



## เทคโนโลยีในการกำจัดสิ่งมีชีวิตที่คาดว่าจะเป็นชนิดพันธุ์ต่างถิ่นที่รุกรานในน้ำอับเฉาเรือ

### Technology for Invasive Species Removal in Ballast Water

วรัญพัชร แสงสัมฤทธิ์<sup>1</sup>, สันติ พวงเจริญ<sup>2</sup>, ปาสินี วรชนะนนท์<sup>1\*</sup>

Waranphat Saengsomrit<sup>1</sup>, Santi Pongcharean<sup>2</sup>, Pasinee Worachananant<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ภาคเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

<sup>1</sup>Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University

<sup>2</sup>ภาควิชาชีววิทยาประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

<sup>2</sup>Department of Fishery Biology, Faculty of Fisheries, Kasetsart University

Received : 16 July 2022

Revised : 26 October 2022

Accepted : 27 October 2022

#### บทคัดย่อ

ปัญหาการปนเปื้อนของชนิดพันธุ์ต่างถิ่นในน้ำอับเฉาเป็นหนึ่งในสื่อกักตุนที่สำคัญต่อระบบนิเวศทางทะเล ในน้ำอับเฉามีชนิดพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตมากกว่า 7,000 ชนิด ถ้าไม่มีการบำบัดอย่างเหมาะสมสิ่งมีชีวิตจะมีการแพร่กระจายสู่สภาพแวดล้อมใหม่ ส่งผลต่อสายพันธุ์พื้นเมือง และก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางระบบนิเวศ จึงทำการศึกษาเทคโนโลยีการกำจัดสิ่งมีชีวิตต่างถิ่นที่รุกรานในน้ำอับเฉาเรือ โดยศึกษาผลการบำบัดสิ่งมีชีวิต 4 ชนิด ได้แก่ แพลงก์ตอนพืชจำนวน 2 ชนิด คือ *Chaetoceros* sp. และ *Chlorella* sp. และแพลงก์ตอนสัตว์ 2 ชนิด คือ ตัวอ่อนปูม้า ระยะเวลา zoea และ *Artemia* sp. โดยใช้รูปแบบการบำบัด 4 วิธี ได้แก่ 1. อุณหภูมิต่ำ 2. อัลตราไวโอเล็ต 3. โอโซน และ 4. ไมโครบับเบิล จากการศึกษาพบว่า การบำบัดด้วยไมโครบับเบิลเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด สามารถบำบัดแพลงก์ตอนทั้ง 4 ชนิด ได้มากถึงร้อยละ 100 โดยใช้เวลาในการบำบัด 20 นาที รองลงมา คือ การบำบัดด้วยอัลตราไวโอเล็ต สามารถบำบัดแพลงก์ตอนทั้ง 4 ชนิด ได้มากถึงร้อยละ 100 ที่เวลา 240 นาที การบำบัดด้วยโอโซน มีประสิทธิภาพในการบำบัดแพลงก์ตอนสัตว์ดีกว่าแพลงก์ตอนพืช โดยสามารถบำบัดแพลงก์ตอนสัตว์ได้เท่ากับร้อยละ 100 ที่เวลา 360 นาที แต่การบำบัดแพลงก์ตอนพืชมีประสิทธิภาพสูงสุดเพียงร้อยละ 56.87 ที่เวลา 360 นาที ในขณะที่การบำบัดสิ่งมีชีวิตด้วยอุณหภูมิเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพต่ำสุด โดยสามารถบำบัดแพลงก์ตอนสัตว์ได้ดีกว่าแพลงก์ตอนพืช โดยสามารถบำบัดแพลงก์ตอนสัตว์ได้เท่ากับร้อยละ 100 ที่เวลา 300 นาที และการบำบัดแพลงก์ตอนพืชมีประสิทธิภาพสูงสุดเพียงร้อยละ 38.08 ที่เวลา 1440 นาที

**คำสำคัญ :** การบำบัดน้ำอับเฉา ; ไมโครบับเบิล ; โอโซน ; อุณหภูมิต่ำ ; อัลตราไวโอเล็ต



### Abstract

Contamination of alien species in ballast water is one of the four major threats to marine ecosystems. There are more than 7,000 species of organisms found in ballast water. Without proper treatment, these organisms were released into new environments and causing a devastating effect on native species and the ecological changes. Therefore, the removal efficiency of technology including temperature, Ultraviolet, ozone and microbubble to treat 2 phytoplankton (*Chaetoceros* sp. and *Chlorella* sp.) and 2 zooplanktons (Crab larvae in Zoea stag and *Artemia* sp.) were investigated. The results showed that microbubble treatment is the most effective technology which can treat up to 100% of all 4 types of plankton within 20 minutes. Ultraviolet treatment is the second most effective technology, which can treat up to 100% of all 4 types of plankton within 240 minutes. Followed by ozone treatment which can treat zooplankton (100% within 360 min) better than phytoplankton (56.87% within 360 min). The least efficient method was temperature treatment, which can treat zooplankton (100% within 300 min) better than phytoplankton (38.08% within 1,440 min).

**Keywords** : ballast water treatment ; microbubble ; ozone ; temperature ; ultraviolet

\*Corresponding author. E-mail : [pasinee.r@ku.th](mailto:pasinee.r@ku.th)



## บทนำ

ปัจจุบันเป็นยุคที่มีการเติบโตทางด้านเศรษฐกิจเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะธุรกิจด้านการขนส่งทางเรือ ประเทศไทยได้พัฒนาประเทศโดยการอาศัยการค้าระหว่างประเทศมาโดยตลอด ซึ่งมีการนำเข้าและส่งออกสินค้าทางเรือมากถึงร้อยละ 80 ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2513 ปริมาณการเดินเรือทางทะเลได้เพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 2.1 ต่อปี ซึ่งมีการขนส่งสินค้ามากกว่า 10 พันล้านตัน ในปีพ.ศ. 2558 (UNCTAD, 2017) การที่ธุรกิจการขนส่งทางเรือเติบโตไปอย่างรวดเร็วได้ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมทางทะเลประสบปัญหาสภาวะวิกฤต เนื่องจากเรือแต่ละลำมีการสูบน้ำเข้าไปยังห้องอับเฉาเพื่อใช้ในการปรับศูนย์ถ่วงของเรือ รวมไปถึงการรักษาสมดุลของเรือในปริมาณที่มากกว่า 1,000 ตัน/ลำ ทำให้ในแต่ละปีมีการถ่ายน้ำอับเฉาเรือมากถึง 5,000 ล้านตัน/ปี (Bikram, 2016)

ปัจจุบันการปล่อยน้ำอับเฉาลงสู่ระบบนิเวศจึงกลายเป็นปัญหาที่เพิ่มขึ้นในระดับโลก โดยมีผลกระทบต่อระบบนิเวศ เศรษฐกิจ และสุขภาพ การเดินเรือทางทะเลถูกระบุว่าเป็นหนึ่งในเส้นทางสำคัญของการเคลื่อนย้ายที่อยู่ของชนิดพันธุ์ต่างถิ่นโดยไม่ได้ตั้งใจ (Bax *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2016; Ruiz *et al.*, 2000; Wan *et al.*, 2016) โดยมีน้ำอับเฉาที่เป็นตัวกลางในการเคลื่อนย้ายที่สำคัญของการแพร่กระจายของสิ่งมีชีวิตจากระบบนิเวศหนึ่งไปสู่ระบบนิเวศหนึ่ง การสูบน้ำทะเลขึ้นมาในแต่ละครั้งจะมีชนิดพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตติดขึ้นมาด้วยมากกว่า 7,000 – 10,000 ชนิด (James, 1999)

