยเหนียวสำหรับเกาะหลักเรียกว่า เกสร โดยหอยแมลงภูเป็นหอยที่นิยมบริโภคกันเป็นอย่างมาก สามารถนำไปปรุงเป็นอาหารได้หลากหลาย และเป็นสัตว์เศรษฐกิจที่มีการเพาะเลี้ยงกันมาเป็นเวลานาน

2.7.1 พฤติกรรมการกินอาหารของหอยแมลงภู

หอยแมลงภูเป็นสัตว์น้ำจำพวกที่เกาะติดอยู่กับที่ (sessile animal) และกินอาหารโดยการกรองกิน หรือ เรียกว่า filter feeding โดยหอยจะเปิดเปลือกเพื่อให้น้ำไหลผ่านเข้าไปในตัวและกรองอาหารที่ติดมากับน้ำ อาหารประกอบด้วยสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เช่น แพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ ไดอะตอม เศษอินทรีย์ขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ รวมถึงสารเคมีที่ปนมากับน้ำก็จะถูกกรองเข้าสู่ระบบทางเดินอาหาร เกิดการย่อยและดูดซึมในระบบทางเดินอาหารต่อไป ดังนั้นหากเกิดการ

ปนเปื้อนของสารเคมีลงสู่แหล่งน้ำ สารเคมีเหล่านั้นก็จะสัมผัสกับตัวหอยโดยตรง (วรารุณี, 2555) และมีโอกาสเข้าสู่ระบบทางเดินอาหาร ผ่านระบบการกรองกิน และอาจส่งผลกระทบต่อกลไกการทำงานของร่างกายได้ในที่สุด เช่น กระตุ้น การเต้นของหัวใจ ทำให้อัตราการเต้นของหัวใจเร็วขึ้น เป็นต้น



ภาพที่ 4 อวัยวะภายในของหอยแมลงภู่ม้า (green mussel)

ที่มา : <https://www.sanook.com/news/1619729/>

2.8 การเพิ่มกำลังทางชีวภาพของ BPA

การเพิ่มกำลังทางชีวภาพ เป็นส่วนสำคัญของการสะสมของสารปนเปื้อนในสิ่งมีชีวิตในน้ำ หมายถึง สภาวะที่ความเข้มข้นของสารเคมีในสิ่งมีชีวิตสูงกว่าความเข้มข้นของอาหารที่กินสิ่งมีชีวิตดูดซึมสารปนเปื้อนผ่านอาหารที่กิน (Wang et al., 2021) คำว่า biomagnification ของสายใยอาหาร ถูกใช้เพื่ออธิบายการเพิ่มขึ้นของสารปนเปื้อนภายในสายใยอาหารและหมายถึงความเข้มข้นของสารเคมีที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องพร้อมกับลำดับทางโภชนาการของสัตว์ที่เพิ่มขึ้น (Houde et al., 2008) โดยเฉพาะสารปนเปื้อนประเภทสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ชอบน้ำและโลหะหนัก ซึ่งมีการใช้ค่าความลาดชันของการถดถอยของไอโซโทปเสถียร $\delta^{15}\text{N}$ ในการแสดงเชิงปริมาณของตำแหน่งทางโภชนาการในการกำหนดอัตราการเพิ่มกำลังทางชีวภาพของโลหะหนักและสารเคมีที่สร้างโดยมนุษย์

ผ่านใยอาหาร (Tu et al., 2011) แล้วด้วยคุณสมบัติของสารปนเปื้อน $\log K_{ow}$ สามารถใช้เป็นเกณฑ์บอกถึงสามารถละลายน้ำได้ สิ่งนี้ทำให้เกิดการสะสมของสารปนเปื้อนในเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต ดังนั้นจึงมีความเสี่ยงเมื่อมนุษย์เป็นผู้บริโภคอันดับสุดท้ายของห่วงโซ่อาหาร (Berglund et al., 2000)

2.9 ไอโซโทปเสถียร

ไอโซโทป คือ อะตอมของธาตุเดียวกัน ซึ่งมีจำนวนโปรตอนและจำนวนอิเล็กตรอนเท่ากัน แต่มีจำนวนนิวตรอนต่างกัน หมายถึง การมีประจุที่เท่ากัน แต่มีมวลต่างกัน ตัวเลขด้านบนซ้ายของสัญลักษณ์ธาตุ แสดงผลรวมของจำนวนโปรตอนกับจำนวนนิวตรอนของไอโซโทป ตัวอย่างเช่น ดิวเทอเรียม (deuterium) ซึ่งเป็นไอโซโทปของไฮโดรเจน เขียนแทนด้วย D หรือ ^2H มีหนึ่งโปรตอนกับหนึ่งนิวตรอน มีมวลประมาณ 2 เท่าของโปรเทียม (protium, ^1H) ขณะที่ ทริเทียม (tritium, ^3H) มีสองนิวตรอน และมีมวลประมาณ 3 เท่าของโปรเทียม ส่วนไอโซโทปของออกซิเจนมี 8 อิเล็กตรอนกับ 8 โปรตอน โดย ออกซิเจน-18 (^{18}O) มีนิวตรอนมากกว่า ออกซิเจน-16 (^{16}O) 2 นิวตรอน (สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย, 2563)

ไอโซโทปเสถียร (stable isotopes) ลักษณะการกระจายของไอโซโทปเสถียรซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านอาหาร เพื่อหาแหล่งที่มาของอาหาร ระดับการกินอาหาร (trophic level) ว่าอยู่ส่วนใดของห่วงโซ่อาหารในกระเพาะอาหารของสิ่งมีชีวิต (gut analysis) เพื่อตรวจสอบสิ่งที่พบในกระเพาะที่สัตว์กินเข้าไป (Sondergaard et al., 1988; Kioboe et al., 1990) หรือลักษณะการดำรงชีวิตของสัตว์ในยุคโบราณ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ทางด้านโบราณคดี นิเวศวิทยา นิติวิทยาศาสตร์ อุทกวิทยา หรือธรณีวิทยา โดยสัดส่วนของไอโซโทป (isotope ratio) สามารถหาได้ด้วยเทคนิคการวัดมวล (mass spectrometry) ซึ่งจะแยกไอโซโทปของธาตุที่ไม่เท่ากันออกจากกัน โดยอาศัยหลักการของสัดส่วนมวลต่อประจุ (mass-to-charge ratio) (สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย, 2563) นอกจากนี้ยังสามารถไอโซโทปเสถียร $\delta^{13}\text{C}$ ใช้บ่งชี้แหล่งที่มาของสารอินทรีย์คาร์บอนในสิ่งแวดล้อมได้ (B. J. Peterson et al., 1985) รวมถึงการใช้ $\delta^{15}\text{N}$ ในการตรวจสอบแหล่งที่มาของไนโตรเจนที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ ทำการศึกษาโดย (Duan et al., 2014) พบว่าแหล่งที่มาของสารอินทรีย์ในแม่น้ำ San Jacinto นั้นมาจากน้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์

องค์ประกอบของไอโซโทปเสถียรในธาตุที่มีมวลน้อย เช่น ออกซิเจน ไฮโดรเจน คาร์บอน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์โดยทั่วไปจะรายงานด้วยค่าของเดลตา (delta, δ) ซึ่งเป็นค่าของ “ส่วนในพันส่วน” ใช้สัญลักษณ์เปรียบเทียบว่ามีค่าที่มากกว่า (enrichment) หรือน้อยกว่า (depletion) ค่าในสารมาตรฐาน สัญลักษณ์ มีการเรียกกันหลายอย่าง เช่น permil, per mil, per mill, หรือ per mille หน่วย per mill นี้เป็นหน่วย ไอโซ หรือองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (ISO) แต่ยังมีการใช้ที่ไม่แพร่หลาย โดยคำนวณ δ ได้จาก (สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย, 2563)

$$\delta X (\text{‰}) = [(R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}}) - 1] \times 10^3$$

โดย X	คือ ไอโซโทปเสถียรของคาร์บอน (^{13}C) หรือไนโตรเจน (^{15}N)
R	คือ ปริมาณสัดส่วนของไอโซโทปเสถียร ($^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N} / ^{14}\text{N}$, $^2\text{H} / ^1\text{H}$, $^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$, $^{34}\text{S} / ^{32}\text{S}$)
R_{sample}	คือ สัดส่วนไอโซโทปหนักต่อไอโซโทปเบาในตัวอย่าง
R_{standard}	คือ สัดส่วนไอโซโทปหนักต่อไอโซโทปเบาในสารมาตรฐาน

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันการศึกษา BPA ในสิ่งแวดล้อมจะมุ่งเน้นศึกษาด้านของ การปนเปื้อนและสะสมในดิน ตะกอน แหล่งน้ำ และในสิ่งมีชีวิต เช่นการศึกษาของ Safakhah et al. (2020) ได้พบการปนเปื้อนและการกระจายของ BPA ในดินตะกอนบริเวณแม่น้ำ Musa และแม่น้ำทางตอนเหนือของอ่าวเปอร์เซีย ประเทศอิหร่าน โดยมีความเข้มข้นของ BPA อยู่ในช่วง 2.22 – 16.71 ng/g โดยสถานที่ที่พบความเข้มข้นของ BPA สูง อยู่ในพื้นที่ใกล้โรงงานอุตสาหกรรมผลิต BPA ทำเรือและเขตเมือง ซึ่งมีช่วงความเข้มข้นของ BPA ในดินตะกอน อยู่ในช่วงใกล้เคียงกับการศึกษาของ (Bian et al., 2010) ที่ทำการศึกษาการสะสมของ BPA ในดินตะกอนบริเวณปากแม่น้ำฉางเจียง (แยงซีเกียง) และทะเลจีนตะวันออก พบว่ามีความเข้มข้น BPA ในช่วง 0.72 – 13.2 ng/g และจากการศึกษาการปนเปื้อนของ BPA ในเกาะ Okinawa และ Ishigaki ประเทศญี่ปุ่นของ (Kawahata et al., 2004) พบความเข้มข้นของ

BPA ในดินตะกอนบริเวณชายฝั่ง และแนวปะการังในปริมาณที่สูง เนื่องจากการปนเปื้อนของ BPA เป็นผลมาจากการปล่อยของเสียของมนุษย์และอุตสาหกรรม เช่นเดียวกับการศึกษาของ (Liao et al., 2019) ที่ศึกษา BPA ในชายฝั่งทางตอนเหนือของจีน ซึ่งพบความเข้มข้นของ BPA สูงในดินตะกอนที่เก็บมาจากพื้นที่ใกล้เขตอุตสาหกรรม นอกจากนี้การศึกษาของ Stuart et al. (2005) พบว่าปริมาณ BPA สูงสุดในตัวอย่างดินตะกอนอยู่ในช่วง 1-30 ng/g อยู่บริเวณสถานีเก็บตัวอย่างใกล้กับท่าอระบายน้ำเสียของ Boston Harbor Deer Island และ Stellwagen Bank National Marine Sanctuary แสดงถึงการแพร่กระจายของ BPA มาจากน้ำเสีย

มีการศึกษาการปนเปื้อนของ BPA ในแหล่งน้ำชายฝั่งของ Ocharoen et al. (2018) พบความเข้มข้นสูงสุดของ BPA ที่สถานีคลองซากหมาก 50.26 ng/L เนื่องจากคลองซากหมากได้รับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี จากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด และพบความเข้มข้นของ BPA ในสถานีหาดวอนนภาอยู่ที่ 37.13 ± 2.70 ng/L เนื่องจากสถานีหาดวอนนภาอยู่ใกล้เทศบาล และเป็นสถานที่ท่องเที่ยว มีชุมชนจำนวนมาก ด้วยเหตุนี้อาจส่งผลทำให้เกิดขยะที่มีจำนวนมาก นอกจากนี้มีการศึกษาการปนเปื้อนของ BPA ในสิ่งมีชีวิตและสัตว์จำพวกหอยโดย (Ocharoen et al., 2018) พบปริมาณ BPA ในเนื้อเยื่อหอยแมลงภู่ บริเวณชายฝั่งตะวันออกของประเทศไทย สูงสุด (37.13 ng/g) ซึ่งพื้นที่ที่พบปริมาณ BPA สูงอยู่ใกล้กับพื้นที่ของอุตสาหกรรม เช่นเดียวกับการศึกษาของ Jahromi et al. (2020) ที่พบปริมาณ BPA ในหอยนางรม *Saccostrea* sp. สูงถึง 340.16 ng/g¹ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการปนเปื้อนของ BPA จะลดลงเมื่อระยะทางไกลจากฝั่ง เนื่องจากพื้นที่ชายฝั่งมีกิจกรรมของมนุษย์ น้ำเสียในเมือง การระบายน้ำเสียของอุตสาหกรรม และท่าเรือที่ขยายตัวมากขึ้นอาจเป็นแหล่งสำคัญของการปนเปื้อน BPA สู่สิ่งแวดล้อม

