



การพัฒนาทุ่นลอยและการประยุกต์ใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุลอยน้ำในทะเล

Development of Drifters and Its Application on Floating Object Study Using the Numerical Model

พชร อัสวักติมากุล¹, สุริย์ณห์ สาระมูล² และ จิตรภรณ์ พักโสภา^{1*}

Bojara Asavakittimakul¹, Suriyan Saramul² and Jitraporn Phaksopa^{1*}

¹ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

¹Department of Marine Science, Faculty of Fisheries, Kasetsart University

²Department of Marine Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University

Received : 4 March 2022

Revised : 5 April 2022

Accepted : 4 May 2022

บทคัดย่อ

ปัญหาการแพร่กระจายของสารมลพิษ ชยะทะเล หรือแม้แต่ปัญหาอุบัติเหตุทางทะเลนับเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการศึกษาหรือคาดการณ์การเคลื่อนที่ของสิ่งต่างๆ เหล่านี้จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีการพัฒนาทุ่นลอยเพื่อใช้ในการสำรวจภาคสนามในพื้นที่ชายฝั่งจังหวัดระยองและจังหวัดกระบี่ และการประยุกต์ใช้แบบจำลองอุทกพลศาสตร์ 3 มิติ (Regional Ocean Model System : ROMS) เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของทุ่นลอยและติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่ของทุ่นลอยตามกระแสน้ำ ผลการศึกษาพบว่าทุ่นลอยที่ทำการพัฒนาสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและใช้งานได้ในพื้นที่ที่มีสัณฐานชายฝั่งที่แตกต่างกัน และมีแรงที่กระทำต่อทุ่นลอยที่ความแตกต่างกัน โดยพื้นที่ชายฝั่งระยองทุ่นเคลื่อนที่ตามกระแสน้ำที่ได้รับอิทธิพลของลมเป็นหลัก ในขณะที่บริเวณเกาะลันตาฝั่งตะวันออกกระแสน้ำได้รับอิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลงอย่างชัดเจน เมื่อนำข้อมูลภาคสนามที่ได้มาพิจารณาร่วมกับแบบจำลองพบว่า แบบจำลองสามารถคาดการณ์การเคลื่อนที่ของทุ่นลอยไปในทิศทางเดียวกับข้อมูลจากภาคสนามแต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในระยะรัศมีไม่เกิน 3 กิโลเมตร ทั้งนี้ควรพัฒนาต่อยอดตัวแบบจำลองโดยพิจารณาอิทธิพลของคลื่นและการนำข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาจากการตรวจวัดในพื้นที่ศึกษามาประยุกต์ใช้มากขึ้น เพื่อที่จะสามารถนำแบบจำลองนี้ไปใช้งานได้จริงในเชิงปฏิบัติการทางทะเลต่อไป

คำสำคัญ : ROMS ; ทุ่นลอย ; กระแสน้ำชายฝั่ง ; แบบจำลองเชิงตัวเลข



Abstract

The marine environmental problems, such as spreading of marine pollutants, marine debris, and even marine incident cases are lately continuously increased. Therefore, the study/prediction of floating objects in the sea is becoming an important factor to role in management. This study focuses on the development of drifter for tracking floating objects in the coastal area of Thailand (Rayong and Krabi Province) . Three- dimensional hydrodynamic model, ROMS, was also applied to compare modeled track with drifter's track. The results showed that the developed drifters were functionally and efficiently worked even in different kinds of coastal morphology and forcing (i.e., in Rayong area, drifters were driven by wind, while Lanta Island area, drifters were mainly forced by tides) . The comparison between drifter's track and modeled track shows errors approximately 3 kilometers in radial distance. However, the modeled track could be improved by considering the effects of waves and by including the local observed atmospheric data to make the modeled track more realistic. Hence, it could be used in a sea management plan and rescue operation in the future.

Keywords : ROMS ; Drifter ; Coastal current ; Numerical Model



บทนำ

การศึกษาเพื่อให้เข้าใจถึงคุณลักษณะของกระแสน้ำในบริเวณพื้นที่ชายฝั่งนับเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ เพราะข้อมูลกระแสน้ำเป็นข้อมูลพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อการวางแผนการจัดการและการป้องกันพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเล เนื่องจากกระแสน้ำนั้นถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายของสารพิษ โลหะหนัก ตัวอ่อนสัตว์น้ำ ขยะ หรือวัตถุใด ๆ ที่ล่องลอยอยู่ในทะเล ดังนั้นในการศึกษาเพื่อติดตามการเคลื่อนที่หรือการแพร่กระจายของสารต่าง ๆ เหล่านั้นจึงมีการใช้ทุ่นลอย (Lagrangian Drifter) ในการเก็บข้อมูลภาคสนามกันอย่างแพร่หลายทั้งบริเวณพื้นที่ชายฝั่งหรือบริเวณทะเลเปิด (Berti *et al.*, 2011; Bouzaiene *et al.*, 2021; Duyck and De Jong, 2021) โดยทั่วไปแล้วทุ่นลอยเป็นอุปกรณ์ติดตั้งแบบพาสซีฟ (Passive) คือสามารถทำงานโดยแรงจากการเคลื่อนที่ของน้ำทะเล โครงสร้างประกอบไปด้วยสองส่วนหลัก คือ ส่วนที่ไหลพื้นผิว (Float/Buoy) ซึ่งทำหน้าที่ในการพยุงน้ำหนักตัวของทุ่นลอยและส่วนล่าง (Drogue) ให้อยู่ในระดับความลึกที่ต้องการ ในขณะที่ส่วนล่างทำหน้าที่ในการรับแรงจากกระแสน้ำที่พัดพามา (Subbaraya *et al.*, 2016) อย่างไรก็ตามรูปแบบของทุ่นลอยจะมีความแตกต่างกันไปตามจุดประสงค์ของการศึกษา และยังคงมีการพัฒนารูปแบบรวมไปถึงวัสดุที่นำไปใช้ให้มีความคงทนต่อสภาวะอากาศที่รุนแรง ทนทานต่อการกัดกร่อน รวมไปถึงการเลือกใช้วัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เช่น CODE drifter (Davis, 1985), CARTE drifter (Novelli *et al.*, 2017) เป็นต้น สำหรับการประยุกต์ใช้ทุ่นลอยเพื่อการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับงานสิ่งแวดล้อมทางทะเลมีการทำกันอย่างแพร่หลาย เช่น การศึกษาการกระจายตัวของตัวอ่อนปะการัง (Chanthasiri *et al.*, 2014) การเคลื่อนที่ของวัตถุลอยน้ำบริเวณปากแม่น้ำ (Lamsawat *et al.*, 2020) เพื่อศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำผิวหน้าในพื้นที่ศึกษา การพัฒนาทุ่นลอยแบบ Microstar ที่ถูกพัฒนามาเพื่อการตรวจสอบพลวัตของน้ำแบบ Lagrangian (Srinivasan, 2014; Subbaraya *et al.*, 2016) หรือทุ่นลอย Ultra – Thin ที่มีจุดประสงค์เพื่อการตรวจสอบกระแสน้ำผิวหน้าบาง ๆ (Morey *et al.*, 2018) เป็นต้น ซึ่งเมื่อพิจารณาทุ่นลอยสำหรับพื้นที่ชายฝั่ง พบว่าส่วนใหญ่จะเป็นทุ่นลอยขนาดเล็กจึงยังคงมีข้อจำกัดในการติดตั้งอุปกรณ์บันทึกตำแหน่งและแบตเตอรี่ และไม่คงทนเมื่อเจอสภาพอากาศรุนแรง เพราะตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์บันทึกตำแหน่งอยู่นอกทำให้เกิดความเสียหายจากความชื้นของน้ำทะเลและฝน ทำให้เก็บข้อมูลได้ในเวลาสั้น ๆ เท่านั้น ดังนั้นการพัฒนารูปแบบของทุ่นลอยและอุปกรณ์บันทึกตำแหน่งจึงนับว่าเป็นงานที่มีความสำคัญมากเพื่อให้มาซึ่งข้อมูลการตรวจวัดที่ต่อเนื่องและระยะเวลาที่ยาวขึ้น

นอกจากนี้ยังมีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยในการศึกษาการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำในสถานการณ์รูปแบบต่าง ๆ เช่น การจำลองการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำและติดตามวัตถุจากอิทธิพลของกระแสน้ำ (Carniel *et al.*, 2009; Dagestad & Röhrs, 2019; Isobe *et al.*, 2009) หรือการจำลองการเคลื่อนที่ของคราบน้ำมัน (Marta-Almeida *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2020) เป็นต้น ดังนั้นในการศึกษาดังนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนารูปแบบของทุ่นลอยสำหรับพื้นที่ชายฝั่ง (coastal drifter) เพื่อให้มีความสามารถในการเก็บข้อมูลได้ยาวนานมากขึ้น ส่งสัญญาณและข้อมูลได้แบบ near-real time แม้ว่าอยู่ในพื้นที่ห่างไกล คงทนต่อสภาวะอากาศ และประยุกต์รวมกับการพัฒนาแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ในการคาดการณ์การเคลื่อนที่ของทุ่นลอย โดยพิจารณากระแสน้ำจากปัจจัยอิทธิพลของลม และน้ำขึ้นน้ำลงเป็นหลัก ในพื้นที่ศึกษาสองพื้นที่



ทะเลชายฝั่งที่มีลักษณะสัณฐานชายฝั่งที่แตกต่างกัน คือพื้นที่ชายฝั่งจังหวัดระยอง และกระบี่ – ตรัง ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนในการกักกันทางทะเล หรือปัญหาการแพร่กระจายของขยะในทะเล ซึ่งจะนำไปสู่การวางแผนการจัดการทางทะเลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการพัฒนาหุ่นลอย และการประยุกต์ใช้แบบจำลองอุทกพลศาสตร์ Regional Ocean Modeling System (ROMS) เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระแสน้ำต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นลอยในพื้นที่ทะเลชายฝั่ง บริเวณจังหวัดระยองและจังหวัดกระบี่ เนื่องจากลักษณะของทั้งสองพื้นที่ที่มีความโดดเด่นที่แตกต่างกัน กล่าวคือพื้นที่ชายฝั่งบริเวณระยองมีลักษณะเป็นแนวทะเลเปิดกว้าง พร้อมกับมีเกาะเสม็ดขนาดใหญ่ตั้งอยู่ในพื้นที่อีกทั้งยังเป็นสถานที่ท่องเที่ยวที่มีการสัญจรของเรือทั้งเรือประมงและเรือสำหรับการท่องเที่ยว จึงมีความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุทางทะเลสูง ในขณะที่ชายฝั่งบริเวณจังหวัดกระบี่ บริเวณเกาะลันตา มีลักษณะเป็นอ่าวโค้งกึ่งเปิด ประกอบกับเกาะแก่งขนาดเล็กจำนวนมาก เช่น เกาะมุกต์ เกาะแหวน หรือเกาะไหง เป็นต้น เพื่อเป็นตัวแทนการศึกษาของพื้นที่ชายฝั่งในลักษณะดังกล่าว