จากการสำรวจสิ่งมีชีวิตในน้ำอับเฉาเรือที่บริเวณท่าเรือของประเทศจีนจำนวน 19 แห่ง ซึ่งมีการสุ่มสำรวจน้ำอับเฉาเรือจากประเทศญี่ปุ่น ประเทศเกาหลีใต้ ประเทศไต้หวัน และประเทศจีน ในการสำรวจครั้งนี้ทำให้ทราบถึงชนิดพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตในน้ำอับเฉาเรือ พบว่ามีจำนวนแพลงก์ตอนพืชมากถึง 40 สายพันธุ์ และแพลงก์ตอนสัตว์ 16 สายพันธุ์ โดยมีการแบ่งประเภทของสิ่งมีชีวิตเป็น 4 กลุ่มใหญ่ที่พบเป็นจำนวนมากในการสำรวจสิ่งมีชีวิตในน้ำอับเฉาเรือ ได้แก่ แพลงก์ตอนกลุ่มไดอะตอมซึ่งเป็นกลุ่มที่มีผลผลิตที่หนา และแข็งแรง แพลงก์ตอนกลุ่มสาหร่ายสีเขียวมีความสามารถในการเจริญเติบโตได้ดีในหลายสภาวะ สามารถพบได้ทั่วไปทั้งน้ำจืด น้ำเค็ม และน้ำกร่อย บางสายพันธุ์อาจนำไปสู่ภาวะยูโทรฟิเคชัน หรือ red tide และสาหร่ายสีเขียวบางชนิดเป็นสายพันธุ์ที่มีพิษสามารถส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำและระบบนิเวศ (GEF-UNDP-IMO GloBallast Partnerships Programme, 2017) กลุ่มตัวอ่อนสัตว์น้ำ รวมไปถึงไข่ของสัตว์น้ำบางชนิดที่มีความแข็งแรง และสามารถปรับตัวต่อสภาพแวดล้อมได้สูง ซึ่งทำให้มีผลกระทบโดยตรงต่อระบบนิเวศ เช่น การเติบโตในสภาพแวดล้อมใหม่ มีการแพร่พันธุ์สร้างประชากรอย่างรวดเร็ว เกิดการรุกรานสัตว์น้ำท้องถิ่น หรือสร้างผลกระทบต่อสมดุลของระบบนิเวศและทั้งเศรษฐกิจ เช่น American comb jelly (*Mnemiopsis leidyi*) ถือว่าเป็นชนิดพันธุ์ต่างถิ่นที่เป็นภัยคุกคามที่สำคัญที่สุดของทะเลดำ (Black sea) ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศโดยตรง สายพันธุ์นี้ถูกนำมาจากทะเลเหนือ (North sea) ซึ่งมีการคุกคามสัตว์น้ำในพื้นที่ มีการกินไข่และตัวอ่อนของสัตว์น้ำเป็นจำนวนมาก นำไปสู่ความสูญเสียทางเศรษฐกิจ และก่อให้เกิดการลดลงอย่างรวดเร็วของประชากรสัตว์น้ำในพื้นที่นั้น (Vladimir *et al.*, 2000) European Green Crab (*Carcinus maenas*) เป็นปูอีกสายพันธุ์หนึ่งที่มีการตั้งถิ่นฐานใหม่ที่ประเทศออสเตรเลีย ปูชนิดนี้มีถิ่นกำเนิดอยู่ที่มหาสมุทรแอตแลนติกและเขตชายฝั่งแปซิฟิกของอเมริกาเหนือ ปูชนิดนี้เป็นสัตว์กินเนื้อ เช่น หอยนางรมและหอยชนิดต่างๆ สามารถส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจ และการทำประมงเกี่ยวกับหอยประเภทต่างได้ (GEF-UNDP-IMO GloBallast Partnerships Programme, 2017) และกลุ่มคริสเตเซียน



(โรน้าทะเล) ซึ่งมีการขยายพันธุ์และเจริญเติบโตที่เร็วมากในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม และมีเปลือกแข็งหุ้มตามลำตัว (Wu *et al.*, 2017) เช่น Cladoceran water Flea (*Cercopagis pengoi*) หรือ fish – hook water flea มีถิ่นกำเนิดที่ Black Sea , Caspian Sea , Azov Sea และ Aral Sea จากหลักฐานการแพร่กระจายในระบบนิเวศของอเมริกาเหนือ รวมไปถึงมีการแพร่กระจายใน Lake Ontario และ Great Lakes ทำให้รัฐบาลของอเมริกาและประเทศแคนาดาต้องหามาตรการรับมือกับโรน้าชนิดนี้ เนื่องจากไข่ของโรน้าทะเลสามารถคงอยู่ในสภาวะพักได้เป็นเวลานาน และยังสามารถทนต่อสภาพแวดล้อมได้สูง เมื่อมีปัจจัยที่เอื้อหนุนต่อการเจริญเติบโต ไข่ก็สามารถฟักออกมาเป็นตัวอ่อนและเจริญเติบโตในระบบนิเวศใหม่ได้ (GEF-UNDP-IMO GloBallast Partnerships Programme, 2017)

ในหลายประเทศทั่วโลกได้รับผลกระทบจากการปล่อยน้ำอับเฉาจากระบบนิเวศซึ่งมีสิ่งมีชีวิตที่รุกราน และสิ่งมีชีวิตที่สามารถก่อให้เกิดโรคต่างปะปนมาด้วย ดังนั้นการแพร่กระจายของน้ำอับเฉาจึงถูกระบุว่าเป็นหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการจัดการระบบนิเวศทางทะเล จึงทำให้ปัญหาเหล่านี้ถูกนำไปเป็นหัวข้อที่สำคัญเกี่ยวกับผลกระทบที่มีต่อระบบนิเวศทางทะเลขององค์การทางทะเลระหว่างประเทศ (International Maritime Organization's : IMO) และคณะกรรมการคุ้มครองสิ่งแวดล้อมทางทะเล (Marine Environment Protection committee : MEPC) (Lakshmi *et al.*, 2021) เพื่อตอบสนองต่อภัยคุกคามที่รุนแรงนี้ องค์การทางทะเลระหว่างประเทศ (IMO) ได้มีการจัดแนวทางการควบคุมและการจัดการน้ำอับเฉาเรือขึ้นเพื่อลดหรือจำกัดการเคลื่อนย้ายของสิ่งมีชีวิตที่อาจจะเป็นอันตราย และได้มีการพัฒนาอนุสัญญาระหว่างประเทศว่าด้วยการควบคุมและจัดการบัลลาสต์น้ำและตะกอนของเรือ ค.ศ. 2004 (Ballast Water Management Convention : BWM Convention) จึงทำให้รัฐบาลของหลายประเทศให้ความสนใจเกี่ยวกับสิ่งมีชีวิตที่ปะปนมากับน้ำอับเฉาเรือมากขึ้น

ระบบบำบัดน้ำอับเฉาเรือที่เป็นที่นิยมได้แก่ การกรอง การบำบัดทางกายภาพ และการบำบัดทางเคมี หรือการผสมผสานของทั้งสองอย่างเข้าด้วยกัน (Balaji *et al.*, 2017; Gregg *et al.*, 2009; Satir, 2014; Tsolaki *et al.*, 2010) จากการศึกษาการบำบัดด้วยรังสี UV พบว่าแบคทีเรียมีปฏิกิริยาต่อรังสี UV มากกว่าแพลงก์ตอนพืชและแพลงก์ตอนสัตว์ (Sutherland *et al.*, 2001) จากการศึกษาการบำบัดด้วยโอโซนเป็นเวลา 5-10 ชั่วโมง พบว่าสามารถบำบัดแพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ และแบคทีเรียได้ร้อยละ 70-99 (Tsolaki *et al.*, 2010) จากการศึกษาการบำบัดจากโอโซนเป็นเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าสามารถบำบัดแพลงก์ตอนพืชได้มากกว่าร้อยละ 90 (Hess-Erga *et al.*, 2019) จากการศึกษาการบำบัดด้วยอุณหภูมิ พบว่า แพลงก์ตอนพืชส่วนใหญ่สามารถบำบัดได้ที่อุณหภูมิ 35-37.5 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการบำบัดมากกว่า 30 นาที โดยประสิทธิภาพสูงที่สุดในการบำบัดสามารถทำได้ที่ 38 องศาเซลเซียส หลังจากการบำบัดที่ 4 ชั่วโมง 30 นาที (Tsolaki *et al.*, 2010) และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 55 องศาเซลเซียสเป็น 80 องศาเซลเซียส แพลงก์ตอนสัตว์จะลดลงถึงร้อยละ 95 และแพลงก์ตอนพืชจะลดลงถึงร้อยละ 90 (Quilez-Badia *et al.*, 2008) อย่างไรก็ตาม พบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาสิ่งมีชีวิตเฉพาะกลุ่ม โดยใช้วิธีใดวิธีหนึ่งเท่านั้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเทคโนโลยีในการกำจัดสิ่งมีชีวิตในระบบน้ำอับเฉา โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสิ่งมีชีวิตทั้งในกลุ่มแพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ และสัตว์น้ำวัยอ่อน โดยเปรียบเทียบเทคโนโลยีในการบำบัด 4 เทคโนโลยี เพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนแนวทางป้องกันการรุกรานของชนิดพันธุ์ต่างถิ่นนี้ได้อย่างเหมาะสมต่อไปในอนาคต



## วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษานี้ทำการเลือกสิ่งมีชีวิตในการทดลองประสิทธิภาพเทคโนโลยีในการบำบัด โดยมีเกณฑ์ในการเลือกสิ่งมีชีวิตดังนี้

1. แพลงก์ตอนกลุ่มไดอะตอมซึ่งเป็นกลุ่มที่มีผนังเซลล์ที่หนา และแข็งแรง ได้แก่ *Chaetoceros* sp.
2. แพลงก์ตอนกลุ่มสาหร่ายสีเขียวมีความสามารถในการเจริญเติบโตได้ดีในหลายสภาวะ สามารถพบได้ทั่วไปทั้งน้ำจืด น้ำเค็ม และน้ำกร่อย ได้แก่ *Chlorella* sp. (สาหร่ายสีเขียว)
3. แพลงก์ตอนสัตว์ และตัวอ่อนสัตว์น้ำกลุ่มครัสเตเชียซึ่งมีการขยายพันธุ์และเจริญเติบโตที่เร็วมากในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม และมีเปลือกแข็งหุ้มตามลำตัว ได้แก่ *Artemia* sp. (ไรน้ำทะเล) และตัวอ่อนปูม้า ระยะ zoea (ตัวอ่อนสัตว์น้ำ) และ

โดยมีการทดลองประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการบำบัดทั้งหมด 4 วิธี ได้แก่ อุณหภูมิ แสง UV และ Microbubble ระหว่างการทดลองเทคโนโลยีการบำบัดจะมีการตรวจวัดประสิทธิภาพโดยการวิเคราะห์หาค่าคลอโรฟิลล์ เอ ในกลุ่มตัวอย่าง แพลงก์ตอนพืช และการนับปริมาณความหนาแน่นในกลุ่มตัวอย่างแพลงก์ตอนสัตว์ เพื่อเปรียบเทียบร้อยละการลดลงของแพลงก์ตอนก่อนและหลังการบำบัด

ในการเพาะเลี้ยงแพลงก์ตอนพืชจะทำในห้องเพาะเลี้ยงแบบปิดที่มีการควบคุมปัจจัยต่างๆ ดังนี้ อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส ความเค็มน้ำทะเลที่ 30-33 ppt ให้แสงสว่างตลอด 24 ชั่วโมง ที่ความเข้มแสง 3,000 ลักซ์ อาหารที่ใช้ในการเลี้ยงแพลงก์ตอนพืชเป็นสูตรอาหารที่ดัดแปลงจากสูตรของคอนเวย์และวิลเน โดยจะใช้เวลาในการทดลองคือ 0 , 20 , 40 , 60 , 90 , 120 , 150 , 180 , 240 , 300 , 360 , 720 และ 1440 นาที และการบำบัดด้วย Ozone จะใช้เวลาในการทดลองคือ 0 , 20 , 40 , 60 , 90 , 120 , 150 , 180 , 240 , 300 และ 360 ทุกการทดลองประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการบำบัดจะทำในห้องปฏิบัติการที่ไร้แสง เพื่อจำลองห้องปฏิบัติการให้เหมือนกับถังอับเฉาเรือที่อยู่ในสภาวะไร้แสง ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ และมีการวิเคราะห์สถิติด้วย ANOVA ซึ่งมีรายละเอียดการศึกษาดังนี้

การบำบัดด้วยอุณหภูมิ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองจะมีทั้งหมด 4 ช่วง คือ 27 , 38 , 40 และ 43 องศาเซลเซียส ปรับอุณหภูมิของน้ำตัวอย่างด้วยขดลวดไฟฟ้า (Aquarium heater)

การบำบัดด้วยแสง UV ใช้ระดับความเข้มแสง 4 ระดับ คือ 0 , 5 , 11 และ 30 วัตต์

การบำบัดด้วย Ozone ใช้ปริมาณความเข้มข้นของ Ozone ทั้งหมด 4 ระดับ คือ 0 , 0.53 , 1.14 และ 1.14 มิลลิกรัมต่อนาที (mg/min)

การบำบัดด้วย Microbubble ดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบทช์ โดยใช้ความดันก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่ 4 ระดับ คือ 0 , 5 , 10 และ 15 Mpa.

### ผลการวิจัย

#### - การบำบัดด้วยอุณหภูมิ

จากการทดลองการบำบัดของ *Chaetoceros* sp. ด้วยอุณหภูมิ พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ  $29.09 \pm 0.73$ ,  $21.62 \pm 0.06$  และ  $5.92 \pm 0.54$  ที่อุณหภูมิ 43, 40 และ 38 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่เวลา 1440 นาที

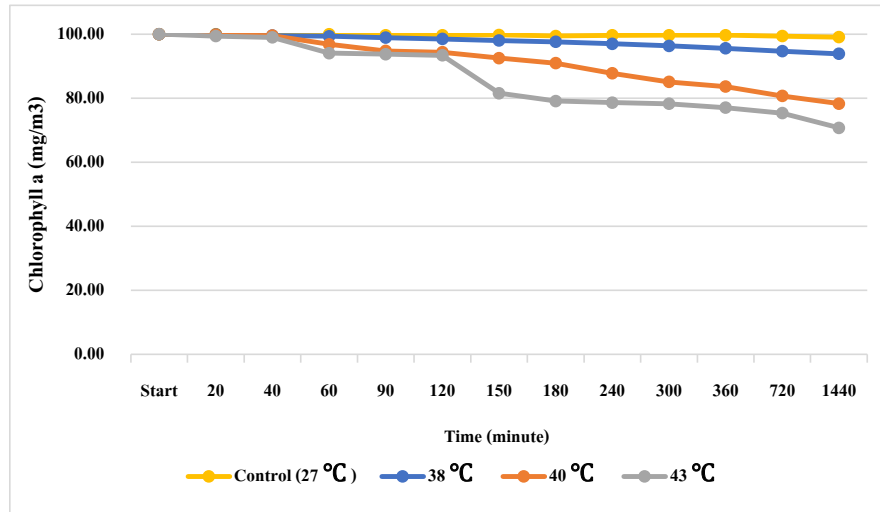


Figure 1 The removal efficiency of *Chaetoceros* sp. with temperature.

การบำบัดของ *Chlorella* sp. ด้วยอุณหภูมิ พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ  $38.08 \pm 0.80$ ,  $28.90 \pm 1.31$  และ  $19.63 \pm 0.58$  ที่อุณหภูมิ 43, 40 และ 38 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่เวลา 1440 นาที

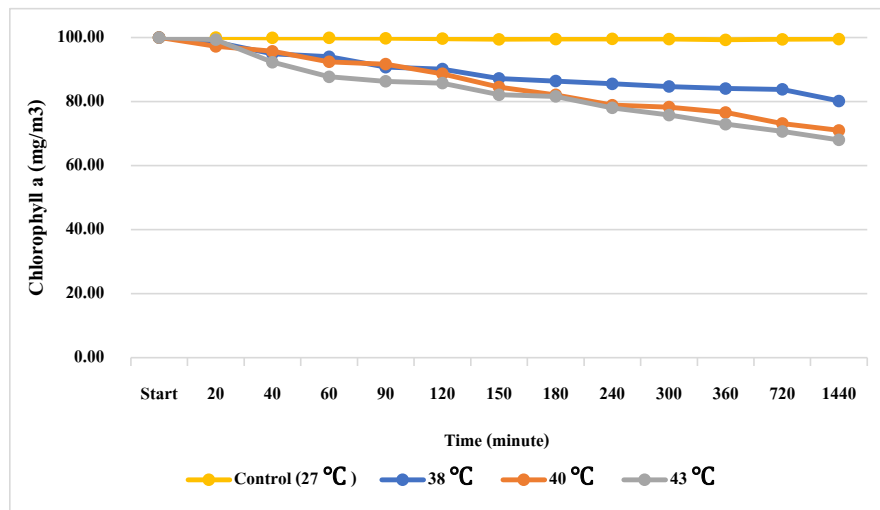


Figure 2 The removal efficiency of *Chlorella* sp. with temperature

การบำบัดของตัวอ่อนปูม้าด้วยอุณหภูมิ พบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ  $100 \pm 0$  ที่อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส ที่เวลา 720 นาที รองลงมาคือร้อยละ  $89.55 \pm 3.07$  และ  $48.84 \pm 3.48$  ที่อุณหภูมิ 40 และ 38 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่เวลา 1440 นาที

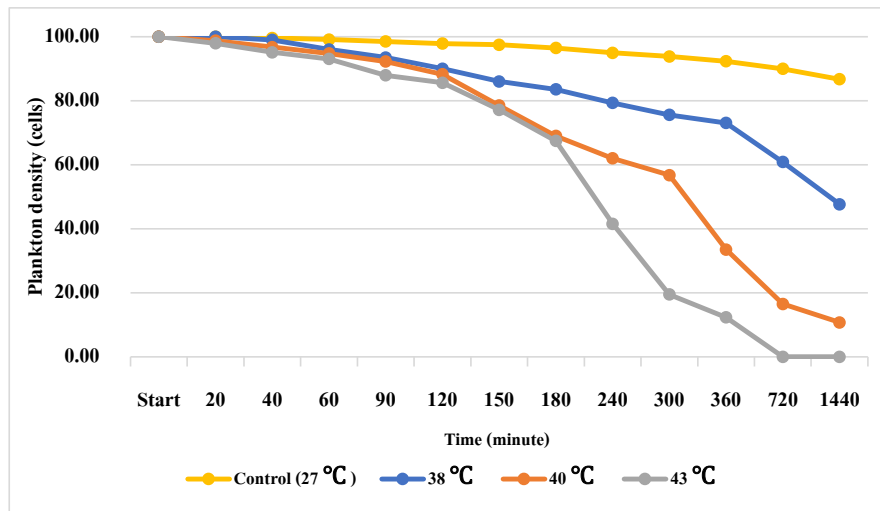


Figure 3 The removal efficiency of blue swimming crab in zoea larvae stages with temperature.

