



## กรมอุตุนิยมวิทยา

4353 ถนนสุขุมวิท กรุงเทพฯ 10260

METEOROLOGICAL DEPARTMENT

4353 Sukhumvit Road, Bangkok 10260, THAILAND

### เอกสารวิชาการ

การประเมินความเสี่ยงของฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในอ่าวไทยด้วยดัชนี Exposure Velocity (EV) จากข้อมูลคลื่นแบบจำลอง WAM และกระแสน้ำแบบจำลอง HYCOM  
อนุชา ศรีเรียงหล้า

Assessment of Marine Aquaculture Risk in the Gulf of Thailand Using Exposure Velocity (EV) Derived from WAM Wave Model and HYCOM Ocean Current Data

ANUCHA SRERURNGLA

เอกสารวิชาการ เลขที่

Technical Document No.

ISBN:

การประเมินความเสี่ยงของฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในอ่าวไทยด้วยดัชนี Exposure Velocity (EV)  
จากข้อมูลคลื่นแบบจำลอง WAM และกระแสน้ำแบบจำลอง HYCOM  
Assessment of Marine Aquaculture Risk in the Gulf of Thailand Using Exposure  
Velocity (EV) Derived from WAM Wave Model and HYCOM Ocean Current Data

อนุชา ศรีเรืองล้ำ  
ส่วนอุตุนิยมวิทยาเกษตร  
กองพัฒนาอุตุนิยมวิทยา  
มีนาคม พ.ศ. 2569

ANUCHA SRERURONGLA  
AGROMETEOROLOGY SUB-DIVISION  
METEOROLOGICAL DEVELOPMENT DIVISION  
MARCH 2026

## บทคัดย่อภาษาไทย

อ่าวไทยเป็นพื้นที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศ แต่มีความเสี่ยงจากแรงกระทำทางกายภาพของคลื่นและกระแสน้ำ โดยเฉพาะในช่วงฤดูมรสุม การประเมินความเสี่ยงที่ผ่านมาโดยอาศัยตัวแปรคลื่นเพียงอย่างเดียวอาจไม่สะท้อนแรงกระทำรวมที่โครงสร้างกระชังต้องเผชิญจริง การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาดัชนี Exposure Velocity (EV-Index) สำหรับประเมินความเสี่ยงของฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งในอ่าวไทย โดยบูรณาการความเร็วเชิงวงโคจรของคลื่นจากแบบจำลอง WAM และความเร็วกระแสน้ำจากแบบจำลอง HYCOM ย้อนหลัง 10 ปี (พ.ศ. 2558–2567) ครอบคลุมพื้นที่น้ำตื้นที่มีความลึกไม่เกิน 40 เมตร

ผลการศึกษาพบว่า EV-Index สามารถสะท้อนแรงกระทำรวมจากคลื่นและกระแสน้ำได้อย่างมีความหมายเชิงกายภาพ โดยพื้นที่ส่วนใหญ่ของอ่าวไทยมีลักษณะเป็นระบบที่คลื่นเป็นปัจจัยนำ (wave-dominant regime) โดยเฉพาะในช่วงเหตุการณ์รุนแรง ซึ่งคลื่นมีสัดส่วนเฉลี่ยประมาณร้อยละ 80–85 ของค่า EV ทั้งหมด อย่างไรก็ตาม บางพื้นที่มีลักษณะกึ่งผสมหรือมีการเปลี่ยนแปลงกลไกเด่นภายใต้เงื่อนไขสุดขั้ว

