



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การศึกษาการจำแนกชนิดของสารประกอบสารหนูในสิ่งแวดล้อม
(The Study of Arsenic Speciation in Environment)

หัวหน้าโครงการผู้รับทุน

ดร. อภิญญา นวคุณ

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

รหัสโครงการ 2559A10802024

สัญญาเลขที่ 53/2559

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การศึกษาการจำแนกชนิดของสารประกอบสารหนูในสิ่งแวดล้อม

(The Study of Arsenic Speciation in Environment)

หัวหน้าโครงการผู้รับทุน

ดร. อภิญญา นวคุณ

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ. ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่ 53/2559

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาสำหรับสถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านพิษวิทยาและอนามัยสิ่งแวดล้อม สำหรับเครื่อง purge and trap ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ด้วย

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้ประเมินการปนเปื้อนของสารประกอบสารหนู 4 ชนิด ทำการวิเคราะห์ปริมาณด้วยเทคนิคเพริจแอนด์แทรป-แก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมทรี และใช้เทคนิคการสกัดด้วยอัลตราโซนิคในการเตรียมตัวอย่างของแข็ง ได้วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบสารหนูในตัวอย่างน้ำทะเล ดินตะกอน หอยแมลงภู่และแพลงค์ตอนที่เก็บจากพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี โดยเก็บตัวอย่างทุก 1 เดือนเป็นระยะเวลา 2 ปี ระหว่างเดือนสิงหาคม 2559 ถึงเดือนกรกฎาคม 2560 ผลการศึกษาพบเฉพาะสารหนูอนินทรีย์ในตัวอย่างน้ำทะเลและตะกอนดิน ซึ่งมีค่า 0.82 ± 0.63 และ 1.35 ± 0.40 ไมโครกรัมต่อลิตร และ 25.32 ± 6.50 และ 7.18 ± 4.45 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับ As(III) และ As(V) ในตัวอย่างน้ำทะเลและตะกอนดินตามลำดับ และพบ As(III) As(V) MMA และ DMA ในตัวอย่างหอยแมลงภู่ ซึ่งมีค่า 2.28 ± 1.61 1.58 ± 1.41 1.59 ± 1.01 และ 5.34 ± 7.74 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ อย่างไรก็ตามไม่พบสารประกอบสารหนูทุกชนิดในตัวอย่างแพลงค์ตอน โดยปริมาณสารประกอบสารหนูทุกชนิดที่พบมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่เกี่ยวข้องซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าการปนเปื้อนของสารประกอบสารหนูที่ศึกษานี้ไม่มีผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของสารประกอบสารหนูในสิ่งแวดล้อมด้วย

Abstract

In this research project, the contamination of four arsenic compounds was evaluated by using purge and trap gas chromatography mass spectrometry couple with ultrasonic extraction. The arsenic compounds in sea water, sediment, green mussel (*P. viridis*) and plankton samples were determined. The samples were collected from Mueang District, Chonburi Province every month for 2 years from August 2015 to July 2017. The results revealed that only inorganic arsenic species were found in sea water and sediment samples. The amount of 0.82 ± 0.63 and 1.35 ± 0.40 $\mu\text{g/L}$ and 25.32 ± 6.50 and 7.18 ± 4.45 $\mu\text{g/kg}$ were found for As(III) and As(V) from sea water and sediment samples respectively. The arsenic species of As(III) As(V) MMA and DMA as 2.28 ± 1.61 1.58 ± 1.41 1.59 ± 1.01 and 5.34 ± 7.74 $\mu\text{g/kg}$ respectively were found in green mussel samples. However, no arsenic compounds were detected from plankton sample in this study. In addition, the amounts of arsenic compound found in this study were below the reference value from the relevant standards. It was indicated that the contamination of arsenic was no impact on human health and environment. Finally, the correlation between arsenic species in environmental media was proposed in this research.

สารบัญเรื่อง

	หน้า
ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
วัตถุประสงค์การวิจัย	2
ขอบเขตการวิจัย	3
ทฤษฎี สมมุติฐานและกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
วิธีดำเนินการวิจัย	5
ผลและอภิปรายผลการวิจัย	
1. การเก็บตัวอย่าง	7
2. การเตรียมตัวอย่าง	8
3. ผลการวิเคราะห์ตัวอย่าง	
3.1 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทะเล	10
3.2 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างตะกอนดิน	15
3.3 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างหอยแมลงภู	20
4. การศึกษาความสัมพันธ์ของสารประกอบสารหนูในวัฏจักรน้ำทะเล	
4.1 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารประกอบสารหนูในน้ำทะเล	25
4.2 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารประกอบสารหนูตะกอนดิน	25
4.3 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารประกอบสารหนูในหอยแมลงภู	27
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารประกอบสารหนูในน้ำทะเลและตะกอนดิน	31
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารประกอบสารหนูในน้ำทะเลและหอยแมลงภู	34
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารประกอบสารหนูในหอยแมลงภูและตะกอนดิน	39
5. การประเมินความเสี่ยงของการได้รับสารประกอบสารหนู	44

หน้า

สรุปผลการวิจัย	48
ข้อเสนอแนะและการนำไปใช้ประโยชน์ของงานวิจัย	51
รายงานสรุปการเงิน	52
บรรณานุกรม	53
ประวัติผู้วิจัย	58

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สภาพที่เหมาะสมในการวิเคราะห์สารประกอบสารหนูด้วยเทคนิค purge and trap – GCMS	6
ตารางที่ 2 สภาพที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบสารหนูด้วยวิธีการสกัด ultrasonic extraction	7
ตารางที่ 3 ค่าทางเคมีวิเคราะห์ในการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น	7
ตารางที่ 4 สถานที่และพิกัดที่เก็บตัวอย่าง	8
ตารางที่ 5 ปริมาณสารประกอบสารหนูในน้ำทะเลจากสถานีหาดวอนนภา (n=3)	12
ตารางที่ 6 ปริมาณสารประกอบสารหนูในน้ำทะเลจากสถานีแหลมแท่น (n=3)	13
ตารางที่ 7 ปริมาณสารประกอบสารหนูในน้ำทะเลจากสถานีอ่างศิลา (n=3)	14
ตารางที่ 8 ปริมาณสารประกอบสารหนูในตะกอนดินจากสถานีหาดวอนนภา (n=3)	17
ตารางที่ 9 ปริมาณสารประกอบสารหนูในตะกอนดินจากสถานีแหลมแท่น (n=3)	18
ตารางที่ 10 ปริมาณสารประกอบสารหนูในตะกอนดินจากสถานีอ่างศิลา (n=3)	19
ตารางที่ 11 ปริมาณสารประกอบสารหนูในหอยแมลงภู่จากสถานีหาดวอนนภา (n=3)	22
ตารางที่ 12 ปริมาณสารประกอบสารหนูในหอยแมลงภู่จากสถานีแหลมแท่น (n=3)	23
ตารางที่ 13 ปริมาณสารประกอบสารหนูในหอยแมลงภู่จากสถานีอ่างศิลา (n=3)	24
ตารางที่ 14 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารประกอบสารหนูในตัวอย่างตะกอนดิน	27
ตารางที่ 15 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารประกอบสารหนูในตัวอย่างหอยแมลงภู่	31
ตารางที่ 16 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารประกอบสารหนูในตัวอย่างน้ำทะเลและตะกอนดิน	34
ตารางที่ 17 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารประกอบสารหนูในตัวอย่างน้ำทะเลและหอยแมลงภู่	39
ตารางที่ 18 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารประกอบสารหนูในตัวอย่างหอยแมลงภู่และตะกอนดิน	44
ตารางที่ 19 การประเมินความเสี่ยงของสารประกอบสารหนูในตัวอย่างตะกอนดิน	46
ตารางที่ 20 Estimated daily intake และ potential health risk จากการบริโภคหอยแมลงภู่ในการศึกษานี้ (n=63)	47

ตารางที่ 21 สภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์สารประกอบสารหนู 4 ชนิดในสิ่งแวดล้อม	49
ตารางที่ 22 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์	50
ตารางที่ 23 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบสารหนู 4 ชนิดในตัวอย่างน้ำทะเล ตะกอนดิน หอยแมลงภู่และแพลงก์ตอน	50

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 สถานีเก็บตัวอย่าง	8
รูปที่ 2 ปริมาณสารหนูอนินทรีย์ 2 ชนิด ที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำทะเล	11
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของน้ำทะเลกับความเข้มข้นของ As(III) และ As(V) ที่ตรวจพบ	11
รูปที่ 4 ปริมาณสารหนูอนินทรีย์ 2 ชนิด ที่ตรวจพบในตัวอย่างตะกอนดิน	16
รูปที่ 5 ปริมาณ As (III) และ As(V) ที่พบในตัวอย่างหอยแมลงภู่	21
รูปที่ 6 ปริมาณ MMA และ DMA ที่พบในตัวอย่างหอยแมลงภู่	21
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของปริมาณของ As (III) และ As (V) ที่พบในตัวอย่างน้ำทะเล	25
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของปริมาณของ As (III) และ As (V) ที่พบในตัวอย่างตะกอนดิน	26
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของปริมาณของ As (III) และ total inorganic As ในตัวอย่างตะกอนดิน	26
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของปริมาณของ As(V) และ total inorganic As ในตัวอย่างตะกอนดิน	27
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของปริมาณของ As (III) และ As (V) ที่พบในตัวอย่างหอยแมลงภู่	28
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของปริมาณของ As (III) และ MMA ที่พบในตัวอย่างหอยแมลงภู่	28
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ของปริมาณของ As (III) และ DMA ที่พบในตัวอย่างหอยแมลงภู่	29
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ของปริมาณของ As(V) และ MMA ที่พบในตัวอย่างหอยแมลงภู่	29
รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ของปริมาณของ As(V) และ DMA ที่พบในตัวอย่างหอยแมลงภู่	30
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ของปริมาณของ MMA และ DMA ที่พบในตัวอย่างหอยแมลงภู่	30
รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(III) ในน้ำทะเลและตะกอนดิน	32
รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(III) ในน้ำทะเลและ As(V) ในตะกอนดิน	32
รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(V) ในน้ำทะเลและ As(III) ในตะกอนดิน	33
รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(V) ในน้ำทะเลและ As(V) ในตะกอนดิน	33

รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(III) ในน้ำทะเลและหอยแมลงภู่	35
รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(III) ในน้ำทะเลและ As(V) ในหอยแมลงภู่	35
รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(III) ในน้ำทะเลและ MMA ในหอยแมลงภู่	36
รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(III) ในน้ำทะเลและ DMA ในหอยแมลงภู่	36
รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(V) ในน้ำทะเลและ As(III) ในหอยแมลงภู่	37
รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(V) ในน้ำทะเลและ As(V) ในหอยแมลงภู่	37
รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(V) ในน้ำทะเลและ MMA ในหอยแมลงภู่	38
รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(V) ในน้ำทะเลและ DMA ในหอยแมลงภู่	38
รูปที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(III) ในหอยแมลงภู่และตะกอนดิน	40
รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(III) ในหอยแมลงภู่และ As(V) ในตะกอนดิน	40
รูปที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(V) ในหอยแมลงภู่และ As(III) ในตะกอนดิน	41
รูปที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(V) ในหอยแมลงภู่และ As(V) ในตะกอนดิน	41
รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่าง MMA ในหอยแมลงภู่และ As(III) ในตะกอนดิน	42
รูปที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่าง MMA ในหอยแมลงภู่และ As(V) ในตะกอนดิน	42
รูปที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่าง DMA ในหอยแมลงภู่และ As(III) ในตะกอนดิน	43
รูปที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่าง DMA ในหอยแมลงภู่และ As(V) ในตะกอนดิน	43

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย (list of Abbreviations)

GC-MS	Gas chromatography mass spectrometry
PT	Purge and Trap
As (III)	Inorganic arsenic (III)
As(V)	Inorganic arsenic (V)
MMA	Monomethylarsonic acid
DMA	Dimethylarsinic acid
NaBH ₄	Sodium Borohydride
M	mole/L
mL	milliliter
µg/L	microgram/Liter
µg/kg	microgram/kilogram

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

(Executive Summary)

ข้าพเจ้า ดร. อภิญา นวคุณ ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัยจากมหาวิทยาลัยบูรพา ประเภทงบประมาณรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) มหาวิทยาลัยบูรพา โครงการวิจัยเรื่อง การศึกษาการจำแนกชนิดของสารประกอบสารหนูในสิ่งแวดล้อม (The Study of Arsenic Speciation in Environment) รหัสโครงการ 2559A10802024 สัญญาเลขที่ 53/2559 ได้รับงบประมาณรวมทั้งสิ้น 550,000 บาท (ห้าแสนห้าหมื่นบาทถ้วน) ระยะเวลาการดำเนินงาน 1 ปี (ระหว่างวันที่ 1 ตุลาคม 2558 ถึง 30 กันยายน 2559)

Output/Outcome

เนื่องจากโครงการวิจัยนี้เป็นโครงการต่อเนื่องปีที่ 3 ของโครงการวิจัย 3 ปี โดยมีผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์แล้วสำหรับปีวิจัยที่ 1 เรื่อง สภาวะที่เหมาะสมในการหาปริมาณไดเมทิลอาร์ซีนีตและโมโนเมทิลอาร์ซีนีต โดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี และได้เผยแพร่ วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ฉบับพิเศษ การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์วิจัยครั้งที่ 6 , 2557. 289-297.

สำหรับงานวิจัยในปีงบประมาณ 2559 (ปีวิจัยที่ 2) เป็นการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง เพื่อนำไปสรุปผลการศึกษาทั้งหมด โดยสามารถนำไปเขียนเป็นบทความวิจัยระดับนานาชาติได้ ซึ่งตอนนี้อยู่ระหว่างดำเนินการเขียนบทความวิจัย

ความสำคัญและที่มาของปัญหา

สารประกอบสารหนู (Arsenic compounds) เป็นสารพิษที่พบในสิ่งแวดล้อมซึ่งมาจากธรรมชาติและจากมนุษย์ ความเป็นพิษของสารหนูมีผลกระทบต่อประชากรทั่วไป เนื่องจากสามารถแพร่กระจายได้กว้าง สารหนูทำให้เกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด ระบบประสาทบกพร่อง โรคเบาหวาน รวมถึงโรคมะเร็งในหลายส่วนของร่างกาย มนุษย์ได้รับสารประกอบสารหนูที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมจากอาหาร น้ำดื่มและการหายใจ หรือจากการสัมผัสดินหรือน้ำ โดยสาเหตุหลักมาจากการรับประทานอาหารที่มีการปนเปื้อนสารประกอบสารหนู ความเป็นพิษและการได้รับสารหนูของมนุษย์ทำให้สารหนูจัดเป็นสารพิษอันดับหนึ่ง จาก Agency for toxic substances and disease registry, Centers for Disease control and prevention, สหรัฐอเมริกา สารประกอบสารหนูได้นำมาใช้งานได้หลากหลายทั้งทางอุตสาหกรรม เช่นอุตสาหกรรมผลิตแก้วและเคมีคอนกรีตและการผลิตหลอดไฟแอลอีดี อุตสาหกรรมผลิตอัลลอยด์สำหรับแบตเตอรี่รถยนต์ นิยมใช้สารประกอบสารหนูเป็นสารป้องกันรักษาเนื้อไม้เช่นเสาเข็มหรือในอุตสาหกรรมทำเรือ ทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารหนูส่งทะเลได้ ด้านการเกษตรใช้เป็นสารปราบศัตรูพืช สารปราบวัชพืช สารเร่งโตในสุกร สารเติมแต่งในอาหารสัตว์ปีก โดยในอดีตได้มีการใช้สารหนูอนินทรีย์เป็นยากำจัดศัตรูพืช แต่ปัจจุบันนิยมใช้สารหนูอินทรีย์ได้แก่ methylarsenate แทน นอกจากนี้ในอดีตยังมีการใช้สารประกอบสารหนูจำพวก organo-arsenicals เป็นอาวุธเคมี ในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 1 และสงครามโลกครั้งที่ 2 อย่างไรก็ตามการปนเปื้อนของสารประกอบที่เป็นพิษดังกล่าวยังคงตกค้างและสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมจนถึงปัจจุบัน

สารประกอบสารหนูจะสะสมในดิน สามารถปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ทางอากาศ น้ำ หรือฝุ่นละออง สารหนูที่อยู่ในแร่ธรรมชาติจะปนอยู่กับแร่ทองแดงและแร่ตะกั่วสามารถปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมจากการทำเหมืองแร่และถลุงแร่ สารหนูจะออกจากแหล่งอุตสาหกรรมจากฝุ่นละอองขนาดเล็กและตกตะกอนเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ปนเปื้อนในดินซึ่งสามารถถูกชะล้างได้ด้วยน้ำฝน สารประกอบสารหนูในอนุภาคขนาดเล็กสามารถอยู่ในอากาศได้นานและแพร่กระจายได้กว้าง สารประกอบสารหนูไม่ถูกทำลายในสิ่งแวดล้อม สารประกอบสารหนูสามารถเปลี่ยนรูปได้ในธรรมชาติโดยการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือโมเลกุลชนิดอื่นๆในอากาศ น้ำ หรือดิน หรือจากแบคทีเรียในดินหรือตะกอนดิน สารประกอบสารหนูหลายชนิดสามารถละลายได้ดีในน้ำ มีการพบการปนเปื้อนของสารประกอบสารหนูในแหล่งน้ำต่างๆ เช่น ทะเลสาบ แม่น้ำ หรือน้ำบาดาล นอกจากนี้พบว่าการปนเปื้อนของสารประกอบสารหนูชั้นสุดท้ายจะสะสมอยู่ในตะกอนดินใต้ทะเลสาบ แม่น้ำหรือทะเล ซึ่งมีสาหร่าย ปลาหรือหอยบางชนิดได้รับและสะสมสารประกอบสารหนูระหว่างการเจริญเติบโต นอกจากนี้ยังพบว่าสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติ เช่นสาหร่าย แบคทีเรีย หรือพืชบางชนิดในวัฏจักรสิ่งแวดล้อมสามารถสะสมและเปลี่ยนรูปสารประกอบสารหนูได้

สารประกอบสารหนูในสิ่งแวดล้อมมีหลายชนิด สารประกอบสารหนูในธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นสารหนูอนินทรีย์ (inorganic arsenic; As(III), As(V)) ซึ่งพบว่ามีความเป็นพิษมากกว่าสารหนูอินทรีย์ (organic arsenic, methylated arsenic compounds, arsenobetaine) อย่างไรก็ตามพบว่าสารหนูอินทรีย์ประเภท methylated arsenic compounds โดยเฉพาะอย่างยิ่ง tetramethylarsonium ion ได้มีรายงานถึงความเป็นพิษรุนแรง โดยความเป็นพิษของ methylated arsenic compounds จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของหมู่ methyl ที่มีในสารประกอบ ดังนั้นในการศึกษาปริมาณของสารหนูที่อยู่ใน

รูปของสารหนูทั้งหมด (total arsenic concentration) ไม่สามารถให้ข้อมูลที่เพียงพอสำหรับการศึกษาความเป็นพิษของสารประกอบสารหนู เนื่องจากความเป็นพิษขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบสารหนู (chemical species) ข้อมูลที่ถูกต้องเกี่ยวกับชนิดของสารประกอบสารหนูจึงมีความสำคัญในการศึกษาความเป็นพิษ การเคลื่อนย้ายในสิ่งแวดล้อมการสะสมในสิ่งมีชีวิตขึ้นกับชนิดของสารประกอบสารหนูรวมถึงการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารหนูในวัฏจักรสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นในการที่จะได้รับข้อมูลอย่างครบถ้วนและถูกต้องของความเป็นพิษและการเปลี่ยนรูปของสารประกอบสารหนูในสิ่งแวดล้อม การวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบสารหนูจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ในงานวิจัยนี้จึงพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ที่มีสภาพไวสูงและเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบสารหนูในตัวอย่างสิ่งแวดล้อม โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography) และเชื่อมต่อกับเครื่องตรวจวัด mass spectrometer detector ซึ่งเป็นเครื่องตรวจวัดที่มีสภาพไวและสามารถพิสูจน์ยืนยันชนิดของสารได้ นอกจากนี้ยังใช้เทคนิค purge and trap สำหรับการเตรียมและเพิ่มความเข้มข้นเพื่อพัฒนาให้มีขีดจำกัดการตรวจวัดในระดับต่ำ ($\mu\text{g/L}$) ของสารประกอบสารหนูแต่ละชนิดในสิ่งแวดล้อมได้ เพื่อที่นำวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้ ไปใช้ในการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบสารหนูในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมเพื่อเป็นข้อมูลที่ถูกต้อง ครบถ้วน สามารถนำไปใช้ในการบ่งบอกถึงชนิดและความเป็นพิษที่แท้จริงของสารประกอบสารหนูในสิ่งแวดล้อมได้ นอกจากนี้สามารถบอกถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปของสารประกอบสารหนู ตลอดจนทำนายวัฏจักรของสารประกอบสารหนูในสิ่งแวดล้อมได้

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ชนิดสารประกอบสารหนู ด้วยเทคนิค gas chromatography - mass spectrometry
2. เพื่อพัฒนาวิธีการเตรียมตัวอย่างและเพิ่มความเข้มข้นสารประกอบสารหนูด้วยเทคนิค purge and trap
3. เพื่อศึกษาวิธีการเก็บและการรักษาตัวอย่างสารประกอบสารหนูในตัวอย่างสิ่งแวดล้อม
4. เพื่อหาปริมาณสารประกอบสารหนูในตัวอย่างสิ่งแวดล้อม
5. เพื่อศึกษาผลกระทบความเป็นพิษของสารประกอบสารหนูที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อประชาชนและสิ่งมีชีวิตอื่นๆ
6. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปของสารประกอบสารหนูในสิ่งแวดล้อม
7. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนรูปของสารประกอบสารหนูในวัฏจักรสิ่งแวดล้อม (น้ำทะเล)

ขอบเขตการวิจัย

1. พัฒนาวิธีการวิเคราะห์สารประกอบสารหนู 4 ชนิด ได้แก่ As(III), As(V), monomethylarsonic acid (MMA) และ dimethylarsinic acid (DMA) ด้วยเทคนิค gas chromatography-mass spectrometry โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแยกสารประกอบสารหนู
2. พัฒนาวิธีการเตรียมตัวอย่างและเพิ่มความเข้มข้นสารประกอบสารหนู โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพสกัดสารประกอบสารหนูด้วยเทคนิค purge and trap
3. พัฒนาวิธีการเก็บและการรักษาสารประกอบสารหนูในตัวอย่าง ตลอดจนศึกษาปัจจัยที่มีต่อความเสถียรของสารประกอบสารหนูในตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์
4. หาปริมาณสารประกอบสารหนู 4 ชนิดในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมเช่น น้ำทะเล ตะกอนดิน หอยแมลงภู่และสาหร่าย
5. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปของสารประกอบสารหนู เช่น ความเป็นกรดเบส ไอออนบางชนิด อุณหภูมิ การสะสมและกระบวนการเมตาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิต
6. ศึกษาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนรูปของสารประกอบสารหนูในวัฏจักรน้ำทะเล โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากสารหนูอนินทรีย์ (inorganic arsenic) เป็นสารหนูอินทรีย์ชนิด methylated species

ทฤษฎี สมมุติฐานและกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

มนุษย์ได้รับสารประกอบสารหนูจากอาหาร น้ำดื่มและการหายใจ หรือจากการสัมผัสดินหรือน้ำที่มีการปนเปื้อน อย่างไรก็ตามวิธีการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบสารหนูยังจำกัด ปัจจุบันข้อมูลส่วนใหญ่ของสารหนูในสิ่งแวดล้อมยังเป็นข้อมูลของสารหนูรวม (total arsenic) ไม่ใช่ข้อมูลของสารประกอบสารหนูแต่ละชนิด (arsenic speciation) ทำให้ไม่ทราบข้อมูลที่แท้จริงของชนิดของสารประกอบสารหนูที่มนุษย์ได้รับเข้าสู่ร่างกาย โดยชนิดของสารประกอบสารหนูจะเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงการยึดเหนี่ยวอยู่ในอนุภาคหรือแร่ธาตุที่สามารถดูดซับและสะสมได้ในพืชหรือสัตว์ ดังนั้นในการศึกษาปริมาณของสารหนูที่อยู่ในรูปของสารหนูทั้งหมดไม่สามารถให้ข้อมูลที่เพียงพอสำหรับการศึกษาความเป็นพิษของสารประกอบสารหนู เนื่องจากความเป็นพิษขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบสารหนู ข้อมูลที่ถูกต้องเกี่ยวกับชนิดของสารประกอบสารหนูจึงมีความสำคัญในการศึกษาความเป็นพิษ การเคลื่อนย้ายในสิ่งแวดล้อมและการสะสมในสิ่งมีชีวิตขึ้นกับชนิดของสารประกอบสารหนู รวมถึงการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารหนูในวัฏจักรสิ่งแวดล้อม

ความตระหนักถึงการปนเปื้อนของสารประกอบสารหนูที่เพิ่มขึ้นในสิ่งแวดล้อม การได้รับและสะสมของสารประกอบสารหนูและความเป็นพิษของสารประกอบสารหนู ทำให้จำเป็นต้องพัฒนามีวิธีการวิเคราะห์ที่มีสภาพไวสูงและเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบสารหนูซึ่งมีอยู่ในระดับต่ำ ($\mu\text{g/L}$) ในตัวอย่างสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ระหว่างกระบวนการเก็บตัวอย่าง (sampling) การเก็บรักษาตัวอย่าง (storage) การเตรียมตัวอย่าง (sample preparation and treatment) การสกัดตัวอย่าง (extraction) ตลอดจนการวิเคราะห์ (analysis) สารประกอบสารหนูสามารถเปลี่ยนรูปหรือ

เปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันได้ เช่นจากกระบวนการเมตาบอลิซึมในสิ่งมีชีวิต หรือการสูญหายจากการถูกดูดซับหรือการระเหยกลายเป็นไอของสารประกอบสารหนู ซึ่งเป็นสาเหตุให้ข้อมูลที่得不ถูกต้อง