การพัฒนาหุ่นลอย

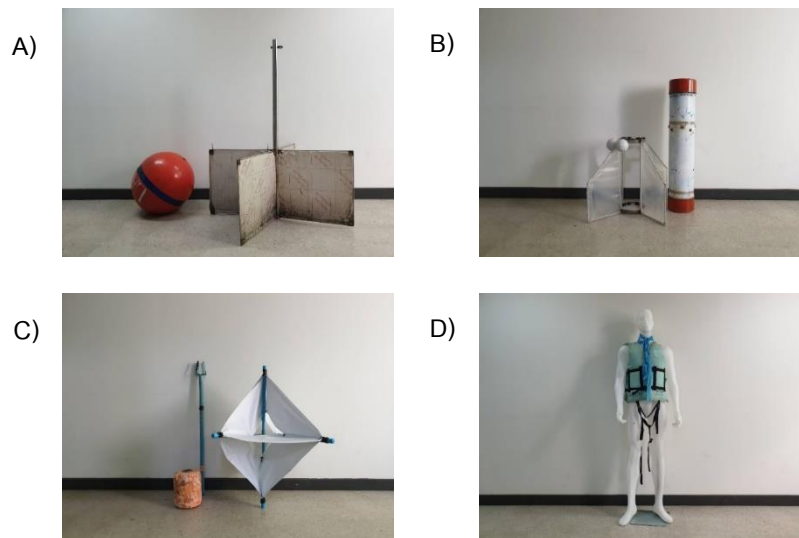
ในส่วนของการพัฒนาหุ่นลอยเริ่มต้นจากรูปแบบตั้งต้นของการศึกษานี้คือหุ่นรูปใบพัด (CODE drifter) มีลักษณะเป็นรูปใบพัดประกอบขึ้นจากท่อสแตนเลส ความสูง 1.3 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.38 เมตร ร่วมกับใบรับกระแสไฟฟ้าจากแผ่นอะคริลิกสี่ด้านขนาด 0.5x 2 ตารางเมตร และติดตั้งเครื่องบันทึกพิกัดตำแหน่งที่บริเวณปลายยอดเสา (ภาพที่ 1A) อ้างอิงจากการศึกษาของ Lamsawat *et al.*, (2020) พบว่าหุ่นลอยมีความสามารถในการรับกระแสไฟฟ้าที่มาจากทุกทิศทางได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในการใช้งานหลายด้านคือ ลักษณะของใบรับกระแสไฟฟ้าของหุ่นลอยมีขนาดใหญ่หากติดตั้งร่วมกับลูกลอยขนาดเล็กทำให้ไม่มั่นคงเมื่อเจอสภาพอากาศที่รุนแรง เมื่อลองเปลี่ยนไปใช้ลูกลอยขนาดใหญ่พบว่าการเคลื่อนที่ของหุ่นลอยมีการไถล (drift) จากแรงลมมากกว่ากระแสไฟฟ้า นอกจากนี้รูปทรงของหุ่นลอยยังมีพื้นที่ติดตั้งเครื่องบันทึกตำแหน่งและแบตเตอรี่อย่างจำกัดทำให้ไม่สามารถทิ้งหุ่นลอยเป็นระยะเวลาได้นานได้ จากปัญหาที่เกิดขึ้นจึงได้พัฒนาหุ่นลอยต้นแบบ 3 ชนิด โดยมีรายละเอียดแต่ละชนิดดังนี้

1) หุ่นรูปจรวด (Apollo drifter) สร้างขึ้นจากท่อ PVC ทรงกระบอก สูง 1.1 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.21 เมตร ไม่มีสมอททะเลติดตั้งด้านล่าง เพื่อให้สามารถบรรจุเครื่องติดตามตำแหน่งที่มีขนาดใหญ่พร้อมกับแบตเตอรี่ที่มีกำลังไฟเยอะขึ้น ทำให้บันทึกและส่งสัญญาณข้อมูลตำแหน่งได้นานมากยิ่งขึ้น ด้านข้างประกอบเข้ากับชุดใบรับกระแสไฟฟ้า 4 ทิศทรงสี่เหลี่ยมคางหมู ภายในแบ่งเป็น 2 ส่วนด้วยแผ่นอะคริลิก ส่วนบนมีหน้าที่พองหุ่นลอยด้วยอากาศที่บรรจุภายในและหุ่นไขปลานขนาดเล็กเพื่อลดพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศให้มากที่สุด นอกจากนี้ภายในของส่วนบนยังมีพื้นที่เพื่อติดตั้งแบตเตอรี่ขนาดใหญ่พร้อมกับฝาปิด ในขณะที่ส่วนด้านล่างมีช่องเปิดให้น้ำทะเลเข้าเพื่อรักษาสมดุลน้ำหนักให้ส่วนหัวตั้งตรง (ภาพที่ 1B)

2) หุ่นรูปเพชร (Microstar Drifter) อ้างอิงจากการศึกษา (Srinivasan, 2014) เป็นหุ่นประกอบสองส่วน คือส่วนบนและส่วนสมอททะเล โดยส่วนบนสร้างขึ้นจากท่อ PVC ขนาด 1 เมตร ลอยตัวด้วยโฟมอัดแข็ง และถ่วงน้ำหนักด้วยการหล่อปูนที่

ส่วนปลาย พร้อมกับทำขาล็อคเพื่อให้สามารถติดตั้งเครื่องบันทึกตำแหน่งขนาดเล็กได้ที่บริเวณปลายยอดได้อย่างมั่นคง ในส่วนของสมอทะเลสร้างขึ้นจากท่อ PVC ขนาด 1.05 เมตร พร้อมทั้งมีโครงสร้างยื่นออกจากแกนส่วนกลาง 6 ทิศทาง และ ยึดโยงด้วยผ้าใบเข้ากันในแต่ละแขนโครงสร้างเพื่อรับกระแสลมจากทุกทิศทาง โดยรูปแบบมีจุดประสงค์เพื่อลดขนาดพื้นที่ ผิวน้ำสัมผัสกับอากาศน้อยที่สุด ใช้ท่อ PVC แกนหลักและความสูงจากผิวน้ำทะเลน้อยกว่าทุ่นรูปใบพัด (ภาพที่ 1C)

3) ทุ่นรูปคน (George Drifter) เป็นทุ่นที่เกิดจากการประยุกต์ใช้ทุ่นจำลองรูปคนเป็นทุ่นลอยน้ำ พร้อมกับสวมใส่เสื้อ พวงชูชีพในช่องบนและถ่วงน้ำหนักด้วยตะกั่วขนาด 1 กิโลกรัม 10 ก้อน พร้อมกับเปิดช่องให้น้ำทะเลเข้าในช่วงล่าง เพื่อรักษา สมดุลการลอย โดยมีจุดประสงค์เพื่อจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของผู้ประสบอุบัติเหตุทางทะเล (ภาพที่ 1D)



ภาพที่ 1 ทุ่นลอยชนิดต่างๆ A) ทุ่นลอยชนิด CODE B) ทุ่นลอยรูปจรวด C) ทุ่นลอยชนิด Micro star D) ทุ่นลอยรูปคน

ในการติดตามตำแหน่งด้วยเครื่องบันทึกพิกัดตำแหน่งมีทั้งสินค้าชนิดคือ GPS Logger ยี่ห้อ Holux รุ่น m – 241 plus เป็นเครื่องบันทึกตำแหน่งขนาดเล็กสะดวกต่อการใช้งาน สามารถบันทึกตำแหน่งความถี่ทุก 1 นาที ใช้พลังงานจากถ่าน Alkaline และเก็บข้อมูลพิกัดภายในตัวเครื่องเท่านั้น ดังนั้นจะต้องทำการกู้ทุ่นลอยทุกครั้งเพื่อดึงข้อมูลที่ถูบันทึกไว้ ส่วนเครื่องติดตามตำแหน่งแบบ Real Time Tracking Device สามารถส่งสัญญาณบอกตำแหน่งความถี่ทุก 20 วินาที เชื่อมต่อกับ โทรศัพท์มือถือ ใช้แบตเตอรี่ภายในตัว มีข้อจำกัดเรื่องที่ไม่สามารถบันทึกเส้นทางของการเคลื่อนที่ของทุ่นลอยได้และไม่สามารถรับ ข้อมูลได้หากไปทุ่นลอยเคลื่อนที่หรือลอยไปยังพื้นที่ไม่มีสัญญาณโทรศัพท์ และอุปกรณ์ติดตามตำแหน่ง Vessel Monitoring System (VMS) สามารถรับส่งสัญญาณทุก 1 ชั่วโมงผ่านแอปพลิเคชันหรือเว็บเบราว์เซอร์ (<https://www.etnecalink.com/>) และ ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ขนาด 12V 7A ทำให้สามารถติดตามการเคลื่อนที่ของทุ่นลอยได้แม้ว่าทุ่นลอยจะไปอยู่ตำแหน่ง ระยะไกลจากฝั่งทะเลมาก ๆ ได้



สำหรับการศึกษาคั้งนี้ได้เก็บข้อมูลภาคสนามด้วยการติดตั้งเครื่องตรวจวัดความเร็วกระแสน้ำตามระดับชั้นความลึกน้ำ (ADCP) ร่วมด้วย เพื่อเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของทุ่นลอย ทั้งหมดสองพื้นที่ชายฝั่ง จังหวัดระยองและจังหวัดกระบี่-ตรัง ใน 3 ช่วงเวลาดังใน ตารางที่ 1 โดยได้วางแผนเก็บข้อมูลภาคสนามทั้งในช่วงฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ แต่พบว่าในช่วงฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้สภาพอากาศและสภาวะทางทะเลไม่เอื้ออำนวยต่อการเก็บข้อมูลภาคสนาม ดังนั้นข้อมูลภาคสนามส่วนใหญ่จะเป็นช่วงฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและช่วงเปลี่ยนฤดูมรสุมเท่านั้น