นอกจากการปนเปื้อน BPA ในดินตะกอน น้ำและในหอยแล้ว ยังมีรายงานการศึกษาระบบทางชีวภาพของ Guo et al. (2017) ที่ศึกษาการสะสมของ BPA ในสาหร่าย *Chlorella pyrenoidosa* และการถ่ายทอดสารอาหารไปยังไรติเฟอร์ โดยดูการสะสมของ C¹⁴ ของ BPA ที่ตกค้างในสาหร่ายคลอเรลลา มีการสะสมมากที่สุดเป็น 71% ของการสะสมทั้งหมดในเซลล์สาหร่าย และมีการถ่ายทอดสารอาหารของสารตกค้างที่ได้รับ BPA จากสาหร่ายไปยังไรติเฟอร์ ส่งผลให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากผลกระทบที่ตามมาในห่วงโซ่อาหารในปี ค.ศ. 2018 M'Rabet et al. (2018) ได้ศึกษาผลกระทบของ BPA ต่อความเป็นพิษของไดโนแฟลกเจลเลต (*Alexandrium*

pacificum) พบว่า *A. pacificum* มีความไวสูงต่อการปนเปื้อนของ BPA ทำให้มวลชีวภาพลดลง (1.2-50 เท่า) ต่อมาในปี ค.ศ. 2019 M'rabet et al. (2019) ศึกษาผลกระทบของ BPA ต่อมวลชีวภาพของแพลงก์ตอนพืชและโครงสร้างประชาคม บริเวณตะวันออกเฉียงใต้ของเมดิเตอร์เรเนียน พบว่ามวลชีวภาพของแพลงก์ตอนพืชลดลงมากถึง 50 %

มีการศึกษาการปนเปื้อนของ BPA ในน้ำชะขยะที่อาจมาจากการทับถม การฝังกลบ และการย่อยสลายของขยะพลาสติก ได้แก่ การศึกษาของ ยูภาพร อำนาจ (2018) ศึกษาการปนเปื้อนของ BPA ในน้ำชะขยะเทศบาล ในจังหวัดอุบลราชธานี พบ BPA ปนเปื้อนในน้ำชะขยะมูลฝอยอยู่ในช่วง 15.45-54.09 มิลลิกรัม/ลิตร อาจเกิดจากการย่อยสลายหรือการเกิดปฏิกิริยาเคมีของขยะพลาสติก ดังนั้นการฝังกลบขยะมูลฝอยอาจเป็นแหล่งปลดปล่อย BPA ให้ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม

การนำเทคนิคไอโซโทปเสถียรมาใช้ในการติดตามแหล่งที่มาของสารอินทรีย์บริเวณชายฝั่งที่ได้รับผลกระทบจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยมีการใช้ไอโซโทปเสถียรของคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) และไนโตรเจน ($\delta^{15}\text{N}$) มาใช้อย่างกว้างขวางในการประเมินสถานะสิ่งแวดล้อมของแหล่งน้ำในระบบนิเวศต่างๆ เช่น การศึกษาของ Xie et al. (2020) ได้นำไอโซโทปเสถียร ($\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$) มาศึกษาสารอินทรีย์แขวนลอย (SPOM) ในกระชังเลี้ยงปลา อ่าว Sansha ประเทศจีน พบว่าการให้อาหารปลาปริมาณหลายล้านตันในบริเวณนี้ ส่งผลกระทบท่อความเข้มข้นของ $\delta^{13}\text{C}$ ของ (SPOM) มีค่า (-20.00 ‰) และ $\delta^{15}\text{N}$ ของ (SPOM) มีค่า (19.31‰) และมีรายงานการศึกษาของ Barros et al. (2010) ใช้ไอโซโทปเสถียร $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนและไนโตรเจนของระบบนิเวศในอ่าว Babitonga ประเทศบราซิล พบว่าปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ของสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำอยู่ในช่วง (1.8‰ ถึง -7.4 ‰) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ $\delta^{13}\text{C}$ ในน้ำเสียชุมชน และมีปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ของอินทรีย์คาร์บอนแขวนลอยอยู่ในช่วง (-26.2‰ ถึง -23.9‰) และปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ ของอินทรีย์ไนโตรเจนแขวนลอยมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ บนบก และปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ ของสารอินทรีย์มีความแตกต่างกันทำให้สามารถสรุปได้ว่า แหล่งที่มาของอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำและอินทรีย์แขวนลอยในอ่าว Babitonga ของประเทศบราซิล มาจากน้ำเสียชุมชนที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดและมาจากทะเล ในส่วนแหล่งที่มาของอินทรีย์ไนโตรเจนแขวนลอยมาจากบนบก การศึกษาของ Boonphakdee and Fujiwara (2008) ใช้ไอโซโทปเสถียรของคาร์บอน และสัดส่วนของ C/N มาใช้ในการระบุแหล่งที่มา ของสารอินทรีย์บริเวณปากแม่น้ำบางปะกง พบว่าแหล่งที่มาของสารอินทรีย์

ส่วนใหญ่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ ทะเลและพืชบก เนื่องจากบริเวณปากแม่น้ำบางปะกง อยู่ในพื้นที่เมืองขนาดใหญ่ จึงทำให้ได้รับผลกระทบจากกิจกรรมของมนุษย์นอกจากนี้ยังมีรายงานการศึกษาของ Hong et al. (2020) ใช้ไอโซโทปเสถียร $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ เพื่อระบุลำดับโภชนาการของหอย พบว่าค่าไอโซโทปเสถียรเฉลี่ยที่พบในหอยมีค่า $\delta^{13}\text{C}$ อยู่ในช่วง (-25‰ ถึง -20.1‰) และ $\delta^{15}\text{N}$ อยู่ในช่วง (1.9‰ ถึง 8.3‰) บ่งบอกถึงแหล่งที่มาของอาหารที่แตกต่างกัน มาจากทะเล มีการศึกษาการแพร่กระจายและแหล่งที่มาของสารอินทรีย์ในดินตะกอนบริเวณ Tokachi ประเทศญี่ปุ่น ศึกษาโดย Usui et al. (2006) สามารถสรุปได้ว่าสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ที่พบบริเวณปากแม่น้ำมาจากบนบก โดยมีปัจจัยหลักที่ควบคุมการกระจายของสารอินทรีย์ในดินตะกอนคือการไหลของน้ำ

บทที่ 3

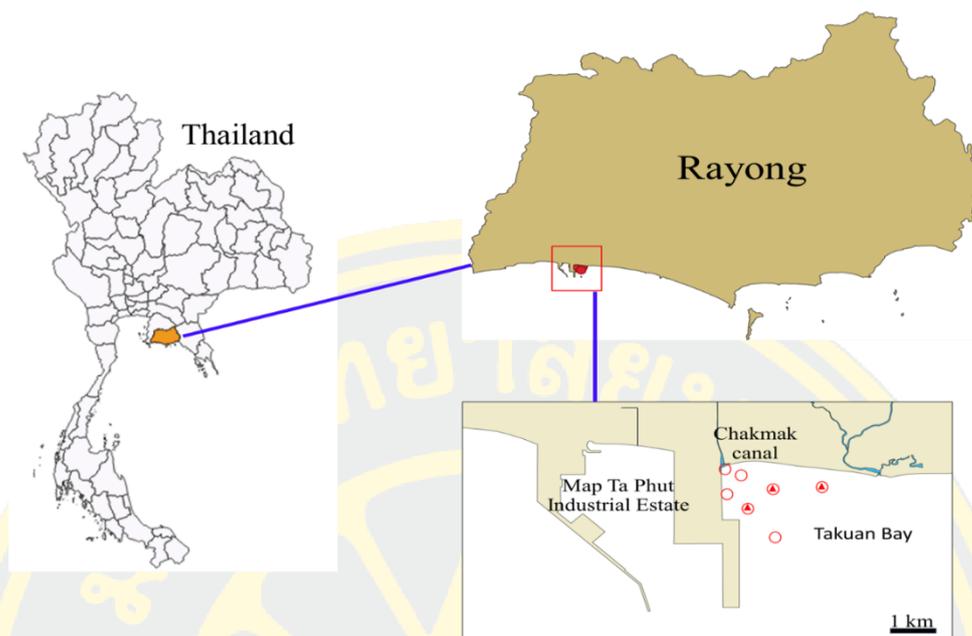
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 พื้นที่ทำการศึกษ

ทำการศึกษปริมาณและแหล่งที่มาของ BPA โดยทำการเก็บตัวอย่าง น้ำ ดินตะกอน แพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ และหอยแมลงภู่ ในพื้นที่บริเวณชายฝั่งของจังหวัดระยอง ทำการเก็บตัวอย่างบริเวณปากคลองชากหมากและหาดตากวน รวม 7 สถานี (ภาพที่ 5) ลักษณะพื้นที่ศึกษาอยู่ติดกับเขตนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดและเป็นที่ตั้งของกลุ่มประมงพื้นบ้านหาดตากวน

ตารางที่ 2 พิกัดภูมิศาสตร์ของสถานีเก็บตัวอย่าง

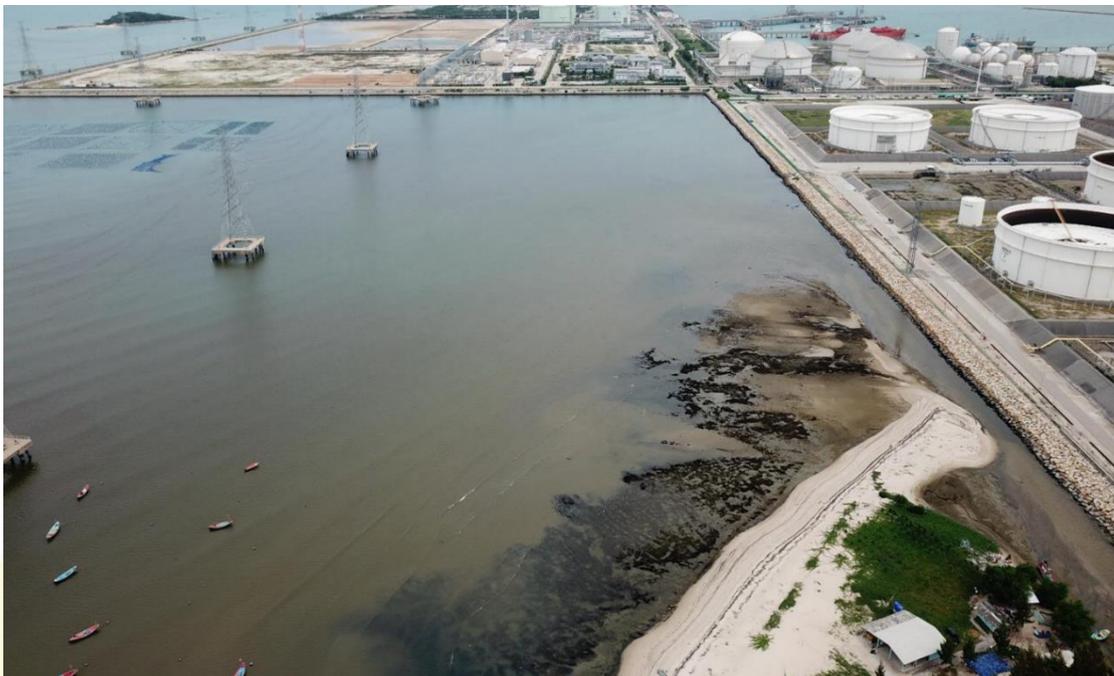
Station	Code	Latitude	Longitude
คลองชากหมาก	MP 1	12°40'07.2"N	101°09'29.2"E
อ่าวตากวน	MP 2	12°39'58.8"N	101°09'33.4"E
	MP 3	12°40'07.0"N	101°09'36.7"E
	MP 4	12°39'54.8"N	101°09'45.2"E
	MP 5	12°39'59.6"N	101°09'55.1"E
	MP 6	12°40'02.9"N	101°10'22.8"E
	MP 5	12°39'59.6"N	101°09'55.1"E
	MP 7	12°39'38.1"N	101°10'13.7"E



ภาพที่ 5 พื้นที่ศึกษาบริเวณคลองชากหมากและหาดตากวน ตำบลมาบตาพุด อำเภอเมือง จังหวัดระยอง



ภาพที่ 6 จุดเก็บตัวอย่างบริเวณคลองชากหมากและหาดตากวน ตำบลมาบตาพุด อำเภอเมือง จังหวัดระยอง โดยวงกลมแสดงจุดเก็บตัวอย่างน้ำทะเลและดินตะกอน สามเหลี่ยมที่บแสดงจุดเก็บตัวอย่างหอยแมลงภู่มู่และแพลงก์ตอน



ภาพที่ 7 พื้นที่เก็บตัวอย่างบริเวณปากคลองซากหมากและอ่าวตากวน



ภาพที่ 8 ลักษณะแพเลี้ยงหอยแมลงภูบริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง



ภาพที่ 9 ลักษณะการเลี้ยงหอยแมลงภู่มวลแบบเชือกในอ่าวตากวน จังหวัดระยอง

3.2 การเก็บตัวอย่าง

3.2.1 ตัวอย่างน้ำทะเล

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทะเลจากระดับผิวน้ำที่ระดับความลึก 0.5 เมตรโดยใช้กระบอกลอยเก็บน้ำ (water sampler) ทำการเก็บตัวอย่างน้ำ ใส่เกลลอนขนาด 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างน้ำใกล้ปากคลองซากหมากซึ่งเป็นบริเวณรองรับน้ำทิ้งจากท่อระบายน้ำทิ้งก่อนไหลลงสู่ชายฝั่งทะเลในพื้นที่ทำการศึกษา จากนั้นนำตัวอย่างน้ำทั้งหมดไปแช่เย็นในระหว่างการขนส่งก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ปริมาณ BPA ปริมาณอินทรีย์แขวนลอย ไอโซโทปเสถียรของคาร์บอนและไนโตรเจน ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$),