งานวิจัยเกี่ยวกับสารประกอบสารหนุนิยมใช้เทคนิค hydride ควบคู่กับเทคนิคทาง atomic spectroscopy เช่น AAS AFS หรือ ICP-AES ซึ่งเทคนิคดังกล่าวเป็นเทคนิคที่ง่าย รวดเร็วและมีสภาพไวสูง อย่างไรก็ตามเทคนิคดังกล่าวให้ข้อมูลที่เป็นความเข้มข้นของสารหนุ As(III) หรือ As(V) และ total arsenic เท่านั้น ไม่สามารถให้ข้อมูลที่ครบถ้วนได้ ซึ่งงานวิจัยเกี่ยวกับการจำแนกชนิดของสารประกอบสารหนุนิยมใช้เทคนิคโครมาโทกราฟี (gas chromatography (GC) หรือ high performance liquid chromatography (HPLC)) โดยเทคนิค HPLC ที่มีเครื่องตรวจวัด mass spectrometer (LC-MS) หรือเครื่องตรวจวัด ICP-MS (LC-ICP-MS) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการจำแนกชนิดของสารประกอบสารหนุในสิ่งแวดล้อมเนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีสภาพไวสูง แต่เทคนิคดังกล่าวต้องอาศัยเครื่องมือที่มีราคาแพงมาก อีกทั้งค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์สูง ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เทคนิค Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) ซึ่งใช้เครื่องมือที่มีสภาพไว มีราคาถูก ใช้เวลาในการวิเคราะห์รวดเร็ว โดยพัฒนาการวิเคราะห์ด้วยการเปลี่ยนอนุพันธ์ของสารประกอบสารหนุเป็นสารประกอบที่ระเหยเป็นไอได้ง่าย และใช้เทคนิค purge and trap สำหรับการสกัดและการเพิ่มความเข้มข้นในการวิเคราะห์สารประกอบสารหนุที่มีความเข้มข้นในระดับต่ำ ($\mu\text{g/L}$) ในสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ในงานวิจัยจะพัฒนาวิธีการเก็บตัวอย่าง การเตรียมตัวอย่างและขั้นตอนการสกัดตัวอย่างและวิธีการวิเคราะห์ที่ให้เกิดการสูญเสียของสารประกอบสารหนุน้อยที่สุด เพื่อข้อมูลที่มีความเที่ยงและความแม่นยำสูง สามารถนำไปวิเคราะห์สารประกอบสารหนุในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมได้จริง โดยข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมสามารถบอกถึงความเป็นพิษของสารประกอบสารหนุ บอกระดับการปนเปื้อนในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมชนิดต่างๆ สามารถบอกถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปของสารประกอบสารหนุ ตลอดจนทำนายวัฏจักรของสารประกอบสารหนุในสิ่งแวดล้อมได้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้วิธีการวิเคราะห์และจำแนกชนิดของสารประกอบสารหนุที่เป็นวิธีมาตรฐานในการ วิเคราะห์ในตัวอย่างน้ำ ดิน และตัวอย่างของแข็งชนิดต่างๆ
2. ผลการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบสารหนุสามารถตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติทางเคมี วิเคราะห์และสิ่งแวดล้อมได้เช่น Analytica Chimica Acta หรือ Talanta หรือ Environmental Science and Technology
3. ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบสารหนุสามารถนำไปประเมินถึงระดับการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมและแหล่งอาหารได้ ทำให้สามารถเฝ้าระวังและวางแผนการป้องกันการปนเปื้อนของสารประกอบสารหนุที่มีผลต่อประชาชนได้อย่างถูกต้อง
4. ผลการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบสารหนุในสิ่งแวดล้อมสามารถทำนายการเปลี่ยนรูปของสารประกอบสารหนุ ภายใต้สภาวะต่างๆ ในสิ่งแวดล้อมได้ ทำให้ช่วยควบคุมความเป็นพิษของสารประกอบสารหนุในสิ่งแวดล้อมได้

วิธีดำเนินการวิจัย

1. พัฒนาวิธีการวิเคราะห์สารประกอบสารหนู 4 ชนิด ได้แก่ As(III), As(V), monomethylarsonic acid (MMA) และ dimethylarsinic acid (DMA) ด้วยเทคนิค gas chromatography-mass spectrometry
2. พัฒนาวิธีการเตรียมตัวอย่างและเพิ่มความเข้มข้นสารประกอบสารหนู โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพสกัดสารประกอบสารหนูด้วยเทคนิค purge and trap โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสกัดได้แก่ การเปลี่ยนอนุพันธ์ของสารประกอบสารหนู ชนิดของตัวดูดซับ (Trap) อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด เวลาที่ใช้ในการสกัด ปริมาตรและน้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้ อุณหภูมิของตัวดูดซับระหว่างการดูดซับ อุณหภูมิของการ desorb สารออกจากตัวดูดซับ การเติมเกลือบางชนิดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสกัด
3. พัฒนาวิธีการเก็บและการรักษาสารประกอบสารหนูในตัวอย่าง ตลอดจนศึกษาปัจจัยที่มีต่อความเสถียรของสารประกอบสารหนูในตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาตัวอย่าง ระยะเวลาในการเก็บรักษาตัวอย่าง สภาพความเป็นกรดเบสในการเก็บรักษาตัวอย่าง การเติมสารเคมีช่วยรักษาสภาพตัวอย่าง
4. ศึกษา method validation ของวิธีการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานได้แก่ ชีตจำกัดการตรวจวัด ชีตจำกัดการหาปริมาณ สภาพไวในการตรวจวัด ความเที่ยงและความแม่นยำของวิธีการวิเคราะห์
5. หาปริมาณสารประกอบสารหนู 4 ชนิดในตัวอย่างสิ่งแวดล้อม หาปริมาณสารประกอบสารหนูในตัวอย่าง โดยเก็บตัวอย่างจากบริเวณชายหาดบางแสน อ่างศิลาและท่าเรือแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี โดยเก็บตัวอย่างน้ำทะเล ตะกอนดิน หอยแมลงภู่ สาหร่ายในบริเวณเดียวกันหรือใกล้กัน ได้แก่ น้ำทะเล ตะกอนดิน หอยแมลงภู่ และสาหร่าย
ในการเก็บตัวอย่างจะทำการเก็บตัวอย่างทุกชนิดภายในวันเดียวกัน บันทึกข้อมูลความเป็นกรดเบส อุณหภูมิ ความเค็มของน้ำทะเล ฯลฯ ทุกครั้งที่มีการเก็บตัวอย่าง
6. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปของสารประกอบสารหนู ได้แก่ ความเป็นกรดเบส ไอออนบางชนิด อุณหภูมิ การสะสมและกระบวนการเมตาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิต
7. ศึกษาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนรูปของสารประกอบสารหนูในวัฏจักรน้ำทะเล โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากสารหนูอนินทรีย์ (inorganic arsenic) เป็นสารหนูอินทรีย์ชนิด methylated species

หมายเหตุโครงการวิจัยนี้เป็นโครงการต่อเนื่อง 3 ปี รายงานวิจัยนี้เป็นรายงานโครงการวิจัยในปีที่ 3 ของโครงการทั้งหมด

ผลและอภิปรายผลการวิจัย

โครงการวิจัยในปีการวิจัยที่ 1 -2 (ปีงบประมาณ 2557-2558) ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกสารประกอบสารหนู ด้วยเทคนิค GC-MS ผ่านการทำอนุพันธ์ไฮไดรด์ด้วย NaBH_4 และสกัดอนุพันธ์สารประกอบสารหนูออกจากสารละลายด้วยเทคนิค purge and trap โดยสภาวะของการวิเคราะห์ที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 1 และได้ศึกษาการสกัดสารประกอบสารหนูในตัวอย่างด้วยเทคนิค ultrasonic extraction สภาวะการสกัด ดังตารางที่ 2 และผลการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 1 สภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์สารประกอบสารหนูด้วยเทคนิค purge and trap – GCMS

ปัจจัย	สภาวะที่เหมาะสม
<u>GC-MS</u>	
คอลัมน์	DB5-MS (60m x0.32 mm i.d., 1 micron film thickness)
แก๊สพา	He (อัตราการไหล 1.5 mL/min)
Temperature program:	50°C (0.5 min) เพิ่มขึ้น 100°C (20 °C/min) และเพิ่มเป็น 200 °C (50 °C/min) คงที่ 3 min
Mass detector	SIM mode m/z 75, 77, and 78 สำหรับ As(III) m/z 76, 90, and 92 สำหรับ MMA m/z 75, 90, and 106 สำหรับ DMA
<u>การเตรียมอนุพันธ์ไฮไดรด์ด้วย NaBH_4</u>	
ชนิดกรด	HNO_3
pH ของสารละลาย	1.0 HNO_3 (0.1M)
ความเข้มข้น NaBH_4	0.10%
<u>การจำแนกชนิดสารประกอบสารหนูด้วยการเตรียมอนุพันธ์ไฮไดรด์</u>	
การวิเคราะห์สารหนู As(III) ชนิดเดียว	0.01 M กรดไนตริก
การวิเคราะห์สารหนูอนินทรีย์รวม	0.50 M กรดไนตริก
MMA และ DMA	
<u>Purge and trap</u>	
purge time	1.00 นาที
desorp flow rate	350 ml/min
desorp time	2.00 min
desorp temperature	230 °C
transfer line temperature	180 °C
bake time	3 นาที

ตารางที่ 2 สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบสารหนูด้วยวิธีการสกัด ultrasonic extraction

สภาวะที่ศึกษา	สภาวะที่เหมาะสม
การสกัดโดยอัลตราโซนิค	
ตัวทำละลายที่ใช้สกัด	0.01M กรดฟอสฟอริก 30 mL
เวลาที่ใช้สกัด	60 นาที
วิธีการสกัด	แบบครั้งเดียว
การเติมสาร antifoam	1% 0.4 mL

ตารางที่ 3 ค่าทางเคมีวิเคราะห์ในการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น

เทอมที่ตรวจสอบ	ค่าที่ได้		
	As(III)	MMA	DMA
ขีดจำกัดการตรวจวัด ($\mu\text{g/L}$)	0.065	0.015	0.031
ขีดจำกัดการหาปริมาณ ($\mu\text{g/L}$)	0.217	0.050	0.105
กราฟมาตรฐาน			
สมการเส้นตรง	$y = 4171x - 2226$	$y = 9641 - 434$	$y = 8929 - 1487$
R^2	0.9958	0.9946	0.9926
ความเที่ยงภายในวันเดียว (n = 9)			
พื้นที่ได้พิก (%RSD)	4.74	4.24	4.51
เวลารีเทนชัน (%RSD)	0.03	0.01	0.33
ความเที่ยงระหว่างวัน (n = 9)			
พื้นที่ได้พิก (%RSD)	2.85	4.66	3.53
เวลารีเทนชัน (%RSD)	0.59	0.04	0.87
ร้อยละการได้กลับคืน	97.61 ± 4.14	100.69 ± 5.36	99.44 ± 3.65

ในการวิจัยปีที่ 3 (ปีงบประมาณ 2559) ได้ดำเนินการหาปริมาณสารประกอบสารหนู 4 ชนิด ได้แก่ สารหนูอนินทรีย์ 2 ชนิด คือ As(III) และ As(V) และสารหนูอนินทรีย์ 2 ชนิด คือ monomethylarsonic acid (MMA) และ dimethylarsinic acid (DMA) โดยศึกษาปริมาณสารประกอบสารหนูในตัวอย่างสิ่งแวดล้อม ได้แก่ น้ำทะเล สัตว์(หอยแมลงภู) ดินตะกอน และ แพลงค์ตอน

1. การเก็บตัวอย่าง

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทะเล หอยแมลงภู ดินตะกอน และแพลงค์ตอน จากบริเวณหาดวอนนภา และแหลมแท่นและอ่างศิลา อำเภอเมืองจังหวัดชลบุรี โดยทำการเก็บตัวอย่างทุกเดือนเป็นเวลา 2 ปี ตั้งแต่เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2558 ถึงเดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2560 สถานที่เก็บตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 1 โดยมีพิกัดของจุดเก็บตัวอย่าง ดังตารางที่ 4 โดยตัวอย่างทุกชนิดแช่ในน้ำแข็งระหว่างเดินทางและนำไปแช่ไว้ในตู้เย็นอุณหภูมิต่ำ -20°C ก่อนการวิเคราะห์ต่อไป

ตารางที่ 4 สถานีและพิกัดที่เก็บตัวอย่าง

สถานี	ชื่อ	ละติจูด	ลองจิจูด
1	หาดวอนนภา	N 13° 16′	E 100° 54′
2	แหลมแท่น	N 10° 20′	E 100° 55′
3	อ่างศิลา	N 13° 18′	E 100° 53′



รูปที่ 1 สถานีเก็บตัวอย่าง

2. การเตรียมตัวอย่าง

2.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำทะเล

- กรองตัวอย่างน้ำทะเลด้วยเยื่อกรองไนลอน
- ปรับสภาวะของตัวอย่างน้ำทะเล ด้วยการเติมกรดไนตริกเข้มข้นปริมาตรตามที่กำหนด และสารละลาย antifoam 1% 0.2 mL ลงในตัวอย่างน้ำทะเลที่กรองแล้ว ปรับปริมาตรด้วยตัวอย่างน้ำทะเล จนได้ปริมาตร 50.00 mL
- ใช้หลอดฉีดยาคูดตัวอย่างน้ำทะเลที่ปรับสภาพแล้วมา 10.0 mL ฉีดเข้าเครื่อง purge and trap เติมสารละลาย NaBH_4 0.6% ใน NaOH 0.1% ปริมาตร 2 mL เข้าเครื่อง purge and trap เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนอนุพันธ์
- วิเคราะห์ปริมาณสารหนูโดยเครื่อง GC-MS โดยหาปริมาณเทียบกับกราฟมาตรฐาน

* สำหรับการวิเคราะห์ As (III) และ total inorganic As ใช้ปริมาตรกรดไนตริกเข้มข้น 31 μL และ 310 μL ตามลำดับ

2.2 การเตรียมตัวอย่างของแข็ง (หอยแมลงภู่และตะกอนดิน)

- นำตัวอย่างมาบดให้ละเอียดและผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
- ชั่งตัวอย่างให้รู้น้ำหนักที่แน่นอนใส่ขวดสีชา โดยตัวอย่างหอยแมลงภู่ประมาณ 10 กรัม และตะกอนดินประมาณ 5 กรัม ตามลำดับ
- เติมกรดฟอสฟอริก 0.01 M 15 mL แช่ในตู้เย็น 24 ชั่วโมง เพื่อให้สารละลายซึมเข้าไปในตัวอย่าง
- นำไปสกัดในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 60 นาที
- เมื่อสกัดเสร็จแล้วนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4000 rpm เป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตะกอนของแข็งที่เหลือออก
- ดูดสารละลายส่วนใสมา 10 mL เติมกรดไนตริกเข้มข้นปริมาตรตามที่กำหนด
- เติมสารละลาย antifoam 1% ปริมาตร 0.2 mL
- ใช้หลอดฉีดยาดูดตัวอย่างน้ำทะเลที่ปรับสภาพแล้วมา 10.0 mL ฉีดเข้าเครื่อง purge and trap เติมสารละลาย NaBH_4 0.6% ใน NaOH 0.1% ปริมาตร 2 mL เข้าเครื่อง purge and trap เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนอนุพันธ์
- วิเคราะห์ปริมาณสารหนูโดยเครื่อง GC-MS โดยหาปริมาณเทียบกับกราฟมาตรฐาน คำนวณความเข้มข้นที่พบในหน่วย $\mu\text{g}/\text{kg}$

2.3 การเตรียมตัวอย่างแพลงค์ตอน

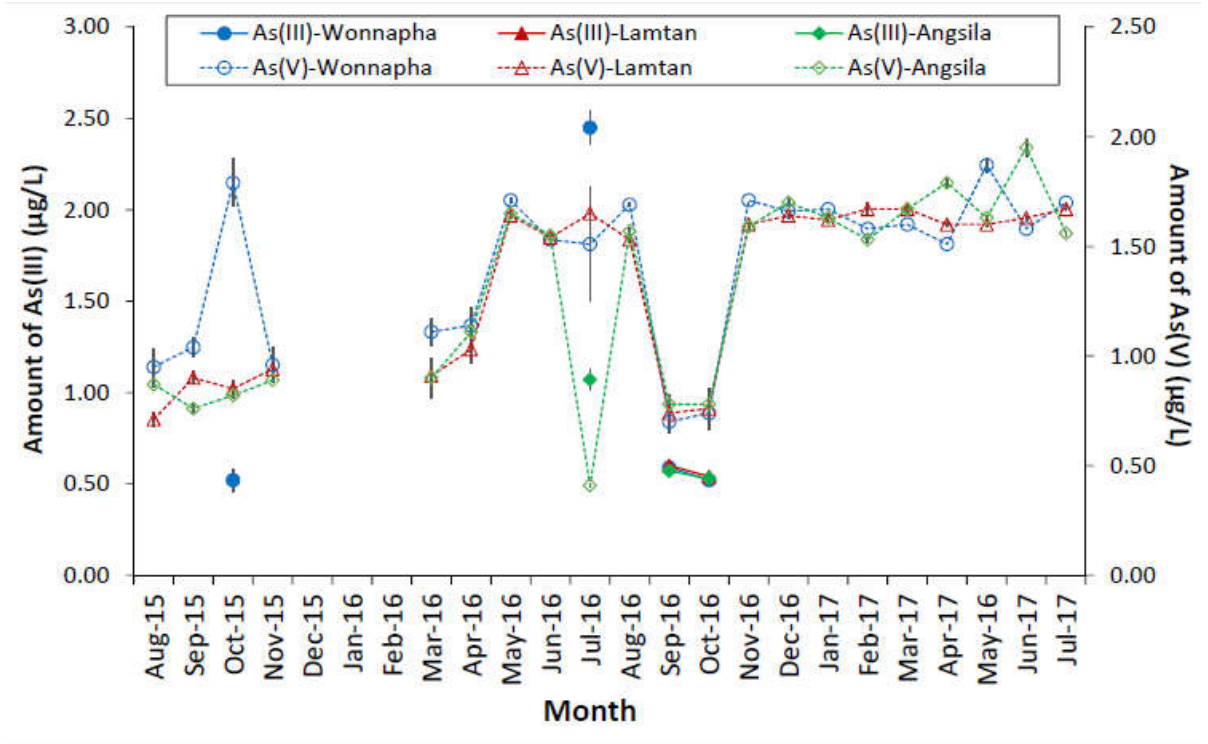
- นำตัวอย่างน้ำทะเลมา 2 L กรองผ่านเยื่อกรองไนลอน (รูน้ำหนักระบายเยื่อกรองก่อนการกรองตัวอย่าง) จากนั้นนำเยื่อกรองมาอบให้แห้งนำไปชั่งเพื่อหาน้ำหนักของแพลงค์ตอน
- นำเยื่อกรองที่มีตัวอย่างแพลงค์ตอนไปแช่ในกรดไนตริก 0.01 M ปริมาตร 50 mL สำหรับการวิเคราะห์ As(III) และแช่ในกรดไนตริก 0.1 M ปริมาตร 50 mL สำหรับการวิเคราะห์ total inorganic As
- ใช้หลอดฉีดยาดูดตัวอย่างน้ำทะเลที่ปรับสภาพแล้วมา 10.0 mL ฉีดเข้าเครื่อง purge and trap เติมสารละลาย NaBH_4 0.6% ใน NaOH 0.1% ปริมาตร 2 mL เข้าเครื่อง purge and trap เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนอนุพันธ์
- วิเคราะห์ปริมาณสารหนูโดยเครื่อง GC-MS โดยหาปริมาณเทียบกับกราฟมาตรฐาน คำนวณความเข้มข้นที่พบในหน่วย $\mu\text{g}/\text{kg}$

3. ผลการวิเคราะห์ตัวอย่าง

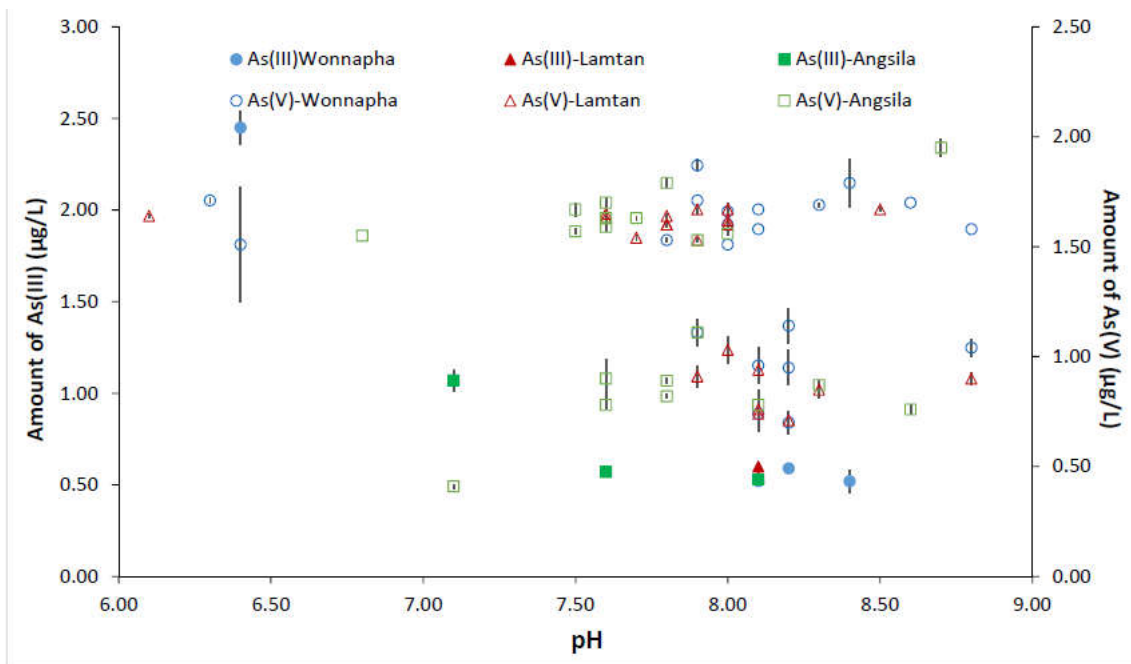
3.1 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทะเล

ผลการวิเคราะห์สารประกอบสารหนู 4 ชนิดในตัวอย่างน้ำทะเลจากสถานีหาดวอนนภา สถานีแหลมแท่นและสถานีอ่างศิลา ไม่พบสารประกอบสารหนูอินทรีย์คือ MMA และ DMA ในทุกตัวอย่าง พบสารหนูอนินทรีย์คือ As(III) และ As(V) ในทุกสถานี โดยสถานีหาดวอนนภาพบ As(III) จำนวน 4 ตัวอย่าง ในช่วง 0.52 ± 0.02 - 2.45 ± 0.09 $\mu\text{g/L}$ และ As(V) ในทุกตัวอย่างที่ศึกษาคือ 21 ตัวอย่าง ในช่วง 0.70 ± 0.05 - 1.87 ± 0.03 $\mu\text{g/L}$ สถานีแหลมแท่นพบ As(III) จำนวน 2 ตัวอย่างในช่วง 0.54 ± 0.02 - 0.60 ± 0.01 $\mu\text{g/L}$ และ As(V) จำนวน 21 ตัวอย่างในช่วง 0.74 ± 0.08 - 1.67 ± 0.03 $\mu\text{g/L}$ และสถานีอ่างศิลาพบ As(III) จำนวน 3 ตัวอย่างในช่วง 0.53 ± 0.01 - 1.04 ± 0.06 $\mu\text{g/L}$ และ As(V) จำนวน 21 ตัวอย่างในช่วง 0.41 ± 0.08 - 1.95 ± 0.04 $\mu\text{g/L}$ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 5-7 และรูปที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบสารหนูที่พบกับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งโดยกรมควบคุมมลพิษ กำหนดค่ามาตรฐานของสารหนูรวมไว้ไม่เกิน $10 \mu\text{g/L}$ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าปริมาณสารประกอบสารหนูทุกชนิดที่ตรวจพบในน้ำทะเลในทุกตัวอย่างมีความเข้มข้นไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ แสดงให้เห็นว่าน้ำทะเลจากสถานีหาดวอนนภา สถานีแหลมแท่นและสถานีอ่างศิลาที่ทำการศึกษาไม่มีอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ที่ได้รับสัมผัสน้ำทะเลดังกล่าว

จากผลการศึกษาปริมาณสารประกอบสารหนูในตัวอย่างน้ำทะเล ผลการศึกษาพบว่าในน้ำทะเลมีเฉพาะสารประกอบสารหนูอนินทรีย์ คือ As(III) และ As(V) เมื่อพิจารณาชนิดของสารประกอบสารหนูที่ตรวจพบในสถานีหาดวอนนภา สถานีแหลมแท่นและสถานีอ่างศิลา พบว่าสารประกอบสารหนูอนินทรีย์ชนิด As(V) เป็นสปีชีส์หลักของสารประกอบสารหนูที่พบในทะเล โดยมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.41 - $1.95 \mu\text{g/L}$ และความเข้มข้นเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ $1.35 \pm 0.40 \mu\text{g/L}$ ($n=63$) ซึ่งผลการศึกษาที่สอดคล้องกับการศึกษาอื่นๆ ซึ่งพบว่า As(V) เป็นสปีชีส์หลักที่พบในน้ำทะเล เช่น การศึกษาของ Salaün และคณะ (2007) Gomex-Ariza และคณะ (2000) และ Nakazato และคณะ (2002) เป็นต้น และเมื่อศึกษาค่า pH ของน้ำทะเลที่มีต่อความเข้มข้นของสารประกอบสารหนูอนินทรีย์ คือ As(III) และ As(V) แสดงดังรูปที่ 4 พบว่า pH ของน้ำทะเลที่ศึกษาอยู่ในช่วง 6.1-8.8 ซึ่งมีสถานะเป็น oxic condition และสอดคล้องกับรายงานวิจัยที่ระบุว่าช่วง pH ของน้ำทะเลในช่วง 2.5-7 จะเกิด As(V) เป็นหลัก (Sharma and Sohn (2009) Kalia และ Khambhojia (2015)) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของ As(III) ที่ตรวจพบในสถานีหาดวอนนภาในเดือน กรกฎาคม 2016 พบ As(III) ในปริมาณที่สูงคือ $2.45 \pm 0.06 \mu\text{g/L}$ เนื่องจากช่วงเดือนกรกฎาคม 2016 เกิดปรากฏการณ์ plankton bloom ทำให้มีปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำทะเลปริมาณมาก และเกิดการเปลี่ยนสปีชีส์จาก As(V) เป็น As(III) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cabon และ Cabon (2000) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์น้ำทะเลที่สถานีหาดวอนนภาในเดือนตุลาคม 2015 พบปริมาณของ As (III) และ As(V) สูงกว่าในตัวอย่างอื่นๆคือพบ As (III) และ As(V) เท่ากับ 0.52 ± 0.06 และ $1.79 \pm 0.11 \mu\text{g/L}$ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าช่วงเวลาที่เก็บตัวอย่างพบชั้นของน้ำมันลอยอยู่บนน้ำทะเลซึ่งอาจจะมาจากการรั่วไหลของน้ำมันจากเรือประมงที่จอดอยู่ในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nomnongso และ Ngila (2015) และ Bechker และคณะ (2012) ที่รายงานว่าพบปริมาณสารประกอบสารหนูเพิ่มขึ้นเมื่อมีการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิง



รูปที่ 2 ปริมาณสารหนูอนินทรีย์ 2 ชนิด ที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำทะเล



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของน้ำทะเลกับความเข้มข้นของ As(III) และ As(V) ที่ตรวจพบ

ตารางที่ 5 ปริมาณสารประกอบสารหนูในน้ำทะเลจากสถานีหาดวอนนภา (n=3)