การบำบัดของ *Artemia* sp. ด้วยอุณหภูมิ พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ  $100 \pm 0$  ที่อุณหภูมิ 43 , 40 และ 38 องศาเซลเซียส ที่เวลา 300 , 360 และ 720 นาทีตามลำดับ

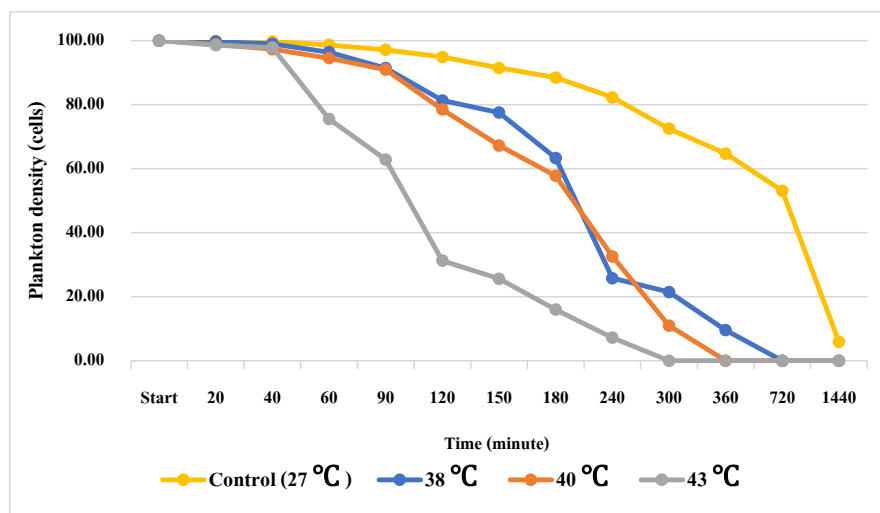


Figure 4 The removal efficiency of *Artemia* sp. with temperature.

จากการศึกษาการบำบัดสิ่งมีชีวิตด้วยอุณหภูมิ พบว่าการบำบัดด้วยอุณหภูมิมีประสิทธิภาพสูงสุด และสามารถกำจัดสิ่งมีชีวิตได้ดีที่อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส โดยการบำบัดด้วยอุณหภูมิเหมาะสมสำหรับการบำบัดสิ่งมีชีวิตกลุ่ม

แพลงก์ตอนสัตว์มากกว่าแพลงก์ตอนพืช เนื่องจากสามารถกำจัดสิ่งมีชีวิตกลุ่มแพลงก์ตอนสัตว์ได้แก่ ตัวอ่อนปูม้า ระยะ zoea และ *Artemia* sp. ได้ร้อยละ 100±0 ที่เวลา 720 และ 300 นาที ตามลำดับ ซึ่งแพลงก์ตอนพืชมีผนังเซลล์ที่หนาและแข็งแรง จึงทำให้ทนต่อการบำบัดด้วยอุณหภูมิได้ (Tsolaki et al., 2010)

- การบำบัดด้วยแสง UV

จากการทดลองการบำบัดของ *Chaetoceros* sp. ด้วยแสง UV พบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ 100±0 ที่ความเข้มแสง 30 และ 11 วัตต์ ที่เวลา 240 และ 720 นาทีตามลำดับ รองลงมาคือร้อยละ 79.85±1.57 ที่ความเข้มแสง 5 วัตต์ ที่เวลา 1440 นาที

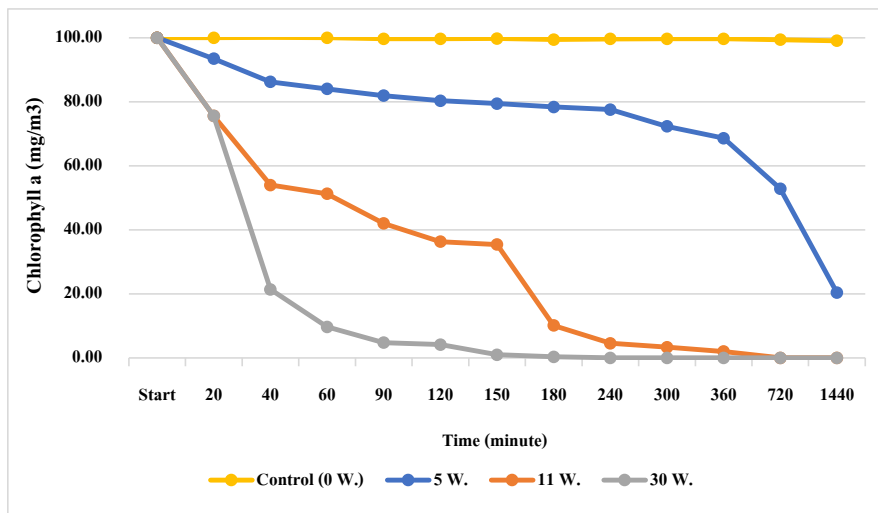


Figure 5 The removal efficiency of *Chaetoceros* sp. with UV.

การบำบัดของ *Chlorella* sp. ด้วยแสง UV พบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ 100±0 ที่ความเข้มแสง 30 และ 11 วัตต์ ที่ระยะเวลา 240 และ 1440 นาทีตามลำดับ รองลงมาคือร้อยละ 98.57±0.41 ที่ความเข้มแสง 5 วัตต์ ที่เวลา 1440 นาที



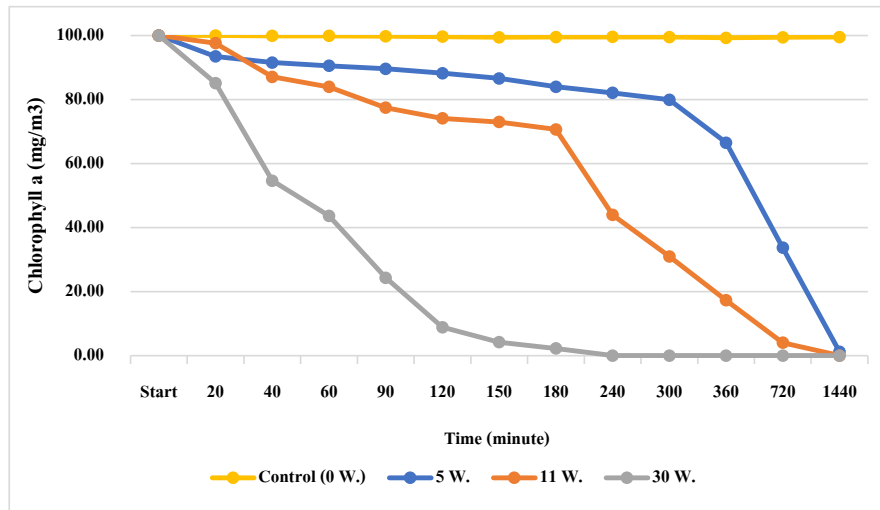


Figure 6 The removal efficiency of *Chlorella* sp. with UV.

การบำบัดของตัวอ่อนปูม้าด้วยแสง UV พบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ  $100 \pm 0$  ที่ความเข้มแสง 30 , 11 และ 5 วัตต์ ของระยะเวลาที่ 240 , 720 และ 1440 นาที ตามลำดับ

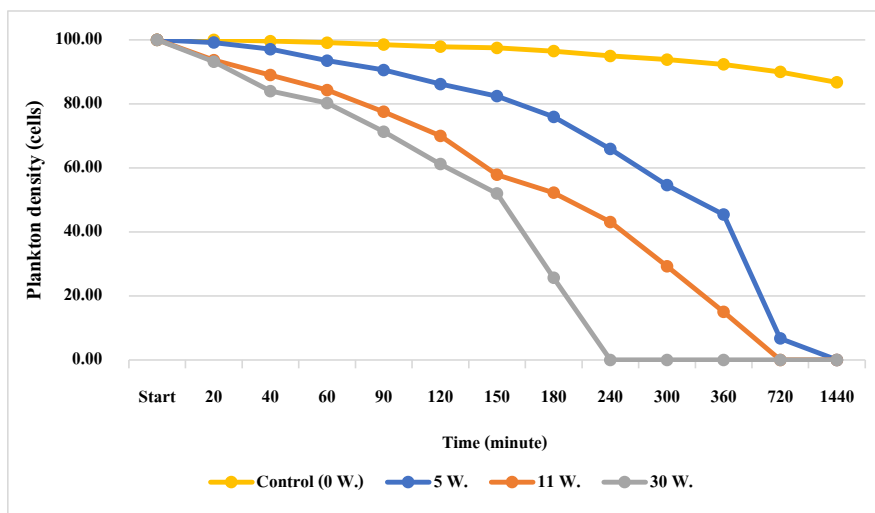


Figure 7 The removal efficiency of blue swimming crab in zoea larvae stages with UV.