3.2.2 ตัวอย่างดินตะกอน

เก็บตัวอย่างผิวน้ำดินดินตะกอนด้วย grab sampler ขนาด 30×30 เซนติเมตร เก็บตัวอย่างดินใส่ถุงซิปล็อค และเก็บรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อรอทำการวิเคราะห์ปริมาณ BPA ปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$

3.2.3 ตัวอย่างแพลงก์ตอนพืชและแพลงก์ตอนสัตว์

แพลงก์ตอนสัตว์ถูกรวบรวมเพื่อตรวจวัด BPA โดยทำการลากถุงลากแพลงก์ตอนแนวตั้งจำนวน 15 ถึง 25 ครั้งโดยใช้ถุงลาก (ขนาดตาข่าย 200 มม.) ซึ่งเป็นวิธีการที่ดัดแปลงจาก

Mortazavi et al., (2013) สกัดโดยใช้ของผสมสารละลาย 5 มิลลิลิตรของเมทานอล (MeOH) และไดคลอโรมีเทน (DCM) (9:1, ปริมาตร/ปริมาตร) การสกัด BPA ดำเนินการตามวิธีของ Jahromi et al. (2020)

3.2.4 ตัวอย่างหอยแมลงภู่

เก็บตัวอย่างหอยแมลงภู่จากเข็อกแขวนที่ใช้สำหรับเพาะเลี้ยงในบริเวณอ่าวตากวน ตำบล มาบตาพุด อำเภอเมือง จังหวัดระยอง จากนั้นทำการขนส่งด้วยการแช่เย็นจนถึงห้องปฏิบัติการ และทำการเก็บรักษาตัวอย่างหอยแมลงภู่ที่อุณหภูมิ -20°C เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณไอโซโทปเสถียรของคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) ไนโตรเจน ($\delta^{15}\text{N}$) และปริมาณ BPA

3.3 วิธีการเตรียมและวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.3.1 วิเคราะห์ปริมาณไอโซโทปเสถียรของคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) และไนโตรเจน ($\delta^{15}\text{N}$) ใน น้ำทะเล

นำตัวอย่างน้ำประมาณ 500 ml มากรองผ่านกระดาษกรอง Whatman GF/C (ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง) นำกระดาษกรองไปแช่กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นเป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วนำกระดาษกรองไปอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำไปวิเคราะห์ปริมาณไอโซโทปเสถียรของคาร์บอนและไนโตรเจน ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) ด้วยเครื่อง elemental analysis – isotope ratio mass spectrometer ที่มหาวิทยาลัยคอร์เนล สหรัฐอเมริกา

3.3.2 วิเคราะห์ปริมาณไอโซโทปเสถียรของคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) และไนโตรเจน ($\delta^{15}\text{N}$) ใน ดินตะกอน

นำตัวอย่างดินตะกอนที่บดละเอียดแล้วไปย่อยคาร์บอนเนตด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1 N ที่มีฝาปิดแล้วใช้เครื่องเขย่าเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ตามวิธีของ (Sampaio et al., 2010) และ Onpankoon et al. (2012) หลังจากนั้นนำตัวอย่างดินตะกอนมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI) เพื่อเจือจางกรดและให้ pH เป็นกลาง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C องศาเซลเซียส จนแห้งจากนั้นนำมาบดให้ละเอียดด้วยโกร่งอีกครั้ง และนำตัวอย่างมาชั่งบรรจุลงใน tin capsule ประมาณ 25 มิลลิกรัม เพื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณ ($\delta^{13}\text{C}$) และ ($\delta^{15}\text{N}$) ด้วยเครื่อง elemental analysis – isotope ratio mass spectrometer ที่มหาวิทยาลัยคอร์เนล สหรัฐอเมริกา

3.3.3 ปริมาณไอโซโทปเสถียรของคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) และไนโตรเจน ($\delta^{15}\text{N}$) ในสิ่งมีชีวิต

นำตัวอย่างสิ่งมีชีวิต (หอยแมลงภู) มาล้างทำความสะอาด แยกเอาส่วนเนื้อเยื่อไปทำให้แห้งด้วยเครื่อง Freezed dryer และนำมาสกัดไขมันด้วยสารละลายผสมของคลอโรฟอร์มและเมทานอล อัตราส่วน 2:1 ตามวิธีของ Boonphakdee & Sichan (2013) และ Gen et al. (2013) จากนั้นนำตัวอย่างบรรจุใน Tin capsule เพื่อวิเคราะห์ปริมาณ ($\delta^{13}\text{C}$) และ ($\delta^{15}\text{N}$) ด้วยเครื่อง Elemental Analysis – Isotope Ratio Mass Spectrometer ที่มหาวิทยาลัยคอร์เนล สหรัฐอเมริกา

3.3.4 ปริมาณ BPA ในดินตะกอน

นำตัวอย่างดินตะกอน ชั่งน้ำหนักให้ได้ 7 กรัม ใส่ในหลอด centrifuge ขนาด 10 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายผสม dichloromethane : methanol ในอัตราส่วน 1:9 แล้วนำไปเข้า เครื่อง sonicate ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที แล้วทำการปั่นเหวี่ยงที่ 40 รอบต่อนาที และดูดส่วนใสมา freeze dry ประมาณ 6 ชั่วโมงหรือจนกว่าตัวอย่างจะแห้ง หลังจากนั้นทำการละลายตัวอย่างด้วย 75 % methanol ปริมาตร 1 มิลลิลิตร กรองผ่านกระดาษกรอง 0.2 ไมครอน แล้วจึงนำตัวอย่างเข้าเครื่อง high performance liquid chromatography (HPLC)

3.3.5 ปริมาณ BPA ในน้ำทะเล

เก็บตัวอย่างน้ำทะเลปริมาตร 10 ลิตร จากระดับผิวน้ำที่ระดับความลึก 0.5 เมตรโดยใช้ กระบอกเก็บน้ำ (water sampler) กรองตัวอย่างน้ำทะเลผ่านกระดาษกรอง Whatman, GF/F 0.7 ไมครอน แล้วกรองผ่าน C18 cartridge ควบคุมอัตราการไหลของตัวอย่างน้ำ 5 มิลลิลิตร/1 นาที และทำการ elution ด้วย 5 % methanol เป็นเวลา 5 นาที แล้วเก็บตัวอย่างที่ได้ใส่หลอด centrifuge พันด้วยพาราฟิล์ม จากนั้นนำไป freeze dry 6 ชั่วโมง หรือจนกว่าตัวอย่างจะแห้ง แล้วนำมาละลายด้วย methanol 3 มิลลิลิตร แล้วเข้าเครื่อง HPLC เพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป

3.3.6 ปริมาณ BPA ในหอยแมลงภู

นำตัวอย่างหอยแมลงภูมาตัดเอาส่วนของเนื้อเยื่อกระเพาะอาหาร แล้วนำไปให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน ด้วยเครื่อง homogenizer เติม 100 % methanol ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และนำไปปั่น ด้วยเครื่อง sonicate ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปปั่นเหวี่ยง 13,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นดูดส่วนใสใส่หลอด centrifuge เติมน้ำบริสุทธิ์ให้ครบ 100 มิลลิลิตร ทำกรองผ่าน C18 cartridge และ elution ด้วย 5 % methanol ปริมาตร 3 มิลลิลิตร แล้ว นำไป freeze dry 6 ชั่วโมง หรือจนกว่าตัวอย่างจะแห้ง แล้วทำการละลายตัวอย่างด้วย 75 % methanol ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC

3.3.7 การวิเคราะห์ตำแหน่งการกิน (Trophic Position)

ในการประเมินลำดับการกินในห่วงโซ่อาหารในแต่ละสถานที่ใช้สมการต่อไปนี้ในการคำนวณ (Rumolo et al., 2016)

$$TP = TL_{Base} + (\delta^{15}N_{Consumer} - \delta^{15}N_{Prey}) / \Delta \delta^{15}N$$

เมื่อ TP	= ตำแหน่งของผู้บริโภค
$\delta^{15}N_{Consumer}$ และ $\delta^{15}N_{Prey}$	= ปริมาณไอโซโทปของไนโตรเจน
$\Delta \delta^{15}N$	= เป็นค่า Trophic Enrichment Factor (TEF) ของการศึกษา 2.5‰ (Vanderklift & Ponsard, 2003; Riera & Richard, 1996)
TL_{Base}	= Basic Trophic Level ($TL_{base} = 1$)

3.3.8 ค่าการสะสมทางชีวภาพ (Bioconcentration factor, BCF value)

BCF เป็นค่าที่ใช้ในการอธิบายการสะสมของสารเคมีในสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำที่มีการปนเปื้อนสารเคมี โดยเป็นอัตราความเข้มข้นของสารเคมีในสิ่งมีชีวิตต่อความเข้มข้นของสารเคมีในน้ำ เกิดจากการที่สิ่งมีชีวิตได้รับสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำผ่านทางเหงือกแล้วมีการสะสมในร่างกายหรืออวัยวะต่างๆของสัตว์ จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าค่า BCF ของ BPA มีค่า 1298 เมื่อจำแนกตามประเภทการสะสมทางชีวภาพของชนิดสิ่งมีชีวิต (BCF) ตามองค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อม ประเทศสหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency's -US EPA) โดยค่า BCF คำนวณได้จากสมการที่อ้างอิงจาก Staniszewska et al. (2014b)

$$BCF (l/kg) = \frac{\text{ความเข้มข้นของ BPA ในหอยแมลงภู่ม (ng/kg)}}{\text{ความเข้มข้นของ BPA ในน้ำ (ng/l)}}$$

3.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

3.4.1 การทดสอบความแตกต่างของ BPA ในแต่ละสถานีโดยใช้วิธีทดสอบแบบ one-way ANOVA ด้วยโปรแกรม Minitab เป็นตัวทดสอบทางสถิติ

3.4.2 ทดสอบความสัมพันธ์ของ BPA ปริมาณไอโซโทปเสถียรของคาร์บอนและไนโตรเจนในแต่ละสถานี โดยใช้วิธีทดสอบแบบ สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation) ด้วยโปรแกรม Minitab เป็นตัวทดสอบ



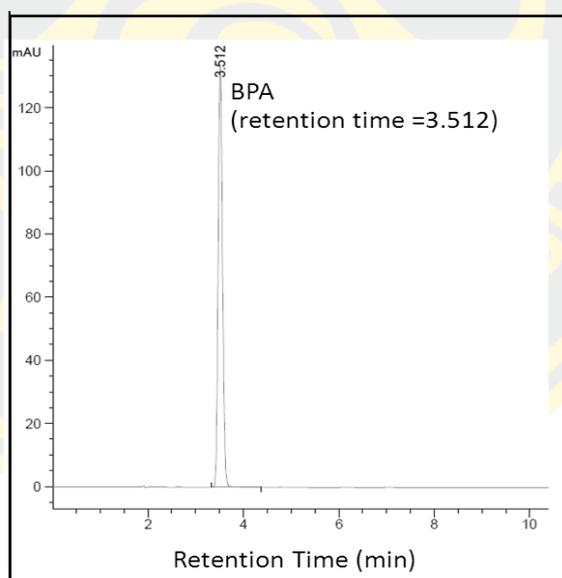
บทที่ 4

ผลการวิจัย

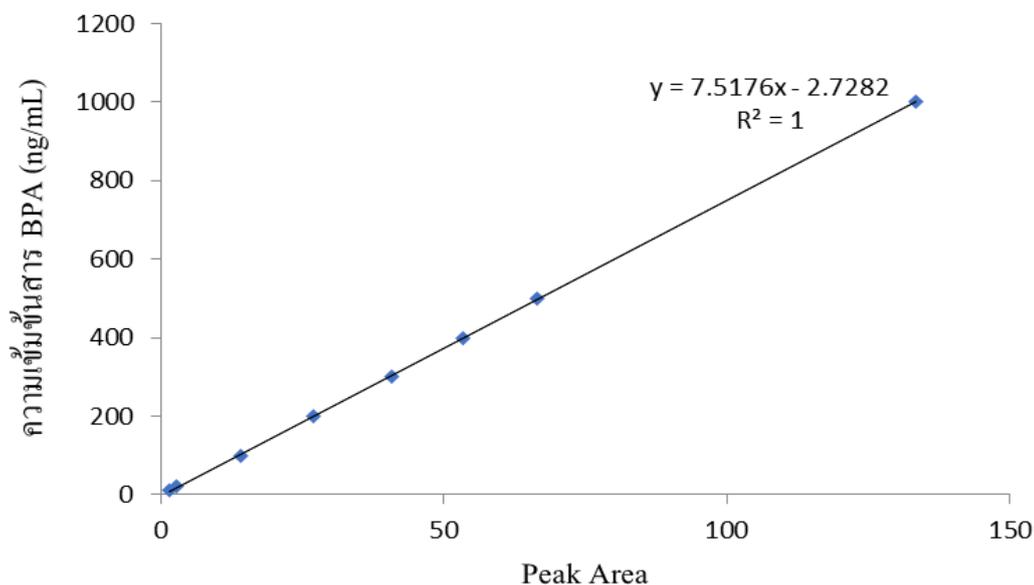
4.1 การวิเคราะห์ปริมาณ BPA ด้วยเทคนิค High-performance liquid chromatography (HPLC)