การวิเคราะห์เชิงพื้นที่แสดงให้เห็นการคงอยู่ของพื้นที่เสี่ยงสูงอย่างแนวชายฝั่งด้านตะวันตกตอนกลางถึงตอนล่างของอ่าวไทย โดยเฉพาะบริเวณจังหวัดชุมพร สุราษฎร์ธานี และพื้นที่ต่อเนื่องลงไปทางภาคใต้ตอนล่าง ปรากฏเป็นพื้นที่ที่มีค่า EV สูงอย่างต่อเนื่องทั้งในเชิงค่าเฉลี่ยและค่าสถิติเปอร์เซ็นต์ไทล์ระดับสูง (P90, P95 และ P99) ขณะที่อ่าวไทยตอนบนรูปตัว “ก” มีระดับความเสี่ยงต่ำกว่าอย่างชัดเจนในเชิงฤดูกาล เดือนธันวาคม มกราคม และกุมภาพันธ์เป็นช่วงที่มีค่า EV เฉลี่ยสูงสุด สอดคล้องกับอิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และเหตุการณ์ EV สูงสุด 20 อันดับแรกส่วนใหญ่เกิดในช่วงปลายปีถึงต้นปี ผลการเปรียบเทียบกับเหตุการณ์ความเสียหายจริงพบว่า เหตุการณ์ที่มีแรงกระทำต่อเนื่องหลายชั่วโมงถึงหลายวันมีค่า EV-Index อยู่ในระดับเปอร์เซ็นต์ไทล์สูงมาก และแสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นก่อนเกิดความเสียหาย สะท้อนศักยภาพของดัชนีในการใช้เป็นเครื่องมือเฝ้าระวังเชิงระบบ แม้จะมีข้อจำกัดต่อเหตุการณ์ฉับพลันระยะสั้นบางประเภท

โดยสรุป ดัชนี Exposure Velocity (EV-Index) ที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมในการใช้ประเมินความเสี่ยงเชิงพื้นที่และเชิงฤดูกาลของฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งในอ่าวไทย และสามารถต่อยอดสู่การจัดทำแผนที่ความเสี่ยง การกำหนดระดับการเตือนภัย และการสนับสนุนการบริหารจัดการพื้นที่ชายฝั่งในเชิงนโยบายได้อย่างเป็นระบบ

## ABSTRACT

The Gulf of Thailand is an economically important coastal aquaculture region, yet it is exposed to hydrodynamic forces generated by waves and currents, particularly during the monsoon season. Previous risk assessments based solely on wave parameters may not adequately represent the combined physical forces acting on cage aquaculture structures. This study aims to develop an Exposure Velocity (EV) Index for assessing the risk of coastal aquaculture farms in the Gulf of Thailand by integrating wave orbital velocity derived from the WAM model and current velocity obtained from the HYCOM model over a 10-year period (2015–2024), covering shallow waters with depths of less than 40 meters.

The results indicate that the EV-Index effectively represents the combined hydrodynamic forcing from waves and currents in a physically meaningful manner. Most areas of the Gulf of Thailand exhibit a wave-dominant regime, particularly during high-intensity events, with waves contributing approximately 80–85% of the total EV magnitude. However, certain locations demonstrate mixed regimes or regime shifts under extreme conditions, reflecting spatial variability in hydrodynamic processes.

Spatial analysis reveals persistent high-risk zones along the central to lower western coastline of the Gulf of Thailand, particularly in the Chumphon and Surat Thani provinces and extending further southward. These areas consistently show elevated EV values in both long-term means and high percentile statistics (P90, P95, and P99). In contrast, the upper Gulf (inner gulf region) exhibits substantially lower risk levels. Seasonally, December, January, and February present the highest average EV values, corresponding to the influence of the Northeast Monsoon, with most of the top-20 extreme EV events occurring during late-year to early-year months. Comparison with documented damage events suggests that prolonged hydrodynamic forcing over several hours to days is associated with EV values exceeding high percentile thresholds and showing increasing trends prior to damage occurrence. This demonstrates the potential

of the EV-Index as a systematic monitoring tool, although limitations remain for short-duration impulsive events.

In conclusion, the developed EV-Index is suitable for spatial and seasonal risk assessment of coastal aquaculture farms in the Gulf of Thailand. It provides a scientific basis for risk mapping, threshold-based warning systems, and coastal aquaculture management and policy support in a systematic framework.