การบำบัดของ *Artemia* sp. ด้วยแสง UV พบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ  $100 \pm 0$  ที่ความเข้มแสง 30 และ 11 วัตต์ ที่เวลา 240 และ 1440 นาที ตามลำดับ รองลงมาคือร้อยละ  $97.95 \pm 1.06$  ที่ความเข้มแสง 5 วัตต์ ที่เวลา 1440 นาที

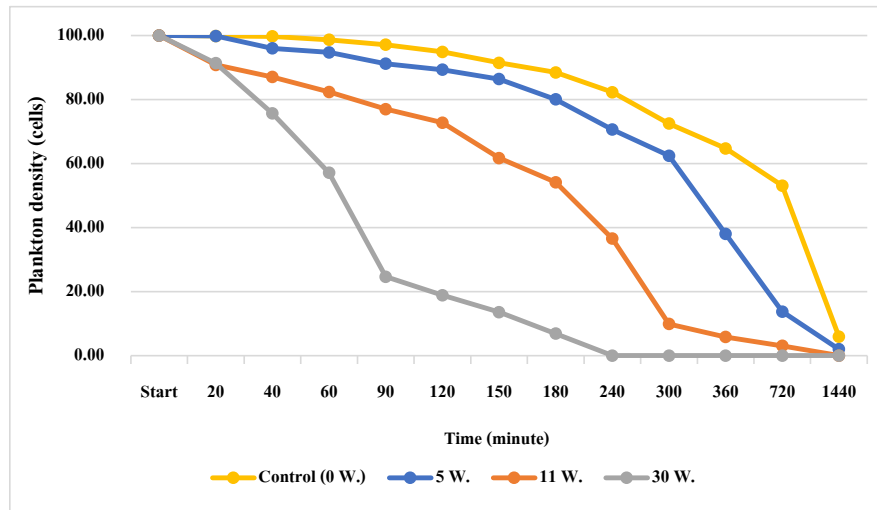


Figure 8 The removal efficiency of *Artemia* sp. with UV.

จากการศึกษาการบำบัดสิ่งมีชีวิตด้วยแสง UV พบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ 100 และสามารถกำจัดสิ่งมีชีวิตได้ดีในช่วงของความเข้มแสง 30 วัตต์ โดยการบำบัดด้วยแสง UV มีความเหมาะสมสำหรับการบำบัดสิ่งมีชีวิตกลุ่มแพลงก์ตอนสัตว์และแพลงก์ตอนพืชที่เท่ากัน ที่เวลา 240 นาที การบำบัดด้วยแสง UV ที่ช่วงของความเข้มแสงสูงสามารถกำจัดสิ่งมีชีวิตที่ถูกสัมผัสได้ ซึ่งประสิทธิภาพของแสง UV ในปริมาณที่สูงสามารถทำลายดีเอ็นเอและผนังเซลล์ของสิ่งมีชีวิตได้ โดยการก่อตัวของไดเมอร์ที่สามารถยับยั้งการเติบโตของสิ่งมีชีวิตได้และสามารถส่งเสริมการก่อตัวของอนุมูลอิสระซึ่งส่งผลให้เกิดกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (AOPs) (Penru *et al.*, 2012)

#### - การบำบัดด้วย Ozone

จากการทดลองการบำบัดของ *Chaetoceros* sp. ด้วย Ozone พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ  $54.99 \pm 0.37$ ,  $52.89 \pm 0.63$  และ  $32.71 \pm 0.36$  ที่ปริมาณความเข้มข้นของ Ozone เท่ากับ 1.20, 1.14 และ 0.53 มิลลิกรัมต่อนาที ตามลำดับที่เวลา 360 นาที

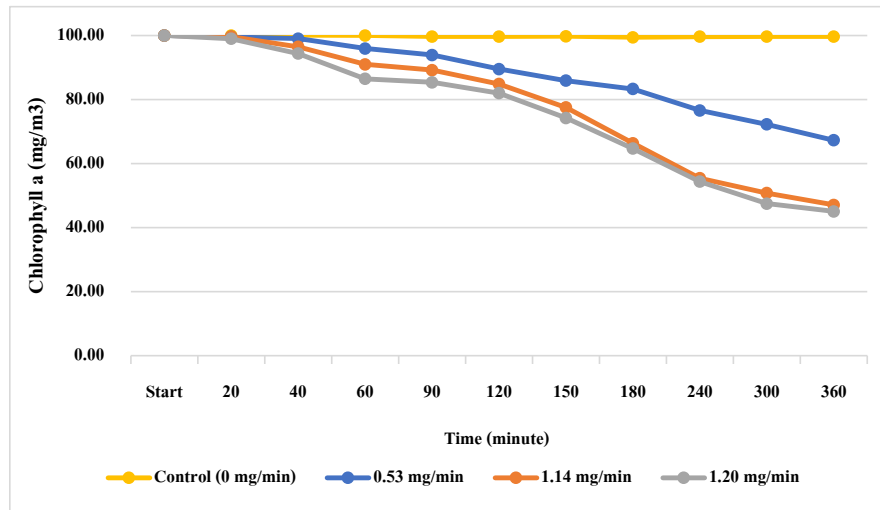


Figure 9 The removal efficiency of *Chaetoceros* sp. with ozone.

การทดลองการบำบัดของ *Chlorella* sp. ด้วย Ozone พบว่า มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ ร้อยละ  $56.87 \pm 0.67$ ,  $56.40 \pm 0.47$  และ  $29.50 \pm 0.54$  ที่ปริมาณความเข้มข้นของ Ozone เท่ากับ 1.20 , 1.14 และ 0.53 มิลลิกรัมต่อนาที ตามลำดับ ที่เวลา 360 นาที

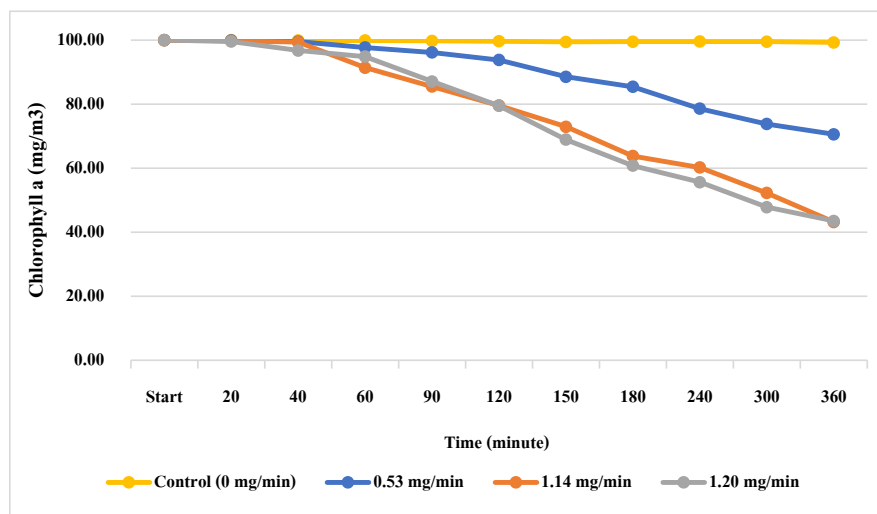


Figure 10 The removal efficiency of *Chlorella* sp. with ozone.

การทดลองการบำบัดของตัวอ่อนปูม้าด้วย Ozone พบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ  $100 \pm 0$  ที่ปริมาณความเข้มข้นของ Ozone เท่ากับ 1.20 , 1.14 และ 0.53 มิลลิกรัมต่อนาที ตามลำดับ ที่เวลา 180 , 180 และ 300 นาที ตามลำดับ

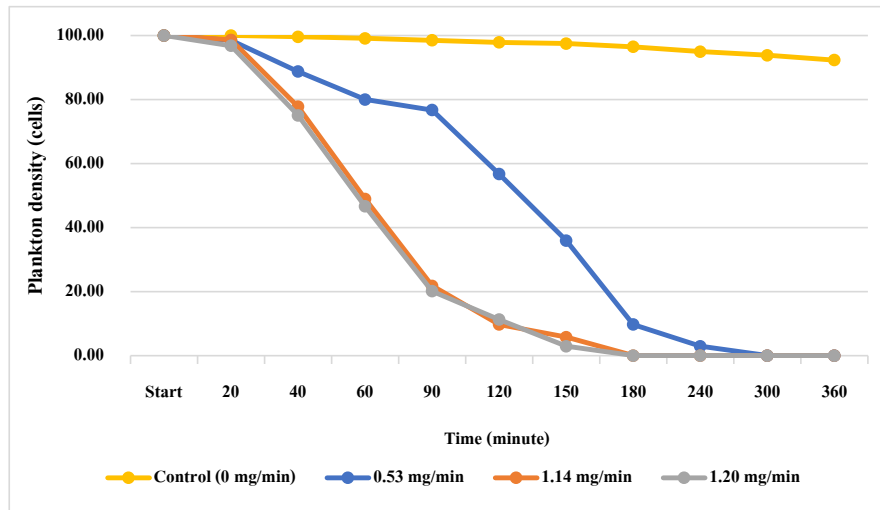
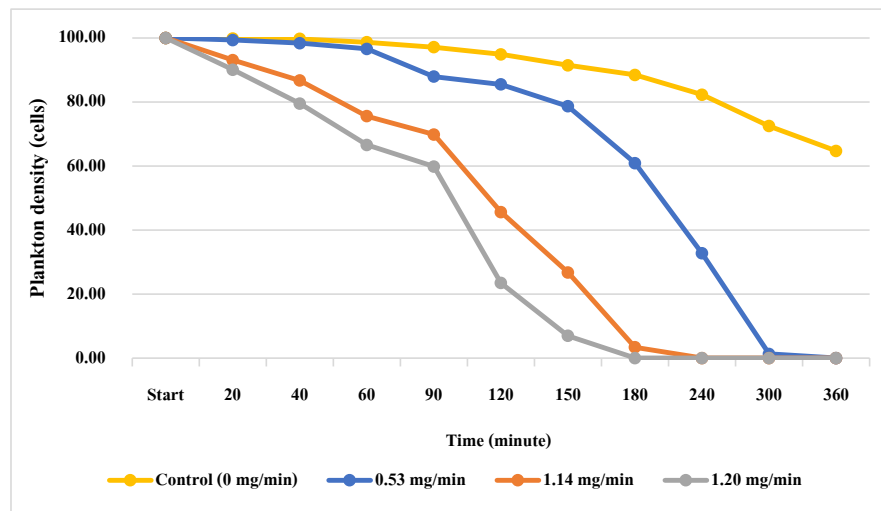


Figure 11 The removal efficiency of blue swimming crab in zoea larvae stages with ozone.