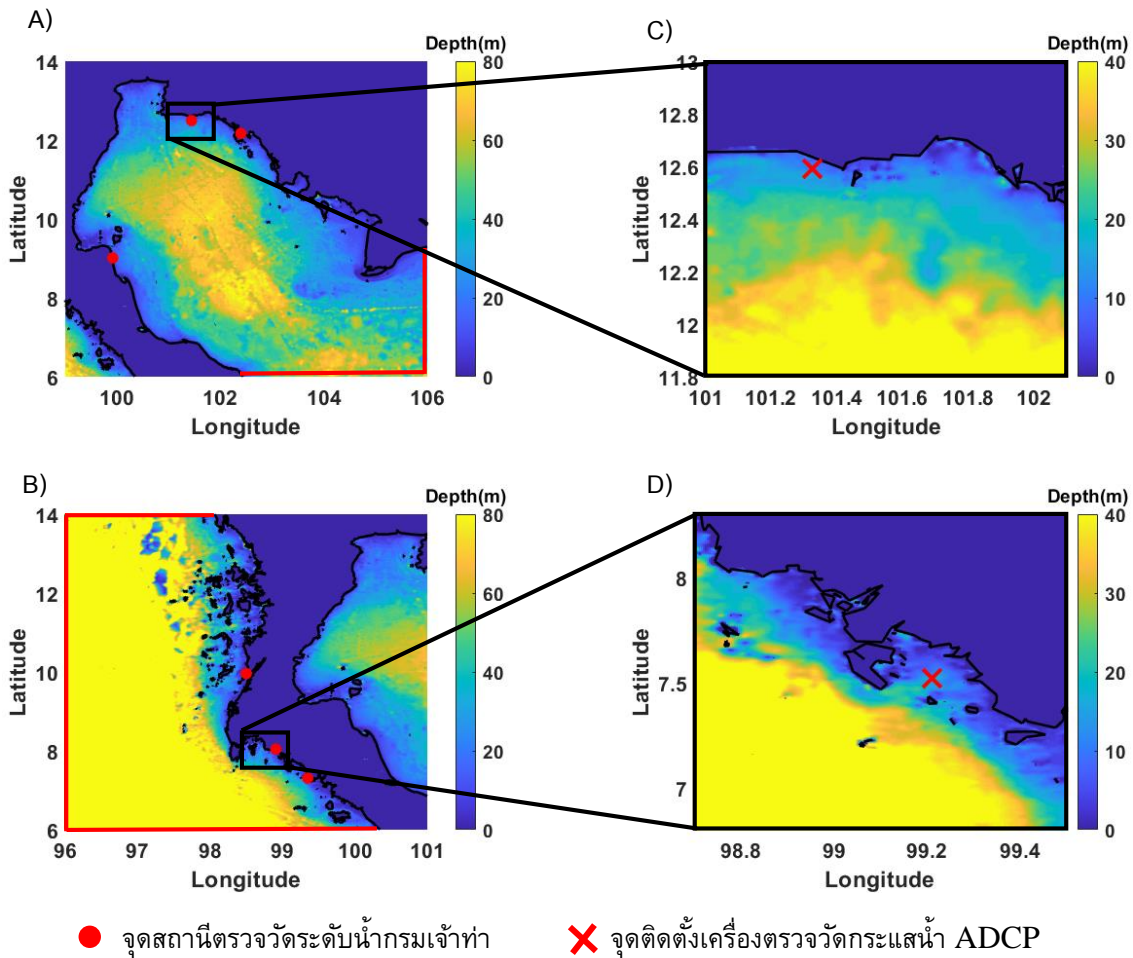
ตารางที่ 1 พื้นที่เก็บข้อมูลภาคสนาม ช่วงเวลา และเครื่องมือที่ใช้เก็บข้อมูลภาคสนาม

อุปกรณ์	ADCP		ทุ่นลอย			
	พื้นที่	ช่วงเวลาติดตั้ง	จุดติดตั้ง ADCP	ช่วงเวลา	เวลา (ระยะทาง)	ชนิดทุ่นลอย
ระยอง	21-22 ธ.ค. 62	101.3183 °E 12.5893 °N	21 ธ.ค. 62	6.29 ชม.	ทุ่นรูปใบพัด (GPS Logger)	101.4499 °E
				(4.9 กม.)		12.5907 °N
ระยอง	24-26 ต.ค. 63	101.3183 °E 12.5893 °N	24 ต.ค. 63	30.00 ชม.	ทุ่นรูปจรวด (VMS)	101.4176 °E
				(17.19 กม.)		12.5621 °N
				15.24 ชม.		ทุ่นรูปเพชร (GSM tracking)
				(10.57 กม.)		12.5604 °N
				7.15 ชม.	ทุ่นรูปคน (GPS Logger)	101.4193 °E
				(7.00 กม.)		12.5600 °N
กระบี่ – ตรัง	2-3 มี.ค. 64	99.1442 °E 7.5533 °N	9 พ.ย.64	145 ชม.	ทุ่นรูปจรวด (VMS)	99.2282 °E 7.5637 °N
				(11.08 กม)		

การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกประยุกต์เข้ามาใช้ร่วมในการศึกษาถึงอิทธิพลของกระแสน้ำต่อการคาดการณ์การเคลื่อนที่ของทุ่นลอย การศึกษานี้เป็นการสร้างแบบจำลองกระแสน้ำในบริเวณทะเลอันดามันและอ่าวไทย โดยใช้โปรแกรมทางอุทกพลศาสตร์ ROMS Version 3.9 (<http://myroms.org>) บนพื้นฐานของ 3D-Reynolds-averaged equation สำหรับการแลกเปลี่ยนฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) ประยุกต์ใช้ Generic Length Scale (GLS) turbulence approach (Kantha and Carniel, 2003; Umlauf and Burchard 2013; Shchepetkin *et al.*, 2005) โดยแยกพื้นที่ศึกษาระหว่างอ่าวไทยกับอันดามันอย่างชัดเจนเพราะทั้งสองพื้นที่มีลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน และเพื่อเป็นการลดเวลาในการทำงานของแบบจำลองโดยพื้นที่ศึกษาอ่าวไทย ครอบคลุมพื้นที่ 6 -14 °N และ 99 – 106 °E และพื้นที่ศึกษาทะเลอันดามัน ครอบคลุม

พื้นที่ 6-14 °N และ 96 – 101 °E และนำระบบกริดซ้อน (Nesting grid) แบบ 2-way nesting มาใช้ในบริเวณทะเลชายฝั่งจังหวัดระยอง และบริเวณทะเลชายฝั่งกระบี่ – ตรัง สำหรับพื้นที่ศึกษาอ่าวไทยและอันดามันตามลำดับ (ภาพที่ 2) ร่วมกับนำเข้าข้อมูลความลึกน้ำจากชุดข้อมูล GEBCO 30 arc – second grid Bathymetry (Weatherall *et al.*, 2015)



ภาพที่ 2 ความลึกน้ำของพื้นที่ศึกษาโดยแบบจำลองทางอุทกพลศาสตร์ ROMS A) พื้นที่ศึกษาอ่าวไทย โดยจุดสีแดงหมายถึงสถานีตรวจวัดระดับน้ำกรมเจ้าท่า (จากซ้ายไปขวา) สถานีสิชล สถานีระยอง และสถานีแหลมฉบัง B) พื้นที่ศึกษาทะเลอันดามัน โดยจุดสีแดงหมายถึงสถานีตรวจวัดระดับน้ำกรมเจ้าท่า (จากบนลงล่าง) สถานีระนอง สถานีกระบี่ และสถานีกันตัง C) พื้นที่ศึกษากริดซ้อนบริเวณจังหวัดระยอง D) พื้นที่ศึกษากริดซ้อนบริเวณจังหวัดกระบี่



ข้อมูลนำเข้าและการกำหนดค่าพารามิเตอร์ฟิสิกส์

ข้อมูลนำเข้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนกระแสน้ำ ประกอบด้วยข้อมูลอุณหภูมิจากฐานข้อมูล European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) ชุดข้อมูล ERA5 hourly data reanalysis (Hersbach *et al.*, 2020) ประกอบไปด้วย 7 พารามิเตอร์ที่ถูกกำหนดเพื่อใช้ใน Bulk fluxes parameterization คือ ข้อมูลลมที่ระดับความสูง 10 เมตร ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศที่ระดับความสูง 2 เมตร ความกดอากาศ ปริมาณหยาดน้ำฟ้ารวม ปริมาณรังสีจากคลื่นสั้นและคลื่นยาวที่ผิวหน้า (Fairall, Bradley, Hare, Grachev, & Edson, 2003) สำหรับแรงขับที่ขอบเขตเปิด (open boundary) เส้นทึบสีแดงในภาพที่ 2 ใช้ระดับน้ำเป็นแรงขับคำนวณมาจากองค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลงจาก Global Tidal Model ของ OSU TOPEX/Poseidon Global Inverse Solution TPXO Version 8.0 (Egbert, Bennett, & Foreman, 1994; Egbert & Erofeeva, 2002) จำนวน 13 องค์ประกอบ และข้อมูลสภาพน้ำทะเลเริ่มต้นจากฐานข้อมูล HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) (Bleck & Benjamin, 1993; Bleck & Boudra, 1981) ข้อมูลระดับน้ำ อุณหภูมิ ความเค็ม และความเร็วกระแสน้ำ และตั้งค่าทางฟิสิกส์ในแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองคณิตศาสตร์และช่วงเวลา

	อ่าวไทย (ระยอง)	อันดามัน (กระบี่-ตรัง)
พื้นที่กริดหลัก	6° - 14° N 99° - 106° E	6° - 14° N 96° - 101° E
(ความละเอียดในแนวราบ)	(2x2 km ²)	(2x2 km ²)
พื้นที่กริดซ้อน	11.8° - 13° N 101° - 103° E	6° - 8.5° N 97.5° - 100.5° E
(ความละเอียดในแนวราบ)	(400x400 m ²)	(400x400 m ²)
จำนวนชั้นน้ำ	16	16
ช่วงเวลา	1. 16-24 ธ.ค. 2562 2. 19-28 ต.ค. 2563	5-19 พ.ย. 2564
ความขรุขระของผิวน้ำ	14,000 (Camiel <i>et al.</i> , 2009)	
Horizontal eddy viscosity	กริดหลัก 1.0/ กริดซ้อน 10.0 (Lamsawat <i>et al.</i> , 2020)	
ข้อมูลอุณหภูมิจาก	ECMWF: ERA5 reanalysis	
องค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลง	TOPEX/Poseidon TPXO version 8.0	
ข้อมูลสภาพน้ำทะเลเริ่มต้น	HYCOM	
ประกอบด้วย อุณหภูมิ ความเค็ม ความเร็วกระแสน้ำ และ ความสูงระดับน้ำ		



จากนั้นข้อมูลระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง ROMS จะนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลระดับน้ำตรวจวัดจากกรมเจ้าท่า ที่สถานีระยอง สถานีแหลมงอบ และสถานีสิชล ในพื้นที่บริเวณอ่าวไทย และสถานีกระบี่ สถานีกันตัง และสถานีระนองในพื้นที่ ฟังทะเลอันดามัน และข้อมูลกระแสน้ำจากแบบจำลองจำลองนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลตรวจวัดภาคสนาม จากนั้นทำการ ประเมินด้วยการทดสอบทางสถิติ โดยค่าสหสัมพันธ์ (Coefficient of determination: R^2) จาก Pearson's correlation coefficient formula และค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยยกกำลังสอง (Root Mean Square Error: RMSE) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพ ความแม่นยำ และค่าการเอนเอียงของแบบจำลอง รวมถึงค่า Skill Score (SS) เพื่อทดสอบความคล้ายของเหตุการณ์ใน รูปแบบเศษส่วนของพื้นที่แบบจำลองต่อค่าตรวจวัด ดังนี้