4.1.1 ความถูกต้องของวิธีการวิเคราะห์

จากการทดลองฉีดสารละลายมาตรฐาน BPA 1000 ng/mL ปริมาณ 20 μ l ทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง HPLC พบพีคของสารละลายมาตรฐาน BPA อยู่ที่เวลา (retention time) เท่ากับ 3.512 นาที (ภาพที่ 10) และจากการตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการวิเคราะห์พบว่า กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าได้พีคกับค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐานอยู่ที่ความเข้มข้น 10 - 1,000 ng พบว่าได้สมการเส้นตรงของ BPA คือ $y=7.5176x-2.7282$ (ภาพที่ 11) และได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ BPA (R^2) เท่ากับ 1



ภาพที่ 10 โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐาน BPA ความเข้มข้น 1000 ng/mL ที่ความยาวคลื่น 280 nm เฟสคงที่คือ sunfire C18 column ขนาด 3.5 μ m (3.0 \times 150 mm) เฟสเคลื่อนที่เป็นเมทานอลกับน้ำ (75:25) อัตราการไหลคงที่เท่ากับ 1 mL/min อุณหภูมิคอลัมน์ 30 $^{\circ}$ C ปริมาณการฉีดสารเข้าเครื่อง HPLC เท่ากับ 20 μ l



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐาน BPA ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐาน BPA ในช่วง 10, 20, 100, 200, 300, 400, 500 และ 1,000 ng/mL กับพื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area)

4.1.2 ปริมาณ BPA ในตัวอย่างน้ำทะเล

ปริมาณความเข้มข้นของ BPA ในตัวอย่างน้ำทะเลที่เก็บจากบริเวณปากคลองชักหามากและอ่าวตากวน จังหวัดระยอง มีความเข้มข้นของ BPA สูงสุดเฉลี่ยในสถานี MP1 (ปากคลองชักหามาก) 1060 ± 19 ng/L และค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สถานี MP3 (อ่าวตากวน) 50 ± 12 ng/L จากการศึกษา มีบางสถานีตรวจไม่พบค่าความเข้มข้นของ BPA ในตัวอย่างน้ำทะเล (ตารางที่ 3)

4.1.3 ปริมาณ BPA ในตัวอย่างดินตะกอน

ปริมาณความเข้มข้นของ BPA ในตัวอย่างดินตะกอนที่เก็บจากบริเวณปากคลองชักหามากและอ่าวตากวน จังหวัดระยอง มีความเข้มข้นของ BPA สูงสุดเฉลี่ยในสถานี MP1 (ปากคลองชักหามาก) 240 ± 8 ng/g และค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สถานี MP3 (อ่าวตากวน) 33 ± 4 ng/g จากการศึกษา ครั้งนี้สถานี MP4-MP7 ไม่พบค่าความเข้มข้นของ BPA ในตัวอย่างดินตะกอน (ตารางที่ 3)

4.1.4 ปริมาณ BPA ในระบบทางเดินอาหารของหอยแมลงภู่

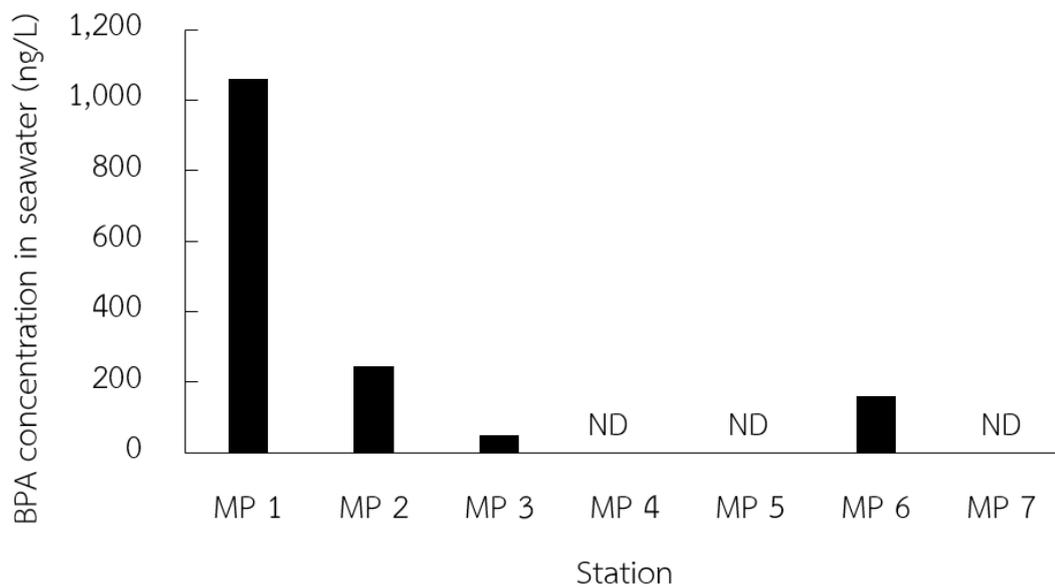
ปริมาณความเข้มข้นของ BPA ในตัวอย่างเนื้อเยื่อทางเดินอาหารของหอยแมลงภู่ที่เก็บจากบริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง มีความเข้มข้นของ BPA สูงสุดเฉลี่ยในสถานี MP5 (อ่าวตากวน) 579 ± 13 ng/g และค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สถานี MP3 (อ่าวตากวน) 384 ± 6 ng/g (ภาพที่ 14)

ตารางที่ 3 ปริมาณความเข้มข้น (เฉลี่ย±SD) ของ BPA ในตัวอย่างน้ำทะเล ดินตะกอน หอยแมลงภู่ และแพลงก์ตอนบริเวณคลองซากหมากและอ่าวตากวน จังหวัดระยอง

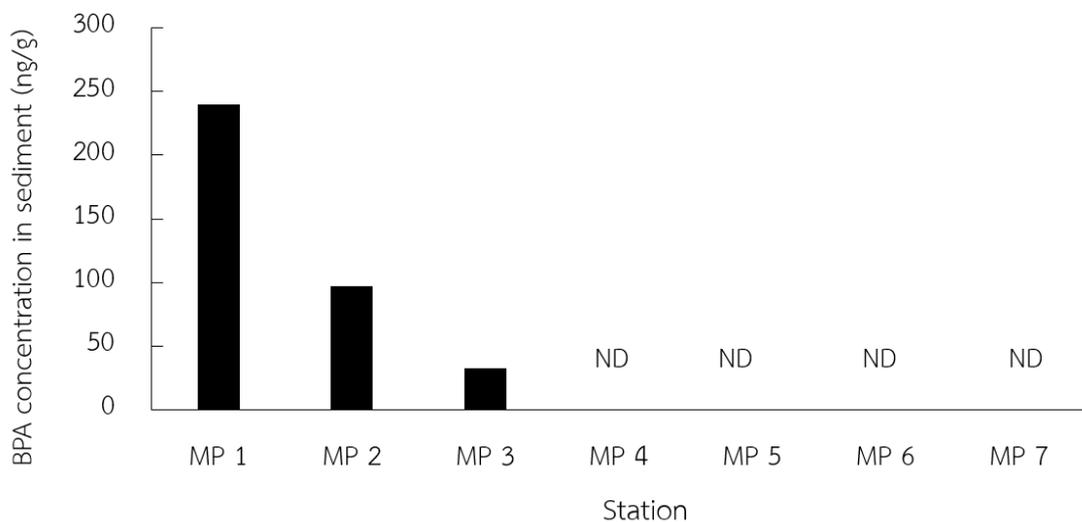
Station	Seawater (ng/L)	Sediment (ng/g)	Green mussels (ng/g)	Plankton (ng/g)
MP1	1060 ±19	240±8	-	-
MP2	246±18	97±6	-	-
MP3	50±12	33±4	-	-
MP4	nd	nd	513±17	nd
MP5	nd	nd	579±13	nd
MP6	160±2	nd	384±6	122
MP7	nd	nd	-	-

Nd = < 1.46 ng/L

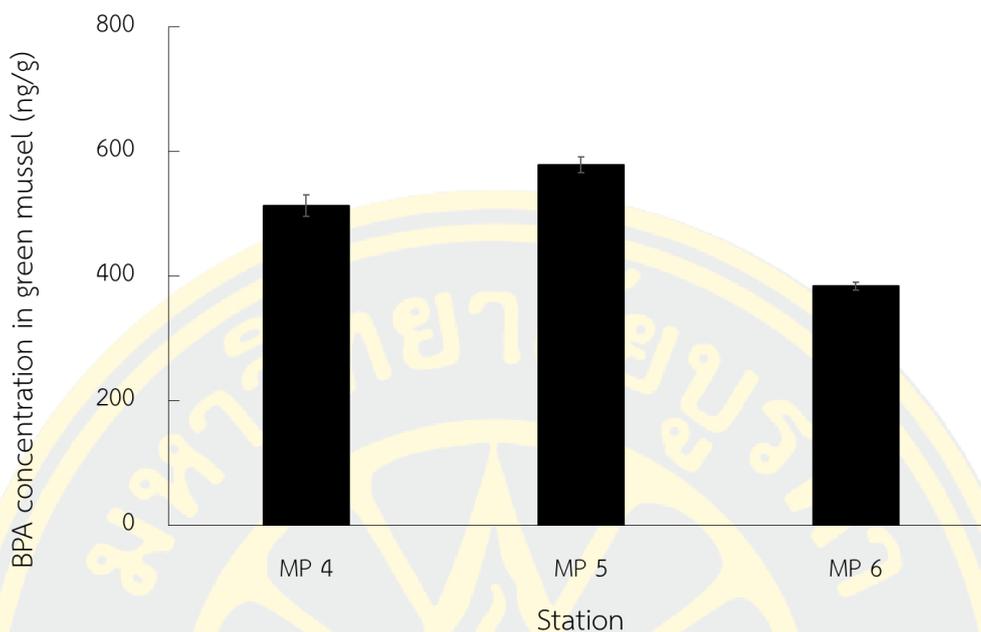
หมายเหตุ SD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)



ภาพที่ 12 ปริมาณของ BPA ในตัวอย่างน้ำทะเล ทั้ง 7 สถานี บริเวณคลองชักหมากและอ่าวตากวน จังหวัดระยอง ND = Not detectable (ไม่สามารถตรวจวัดได้ โดยมีปริมาณต่ำกว่าขีดจำกัดของการตรวจวัดโดยวิธี HPLC น้อยกว่า 1.46 ng/L)



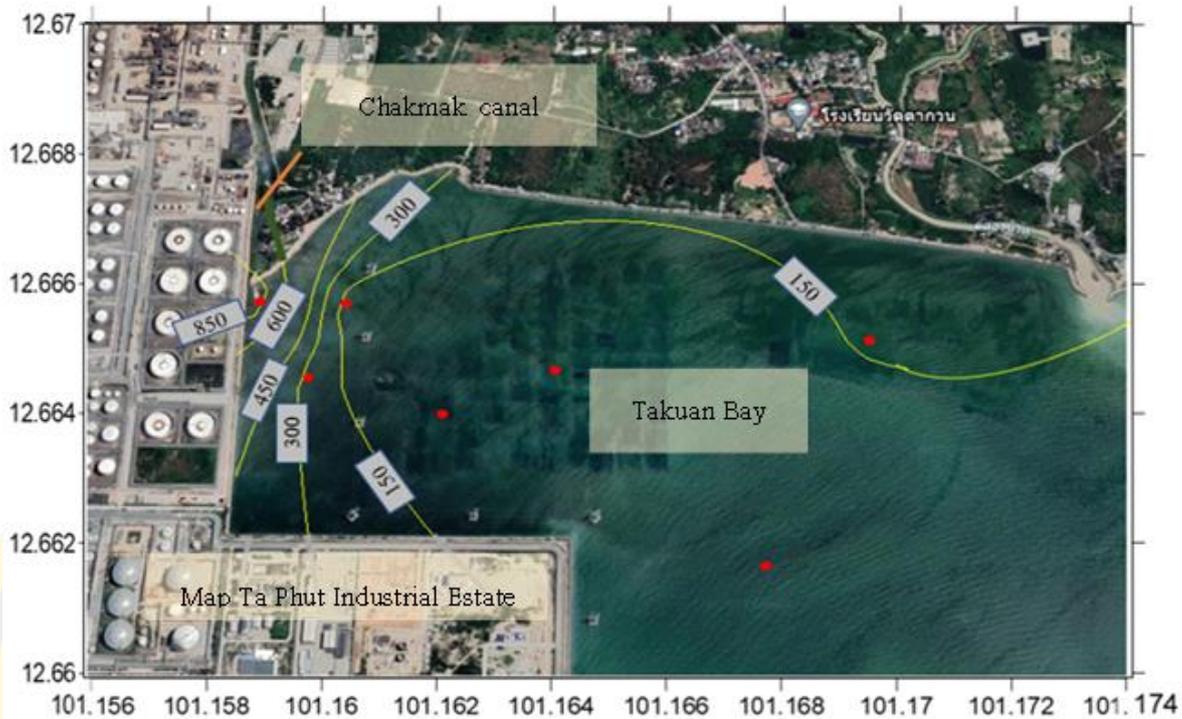
ภาพที่ 13 ปริมาณของ BPA ในตัวอย่างดินตะกอน ทั้ง 7 สถานี บริเวณคลองชักหมากและอ่าวตากวน จังหวัดระยอง ND = Not detectable (ไม่สามารถตรวจวัดได้ โดยมีปริมาณต่ำกว่าขีดจำกัดของการตรวจวัดโดยวิธี HPLC น้อยกว่า 1.46 ng/L)



