

ผลของสารไดบิวทิลทินและโมนอบิวทิลทินต่อการเจริญเติบโต การตาย และการพัฒนาอวัยวะเพศผู้ของหอยหวาน (*Babylonia areolata*) เพศเมีย

สุภัณฑิต นิมรัตน์* กณิกนันต์ ศรีสวัสดิ์ ไตรมาศ บุญไทย และ วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

รับบทความ 19 พฤษภาคม 2565 แก้ไขบทความ 1 พฤศจิกายน 2566 ตอรับบทความ 30 พฤศจิกายน 2566

บทคัดย่อ

สารประกอบบิวทิลทิน ได้แก่ สารไตรบิวทิลทิน ไดบิวทิลทินและโมนอบิวทิลทิน เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบต่อมไร้ท่อและระบบสืบพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตในทะเล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาอวัยวะเพศผู้ของหอยฝาเดียวเพศเมีย เนื่องด้วยความเป็นพิษสูงและไม่จำเพาะเจาะจงในสิ่งมีชีวิตต่างๆ จึงได้มีประกาศห้ามใช้สีที่มีส่วนผสมของสารไตรบิวทิลทินทาอยู่บนตัวเรือทั่วโลกตั้งแต่ พ.ศ. 2551 แต่สารประกอบนี้ยังถูกใช้ในอุตสาหกรรมและภาคการเกษตรและปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมทางทะเล การศึกษาในครั้งนี้จึงเป็นการประเมินผลของสารไดบิวทิลทินและโมนอบิวทิลทินต่อการเจริญเติบโต การตายและการพัฒนาอวัยวะเพศผู้ของหอยหวาน (*Babylonia areolata*) เพศเมีย โดยพบว่าสารไดบิวทิลทินและโมนอบิวทิลทิน 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร สามารถสะสมและเกิดการเปลี่ยนแปลงในเนื้อเยื่อหอยหวานโดยไม่มีผลต่อความยาวเปลือกของหอยหวาน แต่มีผลทำให้น้ำหนักลดลงและอัตราการตายเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) นอกจากนี้สารไดบิวทิลทินและโมนอบิวทิลทินยังเหนี่ยวนำให้เกิดการพัฒนาอวัยวะเพศผู้ในหอยหวานเพศเมียได้ร้อยละ 10.00-13.33 และกระตุ้นให้เกิดการพัฒนาของ Pseudopenis ได้ถึงระดับ 1-2 ขึ้นอยู่กับความเข้มข้น การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าสารไดบิวทิลทินและโมนอบิวทิลทินมีผลต่อการเจริญเติบโต อัตราการตายและการพัฒนาของอวัยวะเพศผู้ในหอยหวาน ดังนั้นหน่วยงานภาครัฐจึงควรมีมาตรการและการบังคับใช้กฎหมายอย่างเคร่งครัด เพื่อลดการปนเปื้อนสารประกอบบิวทิลทินในสิ่งแวดล้อมทางทะเลและป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อผลผลิตในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงหอยในอนาคต

คำสำคัญ : สีกันเปรียง; หอยฝาเดียว; สารบิวทิลทิน; ดีบุก; การเพาะเลี้ยงหอย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 3810 3120, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: subunti@buu.ac.th

Effects of Dibutyltin and Monobutyltin on Growth, Mortality and Development of Imposex in Female Spotted Babylon (*Babylonia areolata*)

Subuntith Nimrat* Kaniknun Srisawat Traimat Boonthai and
Verapong Vuthiphandchai

Faculty of Science, Burapha University

169 Long-Had Bangsaen Road, Saensuk, Mueang, Chonburi, 20131

Received 19 May 2022; Revised 1 November 2023; Accepted 30 November 2023

Abstract

Organotin compounds, e.g. tributyltin, dibutyltin and monobutyltin cause changes in the endocrine and reproductive systems of marine organisms, especially imposex in female gastropods. Due to high toxicity to non-target species, tributyltin-based antifouling paints were banned for the use in all vessels since 2008. However, organotin compounds are used in a variety of industrial and agricultural applications, and subsequently discharged into coastal environment. This study aimed to assess the effects of dibutyltin and monobutyltin on growth, mortality rate, and development of imposex in female spotted babylon (*Babylonia areolata*). Dibutyltin and monobutyltin (5 and 10 mg/L) could accumulate and metabolic transform in the tissues without deleterious effect on shell length, but significantly ($p < 0.05$) decreased whole body weight and increased mortality rate of spotted babylon. Additionally, dibutyltin and monobutyltin induced development of imposex (10.00-13.33%) in spotted babylon and promoted development stage of pseudopenis to the level 1-2 dependent on the chemical concentrations. The results demonstrated that dibutyltin and monobutyltin had effects on growth, mortality, and imposex incidence of spotted babylon. Therefore, government authorities should implement stringent measures and enforce a law to reduce the contamination of organotin compounds in marine environment, and simultaneously prevent undesirable consequences on production of shellfish culture in the future.

Keywords : Antifouling Paint; Gastropod; Butyltins; Tin; Shellfish Culture

* Corresponding Author. Tel.: +66 3810 3120, E-mail Address: subunti@buu.ac.th

1. บทนำ

สารประกอบบิวทิลทินเป็นสารรบกวนการทำงานของต่อมไร้ท่อและมีความเป็นพิษสูงต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศ สารไดบิวทิลทิน (Dibutyltin) และโมนอบิวทิลทิน (Monobutyltin) เป็นสารในกลุ่มนี้ที่ถูกนำมาใช้เป็นสารให้มีความคงตัวในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์ชนิดพีวีซี และส่วนผสมแก้วให้แข็งแรงมากขึ้น [1] ส่วนสารอีกชนิดหนึ่งที่รู้จักดีในกลุ่มนี้ คือ สารไตรบิวทิลทิน นิยมนำมาใช้เป็นองค์ประกอบในสีทาเรือเดินทะเลเพื่อป้องกันสิ่งมีชีวิตที่มากเกาะท้องเรือ เช่น เพรียงและหอยสองฝาบางชนิด ตั้งแต่คริสต์ศตวรรษที่ 1960 จึงทำให้สารไตรบิวทิลทินหลุดออกมาจากสีทาเรือปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมทางทะเล เนื่องจากคุณสมบัติไม่ชอบน้ำจึงทำให้สารนี้จับกับอนุภาคดินตะกอนและสะสมในตะกอนดินได้เป็นเวลานาน โดยมีค่าครึ่งชีวิตในดินตะกอนทะเลประมาณ 1-8.7 ปี [2] และค่าครึ่งชีวิตของสารไตรบิวทิลทินจะยาวนานมากขึ้นกว่า 10 ปี หากสะสมในดินตะกอนภายใต้สภาวะไม่มีออกซิเจน [3] ส่วนสารไดบิวทิลทินและโมนอบิวทิลทินมีค่าครึ่งชีวิตในดินและดินตะกอนตั้งแต่ 0.9-15 และ 0.6-8 ปี ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของดินและดินตะกอน [4] เป็นที่ทราบดีว่าการสัมผัสสารไตรบิวทิลทินแม้ความเข้มข้นต่ำมีผลโดยตรงต่อการทำงานของระบบต่อมไร้ท่อของสิ่งมีชีวิตในทะเล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาอวัยวะเพศผู้ในเพศเมีย (Imposex) ของหอยฝาเดียว โดยการสร้าง Pseudopenis และท่อนำสเปิร์ม (Vas Deferens) อวัยวะที่เกิดขึ้นนี้จะขัดขวางท่อนำไข่ ทำให้ท่อนำไข่อุดตัน ส่งผลให้หอยเพศเมียบางชนิดเป็นหมันเพราะไม่สามารถวางไข่ได้ จนเป็นสาเหตุของการตาย ลดจำนวนประชากรและสูญพันธุ์ของหอยหลายชนิด เช่น หอย Baltic Macoma (*Macoma balthica*) และหอย Peppery Furrow (*Scrobicularia plana*) [1], [5] ในปัจจุบันมีรายงานถึงความเป็นพิษเรื้อรังด้วยการเหนี่ยวนำให้เกิดการพัฒนาอวัยวะเพศผู้ในหอยฝาเดียวเพศเมียกว่า 260 ชนิดทั่วโลก [6] สารชนิดนี้ยังเป็นพิษอย่างมากต่อสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ในทะเล เช่น การพัฒนา