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (2)$$

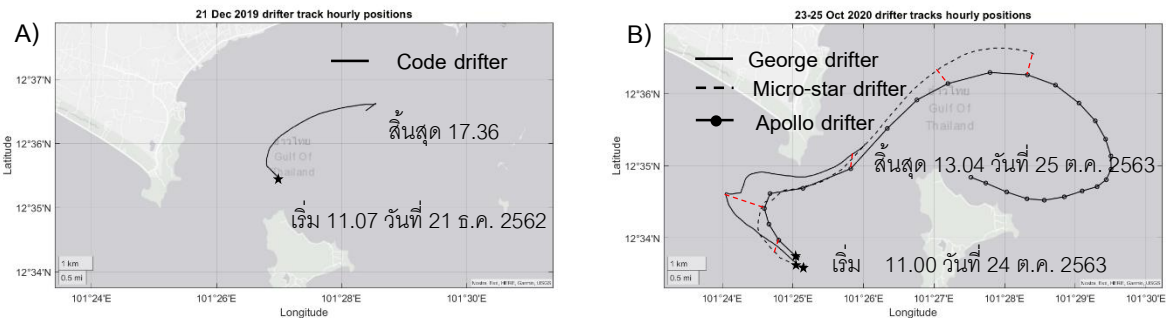
$$SS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^2}{\sum_{i=1}^n (|x_i - \bar{y}| + |y_i - \bar{x}|)^2} \quad (3)$$

โดยที่ x_i คือข้อมูลจากแบบจำลอง \bar{x} คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากแบบจำลอง y_i คือข้อมูลจากการตรวจวัด \bar{y} คือค่าเฉลี่ย ข้อมูลจากการตรวจวัด ซึ่งค่า Skill Score (SS) หากค่าอยู่ในระหว่าง 0.65 - 1 แสดงว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพดี (Chen *et al.*, 2016) จากนั้นทำการประยุกต์แบบจำลองเพื่อติดตามหรือคาดการณ์การเคลื่อนที่ของทุ่นลอยโดยศึกษาร่วมกับ แบบจำลองการไหลเวียนกระแสน้ำและข้อมูลทิศทางการเคลื่อนที่ของทุ่นลอยจากการตรวจวัดภาคสนามข้างต้น

ผลการวิจัย

การทดสอบทุ่นลอยภาคสนาม

จากการตรวจวัดภาคสนามโดยการปล่อยทุ่นลอยทั้ง 3 ครั้ง โดยครั้งแรกทำการปล่อยทุ่นลอยรูปใบพัด ในวันที่ 21 ธันวาคม พ.ศ. 2562 ช่วงภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ พร้อมเครื่องบินที่ตำแหน่งรายละเอียดดังแสดง ในตารางที่ 1 ระยะเวลาทั้งสิ้น 6 ชั่วโมง 29 นาที ด้วยระยะทาง 4.90 กิโลเมตร ทุ่นลอยเคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ จากนั้นค่อย ๆ เบนการเคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ อย่างไรก็ตามในการติดตั้งทุ่นลอยครั้งแรกทำได้เพียงระยะเวลา สั้นๆ เนื่องจากต้องติดตามและเก็บกู้ทุ่นลอยและระยะเวลาการทำงานของแบตเตอรี่มีจำกัดเพื่อดึงข้อมูลออกจากตัว GPS logger (ภาพที่ 3A)



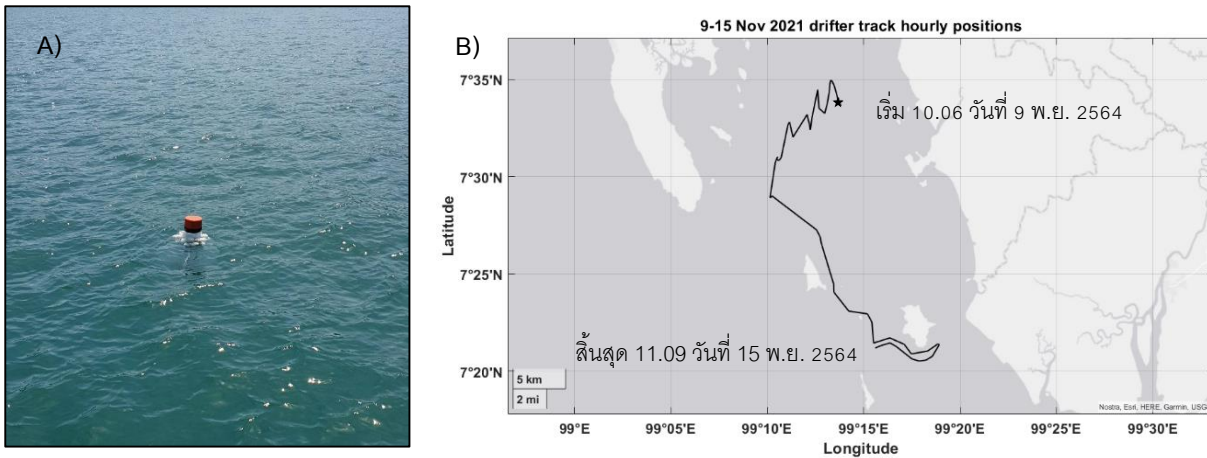
ภาพที่ 3 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของทุ่นลอย A) ครั้งที่ 1: 21 ธันวาคม 2562 B) ครั้งที่ 2: 23-25 ตุลาคม พ.ศ. 2563 โดยจุดรูปดาวหมายถึงตำแหน่งเริ่มต้น

การเก็บข้อมูลครั้งที่สองในวันที่ 24-25 ตุลาคม พ.ศ. 2563 ได้ใช้ทุ่นลอยที่พัฒนาขึ้นมา 3 รูปแบบ พร้อมเครื่องบันทึกตำแหน่งรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1 โดยผลการทดสอบใช้เวลาทั้งสิ้น 15.24, 7.15 และ 30.00 ชั่วโมง และระยะการเคลื่อนที่ 10.57, 7.00 และ 17.19 กิโลเมตร สำหรับทุ่นรูปเพชร ทุ่นรูปคน และทุ่นรูปจรวด ตามลำดับ (ภาพที่ 3B) เมื่อพิจารณาเส้นทางการเคลื่อนที่ของทุ่นทั้งสามชนิดพบว่า มีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน โดยในช่วงเริ่มต้นมีทิศการเคลื่อนที่ออกไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือจากจุดเริ่มต้น จากนั้นจึงเริ่มเบนมาทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือก่อนทุ่นรูปคนจะถูกเก็บกู้เป็นชนิดแรก จากนั้นทุ่นอีกสองชนิดได้เคลื่อนที่ผ่านร่องน้ำด้านตะวันตกของเกาะ เข้าสู่บริเวณด้านเหนือของเกาะเสม็ด จากนั้นจึงทำการเก็บทุ่นรูปเพชร ส่วนทุ่นรูปจรวดได้เดินทางต่อไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือของเกาะเสม็ด ก่อนจะย้อนกลับไปทางทิศตะวันตกอีกครั้งหนึ่งผ่านบริเวณด้านเหนือของเกาะเสม็ดที่ใกล้ชายฝั่งมากยิ่งขึ้นสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำในช่วงเวลา

การเก็บข้อมูลภาคสนามครั้งที่สองพบว่า ทุ่นลอยรูปคนที่พัฒนาขึ้นมา มีการเคลื่อนที่ตามกระแสน้ำจากอิทธิพลของลมร่วมด้วยมากกว่าทุ่นชนิดอื่นเนื่องจากพื้นที่ด้านบนเหนือผิวน้ำมีพื้นผิวมากกว่าทุ่นอื่น และจำเป็นต้องเก็บกู้ขึ้นก่อนเพราะความไม่คงทนต่อสภาพอากาศรวมถึงการถูกรบกวนโดยเรือประมงในพื้นที่จากความเข้าใจผิดว่าเป็นผู้ประสภภัยจริง (แม้จะมีการติดตั้งธงและสัญญาณเพื่อเตือนว่าเป็นงานศึกษาวิจัย) สำหรับทุ่นลอยรูปเพชรและทุ่นลอยรูปจรวด มีความทนทานต่อสภาพอากาศมากกว่าและสะดวกต่อการติดตามเก็บกู้ ทำให้สามารถปล่อยทุ่นลอยเป็นระยะเวลาที่นานขึ้นได้ เมื่อพิจารณาผลการเคลื่อนที่ของทุ่นลอยในการศึกษาครั้งที่สอง พบว่าการเคลื่อนที่ของทุ่นลอยในพื้นที่แม้จะอยู่ใกล้ชายฝั่งแต่การเคลื่อนที่กลับพบว่าไม่แสดงลักษณะของการเคลื่อนที่จากอิทธิพลน้ำขึ้นน้ำลงในรอบวัน จากเส้นทางการเคลื่อนที่และประสิทธิภาพของทุ่นลอยพบว่า การเคลื่อนที่ของทุ่นลอยทั้งสามแบบไปในทิศทางเดียวกันแต่ทุ่นลอยแบบจรวดมีความเหมาะสมในการใช้ในการปฏิบัติงานทางทะเลมากที่สุด

การเก็บข้อมูลครั้งที่สามระหว่างวันที่ 9-15 พฤศจิกายน พ.ศ. 2564 ทำการปล่อยชุดทุ่นลอยรูปจรวดในพื้นที่ศึกษาที่บริเวณอ่าวกระเปาะ-ตรัง ที่ตำแหน่ง 7.5637 °N 99.2282 °E พร้อมติดตั้งเครื่องบันทึกตำแหน่ง VMS พร้อมแบตเตอรี่ 12 V 7A

จำนวนหนึ่งลูก ระยะเวลาประมาณ 145 ชั่วโมง ด้วยระยะทางการเคลื่อนที่ 11.08 กิโลเมตร โดยในช่วงวันที่ 9-11 พฤศจิกายน การเคลื่อนที่ของทุ่นลอยได้รับอิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลงอย่างชัดเจนเมื่ออยู่ในอ่าว จากนั้นทุ่นลอยเคลื่อนที่มีทิศไปทางทิศใต้มุ่งหน้าไปยังบริเวณเกาะมุกด์ (ภาพที่ 4)