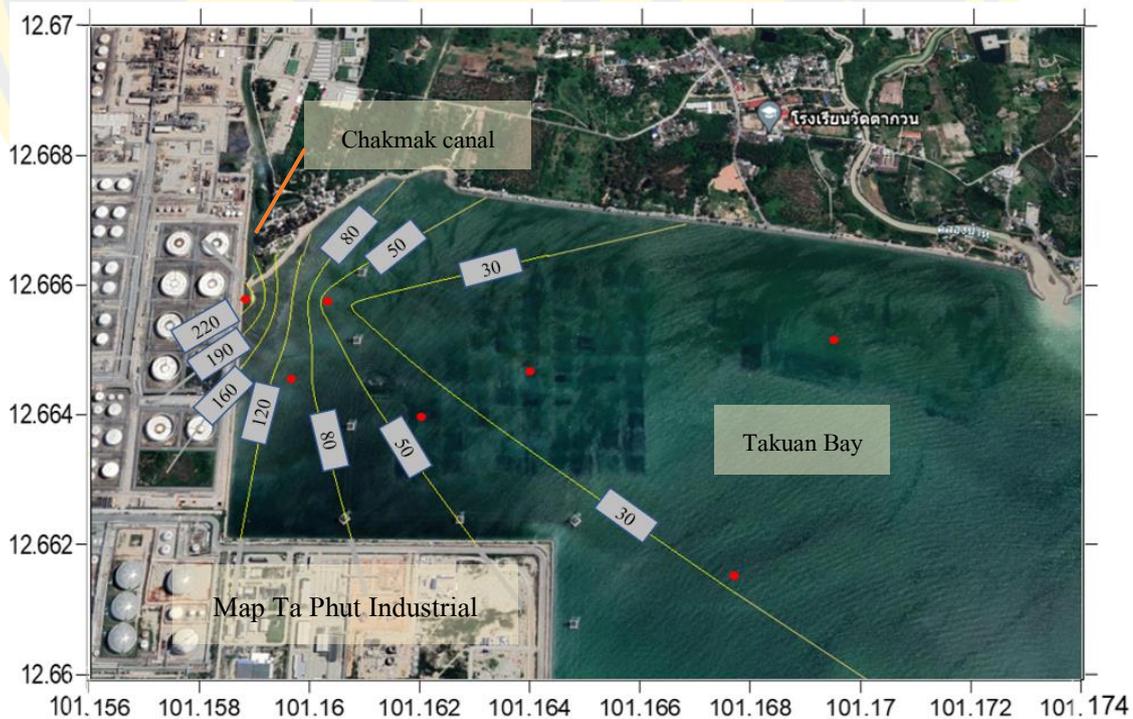
ภาพที่ 14 ปริมาณของ BPA ในตัวอย่างหอยแมลงภู่น้ำจืด (n=5) ที่สถานี MP4 - MP6 บริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง

4.2 การกระจายของ BPA ในน้ำทะเลและดินตะกอน

การกระจายของ BPA ในน้ำทะเลและดินตะกอน บริเวณคลองซากหมากและอ่าวตากวน โดยสถานีปากคลองซากหมากเป็นสถานีที่อยู่ใกล้เขตนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดมากที่สุด และอีก 6 สถานีตั้งอยู่ในอ่าวตากวน โดยเลือกสถานี MP.7 เป็นจุดที่มีระยะห่างจากเขตเมืองและเขตอุตสาหกรรม โดยมีความเข้มข้นของ BPA สูงสุดที่สถานี MP1 ที่อยู่บริเวณใกล้ปากคลองซากหมาก และความเข้มข้นต่ำสุดของ BPA อยู่ที่สถานี MP7 ซึ่งเป็นสถานีที่อยู่ห่างจากเขตอุตสาหกรรม แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของ BPA มีแนวโน้มลดลงตามระยะทางจากปากคลองซากหมากไปยังทะเล (ภาพที่ 15, 16)



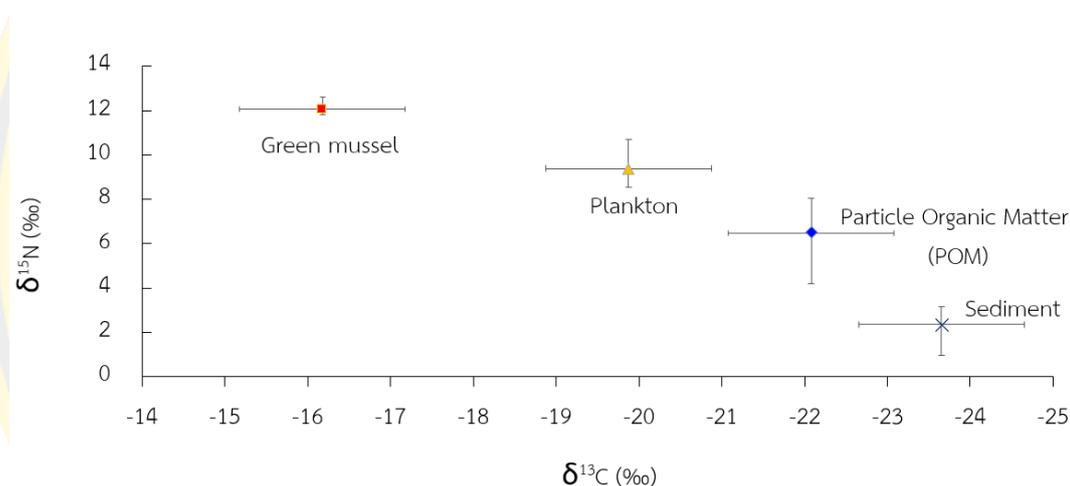
ภาพที่ 15 การกระจายของ BPA ในตัวอย่างน้ำทะเลบริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง



ภาพที่ 16 การกระจายของ BPA ในตัวอย่างดินตะกอนบริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง

4.3 การใช้ปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ ตามห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิตบริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง

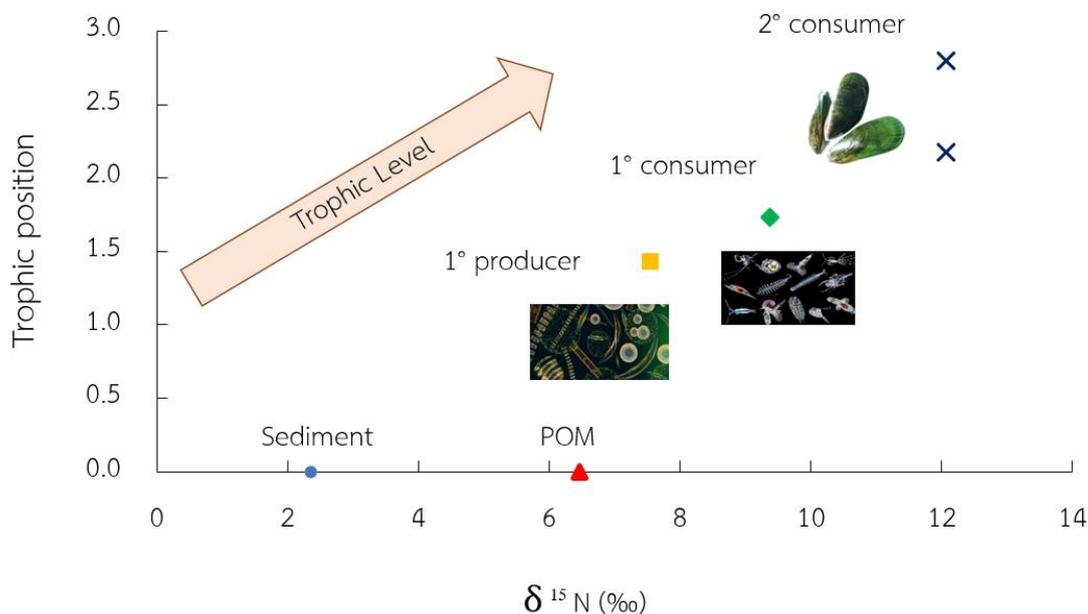
ปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ ในเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต โดยพบปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในแพลงก์ตอนเฉลี่ยอยู่ที่ $-19.88 \pm 0.83\text{‰}$ ปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ เฉลี่ยอยู่ที่ $9.83 \pm 1.33\text{‰}$ และพบปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ ในหอยแมลงภู่เฉลี่ยอยู่ที่ $-16.18 \pm 0.24\text{‰}$ ปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ เฉลี่ยอยู่ที่ $12.06 \pm 0.52\text{‰}$ ซึ่งพบว่าหอยแมลงภู่มีปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ สูงที่สุดในห่วงโซ่อาหาร (ภาพที่ 17)



ภาพที่ 17 ปริมาณไอโซโทปเสถียรของคาร์บอนและไนโตรเจนในสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมบริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง

4.4 การเพิ่มก้ำกลางทางชีวภาพในห่วงโซ่อาหารของหอยแมลงภู่บริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง

การศึกษาค้นคว้านี้ได้ตรวจสอบการเพิ่มก้ำกลางทางชีวภาพของ BPA ในสิ่งมีชีวิต ซึ่งคาดว่า BPA จะมีการสะสมและถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิตบริเวณอ่าวตากวน (ภาพที่ 18) โดยเลือกแพลงก์ตอนและหอยแมลงภู่เนื่องจากเป็นผู้บริโภคลำดับที่ 1 และผู้บริโภคลำดับที่ 2 ตามลำดับจากการวิเคราะห์ ด้วยเครื่อง HPLC พบว่ามี BPA ในตัวอย่างแพลงก์ตอนและหอยแมลงภู่จากสถานี MP6



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ของ $\delta^{15}\text{N}$ กับลำดับการกิน (Trophic level) ในบริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง

4.5 การสะสมทางชีวภาพในสิ่งมีชีวิต (Bioconcentration factor: BCF)

BCF เป็นค่าที่ใช้ในการอธิบายการสะสมของสารเคมีในสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำที่มีการปนเปื้อนสารเคมี โดยเป็นอัตราความเข้มข้นของสารเคมีในสิ่งมีชีวิตต่อความเข้มข้นของสารเคมีในน้ำ เกิดจากการที่สิ่งมีชีวิตได้รับสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำผ่านทางเหงือกแล้วมีการสะสมในร่างกายหรืออวัยวะต่างๆของสัตว์ จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าค่า BCF ของ BPA มีค่า 1298 เมื่อจำแนกตามประเภทการสะสมทางชีวภาพของชนิดสิ่งมีชีวิต (BCF) ตามองค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อม ประเทศสหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency's -US EPA) สามารถค่าการสะสมทางชีวภาพได้เป็นอันดับการสะสมทางชีวภาพอันดับที่ 2 เนื่องจากค่า $\text{BCF} \geq 1000$

บทที่ 5

อภิปรายและสรุปผล

5.1 ปริมาณและการกระจายของ BPA บริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง

5.1.1 ปริมาณและการกระจายของ BPA ในน้ำทะเลบริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง

จากผลการศึกษาปริมาณ BPA ในน้ำทะเลอยู่ระหว่าง 49.73 ถึง 1,059.70 ng/L โดยความเข้มข้นของ BPA สูงที่สุดบริเวณสถานีปากคลองซากหมาก (MP1) อยู่ที่ $1,059 \pm 18.65$ ng/L เมื่อเปรียบเทียบกับสถานีอื่นๆ (ตารางที่ 3) แสดงให้เห็นว่าน้ำทิ้งจากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดมีการปนเปื้อน BPA และเกิดการสลายตัวเมื่อไหลลงสู่ทะเล เนื่องจาก BPA สามารถสลายตัวได้เมื่อถูกความร้อน แสงยูวี หรือสารเคมีบางชนิด (Han et al., 2023) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ (Flint et al., 2012) ซึ่งพบว่า BPA ส่วนใหญ่จะพบในปริมาณมากบริเวณเขตอุตสาหกรรมและเขตเมืองที่มีจำนวนประชากรหนาแน่น โดยพื้นที่ศึกษาในครั้งนี้เป็นพื้นที่อ่าวที่รองรับน้ำทิ้งจากนิคมอุตสาหกรรมซึ่งมีลักษณะพื้นที่คล้ายกับการศึกษาของ (Bayen et al., 2013) ที่ทำการศึกษาริเวณท่าเรือรอบๆเขตพื้นที่อุตสาหกรรมที่ได้รับการบำบัดน้ำแล้วถูกปล่อยลงสู่น้ำชายฝั่งพบปริมาณ BPA อยู่ในช่วง $<96 - 964$ ng/L ซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกับการศึกษาครั้งนี้ โดยการศึกษาครั้งนี้พบความเข้มข้นของ BPA ในน้ำจากบริเวณปากคลองซากหมากสูงกว่าการศึกษาของ Ocharoen et al. (2018) ที่ศึกษาพื้นที่เดียวกัน ซึ่งพบปริมาณ BPA 50 ± 9 ng/L เนื่องจากทำการศึกษาในช่วงเดือนธันวาคม-มกราคม ซึ่งเป็นช่วงที่โรงงานปิโตรเคมีในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดที่มีการใช้ BPA รวมถึงพลาสติกพอลีคาร์บอเนตและอีพอกซีเรซินเป็นสารตั้งต้นของกระบวนการผลิตได้ทำการปิดซ่อมบำรุง (บริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน), 2559) จึงทำให้มีการปล่อยน้ำทิ้งที่มี BPA ปนเปื้อนน้อยลงกว่าในช่วงที่มีการผลิตปกติ ผลการศึกษาครั้งนี้บ่งชี้ว่าในบริเวณที่ไกลจากแหล่งกำเนิดน้ำทิ้งจะพบความเสี่ยงในการปนเปื้อน BPA ลดลงซึ่งสอดคล้องกับสถานีเก็บตัวอย่างอ่าวตราด จังหวัดตราด ของ Ocharoen et al. (2018) พบความเข้มข้นของ BPA ในน้ำทะเล 1.21 ± 0.01 ng/L ซึ่งต่ำกว่าสถานีอื่นๆ เนื่องจากสถานีอ้างอิงในจังหวัดตราดเป็นพื้นที่ชนบทห่างไกลเขตเมืองและนิคมอุตสาหกรรมจึงแตกต่างจากสถานีเก็บตัวอย่างในการศึกษาปัจจุบัน อย่างไรก็ตามปริมาณ BPA ในน้ำทะเล บริเวณอ่าวตากวน พบว่าไม่สูงเกินเกณฑ์ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ กำหนดปริมาณ BPA (< 1.5 μ g/L) โดยสหภาพยุโรป (European Union, 2008)