ของตัวอ่อนและการเจริญของเปลือกผิดปกติในหอยนางรมและภาวะการสะสมไขมันในร่างกายมากเกินไปของปลาทะเล เป็นต้น [5] นอกจากนี้สารไตรบิวทิลทินยังสามารถสะสมในห่วงโซ่อาหารและอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ผ่านทางห่วงโซ่อาหารทะเลที่มีการปนเปื้อน [1] ดังนั้นองค์การทางทะเลระหว่างประเทศ (International Maritime Organization) ได้ประกาศสนธิสัญญาการห้ามใช้สีกันเปรียงที่มีสารไตรบิวทิลทินเป็นส่วนประกอบ (The Global Antifouling Treaty) ในปี พ.ศ. 2546 และห้ามมีสีที่มีส่วนผสมของสารไตรบิวทิลทินทาทอยู่บนตัวเรือทั่วโลกตั้งแต่ พ.ศ. 2551

อย่างไรก็ตามสารไตรบิวทิลทินและอนุพันธ์ยังคงมีการตรวจพบในสิ่งแวดล้อมทางทะเลทั่วโลก ทั้งๆ ที่มีประกาศห้ามใช้มาแล้วกว่า 10 ปี เช่น ดินตะกอนบริเวณท่าเรือประมง Qianzhen ประเทศไต้หวันมีการปนเปื้อนด้วยสารประกอบบิวทิลทินรวมอยู่ในช่วง 14.2-807 นาโนกรัมต่อกกรัม (น้ำหนักแห้ง) โดยดินตะกอนเหล่านี้ปนเปื้อนด้วยสารไตรบิวทิลทินเป็นหลักด้วยความเข้มข้นเฉลี่ยประมาณ 300 นาโนกรัมต่อกกรัม (น้ำหนักแห้ง) และตัวอย่างดินตะกอนกว่าร้อยละ 80 ปนเปื้อนสารไตรบิวทิลทินในระดับที่สร้างผลกระทบต่อระบบสืบพันธุ์ของหอยฝาเดียว [5] และหอย Dog Whelk (*Nucella lapillus*) บริเวณชายฝั่งประเทศโปรตุเกสมีการสะสมของสารไตรบิวทิลทินในช่วง 1.5-55 นาโนกรัมต่อกกรัม (น้ำหนักแห้ง) [7] สำหรับประเทศไทยมีรายงานการตรวจพบสารไตรบิวทิลทินอย่างต่อเนื่องในตลอด 10 ปีที่ผ่านมา ในปี พ.ศ. 2554 สารประกอบบิวทิลทินในหอยแมลงภู่ (*Perna viridis*) บริเวณปากอ่าวปัตตานีมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 27 -36 นาโนกรัมต่อกกรัม โดยตรวจพบสารไตรบิวทิลทินในหอยแมลงภู่กว่าร้อยละ 60 [8] หอยแมลงภู่ที่เพาะเลี้ยงบริเวณชายฝั่งจังหวัดชลบุรี ระยองและตราดยังตรวจพบสารประกอบบิวทิลทินเฉลี่ย 1.04, 5.98 และ 0.95 นาโนกรัมต่อกกรัม (น้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ [9] ในปี พ.ศ. 2559 พบการปนเปื้อนของสารไตรบิวทิลทินร้อยละ 37-56 ของตัวอย่างดินตะกอนที่เก็บจากท่าเรือ

ต่างๆ ตามแนวชายฝั่งเมืองเก่าสงขลา [10] และในปีเดียวกัน สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษพบว่าตะกอนดินชายฝั่งทะเลบริเวณอ่าวไทยฝั่งตะวันออกและอ่าวไทยตอนใน โดยเฉพาะบริเวณอ่าวตังเกี๋ย เรือซ่อมเรือ ท่าเทียบเรือ และเส้นทางการเดินเรือหนาแน่นบริเวณปากน้ำระยอง จังหวัดระยอง ท่าเรือแหลมฉบังและพัทยาใต้ จังหวัดชลบุรี ปากแม่น้ำเจ้าพระยา จังหวัดสมุทรปราการ บางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร และปากคลองบ้านบางตะบูน จังหวัดเพชรบุรี มีการปนเปื้อนของสารไตรบิวทิลนอยในช่วง 0.5-14.6 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง [11] การปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมทางทะเลอย่างต่อเนื่องทำให้สารไตรบิวทิลนอยและอนุพันธ์ยังคงเป็นสารมลพิษที่ถูกเฝ้าระวังโดยโปรแกรมสิ่งแวดล้อมขององค์การสหประชาชาติ (United Nation Environmental Program: UNEP) ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และแปซิฟิก อันเนื่องมาจากความไม่เข้มงวดในการใช้กฎหมายของประเทศต่างๆ เป็นที่ทราบกันว่าสารไตรบิวทิลนอยและโมโนบิวทิลนอยเป็นสารตัวกลางที่เกิดจากการย่อยสลายสารไตรบิวทิลนอย การปนเปื้อนของสารไตรบิวทิลนอยในสิ่งแวดล้อมทางทะเลของประเทศไทยก็อาจจะส่งผลกระทบต่อระบบเศรษฐกิจ สร้างความเสียหายต่อทรัพยากรสัตว์น้ำและการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ อันเนื่องมาจากสารตัวกลางที่เกิดจากการย่อยสลายของสารไตรบิวทิลนอย ดังนั้นเพื่อเป็นการตระหนักและเฝ้าระวังอันตรายที่เกิดจากการปนเปื้อนสารเคมีอันตราย การศึกษาครั้งนี้จึงศึกษาผลของสารไตรบิวทิลนอยและโมโนบิวทิลนอยต่อการสะสม การเจริญเติบโต การตาย และการพัฒนาอวัยวะเพศผู้ของหอยหวาน (*Babylonia areolata*) เพศเมีย ซึ่งเป็นหอยฝาเดียวที่สำคัญและมีการเพาะเลี้ยงเชิงพาณิชย์บริเวณชายฝั่งทะเลของประเทศไทย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเหนี่ยวนำให้เกิดการพัฒนาอวัยวะเพศผู้ในหอยหวานเพศเมีย