การทดลองการบำบัดของ *Artemia* sp. ด้วย Ozone พบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ  $100 \pm 0$  ที่ปริมาณความเข้มข้นของ Ozone เท่ากับ 1.20 , 1.14 และ 0.53 มิลลิกรัมต่อนาที ตามลำดับ ที่เวลา 180 , 240 และ 360 นาที ตามลำดับ



ภาพที่ 12 The removal efficiency of *Artemia* sp. with ozone.

จากการศึกษาการบำบัดสิ่งมีชีวิตด้วย Ozone มีประสิทธิภาพสูงสุด และสามารถกำจัดสิ่งมีชีวิตได้ดีที่ปริมาณความเข้มข้นของ Ozone เท่ากับ 1.20 มิลลิกรัมต่อนาที โดยการบำบัดด้วย Ozone มีความเหมาะสมสำหรับการบำบัดสิ่งมีชีวิตกลุ่มแพลงก์ตอนสัตว์มากกว่าแพลงก์ตอนพืช เนื่องจากแต่การบำบัดสิ่งมีชีวิตด้วย Ozone จะมีประสิทธิภาพมากกว่าสำหรับสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดมากกว่า 100 ไมโครเมตร เช่น แพลงก์ตอนสัตว์ และมีประสิทธิภาพน้อยกว่าสำหรับสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กกว่า

100 ไมโครเมตร เช่น แพลงก์ตอนพืชและแบคทีเรีย (Holm *et al.*, 2008) โดยไอโซนจะสลายตัวเป็นโบรมีน ซึ่งมีสารที่มีฤทธิ์สามารถกำจัดสิ่งมีชีวิตได้ (Herwig *et al.*, 2006; Vroom *et al.*, 2005)

- การบำบัดด้วย *Microbubble*

จากการทดลองการบำบัดของ *Chaetoceros sp.* ด้วย *Microbubble* พบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ  $100 \pm 0$  ที่ความดันก๊าซ  $\text{CO}_2$  เท่ากับ 15, 10 และ 5 Mpa. ที่เวลา 180, 300 และ 360 นาที ตามลำดับ

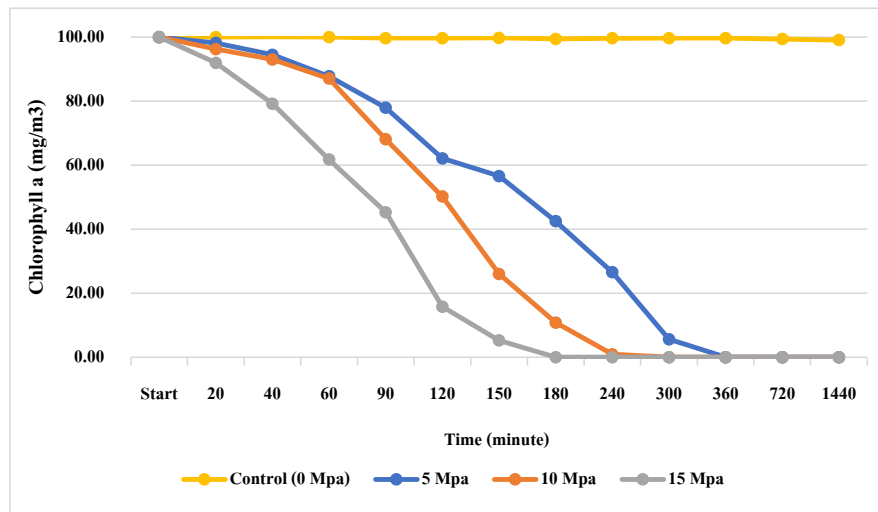


Figure 13 The removal efficiency of *Chaetoceros sp.* with microbubble.

การทดลองการบำบัดของ *Chlorella sp.* ด้วย *Microbubble* พบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ  $100 \pm 0$  ที่ความดันก๊าซ  $\text{CO}_2$  เท่ากับ 15, 10 และ 5 Mpa. ที่เวลา 150, 240 และ 300 นาที ตามลำดับ

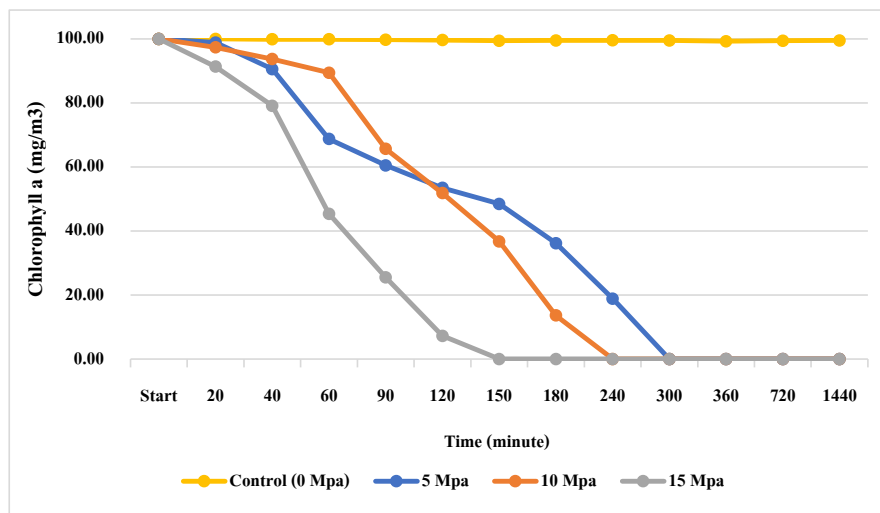


Figure 14 The removal efficiency of *Chlorella sp.* with microbubble.

การทดลองการบำบัดของตัวอ่อนปูม้าด้วย Microbubble พบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ  $100 \pm 0$  ที่ความดันก๊าซ  $\text{CO}_2$  เท่ากับ 5, 10 และ 15 Mpa. ที่เวลา 20 นาที

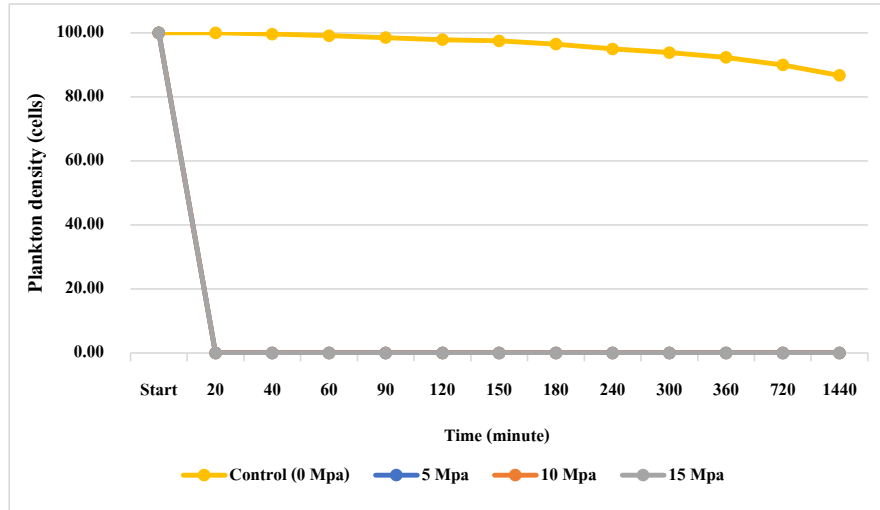


Figure 15 The removal efficiency of blue swimming crab in zoea larvae stages with microbubble.