เดือน ปี ค.ศ.	pH	สารประกอบสารหนูที่พบ ($\mu\text{g/L}$)							
		As(III)		As(V)		MMA		DMA	
		mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD
ส.ค.15	8.2	ND	-	0.95	0.08	ND	-	ND	-
ก.ย.15	8.8	ND	-	1.04	0.04	ND	-	ND	-
ต.ค.15	8.4	0.52	0.06	1.79	0.11	ND	-	ND	-
พ.ย.15	8.1	ND	-	0.96	0.08	ND	-	ND	-
ธ.ค.15		*	-	*	-	*	-	*	-
ม.ค.16		*	-	*	-	*	-	*	-
ก.พ.16		*	-	*	-	*	-	*	-
มี.ค.16	7.9	ND	-	1.11	0.06	ND	-	ND	-
เม.ย.16	8.2	ND	-	1.14	0.08	ND	-	ND	-
พ.ค.16	6.3	ND	-	1.71	0.01	ND	-	ND	-
มิ.ย.16	7.8	ND	-	1.53	0.01	ND	-	ND	-
ก.ค.16	6.4	2.45	0.09	1.51	0.26	ND	-	ND	-
ส.ค.16	8.3	ND	-	1.69	0.01	ND	-	ND	-
ก.ย.16	8.2	0.59	0.01	0.70	0.05	ND	-	ND	-
ต.ค.16	8.1	0.52	0.02	0.74	0.08	ND	-	ND	-
พ.ย.16	7.9	ND	-	1.71	0.01	ND	-	ND	-
ธ.ค.16	8.0	ND	-	1.66	0.01	ND	-	ND	-
ม.ค.17	8.1	ND	-	1.67	0.01	ND	-	ND	-
ก.พ.17	8.1	ND	-	1.58	0.01	ND	-	ND	-
มี.ค.17	8.0	ND	-	1.60	0.01	ND	-	ND	-
เม.ย.17	8.0	ND	-	1.51	0.01	ND	-	ND	-
พ.ค.17	7.9	ND	-	1.87	0.03	ND	-	ND	-
มิ.ย.17	8.8	ND	-	1.58	0.01	ND	-	ND	-
ก.ค.17	8.6	ND	-	1.70	0.01	ND	-	ND	-

ตารางที่ 6 ปริมาณสารประกอบสารหนูในน้ำทะเลจากสถานีแหลมแท่น (n=3)

เดือน ปี ค.ศ.	pH	สารประกอบสารหนูที่พบ ($\mu\text{g/L}$)							
		As(III)		As(V)		MMA		DMA	
		mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD
ส.ค.15	8.2	ND	-	0.71	0.03	ND	-	ND	-
ก.ย.15	8.8	ND	-	0.90	0.03	ND	-	ND	-
ต.ค.15	8.3	ND	-	0.85	0.04	ND	-	ND	-
พ.ย.15	8.1	ND	-	0.94	0.02	ND	-	ND	-
ธ.ค.15		*	-	*	-	*	-	*	-
ม.ค.16		*	-	*	-	*	-	*	-
ก.พ.16		*	-	*	-	*	-	*	-
มี.ค.16	7.9	ND	-	0.91	0.05	ND	-	ND	-
เม.ย.16	8.0	ND	-	1.03	0.06	ND	-	ND	-
พ.ค.16	6.1	ND	-	1.64	0.01	ND	-	ND	-
มิ.ย.16	7.7	ND	-	1.54	0.01	ND	-	ND	-
ก.ค.16	7.6	ND	-	1.65	0.02	ND	-	ND	-
ส.ค.16	7.9	ND	-	1.53	0.01	ND	-	ND	-
ก.ย.16	8.1	0.60	0.01	0.74	0.08	ND	-	ND	-
ต.ค.16	8.1	0.54	0.02	0.76	0.06	ND	-	ND	-
พ.ย.16	7.8	ND	-	1.60	0.01	ND	-	ND	-
ธ.ค.16	7.8	ND	-	1.64	0.01	ND	-	ND	-
ม.ค.17	8.0	ND	-	1.62	0.01	ND	-	ND	-
ก.พ.17	8.0	ND	-	1.67	0.03	ND	-	ND	-
มี.ค.17	7.9	ND	-	1.67	0.02	ND	-	ND	-
เม.ย.17	7.8	ND	-	1.60	0.01	ND	-	ND	-
พ.ค.17	8.0	ND	-	1.60	0.01	ND	-	ND	-
มิ.ย.17	7.6	ND	-	1.63	0.01	ND	-	ND	-
ก.ค.17	8.5	ND	-	1.67	0.01	ND	-	ND	-

ตารางที่ 7 ปริมาณสารประกอบสารหนูในน้ำทะเลจากสถานีอ่างศิลา (n=3)

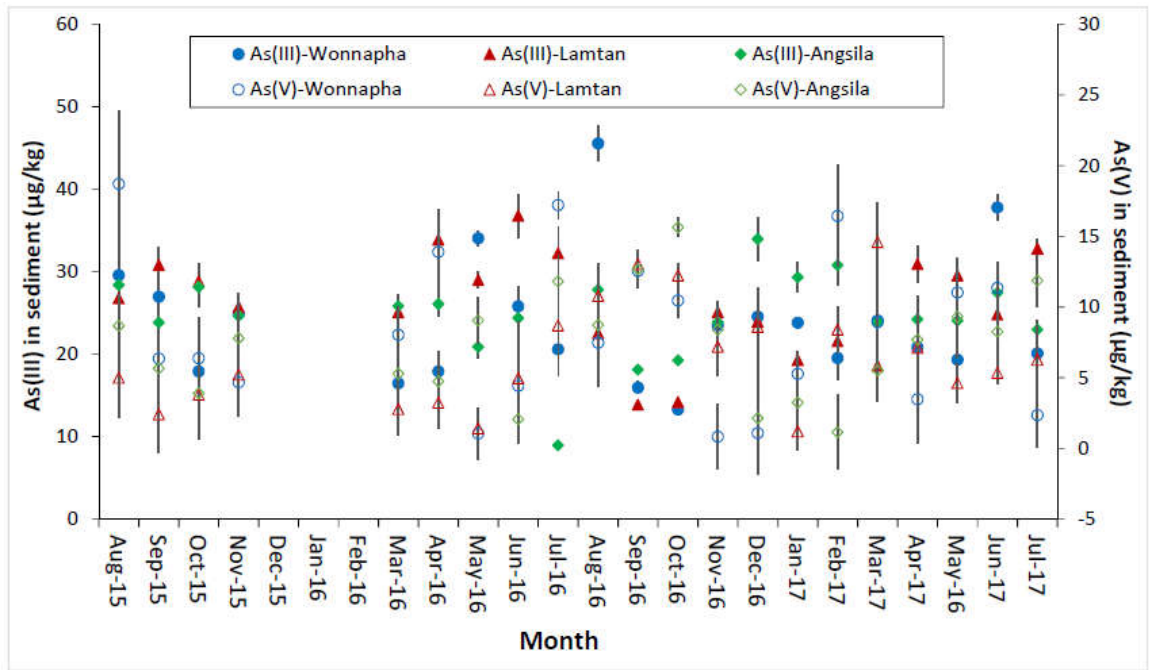
เดือน ปี ค.ศ.	pH	สารประกอบสารหนูที่พบ ($\mu\text{g/L}$)							
		As(III)		As(V)		MMA		DMA	
		mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD
ส.ค.15	8.3	ND	-	0.87	0.01	ND	-	ND	-
ก.ย.15	8.6	ND	-	0.76	0.02	ND	-	ND	-
ต.ค.15	7.8	ND	-	0.82	0.01	ND	-	ND	-
พ.ย.15	7.8	ND	-	0.89	0.01	ND	-	ND	-
ธ.ค.15		*	-	*	-	*	-	*	-
ม.ค.16		*	-	*	-	*	-	*	-
ก.พ.16		*	-	*	-	*	-	*	-
มี.ค.16	7.6	ND	-	0.90	0.09	ND	-	ND	-
เม.ย.16	7.9	ND	-	1.11	0.05	ND	-	ND	-
พ.ค.16	5.9	ND	-	1.65	0.01	ND	-	ND	-
มิ.ย.16	6.8	ND	-	1.55	0.01	ND	-	ND	-
ก.ค.16	7.1	1.04	0.06	0.41	0.01	ND	-	ND	-
ส.ค.16	7.5	ND	-	1.57	0.01	ND	-	ND	-
ก.ย.16	7.6	0.57	0.01	0.78	0.02	ND	-	ND	-
ต.ค.16	8.1	0.53	0.01	0.78	0.07	ND	-	ND	-
พ.ย.16	7.6	ND	-	1.59	0.02	ND	-	ND	-
ธ.ค.16	7.6	ND	-	1.70	0.02	ND	-	ND	-
ม.ค.17	7.6	ND	-	1.63	0.01	ND	-	ND	-
ก.พ.17	7.9	ND	-	1.53	0.01	ND	-	ND	-
มี.ค.17	7.5	ND	-	1.67	0.03	ND	-	ND	-
เม.ย.17	7.8	ND	-	1.79	0.02	ND	-	ND	-
พ.ค.17	7.7	ND	-	1.63	0.01	ND	-	ND	-
มิ.ย.17	8.7	ND	-	1.95	0.04	ND	-	ND	-
ก.ค.17	8.0	ND	-	1.56	0.01	ND	-	ND	-

3.2 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างตะกอนดิน

ผลการวิเคราะห์สารประกอบสารหนู 4 ชนิดในตัวอย่างตะกอนดินจากสถานีหาดวอนนภา สถานีแหลมแท่นและสถานีอ่างศิลา ไม่พบสารประกอบสารหนูอินทรีย์คือ MMA และ DMA ในทุกตัวอย่างพบสารหนูอนินทรีย์คือ As(III) และ As(V) ในทุกสถานี โดยสถานีหาดวอนนภาพบ As(III) ในทุกตัวอย่างที่ศึกษาคือ 21 ตัวอย่าง ในช่วง $13.33 \pm 0.12 - 45.75 \pm 1.24 \mu\text{g/kg}$ และ As(V) จำนวน 21 ตัวอย่าง ในช่วง $0.64 \pm 0.91 - 18.22 \pm 5.40 \mu\text{g/kg}$ สถานีแหลมแท่นพบ As(III) จำนวน 21 ตัวอย่างในช่วง $14.55 \pm 0.12 - 36.51 \pm 1.03 \mu\text{g/kg}$ และ As(V) จำนวน 21 ตัวอย่างในช่วง $0.87 \pm 0.92 - 12.92 \pm 1.22 \mu\text{g/kg}$ และสถานีอ่างศิลาพบ As(III) จำนวน 21 ตัวอย่างในช่วง $8.92 \pm 0.11 - 34.12 \pm 1.12 \mu\text{g/kg}$ และ As(V) จำนวน 21 ตัวอย่างในช่วง $0.85 \pm 1.39 - 15.82 \pm 0.52 \mu\text{g/kg}$ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 8-10 และรูปที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบสารหนูที่พบในตัวอย่างตะกอนดินกับค่ามาตรฐานตะกอนดินโดยกรมควบคุมมลพิษ กำหนดค่ามาตรฐานของสารหนูรวมไว้ไม่เกิน 5 mg/kg น้ำหนักแห้ง และกำหนดค่ามาตรฐานสารหนูอนินทรีย์ไว้ไม่เกิน 2 mg/kg น้ำหนักแห้ง ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าปริมาณสารประกอบสารหนูทุกชนิดที่ตรวจพบในตะกอนดินในทุกตัวอย่างมีความเข้มข้นไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ แสดงให้เห็นว่าตะกอนดินจากสถานีหาดวอนนภา สถานีแหลมแท่นและสถานีอ่างศิลาที่ทำการศึกษามีอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์

เมื่อพิจารณาปริมาณสารประกอบสารหนูที่ตรวจพบจาก 3 สถานี พบว่ามีปริมาณ As(III) ในช่วง $14.16 \pm 72.15 \mu\text{g/kg}$ ค่าเฉลี่ยมีค่า $39.52 \pm 10.17 \mu\text{g/kg}$ ($n=63$) และมี As(V) อยู่ในช่วง $1.31 - 29.64 \mu\text{g/kg}$ ค่าเฉลี่ยมีค่า $11.68 \pm 6.98 \mu\text{g/kg}$ ($n=63$) และไม่ตรวจพบ MMA และ DMA ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gomez-Ariza และคณะ (2000) ที่มีพบสารประกอบ MMA และ DMA อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบปริมาณ As(III) และ As(V) ที่ตรวจพบในตัวอย่างตะกอนดินกับงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ พบว่าปริมาณ As(III) และ As(V) ที่ตรวจพบในงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่างานวิจัยอื่นๆมาก เนื่องจากตะกอนดินที่เก็บมาจากสถานีที่ศึกษามีปริมาณของทรายเป็นองค์ประกอบมากกว่าตะกอนดินจากงานวิจัยอื่นๆ และจากรายงานวิจัยพบว่าสารประกอบสารหนูชอบยึดเหนี่ยว (binding) กับอะตอมของธาตุ Fe ที่อยู่ในชั้นอินทรีย์ในตะกอนดิน โดยงานวิจัยของ Duan และคณะ (2013) แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณสารประกอบสารหนูจะลดลงเมื่อปริมาณทรายในตะกอนดินเพิ่มขึ้น ($r = 0.80$, $p < 0.01$) โดยตัวอย่างตะกอนดินที่ศึกษามีปริมาณทรายเป็นองค์ประกอบ 68.3% เมื่อทำการคำนวณปริมาณของ As(III) และ As(V) ในตะกอนดินโดยมีการ correction ปริมาณทรายในตะกอนดินทำให้ได้ปริมาณของ As(III) มีค่าเป็น $970.78 - 4946.19 \mu\text{g/kg}$ ค่าเฉลี่ย $2698.28 \pm 694.23 \mu\text{g/kg}$ ($n=63$) และ As(V) มีค่าเป็น $90.1282 - 2031.68 \mu\text{g/kg}$ ค่าเฉลี่ย $797.24 \pm 476.80 \mu\text{g/kg}$ ($n=63$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ellwood และ Maher (2003) Tomlinson และคณะ (2016) เป็นต้น

นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้พบว่า As(III) เป็นสปีชีส์ของสารประกอบสารหนูที่พบในตัวอย่างตะกอนดินเนื่องจากตัวอย่างตะกอนดินที่ศึกษามีปริมาณของ Fe และ S มาก สังเกตได้จากสีดำเข้มของตะกอนดินและกลิ่นของ H_2S ทำให้ตะกอนดินที่ศึกษานี้มีสถานะเป็น anoxic condition ซึ่งทำให้มีสปีชีส์ที่มีออกซิเดชันต่ำคือ As(III) เป็นหลัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hagiwara และคณะ (2011) และ Manindy-Pajany และคณะ (2013)



รูปที่ 4 ปริมาณสารหนูอนินทรีย์ 2 ชนิด ที่ตรวจพบในตัวอย่างตะกอนดิน

ตารางที่ 8 ปริมาณสารประกอบสารหนูในตะกอนดินจากสถานีหาดวอนนภา (n=3)

เดือน ปี ค.ศ.	สารประกอบสารหนูที่พบ ($\mu\text{g}/\text{kg}$)							
	As(III)		As(V)		MMA		DMA	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD
ส.ค.15	29.95	0.91	18.22	5.40	ND	-	ND	-
ก.ย.15	27.30	1.18	6.12	1.87	ND	-	ND	-
ต.ค.15	18.19	1.59	6.15	2.13	ND	-	ND	-
พ.ย.15	26.25	1.15	4.20	2.25	ND	-	ND	-
ธ.ค.15	*	-	*	-	*	-	*	-
ม.ค.16	*	-	*	-	*	-	*	-
ก.พ.16	*	-	*	-	*	-	*	-
มี.ค.16	26.12	0.23	7.63	2.03	ND	-	ND	-
เม.ย.16	27.81	0.52	14.12	1.82	ND	-	ND	-
พ.ค.16	34.03	0.14	0.64	0.91	ND	-	ND	-
มิ.ย.16	35.82	1.05	4.17	1.82	ND	-	ND	-
ก.ค.16	20.51	1.11	17.52	0.92	ND	-	ND	-
ส.ค.16	45.75	1.24	7.62	2.51	ND	-	ND	-
ก.ย.16	16.03	0.16	12.55	1.02	ND	-	ND	-
ต.ค.16	13.33	0.12	10.22	0.81	ND	-	ND	-
พ.ย.16	24.08	0.24	0.81	1.51	ND	-	ND	-
ธ.ค.16	25.32	0.51	0.94	1.81	ND	-	ND	-
ม.ค.17	24.53	0.21	5.11	1.19	ND	-	ND	-
ก.พ.17	19.23	1.11	16.24	2.29	ND	-	ND	-
มี.ค.17	24.01	0.79	8.82	1.52	ND	-	ND	-
เม.ย.17	21.31	0.51	3.19	2.02	ND	-	ND	-
พ.ค.17	18.92	0.31	11.13	0.59	ND	-	ND	-
มิ.ย.17	38.02	0.29	11.59	0.81	ND	-	ND	-
ก.ค.17	20.83	1.02	2.09	1.89	ND	-	ND	-

ตารางที่ 9 ปริมาณสารประกอบสารหนูในตะกอนดินจากสถานีแหลมแท่น (n=3)

เดือน ปี ค.ศ.	สารประกอบสารหนูที่พบ ($\mu\text{g}/\text{kg}$)							
	As(III)		As(V)		MMA		DMA	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD
ส.ค.15	27.05	0.89	4.45	2.10	ND	-	ND	-
ก.ย.15	30.50	1.28	3.02	2.01	ND	-	ND	-
ต.ค.15	28.56	1.45	3.51	2.09	ND	-	ND	-
พ.ย.15	26.21	1.21	4.71	2.03	ND	-	ND	-
ธ.ค.15	*	-	*	-	*	-	*	-
ม.ค.16	*	-	*	-	*	-	*	-
ก.พ.16	*	-	*	-	*	-	*	-
มี.ค.16	25.11	0.09	2.62	2.06	ND	-	ND	-
เม.ย.16	33.40	0.62	2.82	2.18	ND	-	ND	-
พ.ค.16	29.12	0.22	1.02	0.91	ND	-	ND	-
มิ.ย.16	36.51	1.03	4.82	1.87	ND	-	ND	-
ก.ค.16	32.12	1.12	8.41	0.89	ND	-	ND	-
ส.ค.16	23.25	0.82	10.52	1.23	ND	-	ND	-
ก.ย.16	18.22	0.12	12.92	1.22	ND	-	ND	-
ต.ค.16	14.55	0.12	12.10	0.51	ND	-	ND	-
พ.ย.16	25.21	0.51	7.12	1.32	ND	-	ND	-
ธ.ค.16	23.82	0.32	8.02	1.10	ND	-	ND	-
ม.ค.17	19.51	0.15	0.87	0.92	ND	-	ND	-
ก.พ.17	21.71	0.49	8.19	1.23	ND	-	ND	-
มี.ค.17	18.32	0.62	14.59	2.22	ND	-	ND	-
เม.ย.17	31.51	1.21	7.52	0.88	ND	-	ND	-
พ.ค.17	27.21	0.66	4.85	0.82	ND	-	ND	-
มิ.ย.17	25.66	0.69	5.12	0.48	ND	-	ND	-
ก.ค.17	33.78	0.25	6.02	1.30	ND	-	ND	-

ตารางที่ 10 ปริมาณสารประกอบสารหนูในตะกอนดินจากสถานีอ่างศิลา (n=3)

เดือน ปี ค.ศ.	สารประกอบสารหนูที่พบ ($\mu\text{g}/\text{kg}$)							
	As(III)		As(V)		MMA		DMA	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD
ส.ค.15	28.52	2.24	8.50	1.15	ND	-	ND	-
ก.ย.15	24.01	2.78	5.55	1.81	ND	-	ND	-
ต.ค.15	28.42	2.53	3.66	1.90	ND	-	ND	-
พ.ย.15	26.02	1.23	7.65	1.85	ND	-	ND	-
ธ.ค.15	*	-	*	-	*	-	*	-
ม.ค.16	*	-	*	-	*	-	*	-
ก.พ.16	*	-	*	-	*	-	*	-
มี.ค.16	16.53	0.49	5.15	1.12	ND	-	ND	-
เม.ย.16	25.89	0.82	4.52	1.48	ND	-	ND	-
พ.ค.16	20.09	0.52	8.94	2.09	ND	-	ND	-
มิ.ย.16	24.52	0.85	1.83	1.32	ND	-	ND	-
ก.ค.16	8.92	0.11	11.84	1.48	ND	-	ND	-
ส.ค.16	27.84	1.32	8.53	1.16	ND	-	ND	-
ก.ย.16	14.23	0.14	12.81	1.32	ND	-	ND	-
ต.ค.16	17.82	0.12	15.82	0.52	ND	-	ND	-
พ.ย.16	24.52	0.23	8.02	0.52	ND	-	ND	-
ธ.ค.16	34.12	1.12	1.82	1.68	ND	-	ND	-
ม.ค.17	29.31	0.74	4.05	1.56	ND	-	ND	-
ก.พ.17	31.52	0.63	0.85	1.39	ND	-	ND	-
มี.ค.17	24.12	0.63	5.20	1.28	ND	-	ND	-
เม.ย.17	24.02	1.02	6.63	0.88	ND	-	ND	-
พ.ค.17	24.55	0.82	8.98	0.63	ND	-	ND	-
มิ.ย.17	27.85	1.03	7.92	0.82	ND	-	ND	-
ก.ค.17	23.84	0.24	11.87	1.14	ND	-	ND	-

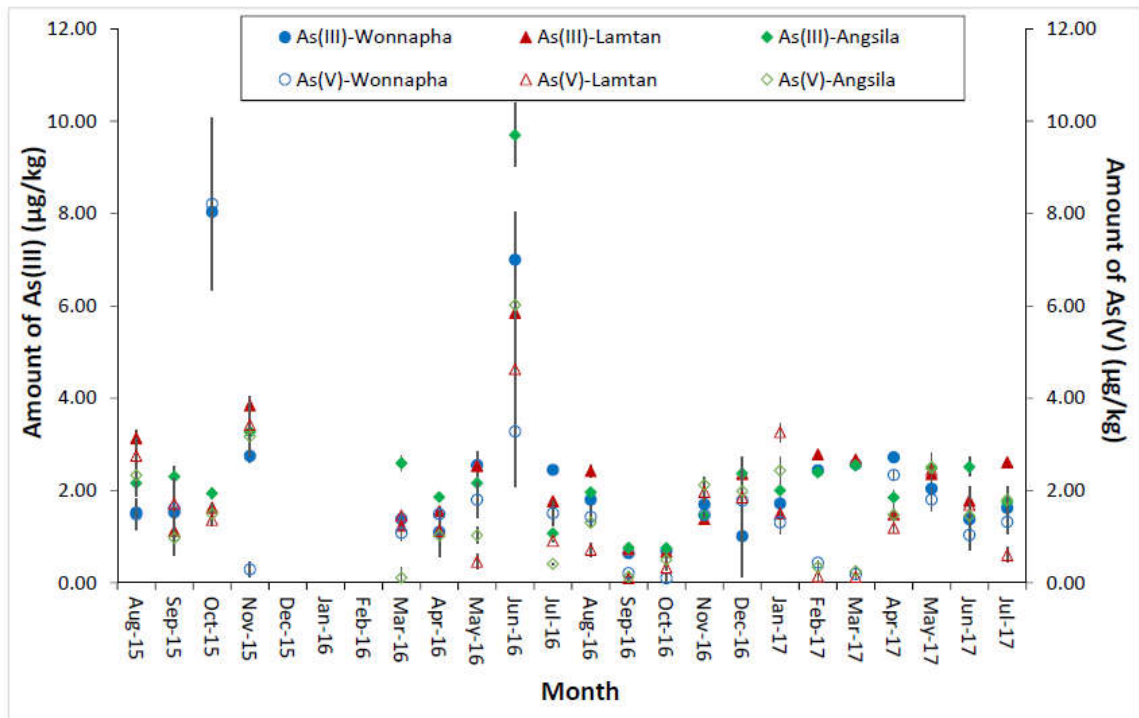
3.3 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างหอยแมลงภู

ผลการวิเคราะห์สารประกอบสารหนู 4 ชนิดในตัวอย่างหอยแมลงภูจากสถานีหาดวอนนภา สถานีแหลมแท่นและสถานีอ่างศิลา ตรวจพบสารประกอบสารหนูทุกชนิดคือ As(III) As(V) MMA และ DMA ในทุกสถานี โดยสถานีหาดวอนนภาพบ As(III) ในทุกตัวอย่างที่ศึกษาคือ 21 ตัวอย่าง ในช่วง $0.64 \pm 0.02 - 8.04 \pm 1.34 \mu\text{g/kg}$ As(V) จำนวน 21 ตัวอย่าง ในช่วง $0.10 \pm 0.08 - 8.21 \pm 0.87 \mu\text{g/kg}$ MMA จำนวน 10 ตัวอย่าง ในช่วง $0.58 \pm 0.03 - 4.73 \pm 0.64 \mu\text{g/kg}$ และ DMA จำนวน 6 ตัวอย่าง ในช่วง $0.62 \pm 0.03 - 35.48 \pm 2.61 \mu\text{g/kg}$ สถานีแหลมแท่นพบ As(III) จำนวน 21 ตัวอย่าง ในช่วง $0.67 \pm 0.04 - 5.85 \pm 0.57 \mu\text{g/kg}$ As(V) จำนวน 21 ตัวอย่าง ในช่วง $0.10 \pm 0.09 - 3.42 \pm 0.51 \mu\text{g/kg}$ MMA จำนวน 5 ตัวอย่าง ในช่วง $0.77 \pm 0.04 - 2.49 \pm 1.11 \mu\text{g/kg}$ และ DMA จำนวน 7 ตัวอย่าง ในช่วง $0.77 \pm 0.15 - 11.38 \pm 0.35 \mu\text{g/kg}$ และสถานีอ่างศิลาพบ As(III) จำนวน 21 ตัวอย่าง ในช่วง $0.75 \pm 0.02 - 9.70 \pm 0.68 \mu\text{g/kg}$ As(V) จำนวน 21 ตัวอย่าง ในช่วง $0.13 \pm 0.08 - 6.02 \pm 0.78 \mu\text{g/kg}$ MMA จำนวน 8 ตัวอย่าง ในช่วง $0.63 \pm 0.04 - 3.75 \pm 0.14 \mu\text{g/kg}$ และ DMA จำนวน 8 ตัวอย่าง ในช่วง $0.79 \pm 0.07 - 9.31 \pm 0.28 \mu\text{g/kg}$ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 11-13 และรูปที่ 5-6 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบสารหนูที่พบในตัวอย่างหอยแมลงภูกับค่ามาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน จากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กำหนดค่าสูงสุดของสารหนูรวมในอาหารทั่วไปไม่เกิน 2 mg/kg และกำหนดปริมาณสารหนูอินทรีย์ในอาหารทะเลไม่เกิน 2 mg/kg ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าปริมาณสารประกอบสารหนูทุกชนิดที่ตรวจพบในหอยแมลงภูในทุกตัวอย่างมีความเข้มข้นไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ แสดงให้เห็นว่าหอยแมลงภูจากสถานีหาดวอนนภา สถานีแหลมแท่นและสถานีอ่างศิลาที่ทำการศึกษามีอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์