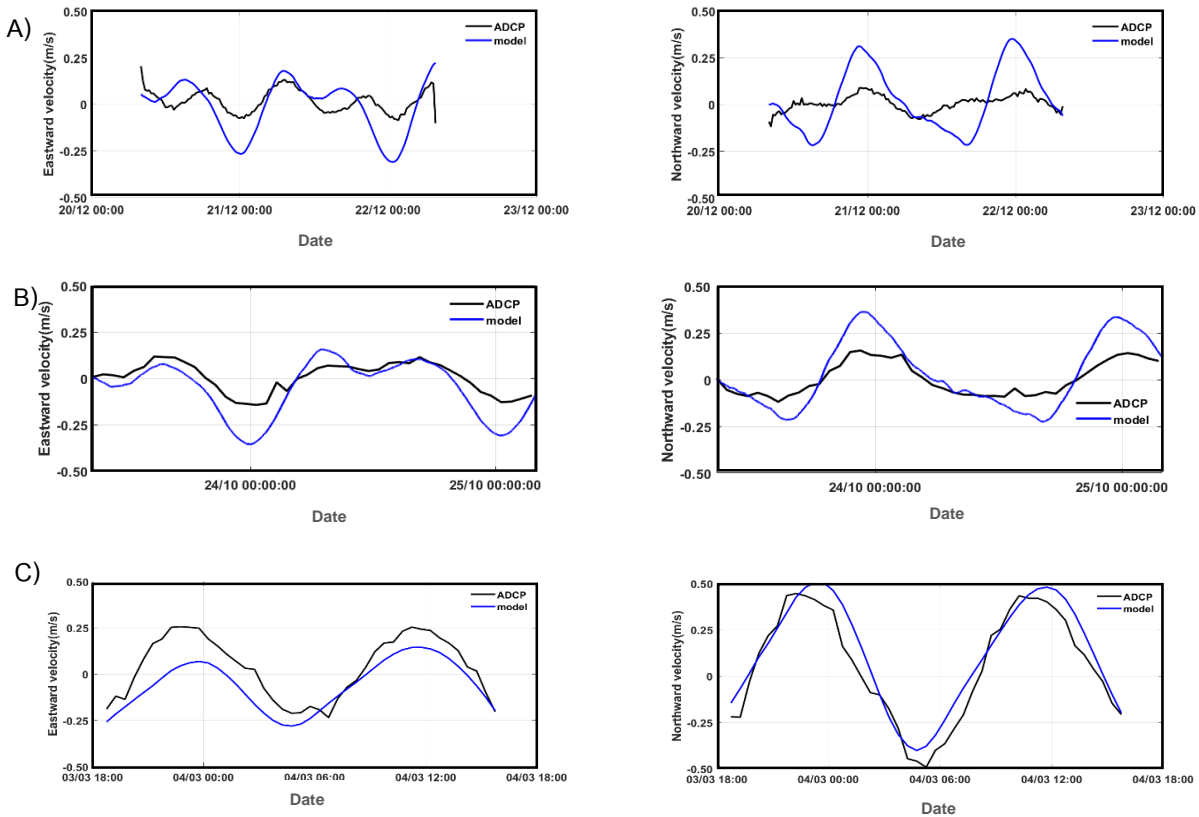
ภาพที่ 4 (A) ทุ่นลอยรูปจรวดขณะติดตั้งในพื้นที่ (B) การเคลื่อนที่ของทุ่นลอยรูปจรวดบริเวณจังหวัดกระบี่-ตรัง โดยจุดรูปดาวหมายถึงตำแหน่งเริ่มต้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลการคำนวณระดับน้ำจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกนำไปปรับเทียบกับข้อมูลระดับน้ำรายชั่วโมงในปี พ.ศ. 2562 ระยะเวลา 360 วัน โดย R^2 มีค่าอยู่ในช่วง 0.77 ถึง 0.93 ส่วนค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.23 ถึง 0.38 เมตร และมีค่า Skill Score มีค่าอยู่ในช่วง 0.91 ถึง 0.98 จากค่าทางสถิติดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ทำการปรับเทียบและทวนสอบในครั้งนี้มีประสิทธิภาพในการจำลองระดับน้ำได้ในระดับที่ดี ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าทางสถิติของข้อมูลระดับน้ำและความเร็วกระแสน้ำที่ได้จากแบบจำลองและการตรวจวัดภาคสนาม

สถานี	ระดับน้ำ			ความเร็วกระแสน้ำ			
	R^2	RSME	Skill Score	สถานี	R^2	RSME	Skill Score
ระยอง	0.82	0.29	0.89	ระยอง (u)	0.65	0.12	0.64
แหลมงอบ	0.77	0.32	0.87	(v)	0.60	0.20	0.56
สีชล	0.77	0.23	0.82	ระยอง (u)	0.94	0.09	0.82
กระบี่	0.93	0.31	0.95	(v)	0.96	0.10	0.85
กันตัง	0.92	0.33	0.92	กระบี่ (u)	0.92	0.12	0.86
ระนอง	0.83	0.38	0.91	(v)	0.96	0.09	0.97



ภาพที่ 5 เปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำจากแบบจำลองและข้อมูลตรวจวัดภาคสนาม

A) ครั้งที่ 1: ระยอง B) ครั้งที่ 2: ระยอง C) กระบี่

จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลความเร็วกระแสน้ำด้วยข้อมูลตรวจวัดจากภาคสนาม พบว่าความเร็วกระแสน้ำทั้งในแนวเหนือ-ใต้ (v-northward) และแนวแนวตะวันออก-ตะวันตก (u – eastward) ในพื้นที่ศึกษาจังหวัดระยองทั้งสองช่วงเวลาที่ทำการเก็บข้อมูล พบว่าแบบจำลองสามารถติดตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเร็วกระแสน้ำในพื้นที่ได้ใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดภาคสนาม แต่อย่างไรก็ตามในรอบเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 พบว่าความเร็วกระแสน้ำจากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าความเร็วกระแสน้ำจากการตรวจวัด โดยเฉพาะความเร็วกระแสน้ำในแนวเหนือใต้ เนื่องมาจากข้อมูลลมที่นำมาใช้ในแบบจำลองนั้นมีความเร็วมากกว่าข้อมูลลมจากสถานีตรวจวัดระยอง กรมอุตุนิยมวิทยาจึงส่งผลให้ความเร็วกระแสน้ำจากแบบจำลองมีค่าสูงกว่า (ไม่ได้นำข้อมูลมาแสดง) (ภาพที่ 5A) ส่วนในรอบเดือนตุลาคม พ.ศ. 2563 ได้ทำการตรวจวัดข้อมูลในวันที่ 23-25 ตุลาคม พ.ศ. 2563 พบว่าความเร็วกระแสน้ำจากแบบจำลองสูงกว่าค่าจากการตรวจวัดเล็กน้อย (ภาพที่ 5B) สำหรับพื้นที่ศึกษากระบี่ ความเร็วกระแสน้ำในรอบเดือนมีนาคม พ.ศ. 2564 พบว่าผลของความเร็วกระแสน้ำจากแบบจำลองใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดภาคสนามแต่มีความเร็วต่ำกว่าเล็กน้อย (ภาพที่ 5C) เมื่อทำการทดสอบค่าทางสถิติพบว่าแบบจำลองสามารถติดตามลักษณะเปลี่ยนแปลงของกระแสน้ำได้ดังตารางที่ 3 จากค่าทางสถิติแบบจำลองสามารถติดตาม

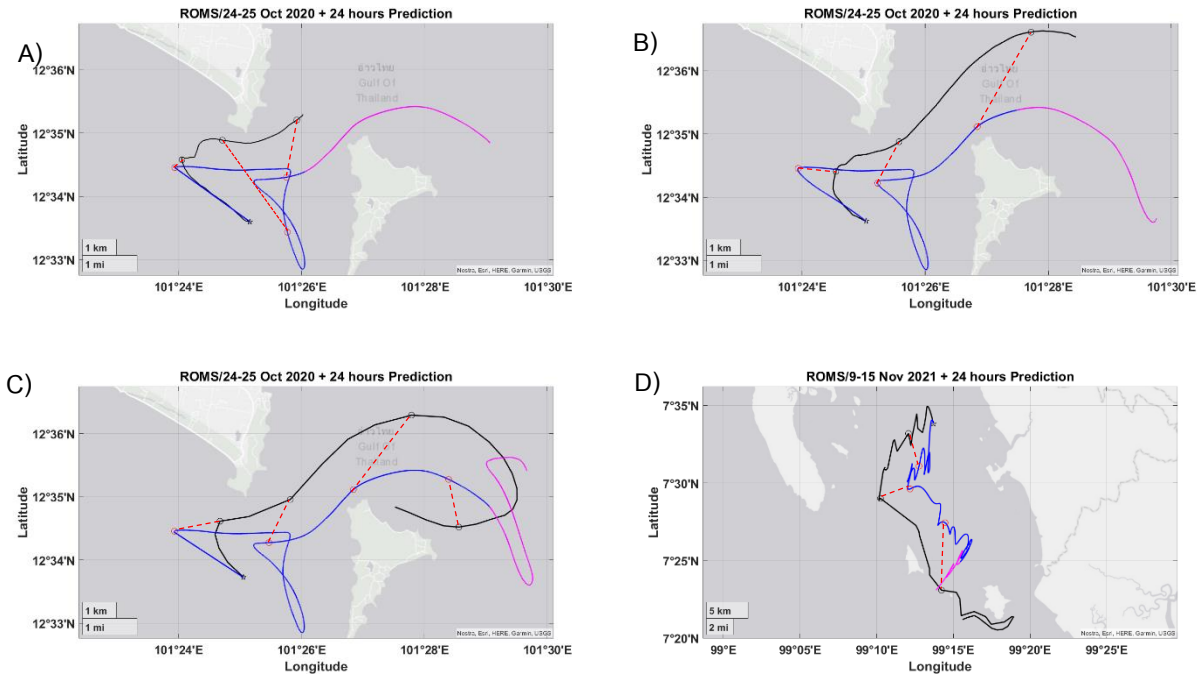


ลักษณะเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำและกระแสน้ำในพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นแบบจำลองที่ได้รับการปรับเทียบและ ทวนสอบในส่วนนี้จะนำไปใช้ศึกษารูปแบบการไหลของกระแสน้ำและการเคลื่อนที่ของทุ่นลอยต่อไป

เมื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่อการคาดการณ์การเคลื่อนที่ของทุ่นลอยทั้ง 3 ครั้งของการเก็บข้อมูลภาคสนาม ในกรณีศึกษาวันที่ 21 ธันวาคม พ.ศ. 2562 ได้กำหนดจุดปล่อยทุ่นลอยที่ตำแหน่ง $12.5907^{\circ}\text{N } 101.4499^{\circ}\text{E}$ พบว่าเส้นทาง จากแบบจำลองมีการเคลื่อนที่หลังจากเริ่มต้นไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ จากนั้นจึงย้อนขึ้นมาจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ก่อนจะสิ้นสุดการเคลื่อนที่ที่ตำแหน่ง $12.5932^{\circ}\text{N } 101.4572^{\circ}\text{E}$ (เส้นสีน้ำเงิน) เมื่อเทียบกับทุ่นตรวจวัดภาคสนามที่สิ้นสุด ตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่ $12.60855^{\circ}\text{N } 101.4731^{\circ}\text{E}$ (เส้นสีดำ) ความแตกต่างกันอยู่ที่ 2.43 กิโลเมตร เมื่อคาดการณ์การ เคลื่อนที่ต่อเนื่องอีก 24 ชั่วโมง มีแนวการเคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันตกและแสดงลักษณะการเคลื่อนที่จากอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำ ลงเป็นหลัก