## สารบัญ

|  | หน้า      |
|--|-----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย  | ค         |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ   | ง         |
| สารบัญ   | ช         |
| สารบัญตาราง  | ซ         |
| สารบัญภาพ  | ณ         |
| <br>   |           |
| <b>1. บทนำ</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา  | 1         |
| 1.2 วัตถุประสงค์   | 2         |
| 1.3 ขอบเขตของการดำเนินการ  | 2         |
| 1.4 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง   | 3         |
| 1.5 ทฤษฎี และ/หรือแนวความคิดที่นำมาใช้ในการศึกษา                                     | 5         |
| 1.6 วิธีดำเนินการศึกษาโดยสรุป  | 10        |
| 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ  | 12        |
| <b>2. ข้อมูลและวิธีดำเนินการ</b>   | <b>13</b> |
| 2.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา   | 13        |
| 2.2 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา   | 14        |
| 2.3 วิธีการดำเนินการศึกษา  | 16        |
| <b>3. ผลการดำเนินการ</b>   | <b>21</b> |
| 3.1 แผนที่แสดงค่าเฉลี่ยระยะยาวของ EV-Index   | 21        |
| 3.2 แผนที่แสดงค่า EV-Index เฉลี่ยรายเดือน  | 24        |
| 3.3 การแยกวิเคราะห์สัดส่วนคลื่นและกระแสไฟฟ้าต่อค่า EV-Index ในอ่าวไทย                | 28        |
| 3.4 การวิเคราะห์ค่า EV-Index ในลักษณะของเหตุการณ์สุดขีด                              | 31        |
| 3.5 เหตุการณ์ EV-Index สูงสุด 20 อันดับแรกเฉลี่ยทั้งพื้นที่ศึกษา                     | 34        |
| 3.6 การวิเคราะห์เหตุการณ์ EV-Index สูงสุด 20 อันดับแรกและรูปแบบการเกิดซ้ำเชิงพื้นที่ | 39        |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า      |
|---|-----------|
| 3.7 การแบ่งพื้นที่เสี่ยงตามระดับ EV-Index                                 | 41        |
| 3.8 การประเมินความสอดคล้องของค่า EV-Index กับเหตุการณ์รุนแรงที่รายงานจริง | 43        |
| <b>4. สรุปการดำเนินการ</b>  | <b>50</b> |
| 4.1 สรุปผลการดำเนินการ  | 50        |
| 4.2 วิจารณ์ผลการดำเนินการ   | 52        |
| 4.3 ข้อเสนอแนะ  | 55        |
| <b>บรรณานุกรม</b>   | <b>57</b> |

## สารบัญตาราง

|   | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 1 แสดงพิกัดภูมิศาสตร์ของจุดศึกษาทั้ง 7 พื้นที่ (R1–R7) ในอ่าวไทย พร้อม<br>ค่ามัธยฐานของสัดส่วนความเร็วจากคลื่นต่อค่า EV-Index ( $f_w$ ) ในสภาวะ<br>ปกติ และในช่วงเหตุการณ์รุนแรง | 30   |
| ตารางที่ 2 การจัดอันดับเหตุการณ์ที่มีค่า EV-Index เฉลี่ยเชิงพื้นที่สูงสุด 20 อันดับแรก<br>พร้อมสัดส่วนอิทธิพลจากคลื่น (Frac_Uc) และกระแสน้ำ (Frac_Uw)                                     | 34   |
| ตารางที่ 3 รายละเอียดเหตุการณ์ EV-Index สูงสุด 20 อันดับแรก ประกอบด้วยลำดับ<br>เหตุการณ์ วันเวลาเกิดเหตุ พิกัดตำแหน่งกริดที่มีค่า EV สูงสุด และค่า EV ที่<br>ตรวจพบ                       | 39   |
| ตารางที่ 4 สรุปค่าดัชนี EV-Index สูงสุดที่ตรวจพบในช่วงเหตุการณ์เมื่อวันที่ 25 มกราคม<br>2559  | 44   |
| ตารางที่ 5 สรุปค่าดัชนี EV-Index สูงสุดที่ตรวจพบในช่วงเหตุการณ์เมื่อวันที่ 26<br>กุมภาพันธ์ 2559  | 46   |
| ตารางที่ 6 สรุปค่าดัชนี EV-Index สูงสุดที่ตรวจพบในช่วงเหตุการณ์เมื่อวันที่ 16 เมษายน<br>2566  | 47   |