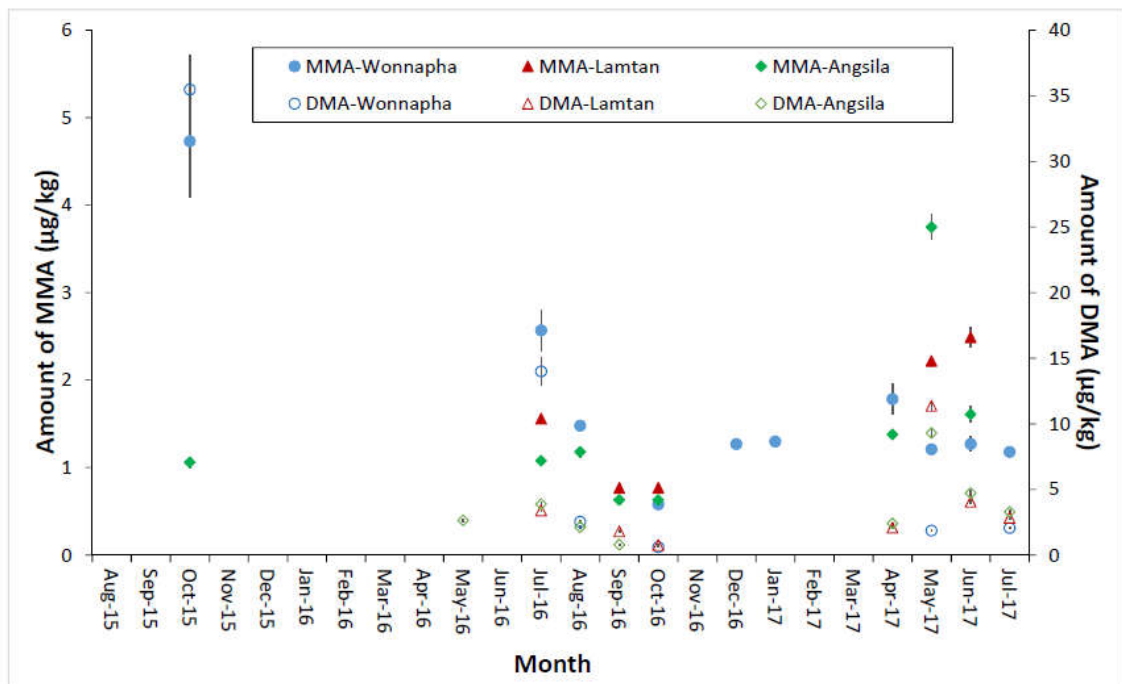
จากการศึกษาปริมาณสารประกอบสารหนูในตัวอย่างหอยแมลงภูพบสารประกอบสารหนูทั้ง 4 ชนิดที่ศึกษา คือ พบ As(III) ในช่วง $0.87 - 13.21 \mu\text{g/kg}$ ค่าเฉลี่ย $3.11 \pm 2.19 \mu\text{g/kg}$ ($n=63$) พบ As(V) ในช่วง $0.14 - 11.18 \mu\text{g/kg}$ ค่าเฉลี่ย $2.15 \pm 1.92 \mu\text{g/kg}$ ($n=63$) พบ MMA ในช่วง $0.75 - 5.86 \mu\text{g/kg}$ ค่าเฉลี่ย $1.97 \pm 1.25 \mu\text{g/kg}$ ($n=23$) พบ DMA ในช่วง $0.62 - 35.48 \mu\text{g/kg}$ ค่าเฉลี่ย $5.34 \pm 7.74 \mu\text{g/kg}$ ($n=21$) ซึ่งปริมาณที่ตรวจพบสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rutten และคณะ (2012) Leufroy และคณะ (2011) Zmozinski และคณะ (2015) โดยตัวอย่างหอยแมลงภูพบสารประกอบสารหนูอินทรีย์คือ MMA และ DMA ซึ่งไม่พบในตัวอย่างน้ำทะเลและตะกอนดินแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบสารหนูเกิดขึ้นในตัวอย่างหอยแมลงภู ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hutchison (2009) ที่รายงานว่าสารประกอบสารหนูเกิดการสะสมที่ชีวภาพ (bioaccumulation) ในสิ่งมีชีวิตในทะเลได้ และเกิดการลดความเป็นพิษด้วยกระบวนการเติมหมู่เมทิล (biomethylation) อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จากกระบวนการลดความเป็นพิษจะเป็นสารประกอบ arsenobetaine ที่เป็นสารประกอบสารหนูที่ไม่เป็นพิษซึ่งรายงานโดย Nakamura (2011)

เมื่อพิจารณาปริมาณสารประกอบสารหนูทั้ง 4 ชนิดในตัวอย่างที่เก็บในเดือนตุลาคม 2015 จากสถานีหาดวอนนภา พบปริมาณ As(III), As(V), MMA และ DMA มีค่าเท่ากับ 10.95 ± 1.34 , 11.18 ± 1.87 , 5.86 ± 0.64 และ $35.48 \pm 2.61 \mu\text{g/kg}$ ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณที่ตรวจพบสูงกว่าค่าเฉลี่ยของตัวอย่างทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ As (III) และ As(V) ในตัวอย่างน้ำทะเลที่สถานีหาดวอนนภาในเดือนตุลาคม 2015 ที่มีปริมาณของ As (III) และ As(V) สูงกว่าในตัวอย่างอื่นๆคือพบ As (III) และ As(V) เท่ากับ 0.52 ± 0.06 และ $1.79 \pm 0.11 \mu\text{g/L}$ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาณของสารประกอบสารหนู

ในตัวอย่างหอยแมลงภู่มั้พันธ์กับปริมาณสารประกอบสารหนูในตัวอย่างน้ำทะเล ซึ่งชี้ให้เห็นการสะสมของสารประกอบสารหนูในสิ่งแวดล้อมสู่ห่วงโซ่อาหาร



รูปที่ 5 ปริมาณ As (III) และ As(V) ที่พบในตัวอย่างหอยแมลงภู่มั้



รูปที่ 6 ปริมาณ MMA และ DMA ที่พบในตัวอย่างหอยแมลงภู่มั้

ตารางที่ 11 ปริมาณสารประกอบสารหนูในหอยแมลงภู่งจากสถานีหาดวอนนภา (n=3)

เดือน ปี ค.ศ.	สารประกอบสารหนูที่พบ ($\mu\text{g}/\text{kg}$)							
	As(III)		As(V)		MMA		DMA	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD
ส.ค.15	1.52	0.21	1.48	0.33	ND	-	ND	-
ก.ย.15	1.53	0.12	1.61	0.64	ND	-	ND	-
ต.ค.15	8.04	1.34	8.21	0.87	4.73	0.64	35.48	2.61
พ.ย.15	2.75	0.15	0.29	0.17	ND	-	ND	-
ธ.ค.15	*	-	*	-	*	-	*	-
ม.ค.16	*	-	*	-	*	-	*	-
ก.พ.16	*	-	*	-	*	-	*	-
มี.ค.16	1.38	0.06	1.08	0.17	ND	-	ND	-
เม.ย.16	1.10	0.52	1.49	0.12	ND	-	ND	-
พ.ค.16	2.55	0.28	1.80	0.38	ND	-	ND	-
มิ.ย.16	7.00	1.03	3.28	0.21	ND	-	ND	-
ก.ค.16	2.45	0.09	1.51	0.26	2.57	0.23	14.00	1.10
ส.ค.16	1.80	0.13	1.43	0.23	1.48	0.04	2.55	0.13
ก.ย.16	0.64	0.02	0.21	0.04	ND	-	ND	-
ต.ค.16	0.69	0.02	0.10	0.08	0.58	0.03	0.62	0.03
พ.ย.16	1.70	0.06	1.47	0.07	ND	-	ND	-
ธ.ค.16	1.01	0.18	1.78	0.94	1.27	0.04	ND	-
ม.ค.17	1.72	0.15	1.31	0.26	1.30	0.06	ND	-
ก.พ.17	2.44	0.02	0.44	0.04	ND	-	ND	-
มี.ค.17	2.57	0.06	0.19	0.08	ND	-	ND	-
เม.ย.17	2.72	0.06	2.34	0.11	1.78	0.17	ND	-
พ.ค.17	2.04	0.08	1.81	0.25	1.21	0.05	1.87	0.06
มิ.ย.17	1.38	0.07	1.03	0.31	1.27	0.08	ND	-
ก.ค.17	1.62	0.13	1.32	0.27	1.18	0.06	2.07	0.06

ตารางที่ 12 ปริมาณสารประกอบสารหนูในหอยแมลงภู่งจากสถานีแหลมแท่น (n=3)

เดือน ปี ค.ศ.	สารประกอบสารหนูที่พบ ($\mu\text{g}/\text{kg}$)							
	As(III)		As(V)		MMA		DMA	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD
ส.ค.15	3.13	0.18	2.75	0.37	ND	-	ND	-
ก.ย.15	1.12	0.11	1.71	0.23	ND	-	ND	-
ต.ค.15	1.63	0.02	1.36	0.11	ND	-	ND	-
พ.ย.15	3.84	0.21	3.42	0.51	ND	-	ND	-
ธ.ค.15	*	-	*	-	*	-	*	-
ม.ค.16	*	-	*	-	*	-	*	-
ก.พ.16	*	-	*	-	*	-	*	-
มี.ค.16	1.23	0.02	1.46	0.10	ND	-	ND	-
เม.ย.16	1.55	0.09	1.12	0.28	ND	-	ND	-
พ.ค.16	2.53	0.12	0.46	0.16	ND	-	ND	-
มิ.ย.16	5.85	0.57	4.63	0.87	ND	-	ND	-
ก.ค.16	1.77	0.03	0.91	0.02	1.56	0.03	3.41	0.06
ส.ค.16	2.42	0.14	0.72	0.15	ND	-	ND	-
ก.ย.16	0.73	0.04	0.10	0.09	0.77	0.04	1.82	0.12
ต.ค.16	0.67	0.04	0.33	0.06	0.77	0.04	0.77	0.15
พ.ย.16	1.38	0.05	1.97	0.25	ND	-	ND	-
ธ.ค.16	2.36	0.09	1.85	0.11	ND	-	ND	-
ม.ค.17	1.50	0.07	3.26	0.20	ND	-	ND	-
ก.พ.17	2.78	0.08	0.14	0.14	ND	-	ND	-
มี.ค.17	2.67	0.05	0.13	0.05	ND	-	ND	-
เม.ย.17	1.48	0.06	1.19	0.10	ND	-	2.10	0.08
พ.ค.17	2.36	0.08	2.44	0.28	2.22	0.06	11.38	0.35
มิ.ย.17	1.78	0.08	1.69	0.38	2.49	0.11	4.07	0.13
ก.ค.17	2.61	0.05	0.60	0.16	ND	-	2.83	0.08

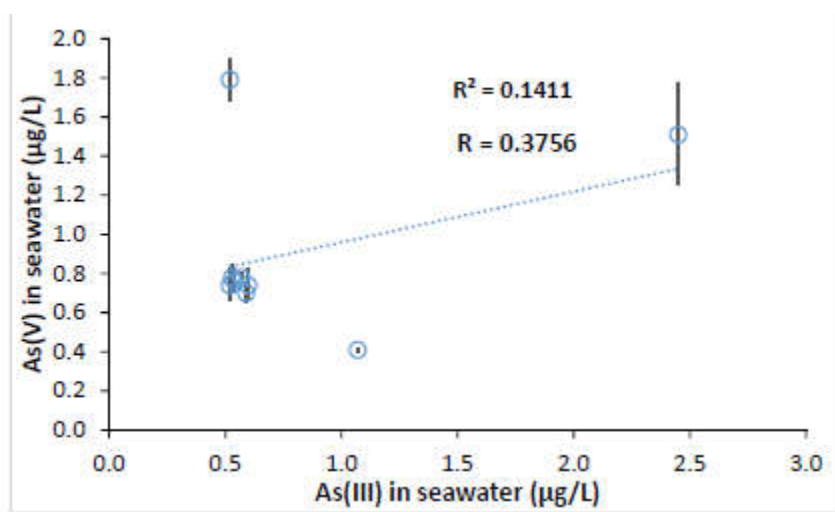
ตารางที่ 13 ปริมาณสารประกอบสารหนูในหอยแมลงภู่จากสถานีอ่างศิลา (n=3)

เดือน ปี ค.ศ.	สารประกอบสารหนูที่พบ ($\mu\text{g}/\text{kg}$)							
	As(III)		As(V)		MMA		DMA	
	mean	SD	mean	SD	mean	SD	mean	SD
ส.ค.15	2.16	0.16	2.33	0.45	ND	-	ND	-
ก.ย.15	2.30	0.22	0.97	0.36	ND	-	ND	-
ต.ค.15	1.94	0.12	1.49	0.21	1.06	0.06	ND	-
พ.ย.15	3.27	0.30	3.17	0.41	ND	-	ND	-
ธ.ค.15	*	-	*	-	*	-	*	-
ม.ค.16	*	-	*	-	*	-	*	-
ก.พ.16	*	-	*	-	*	-	*	-
มี.ค.16	2.59	0.16	0.11	0.22	ND	-	ND	-
เม.ย.16	1.86	0.06	1.02	0.27	ND	-	ND	-
พ.ค.16	2.16	0.16	1.03	0.18	ND	-	2.65	0.10
มิ.ย.16	9.70	0.68	6.02	0.78	ND	-	ND	-
ก.ค.16	1.07	0.06	0.41	0.01	1.08	0.05	3.89	0.16
ส.ค.16	1.96	0.08	1.30	0.09	1.18	0.06	2.14	0.10
ก.ย.16	0.76	0.06	0.13	0.08	0.63	0.04	0.79	0.07
ต.ค.16	0.75	0.02	0.50	0.12	0.63	0.04	ND	-
พ.ย.16	1.46	0.08	2.12	0.18	ND	-	ND	-
ธ.ค.16	2.37	0.19	1.99	0.22	ND	-	ND	-
ม.ค.17	2.00	0.07	2.43	0.30	ND	-	ND	-
ก.พ.17	2.39	0.10	0.34	0.15	ND	-	ND	-
มี.ค.17	2.54	0.03	0.25	0.08	ND	-	ND	-
เม.ย.17	1.85	0.15	1.47	0.23	1.38	0.02	2.42	0.06
พ.ค.17	2.48	0.24	2.51	0.31	3.75	0.14	9.31	0.28
มิ.ย.17	2.51	0.20	1.45	0.32	1.61	0.09	4.73	0.24
ก.ค.17	1.75	0.14	1.80	0.29	ND	-	3.30	0.16

4. การศึกษาความสัมพันธ์ของสารประกอบสารหนูในวัฏจักรน้ำทะเล

4.1 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารประกอบสารหนูในน้ำทะเล

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของสารประกอบสารหนูทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ As (III) As (V) MMA และ DMA ในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมชนิดต่างๆ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบสารหนูแต่ละชนิด และความสัมพันธ์ของสารประกอบสารหนูในตัวอย่างชนิดต่างๆ โดยพบว่าเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของ As (III) และ As (V) ที่พบในตัวอย่างน้ำทะเล พบว่าให้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 7 ซึ่งให้ค่า $r^2 = 0.1411$ ($r = 0.3756$) แสดงว่า ปริมาณของ As (III) และ As (V) ที่พบในตัวอย่างน้ำทะเลมีความสัมพันธ์ปานกลาง

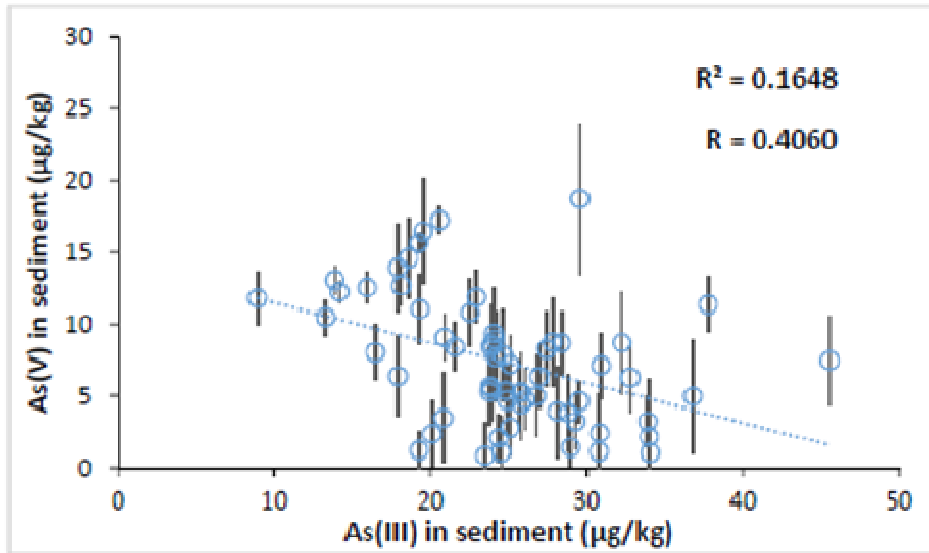


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของปริมาณของ As (III) และ As (V) ที่พบในตัวอย่างน้ำทะเล

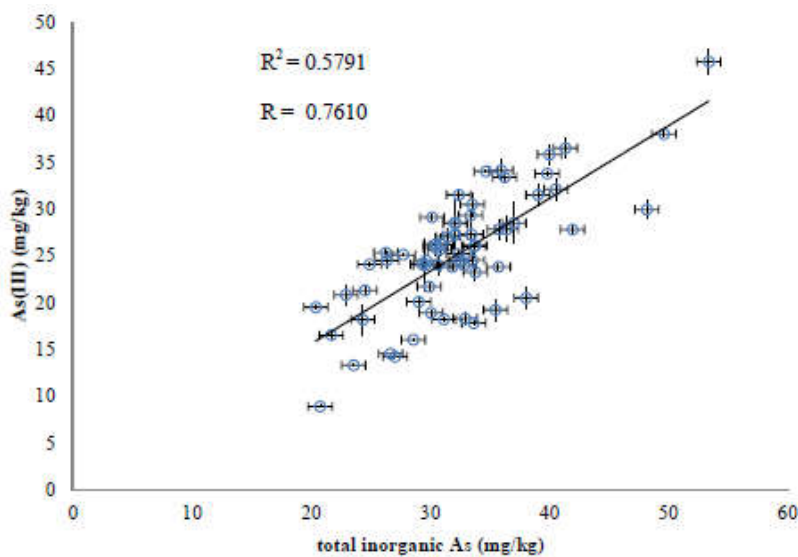
4.2 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารประกอบสารหนูตะกอนดิน

เมื่อพิจารณาตัวอย่างตะกอนดินพบความสัมพันธ์ของ As (III) และ As (V) ที่พบในตัวอย่างตะกอนดิน และความสัมพันธ์ของปริมาณสารหนูอนินทรีย์รวม (total inorganic As) กับ As(III) และ As(V) ดังรูป 8-10 และตารางที่ 14 แสดงว่าปริมาณ As (III) และ As (V) ในตัวอย่างตะกอนดินมีความสัมพันธ์ปานกลาง จากผลการศึกษาปริมาณสารหนูอนินทรีย์ (As(III) และ As(V) ในตัวอย่างน้ำทะเลและตะกอนดิน พบว่าสามารถเกิดการเปลี่ยนรูปและเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันของสารหนูอนินทรีย์ได้ ในสภาวะของน้ำทะเลและตะกอนดินที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ และจากค่า r มีค่า 0.3756 และ 0.4060 ในน้ำทะเลและตะกอนดินตามลำดับแสดงว่าแต่การเปลี่ยนรูปนั้นเกิดขึ้นเล็กน้อยและเกิดในระดับใกล้เคียงกันในสภาวะของน้ำทะเลและตะกอนดินที่ศึกษา อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณของสารหนูอนินทรีย์ As(V) จะเป็นสปีชีส์หลักในน้ำทะเล แต่พบปริมาณของ As(III) เป็นสปีชีส์หลักในตัวอย่างตะกอนดิน แสดงว่าสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันของสารหนูอนินทรีย์ในตะกอนดินได้ และเมื่อพิจารณาความเป็นพิษของสารหนูอนินทรีย์พบว่า As (III) มีความเป็นพิษมากกว่า As(V) โดยค่า LD_{50} ของ As(III) และ As(V)

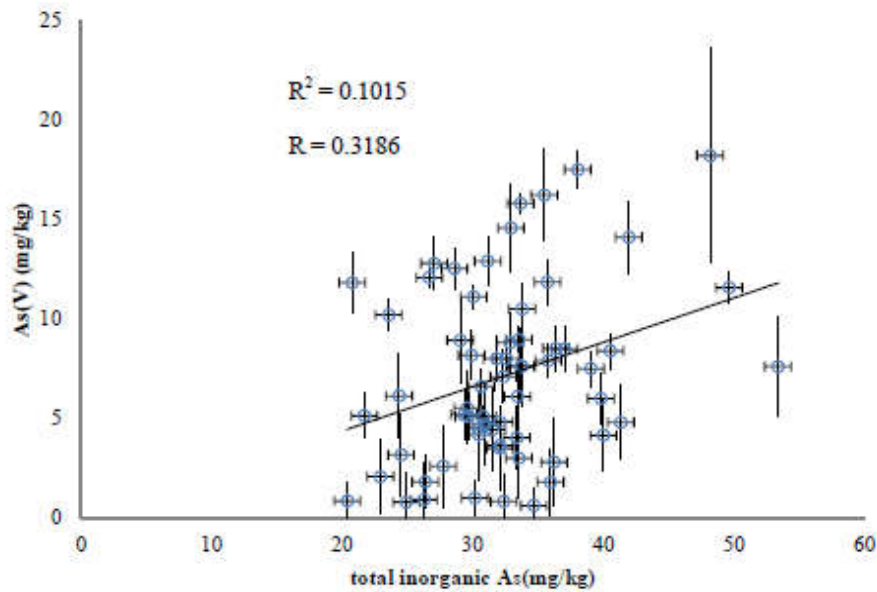
มีค่า 15-42 และ 20-800 mg/kg ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าในสภาวะที่เป็น anoxic condition ของตะกอนดินสามารถรีดิวซ์ As(V) ให้เป็น As(III) ได้ ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของปริมาณสารหนูอนินทรีย์รวมและปริมาณ As(III) มีความสัมพันธ์สูง ($r = 0.7610$) ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าปริมาณสารหนูอนินทรีย์ทั้ง As(III) และ As(V) ในน้ำทะเลสามารถตกตะกอนโดยยึดเหนี่ยวกับอะตอมของ Fe และสารอินทรีย์ในตะกอนดิน หลังจากนั้นจึงเกิดการเปลี่ยนรูปให้อยู่เป็น As(III) และสะสมในตะกอนดิน



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของปริมาณของ As (III) และ As (V) ที่พบในตัวอย่างตะกอนดิน



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของปริมาณของ As (III) และ total inorganic As ในตัวอย่างตะกอนดิน



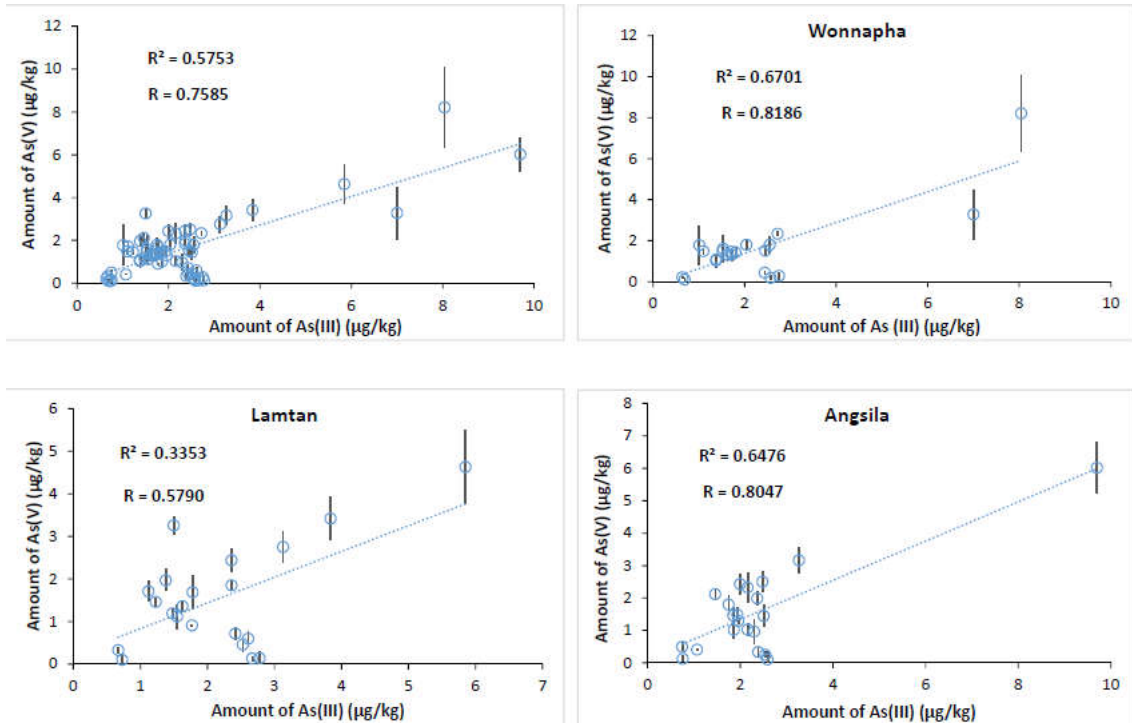
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของปริมาณของ As(V) และ total inorganic As ในตัวอย่างตะกอนดิน

ตารางที่ 14 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารประกอบสารหนูในตัวอย่างตะกอนดิน

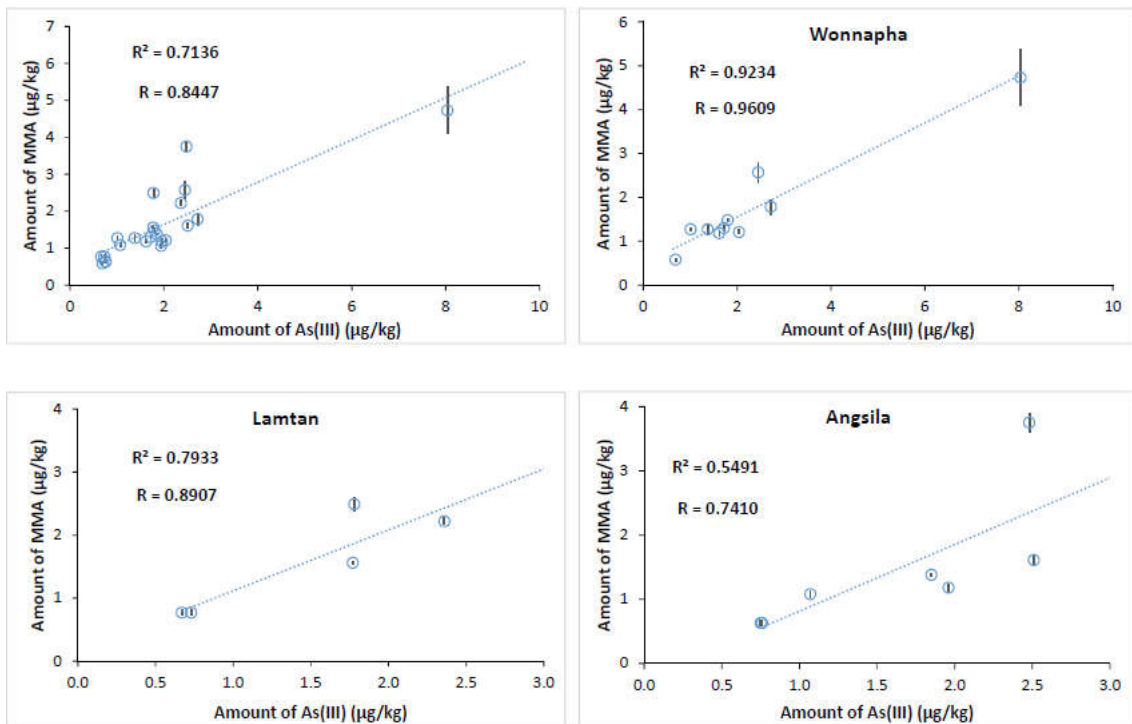
ความสัมพันธ์ระหว่าง	r^2	r	ความหมาย
As(III) และ As(V)	0.1648	0.4060	มีความสัมพันธ์ปานกลาง
As(III) และ total As	0.5791	0.7610	มีความสัมพันธ์สูง
As(V) และ total As	0.1015	0.3186	มีความสัมพันธ์ปานกลาง