ในกรณีศึกษาวันที่ 24 ตุลาคม พ.ศ. 2563 ได้กำหนดจุดปล่อยทุ่นลอยสามตำแหน่งในช่วงเวลาเดียวกัน ตามจำนวน ทุ่นที่ทำการศึกษาได้แก่ ตำแหน่งที่ $12.5600^{\circ}\text{N } 101.4193^{\circ}\text{E}$ (ทุ่นรูปคน) $12.5604^{\circ}\text{N } 101.4174^{\circ}\text{E}$ (ทุ่นรูปเพชร) และ $12.5621^{\circ}\text{N } 101.4176^{\circ}\text{E}$ (ทุ่นรูปจรวด) พบว่าผลจากแบบจำลองแสดงให้เห็นการเคลื่อนที่ของทุ่นทั้งสามเคลื่อนที่โดยแสดง ลักษณะของน้ำขึ้นน้ำลงในพื้นที่เป็นหลักและสิ้นสุดการเคลื่อนที่ที่ตำแหน่ง $12.5732^{\circ}\text{N } 101.4342^{\circ}\text{E}$ ในทุ่นรูปคน (ภาพที่ 6A) $12.5896^{\circ}\text{N } 101.4582^{\circ}\text{E}$ ในทุ่นรูปเพชร (ภาพที่ 6B) และ $12.5807^{\circ}\text{N } 101.4843^{\circ}\text{E}$ ในทุ่นรูปจรวด (ภาพที่ 6C) เมื่อเปรียบเทียบผลจากแบบจำลอง (เส้นสีน้ำเงิน) กับทุ่นลอยทดสอบภาคสนาม (เส้นสีดำ) เมื่อพิจารณาการ เคลื่อนที่ทำนายต่อเนื่องอีก 24 ชั่วโมง (เส้นสีชมพู) พบว่าการเคลื่อนที่ของทุ่นลอยทั้งสามตัว มีลักษณะการเคลื่อนที่ไปทางทิศ ตะวันออกเข้าสู่เกาะเสม็ด พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตลอดระยะทางอยู่ที่ 1.053 2.96 และ 1.83 กิโลเมตร ในทุ่นรูปคน ทุ่นรูปเพชร และทุ่นรูปจรวดตามลำดับ

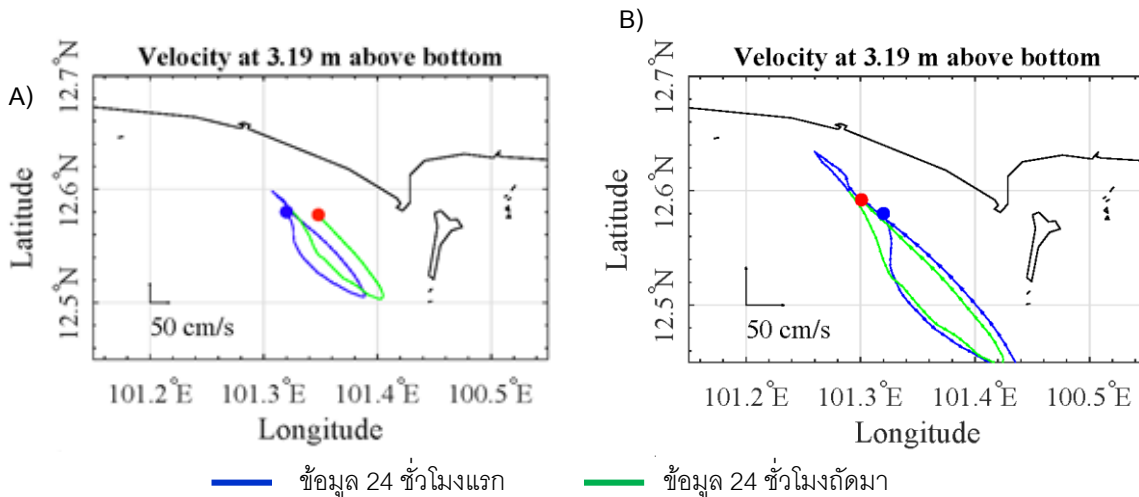
กรณีศึกษาวันที่ 9-15 พฤศจิกายน พ.ศ. 2564 ได้กำหนดจุดปล่อยทุ่นลอยที่ตำแหน่ง $7.5637^{\circ}\text{N } 99.2282^{\circ}\text{E}$ และ สิ้นสุดที่ $7.4152^{\circ}\text{N } 99.2574^{\circ}\text{E}$ (เส้นสีน้ำเงิน) เมื่อเทียบกับทุ่นตรวจวัดภาคสนามที่สิ้นสุดตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่ $7.3533^{\circ}\text{N } 99.2599^{\circ}\text{E}$ (เส้นสีดำ) พบว่ามีความแตกต่างกันอยู่ที่ประมาณ 4.88 กิโลเมตร เมื่อคาดการณ์ต่อเนื่องอีก 24 ชั่วโมงพบว่าการ เคลื่อนที่ของทุ่นภายในแบบจำลองมีทิศการเคลื่อนที่ออกไปทางตะวันตกเฉียงใต้ออกนอกบริเวณอ่าว (ภาพที่ 6D)



— ข้อมูลภาคสนาม — แบบจำลอง — แบบจำลองคาดการณ์ 24 ชั่วโมงถัดไป - - - ตำแหน่งเทียบ

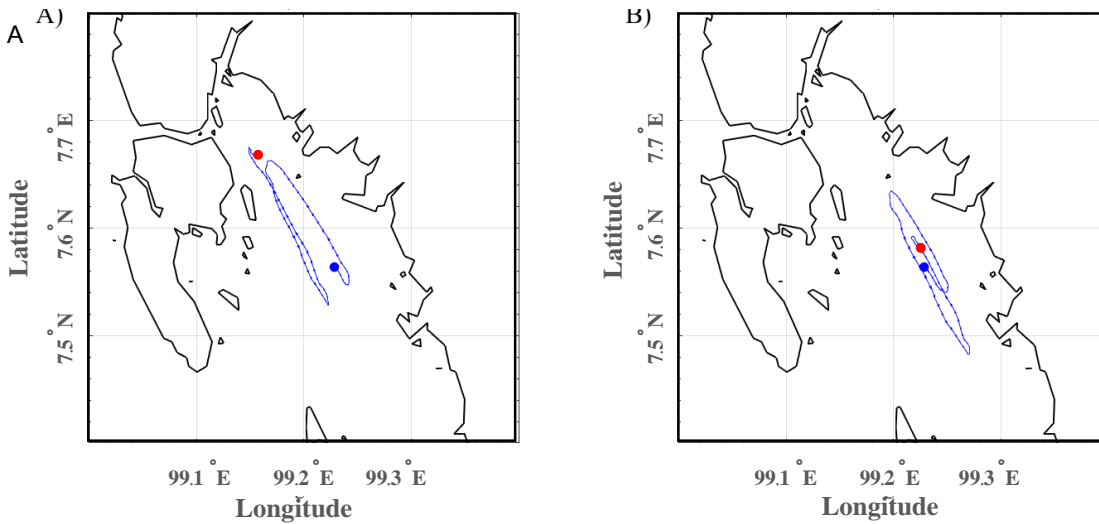
ภาพที่ 6 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของทุ่นลอยจากแบบจำลอง (เส้นน้ำเงิน) ข้อมูลภาคสนาม (เส้นสีดำ) และเส้นทางการคาดการณ์การเคลื่อนที่ของทุ่นลอยจากแบบจำลอง 24 ชั่วโมงถัดมา (เส้นสีม่วง) A) การเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 (ทุ่นรูปคน) B) การเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 (ทุ่นรูปเพชร) C) การเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 (ทุ่นรูปจรวด) D) การเก็บข้อมูลครั้งที่ 3 (ทุ่นรูปจรวด)

เมื่อนำข้อมูลการตรวจวัดกระแสน้ำภาคสนามในพื้นที่จังหวัดระยอง มาพิจารณาในรูปแบบการไหลของ progressive vector เมื่อลากเส้นตรงเชื่อมระหว่างจุดสีน้ำเงิน (จุดเริ่มต้นหรือหางของเวกเตอร์ความเร็ว) และจุดสีแดง (หัวเวกเตอร์ความเร็วที่เวลาสุดท้าย) ที่ระดับความลึกผิวน้ำจะได้ทิศทางการไหลสุทธิดังแสดงในภาพที่ 7 เมื่อพิจารณาอิทธิพลจากลม น้ำขึ้นน้ำลง และปัจจัยอื่นๆ ตำแหน่งของกระแสน้ำจึงไม่กลับมาที่เดิม (ภาพที่ 7A) และเมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลงเท่านั้น โดยการกรองข้อมูลกระแสน้ำจากอิทธิพลจากแรงชนิดอื่นออก ด้วยวิธี low pass filtering โดยใช้ Godin Filter จะทำให้ได้รูปแบบของ progressive vector ที่มีความชัดเจนมากขึ้น ทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงมีลักษณะวงรี (tidal ellipse) โดยมีทิศทางการไหลหลักในแนวตะวันออกเฉียงใต้ในช่วงน้ำลง และในแนวตะวันตกเฉียงเหนือในช่วงน้ำขึ้น ซึ่งแนวของการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำจะเคลื่อนที่ขนานกับชายฝั่งระยองตลอดระยะขึ้นลงของระดับน้ำ (ภาพที่ 7B)



ภาพที่ 7 Progressive plot ของกระแสน้ำผิวหน้า บริเวณชายฝั่ง จังหวัดระยอง ระหว่างวันที่ 23 – 25 ตุลาคม พ.ศ. 2563 จุดสีน้ำเงิน และสีแดงแทนจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของเวกเตอร์ความเร็วกระแสน้ำ

A) พิจารณาปัจจัยจากลม น้ำขึ้นน้ำลง และปัจจัยอื่นๆ B) พิจารณาปัจจัยน้ำขึ้นน้ำลง



ภาพที่ 8 Progressive plot ของกระแสน้ำผิวหน้า จังหวัดกระบี่ ระหว่างวันที่ 2-3 มีนาคม พ.ศ. 2564 จุดสีน้ำเงิน และสีแดงแทนจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของเวกเตอร์ความเร็วกระแสน้ำ