## สารบัญภาพ

|   | หน้า |
|---|------|
| ภาพที่ 1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการอย่างละเอียดของงานวิจัย (Flow Chart)  | 11   |
| ภาพที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยของ EV-Index ในพื้นที่ศึกษา จากข้อมูลย้อนหลังเฉพาะปีที่มีข้อมูลรายเดือนครบถ้วนจำนวน 6 ปี ได้แก่ ปี ค.ศ. 2015 และช่วงปี ค.ศ. 2020–2024   | 22   |
| ภาพที่ 3 กราฟแท่งแสดงค่าเฉลี่ยรายปีของ EV-Index สำหรับปี ค.ศ. 2015 และช่วงปี ค.ศ. 2020–2024   | 23   |
| ภาพที่ 4 ค่า EV-Index เฉลี่ยรายเดือน 12 เดือน (multi-year monthly mean) แสดงลักษณะความเสี่ยงเชิงฤดูกาลภายใต้สถานะเฉลี่ยระยะยาว  | 24   |
| ภาพที่ 5 แสดงค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่รายเดือนของ EV-Index ในพื้นที่ศึกษา จากข้อมูลย้อนหลังหลายปี โดยเรียงลำดับเดือนจากค่ามากที่สุดไปหาน้อยที่สุด  | 28   |
| ภาพที่ 6 แสดงตำแหน่งจุดศึกษาทั้ง 7 พื้นที่ (R1–R7) ในอ่าวไทยที่ใช้ในการวิเคราะห์สัดส่วนความเร็วจากคลื่น ( $U_w$ ) และกระแสน้ำ ( $U_c$ ) ต่อค่า EV-Index โดยพื้นที่สีม่วงแสดงขอบเขตพื้นที่ศึกษาที่ผ่านการคัดกรองข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์             | 29   |
| ภาพที่ 7 แผนภาพกล่องแสดงค่ามัธยฐานและช่วงควอไทล์ของสัดส่วนความเร็วจากคลื่น ( $f_w$ ) ต่อค่า EV-Index ของจุดศึกษาทั้ง 7 พื้นที่ โดยเปรียบเทียบระหว่างสถานะปกติและช่วงเหตุการณ์รุนแรง เพื่อใช้จำแนกลักษณะกลไกหลักที่ควบคุมค่า EV-Index ในแต่ละพื้นที่ | 30   |
| ภาพที่ 8 แผนที่ EV-Index ระดับ (a) P90 (ความเสี่ยงพื้นฐาน) (b) P95 (ความเสี่ยงหลัก) และ (c) P99 (ความเสี่ยงระดับสุดขีด) ในอ่าวไทยช่วงปี 2015–2024 โดยใช้สเกลต่างกันเพื่อการเปรียบเทียบเชิงพื้นที่และความรุนแรง                                      | 33   |
| ภาพที่ 9 การเปรียบเทียบรูปแบบการกระจายเชิงพื้นที่ของค่า EV Index ระหว่างเหตุการณ์รุนแรงลำดับที่ 1 และลำดับที่ 5   | 36   |
| ภาพที่ 10 การเปรียบเทียบรูปแบบเชิงพื้นที่และเชิงเวลาของค่า EV-Index ระหว่างเหตุการณ์รุนแรงลำดับที่ 2 และลำดับที่ 3  | 38   |
| ภาพที่ 11 ตำแหน่งกริดที่มีค่า EV-Index สูงสุดของเหตุการณ์ 20 อันดับแรกในพื้นที่ศึกษา โดยสีของจุดแสดงจำนวนครั้งที่ตำแหน่งดังกล่าวปรากฏอยู่ในกลุ่ม Top-20   | 40   |
| ภาพที่ 12 แผนที่ความเสี่ยง EV-Index ในพื้นที่ศึกษา (2015–2024) แสดง 2 แผง ได้แก่ (ซ้าย) Intensity (P95) และ (ขวา) Hotspot Fraction (Top-20 ภายใต้เหตุการณ์รุนแรง)   | 42   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| ภาพที่ 13 การเปลี่ยนแปลงค่า EV-Index แบบค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ (EV area-mean) ภายใน<br>รัศมี ROI 20 กม. รอบ อ.สิงหนคร ในช่วง $\pm 3$ วันจากวันเกิดเหตุ โดยพื้นที่<br>แรเงาแสดงช่วงเวลาที่มียางานเหตุการณ์จริง  | 44   |
| ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงค่า EV-Index แบบค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ (EV area-mean) ภายใน<br>รัศมี ROI 20 กม. รอบ อ.สิงหนคร ในช่วง $\pm 3$ วันจากวันเกิดเหตุ โดยพื้นที่<br>แรเงาแสดงช่วงเวลาที่มียางานเหตุการณ์จริง  | 46   |
| ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลงค่า EV-Index แบบค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ (EV area-mean) ภายใน<br>รัศมี ROI 20 กม. รอบอ่าวท่าศาลา ในช่วง $\pm 3$ วันจากวันเกิดเหตุ โดยพื้นที่<br>แรเงาแสดงช่วงเวลาที่มียางานเหตุการณ์จริง | 47   |
| ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงค่า EV-Index แบบค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ (EV area-mean) ภายใน<br>รัศมี ROI 20 กม. รอบ อ.ระโนด ในช่วง $\pm 3$ วันจากวันเกิดเหตุ โดยพื้นที่แรเงา<br>แสดงช่วงเวลาที่มียางานเหตุการณ์จริง    | 48   |