การทดลองการบำบัดของ *Artemia* sp. ด้วย Microbubble พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ  $100 \pm 0$  ที่ความดันก๊าซ  $\text{CO}_2$  เท่ากับ 5, 10 และ 15 Mpa. ที่เวลา 20 นาที

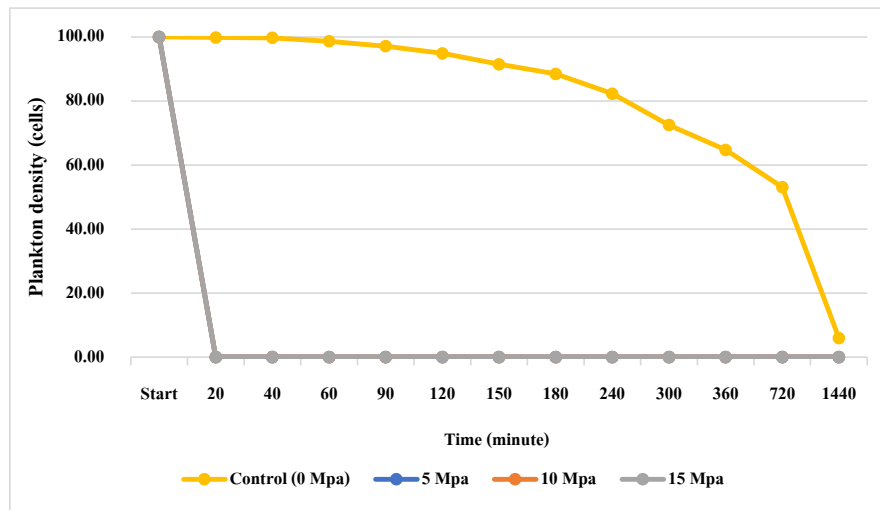


Figure 16 The removal efficiency of *Artemia* sp. with microbubble.

จากการศึกษาการบำบัดสิ่งมีชีวิตด้วย Microbubble พบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ 100 ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการกำจัดสิ่งมีชีวิตกลุ่มแพลงก์ตอนสัตว์มากกว่าแพลงก์ตอนพืชที่ความดันก๊าซ CO<sub>2</sub> เท่ากับ 15 Mpa. โดยการบำบัดในแพลงก์ตอนสัตว์จะใช้เวลาน้อยกว่าแพลงก์ตอนพืช เนื่องจากการบำบัดด้วย Microbubble สามารถทำลายโครงสร้างของผนังเซลล์ ทำให้เกิดการแตกของผนังเซลล์ และส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเซลล์ ร่วมกับการใช้ความดันก๊าซ CO<sub>2</sub> เมื่อมีความดันก๊าซที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดการแทรกซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ และทำให้เกิดการหยุดทำงานของเอนไซม์ และทำให้ยับยั้งการทำงานของสิ่งมีชีวิตได้เร็วขึ้น (Kobayashi *et al.*, 2014)

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสิ่งมีชีวิตทั้ง 4 ชนิด พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ *Chaetoceros* sp. (F= 61.39; df = 12,26; p<0.001) *Chlorella* sp. (F= 54.58; df = 12,26; p<0.001) ตัวอ่อนปูม้า ระยะ zoea (F= 48.37; df = 12,26; p<0.001) และ *Artemia* sp. (F= 24.45 df = 12,26; p<0.001) (ภาพที่ 17) โดย *Artemia* sp. เป็นสิ่งมีชีวิตที่บำบัดได้ง่ายที่สุด รองลงมาคือ ตัวอ่อนปูม้า ระยะ zoea *Chlorella* sp และ *Chaetoceros* sp. ตามลำดับ

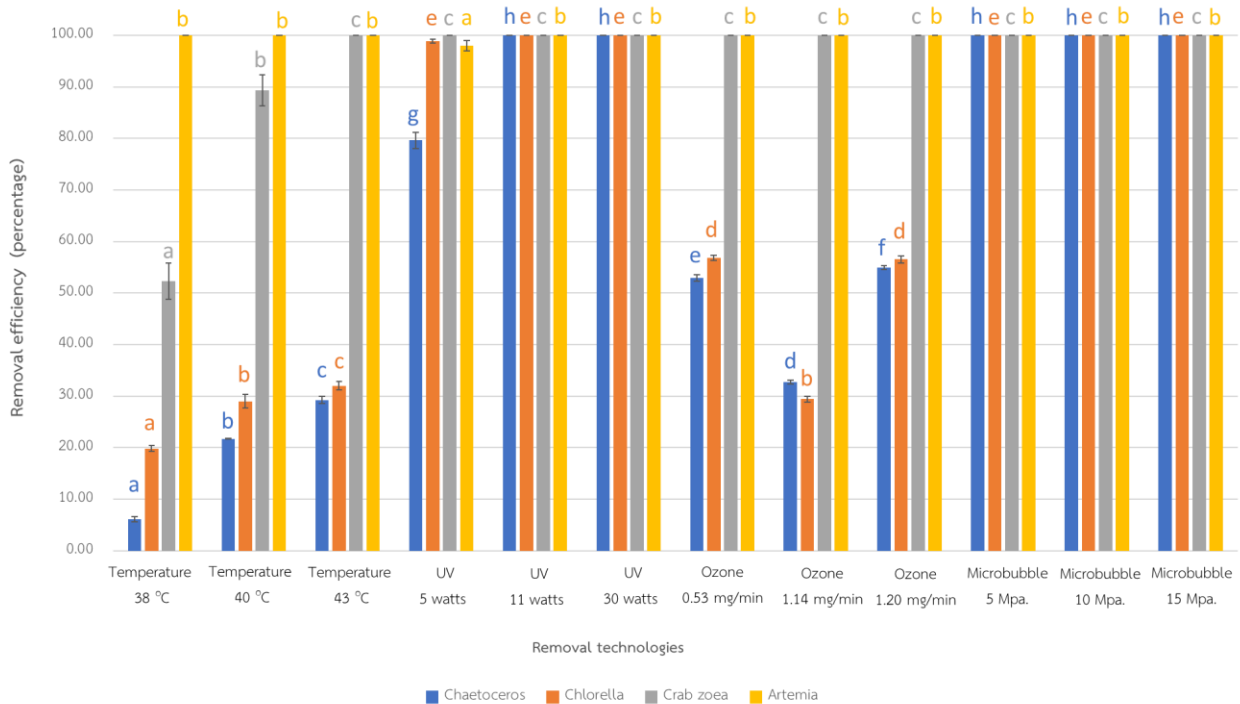


Figure 17 The removal efficiency of organism with various methods.

\* Different English letters were shown to have a statistically significant difference at 95% confidence level.



## วิจารณ์ผลการวิจัย

จากการศึกษาเทคโนโลยีการบำบัดสิ่งมีชีวิตทั้ง 4 วิธี พบว่าการบำบัดด้วย Microbubble มีประสิทธิภาพในการบำบัดแพลงก์ตอนสัตว์และแพลงก์ตอนพืชได้ร้อยละ 100 ซึ่งแพลงก์ตอนสัตว์จะใช้เวลาในการบำบัดน้อยกว่า สำหรับแพลงก์ตอนพืช ความดันก๊าซ  $CO_2$  ที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ใช้เวลาในการบำบัดลดลง โดยความดันก๊าซที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดการแทรกซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ และทำให้เกิดการหยุดทำงานของเอนไซม์ และทำให้ยับยั้งการทำงานของสิ่งมีชีวิตได้เร็วขึ้น (Kobayashi *et al.*, 2014) การบำบัดด้วยแสง UV สามารถบำบัดแพลงก์ตอนสัตว์และแพลงก์ตอนพืชได้มากถึงร้อยละ 100 ที่เวลา 240 นาที โดยแพลงก์ตอนสัตว์มีปฏิกิริยาต่อแสง UV มากกว่าแพลงก์ตอนพืช (Sutherland *et al.*, 2001) อย่างไรก็ตามเนื่องจากแพลงก์ตอนพืชมีการฟื้นตัวที่สูงและมีการซ่อมแซมเซลล์หลังการบำบัดได้ดีกว่าแพลงก์ตอนสัตว์ (First *et al.*, 2015; Hess-Erga *et al.*, 2010; Stehouwer *et al.*, 2015) จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการฟื้นตัวหลังการบำบัดของสิ่งมีชีวิต การบำบัดด้วย Ozone มีประสิทธิภาพในการบำบัดแพลงก์ตอนสัตว์ที่ดีกว่าแพลงก์ตอนพืช โดยสามารถบำบัดแพลงก์ตอนสัตว์เท่ากับร้อยละ 100 ที่เวลา 360 นาที เนื่องจากแต่การบำบัดสิ่งมีชีวิตด้วย Ozone จะมีประสิทธิภาพสูงสำหรับสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดมากกว่า 100 ไมโครเมตร และมีประสิทธิภาพน้อยกว่าสำหรับสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กกว่า 100 ไมโครเมตร (Holm *et al.*, 2008) โดยกระบวนการโอโซนนั้น จะไปทำให้เซลล์ของแพลงก์ตอนได้รับบาดเจ็บหรือตายไปจากการทำปฏิกิริยาของโอโซนหรือสารออกซิแดนท์ที่คงค้าง (กรดไฮโปโบรมัสและไฮโปโบรมิก) กับโมเลกุลภายในและบนพื้นผิวของเซลล์แพลงก์ตอน (Herwig *et al.*, 2006) ซึ่งโอโซนจะไปทำลายเยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์ของแพลงก์ตอน จากคุณสมบัติของโอโซนที่เข้าทำปฏิกิริยาอย่างไม่จำเพาะเจาะจง และการบำบัดด้วยอุณหภูมิต่ำ พบว่ามีประสิทธิภาพต่ำที่สุด ที่สามารถบำบัดแพลงก์ตอนสัตว์ได้ดีกว่าแพลงก์ตอนพืช โดยประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากซึ่งแพลงก์ตอนพืชมีผนังเซลล์ที่หนาและแข็งแรง จึงทำให้ทนต่อการบำบัดด้วยอุณหภูมิต่ำได้มากกว่าและช่วงอุณหภูมิที่สามารถบำบัดสิ่งมีชีวิตในระบบน้ำอับเฉาเรืออย่างมีประสิทธิภาพ คือ มากกว่า 40 องศาเซลเซียส (Tsolaki *et al.*, 2010)

## สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเทคโนโลยีการกำจัดสิ่งมีชีวิตในน้ำอับเฉาเรือ พบว่าการบำบัดด้วย Microbubble เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด เนื่องจากสามารถบำบัดแพลงก์ตอนทั้ง 4 ชนิด ได้มากถึงร้อยละ 100 โดยใช้เวลาในการบำบัดน้อยที่สุด (20 นาที) รองลงมา คือ การบำบัดด้วยแสง UV เนื่องจากสามารถบำบัดแพลงก์ตอนทั้ง 4 ชนิด ได้มากถึงร้อยละ 100 ที่เวลา 240 นาที การบำบัดด้วย Ozone ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดแพลงก์ตอนสัตว์ดีกว่าแพลงก์ตอนพืช โดยสามารถบำบัดแพลงก์ตอนสัตว์ได้ร้อยละ 100 โดยใช้เวลาในการบำบัด 360 นาที และสามารถบำบัดแพลงก์ตอนพืชได้ร้อยละ 56.87 ที่เวลา 360 นาที และการบำบัดด้วยอุณหภูมิต่ำที่มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุด ที่สามารถบำบัดแพลงก์ตอนสัตว์ได้ดีกว่าแพลงก์ตอนพืช โดยสามารถบำบัดแพลงก์ตอนสัตว์ได้ร้อยละ 100 ที่เวลา 300 นาที และสามารถบำบัดแพลงก์ตอนพืชได้ร้อยละ 38.08 ที่เวลา 1,440 นาที





### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ขอขอบคุณสถานีวิจัยประมงศรีราชา คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่สนับสนุนแพลงก์ตอน และห้องปฏิบัติการในการทำวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- Balaji, R., Yaakob, O., & Koh, K. K. (2014). A review of developments in ballast water management. *Environmental Reviews*, 22(3), 298-310. doi:10.1139/er-2013-0073
- Bax, N., Williamson, A., Agüero, M., Gonzalez, E., & Geeves, W. (2003). Marine invasive alien species: A threat to global biodiversity. *Marine Policy*, 27(4), 313-323. doi:10.1016/S0308-597X(03)00041-1
- Bikram, S. (2016). Everything you wanted to know about ballast water exchange and management plan. *J. Marine Environ. Maritime Law*, 18(4), 964-982.
- Davidson, I. C., Minton, M. S., Carney, K. J., Miller, A. W., & Ruiz, G. M. (2017). Pioneering patterns of ballast treatment in the emerging era of marine vector management. *Marine Policy*, 78, 158-162. doi:10.1016/j.marpol.2017.01.021
- First, M. R., Robbins-Wamsley, S. H., Riley, S. C., & Drake, L. A. (2015). Towards minimizing transport of aquatic nuisance species in ballast water: do organisms in different size classes respond uniformly to biocidal treatment? *Biol. Invasions*, 1-14.
- GEF-UNDP-IMO GloBallast Partnerships Programme. (2017). *The GloBallast Story: Reflections from a Global Family*. GloBallast Partnerships Project Coordination Unit International Maritime Organization.
- Gregg, M., Rigby, G., & Hallegraeff, G. M. (2009). Review of two decades of progress in the development of management options for reducing or eradicating phytoplankton, zooplankton and bacteria in ship's ballast water. *Aquatic Invasions*, 4(3), 521-565. doi:10.3391/ai.2009.4.3.14



- Gregg, M., Rigby, G., & Hallegraeff, G. M. (2009). Review of two decades of progress in the development of management options for reducing or eradicating phytoplankton, zooplankton and bacteria in ship's ballast water. *Aquat. Invasions*, 4, 521-565.
- Herwig, R. P., Cordell, J. R., Perrins, J. C., Dinnel, P. A., Gensemer, R. W., & Stubblefield, W. A. (2006). Ozone treatment of ballast water on the oil tanker S/T Tonsina: chemistry, biology and toxicity.
- Hess-Erga, O. K., Blomvågnes-Bakke, B., & Vadstein, O. (2010). Recolonization by heterotrophic bacteria after UV irradiation or ozonation of seawater; a simulation of ballast water treatment. *Water Research*, 44(18), 5439-5449. doi:10.1016/j.watres.2010.06.059
- Hess-Erga, O. K., Moreno-Andrés, J., Enger, Ø., & Vadstein, O. (2019). Microorganisms in ballast water: Disinfection, community dynamics, and implications for management. *Science of the Total Environment*, 657, 704-716. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.12.004
- Holm, E. R., Stamper, D. M., Brizzolara, R. A., Barnes, L., Deamer, N., & Burkholder, J. M. (2008). Sonication of bacteria, phytoplankton and zooplankton: Application to treatment of ballast water. *Marine Pollution Bulletin*, 56(6), 1201-1208. doi:https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.02.007
- James, T. C. (1999). Marine Bio-Invasions of New England. *Maritimes (University of Rhode Island Sea Grant)*, 99.
- Kobayashi, F., Sugiura, M., Ikeura, H., Sato, M., Odake, S., & Tamakib, M. (2014). Comparison of a two-stage system with low pressure carbon dioxide microbubbles and heat treatment on the inactivation of *Saccharomyces pastorianus* cells. *Food Control*.
- Lakshmi, E., Priya, M., & Achari, V. S. (2021). An overview on the treatment of ballast water in ships. *Ocean & Coastal Management*, 199, 105296. doi:https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105296



- Penru, Y., Guastalli, A. R., Esplugas, S., & Baig, S. (2012). Application of UV and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> to seawater: Disinfection and natural organic matter removal. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 233, 40-45. doi:10.1016/j.jphotochem.2012.02.017
- Quilez-Badia, G., McCollin, T., Josefsen, K. D., Vourdachas, A., Gill, M. E., Mesbahi, E., & Frid, C. L. J. (2008). On board short-time high temperature heat treatment of ballast water: A field trial under operational conditions. *Marine Pollution Bulletin*, 56(1), 127-135. doi:10.1016/j.marpolbul.2007.09.036
- Ruiz, G. M., Rawlings, T. K., Dobbs, F. C., Drake, L. A., Mullady, T., Huq, A., & Colwell, R. R. (2000). Global spread of microorganisms by ships: Ballast water discharged from vessels harbours a cocktail of potential pathogens. *Nature*, 408(6808), 49-50. doi:10.1038/35040695
- Satir, T. (2014). Ballast water treatment systems: design, regulations, and selection under the choice varying priorities. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(18), 10686-10695. doi:10.1007/s11356-014-3087-1
- Stehouwer, P. P., Buma, A., & Peperzak, L. (2015). A comparison of six different ballast water treatment systems based on UV radiation, electrochlorination and chlorine dioxide. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 36(16), 2094-2104. doi:10.1080/09593330.2015.1021858
- Sutherland, T. F., Levings, C. D., Elliott, C. C., & Hesse, W. W. (2001). Effect of a ballast water treatment system on survivorship of natural populations of marine plankton. *Marine Ecology Progress Series*, 210, 139-148. doi:10.3354/meps210139
- Tsolaki, E., & Diamadopoulos, E. (2010). Technologies for ballast water treatment: A review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 85(1), 19-32. doi:10.1002/jctb.2276
- UNCTAD. (2017). Review of Maritime Transport 2017. 117.



Vladimir, P. I., Andrey, M. K., Vladimir, B. U., Tamara, S., Olga, Z., Nikolay, A., Henri, J. D. (2000). Invasion of the Caspian Sea by the Comb Jellyfish *Mnemiopsis leidyi* (Ctenophora). *Biological Invasions*, 255–258.

Vroom, I., Jacobs, B., & Tapanlis, C. (2005). In-line Ballast Water Treatment System Based on Mechanical (Ultra Sound), Electro-Chemical and Ozone Treatment.

Wan, Z., Chen, J., Makhoulfi, A. E., Sperling, D., & Chen, Y. (2016). Four routes to better maritime governance. *Nature*, 540(7631), 27-29. doi:10.1038/540027a

Wu, H., Chen, C., Wang, Q., Lin, J., & Xue, J. (2017). The biological content of ballast water in China: A review. *Aquaculture and Fisheries*, 2(6), 241-246. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aaf.2017.03.002>