จากผลการศึกษาการกระจายตัวของ BPA ในน้ำทะเล (ภาพที่ 15) พบว่าพื้นที่ที่อยู่ใกล้บริเวณปากคลองซากหมาก มีความเข้มข้นของ BPA สูงสุดและลดลงเมื่อมีระยะห่างจากปากคลองซากหมาก แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ปากคลองซากหมากได้รับอิทธิพลของน้ำทิ้งภายในนิคมอุตสาหกรรม มาตามาศุด สอดคล้องกับการศึกษาของ Ocharoen et al. (2018) ที่พบปริมาณ BPA สูงที่สุดในสถานีใกล้แหล่งกำเนิดมลพิษและพบปริมาณ BPA ต่ำที่สุดในพื้นที่ห่างจากฝั่ง เช่นเดียวกับการศึกษาของ สดใส มุขวา (2562) ที่รายงานว่าพบสารอินทรีย์ในน้ำทะเลลดลงตามระยะทางจากฝั่งออกสู่ทะเล

5.1.2 ปริมาณและการกระจายของ BPA ในดินตะกอนบริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง

ปริมาณ BPA ในตัวอย่างดินตะกอนที่ทำการศึกษาบริเวณปากคลองซากหมากและอ่าวตากวนรวมทั้ง 7 สถานี (ตารางที่ 3) พบปริมาณ BPA สูงที่สุดที่สถานี MP1 (240 ± 8 ng/g) และต่ำสุดที่สถานี MP 3 (33 ± 4 ng/g) เมื่อพิจารณาการกระจายของ BPA ในดินตะกอน (ภาพที่ 16) พบว่าบริเวณปากคลองซากหมากซึ่งเป็นบริเวณที่รองรับน้ำทิ้งจากนิคมอุตสาหกรรมนั้นมีปริมาณ BPA สูงที่สุดและปริมาณ BPA ลดลงเมื่อมีระยะห่างจากนิคมอุตสาหกรรมหรือแหล่งกำเนิดมลพิษ โดยสอดคล้องกับการศึกษาของ Safakhah et al. (2020) ซึ่งพบปริมาณ BPA สูงสุดที่สถานีปากแม่น้ำ Musa ซึ่งเป็นพื้นที่ใกล้เขตอุตสาหกรรม (16.71 ± 2.28 ng/g) และพบปริมาณ BPA ต่ำสุดในสถานีปากอ่าวเปอร์เซีย (2.22 ± 0.79 ng/g) ซึ่งเป็นสถานีที่อยู่ห่างจากเขตอุตสาหกรรมและเขตเมืองมากที่สุดจึงทำให้พบปริมาณ BPA น้อยกว่าสถานีอื่นๆ และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณ BPA ของการศึกษารุ่นนี้ที่พบจะสูงกว่าที่อ่าวเปอร์เซีย เนื่องจากจุดเก็บตัวอย่างดินตะกอนบริเวณปากคลองซากหมากนั้นอยู่ติดกับพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมมากกว่าและรองรับน้ำทิ้งจากนิคมอุตสาหกรรมโดยตรง ซึ่งต่างจากอ่าวเปอร์เซียที่จุดเก็บตัวอย่างตั้งอยู่บริเวณปากแม่น้ำซึ่งอยู่ไกลเคียงกับเขตอุตสาหกรรม ดังนั้นในการศึกษารุ่นนี้พบว่าปากคลองซากหมากได้รับอิทธิพลจากน้ำทิ้งภายในนิคมอุตสาหกรรม มาตามาศุด โดยพบความเข้มข้นของ BPA ในดินตะกอนสูงกว่าในน้ำทะเล เนื่องจากค่าครึ่งชีวิตของ BPA ในดินตะกอนอยู่ที่ 340 วัน และในน้ำทะเลมีค่าครึ่งชีวิต 38 วันส่งผลให้มีการสะสมของ BPA ในตัวอย่างดินตะกอนสูงกว่าในน้ำทะเล (Corrales et al., 2015)

5.1.3 ปริมาณของ BPA ในระบบทางเดินอาหารของหอยแมลงภู่

ปริมาณ BPA ในหอยแมลงภู่ที่เก็บจากสถานี MP4, MP6-7 มีปริมาณของ BPA อยู่ในช่วง 384-579 ng/g (ภาพที่ 14) โดยพบปริมาณ BPA ในหอยแมลงภู่ต่ำสุดที่สถานี MP7 (384 ± 1.46 ng/g) เนื่องจากเป็นสถานีที่อยู่ห่างจากบริเวณปากคลองซากหมากมากที่สุดและดินตะกอนบริเวณ

สถานีนี้อาจมีลักษณะเป็นดินปนทรายจึงทำให้เกิดการดูดซับของ BPA ได้น้อยกว่าดินโคลน (Kao et al., 2003; Aschberger et al., 2010) สอดคล้องกับ Ocharoen et al. (2018) ที่พบว่า BPA ในหอยแมลงภู่ในบริเวณปากคลองชักหามีปริมาณสูงกว่าสถานที่ห่างออกไป ซึ่งสาเหตุของการปนเปื้อน BPA คือ การปล่อยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งจะเพิ่มความเข้มข้นของสารอาหารและสารปนเปื้อน และเมื่อผู้ผลิตชั้นต้นสัมผัสกับน้ำที่ปนเปื้อน BPA เกิดการสะสมในเนื้อเยื่อหอยแมลงภู่และเกิดถ่ายทอดผ่านห่วงโซ่อาหาร (Liu et al., 2015) โดยหอยแมลงภู่กินแพลงก์ตอนพืชแพลงก์ตอนสัตว์และเศษอินทรีย์ขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเป็นอาหารตลอดจนสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำเข้าสู่ร่างกายและเกิดการสะสมในเนื้อเยื่อของหอยแมลงภู่เนื่องจากคุณสมบัติของ BPA $\log K_{ow}$ 3.64 เนื่องด้วยคุณสมบัติของ BPA ที่สามารถละลายได้ในไขมัน สิ่งนี้ทำให้เกิดการสะสมของ BPA ในเนื้อเยื่อในหอยแมลงภู่ ซึ่งจัดเป็นสัตว์น้ำเศรษฐกิจ ดังนั้นจึงมีความเสี่ยงเมื่อมนุษย์เป็นผู้บริโภคอันดับสุดท้ายของห่วงโซ่อาหาร (Berglund et al., 2000) และเมื่อจำแนกตามประเภทการสะสมทางชีวภาพของชนิดสิ่งมีชีวิต bioconcentration factors (BCF) ตามองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมประเทศสหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency's -US EPA) โดยค่า BCF <1000 = อันดับการสะสมทางชีวภาพ 1; ≥ 1000 = อันดับการสะสมทางชีวภาพ 2; และ $>5,000$ = การสะสมทางชีวภาพอันดับที่ 3 ในการศึกษาครั้งนี้พบค่า BCF ของ BPA ในหอยแมลงภู่คือ 1,298 ค่า BCF ที่สูงบ่งชี้ว่าหอยแมลงภู่สามารถดูดซับ BPA จากสิ่งแวดล้อมได้ในอัตราที่สูงขึ้นและยังสามารถระบุได้ว่าหอยแมลงภู่สามารถสะสมทางชีวภาพได้ในอันดับที่ 2 ซึ่งมากกว่า 1,000 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ocharoen et al. (2018) ที่พบค่า BCF ของ BPA ในหอยแมลงภู่ตัวเต็มวัยอยู่ที่ 1,650 (ตารางที่ 5) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มการสะสมทางชีวภาพเดียวกัน และปัจจุบันยังไม่รายงานเกณฑ์มาตรฐานของ BPA ในสิ่งมีชีวิต

ตารางที่ 4 ค่าการสะสมทางชีวภาพ (Bioconcentration factor, BCF value)

BCF(L/kg)	อันดับการสะสมทางชีวภาพ	แหล่งที่มา
1298	2	การศึกษาครั้งนี้
1650	2	Ocharoen et al. (2018)

5.2 Trophic level ในห่วงโซ่อาหารของหอยแมลงภู่มิบริเวณอ่าวตากวน จังหวัด

ระยอง

ปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการประเมินโครงสร้างสายใยอาหารในระบบนิเวศทางน้ำ และการวิเคราะห์อัตราส่วนไอโซโทปที่เสถียรขององค์ประกอบทางชีวภาพ เช่น $\delta^{13}\text{C}$ และ $\delta^{15}\text{N}$ มีประโยชน์มากในการติดตามสิ่งปนเปื้อนในใยอาหารของสิ่งมีชีวิต (Tu et al., 2011) โดยทั่วไปปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อระดับโภชนาการเพิ่มขึ้น (ประมาณ 1‰ ต่อระดับขั้นการกินอาหาร) ด้วยเหตุนี้ปริมาณ $\delta^{13}\text{C}$ จึงเป็นที่นิยมใช้เพื่อระบุแหล่งคาร์บอนในสายใยอาหาร (Fry & Sherr, 1989a; B. Peterson et al., 1985) และในทางตรงกันข้ามผู้ล่าจะมีปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ สูงกว่าเหยื่อโดยเฉลี่ยประมาณ 2.5–5‰ ต่อระดับขั้นการกินอาหาร ทำให้สามารถระบุตำแหน่งทางโภชนาการในสายใยอาหารได้ (Tu et al., 2011) โดยผู้ผลิตหลักมีปริมาณเฉลี่ยของ $\delta^{15}\text{N}$ ของการศึกษาในช่วง 7-8‰ เมื่อพิจารณาเฉพาะปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ ในสิ่งมีชีวิต พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับการกินในห่วงโซ่อาหาร จะอยู่ที่ประมาณ 2.5‰ ต่อระดับการกินอาหาร (ภาพที่ 18)

ในสายใยอาหารที่ซับซ้อน มีการกำหนดช่วงระดับสารอาหาร (TLs) ของสิ่งมีชีวิตที่ถูกกำหนดโดยหน้าที่ของสายพันธุ์และประเภทการกินอาหารซึ่งสามารถจำแนกได้ดังนี้ แพลงก์ตอนพืชเป็นผู้ผลิตหลัก ($\text{TL}_{\text{sample}} = 1$) สัตว์กินพืช (แพลงก์ตอนสัตว์) เป็นผู้บริโภคอันดับ 1 ($\text{TL}_{\text{sample}} = 2$) และสัตว์กินเนื้อ (สัตว์นักล่าอันดับต้นๆ เช่น หอยแมลงภู่มิเขียว) เป็นผู้บริโภคอันดับ 2 ($\text{TL}_{\text{sample}} = 3$) (Kobayashi et al., 2019; Wang et al., 2021).