## 1. บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

อ่าวไทยเป็นแหล่งเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจและความมั่นคงทางอาหารของประเทศ เนื่องจากมีลักษณะทางภูมิศาสตร์เป็นอ่าวกึ่งปิด ส่งผลให้เกิดการสะสมของสารอาหารในระบบนิเวศทางทะเล ทำให้บริเวณดังกล่าวมีความอุดมสมบูรณ์และเหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำหลากหลายชนิด เช่น ปลา ปู กุ้ง หอยแมลงภู่ และหอยนางรม ฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในพื้นที่อ่าวไทยจึงเป็นแหล่งรายได้ที่สำคัญ ทั้งในด้านการบริโภคภายในประเทศและการส่งออกไปยังต่างประเทศ

รูปแบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งของประเทศไทยส่วนหนึ่งดำเนินการในลักษณะกระชังเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งมักตั้งอยู่ในเขตน้ำตื้นใกล้ชายฝั่ง พื้นที่ดังกล่าวเป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากกระบวนการทางสมุทรศาสตร์ โดยเฉพาะคลื่นลมและกระแสน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ภายใต้อิทธิพลของมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ส่งผลให้ในบางช่วงเวลาของปีเกิดสภาวะคลื่นลมแรงและกระแสน้ำไหลเชี่ยว ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของกระชังเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และนำไปสู่การสูญเสียสัตว์น้ำที่เพาะเลี้ยงไว้เป็นจำนวนมาก