เตรียมตู้กระจกขนาด 30 x 30 x 60 เซนติเมตร โดยเติมทรายหยาบหนาประมาณ 4 เซนติเมตร และน้ำทะเลปริมาณ 34 ลิตร ลงในตู้กระจก มีการเติมอากาศตลอดเวลาและมีการหมุนเวียนน้ำแบบระบบปิดโดยใช้ลูกบอลชีวภาพ (Bioball) เป็นตัวกรอง จากนั้นแบ่งตู้กระจกออกเป็น 5 ชุดการทดลอง ๆ ละ 3 ซ้ำ ยกเว้นชุดควบคุมที่มีจำนวน 2 ซ้ำ ได้แก่ 1) ชุดควบคุม ไม่เติมสารเคมีใด 2) เติมน้ำไตรบิวทิลนอยไดคลอไรด์ 5 ไมโครกรัมต่อลิตร 3) เติมน้ำไตรบิวทิลนอยไดคลอไรด์ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร 4) เติมน้ำโมโนบิวทิลนอยไดคลอไรด์ 5 ไมโครกรัมต่อลิตร และ 5) เติมน้ำโมโนบิวทิลนอยไดคลอไรด์ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร คัดเลือกหอยหวานเพศเมียอายุ 1 ปี โดยพิจารณาจากช่องบริเวณเท้าของหอยหวาน จากสถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา ที่มีขนาดความยาวเปลือก 4-5 เซนติเมตร มาเลี้ยงในตู้กระจกจำนวน 30 ตัวต่อใบหอยหวานแต่ละตัวถูกติดฉลากหมายเลข 1-30 ไว้บนเปลือกหอย ตู้กระจกแต่ละใบปิดคลุมด้วยตาข่ายกรองแสงเพื่อลดความเข้มแสงและตั้งตู้กระจกภายในโรงเพาะฟัก ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา มีการทำความสะอาดพื้นทรายรองพื้นและพื้นตู้กระจกเป็นประจำทุกสัปดาห์ การให้อาหารวันละ 1 ครั้ง ด้วยเนื้อปลาข้างเหลืองสับเป็นชิ้นเล็ก ๆ 3-4 ชิ้นต่อใบ เศษอาหารและของเสียถูกกำจัดทิ้งด้วยไซฟอนหลังการให้อาหารประมาณ 1 ชั่วโมง ดำเนินเพาะเลี้ยงหอยหวานนาน 112 วัน และเติมน้ำประกอบบิวทิลนอยเพียงครั้งเดียวในวันแรกของการทดลอง

2.2 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบบิวทิลทินในเนื้อเยื่อหอยหวาน

เก็บตัวอย่างหอยหวานในวันแรกของการทดลองหลังเติมสารประกอบบิวทิลทินลงในน้ำประมาณ 15 นาที และเก็บหอยหวานทุก 7 วัน โดยสุ่มเก็บหอยหวานครั้งละ 1 ตัวต่อใบ นำมาสกัดสารประกอบบิวทิลทินในเนื้อเยื่อตามวิธีการของ Kan-Atireklap et al. [12] สารมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ไดบิวทิลทินไดคลอไรด์และโมนอบิวทิลทินไดคลอไรด์ การหาประสิทธิภาพในการวิเคราะห์หรือร้อยละการกลับคืน (% Recovery) โดยการเติมสารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนลงในตัวอย่าง นำไปสกัดและวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของสารด้วยวิธีการเดียวกัน ประสิทธิภาพการวิเคราะห์สารไดบิวทิลทินไดคลอไรด์ และโมนอบิวทิลทินไดคลอไรด์ในหอยหวานเท่ากับร้อยละ 82.62 และ 81.59 ตามลำดับ

2.3 การตรวจวัดการเจริญเติบโตและการตายของหอยหวาน

จับหอยหวานจำนวน 10 ตัว เพื่อนำมาวิเคราะห์การเจริญเติบโต โดยนำหอยหวานมาวัดความยาวของเปลือกด้วยเครื่องมือ Caliper และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง (Balance analytical; Mettler Toledo PG802-S, Greifensee, Switzerland) และตรวจนับจำนวนหอยหวานที่ตายในแต่ละชุดการทดลองทุกวัน แล้วคำนวณเป็นอัตราการตายสะสม (ร้อยละ)

2.4 การพัฒนาอวัยวะเพศผู้ในเพศเมีย

นำหอยหวานที่ติดฉลากหมายเลข 1-30 มาพิจารณาการพัฒนาอวัยวะเพศผู้ในเพศเมีย โดยวัดความยาวของ Pseudopenis ด้วยเครื่องมือ Caliper และพิจารณาระดับการพัฒนาของ Pseudopenis ได้แก่ ระดับ 0: ไม่เกิดลักษณะเพศผู้ (ไม่มี Pseudopenis),

ระดับ 1: พบติ่งเนื้อเล็กๆ บริเวณเดียวกับที่มี Penis ในหอยเพศผู้, ระดับ 2: ตี่งเนื้อมีลักษณะใหญ่ขึ้นและโครงสร้างเปลี่ยนแปลง และระดับ 3: มีการพัฒนาของติ่งเนื้อที่มีโครงสร้างคล้ายกับอวัยวะเพศผู้แต่มีขนาดเล็กกว่าอวัยวะเพศผู้ที่โตเต็มวัย [13]

2.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความยาวของเปลือก น้ำหนักและอัตราการตายของหอยหวานที่ได้รับสารไดบิวทิลทินและโมนอบิวทิลทินถูกเปรียบเทียบด้วยการวิเคราะห์ Analysis of Variance (ANOVA) แบบ One-way ANOVA และเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วย Duncan's Multiple Range Test ($p < 0.05$) ด้วยโปรแกรม SPSS เวอร์ชัน 19.0

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

คุณภาพน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิ ความเค็มและค่าความเป็นกรด-ด่างมีการตรวจติดตามทุกวัน ตลอดระยะเวลา 112 วันของการศึกษา โดยมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันในแต่ละวันและชุดการทดลอง และมีค่าเท่ากับ $28.3-30.5^{\circ}\text{C}$, $30-33$ พีพีที และ $6.80-8.20$ ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้สำหรับการเพาะเลี้ยงหอยหวาน [14]