4.3 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารประกอบสารหนูในหอยแมลงภู่

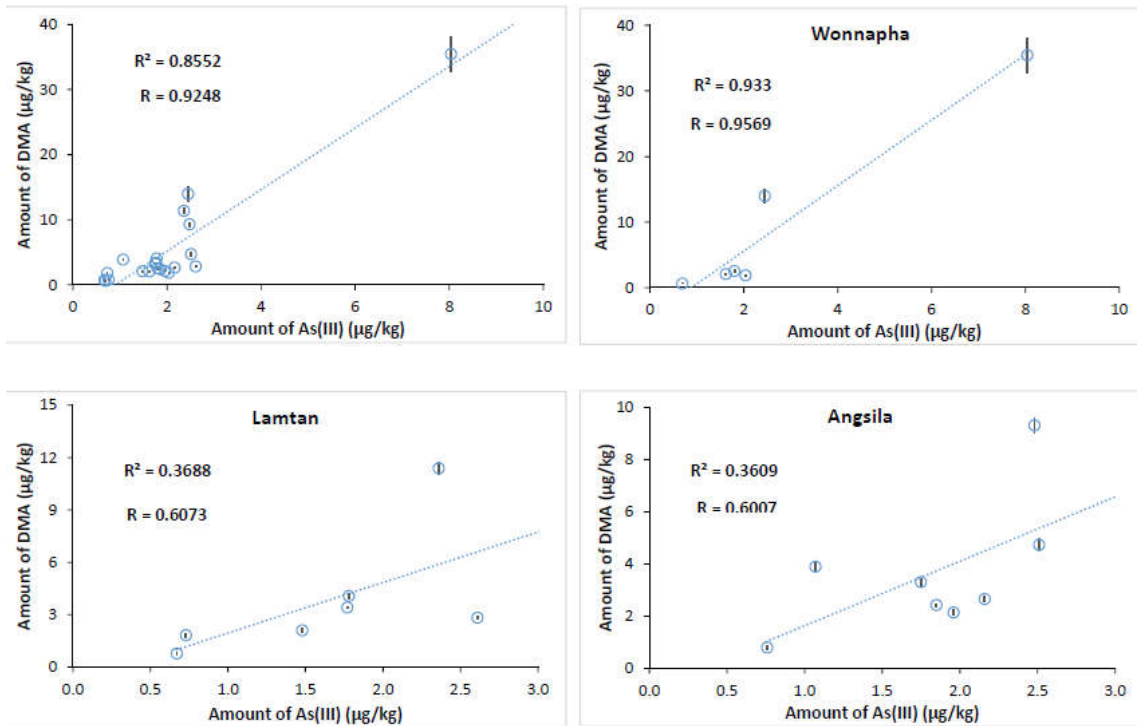
เพื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ตัวอย่างหอยแมลงภู่พบความสัมพันธ์ของปริมาณของสารประกอบสารหนู ได้แก่ As (III) As(V) MMA และ DMA ที่พบในตัวอย่างหอยแมลงภู่ ดังรูปที่ 11-16 และตารางที่ 15 พบสารประกอบสารหนูอินทรีย์คือ MMA และ DMA ในตัวอย่างหอยแมลงภู่ ซึ่งไม่สามารถตรวจพบได้ในตัวอย่างน้ำทะเลและตะกอนดิน แสดงว่าการเกิดสารหนูอินทรีย์ MMA และ DMA ซึ่งเกิดปฏิกิริยาการเติมหมู่เมทิลในสารหนูอนินทรีย์และสะสมในสิ่งมีชีวิต (bioaccumulation และ biomethylation) โดยพบความสัมพันธ์ของสารหนูอนินทรีย์และสารหนูอินทรีย์มีความสัมพันธ์สูง ซึ่งมีค่า $r > 0.75$ ในทุกกรณีที่ศึกษา



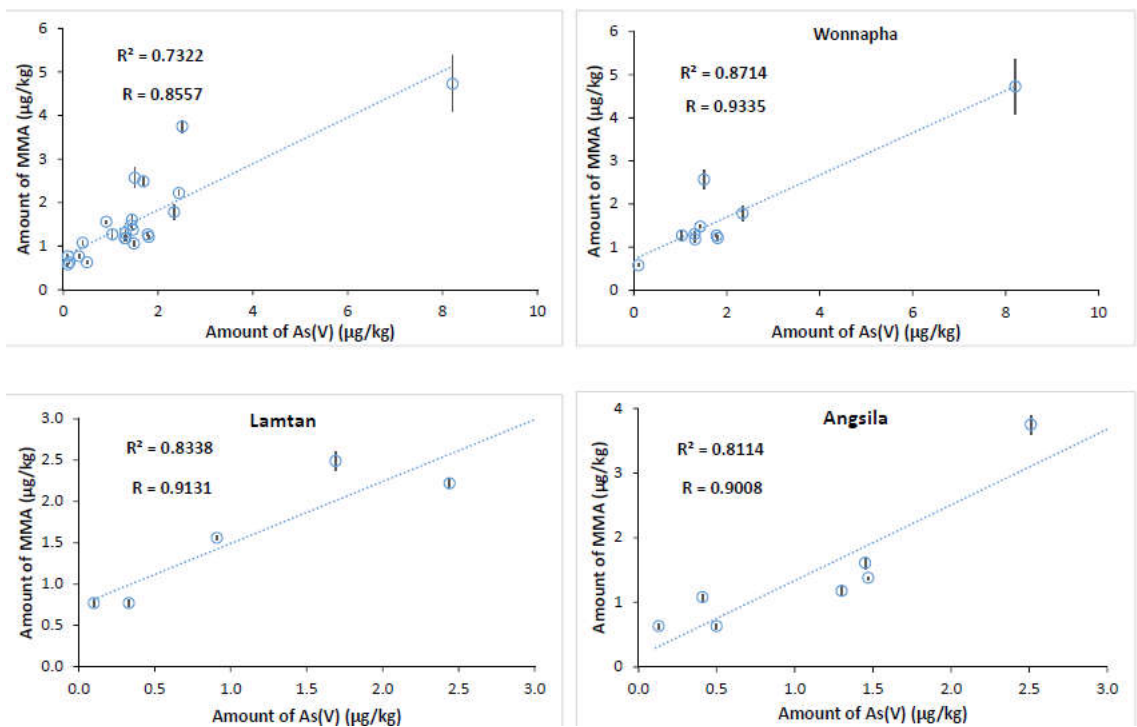
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของปริมาณของ As (III) และ As (V) ที่พบในตัวอย่างหอยแมลงภู



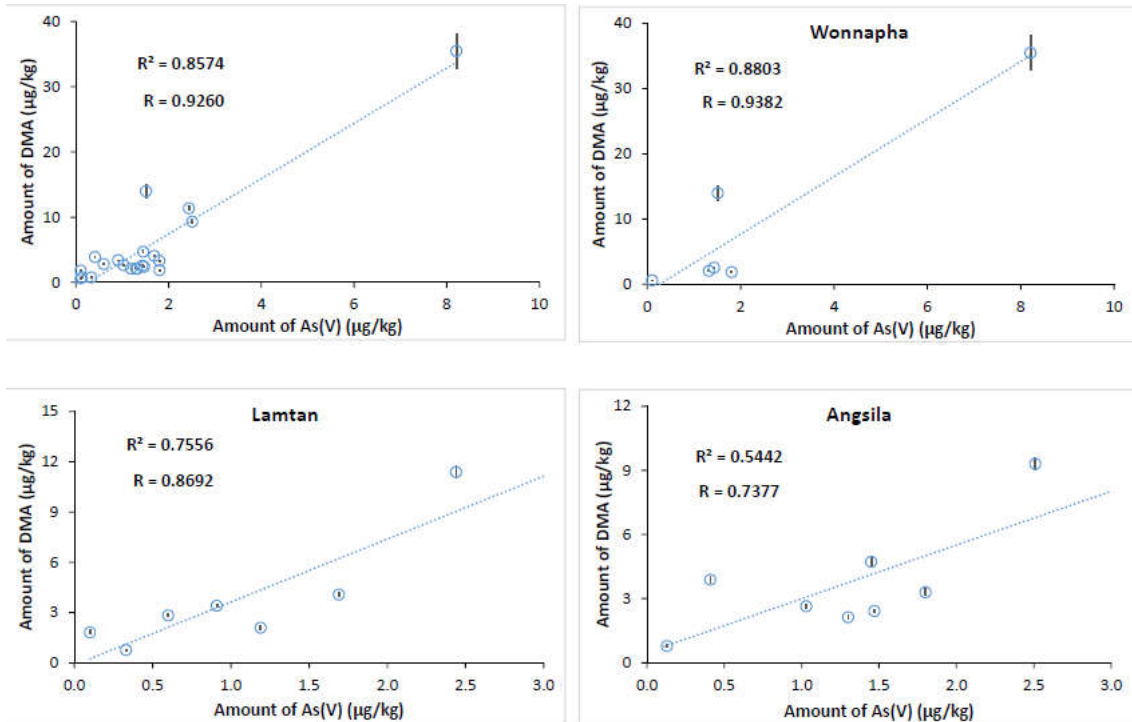
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของปริมาณของ As (III) และ MMA ที่พบในตัวอย่างหอยแมลงภู



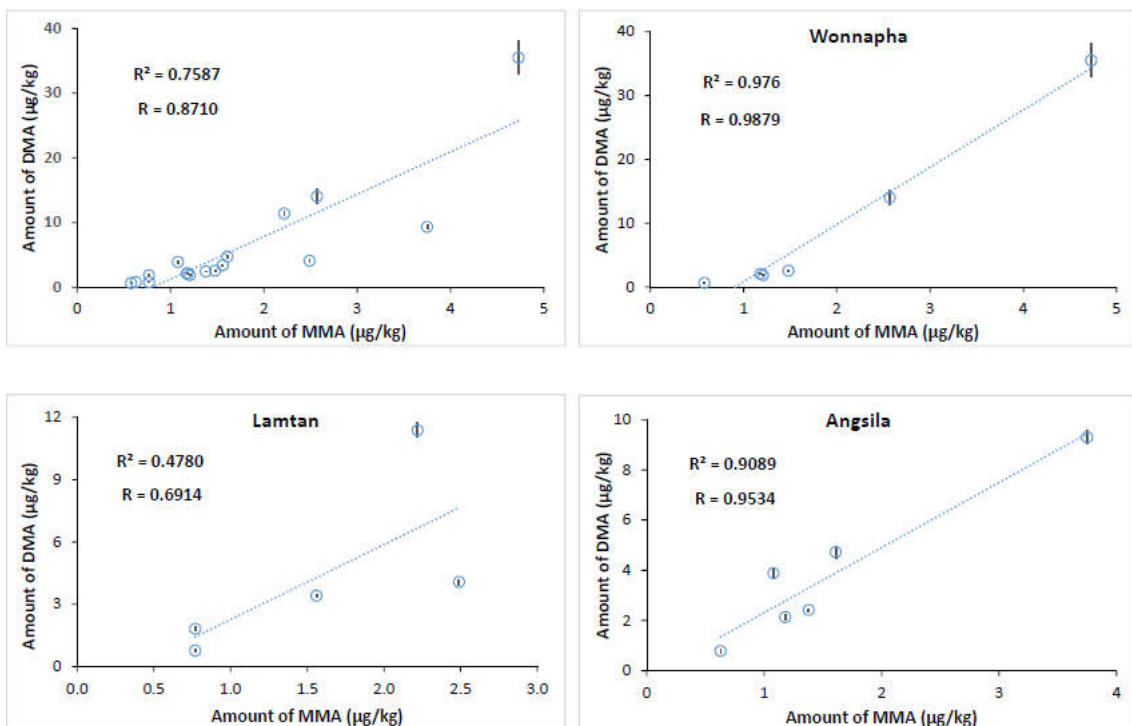
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ของปริมาณของ As (III) และ DMA ที่พบในตัวอย่างหอยแมลงภู



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ของปริมาณของ As(V) และ MMA ที่พบในตัวอย่างหอยแมลงภู



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ของปริมาณของ As(V) และ DMA ที่พบในตัวอย่างหอยแมลงภู



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ของปริมาณของ MMA และ DMA ที่พบในตัวอย่างหอยแมลงภู

ตารางที่ 15 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารประกอบสารหนูในตัวอย่างหอยแมลงภู

ความสัมพันธ์ระหว่าง	r^2	r	ความหมาย
As(III) และ As(V)	0.5753	0.7585	มีความสัมพันธ์สูง
As(III) และ MMA	0.7136	0.8447	มีความสัมพันธ์สูง
As(III) และ DMA	0.8552	0.9248	มีความสัมพันธ์สูง
As(V) และ MMA	0.7322	0.8557	มีความสัมพันธ์สูง
As(V) และ DMA	0.8574	0.9260	มีความสัมพันธ์สูง
MMA และ DMA	0.7587	0.8710	มีความสัมพันธ์สูง

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารประกอบสารหนูในน้ำทะเลและตะกอนดิน

ผลการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารประกอบสารหนูในน้ำทะเลและตะกอนดินแสดงดังรูปที่ 17-20 และตารางที่ 16 โดยพบว่าปริมาณของสารหนูอนินทรีย์ชนิด As(V) เป็นสปีชีส์หลักในน้ำทะเล แต่พบปริมาณของ As(III) เป็นสปีชีส์หลักในตัวอย่างตะกอนดิน แสดงว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของสปีชีส์ของสารหนูอนินทรีย์ จาก As(V) ในน้ำทะเล เป็น As(III) ในตะกอนดิน ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์สูง ระหว่าง As(V) ในน้ำทะเล และ As(III) ในตะกอนดิน ซึ่งให้ค่า $r = 0.9248$ และเมื่อพิจารณาค่าความสัมพันธ์ของปริมาณสารหนูในน้ำทะเลและตะกอนดิน ในเทอมของค่า partition coefficients (Kd) จากสัมพันธ์ในสมการ (1) (Wang และคณะ (2016), Millward และคณะ (1997)

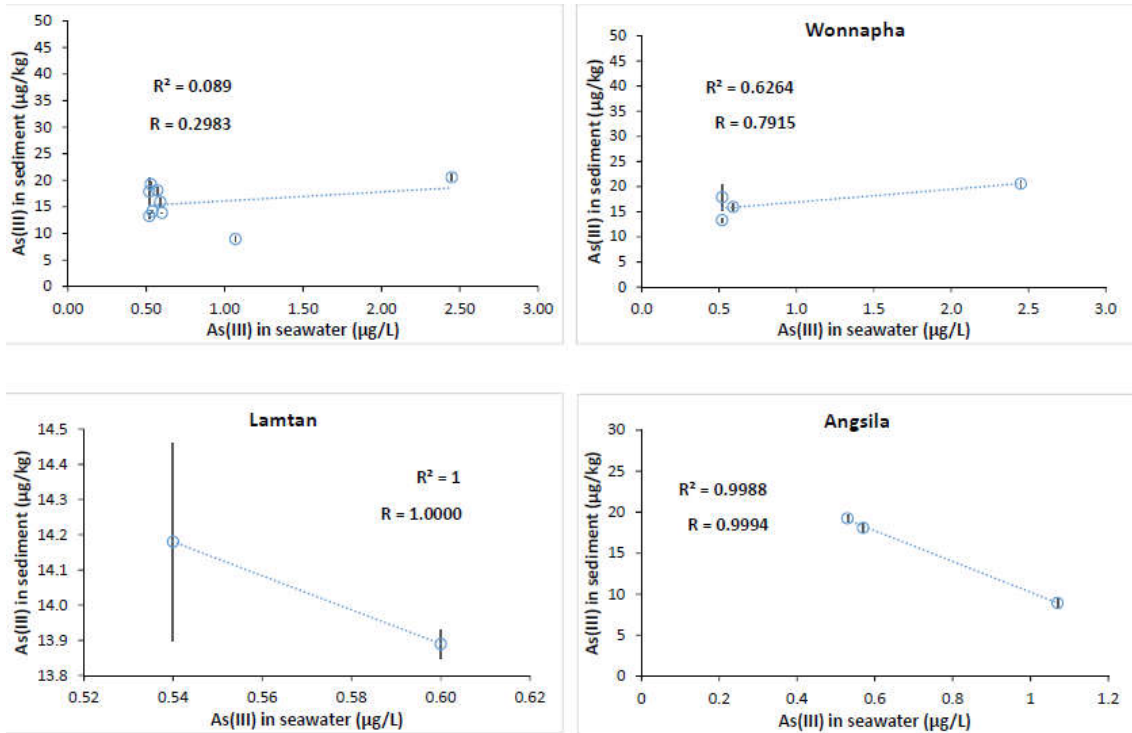
$$Kd = C_{\text{sediment}}/C_{\text{seawater}} \quad (1)$$

โดยที่ Kd คือ partition coefficients ของสารประกอบสารหนูระหว่างตะกอนดินและน้ำทะเล

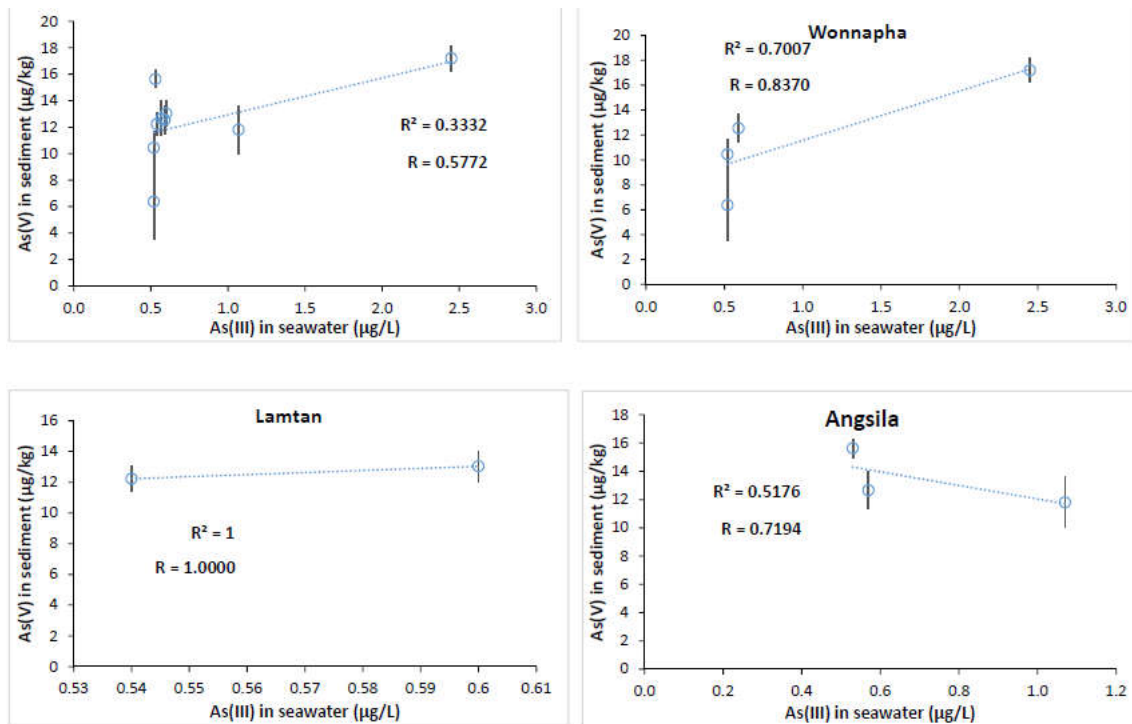
C_{sediment} คือ ความเข้มข้นของสารประกอบสารหนูในตะกอนดิน ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

C_{seawater} คือ ความเข้มข้นของสารประกอบสารหนูในน้ำทะเล ($\mu\text{g}/\text{L}$)

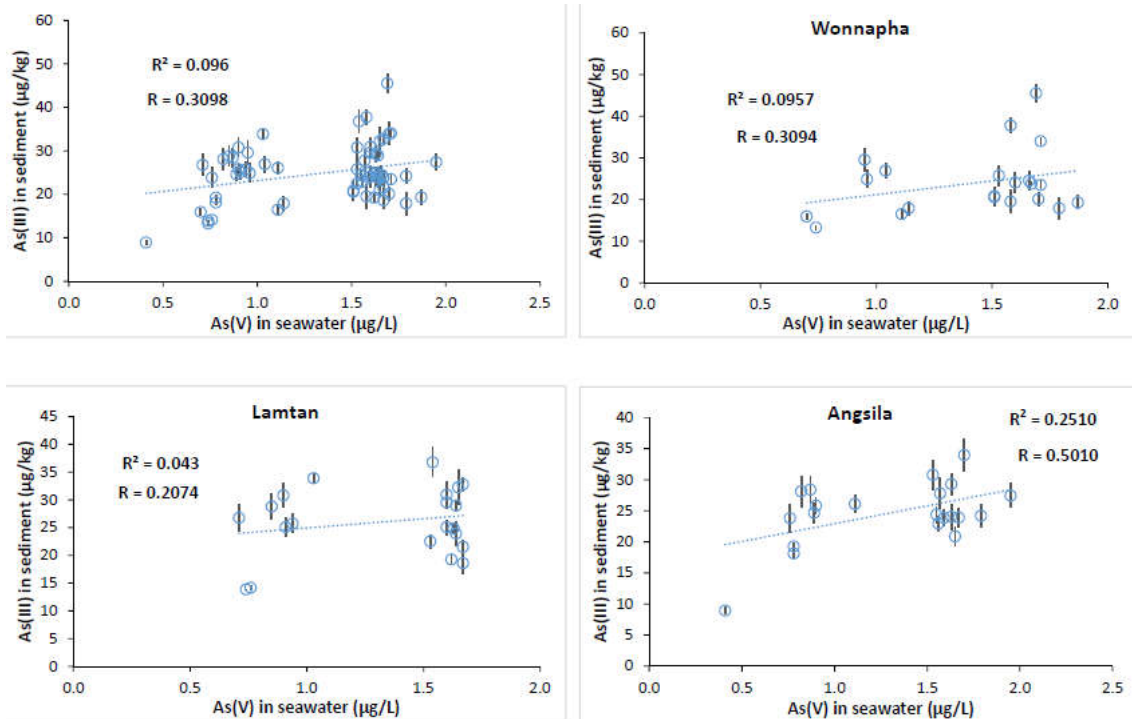
ผลการศึกษาค่า Kd ของสารประกอบสารหนูพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 1036.52 - 5519.71 L/kg ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2608.35 ± 946.04 L/kg ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสารประกอบสารหนูในน้ำทะเลสามารถตกตะกอนและสะสมในตะกอนดินได้ 1036-5519 เท่า นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า $\log Kd$ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 3.02-3.74 (ค่าเฉลี่ย 3.39 ± 0.15) ซึ่งให้ค่าที่สอดคล้องกับงานวิจัยในพื้นที่ปากแม่น้ำ Youngsan ประเทศเกาหลีใต้ (Hong และคณะ, 2017) บริเวณปากแม่น้ำ Huanghe ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน (Wang และคณะ, 2016) ปากแม่น้ำ paranagua ประเทศบราซิล (Anjos และคณะ, 2012) และปากแม่น้ำ Thame ประเทศอังกฤษ (Millward และคณะ, 1997)



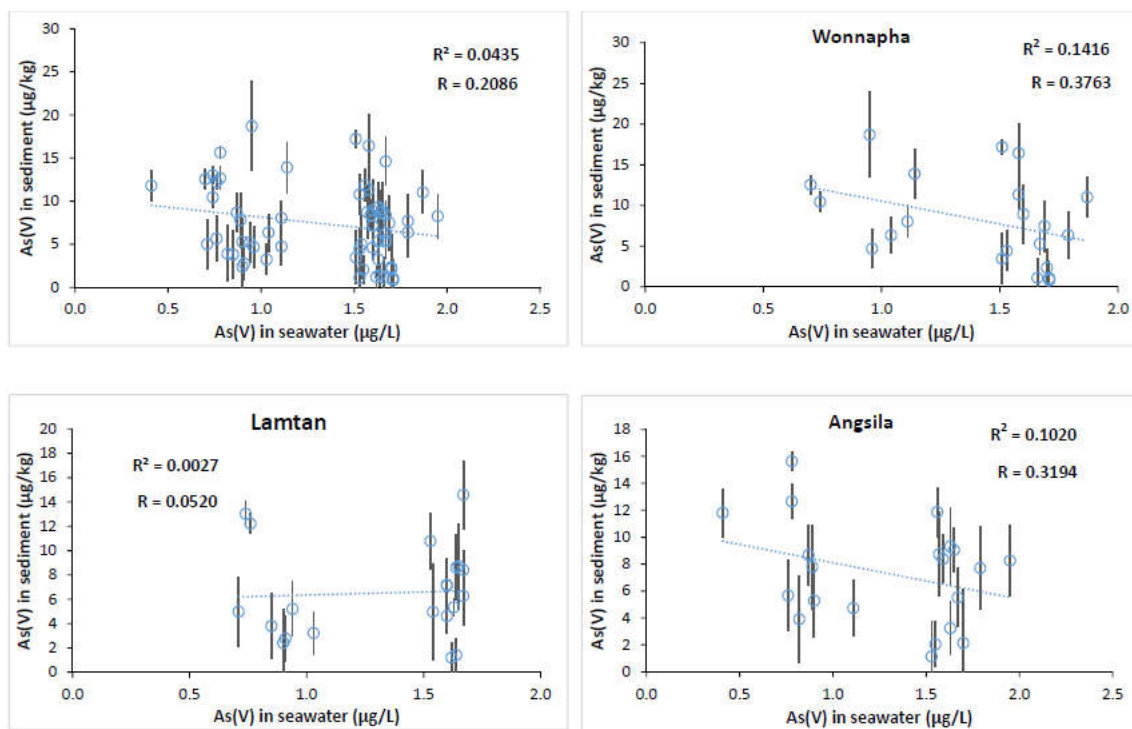
รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(III) ในน้ำทะเลและตะกอนดิน



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(III) ในน้ำทะเลและ As(V) ในตะกอนดิน



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(V) ในน้ำทะเลและ As(III) ในตะกอนดิน



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(V) ในน้ำทะเลและ As(V) ในตะกอนดิน

ตารางที่ 16 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารประกอบสารหนูในตัวอย่างน้ำทะเลและตะกอนดิน

ความสัมพันธ์		r^2	r	ความหมาย
น้ำทะเล	ตะกอนดิน			
As(III)	As(III)	0.0890	0.2983	มีความสัมพันธ์น้อย
As(III)	As(V)	0.3332	0.5772	มีความสัมพันธ์ปานกลาง
As(V)	As(III)	0.8552	0.9248	มีความสัมพันธ์สูง
As(V)	As(V)	0.0960	0.3098	มีความสัมพันธ์น้อย

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารประกอบสารหนูในน้ำทะเลและหอยแมลงภู่