5.3 การเพิ่มกำลังทางชีวภาพในห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิตบริเวณบริเวณอ่าวตากวน จังหวัด

ระยอง

ในการตรวจสอบการขยายทางชีวภาพของ BPA ในห่วงโซ่อาหารแบบลำดับขั้นของหอยแมลงภู่มิ พบว่าแพลงก์ตอนสัตว์เป็นผู้บริโภคลำดับแรก และหอยแมลงภู่มิ เป็นผู้บริโภคลำดับสูงสุดของการศึกษารั้งนี้ ปริมาณของ BPA ในน้ำทะเล ดินตะกอน และหอยแมลงภู่มิ ดังแสดงในตารางที่ 3 และ ภาพที่ 12-14 บ่งชี้ว่า BPA ถูกส่งผ่านในน้ำทะเลและตะกอน จากนั้นขยายเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารหอยแมลงภู่มิกรอกกินแพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ อนุภาคแขวนลอยในน้ำ และดินตะกอนฟุ้งขึ้นมาจากพื้นท้องน้ำ ดังนั้นจึงสังเกตเห็นการสะสมของ BPA ในเนื้อเยื่อหอยแมลงภู่มิ งานวิจัยครั้งนี้เป็นงานวิจัยแรกที่ใช้อิโซโทปเสถียร (Stable Isotopes) ในการศึกษาการเพิ่มกำลังทางชีวภาพของ

BPA ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ikemoto et al. (2008) ที่ศึกษาการเพิ่มกำลังทางชีวภาพของสารประกอบอินทรีย์ที่ตกค้างยาวนาน persistent organic pollutants (POP) ในสายใยอาหารของสัตว์น้ำ โดยใช้ความชันของสมการการถดถอยระหว่างความเข้มข้นของ POP และ $\delta^{15}\text{N}$ ถูกนำมาใช้เป็นดัชนีของการเพิ่มกำลังทางชีวภาพ แต่อย่างไรก็ตามสามารถใช้การวิเคราะห์ (trophic magnification factor TMF) และ biomagnification factor (BMF) เพื่อเป็นดัชนีของการเพิ่มกำลังทางชีวภาพ โดยมีการนิยมใช้ค่า TMF เพื่อวัดปริมาณการเพิ่มกำลังทางชีวภาพและแสดงถึงการถ่ายโอนสารเคมีจากอาหารถึงผู้บริโภคโดยเฉลี่ยผ่านห่วงโซ่อาหาร มีรายงานของ Akhbarizadeh et al. (2020) ที่ศึกษา TMF ของ BPA ในสายใยอาหารของสัตว์ทะเลทั้ง 5 ชนิดในอ่าวเปอร์เซีย พบค่า TMF of BPA = 1.46 เมื่อพิจารณาจากค่า TMF พบว่ามีการเพิ่มกำลังทางชีวภาพ และสันนิษฐานได้ว่าเส้นทางหลักของการสัมผัสสารปนเปื้อนคือกินอาหาร โดย (Won et al., 2018) ได้ทำการจำแนกความเสี่ยงของการเกิดการเพิ่มกำลังทางชีวภาพของสารมลพิษแบ่งออกเป็นไม่เกิดการเพิ่มกำลังทางชีวภาพ (TMF < 1) เกิดการเพิ่มกำลังทางชีวภาพระดับต่ำ ($1 \leq \text{TMF} < 4$) เกิดการเพิ่มกำลังทางชีวภาพระดับปานกลาง ($4 \leq \text{TMF} < 10$) และเกิดการขยายทางชีวภาพอย่างรุนแรง (TMF ≥ 10) ส่วนค่า BMF เป็นวิธีการคำนวณการเพิ่มกำลังทางชีวภาพของสารมลพิษในสายใยอาหาร แล้วสามารถสรุปว่ามีความสามารถในการเพิ่มกำลังทางชีวภาพหรือไม่โดยที่ $\text{BMF} > 1$ บ่งชี้การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารปนเปื้อนจากเหยื่อไปสู่ผู้ล่า (Wang et al., 2021) ดังนั้นจึงเกิดกระบวนการเพิ่มกำลังทางชีวภาพขึ้น

5.4 สรุปผลการศึกษา

1) จากการศึกษาการปนเปื้อน การกระจายและแหล่งที่มาของ BPA ในหอยแมลงภู่ที่เพาะเลี้ยง บริเวณอ่าวตากวน นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2562 มีการปนเปื้อนของ BPA ในน้ำทะเล ดินตะกอนและหอยแมลงภู่ โดยแหล่งที่มาของ BPA มาจากคลองซากหมาก ซึ่งปริมาณ BPA ในน้ำทะเลและดินตะกอน มีรูปแบบการกระจายลดลงเมื่อมีระยะห่างจากปากคลองซากหมาก

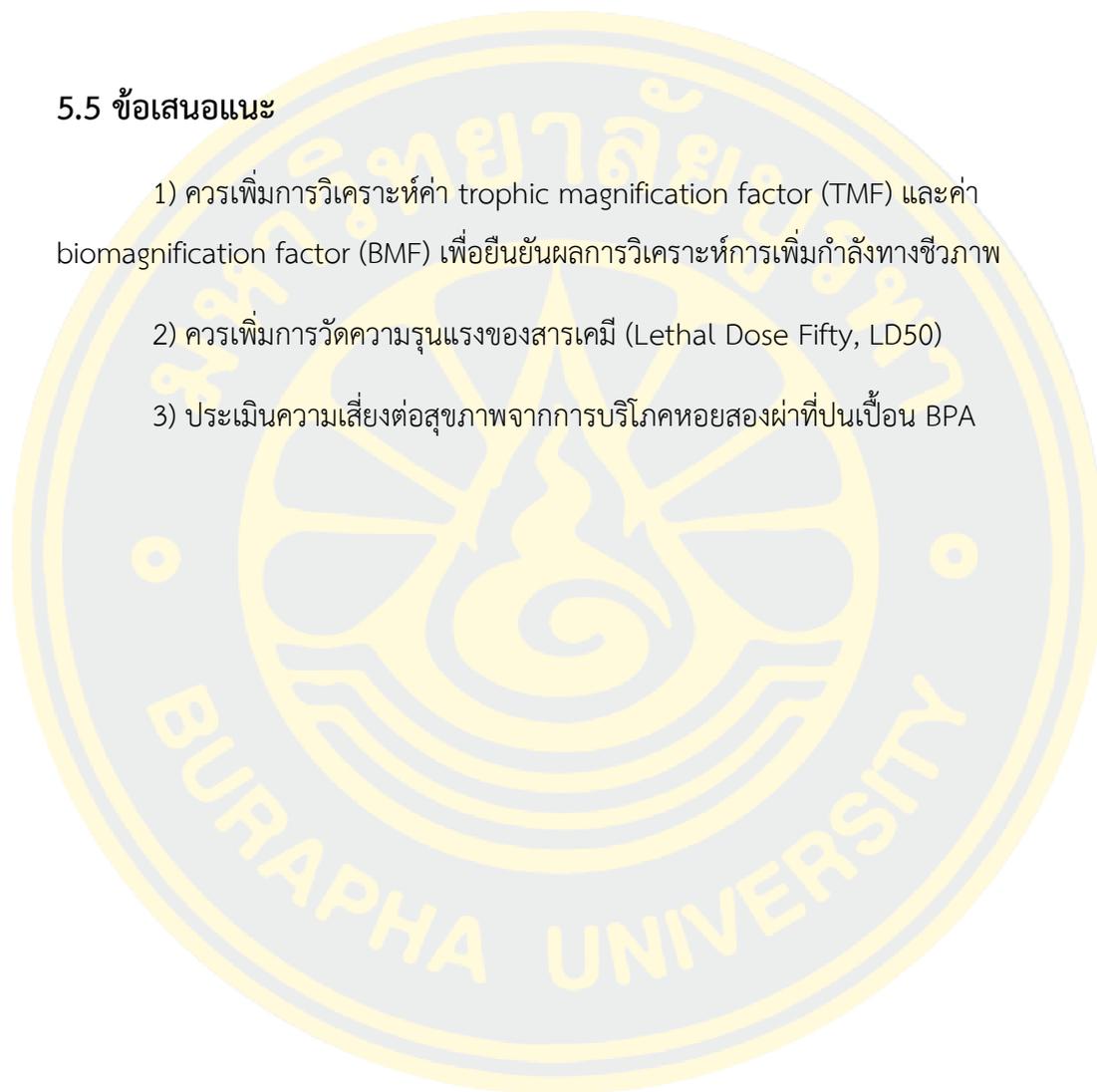
2) ปริมาณ $\delta^{15}\text{N}$ สามารถแบ่งลำดับการกินในห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิต บริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง ได้ 3 ระดับชั้นอาหาร ดังนี้ ผู้ผลิต (แพลงก์ตอนพืช) ผู้บริโภคอันดับที่ 1 (แพลงก์ตอนสัตว์ และหอยแมลงภู่) และผู้บริโภคอันดับที่ 2 (หอยแมลงภู่)

3) มีการเพิ่มกำลังทางชีวภาพของ BPA ตามการกินตามห่วงโซ่อาหารในสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศ บริเวณอ่าวตากวน จังหวัดระยอง

4) ปริมาณ BPA ที่พบในน้ำทะเล บริเวณอ่าวตากวน พบว่ามีปริมาณ BPA ไม่เกินเกณฑ์ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ กำหนดปริมาณ BPA ($< 1.5 \mu\text{g/L}$) โดยสหภาพยุโรป (European Union, 2008)

5.5 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรเพิ่มการวิเคราะห์ค่า trophic magnification factor (TMF) และค่า biomagnification factor (BMF) เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์การเพิ่มกำลังทางชีวภาพ
- 2) ควรเพิ่มการวัดความรุนแรงของสารเคมี (Lethal Dose Fifty, LD50)
- 3) ประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการบริโภคหอยสองฝาที่ปนเปื้อน BPA



บรรณานุกรม

- Alexander, H. C., Dill, D. C., Smith, L. W., Guiney, P. D., & Dorn, P. (1988). Bisphenol A: acute aquatic toxicity. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 7(1), 19-26.
- Aluru, N., Leatherland, J. F., & Vijayan, M. M. (2010). Bisphenol A in oocytes leads to growth suppression and altered stress performance in juvenile rainbow trout. *PloS one*, 5(5), e10741.
- Barboza, L. G. A., Cunha, S. C., Monteiro, C., Fernandes, J. O., & Guilhermino, L. (2020). Bisphenol A and its analogs in muscle and liver of fish from the North East Atlantic Ocean in relation to microplastic contamination. Exposure and risk to human consumers. *Journal of Hazardous Materials*, 393, 122419.
- Barros, G. V., Martinelli, L. A., Novais, T. M. O., Ometto, J. P. H., & Zuppi, G. M. (2010). Stable isotopes of bulk organic matter to trace carbon and nitrogen dynamics in an estuarine ecosystem in Babitonga Bay (Santa Catarina, Brazil). *Science of the Total Environment*, 408(10), 2226-2232.
- Bayen, S., Zhang, H., Desai, M. M., Ooi, S. K., & Kelly, B. C. (2013). Occurrence and distribution of pharmaceutically active and endocrine disrupting compounds in Singapore's marine environment: Influence of hydrodynamics and physical-chemical properties. *Environmental Pollution*, 182, 1-8.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.06.028>
- Belfroid, A., Van Velzen, M., Van der Horst, B., & Vethaak, D. (2002). Occurrence of bisphenol A in surface water and uptake in fish: evaluation of field measurements. *Chemosphere*, 49(1), 97-103.
- Berglund, O., Larsson, P., Ewald, G., & Okla, L. (2000). Bioaccumulation and differential partitioning of polychlorinated biphenyls in freshwater, planktonic food webs. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57(6), 1160-1168.
- Bian, H., Li, Z., Liu, P., & Pan, J. (2010). Spatial distribution and deposition history of nonylphenol and bisphenol A in sediments from the Changjiang River (Yangtze River) Estuary and its adjacent East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 29, 44-51.

- Bonefeld-Jørgensen, E. C., Long, M., Hofmeister, M. V., & Vinggaard, A. M. (2007). Endocrine-disrupting potential of bisphenol A, bisphenol A dimethacrylate, 4-n-nonylphenol, and 4-n-octylphenol in vitro: new data and a brief review. *Environmental health perspectives*, 115(Suppl 1), 69-76.
- Boonphakdee, T., & Fujiwara, T. (2008). Temporal variability of nutrient budgets in a tropical river estuary the Bangpakong River Estuary, Thailand. *Environment Asia*, 1(1), 7-21.
- Canesi, L., & Fabbri, E. (2015). Environmental effects of BPA: focus on aquatic species. *Dose-Response*, 13(3), 1559325815598304.
- Chapin, R. E., Adams, J., Boekelheide, K., Gray Jr, L. E., Hayward, S. W., Lees, P. S., McIntyre, B. S., Portier, K. M., Schnorr, T. M., & Selevan, S. G. (2008). NTP-CERHR expert panel report on the reproductive and developmental toxicity of bisphenol A. *Birth defects research. Part B, Developmental and reproductive toxicology*, 83(3), 157-395.
- Cooper, J. E., Kendig, E. L., & Belcher, S. M. (2011). Assessment of bisphenol A released from reusable plastic, aluminium and stainless steel water bottles. *Chemosphere*, 85(6), 943-947.
- Corrales, J., Kristofco, L. A., Steele, W. B., Yates, B. S., Breed, C. S., Williams, E. S., & Brooks, B. W. (2015). Global assessment of bisphenol A in the environment: review and analysis of its occurrence and bioaccumulation. *Dose-Response*, 13(3), 1559325815598308.
- Cousins, I., Staples, C., KleĀka, G., & Mackay, D. (2002). A multimedia assessment of the environmental fate of bisphenol A. *Human and Ecological Risk Assessment*, 8(5), 1107-1135.
- Duan, S., Amon, R. M., & Brinkmeyer, R. L. (2014). Tracing sources of organic matter in adjacent urban streams having different degrees of channel modification. *Science of the Total Environment*, 485, 252-262.
- Fent, G., Hein, W. J., Moendel, M. J., & Kubiak, R. (2003). Fate of 14C-bisphenol A in soils. *Chemosphere*, 51(8), 735-746.
- Flint, S., Markle, T., Thompson, S., & Wallace, E. (2012). Bisphenol A exposure, effects, and policy: a wildlife perspective. *Journal of environmental management*, 104,

19-34.

Fry, B., & Sherr, E. B. (1989a). $\delta^{13}\text{C}$ measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems. In *Stable isotopes in ecological research* (pp. 196-229). Springer.

Fry, B., & Sherr, E. B. (1989b). $\delta^{13}\text{C}$ measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems. In *Stable isotopes in ecological research* (pp. 196-229). Springer.

Fürhacker, M., Scharf, S., & Weber, H. (2000). Bisphenol A: emissions from point sources. *Chemosphere*, 41(5), 751-756.

Guo, R., Du, Y., Zheng, F., Wang, J., Wang, Z., Ji, R., & Chen, J. (2017). Bioaccumulation and elimination of bisphenol a (BPA) in the alga *Chlorella pyrenoidosa* and the potential for trophic transfer to the rotifer *Brachionus calyciflorus*. *Environmental Pollution*, 227, 460-467.