3.1 การเปลี่ยนแปลงของสารไดบิวทิลทินและโมนอบิวทิลทินในหอยหวาน

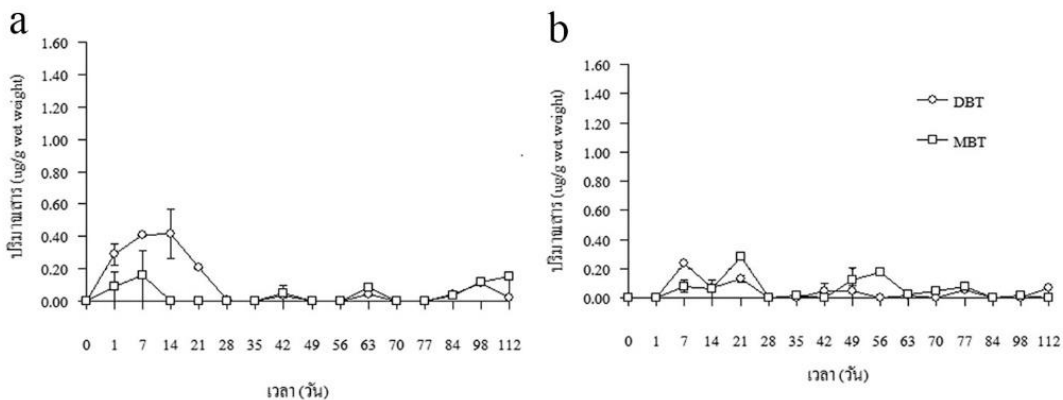
3.1.1 การเปลี่ยนแปลงของสารไดบิวทิลทิน

หอยหวานที่เติมสารไดบิวทิลทิน 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ตรวจพบสารไดบิวทิลทินสูงสุดเท่ากับ 0.42 ± 0.15 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักเปียก) ในวันที่ 14 ของการทดลอง จากนั้นปริมาณสารไดบิวทิลทินมีแนวโน้มลดลง ส่วนสารโมนอบิวทิลทินมีการตรวจตั้งแต่วันที่ 1 ของการทดลอง เท่ากับ 0.09 ± 0.09 ไมโครกรัมต่อกรัม จากนั้นตรวจพบในปริมาณระหว่าง

$0.00 \pm 0.00 - 0.15 \pm 0.03$ ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักเปียก) (รูปที่ 1a)

การสะสมของสารไดบิวทิลทินและสารตัวกลางในหอยหวานที่เติมสารไดบิวทิลทินความเข้มข้นสูง 10 ไมโครกรัมต่อลิตร พบการสะสมของสารไดบิวทิลทินในปริมาณสูงที่สุดเท่ากับ 0.27 ± 0.01 ไมโครกรัมต่อกรัม

(น้ำหนักเปียก) ในวันที่ 7 ของการทดลอง หลังจากนั้นมีความโน้มลดลงอยู่ในช่วง $0.00 \pm 0.00 - 0.12 \pm 0.03$ ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักเปียก) ส่วนสารโมโนบิวทิลทินมีการสะสมในปริมาณใกล้เคียงกับสารไดบิวทิลทิน มีปริมาณเท่ากับ $0.00 \pm 0.00 - 0.25 \pm 0.05$ ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักเปียก) ในระหว่างการเลี้ยง 112 วัน (รูปที่ 1b)



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงสภาพของสารไดบิวทิลทินและสารตัวกลาง (สารโมโนบิวทิลทิน) ในเนื้อเยื่อหอยหวานที่เติมสารไดบิวทิลทิน (a) 5 และ (b) 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ตลอดการเลี้ยงนาน 112 วัน

3.1.2 การเปลี่ยนแปลงของสารโมโนบิวทิลทิน

สารโมโนบิวทิลทินถูกตรวจพบในหอยหวานที่เติมสารโมโนบิวทิลทินความเข้มข้น 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ตั้งแต่วันแรกของการทดลอง หอยหวานที่เติมสารโมโนบิวทิลทินความเข้มข้นต่ำพบปริมาณสูงที่สุดเท่ากับ 1.08 ± 0.03 ไมโครกรัมต่อกรัม ในวันที่ 14 ของการทดลอง จากนั้นค่อย ๆ ลดลงและตรวจไม่พบในวันที่ 70 ของการทดลอง ส่วนหอยหวานที่เติมสารโมโนบิวทิลทินความเข้มข้นสูง (10 ไมโครกรัมต่อลิตร) ตรวจพบสารโมโนบิวทิลทินสูงที่สุดเท่ากับ 1.26 ± 0.07 ไมโครกรัมต่อกรัม ตั้งแต่วันแรกของการทดลอง หลังจากนั้นตรวจพบในปริมาณต่ำมาก (ไม่เกิน 0.02 ไมโครกรัมต่อกรัม) ตั้งแต่วันที่ 28 (รูปที่ 2)

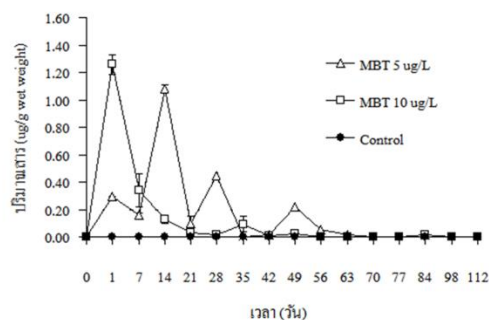
สารไดบิวทิลทินมีคุณสมบัติละลายได้ดีในไขมัน ทำให้มีการสะสมในปริมาณสูงในเนื้อเยื่อหรือเซลล์ที่มีไขมันสูง สารพิษชนิดนี้ถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำ

ได้ เพื่อกำจัดออกจากร่างกายและช่วยลดความเป็นพิษกลไกลดความเป็นพิษในสิ่งมีชีวิตต้องอาศัยกระบวนการเมแทบอลิซึมเกิดเป็นสารตัวกลางและสุดท้ายได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบดีบุกอนินทรีย์ที่มีความเป็นพิษลดลงและกำจัดออกจากร่างกายได้ง่าย ตามลำดับ โดยเฉพาะสัตว์น้ำกลุ่มครัสเตเชียน แอนนิลิดและปลาจะมีระบบเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายสารกลุ่มนี้ได้อย่างรวดเร็วกว่าสัตว์น้ำกลุ่มหอย ซึ่งมีระบบเอนไซม์ที่ใช้ย่อยสลายได้ช้ากว่า กระบวนการเมแทบอลิซึมของสารบิวทิลทินมีความสัมพันธ์กับการเจริญของอวัยวะเพศของหอยฝาเดียว (Gastropods) เพศเมียและความผิดปกติของเปลือกหอย [15], [16] การศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าหอยหวานที่ได้รับสารไดบิวทิลทินและโมโนบิวทิลทิน 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร มีการสะสมของสารเหล่านี้ตั้งแต่วันแรกของการทดลอง ตามธรรมชาติแล้วหอยหวานเป็นสัตว์น้ำที่กินอาหารด้วยวิธี