A) พิจารณาปัจจัยจากลม น้ำขึ้นน้ำลง และปัจจัยอื่นๆ B) พิจารณาปัจจัยน้ำขึ้นน้ำลง

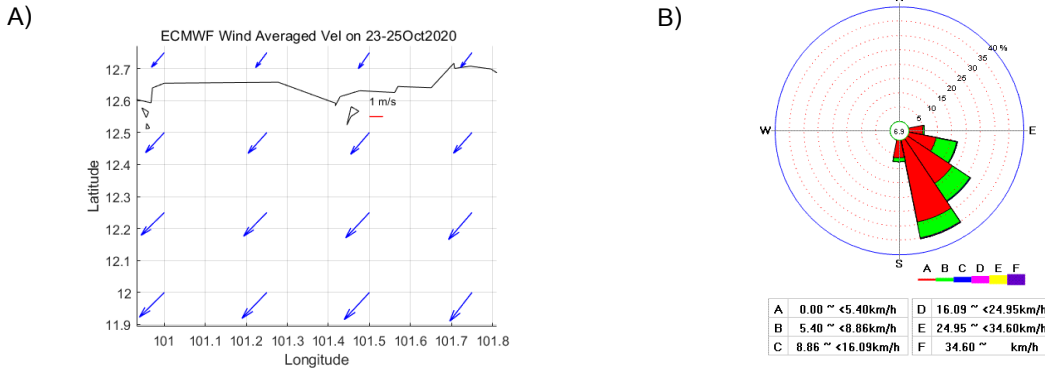


สำหรับข้อมูลการตรวจวัดกระแสน้ำภาคสนามในพื้นที่จังหวัดกระบี่ เมื่อพิจารณาในรูปแบบการไหลของ progressive vector ที่ระดับความลึกผิวน้ำจะได้ทิศทางการไหลสุทธิดังแสดงในภาพที่ 8 เมื่อพิจารณาอิทธิพลจากลม น้ำขึ้นน้ำลง และปัจจัยอื่นๆ ตำแหน่งของกระแสน้ำไม่กลับมามีเดิม (ภาพที่ 8A) และเมื่อพิจารณาเฉพาะอิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลงเท่านั้น โดยการกรองข้อมูลกระแสน้ำจากอิทธิพลจากแรงชนิดอื่นออก จะเห็นกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงมีลักษณะวงรี (tidal ellipse) โดยมีทิศทางการไหลหลักในแนวตะวันออกเฉียงใต้และตะวันตกเฉียงเหนือ (ภาพที่ 8B)

วิจารณ์ผลการวิจัย

จากการศึกษาการพัฒนาหุ่นลอยเพื่อการศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุลอยน้ำในทะเลร่วมกับการประยุกต์ใช้แบบจำลอง ROMS ในการคาดการณ์การเคลื่อนที่ของหุ่นลอย จากปัจจัยของลม และน้ำขึ้นน้ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลระดับน้ำตรวจวัดจากกรมเจ้าท่า ปี พ.ศ. 2562 และข้อมูลกระแสน้ำจากการตรวจวัดภาคสนามพื้นที่จังหวัดระยอง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 และเดือนตุลาคม พ.ศ. 2563 กับพื้นที่อ่าวกระบี่-ตรัง เดือนมีนาคม พ.ศ. 2564 ด้วยการจัดตั้งชุดหุ่นลอยทดสอบกระแสน้ำพร้อมเครื่องบันทึกตำแหน่งการเคลื่อนที่ และเครื่องบันทึกความเร็วกระแสน้ำ พบว่าหุ่นลอยรูปจรวดที่พัฒนาขึ้นมาสามารถใช้งานในพื้นที่จริงมีประสิทธิภาพมากที่สุด เนื่องจากความสามารถในการทนทานต่อสภาพอากาศในพื้นที่ทะเล และสามารถติดตามได้ในระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น รวมถึงแก้ปัญหาเรื่องความเสียหายจากไอทะเลในอุปกรณ์ไฟฟ้า เนื่องจากติดตั้งภายในตัวหุ่น ในขณะที่หุ่นลอยรูปเพชร พบว่ามีลักษณะการเคลื่อนที่ที่คล้ายกันกับหุ่นรูปจรวด แต่ยังมีข้อจำกัดของพื้นที่ในการติดอุปกรณ์ต่าง ๆ และสำหรับหุ่นลอยรูปคน พบว่าการเคลื่อนที่ที่มีลักษณะคล้ายหุ่นรูปจรวดและหุ่นรูปเพชร แต่มีความเร็วการเคลื่อนที่ที่สูงกว่าเนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศมีมากกว่า ดังนั้นจำเป็นต้องมีการพัฒนาเพิ่มเติมต่อไปในอนาคต นอกจากนี้การศึกษาที่ผ่านมาในอดีตพบว่า การศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุลอยน้ำ (floating objects) นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่แตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ศึกษา เช่น คลื่นทะเล กระแสน้ำ และน้ำขึ้นน้ำลง เป็นต้น (Bouzaiene *et al.*, 2021) สำหรับพื้นที่ชายฝั่งจังหวัดระยอง บริเวณเกาะเสม็ด ลักษณะของพื้นที่มีรูปแบบที่เปิดรับคลื่นลมกว้างในทางทิศตะวันตกถึงใต้ การเคลื่อนที่ของหุ่นลอยจึงแสดงให้เห็นลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นลอยที่ได้รับอิทธิพลของ Ekman transport แต่ในขณะที่พื้นที่บริเวณอ่าวในพื้นที่ศึกษาจังหวัดกระบี่ – ตรังการเคลื่อนที่ของหุ่นลอยได้รับอิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลงอย่างชัดเจน เนื่องจากลักษณะของพื้นที่ที่ได้ทำการศึกษาอยู่ภายในอ่าวที่มีแนวเกาะล้อมรอบ ทำให้ได้รับอิทธิพลจากคลื่นลมที่น้อยกว่า

สำหรับการพัฒนาแบบจำลองในการคาดการณ์การเคลื่อนที่ของหุ่นลอย พบว่าเมื่อทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยข้อมูลระดับน้ำรายปีจากกรมเจ้าท่าและข้อมูลความเร็วกระแสน้ำตรวจวัดภาคสนามพบว่า ข้อมูลทั้งสองมีความสอดคล้องกัน เมื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองคาดการณ์การเคลื่อนที่ของวัตถุลอยน้ำพบว่ามีความคลาดเคลื่อนในด้านระยะทางการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นเล็กน้อย โดยในพื้นที่ศึกษาจังหวัดระยองเมื่อได้พิจารณาข้อมูลลมนำเข้าจากฐานข้อมูล ECMWF ในช่วงวันที่ 23-25 ตุลาคม พ.ศ. 2563 แสดงให้เห็นว่าลมที่พัดผ่านในพื้นที่การศึกษาเป็นลมตะวันออกเฉียงเหนือ ด้วยความเร็วขนาด 2.31 เมตรวินาที ในขณะที่ข้อมูลลมจากสถานีตรวจวัดลมอัตโนมัติสถานีจังหวัดระยอง กรมอุตุนิยมวิทยา



ภาพที่ 9 แผนภาพแสดงลมที่พัดผ่านในพื้นที่ A) ข้อมูลลมเฉลี่ยจากฐานข้อมูล ECMWF

B) ข้อมูลลมจากสถานีตรวจวัดอัตโนมัติของกรมอุตุนิยมวิทยา ในช่วงวันที่ 23-25 ตุลาคม

พ.ศ. 2563 (ที่มาภาพ: <http://www.aws-observation.tmd.go.th>)

(ตำแหน่ง 12.5° N 101.5° E) พบว่าในช่วงการเก็บข้อมูลภาคสนามลมที่พัดผ่านเป็นลมฝ่ายตะวันออกเฉียงใต้ความเร็วลมค่อนข้างต่ำ (ภาพที่ 9)

จากความแตกต่างของข้อมูลทั้งสองนี้จึงเป็นผลทำให้การคาดการณ์การเคลื่อนที่ของพุนลอยจากแบบจำลอง พบความคลาดเคลื่อนในด้านระยะทางเกิดขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาบริเวณ Gulf of La Spezia ซึ่งได้ทำการศึกษาถึงการไหลเวียนของกระแสน้ำในบริเวณพื้นที่ชายฝั่งพบว่า ข้อมูลลมระดับ global scale ที่นำมาใช้ในแบบจำลองมีความแตกต่างจากข้อมูล local scale จึงส่งผลต่อผลการเคลื่อนที่ของวัตถุลอยน้ำที่ได้ (Haza *et al.*, 2010) รวมถึงความละเอียดของข้อมูลในกระบวนการระดับ mesoscale และ submesoscale ในแบบจำลองชายฝั่งหรือภูมิภาคซึ่งมีผลอย่างยิ่งต่อการเคลื่อนที่ภายในแบบจำลอง (Meyerjürgens *et al.*, 2020) ดังในการศึกษาของ Graham (2018) และ Guihou *et al.* (2018) นอกจากนี้ลักษณะของภูมิประเทศก็มีผลต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุเช่นกัน โดยจะเห็นได้ว่าบริเวณพื้นที่ศึกษามีลักษณะภูมิประเทศเป็นแหลม (แหลมหญ้า) ยื่นออกมา และเกาะเสม็ดประกอบด้วยภูเขาและเนินเขาเตี้ยๆ ด้านทิศตะวันตกของเกาะมีความลาดชันมาก ทำให้มีร่องน้ำเขาแหลมหญ้า-อ่าวพร้าว เกาะเสม็ด ซึ่งร่องน้ำนี้เองก็ส่งผลต่อการเคลื่อนที่เช่นกัน ในขณะที่พื้นที่ศึกษากระบี่-ตรัง แบบจำลองสามารถคาดการณ์การเคลื่อนที่ของพุนลอยได้ใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดภาคสนามซึ่งได้รับอิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลงเป็นหลักเนื่องจากอยู่ในพื้นที่ลักษณะของอ่าวกึ่งปิดแต่อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้จำนวนพุนลอยที่ใช้มีเพียง 1 อันเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้การศึกษาพลวัตของน้ำทะเลสมมุติมากขึ้นควรปล่อยชุดพุนลอยมากกว่า 1 อัน และระยะเวลาที่นานมากขึ้น ร่วมกับการนำข้อมูลจาก HF-Radar ในพื้นที่มาประยุกต์ใช้มากขึ้นเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการออกเก็บข้อมูลภาคสนาม (Haza *et al.*, 2010) และครอบคลุมพื้นที่ได้กว้างยิ่งขึ้น

ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาการพัฒนาหุ่นลอยเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุลอยน้ำในทะเลสามารถเพิ่มเติมให้สมบูรณ์ได้มากยิ่งขึ้นโดยการประยุกต์ใช้หุ่นลอยในรูปแบบที่พัฒนาขึ้นมาในพื้นที่การศึกษาที่มากขึ้นเพื่อทดสอบลักษณะการเคลื่อนที่ในพื้นที่ต่างๆ และในส่วนของ การประยุกต์ใช้แบบจำลอง เพื่อพยากรณ์การเคลื่อนที่ที่สามารถคำนวณแบบคู่ควบ (Coupling) กับแบบจำลองอากาศ เช่น WRF เพื่อจำลองการเคลื่อนที่จากอิทธิพลลมให้เหมาะสมกับลักษณะการเคลื่อนที่ของลมในพื้นที่มากยิ่งขึ้นหรือแบบจำลองวัตถุ เช่น Particle tracking model หรือ leeway model เป็นต้น