โดยทั่วไป การประเมินความเสี่ยงของฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งมักพิจารณาจากตัวแปรทางคลื่น เช่น ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (Significant Wave Height:  $H_s$ ) เป็นหลัก อย่างไรก็ตาม โครงสร้างของกระชังเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ได้รับอิทธิพลจากคลื่นเพียงอย่างเดียว แต่ยังคงเผชิญกับแรงที่เกิดจากกระแสน้ำที่ไหลผ่านโครงสร้างอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีผลโดยตรงต่อแรงดึง แรงเฉือน และความล้าของวัสดุโครงสร้าง ดังนั้น การใช้ตัวแปรด้านคลื่นเพียงตัวเดียวจึงไม่เพียงพอในการอธิบายสภาพแรงที่กระทำต่อกระชังเลี้ยงสัตว์น้ำในสภาพแวดล้อมจริง โดยเฉพาะในบริเวณน้ำตื้นชายฝั่งอ่าวไทย

จากข้อจำกัดดังกล่าว การศึกษานี้จึงมุ่งพัฒนาดัชนีประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณสำหรับฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง โดยใช้แนวคิดของ Exposure Velocity (EV) ซึ่งเป็นดัชนีที่รวมผลกระทบจากกระบวนการคลื่นทะเลและกระแสน้ำเข้าด้วยกัน เพื่อสะท้อนระดับพลังงานที่โครงสร้างฟาร์มต้องเผชิญจริงในแต่ละช่วงเวลา การคำนวณค่า EV-Index อาศัยข้อมูลคลื่นจากแบบจำลอง WAM และข้อมูลกระแสน้ำจากแบบจำลอง HYCOM ร่วมกับการวิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลังเป็นระยะเวลา 10 ปี ทำให้สามารถประเมินทั้งลักษณะความเสี่ยงเชิงฤดูกาล แนวโน้มระยะยาว และการกระจายตัวของพื้นที่เสี่ยงเชิงพื้นที่ได้อย่างเป็นระบบ

ผลลัพธ์จากการศึกษานี้คาดว่าจะประโยชน์ต่อเกษตรกร หน่วยงานด้านการบริหารจัดการทรัพยากรทางทะเล และหน่วยงานด้านการเตือนภัย โดยสามารถนำไปใช้ในการวางแผนลดความเสี่ยง เช่น การเลือกและจัดสรรพื้นที่ตั้งฟาร์ม การปรับตำแหน่งหรือรูปแบบการวางกระชัง การ

เสริมความแข็งแรงของโครงสร้าง ตลอดจนการพัฒนาาระบบเตือนภัยเชิงรุกเพื่อรองรับสภาวะคลื่นลม และกระแสน้ำที่มีความรุนแรงในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อพัฒนาดัชนี Exposure Velocity (EV-Index) สำหรับการประเมินความเสี่ยงของฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งในอ่าวไทย โดยบูรณาการผลกระทบจากคลื่นทะเลและกระแสน้ำเข้าด้วยกัน เพื่อสะท้อนระดับพลังงานที่โครงสร้างฟาร์มต้องเผชิญจริงในสภาพแวดล้อมทางทะเล

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ลักษณะเชิงสถิติและเชิงพื้นที่ของค่า EV-Index จากข้อมูลคลื่นแบบจำลอง WAM และข้อมูลกระแสน้ำแบบจำลอง HYCOM ย้อนหลัง 10 ปี ครอบคลุมทั้งค่าเฉลี่ย แนวโน้มตามฤดูกาล และค่าความรุนแรงในระดับสุดโต่ง (extreme conditions)

1.2.3 เพื่อระบุช่วงเวลาที่มีความเสี่ยงสูงและพื้นที่เสี่ยงสำคัญต่อฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวางแผนการผลิต การปรับรูปแบบหรือโครงสร้างกระชัง และการลดความสูญเสียจากคลื่นลมและกระแสน้ำที่รุนแรง

1.2.4 เพื่อจัดทำแผนที่ความเสี่ยงเชิงพื้นที่ของฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งอ่าวไทย โดยจำแนกระดับความเสี่ยงออกเป็นหลายระดับ (ต่ำ-ปานกลาง-สูง) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการบริหารจัดการพื้นที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