กรองกิน รวมทั้งสารชีวพิษสามารถซึมผ่านชั้นผิวหนังเข้าสู่ระบบทางเดินอาหารและแพร่กระจายไปสะสมในเนื้อเยื่อและอวัยวะต่างๆ ที่มีไขมันสูงได้ดี [17] หอยหวานที่ได้รับสารไดบีทิลทินทั้ง 2 ความเข้มข้นมีการสะสมของสารไดบีทิลทินมากในช่วงแรก หลังจากนั้นมีปริมาณลดลงพร้อมกับการเกิดขึ้นของสารตัวกลาง ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสารไดบีทิลทินเปลี่ยนแปลงได้ด้วยกระบวนการเมแทบอลิซึมของหอยหวาน สอดคล้องผลการศึกษาในหอย Dog whelk (*Nucella lapillus*) ที่สามารถเปลี่ยนสารชีวพิษเป็นสารตัวกลางภายในต่อมย่อยอาหารได้ [18]

การศึกษาในครั้งนี้ยังพบว่าสารโมโนบีทิลทินถูกเปลี่ยนแปลงในหอยหวานได้รวดเร็วกว่าสารไดบีทิลทิน โดยตรวจไม่พบตั้งแต่วันที่ 98 ของการเพาะเลี้ยง น่าจะเป็นเพราะสารชนิดนี้มีความเป็นพิษและละลายในไขมันได้น้อยกว่าจึงทำให้ถูกเปลี่ยนสภาพด้วยกระบวนการเมแทบอลิซึมได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับสารไดบีทิลทิน การศึกษารังนี้แสดงให้เห็นว่าสารไดบีทิลทินสามารถสะสมอยู่ในหอยหวานได้เป็นเวลานานและเกิดการเปลี่ยนแปลงผ่านกระบวนการเมแทบอลิซึมได้อย่างช้าๆ จึงทำให้น่าจะสร้างความกังวลให้กับผู้บริโภค ตามปกติแล้วหอยหวานที่นำมาบริโภคในประเทศไทยมาจาก 2 แหล่งด้วยกัน คือ จับาจากธรรมชาติและการเพาะเลี้ยง ในเชิงพาณิชย์ทั้งบริเวณชายฝั่งทะเล ดังนั้นหากบริเวณที่หอยหวานอาศัยอยู่หรือบริเวณเพาะเลี้ยงมีการปนเปื้อนด้วยสารไดบีทิลทินดังรายงานการตรวจพบในหลายๆ พื้นที่ของประเทศไทย เช่น พื้นที่ทะเลสาบสงขลา และชายฝั่งทะเลบริเวณอ่าวไทยฝั่งตะวันออกและอ่าวไทยตอนใน ได้แก่ จังหวัดระยอง ชลบุรี สมุทรปราการและเพชรบุรี เป็นต้น [9]-[11] น่าจะทำให้เกิดการสะสมของสารประกอบชีวพิษเหล่านี้ในหอยหวานและสะสมผ่านห่วงโซ่อาหารในผู้บริโภคอันดับสุดท้าย เช่น มนุษย์ จนอาจส่งผลกระทบต่อระบบฮอร์โมนและภูมิคุ้มกันให้อ่อนแอลง [1] ในกรณีที่น่า

หอยหวานที่ปนเปื้อนสารประกอบชีวพิษมา รับประทาน สารเหล่านี้จะไม่ถูกกำจัดหรือลดความเป็นพิษลงด้วยกรรมวิธีในการปรุงอาหารด้วยไมโครเวฟ การทอดและการต้ม โดยพบว่าการประกอบอาหารด้วยวิธีทั้ง 3 นี้จะยังคงพบตกค้างเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 55, 67 และ 76 ตามลำดับ [19]



รูปที่ 2 ปริมาณสารโมโนบีทิลทินในเนื้อเยื่อหอยหวาน ที่เติมสารโมโนบีทิลทินความเข้มข้น 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ตลอดการเลี้ยงนาน 112 วัน

3.2 การเจริญเติบโตและการตายของหอยหวาน

3.2.1 ความยาวเปลือกของหอยหวาน

ความยาวเปลือกของหอยหวานในวันเริ่มต้นการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 4.25 ± 0.07 - 4.32 ± 0.06 เซนติเมตร ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ระหว่างชุดการทดลอง ในทำนองเดียวกัน ความยาวเปลือกของหอยหวาน ณ วันที่ 112 ของการทดลองก็ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ระหว่างกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 4.42 ± 0.03 - 4.57 ± 0.05 เซนติเมตร

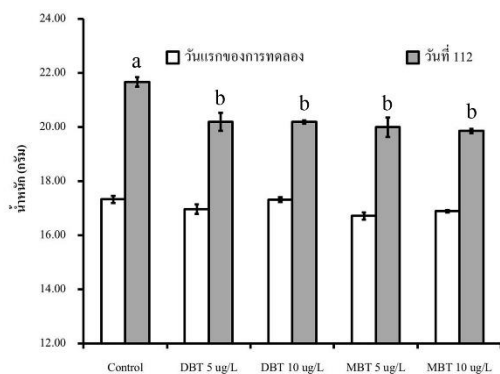
3.2.2 น้ำหนักของหอยหวาน

น้ำหนักของหอยหวานของทุกชุดการทดลองในวันเริ่มต้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 16.71 ± 0.13 - 17.32 ± 0.13 กรัม หลังเลี้ยงนาน 112 วัน หอยหวานในชุด

ควบคุมมีน้ำหนักสูงสุด (21.66 ± 0.17 กรัม) ซึ่งสูงกว่าหอยหวานที่ได้รับสารไดบีวทิลทินและโมโนบีวทิลทินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ที่มีค่าอยู่ระหว่าง $20.18 \pm 0.06 - 20.19 \pm 0.33$ และ $19.85 \pm 0.08 - 19.99 \pm 0.36$ กรัม ตามลำดับ (รูปที่ 3)

3.2.3 อัตราการตายของหอยหวาน

หลังการเพาะเลี้ยงนาน 112 วัน หอยหวานที่ได้รับสารไดบีวทิลทิน 10 ไมโครกรัมต่อลิตร มีอัตราการตายสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 15.56 ± 1.93 รองลงมาคือ หอยหวานที่ได้รับสารไดบีวทิลทิน 5 ไมโครกรัมต่อลิตร และโมโนบีวทิลทิน 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่มีอัตราการตายเท่ากับร้อยละ 11.44 ± 2.50 และ 10.00 ± 0.00 ตามลำดับ สำหรับหอยหวานในชุดควบคุมมีอัตราการตายต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เท่ากับร้อยละ 1.11 ± 1.92



รูปที่ 3 น้ำหนักของหอยหวานที่ได้รับสารไดบีวทิลทินหรือโมโนบีวทิลทิน 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ตัวอักษรภาษาอังกฤษแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ระหว่างชุดการทดลอง ณ ช่วงเวลาเดียวกัน

สารไดบีวทิลทินและโมโนบีวทิลทิน ความเข้มข้น 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ไม่มีผลต่อความยาวเปลือกแต่มีผลทำให้น้ำหนักของหอยหวานลดลง