Han, Q., Wang, M., Sun, F., Yu, B., Dong, Z., Li, P., Luo, J., Li, M., Jin, X., & Dai, Z. (2023). Effectiveness and degradation pathways of bisphenol A (BPA) initiated by hydroxyl radicals and sulfate radicals in water: Initial reaction sites based on DFT prediction. *Environmental Research*, 216, 114601.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114601>

Hong, A. H., Hargan, K. E., Williams, B., Nuangsaeng, B., Siriwong, S., Tassawad, P., Chaiham, C., & Los Huertos, M. (2020). Examining molluscs as bioindicators of shrimp aquaculture effluent contamination in a southeast Asian mangrove. *Ecological Indicators*, 115, 106365.

Houde, M., Muir, D. C. G., Tomy, G. T., Whittle, D. M., Teixeira, C., & Moore, S. (2008). Bioaccumulation and Trophic Magnification of Short- and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Food Webs from Lake Ontario and Lake Michigan. *Environmental Science & Technology*, 42(10), 3893-3899.

<https://doi.org/10.1021/es703184s>

Huang, Y., Wong, C., Zheng, J., Bouwman, H., Barra, R., Wahlström, B., Neretin, L., & Wong, M. H. (2012). Bisphenol A (BPA) in China: a review of sources, environmental levels, and potential human health impacts. *Environment international*, 42, 91-99.

- Ikemoto, T., Tu, N. P. C., Watanabe, M. X., Okuda, N., Omori, K., Tanabe, S., Tuyen, B. C., & Takeuchi, I. (2008). Analysis of biomagnification of persistent organic pollutants in the aquatic food web of the Mekong Delta, South Vietnam using stable carbon and nitrogen isotopes. *Chemosphere*, *72*(1), 104-114.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.01.011>
- Im, J., & Löffler, F. E. (2016). Fate of bisphenol A in terrestrial and aquatic environments. *Environmental science & technology*, *50*(16), 8403-8416.
- Jahromi, F. A., Moore, F., Keshavarzi, B., Mohebbi-Nozar, S. L., Mohammadi, Z., Sorooshian, A., & Abbasi, S. (2020). Bisphenol A (BPA) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surface sediment and bivalves from Hormozgan Province coastline in the Northern Persian Gulf: A focus on source apportionment. *Marine Pollution Bulletin*, *152*, 110941.
- Kang, J.-H., & Kondo, F. (2005). Bisphenol A degradation in seawater is different from that in river water. *Chemosphere*, *60*(9), 1288-1292.
- Kang, J., & Kondo, F. (2006). Bisphenol A in the surface water and freshwater snail collected from rivers around a secure landfill. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, *76*(1), 113-118.
- Kawahata, H., Ohta, H., Inoue, M., & Suzuki, A. (2004). Endocrine disrupter nonylphenol and bisphenol A contamination in Okinawa and Ishigaki Islands, Japan--within coral reefs and adjacent river mouths. *Chemosphere*, *55*(11), 1519-1527.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.01.032>
- Keri, R. A., Ho, S.-M., Hunt, P. A., Knudsen, K. E., Soto, A. M., & Prins, G. S. (2007). An evaluation of evidence for the carcinogenic activity of bisphenol A. *Reproductive toxicology*, *24*(2), 240-252.
- Lang, I. A., Galloway, T. S., Scarlett, A., Henley, W. E., Depledge, M., Wallace, R. B., & Melzer, D. (2008). Association of urinary bisphenol A concentration with medical disorders and laboratory abnormalities in adults. *Jama*, *300*(11), 1303-1310.
- Liao, Y., Shou, L., Jiang, Z., Tang, Y., Du, P., Zeng, J., Chen, Q., Yan, X., & Chen, J. (2019). Effects of fish cage culture and suspended oyster culture on macrobenthic communities in Xiangshan Bay, a semi-enclosed subtropical bay in eastern China. *Marine Pollution Bulletin*, *142*, 475-483.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.065>

- M'Rabet, C., Pringault, O., Zmerli-Triki, H., Gharbia, H. B., Couet, D., & Yahia, O. K.-D. (2018). Impact of two plastic-derived chemicals, the Bisphenol A and the di-2-ethylhexyl phthalate, exposure on the marine toxic dinoflagellate *Alexandrium pacificum*. *Marine Pollution Bulletin*, *126*, 241-249.
- M'rabet, C., Yahia, O. K.-D., Couet, D., Gueroun, S. K. M., & Pringault, O. (2019). Consequences of a contaminant mixture of bisphenol A (BPA) and di-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP), two plastic-derived chemicals, on the diversity of coastal phytoplankton. *Marine Pollution Bulletin*, *138*, 385-396.
- Ocharoen, Y., Boonphakdee, C., Boonphakdee, T., Shinn, A. P., & Moonmangmee, S. (2018). High levels of the endocrine disruptors bisphenol-A and 17 β -estradiol detected in populations of green mussel, *Perna viridis*, cultured in the Gulf of Thailand. *Aquaculture*, *497*, 348-356.
- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.07.057>
- Peterson, B., Howarth, R., & Garritt, H. (1985). Multiple Stable Isotopes Used to Trace the Flow of Organic Matter in Estuarine Food Webs. *Science (New York, N.Y.)*, *227*, 1361-1363. <https://doi.org/10.1126/science.227.4692.1361>
- Peterson, B. J., Howarth, R. W., & Garritt, R. H. (1985). Multiple stable isotopes used to trace the flow of organic matter in estuarine food webs. *Science*, *227*(4692), 1361-1363.
- Rezg, R., El-Fazaa, S., Gharbi, N., & Mornagui, B. (2014). Bisphenol A and human chronic diseases: current evidences, possible mechanisms, and future perspectives. *Environment international*, *64*, 83-90.
- Rubin, B. S., & Soto, A. M. (2009). Bisphenol A: perinatal exposure and body weight. *Molecular and cellular endocrinology*, *304*(1-2), 55-62.
- Safakhah, N., Ghanemi, K., Nikpour, Y., & Batvandi, Z. (2020). Occurrence, distribution, and risk assessment of bisphenol A in the surface sediments of Musa estuary and its tributaries in the northern end of the Persian Gulf, Iran. *Marine Pollution Bulletin*, *156*, 111241.
- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111241>
- Sampaio, L., Rodrigues, A. M., & Quintino, V. (2010). Carbon and nitrogen stable isotopes

in coastal benthic populations under multiple organic enrichment sources. *Marine Pollution Bulletin*, 60(10), 1790-1802.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.06.003>

Staniszewska, M., Falkowska, L., Grabowski, P., Kwaśniak, J., Mudrak-Cegiołka, S., Reindl, A. R., Sokołowski, A., Szumiło, E., & Zgrundo, A. (2014a). Bisphenol A, 4-tert-octylphenol, and 4-nonylphenol in the Gulf of Gdańsk (Southern Baltic). *Archives of environmental contamination and toxicology*, 67(3), 335-347.

Staniszewska, M., Falkowska, L., Grabowski, P., Kwaśniak, J., Mudrak-Cegiołka, S., Reindl, A. R., Sokołowski, A., Szumiło, E., & Zgrundo, A. (2014b). Bisphenol A, 4-tert-octylphenol, and 4-nonylphenol in the Gulf of Gdańsk (Southern Baltic). *Archives of environmental contamination and toxicology*, 67, 335-347.

Staples, C., van der Hoeven, N., Clark, K., Mihaich, E., Woelz, J., & Hentges, S. (2018). Distributions of concentrations of bisphenol A in North American and European surface waters and sediments determined from 19 years of monitoring data. *Chemosphere*, 201, 448-458.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.175>

Staples, C. A., Dome, P. B., Klecka, G. M., Oblock, S. T., & Harris, L. R. (1998). A review of the environmental fate, effects, and exposures of bisphenol A. *Chemosphere*, 36(10), 2149-2173.

Stuart, J. D., Capulong, C. P., Launer, K. D., & Pan, X. (2005). Analyses of phenolic endocrine disrupting chemicals in marine samples by both gas and liquid chromatography–mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1079(1), 136-145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chroma.2005.03.075>

Takahashi, S., Chi, X.-J., Yamaguchi, Y., Suzuki, H., Sugaya, S., Kita, K., Hiroshima, K., Yamamori, H., Ichinose, M., & Suzuki, N. (2001). Mutagenicity of bisphenol A and its suppression by interferon- α in human R5a cells. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 490(2), 199-207.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1383-5718\(00\)00161-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1383-5718(00)00161-3)

Tu, N. P. C., Agusa, T., Ha, N. N., Tuyen, B. C., Tanabe, S., & Takeuchi, I. (2011). Stable isotope-guided analysis of biomagnification profiles of arsenic species in a tropical mangrove ecosystem. *Marine Pollution Bulletin*, 63(5), 124-134.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.03.002>

- Usui, T., Nagao, S., Yamamoto, M., Suzuki, K., Kudo, I., Montani, S., Noda, A., & Minagawa, M. (2006). Distribution and sources of organic matter in surficial sediments on the shelf and slope off Tokachi, western North Pacific, inferred from C and N stable isotopes and C/N ratios. *Marine Chemistry*, *98*(2-4), 241-259.
- Vega-Morales, T., Sosa-Ferrera, Z., & Santana-Rodríguez, J. (2010). Determination of alkylphenol polyethoxylates, bisphenol-A, 17 α -ethynylestradiol and 17 β -estradiol and its metabolites in sewage samples by SPE and LC/MS/MS. *Journal of Hazardous Materials*, *183*(1-3), 701-711.
- Wang, S., Wang, L., Hua, W., Zhou, M., Wang, Q., Zhou, Q., & Huang, X. (2015). Effects of bisphenol A, an environmental endocrine disruptor, on the endogenous hormones of plants. *Environmental Science and Pollution Research*, *22*, 17653-17662.
- Wang, Z., Li, Y., Kong, F., Li, M., Xi, M., & Yu, Z. (2021). How do trophic magnification factors (TMFs) and biomagnification factors (BMFs) perform on toxic pollutant bioaccumulation estimation in coastal and marine food webs. *Regional Studies in Marine Science*, *44*, 101797.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101797>
- Won, E.-J., Choi, B., Hong, S., Khim, J. S., & Shin, K.-H. (2018). Importance of accurate trophic level determination by nitrogen isotope of amino acids for trophic magnification studies: A review. *Environmental Pollution*, *238*, 677-690.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.045>
- Xie, B., Huang, J., Huang, C., Wang, Y., Shi, S., & Huang, L. (2020). Stable isotopic signatures ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) of suspended particulate organic matter as indicators for fish cage culture pollution in Sansha Bay, China. *Aquaculture*, *522*, 735081. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735081>
- Yamamoto, T., Yasuhara, A., Shiraishi, H., & Nakasugi, O. (2001). Bisphenol A in hazardous waste landfill leachates. *Chemosphere*, *42*(4), 415-418.
- Zhang, C., Zeng, G., Yuan, L., Yu, J., Li, J., Huang, G., Xi, B., & Liu, H. (2007). Aerobic degradation of bisphenol A by *Achromobacter xylosoxidans* strain B-16 isolated from compost leachate of municipal solid waste. *Chemosphere*, *68*(1), 181-190.

Zhao, J.-L., Ying, G.-G., Wang, L., Yang, J.-F., Yang, X.-B., Yang, L.-H., & Li, X. (2009).

Determination of phenolic endocrine disrupting chemicals and acidic pharmaceuticals in surface water of the Pearl Rivers in South China by gas chromatography–negative chemical ionization–mass spectrometry. *Science of the total environment*, 407(2), 962-974.

Zoeller, R. T., Brown, T. R., Doan, L. L., Gore, A. C., Skakkebaek, N. E., Soto, A. M., Woodruff, T., & Vom Saal, F. (2012). Endocrine-disrupting chemicals and public health protection: a statement of principles from The Endocrine Society. *Endocrinology*, 153(9), 4097-4110.

ชนชนก อรุณเลิศ, สุภกิจ จิวเจริญ และมารุต สุขสมจิตร์.(2557).การสืบหาแหล่งที่มาของสารอินทรีย์ละลายน้ำบริเวณอ่าวประจวบและบริเวณใกล้เคียง นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง โดยเทคนิค 3D EEM Fluorescence Spectroscopy.ในการประชุมวิทยาศาสตร์ทางทะเล ครั้งที่ 4 (หน้า 589-598). กรุงเทพฯ : สำนักกองทุนสนับสนุนงานวิจัย.

ยุภาพร อำนาจ. (2018). การปนเปื้อนของบิสฟีนอลเอในน้ำชะขยะเทศบาล. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 23, 2018, 12.

ศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ที่ 3 นครสวรรค์. (2563). Bisphenol A (BPA). เข้าถึงได้จาก <http://nakhonsawan.dmsc.moph.go.th/2017/announce2.php?view=bisphenola>

สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. (2563). การวิเคราะห์ไอโซโทป (Isotope analysis). เข้าถึงได้จาก <http://www.nst.or.th/article/article55/article55-002.html>

สิน สินสกุล, & บรรเจิด อร่ามประยูร. (2541). การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทะเล บริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จ.ระยอง. กรุงเทพฯ : กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี.

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	พรวิภา กันเกิด
วัน เดือน ปี เกิด	4 กรกฎาคม 2538
สถานที่เกิด	จังหวัดชัยนาท
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	71/1 ม.3 ต.คู้้งตำเภา อ.มโนรมย์ จ.ชัยนาท 17110
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2561 วิทยาศาสตรบัณฑิต (วาริชศาสตร์) มหาวิทยาลัยบูรพา พ.ศ. 2566 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยบูรพา