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารประกอบสารหนูในน้ำทะเลและหอยแมลงภู่แสดงดังรูปที่ 21-28 และตารางที่ 17 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง As(III) ในน้ำทะเลกับ As(III) และ As(V) ในหอยแมลงภู่ ไม่มีความสัมพันธ์ โดยให้ค่า r เท่ากับ 0.0583 และ 0.0200 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง As(III) ในน้ำทะเลกับ MMA และ DMA ในหอยแมลงภู่ ให้ค่า r เท่ากับ 0.2581 และ 0.1411 ตามลำดับ แสดงว่าเมื่อ As(III) ในน้ำทะเลเข้าสู่หอยแมลงภู่แล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบอินทรีย์และเป็นชนิด monomethylated มากกว่า dimethylated เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง As(V) ในน้ำทะเลกับ As(III) As(V) MMA และ DMA ในหอยแมลงภู่ พบว่าให้ค่า r เท่ากับ 0.2550 0.2366 0.5044 และ 0.2713 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าหอยแมลงภู่มีการดูดซับสารหนูชนิด As(V) จากน้ำทะเลมากกว่าสารหนูชนิด As(III) และเกิดการสะสมอยู่ในรูปสารหนูอินทรีย์ชนิด monomethylated (MMA) มากกว่าสปีชีส์อื่นๆ

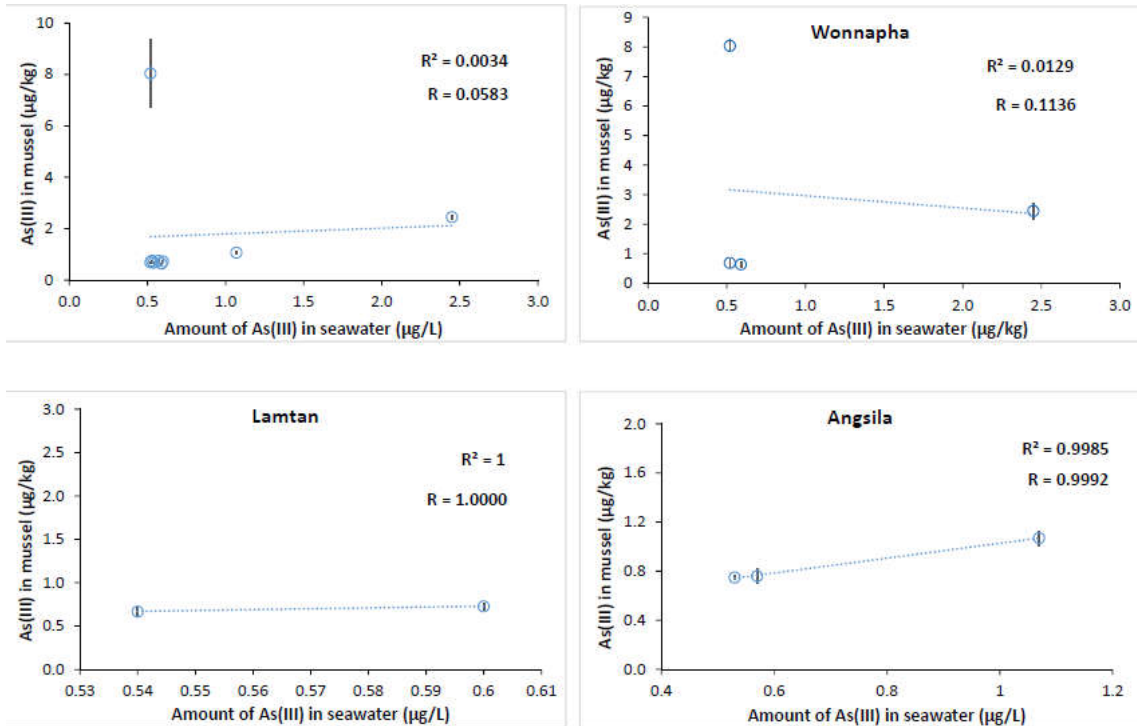
นอกจากนี้สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ของปริมาณสารประกอบสารหนูระหว่างสัตว์และสิ่งแวดล้อมได้จากค่า bioconcentration factor (BCF) และ bioaccumulation factor (BAF) ซึ่งสามารถคำนวณได้สมการ (2) (Velez และคณะ, 2016)

$$BAF = C_{\text{animal}}/C_{\text{environment}} \quad (2)$$

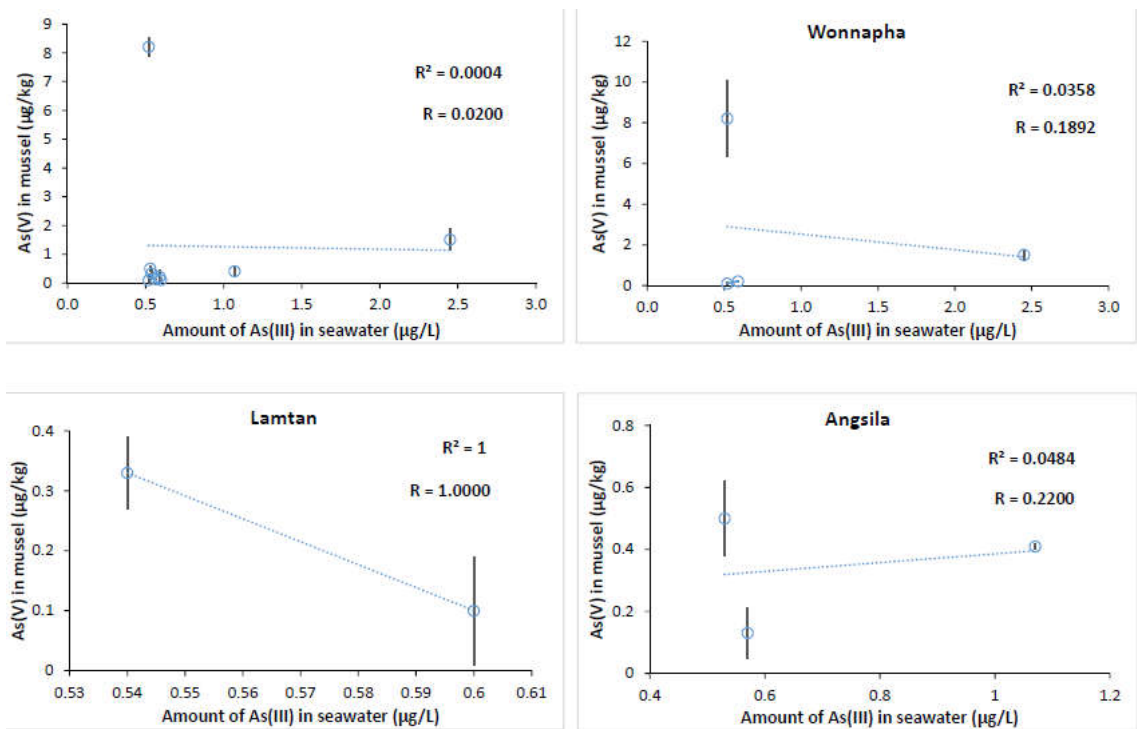
โดยที่ C_{animal} คือ ความเข้มข้นของสารประกอบสารหนูในเนื้อเยื่อสัตว์ (หอยแมลงภู่)

$C_{\text{environment}}$ คือความเข้มข้นของสารประกอบสารหนูในสิ่งแวดล้อม (น้ำทะเล)

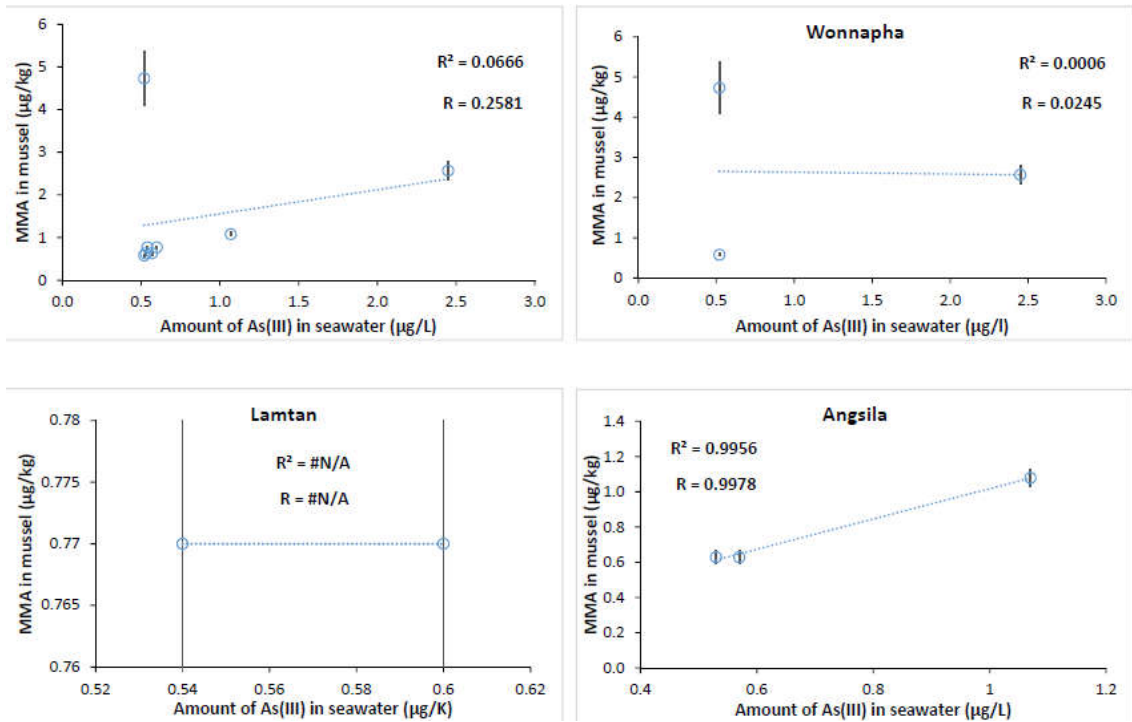
การศึกษาความสัมพันธ์ของสารประกอบสารหนูระหว่างน้ำทะเลและหอยแมลงภู่เป็นการศึกษาการสะสมของสารประกอบสารหนูจากสิ่งแวดล้อมสู่สิ่งมีชีวิต โดยผลการศึกษาพบว่าค่า BAF ของสารประกอบสารหนูระหว่างน้ำทะเลและหอยแมลงภู่มีค่าอยู่ในช่วง 15.97-133.93 มีค่าเฉลี่ย 30.79 ± 21.79 ($n=63$) แสดงว่ามีการสะสมของสารประกอบสารหนูจากสิ่งแวดล้อม(น้ำทะเล)สู่สิ่งมีชีวิต (หอยแมลงภู่) โดยเฉลี่ย 30.79 เท่า ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen และ Folt (2000) ที่ทำการศึกษาการสะสมของสารประกอบสารหนูในบริเวณทะเลสาบ Mystic, New York



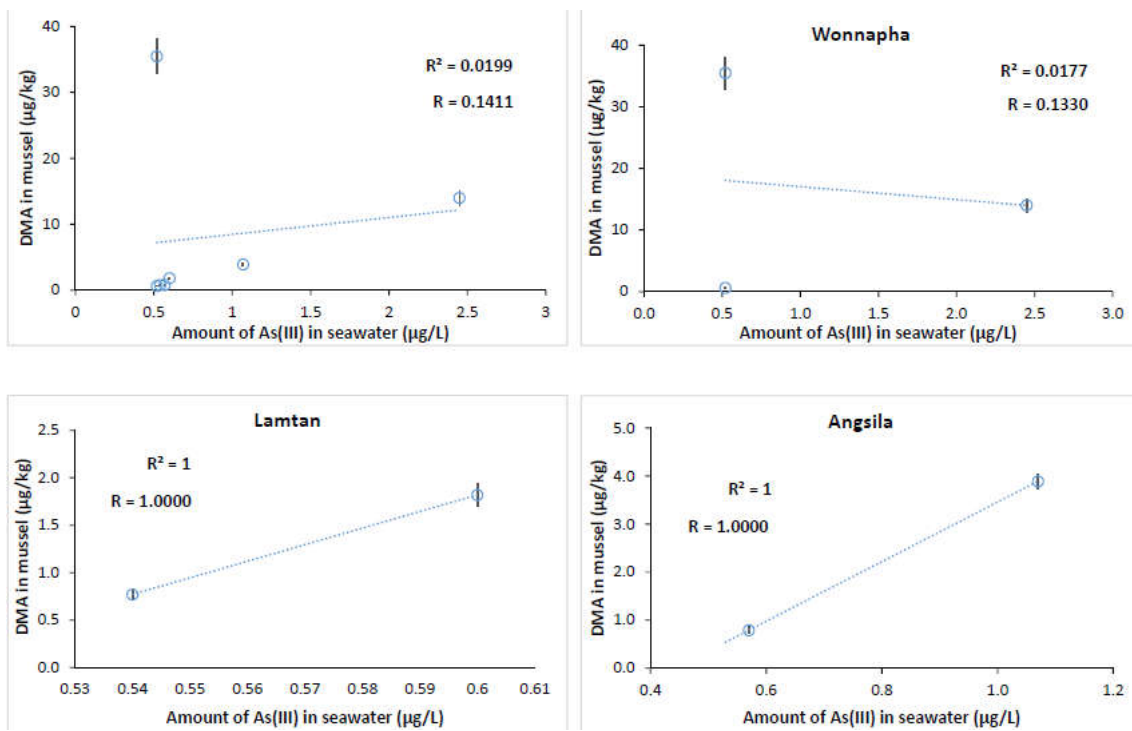
รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(III) ในน้ำทะเลและหอยแมลงภู



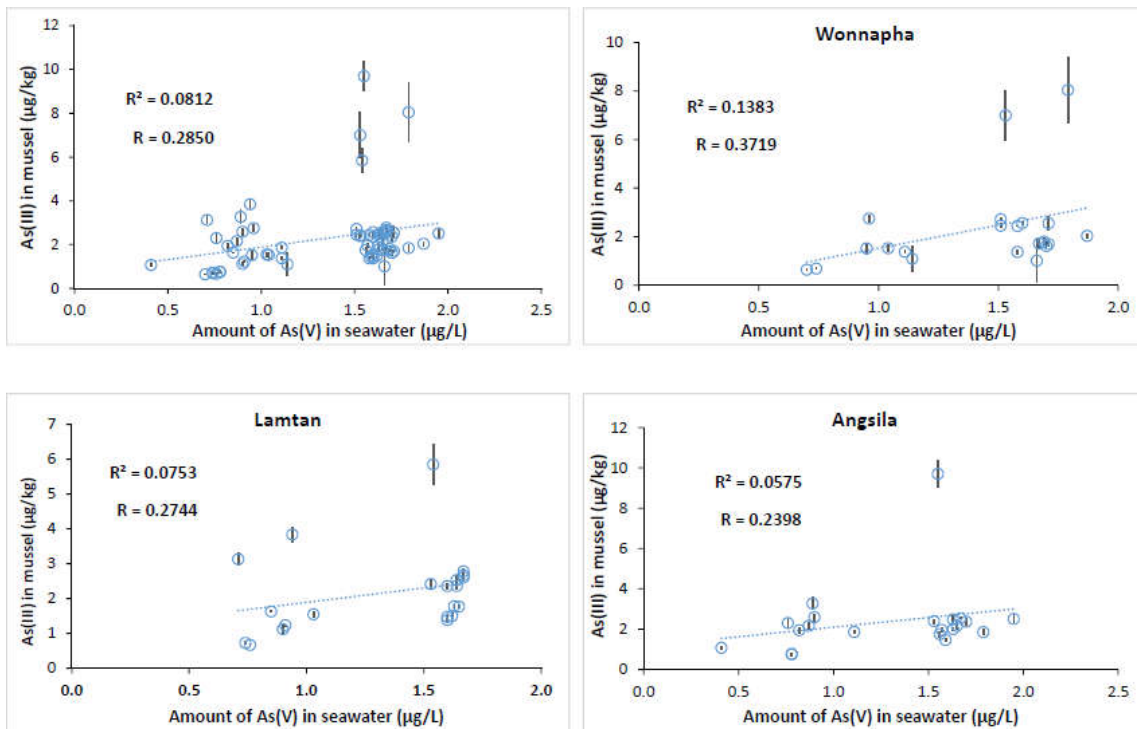
รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(III) ในน้ำทะเลและ As(V) ในหอยแมลงภู



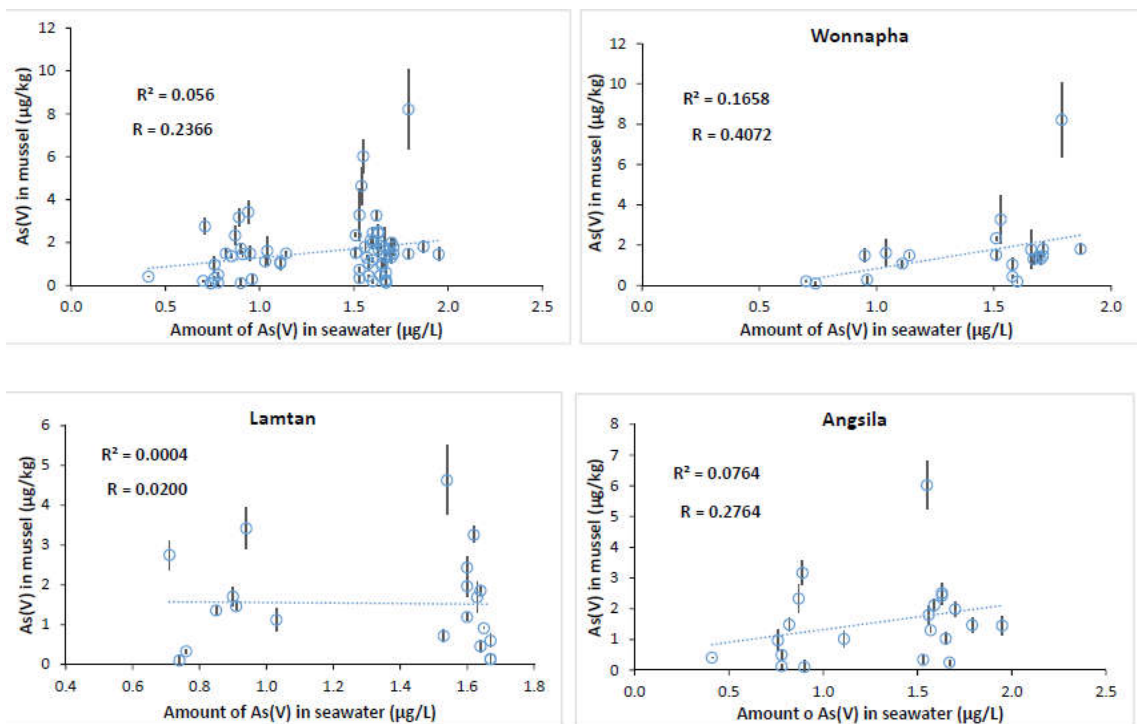
รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(III) ในน้ำทะเลและ MMA ในหอยแมลงภู่



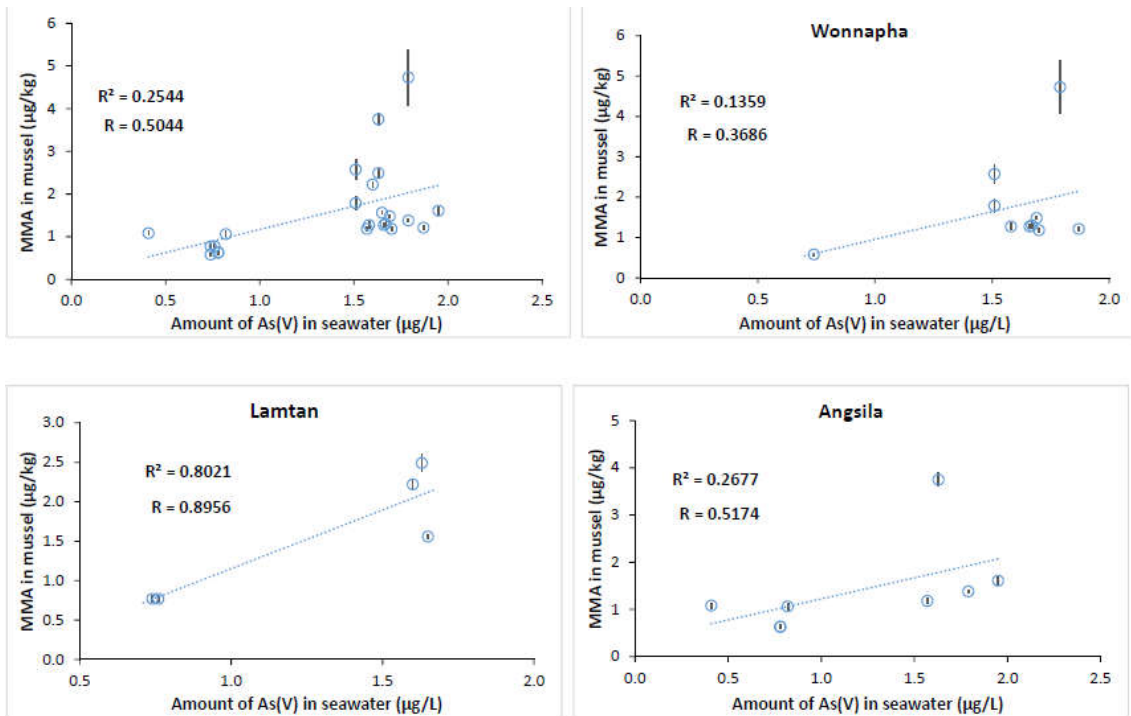
รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(III) ในน้ำทะเลและ DMA ในหอยแมลงภู่



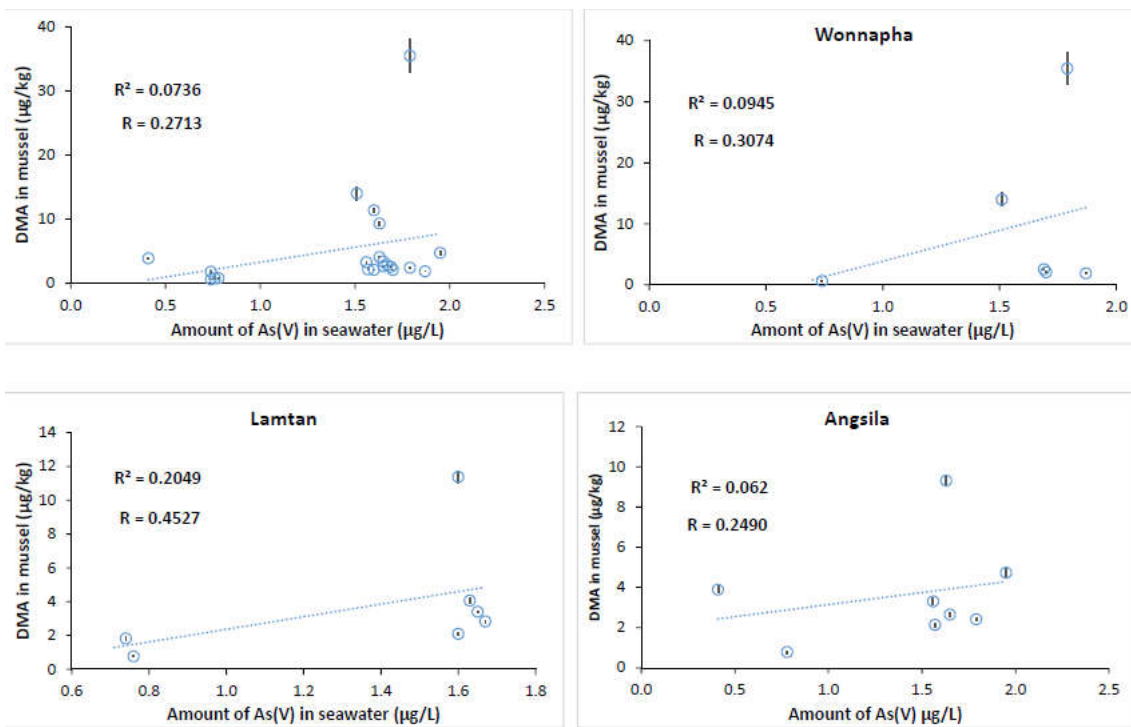
รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(V) ในน้ำทะเลและ As(III)ในหอยแมลงภู่



รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(V) ในน้ำทะเลและ As(V)ในหอยแมลงภู่



รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(V) ในน้ำทะเลและ MMA ในหอยแมลงภู่



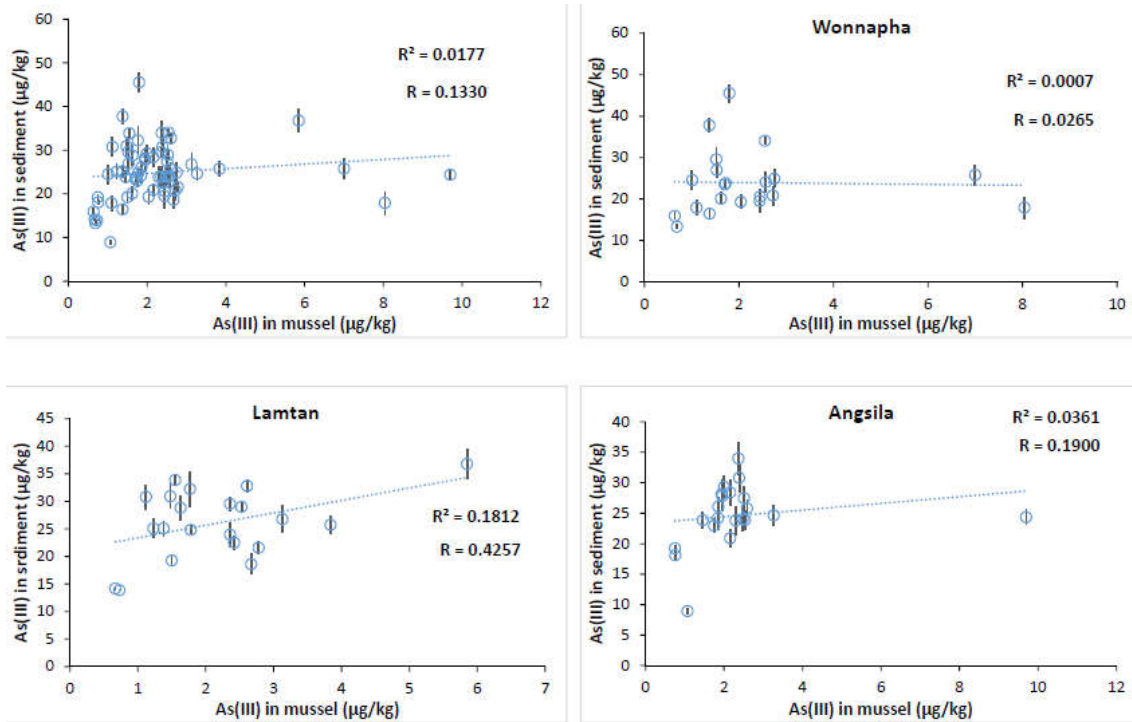
รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(V) ในน้ำทะเลและ DMA ในหอยแมลงภู่

ตารางที่ 17 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารประกอบสารหนูในตัวอย่างน้ำทะเลและหอยแมลงภู