อย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Widdows and Page [20] ที่ยืนยันว่าสารไดบีวทิลทินมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของหอยแมลงภู่น้ำจืด (*Mytilus edulis*) โดยการเจริญเติบโตลดลงเมื่อได้รับสารไดบีวทิลทินความเข้มข้นสูงกว่า 20 ไมโครกรัมต่อกรัม การยับยั้งการเจริญเติบโตของสารบีวทิลทินและอนุพันธ์ยังมีรายงานใน หอย Common Whelk (*Buccinum undatum*) [13] และยังทำให้การสะสมของแคลเซียมในเปลือกหอย Great Pond Snail (*Lymnaea stagnalis*) ลดลง จนทำให้เปลือกหอยอ่อนนุ่มกว่าปกติแตกหักง่ายและน้ำหนักลดลง [21]

การศึกษานี้ยังชี้ให้เห็นว่าสารไดบีวทิลทินและโมโนบีวทิลทินมีผลต่อการตายของหอยหวาน โดยสารไดบีวทิลทินความเข้มข้นสูงมีความเป็นพิษต่อหอยหวานสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ การศึกษาความเป็นพิษเฉียบพลันของสารไดบีวทิลทินและโมโนบีวทิลทินในสัตว์น้ำยังมีรายงานน้อยมาก Horiguchi et al. [22] ยืนยันได้ว่าสารไดบีวทิลทินและโมโนบีวทิลทินมีความเป็นพิษต่อหอย Rock Shell (*Thais clavigera*) แตกต่างกัน โดยทำให้หอยชนิดนี้มีอัตราการตายร้อยละ 20 และ 10 ตามลำดับ หลังได้รับสารความเข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักหอย นาน 24 วัน และการศึกษาความเป็นพิษเฉียบพลันในสัตว์น้ำกลุ่มครัสเตเชียน คือ ไรน้ำ (*Daphnia magna*) พบว่าสารทั้ง 2 ชนิดนี้มีค่า Lethal concentration (LC_{50}) เท่ากับ 900 และ 49,000 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังการได้รับนาน 24 ชั่วโมง [23] ซึ่งความเป็นพิษเฉียบพลันในหอยหวานยังไม่มีรายงานและควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต

หอยหวานที่ได้รับสารไดบีวทิลทินและโมโนบีวทิลทินมีน้ำหนักลดลงและอัตราการตายเพิ่มขึ้นอาจเกิดจากสารประกอบบีวทิลทินมีความเป็นพิษต่อระบบประสาทที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเหงือกและระบบกรองกินส่งผลให้หอยกินอาหารได้ลดลง ความเป็นพิษ

ของสารประกอบชนิดนี้ยังทำให้การใช้ออกซิเจนของเซลล์เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากสารประกอบบิวทิลทินจับหรือมีฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ในระบบการสังเคราะห์พลังงานของไมโทคอนเดรีย [20] รวมทั้งมีผลให้ห้องประกอบภายในเซลล์ได้รับความเสียหายอย่างรุนแรง เช่น ไมโทคอนเดรียมีลักษณะบวมจนมีขนาดใหญ่กว่าปกติ 3-4 เท่า และเยื่อหุ้มไมโทคอนเดรียรั่ว และบางส่วนเกิดเยื่อหุ้มหลายชั้น เป็นต้น ทำให้ไมโทคอนเดรียไม่สามารถสังเคราะห์ ATP ได้ [24] ตามปกติแล้วการตอบสนองต่อความเข้มข้นของสารประกอบบิวทิลทินในหอยฝาดียวแต่ละชนิดแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับและกลไกการกำจัดออกจากเซลล์ของหอย

3.4 การพัฒนาอวัยวะเพศผู้ของหอยหวานเพศเมีย

3.4.1 การพัฒนาอวัยวะเพศผู้ของหอยหวานที่ได้รับสารไดบิวทิลทิน

หอยหวานที่ได้รับสารไดบิวทิลทิน 5 ไมโครกรัมต่อลิตร เริ่มเกิดการพัฒนาของ Pseudopenis ในวันที่ 28 ของการเพาะเลี้ยง โดยเกิดการพัฒนาของ Pseudopenis ถึงระดับ 1 ร้อยละ 10.00 ± 0.00 เมื่อเลี้ยงหอยหวานนาน 112 วัน (รูปที่ 4a) ส่วนหอยหวานที่ได้รับไดบิวทิลทิน 10 ไมโครกรัมต่อลิตร เริ่มเกิดการพัฒนาของ Pseudopenis ในวันที่ 14 ของการ

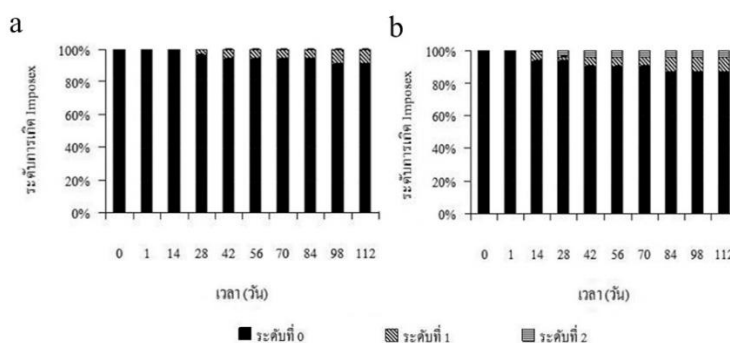
เพาะเลี้ยง และพัฒนาไปถึงระดับที่ 2 โดยมีการพัฒนาอวัยวะเพศผู้ระดับ 1 และ 2 ร้อยละ 10.00 ± 0.00 และ 3.33 ± 0.00 ตามลำดับ เมื่อเลี้ยงหอยหวานนาน 112 วัน (รูปที่ 4b)

3.4.2 การพัฒนาอวัยวะเพศผู้ของหอยหวานที่ได้รับสารโมโนบิวทิลทิน

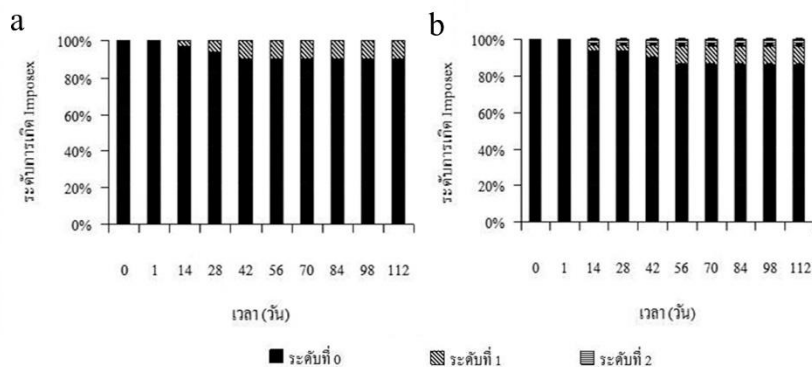
หอยหวานที่ได้รับสารโมโนบิวทิลทิน 5 ไมโครกรัมต่อลิตร มีการพัฒนาของ Pseudopenis ถึงระดับที่ 1 ร้อยละ 10.00 ± 0.00 เมื่อเลี้ยงหอยหวานนาน 112 วัน (รูปที่ 5a) ส่วนหอยหวานที่ได้รับสารโมโนบิวทิลทิน 10 ไมโครกรัมต่อลิตร เริ่มเกิดการพัฒนาของ Pseudopenis ในวันที่ 14 โดยพัฒนาในระดับที่ 1 และ 2 ร้อยละ 10.00 ± 0.00 และ 3.33 ± 0.00 ตามลำดับ เมื่อเลี้ยงหอยหวานนาน 112 วัน (รูปที่ 5b)