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาพัฒนารูปแบบหุ่นลอย โดยการตรวจวัดภาคสนามบริเวณพื้นที่ที่มีลักษณะฐานชายฝั่งแตกต่างกัน พื้นที่ชายฝั่งที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงแบบจังหวัดระยอง และพื้นที่ชายฝั่งที่มีลักษณะเป็นอ่าวกึ่งปิด แบบเกาะลันตาฝั่งตะวันออก จังหวัดกระบี่ พบว่าหุ่นลอยที่พัฒนาขึ้นเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน แต่ลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นลอยแตกต่างกันโดยพื้นที่ชายฝั่งจังหวัดระยองการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับกระแสน้ำที่ได้รับอิทธิพลของลมเป็นหลัก ในขณะที่พื้นที่ชายฝั่งจังหวัดกระบี่การเคลื่อนที่ของหุ่นลอยได้รับอิทธิพลจากกระแสน้ำขึ้นขึ้นลงเป็นหลัก เมื่อจำลองการเคลื่อนตัวของหุ่นลอยด้วยแบบจำลองอุทกพลศาสตร์แบบ 3 มิติ พบว่าการคาดการณ์การเคลื่อนที่ของหุ่นลอยโดยแบบจำลองสอดคล้องกับผลจากการตรวจวัดภาคสนามแต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อน โดยเคลื่อนที่ได้ระยะทางที่ไกลกว่าและความคลาดเคลื่อนของระยะทางตลอดเส้นทางไม่เกิน 3 กิโลเมตร ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากหลายปัจจัย เช่น ลักษณะกายภาพของพื้นที่ศึกษาที่เป็นพื้นที่ชายฝั่ง ที่มีรูปร่างไม่แน่นอนและมีพื้นที่เกาะเข้ามาาร่วมด้วย รวมไปถึงข้อมูลนำเข้าที่มาใช้ในแบบจำลองซึ่งเป็นข้อมูล Global Scale เป็นต้น นอกจากนี้ในการเก็บข้อมูลสนามส่วนใหญ่จะเป็นช่วงที่คลื่นลมไม่มีความรุนแรงมากนัก เพราะไม่สามารถเก็บข้อมูลในช่วงที่มีคลื่นลมแรงได้ซึ่งเป็นช่วงที่มีการเกิดอุปติภัยทางทะเลได้โดยเฉพาะในช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ แต่ทั้งนี้ในพัฒนารูปแบบหุ่นและระบบการเก็บข้อมูลที่ได้นี้ทำให้สามารถปล่อยหุ่นลอยทำงานได้แต่ต้นทุนค่าใช้จ่ายของระบบบันทึกยังสูงอยู่ ดังนั้นจึงยังต้องพัฒนาระบบติดตามที่ใช้ต้นทุนต่ำลงเพื่อให้การใช้งานแพร่หลายมากยิ่งขึ้น สำหรับการพัฒนารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังไม่ได้พิจารณาอิทธิพลจากคลื่นชายฝั่ง ทั้งนี้เพื่อพัฒนาให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพมากขึ้นควรพิจารณาอิทธิพลของคลื่นเข้ามาาร่วมด้วยในการศึกษาครั้งต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยในครั้งนีได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการการพัฒนาและใช้ประโยชน์แบบจำลองการไหลเวียนของกระแสน้ำเพื่องานด้านภัยพิบัติทางทะเลในประเทศไทย โดยสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) และโครงการการศึกษาความหลากหลายทางชีวภาพและการใช้ประโยชน์ในพื้นที่ทะเลและชายฝั่งบริเวณปากคลองไทย ฝั่งอันดามัน โดยสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติขอขอบคุณกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือและกรมเจ้าท่าที่ให้



ความอนุเคราะห์ข้อมูลระดับนำในการทำวิจัยครั้งนี้ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Bleck, R., & Benjamin, S. (1993). Regional Weather Prediction with a Model Combining Terrain-following and Isentropic Coordinates. Part I: Model Description. *Monthly Weather Review - MON WEATHER REV*, 121.
- Bleck, R., & Boudra, D. (1981). Initial Testing of a Numerical Ocean Circulation Model Using a Hybrid (Quasi-Isopycnic) Vertical Coordinate. *Journal of Physical Oceanography - J PHYS OCEANOGR*, 11, 755-770.
- Bouzaiene, M.; Menna, M.; Elhmaidi, D.; Dilmahamod, A.F.; Poulain, P.-M. Spreading of Lagrangian Particles in the Black Sea: A Comparison between Drifters and a High-Resolution Ocean Model. *Remote Sens.* (2021), 13, 2603.
- Carniel, S., Warner, J. C., Chiggiato, J., & Sclavo, M. (2009). Investigating the impact of surface wave breaking on modeling the trajectories of drifters in the northern Adriatic Sea during a wind-storm event. *Ocean Modelling*, 30(2), 225-239.
- Chanthasiri, N. (2014). Numerical Modeling of coral Larval Dispersal in Sattahip Coastal Area, Chon Buri Province. (Thesis for Master of Science, Department of Marine Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University.(in Thai)
- Chen, W., Chen, K., Kuang, C., Zhu, D. Z., He, L., Mao, X., Liang, H., and Song, H. (2016). Influence of sea level rise on saline water intrusion in the Yangtze River Estuary, China. *Applied Ocean Research*, 54, 12-25.
- Dagestad, K.-F., & Röhrs, J. (2019). Prediction of ocean surface trajectories using satellite derived vs. modeled ocean currents. *Remote Sensing of Environment*, 223, 130-142.
- Davis, R. E. (1985). Drifter observations of coastal surface currents during CODE: The method and descriptive view. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C3), 4741-4755.



- Elodie Duyck, Marieke Femke De Jong. (2021). Circulation Over the South-East Greenland Shelf and Potential for Liquid Freshwater Export: A Drifter Study. *Geophysical Research Letters*. Volume48, Issue5.
- Egbert, G., Bennett, A. F., & Foreman, M. (1994). TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. *J Geophys Res*, 99, 821-852.
- Egbert, G., & Erofeeva, S. (2002). Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 19, 183-204. doi:10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2
- Fairall, C. W., Bradley, E. F., Hare, J. E., Grachev, A. A., & Edson, J. B. (2003). Bulk Parameterization of Air–Sea Fluxes: Updates and Verification for the COARE Algorithm. *Journal of Climate*, 16(4), 571-591. doi:10.1175/1520-0442(2003)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2
- Graham, J. A., O'Dea, E., Holt, J., Polton, J., Hewitt, H. T., Furner, R., Guihou, K., Brereton, A., Arnold, A., Wakelin, S., Castillo Sanchez, J. M., & Mayorga Adame, C. G. (2018). AMM15: A new high-resolution NEMO configuration for operational simulation of the European north-west shelf. *Geoscientific Model Development*, 11(2), 681–696. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-681-2018>
- Guihou, K., Polton, J., Harle, J., Wakelin, S., O'Dea, E., & Holt, J. (2018). Kilometric scale modeling of the North West European shelf seas: Exploring the spatial and temporal variability of internal tides: Modeling of the Atlantic European shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123, 688–707. <https://doi.org/10.1002/2017JC012960>
- G. Novelli, C.M. Guigand, C. Cousin, E.H. Ryan, N.J.M. Laxague, H. Dai, B.K. Haus, T.M. Özgökmen. A biodegradable surface drifter for ocean sampling on a massive scale *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 34 (2017), pp. 2509-2532.



Haza, A.C., Özgökmen, T.M., Griffa, A. *et al.* Transport properties in small-scale coastal flows: relative dispersion from VHF radar measurements in the Gulf of La Spezia. *Ocean Dynamics*, 60, 861–882 (2010).
<https://doi.org/10.1007/s10236-010-0301-7>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. doi:10.1002/qj.3803

Isobe, A., Kako, S. i., Chang, P.-H., & Matsuno, T. (2009). Two-Way Particle-Tracking Model for Specifying Sources of Drifting Objects: Application to the East China Sea Shelf. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(8), 1672-1682. doi:10.1175/2009JTECHO643.1

Lamsawat, P., Phaksopa, J., & Sojisuporn, P. (2020). Tracking of Floating Objects in the Area of Chao Phraya River Mouth by Using Numerical Model. *Burapha Science Journal*, 25(3), 953-967. (in Thai)

Lee, K., Kim, T.-G., & Cho. (2020). Influence of Tidal Current, Wind, and Wave in Hebei Spirit Oil Spill Modeling. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8, 69. doi:10.3390/jmse8020069

Marta-Almeida, M., Ruiz-Villarreal, M., Pereira, J., Otero, P., Cirano, M., Zhang, X., & Hetland, R. (2013). Efficient tools for marine operational forecast and oil spill tracking. *Marine pollution bulletin*, 71.
doi:10.1016/j.marpolbul.2013.03.022

Meyerjürgens, J., Ricker, M., Schakau, V., Badewien, T. H., & Stanev, E. V. (2020). Relative dispersion of surface drifters in the North Sea: The effect of tides on mesoscale diffusivity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, e2019JC015925. <https://doi.org/10.1029/2019JC015925>

Morey, S., Wienders, N., Dukhovskoy, D., & Bourassa, M. (2018). Measurement Characteristics of Near-Surface Currents from Ultra-Thin Drifters, Drogued Drifters, and HF Radar. *Remote Sensing*, 10, 1633.
doi:10.3390/rs10101633



Shchepetkin, A. F., & McWilliams, J. C. (2005). The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 9(4), 347-404.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.08.002>

Srinivasan, R. (2014). *Design of GPRS based Drifter for Measurement of Surface Current Velocity in Coastal Waters*.

Subbaraya, S., Breitenmoser, A., Molchanov, A., Muller, J., Oberg, C., Caron, D., & Sukhatme, G. (2016). Circling the Seas: Design of Lagrangian Drifters for Ocean Monitoring. *IEEE Robotics & Automation Magazine*,

23, 1-1. doi:10.1109/MRA.2016.2535154

Umlauf, L., & Burchard, H. (2003). A generic length-scale equation for geophysical turbulence models. *Journal of Marine Research*, 61, 235-265. doi:10.1357/002224003322005087

Weatherall, P., Marks, K. M., Jakobsson, M., Schmitt, T., Tani, S., Arndt, J. E., . Wigley, R. (2015). A new digital bathymetric model of the world's oceans. *Earth and Space Science*, 2(8), 331-345.

doi:<https://doi.org/10.1002/2015EA000107>