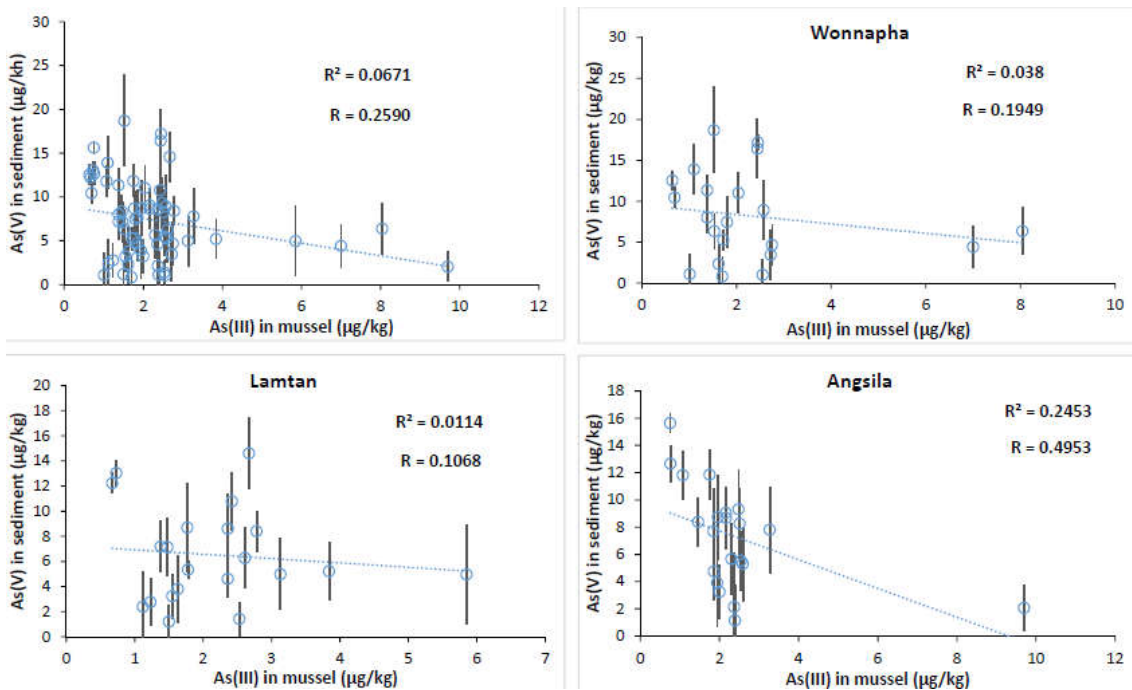
ความสัมพันธ์		r^2	r	ความหมาย
น้ำทะเล	หอยแมลงภู			
As(III)	As(III)	0.0034	0.0583	ไม่มีความสัมพันธ์
As(III)	As(V)	0.0004	0.0200	ไม่มีความสัมพันธ์
As(III)	MMA	0.0666	0.2581	มีความสัมพันธ์น้อย
As(III)	DMA	0.0199	0.1411	ไม่มีความสัมพันธ์
As(V)	As(III)	0.0812	0.2550	มีความสัมพันธ์น้อย
As(V)	As(V)	0.0560	0.2366	มีความสัมพันธ์น้อย
As(V)	MMA	0.2544	0.5044	มีความสัมพันธ์ปานกลาง
As(V)	DMA	0.0736	0.2713	มีความสัมพันธ์น้อย

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารประกอบสารหนูในหอยแมลงภูและตะกอนดิน

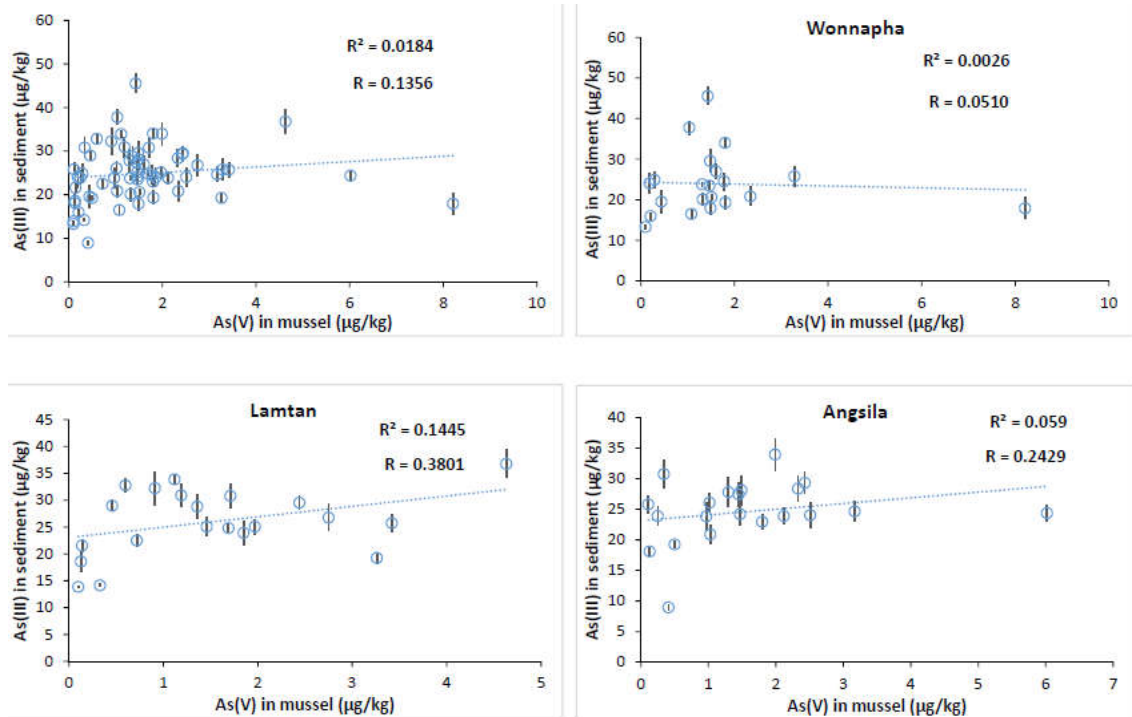
ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารประกอบสารหนูในหอยแมลงภูและตะกอนดินแสดงดังรูปที่ 29-36 และตารางที่ 18 ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างสารหนูในหอยแมลงภูและตะกอนดิน มีค่า r อยู่ในช่วง 0.0755-0.2590 ยกเว้นความสัมพันธ์ระหว่าง As(V) ในหอยแมลงภูกับ As(V) ในตะกอนดิน พบความสัมพันธ์น้อยโดยมีค่า r เท่ากับ 0.3063 แสดงว่าการสะสมของสารประกอบสารหนูในหอยแมลงภูไม่ได้มาจากตะกอนดินโดยตรง ซึ่งสอดคล้องกับค่า BAF ของสารประกอบสารหนูระหว่างตะกอนดินและหอยแมลงภู ซึ่งมีค่า 0.22-4.48 ค่าเฉลี่ย 1.07 ± 0.70 ($n=63$) ซึ่งให้เห็นว่าการสะสมของสารประกอบสารหนูไม่ได้มาจากตะกอนดินเช่นเดียวกัน ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Liu และคณะ (2017) และของ Velez และคณะ (2015) ที่รายงานค่า BAF ของสารประกอบสารหนูระหว่างตะกอนดินและหอยแมลงภู อยู่ในช่วง 1.20-3.19 และ 0.35-5.41 ตามลำดับ



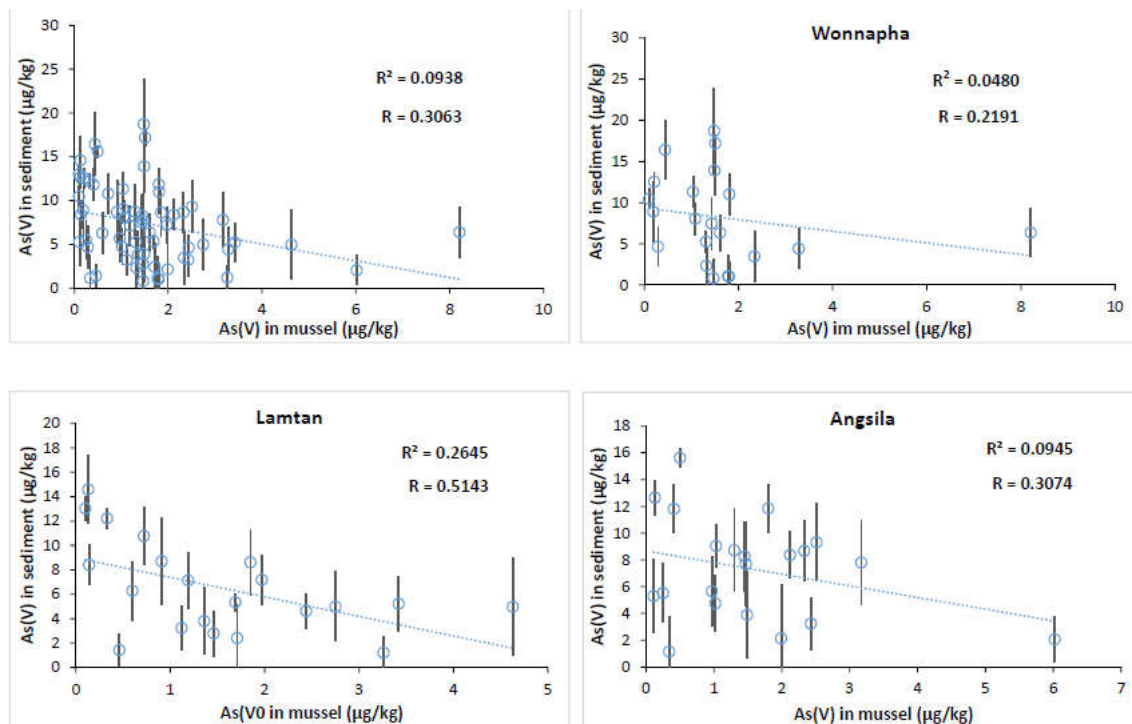
รูปที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(III) ในหอยแมลงภู่มุและตะกอนดิน



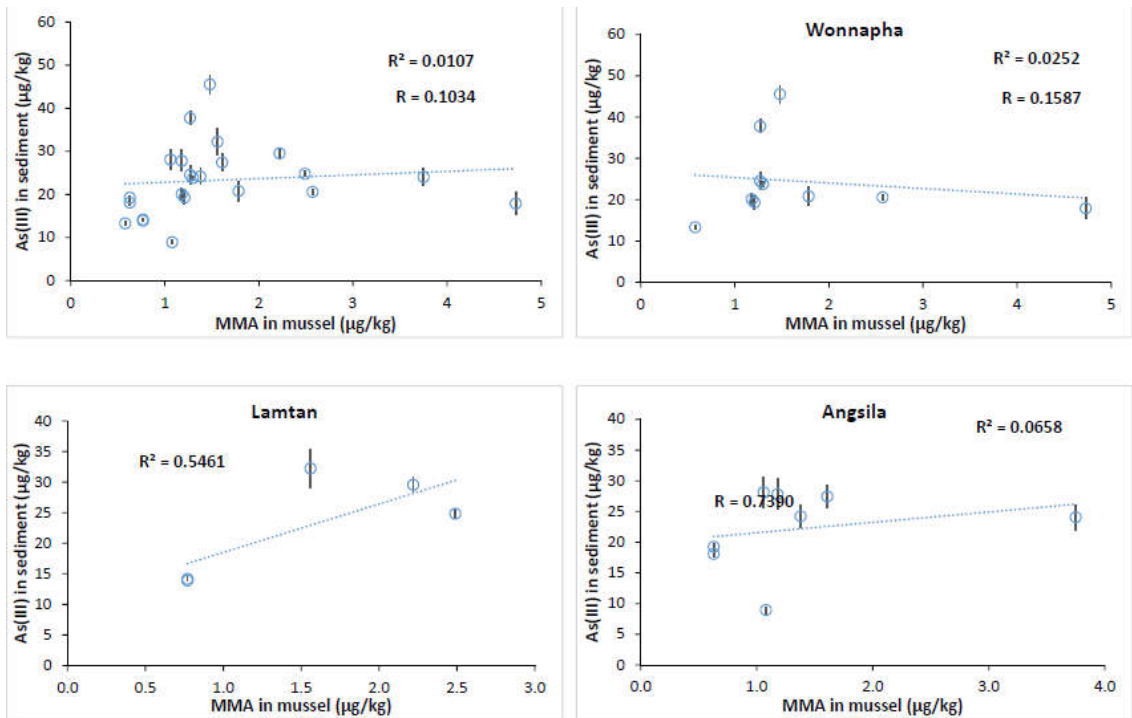
รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(III) ในหอยแมลงภู่มุและ As(V) ในตะกอนดิน



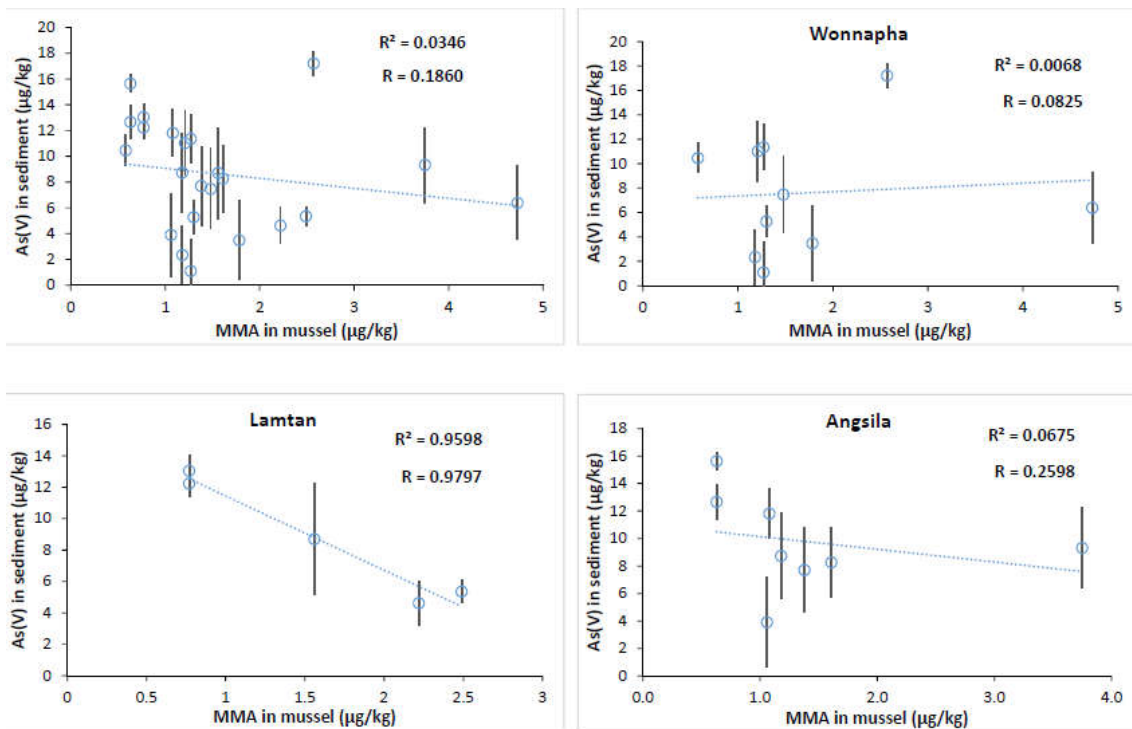
รูปที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(V) ในหอยแมลงภู่และ As(III) ในตะกอนดิน



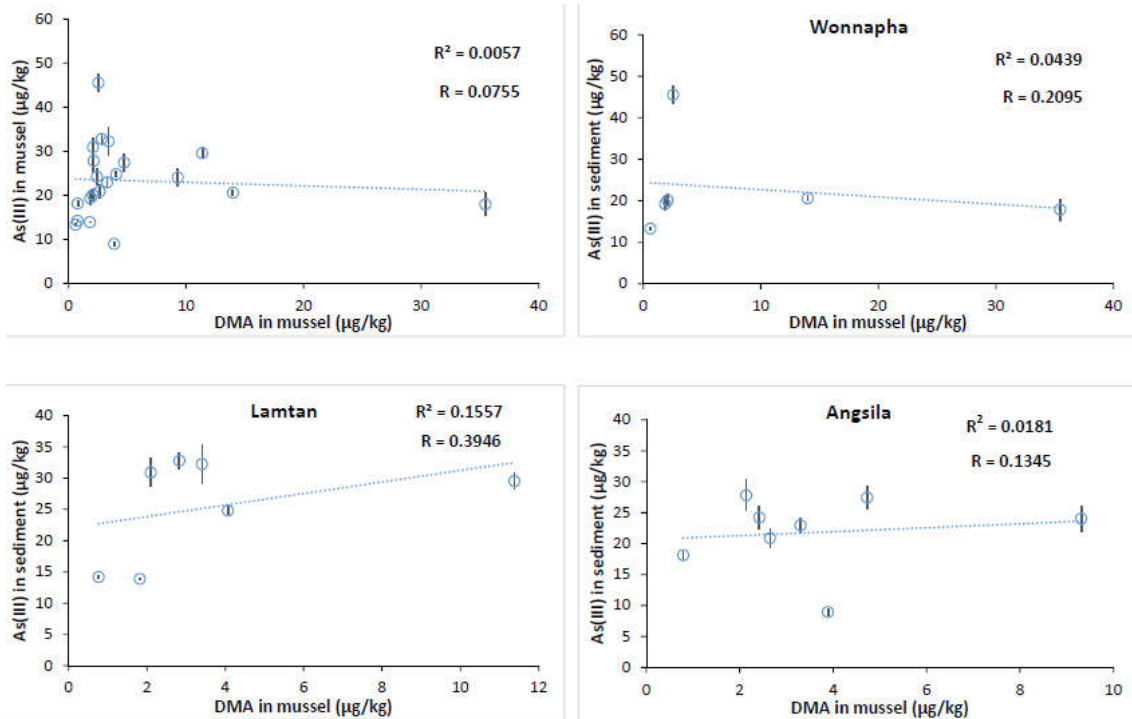
รูปที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่าง As(V) ในหอยแมลงภู่และ As(V) ในตะกอนดิน



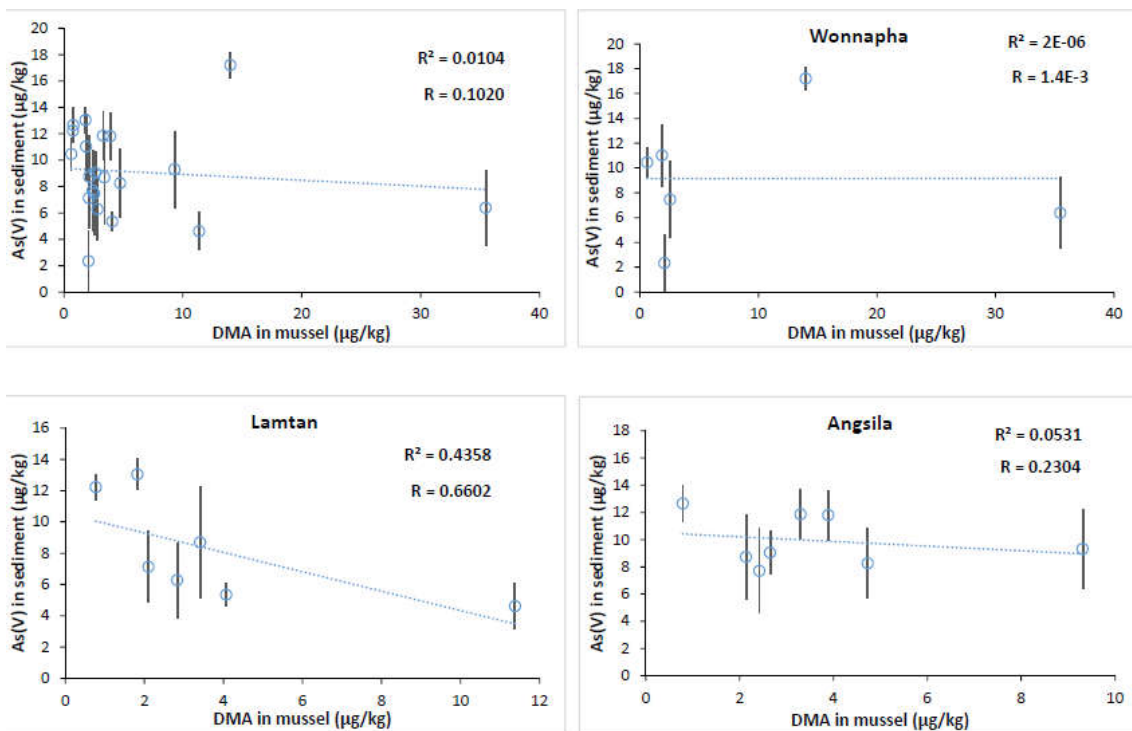
รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่าง MMA ในหอยแมลงภู่และ As(III) ในตะกอนดิน



รูปที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่าง MMA ในหอยแมลงภู่และ As(V) ในตะกอนดิน



รูปที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่าง DMA ในหอยแมลงภู่และ As(III) ในตะกอนดิน



รูปที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่าง DMA ในหอยแมลงภู่และ As(V) ในตะกอนดิน

ตารางที่ 18 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารประกอบสารหนูในตัวอย่างหอยแมลงภู่และตะกอนดิน

ความสัมพันธ์		r^2	r	ความหมาย
หอยแมลงภู่	ตะกอนดิน			
As(III)	As(III)	0.0177	0.1330	ไม่มีความสัมพันธ์
As(III)	As(V)	0.0671	0.2590	ไม่มีความสัมพันธ์
As(V)	As(III)	0.0184	0.1356	ไม่มีความสัมพันธ์
As(V)	As(V)	0.0938	0.3063	มีความสัมพันธ์น้อย
MMA	As(III)	0.0107	0.1034	ไม่มีความสัมพันธ์
MMA	As(V)	0.0346	0.1860	ไม่มีความสัมพันธ์
DMA	As(III)	0.0057	0.0755	ไม่มีความสัมพันธ์
DMA	As(V)	0.0104	0.0755	ไม่มีความสัมพันธ์

5. การประเมินความเสี่ยงของการได้รับสารประกอบสารหนู (Risk assessment)

การประเมินความเสี่ยงของการได้รับสารประกอบสารหนูประเมินโดยการเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของสารหนูจากค่ามาตรฐานต่างๆ (อภิปรายในผลการศึกษาปริมาณสารประกอบหนู หัวข้อ 3.1-3.3) และสำหรับตะกอนดินประเมินความเสี่ยงได้จากค่า contamination factor (CF), geo-accumulation index (I_{geo}), potential ecological risk index (EI) และ adverse effect index (AEI) ซึ่งคำนวณได้ดังสมการ (3)-(6) (Munoz-Barbosa และคณะ(2012) Liu และคณะ (2017) Liu และคณะ (2018) Zhou และคณะ(2018))

Contamination Factor

$$CF = C_i/C_o \quad (3)$$

เมื่อ CF คือ contamination factor

C_i คือ ความเข้มข้นของสารประกอบสารหนูในตะกอนดิน (mg/kg, dry weight)

C_o คือ ความเข้มข้นของสารประกอบสารหนูในพื้นที่ผิวเปลือกโลก มีค่า 2 mg/kg (Flora (2015))

Geo-accumulation index

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_i}{1.5 \times C_o} \right] \quad (4)$$

เมื่อ I_{geo} คือ geo-accumulation index

C_i คือ ความเข้มข้นของสารประกอบสารหนูในตะกอนดิน

C_o คือ ความเข้มข้นของสารประกอบสารหนูในพื้นที่ผิวเปลือกโลก

ค่า I_{geo} สามารถระบุระดับการปนเปื้อนได้ดังนี้

Class 0	$I_{geo} < 0$	ไม่เป็นมลภาวะ (practically unpolluted)
Class 1	$0 < I_{geo} < 1$	ไม่เป็นมลภาวะถึงมลภาวะปานกลาง (unpolluted to moderately polluted)
Class 2	$1 < I_{geo} < 2$	มลภาวะปานกลาง (moderately polluted)
Class 3	$2 < I_{geo} < 3$	มลภาวะปานกลางถึงสูง (moderately to strongly polluted)
Class 4	$3 < I_{geo} < 4$	มลภาวะสูง (strongly polluted)
Class 5	$4 < I_{geo} < 5$	มลภาวะสูงถึงรุนแรง (strongly to extremely polluted)
Class 6	$I_{geo} > 5$	มลภาวะรุนแรง (extremely polluted)

Potential ecological risk index

$$EI = \frac{I_f \times C_i}{C_0} \quad (5)$$

โดยที่ EI คือ Potential ecological risk index

I_f คือ toxic factor ของสารประกอบสารหนู มีค่าเท่ากับ 10

C_i คือ ความเข้มข้นของสารประกอบสารหนูในตะกอนดิน

C_0 คือ ความเข้มข้นของสารประกอบสารหนูในพื้นที่ผิวเปลือกโลก

ค่า EI สามารถประมาณค่าความเสี่ยงได้ดังนี้

$EI < 40$	ความเสี่ยงน้อย (low risk)
$40 \leq EI < 80$	ความเสี่ยงปานกลาง (moderate risk)
$80 \leq EI < 160$	ความเสี่ยงอย่างมีนัยสำคัญ (considerate risk)
$160 \leq EI < 320$	ความเสี่ยงสูง (high risk)
$EI \geq 320$	ความเสี่ยงสูงมาก (extreme risk)

Adverse effect index

$$AEI = \frac{C_i}{TEL} \quad (6)$$

โดยที่ AEI คือ adverse effect index

C_i คือ ความเข้มข้นของสารประกอบสารหนูในตะกอนดิน

TEL คือ threshold effect level ของสารประกอบสารหนู มีค่า (5.9 mg/kg) (Burton (2002))

ค่า AEI สามารถประเมินการเกิด adverse effect ได้ดังนี้

$AEI < 1$ มีปริมาณสารประกอบสารหนูในตะกอนดินน้อยและทำให้เกิด adverse effect ได้ยาก

$AEI \geq 1$ มีปริมาณสารประกอบสารหนูในตะกอนดินสูงและทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตได้

ผลการประเมินความเสี่ยงของสารประกอบสารหนูในตัวอย่างตะกอนดิน แสดงดังตารางที่ 19 พบว่าค่า CF อยู่ในช่วง 0.02-0.04 ค่าเฉลี่ย 0.03±0.00 แสดงถึงการปนเปื้อนของสารประกอบสารหนูในตะกอนดินน้อย ค่า I_{geo} มีค่าอยู่ในช่วง (-6.53) – (-5.15) ค่าเฉลี่ย -5.90 ± 0.27 แสดงว่ามีเกิดมลภาวะอันเนื่องมาจากสารประกอบสารหนู (Class 0, $I_{geo} < 0$) ค่า EI อยู่ในช่วง 0.16-0.42 ค่าเฉลี่ย 0.26 ± 0.05 แสดงว่าความเสี่ยงของอันตรายอันเนื่องมาจากสารประกอบสารหนูมีน้อย ($EI < 40$) และค่า AEI อยู่ในช่วง $0.56 \times 10^{-2} - 1.43 \times 10^{-2}$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าสารประกอบสารหนูในตะกอนดินไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ (adverse effect) ค่าข้อมูลการประเมินความเป็นพิษและความเสี่ยงทำให้สามารถสรุปได้ว่าการปนเปื้อนของสารประกอบสารหนูในตะกอนดินในพื้นที่ที่ศึกษาไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษและความเสี่ยงต่อสุขภาพมนุษย์