3.4.3 ความยาว Pseudopenis ของหอยหวานที่เติมสารไดบิวทิลทินและโมโนบิวทิลทิน

หลังเลี้ยงนาน 112 วัน หอยหวานในชุดควบคุมไม่พบการพัฒนาอวัยวะเพศผู้ โดย Pseudopenis ของหอยหวานที่เติมสารไดบิวทิลทิน 10 ไมโครกรัมต่อลิตร มีความยาวสูงที่สุดเท่ากับ 0.80 ± 0.61 มิลลิเมตร ซึ่งยาวกว่าหอยหวานที่เติมสารไดบิวทิลทิน 5 ไมโครกรัมต่อลิตร และโมโนบิวทิลทิน 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ที่มีค่าเท่ากับ 0.37 ± 0.32 , 0.33 ± 0.20 และ 0.39 ± 0.34 มิลลิเมตรตามลำดับ



รูปที่ 4 ระดับการพัฒนาของ Pseudopenis ในหอยหวานเพศเมียที่ได้รับสารไดบิวทิลทิน ความเข้มข้น a) 5 และ b) 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ระหว่างการเพาะเลี้ยงนาน 112 วัน



รูปที่ 5 ระดับการพัฒนาของ Pseudopenis ในหอยหวานเพศเมียที่ได้รับสารโมนิโนบิวทิลทิน ความเข้มข้น a) 5 และ b) 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ระหว่างการเพาะเลี้ยงนาน 112 วัน

สารไตรบิวทิลทินและอนุพันธ์มีความเป็นพิษรุนแรงต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศแม้ได้รับในปริมาณน้อยในระดับไมโครกรัมต่อลิตร สารประกอบเหล่านี้ไม่เพียงทำให้เกิดการเจริญเติบโตลดลงและเพิ่มอัตราการตาย แต่ยังก่อให้เกิดความผิดปกติของระบบสืบพันธุ์ของหอยฝาเดียวอีกด้วย โดยทำให้เกิดการพัฒนาลักษณะเพศผู้คือการสร้าง Pseudopenis และท่อนำสเปิร์มทำให้จำนวนประชากรหอยลดลง จนเป็นเหตุให้เกิดความเสียหายอย่างมากต่ออุตสาหกรรมเพาะเลี้ยง [1] การศึกษาในครั้งนี้ยืนยันได้ว่าสารไตรบิวทิลทินและโมนิโนบิวทิลทินสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการพัฒนาอวัยวะเพศผู้ในหอยหวานเพศเมีย และสามารถกระตุ้นให้เกิดการพัฒนาของ Pseudopenis จนถึงระดับ 2 เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นความเป็นพิษเรื้อรังของสารบิวทิลทินด้วยการเหนี่ยวนำให้เกิดการพัฒนาอวัยวะเพศผู้ได้มีรายงานอย่างกว้างขวางในหอยฝาเดียวเพศเมียหลายชนิดทั่วโลก เช่น หอย Common whelk มีการพัฒนาของ Pseudopenis เมื่อได้รับสารบิวทิลทิน [13] หอย Rock Shell ที่ได้รับสารไตรบิวทิลทินและโมนิโนบิวทิลทินมีการพัฒนาอวัยวะเพศผู้ในระดับที่เห็นได้ชัดเจน [22] การพัฒนาของลักษณะเพศผู้ของหอยหวานเพศเมียอาจเกิดจากสารประกอบบิวทิลทินยับยั้ง Cytochrome P 450-mediated Aromatase และกระตุ้นการขับ Penial Morphogenetic Factor จาก Pedal Ganglia ซึ่งอยู่

ภายใต้การควบคุมของ Cerebropleura ทำให้เพิ่มการผลิตฮอร์โมนเพศชาย คือ ฮอร์โมนเทสโทสเตอโรน และเพิ่มการแสดงออกของลักษณะเพศผู้มากขึ้นในหอยเพศเมีย [13], [25] การปนเปื้อนสารบิวทิลทินในสิ่งแวดล้อมทางทะเลของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่มีการเพาะเลี้ยงหอยหวานอาจส่งผลให้ผลผลิตหอยหวานลดลงจนเกิดความเสียหายต่ออุตสาหกรรมเพาะเลี้ยง และอาจส่งผลกระทบต่อทรัพยากรทางทะเลอื่นๆ ในระบบห่วงโซ่อาหารที่เป็นอาหารของมนุษย์ อีกทั้งยังอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ เนื่องจากสารประกอบบิวทิลทินมีผลกระทบต่อระบบฮอร์โมนและภูมิคุ้มกันให้อ่อนแอลง ดังนั้นหน่วยงานภาครัฐจึงควรมีมาตรการและการบังคับใช้กฎหมายอย่างเคร่งครัดและมีประสิทธิภาพ เพื่อลดการปนเปื้อนสารไตรบิวทิลทินและอนุพันธ์ในสิ่งแวดล้อมตามยุทธศาสตร์ของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ที่กำหนดเป้าหมายให้ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมได้รับการอนุรักษ์และฟื้นฟูให้อยู่ในระดับที่ยั่งยืนและเหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของประชาชน

4. สรุป

สารไตรบิวทิลทินและโมนิโนบิวทิลทิน 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ไม่มีผลต่อความยาวเปลือก แต่มีผลทำให้น้ำหนักลดลงและอัตราการตายของหอยหวาน

เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ไต่บิวทิลทินและโมโนบิวทิลทินยังเหนียวนาให้เกิดการพัฒนาอวัยวะเพศผู้ในหอยหวาน โดยกระตุ้นให้เกิดการพัฒนาของ Pseudopenis ได้ถึงระดับ 2 เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น ปัจจุบันสารประกอบบิวทิลทินยังถูกใช้ในภาคอุตสาหกรรม เช่น การผลิตพลาสติกพอลิเมอร์และภาคการเกษตรเพื่อเป็นองค์ประกอบของสารกำจัดศัตรูพืชและการกำจัดเชื้อรา ดังนั้นเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงหอยหวานและอันตรายต่อผู้บริโภค หน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบจึงควรมีมาตรการที่ชัดเจนและเข้มงวดในการควบคุมการใช้งานสารไตริวทิลทินและอนุพันธ์ในอุตสาหกรรมต่างๆ ทั้งนี้ได้มีประกาศห้ามใช้สีที่มีส่วนผสมของสารไตริวทิลทินกับเรือตั้งแต่ พ.ศ. 2551 แต่ยังคงมีการตรวจพบการปนเปื้อนสารบิวทิลทินในสิ่งแวดล้อมทางทะเล ทั้งนี้เพื่อให้ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมได้รับการรักษาให้ยั่งยืนและเหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของประชาชนในประเทศไทย

5. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับการรับรองจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในสัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ กองบริหารการวิจัยและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยบูรพา คณะผู้แต่งขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยบางส่วนจากโครงการบัณฑิตศึกษา ภายใต้การกำกับของโครงการพัฒนาศักยภาพบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. O. Sunday, B. A. Alafara, and O. G. Oladele, "Toxicity and speciation analysis of organotin compounds," *Chemical Speciation and Bioavailability*, vol. 24, pp. 216–226, Jan. 2012.
- [2] I. Omae, "Review organotin antifouling paint and their alternatives," *Applied Organometallic Chemistry*, vol. 17, pp. 81–105, Jan. 2003.
- [3] P. H. Dowson, J. M. Bubbs, and J. N. Lester, "Persistence and degradation pathways of tributyltin in freshwater and estuarine sediments," *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 42, pp. 551–562, May 1996.
- [4] J. H. Huang and E. Matzner, "Degradation of organotin compounds in organic and mineral forest soils," *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, vol. 167, pp. 33–38, Feb. 2004.
- [5] S. H. Lee, Y. S. Chen, C. F. Chen, F. P. J. B. Albarico, Y. C. Lim, M. H. Wang, C. W. Chen, and D. C. Dong, "Butyltin contamination in fishing port sediments after the ban of tributyltin antifouling paint: a case of Qianzhen Fishing Port in Taiwan," *Water*, vol. 14, p. 813, Mar. 2022.
- [6] C. P. Titley-O'Neal, K. R. Munkittrick, and B. A. Macdonald, "The effects of organotin on female gastropods," *Journal of Environmental Monitoring*, vol. 13, pp. 2360–2388, Sep. 2011.
- [7] F. Laranjeiro, P. Sánchez-Marín, I. B. Oliveira, S. Galante-Oliveira, and C. Barroso, "Fifteen years of imposex and tributyltin pollution monitoring along the Portuguese coast," *Environmental Pollution*, vol. 232, pp. 411–421, Jan. 2018.
- [8] *Research report*, Distribution of butyltin (BTs) in water and some marine organism

- species from fishing port areas in the southern border provinces, Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, Yala, 2011.
- [9] C. Klinklob, K. Shearman, N. Sudsiri, A. Boonmee, and S. Kingtong, "Butyltin compounds in green mussel (*Perna viridis*) from the coasts of Chonburi, Rayong and Trat provinces," *RMUTI Journal Science and Technology*, vol. 12, pp. 87–100, May 2019.
- [10] *Research report*, Contamination of organotin on Songkhla old-town coast, College of Innovation and Management, Songkhla Rajabhat University, Songkhla, 2016.
- [11] *Research report*, Monitoring of marine coastal sediment quality in 2016, Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment, 2016.
- [12] S. Kan-atireklap, S. Tanabe, and J. Sanguansin, "Contamination by butyltin compounds in sediment from Thailand," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 34, pp. 894–899, Nov. 1997.
- [13] B. P. Mensink, H. Kratt, A. D. Vethaak, C. C. T. Hallers-Tjabbes, J. H. Koeman, B. van Hattum, and J. P. Boon, "Imposex induction in laboratory reared juvenile *Buccinum undatum* by tributyltin (TBT)," *Environmental Toxicology and Pharmacology*, vol. 11, pp. 49–65, Jan. 2002.
- [14] N. Chaithanawisut, S. Kritsanapuntu, W. Santhaweesuk, and S. Phopphet, *Commercial Farming and Aquaculture of Spotted Babylon in Thailand*. Bangkok: Chulalongkorn University Press, 2013.
- [15] R. F. Lee, "Metabolism of tributyltin by aquatic organisms," in *Organotin*, M. Champ and P. F. Seligman, Eds. London: Chapman & Hall, 1995, pp. 369–382.
- [16] P. E. Gibbs and G. W. Bryan, "TBT-induced imposex in gastropod snails: masculinization to mass extinction," in *Tributyltin: Case Study of an Environment Contaminant*, S. J. De Mora, Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996, pp. 212–236.
- [17] H. Harino, S.C.M. O'Hara, G.R. Burt, B.S. Chesman and W.J. Langston, "Distribution of organotin compounds in tissues of mussels *Mytilus edulis* and clams *Mya Arenaria*," *Chemosphere*, vol. 58, pp. 877–881. Feb. 2005.
- [18] G.W. Bryan, D.A. Bright, L.G. Hummerstone and G.R. Burt, "Uptake, tissue distribution and metabolism of ¹⁴C-labelled tributyltin (TBT) in the dog whelk, *Nucella lapillus*," *Journal of the Marine Biological Association UK*, vol. 73, pp. 889–912, Nov. 1993.
- [19] J.W. Short and F.P. Thrower, "Accumulation of butyltins in muscle tissue of Chinook salmon reared in sea pens treated with tri-n-butyltin," *Marine*

- Pollution Bulletin*, vol. 17, pp. 542-545. Dec. 1986.
- [20] J. Widdows and D.S. Page, "Effects of tributyltin and dibutyltin on the physiological energetics of the mussel, *Mytilus edulis*," *Marine Environmental Research*, vol. 35, pp. 233-249. Mar. 1993.
- [21] A. Giusti, A. Barsi, M. Dugué, M. Collinet, J.P. Thomé, C. Joaquim-Justo, B. Roig, L. Lagadic and V. Ducrot, "Reproductive impacts of tributyltin (TBT) and triphenyltin (TPT) in the hermaphroditic freshwater gastropod *Lymnaea stagnalis*," *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 32, pp. 1552-1560, Jul. 2013.
- [22] T. Horiguchi, H. Shiraishi, M. Shimizu and M. Morita, "Effects of triphenyltin chloride and five other organotin compounds on the development of imposex in the rock shell, *Thais clavigera*," *Environmental Pollution*, vol. 95, pp. 85-91. Feb. 1997.
- [23] M. Vighi, and D. Calamari, "QSARs for organotin compounds on *Daphnia magna*," *Chemosphere*, vol. 14, pp. 1925-1932. Jan. 1985.
- [24] H. Guolan and W. Yong, "Effects of tributyltin chloride on marine bivalve mussels," *Water Research*, vol. 29, pp. 1877-1884. Aug. 1995.
- [25] C. Bettin, J. Oehlmann and E. Stroben, "TBT-induced imposex in marine neogastropods is mediated by an increasing androgen level," *Helgolander Meeresunters*, vol. 50, pp. 299-317, Sep. 1996.