ตารางที่ 19 การประเมินความเสี่ยงของสารประกอบสารหนูในตัวอย่างตะกอนดิน

สถานี	สารประกอบสาร หนูในตะกอนดิน $\times 10^{-2}$ (mg/kg)	CF	I_{geo}	EI	AEI ($\times 10^{-2}$)
หาดวอนนภา	3.57 – 8.43	0.02 – 0.04	-6.39 - -5.15	0.18 – 0.42	0.60 – 1.43
แหลมแท่น	3.26 – 6.64	0.02 – 0.03	-6.53 - -5.50	0.16 – 0.33	0.55 – 1.13
อ่างศิลา	3.30 – 5.89	0.02 – 0.03	-6.51 - -5.67	0.16 – 0.29	0.56 – 0.99
ช่วง	3.26 – 8.43	0.02 – 0.04	-6.53 - -5.15	0.16 – 0.42	0.56 – 1.43
ค่าเฉลี่ย ± SD.	5.12 ± 0.97	0.03 ± 0.00	-5.90 ± 0.27	0.26 ± 0.05	0.87 ± 0.16

สำหรับการประเมินความเสี่ยงของสารประกอบสารหนูในตัวอย่างหอยแมลงภู่ จะประเมินการได้รับสารประกอบสารหนูโดยมนุษย์ (Muñoz-Barbosa และคณะ (2017)) คำนวณตามสมการ (7)-(9) ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆเพื่อประเมินความเสี่ยงของสารประกอบสารหนูในตัวอย่างหอยแมลงภู่แสดงดังตารางที่ 20

Estimated daily intake

$$ED_{iAs} = \frac{C_{iAs} \times DIR}{BW} \quad (7)$$

โดยที่ ED_{iAs} คือ estimated daily intake สำหรับสารหนูอนินทรีย์ ($\mu\text{g}/\text{BW kg}\cdot\text{day}$)

C_{iAs} คือ ความเข้มข้นของสารหนูอนินทรีย์ในตัวอย่างหอยแมลงภู่

DIR คือ อัตราการบริโภคอาหารทะเลต่อ 1 วัน มีค่า 54 กรัมต่อวัน (FAO (2016) Gao และคณะ (2018))

BW คือ น้ำหนักตัวเฉลี่ยของคนไทยมีค่า 60 kg (Rangkadilok และคณะ (2015))

The Hazard Quotients

$$THQ_{iAs} = \frac{EDI_{iAs}}{RfD_{iAs}} \times \frac{EF \times ED}{AT} \times 10^{-3} \quad (8)$$

- โดยที่ THQ_{iAs} คือ the hazard quotients ของสารหนูอินทรีย์
 RfD_{iAs} คือ ปริมาณมาตรฐานของสารหนูอินทรีย์ที่กินเข้าไปต่อวัน (oral reference dose) มีค่า 3.0×10^{-4} mg/BW kg.day (USEPA (2015))
 EF คือ ความถี่ที่ได้รับสาร (365 วันต่อปี)
 ED คือ ระยะเวลาที่ได้รับสาร (70 ปี)
 AT คือ ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ได้รับสารหนูอินทรีย์ มีค่าเท่ากับ 25,550 วัน

Carcinogenic risk

$$CR_{iAs} = EDI_{iAs} \times SF_{iAs} \quad (9)$$

- โดยที่ CR_{iAs} คือ ความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็ง (carcinogenic risk)
 EDI_{iAs} คือ estimated daily intake สำหรับสารหนูอินทรีย์ ($\mu\text{g}/\text{BW kg.day}$)
 SF_{iAs} คือ cancer slope factor มีค่าเท่ากับ 1.5×10^{-3} BW kg.day/ μg (USEPA (2015))

ตารางที่ 20 Estimated daily intake และ potential health risk จากการบริโภคหอยแมลงภูใน การศึกษา (n=63)

สถานี	iAs (mg/kg, ww) ($\times 10^{-3}$)	EDI ($\times 10^{-3}$) ($\mu\text{g}/\text{BWkg day}$)	THQ_{iAs} ($\times 10^{-3}$)	CR_{iAs} ($\times 10^{-5}$)
หาดวอนนภา	1.46 – 30.13	1.32 – 27.12	4.39 – 90.39	0.4 – 9.2
แหลมแท่น	1.54 – 19.43	1.38 – 17.49	4.62 – 58.30	0.5 – 6.0
อ่างศิลา	1.65 – 29.15	1.48 – 26.23	4.95 – 87.44	0.5 – 8.9
ช่วง	1.46 – 30.13	1.32 – 27.12	4.39 – 90.39	0.4 – 9.2
ค่าเฉลี่ย \pm SD.	7.16 ± 5.24	6.44 ± 4.72	21.47 ± 15.73	2.2 ± 1.6

ผลการศึกษาได้ค่า THQ_{iAs} มีค่าอยู่ในช่วง 4.39×10^{-3} – 90.39×10^{-3} ค่าเฉลี่ยมีค่า $21.47 \times 10^{-3} \pm 15.73 \times 10^{-3}$ และค่า CR_{iAs} มีค่าอยู่ในช่วง 0.20×10^{-5} – 4.07×10^{-5} ค่าเฉลี่ยมีค่า $2.2 \times 10^{-5} \pm 1.6 \times 10^{-5}$ ซึ่ง ทั้ง 2 พารามิเตอร์มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดโดย USEPA ที่กำหนดค่า $THQ < 1$ และ $CR < 1 \times 10^{-4}$ ซึ่งสามารถชี้ให้เห็นว่าการปนเปื้อนของสารประกอบสารหนูในหอยแมลงภูไม่มีความเสี่ยงต่อ สุขภาพมนุษย์

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการปนเปื้อนของสารประกอบสารหนู 4 ชนิด ได้แก่ สารหนูอนินทรีย์ 2 ชนิดคือ As(III) และ As(V) และสารหนูอินทรีย์ 2 ชนิด ได้แก่ monomethylarsenic (MMA) และ dimethylarseni (DMA) ในตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ภาคตะวันออก โดยได้ดำเนินการหาวิธีการวิเคราะห์สารประกอบสารหนูโดยใช้เทคนิค purge and trap ควบคู่กับเทคนิค Gas chromatography-mass spectrometry ซึ่งเป็นวิธีที่มีสภาพไวสูงและเป็นเทคนิคที่สามารถตรวจสอบชนิดของสารประกอบสารหนูได้ นอกจากนี้ยังได้พัฒนาวิธีการสกัดสารประกอบสารหนูและเตรียมตัวอย่างโดยเทคนิค ultrasonic extraction เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์สารประกอบสารหนู ในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมได้ ผลการวิจัยได้สภาวะการวิเคราะห์สารประกอบสารหนูด้วยเทคนิค ultrasonic extraction และ เทคนิค purge and trap gas chromatography mass spectrometry แสดงดังตารางที่ 21 และได้ตรวจสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์ที่ได้พัฒนาขึ้นตามวิธีมาตรฐานซึ่งได้ผลอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แสดงผลดังตารางที่ 22

เมื่อได้วิธีการวิเคราะห์สารประกอบสารหนูในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมแล้ว ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการที่ได้พัฒนาขึ้นไปวิเคราะห์สารประกอบสารหนูในตัวอย่าง น้ำทะเล ตะกอนดิน หอยแมลงภู่และแพลงค์ตอน โดยการเก็บตัวอย่างในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี เก็บตัวอย่างทุก 1 เดือนเป็นระยะเวลา 2 ปี ตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2558 ถึงเดือน กรกฎาคม 2560 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบสารหนู 4 ชนิดในตัวอย่างสิ่งแวดล้อม สรุปดังตารางที่ 23 นอกจากนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนรูปสารประกอบสารหนูในสิ่งแวดล้อมพบว่าสารประกอบสารหนูที่อยู่ในน้ำทะเลจะเป็นสารหนูอนินทรีย์ชนิด As(V) และมีอยู่ตะกอนดินจะเกิดการเปลี่ยนรูปเป็นสารหนูอนินทรีย์ชนิด As(III) ได้และเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของสารประกอบสารหนูเมื่ออยู่ในตะกอนดิน และพบว่าในตัวอย่างสิ่งมีชีวิตคือหอยแมลงภู่สามารถเปลี่ยนสารประกอบสารหนูอนินทรีย์เป็นสารประกอบสารหนูอินทรีย์คือ MMA และ DMA ได้อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบสารหนูกับค่ามาตรฐานจากกรมควบคุมมลพิษ และการประเมินพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดมลพิษและผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ตามหลักการสากล พบว่าปริมาณสารประกอบสารหนูที่ตรวจพบมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานแสดงให้เห็นว่าปริมาณสารประกอบสารหนูที่ตรวจพบในสิ่งแวดล้อมบริเวณจังหวัดชลบุรี ยังไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 21 สภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์สารประกอบสารหนู 4 ชนิดในสิ่งแวดล้อม

ปัจจัย	สภาวะที่เหมาะสม
<u>การสกัดโดยอัลตราโซนิก</u>	
ตัวทำละลายที่ใช้สกัด	0.01M กรดฟอสฟอริก 30 mL
เวลาที่ใช้สกัด	60 นาที
วิธีการสกัด	แบบครั้งเดียว
การเติมสาร antifoam	1% 0.4 mL
<u>GC-MS</u>	
คอลัมน์	DB5-MS (60m x0.32 mm i.d., 1 micron film thickness)
แก๊สพา	He (อัตราการไหล 1.5 mL/min)
Temperature program:	50°C (0.5 min) เพิ่มเป็น 100°C (20 °C/min) และเพิ่มเป็น 200 °C (50 °C/min) คงที่ 3 min
Mass detector	SIM mode m/z 75, 77, and 78 สำหรับ As(III) m/z 76, 90, and 92 สำหรับ MMA m/z 75, 90, and 106 สำหรับ DMA
<u>การเตรียมอนุพันธ์ไฮไดรด์ด้วย NaBH₄</u>	
ชนิดกรด	HNO ₃
pH ของสารละลาย	1.0 HNO ₃ (0.1M)
ความเข้มข้น NaBH ₄	0.10%
<u>การจำแนกชนิดสารประกอบสารหนูด้วยการเตรียมอนุพันธ์ไฮไดรด์</u>	
การวิเคราะห์สารหนู As(III) ชนิดเดียว	0.01 M กรดไนตริก
การวิเคราะห์สารหนูอนินทรีย์รวม MMA และ DMA	0.50 M กรดไนตริก
<u>Purge and trap</u>	
purge time	1.00 นาที
desorp flow rate	350 mL/min
desorp time	2.00 min
desorp temperature	230 °C
transfer line temperature	180 °C
bake time	3 นาที

ตารางที่ 22 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์

เทอมที่ตรวจสอบ	ค่าที่ได้		
	As(III)	MMA	DMA
ขีดจำกัดการตรวจวัด ($\mu\text{g/L}$)	0.065	0.015	0.031
ขีดจำกัดการหาปริมาณ ($\mu\text{g/L}$)	0.217	0.050	0.105
กราฟมาตรฐาน			
สมการเส้นตรง	$y = 4171x - 2226$	$y = 9641-434$	$y = 8929 - 1487$
R^2	0.9958	0.9946	0.9926
ความเที่ยงภายในวันเดียว (n = 9)			
พื้นที่ได้พิค (%RSD)	4.74	4.24	4.51
เวลารีเทนชัน (%RSD)	0.03	0.01	0.33
ความเที่ยงระหว่างวัน (n = 9)			
พื้นที่ได้พิค (%RSD)	2.85	4.66	3.53
เวลารีเทนชัน (%RSD)	0.59	0.04	0.87
ร้อยละการได้กลับคืน	97.61 ± 4.14	100.69 ± 5.36	99.44 ± 3.65

ตารางที่ 23 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบสารหนู 4 ชนิดในตัวอย่างน้ำทะเล ตะกอนดิน หอยแมลงภู่และแพลงค์ตอน

ตัวอย่าง		สารประกอบสารหนู			
		As(III)	As(V)	MMA	DMA
น้ำทะเล	จำนวนที่พบ	9	63	ไม่พบ	ไม่พบ
	ปริมาณที่พบ ($\mu\text{g/L}$)	0.52-2.45 (0.82 ± 0.63)	0.41-1.95 (1.35 ± 0.40)	-	-
ตะกอนดิน	จำนวนที่พบ	63	63	ไม่พบ	ไม่พบ
	ปริมาณที่พบ ($\mu\text{g/kg}$)	8.92-45.75 (25.32 ± 6.50)	0.64-18.22 (7.18 ± 4.45)	-	-
หอยแมลงภู่	จำนวนที่พบ	63	63	23	21
	ปริมาณที่พบ ($\mu\text{g/kg}$)	0.64-9.70 (2.28 ± 1.61)	0.10-8.21 (1.58 ± 1.41)	0.58-4.73 (1.59 ± 1.01)	0.62-35.48 (5.34 ± 7.74)
แพลงค์ตอน		ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ

ข้อเสนอแนะและการนำไปใช้ประโยชน์ของงานวิจัย

งานวิจัยการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบสารหนูในสิ่งแวดล้อม สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบสารหนูในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมชนิดอื่นๆ ได้ โดยการวิเคราะห์ปริมาณของสารประกอบสารหนูแต่ละชนิด สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการประเมินความเป็นพิษที่แท้จริงต่อผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ได้ เนื่องจากความเป็นพิษของสารประกอบสารหนูขึ้นกับชนิดหรือฟอร์มของสารประกอบสารหนูมากกว่าการรายงานผลในรูปปริมาณสารหนูรวมทั้งหมด

อย่างไรก็ตามการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปของสารประกอบสารหนูสิ่งแวดล้อมในงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการบ่งบอกการเปลี่ยนความเป็นพิษของสารประกอบสารหนูที่เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อมต่างๆ เช่น ในน้ำทะเล การสะสมและเปลี่ยนรูปในตะกอนดิน รวมถึงการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบสารหนูอินทรีย์ที่เกิดในสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในสิ่งแวดล้อม ซึ่งผลการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาการเฝ้าระวังความเป็นพิษของสารประกอบสารหนูในสิ่งแวดล้อมต่างๆ ได้ นอกจากนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนชนิดและความเป็นพิษของโลหะชนิดอื่นๆ ในสิ่งแวดล้อมได้เช่น โปรท และตะกั่ว เป็นต้น

รายงานสรุปการเงิน
เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย 2559A10802024 สัญญาเลขที่ 53/2559
โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ. ศ. 2559
มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ การศึกษาการจำแนกชนิดของสารประกอบสารหนูในสิ่งแวดล้อม

(The Study of Arsenic Speciation in Environment)

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน ดร. อภิญา นวคุณ

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน 2560 ถึงวันที่ 31 กรกฎาคม 2561

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี 3 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน 2561

รายรับ

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 (50%) 275,000.00 บาท เมื่อวันที่ 29 ตุลาคม 2558.
 งวดที่ 2 (40%) 220,000.00 บาท เมื่อวันที่ 23 กรกฎาคม 2561
 งวดที่ 3 (10%) 55,000.00 บาท เมื่อวันที่
 รวม 550,000.00 บาท

รายจ่าย

รายการ	งบประมาณที่ตั้งไว้	งบประมาณที่ใช้จริง	จำนวนเงินคงเหลือ
ค่าจ้างเก็บตัวอย่าง	87,000.00	87,000.00	0.00
ค่าตอบแทนผู้วิจัยและผู้ช่วยวิจัย	208,000.00	208,000.00	0.00
ค่าใช้สอย	40,000.00	40,000.00	0.00
ค่าวัสดุ	160,000.00	160,000.00	0.00
ค่าบริหารโครงการจ่ายให้ มหาวิทยาลัย 10%	55,000.00	55,000.00	0.00
รวม	550,000.00	550,000.00	0.00

()

ดร. อภิญา นวคุณ
 หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

บรรณานุกรม

กรมควบคุมมลพิษ ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 27 (พ.ศ. 2549) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทะเล 1 กุมภาพันธ์ 2550

Anjos V. E. D., Marco E. D. C. และ Grassi, M. T. (2012). Biogeochemical behavior of arsenic species at Paranaguá estuarine complex, southern, Brazil. *Aquatic Geochemistry*, 18, 407-420.

Becker E. M., Dessuy M. B., Boschetti W., Vale M. G. R., Ferreira S. L. C. and Welz, B. Development of an analytical method for the determination of arsenic in gasoline samples by hydride generation-graphite furnace atomic absorption spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B*, 71-72 (2012), 102-106.

Britta P-F., Corinne L., Jorg M., Broder J. M., Darrel K. N., Mark W. S., Speciation of volatile arsenic at geothermal features in Yellowstone national park. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70 (2006), 2480-2491.

Burton G. A. (2002). Sediment quality criteria in used around the world. *Limnology*, 3, 65-75.

Cabon J. Y. and Cabon N. Speciation of major arsenic species in seawater by flow injection hydride generation atomic absorption spectrometry. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 368(2000), 484-489.

Campillo N., Penalver R., Lopez-Garcia V. P., Hernandez-Cordoba M., Speciation of arsenic using capillary gas chromatography with atomic emission detection. *Talanta* 77 (2008) 793-799.

Chen C. Y. และ Folt C. L. (2000). Bioaccumulation and diminution of arsenic and lead in a freshwater food web. *Environmental Science and Technology*, 34, 3878-3884.

Daniel R. K., and Joseph H. A. III, Identification of dimethylchloroarsine near a former herbicide factory by headspace solid-phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry. *Chemosphere* 48 (2002), 1003-1008.

Daniel R. K., and Joseph H. A. III, Solid phase microextraction method for gas chromatography with mass spectrometric and pulsed flame photometric detection: studies of organoarsenical speciation. *Journal of Chromatography A* 918 (2001), 169-175.

Ellwood M. J. และ Maher W. A. Measurement of arsenic species in marine sediments by high-performance liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 477(2003), 279-291.

Flora S. J. S. (2015). Arsenic: Chemistry, Occurrence, and Exposure. In: Flora S. J. S. (ED.), *Handbook of arsenic toxicology*, ISBN: 978-012-419-955-2, Academic press, Available from : <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-418688-0.00001.0>.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2016). The state of world fisheries and aquaculture, United Nations, Available from: www.fao.org/3/a-i5555e.pdf.

Gao Y., Baisch P., Mirleae N., Júnior F. M. R. D. F., Larebeke N. V., Baeyens W. และ Leermakers M. (2018). Arsenic speciation in fish and shellfish from the North Sea (Southern bight) and Açú Port area (Brazil) and health risks related to seafood consumption. *Chemosphere*, 191, 89-96.

Gomez-Ariza J. L., Sanchez-Fodaz D., Giraldez I., and Morales E., A comparison between ICP-MS and AFS detection for arsenic speciation in environmental samples. *Talanta*, 51(2000), 257-268.

Gong Z., Lu X., Ma M., Watt C., and Le X. C. Arsenic speciation analysis. *Talanta* 58 (2002) 77-96.

Hagiwara H., Akai J., Terasaki K., Yoshimura T. และ Luo H. Black colored sandy sediments caused by bacterial action, and the mechanism for arsenic enrichment of groundwater in Inner Mongolia. *Applied Geochemistry*, 26(2011), 380-393.

Hong S., Choi S. D. และ Khim J. S. (2017). Arsenic speciation in environmental multimedia samples from the Youngsan river estuary, Korea: A comparison between freshwater and saltwater. *Environmental Pollution*, 1-9.

Imran A., Hassan Y., and Aboul E., Speciation of arsenic and chromium metal ions by reversed phase high performance liquid chromatography. *Chemosphere* 48 (2002), 275-278.

Kalia K. and Khambhojia D. K.. Arsenic contents and its biotransformation in the marine environment. 2015, Handbook of arsenic toxicology, 2015 ISBN: 978-012-419-955-2, Academic press, Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-418688-0.00028-9>.

Kazi F. A., Zuliang C., Lester S., David D., and Ravi N., Speciation of arsenic in ground water samples: A comparative study of CE-UV, HG-AAS and LC-ICP-MS. *Talanta* 68 (2005), 406-415.

Kosters J., Diaz-Bone R. A., Planer-Friedrich B., Rothweiler B., Hirner A. V., Identification of organic arsenic, tin, antimony and tellurium compounds in environmental samples by GC-MS. *Journal of Molecular structure* 661-662 (2003), 347-356.

Krupp E. M., Johnson C., Rechsteiner C., Moir M., Leong D., and Feldmann J. Investigation into the determination of trimethylarsine in natural gas and its partitioning into gas and condensate phases using (cryotrapping)/gas chromatography coupled to inductively coupled plasma mass spectrometry and liquid/solid sorption techniques. *Spectrochimica Acta Part B* 62 (2007), 970-977.

Leermakers M., Baeyens W., De Gieter M., Smedts B., Meert C., De Bisschop H. C., Morabito R., Quevauviller P. Toxic arsenic compounds in environmental samples: speciation and validation. *Trends in Analytical chemistry* 25 (2006), 1-10.

Leufroy A., Noël L., Dufailly V., Beauchemin D., และ Guérin T. Determination of seven arsenic species in seafood by ion exchange chromatography coupled to inductively coupled plasma-mass spectrometry following microwave assisted extraction: Method validation and occurrence data. *Talanta*, 83(2011), 770–779.

Lihareva N. Arsenic solubility, mobility and speciation in the deposits from a copper production waste storage. *Microchemical Journal* 81 (2005), 177-183.

Liu J., Cao L. และ Don S. (2017). Bioaccumulation of heavy metals and health risk assessment in tree benthic

Liu Q., Wang F., Meng F., Jiang L., Li G. และ Zhou R. (2018). Assessment of metal contamination in estuarine surface sediments from Dongying city, China: use of a modified ecological risk index. *Marine Pollution Bulletin*, 126, 293-303.

Mamindy-Pajany Y., Hurel C., G eret F., Galgani F., Battaglia-Brunet F., Marmier, N. และ Rom eo M. Arsenic in marine sediments from French Mediterranean ports: Geochemical partitioning, bioavailability and ecotoxicology. *Chemosphere*, 90(2013), 2730-2736.

Millward, G. E., Kitts, H. J., Ebdon, L., Allen, J. I. และ Morris A. W. (1997). Arsenic in the Thame plume, UK. *Marine Environmental Research*, 44, 51-57.

Mu noz-Barbosa A., Guti errez-Galindo E. A., Daessl e L. W., Orozco-Borb on M. V. และ Segovia-Zavala J. A. (2012). Relationship between metal enrichments and a biological adverse effects index in sediments from Todos Santos Bay, northwest coast of Baja California, M exico. *Marine Pollution Bulletin*, 64, 405-409.

Mustafa T., Demirphan C. Durali M. and Mustafa S. Arsenic speciation in natural water samples by coprecipitation-hydride generation atomic absorption spectrometry combination. *Talanta* 78 (2009), 52-56.

Nakazato T., Tao H., Taniguchi T., and Isshiki K., Determination of arsenite, arsenate and monomethylarsonic acid in seawater by ion-exclusion chromatography combined with inductively coupled plasma mass spectrometry using reaction cell and hydride generation techniques. *Talanta*, 58(2002), 121-132.

Nomngongo P. N. and Ngila J. C. Multivariate optimization of dual-bed solid phase extraction for preconcentration of Ag, Al, As and Cr in gasoline prior to inductively coupled plasma optical emission spectrometric determination. *Fuel*, 139(2015), 285-291.

Ozgur D. U., Mustafa T., Durali M. and Mustafa S., Determination of As(III) and As(V) species in some natural water and food samples by solid-phase extraction on

Streptococcus pyogenes immobilized on sepabeads SP70 and hydride generation atomic absorption spectrometry. *Food and Chemical Toxicology* 48 (2010), 1393-1398.

Preter, de B., Staeyen, van G., Esser D., Rutgeerts, P., Verbake, K. Development of a screening method to determine the pattern of fermentation metabolites in faecal samples using on-line purge-and-trap gas chromatographic-mass spectrometric analysis. *J. Chromatogr. A.* 1216(2009), 1476-1483.

Rangkadilok N., Siripriwon P., Nookabkaew S., Suriyo T. และ Satayavivad J. (2015). Arsenic, cadmium, and manganese levels in shellfish from Mab Ta Phut, an industrial area in Thailand, and potential toxic effects on human cells. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 68, 169-180.

Roland A. D.-R., Maren R., Simone A., Bianca K., Bernd M., Klaus K., Renatus W., Alfred V. H., Investigation of biomethylation of arsenic and tellurium during composting. *Journal of Hazardous Materials* 189(2011), 653-659.

Ruixue C. Benjamin W. S., James D. W., Mike S. T., Gina K., and Lena Q. M. Arsenic speciation in Chinese brake fern by ion-pair high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectroscopy. *Analytica Chimica Acta* 504 (2004), 199-207.

Ruttens A., Blanpain A. C., Temmerman L. D., และ Waegeneers N. Arsenic speciation in food in Belgium Part 1: Fish, molluscs and crustaceans. *Journal of Geochemical Exploration*, 121(2012), 55-61.

Salaün P., Britta P. F., and Constant M. G. V. G., Inorganic arsenic speciation in water and seawater by anodic stripping voltammetry with as gold microelectrode. *Analytica Chimica Acta*, 585(2007), 312-322.

Sebastien N. R., Vincent L., Philippe C., Nicolas M., Alfred C., and Jean-Paul B., Speciation of five arsenic species (arsenite, arsenate, MMAA^V, DMAA^V, and AsBet) in different kind of water by HPLC-ICP-MS. *Chemosphere* 66 (2007), 738-745.

Sharma V. K. and Sohn M., Aquatic arsenic: Toxicity, speciation, transformations, and remediation. *Environment International*, 35(2009), 743-759.

Shona M., Joana S., Roberto M. and Philippe Q., The speciation of arsenic in biological tissues and the certification of reference materials for quality control. *Trends in Analytical Chemistry* 22 (2003), 191-209.

Tomlinson M. S. และ Carlo E. H. D. Occurrence and possible sources of arsenic in seafloor sediments surrounding sea-disposed munitions and chemical agents near Oahu, Hawaii. *Deep Sea Research II*, 128(2016), 70-84.

USEPA. (2015). Exposure Factors Handbook. Available from: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/efh-chapter10.pdf>.

Velez C., Figueira E., Soanes A. และ Freitas R. (2015). Spatial distribution and bioaccumulation patterns in the tree clam populations from a low contaminated ecosystem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 155, 114-125.

Wang Y., Liu R. H., Zhang Y.Q., Cui X. Q., Tang A. K. และ Zhang L. J. (2016). Transport of heavy metal in the Huanghe river estuary, China. *Environmental Earth Science*, 75:288.

Zdenka S., Johannes T. E., and Anthony R. B., A dual arsenic speciation system combining liquid chromatographic and purge and trap-gas chromatographic separation with atomic fluorescence spectrometric detection. *Analytica Chimica Acta* 358 (1998), 51-60.

Zhou Y., Niu L., Liu K., Yin S. และ Liu W. (2018). Arsenic in agricultural soils across China: Distribution pattern, accumulation trend, influencing factors, and risk assessment. *Science of the Total Environment*, 616-617, 156-163.

Zmozinski A. V., Llorente-Mirandes T., López-Sánchez J. F., และ Silva M. M. D. Establishment of a method for determination of arsenic species in seafood by LC-ICP-MS. *Food Chemistry*, 173(2015), 1073–1082.

Zoltan M. and Janusz P., Speciation of dimethylarsinic acid and monomethylarsonic acid by solid-phase microextraction-gas chromatography-ion trap mass spectrometry. *Journal of Chromatography A* 873 (2000), 129-135.