1.2.5 เพื่อสนับสนุนการพัฒนาาระบบเตือนภัยและการวางนโยบายด้านการจัดการชายฝั่ง และการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำของหน่วยงานภาครัฐ โดยใช้ผลการประเมินความเสี่ยงจาก EV-Index เป็นฐานข้อมูลเชิงวิทยาศาสตร์

## 1.3 ขอบเขตของการดำเนินการ

การศึกษานี้มุ่งเน้นการประเมินความเสี่ยงของฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งในอ่าวไทยโดยใช้ดัชนี Exposure Velocity ซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่บูรณาการอิทธิพลจากคลื่นทะเลและกระแสน้ำ ทั้งนี้ขอบเขตการดำเนินการของงานวิจัยกำหนดไว้ดังต่อไปนี้

ด้านขอบเขตข้อมูลและช่วงเวลา การศึกษาใช้ข้อมูลคลื่นทะเลจากแบบจำลอง WAM และข้อมูลกระแสน้ำจากแบบจำลอง HYCOM ในรูปแบบข้อมูลเชิงเวลาแบบราย 3 ชั่วโมง ครอบคลุมช่วงระยะเวลาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2558–2567 (ค.ศ. 2015–2024) รวมระยะเวลา 10 ปี เพื่อให้สามารถสะท้อนลักษณะความแปรปรวนเชิงฤดูกาล แนวโน้มระยะยาว และเหตุการณ์สุดขีดทางสมุทรศาสตร์ได้อย่างเหมาะสม

ด้านขอบเขตพื้นที่ศึกษา การวิเคราะห์จำกัดเฉพาะพื้นที่ชายฝั่งอ่าวไทย โดยพิจารณาเฉพาะบริเวณที่มีความลึกของน้ำไม่เกิน 40 เมตร ซึ่งเป็นช่วงความลึกที่ฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งมัก

ตั้งอยู่ เช่น กระชังเลี้ยงปลาและฟาร์มหอย และเป็นบริเวณที่โครงสร้างฟาร์มได้รับอิทธิพลจากคลื่นลม และกระแสน้ำโดยตรง ทั้งนี้ พื้นที่นอกเหนือจากขอบเขตดังกล่าวจะไม่ถูกนำมารวมในการวิเคราะห์

ด้านขอบเขตวิธีการวิเคราะห์ ข้อมูลคลื่นและกระแสน้ำที่ได้จะผ่านกระบวนการตรวจสอบคุณภาพข้อมูล การปรับกริดเชิงพื้นที่ให้มีความสอดคล้องกัน และการจัดการข้อมูลที่ขาดหาย เพื่อให้สามารถนำมาคำนวณค่า Exposure Velocity ได้อย่างต่อเนื่องและมีความสม่ำเสมอ ค่า EV จะถูกคำนวณในระดับราย 3 ชั่วโมงตลอดช่วงระยะเวลาศึกษา เพื่อสะท้อนสภาพแรงที่โครงสร้างฟาร์มต้องเผชิญในแต่ละช่วงเวลาอย่างละเอียด

ด้านขอบเขตการวิเคราะห์เชิงสถิติ ค่า EV ที่คำนวณได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติในหลายระดับเวลา ได้แก่ รายวัน รายเดือน และรายปี รวมทั้งการวิเคราะห์ค่าการกระจายทางสถิติ เช่น ค่าเฉลี่ย (mean) ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ระดับสูง (P90 และ P95) และค่าความรุนแรงสูงสุด (extreme values) เพื่อระบุถึงลักษณะความเสี่ยงโดยทั่วไปและเหตุการณ์ความเสี่ยงสูงที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ด้านขอบเขตการวิเคราะห์เหตุการณ์สุดขีด การศึกษานี้จะนำเหตุการณ์ที่มีค่า EV อยู่ในระดับสูงมาพิจารณาเชิงลึก และเปรียบเทียบกับเหตุการณ์จริงที่มีรายงานความเสียหายจากคลื่นลม และกระแสน้ำในพื้นที่ศึกษา เพื่อประเมินความสอดคล้องและศักยภาพของดัชนี EV ในการอธิบายและบ่งชี้ความเสี่ยงของฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง

ทั้งนี้ การศึกษามุ่งเน้นการพัฒนาดัชนี EV ในเชิงการประเมินความเสี่ยงเชิงพื้นที่และเชิงเวลา ไม่ครอบคลุมการประเมินความแข็งแรงเชิงวิศวกรรมของโครงสร้างกระชังในรายละเอียดเชิงโครงสร้าง และไม่รวมการวิเคราะห์ผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์โดยตรง

## 1.4 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

### 1.4.1 กรอบแนวคิดการวิเคราะห์ความเสี่ยง (Risk Analysis Framework)

การประเมินความเสี่ยง (Risk Analysis) ในบริบทของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและวิศวกรรมชายฝั่ง มีเป้าหมายสำคัญเพื่อระบุโอกาสในการเกิดความเสียหายและระดับของผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น ภายใต้สภาพแวดล้อมทางทะเลที่มีความผันผวน โดยอาศัยกรอบแนวคิดสากลขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) ความเสี่ยงเกิดจากปฏิสัมพันธ์ขององค์ประกอบหลัก ได้แก่ ภัยอันตราย (Hazard) ซึ่งหมายถึงเหตุการณ์ที่มีศักยภาพในการก่อให้เกิดความเสียหาย, และความเสี่ยง (Risk) ซึ่งประเมินจากผลคูณระหว่างโอกาสเกิด (Likelihood) และความรุนแรงของผลกระทบ (Consequence) การวิเคราะห์ความเสี่ยงจึงเป็นเครื่องมือสำคัญในการจัดลำดับความสำคัญของปัญหาและกำหนดมาตรการจัดการ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อความสูญเสียทางเศรษฐกิจและโครงสร้าง (Arthur et al., 2009)

#### 1.4.2 ผลกระทบของคลื่นและกระแสน้ำต่อโครงสร้างทางทะเลและฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ในบริบทของโครงสร้างทางทะเล ภัยอันตรายทางกายภาพที่สำคัญมักเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics) โดยมีปัจจัยสำคัญได้แก่ คลื่น กระแสน้ำ และระดับความลึกของน้ำ (Buck et al., 2024) ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อความมั่นคงของโครงสร้างและการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำการออกแบบทางวิศวกรรมจำเป็นต้องคำนึงถึงสภาวะสุดขีดเพื่อกำหนดค่าที่ใช้ในการออกแบบที่ปลอดภัยเพียงพอสำหรับระบบยึดโยงและโครงสร้างลอยน้ำ

อย่างไรก็ตาม การประเมินความเสี่ยงโดยพิจารณาปัจจัยคลื่นหรือกระแสน้ำเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ เนื่องจากในความเป็นจริง โครงสร้างต้องเผชิญกับ "ผลรวมของแรงกระทำ" จากทั้งสองปัจจัยพร้อมกัน งานวิจัยของ Liu et al. (2024) ชี้ให้เห็นว่าการตอบสนองเชิงพลวัต (Dynamic response) ของระบบยึดโยงกระชังปลา (Mooring system) จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อคลื่นและกระแสน้ำเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน ซึ่งส่งผลต่อแรงดึงในสายสมอและการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง นอกจากนี้ ในเขตน้ำตื้นหรือพื้นที่หน้าดอน (Shoals) การแตกตัวของคลื่นสามารถก่อให้เกิด "กระแสน้ำที่เกิดจากคลื่น" (Wave-generated currents) ที่มีความรุนแรง ส่งผลให้เกิดการบิดเบี้ยวของรูปทรงกระชัง (Cage deformation) ลดปริมาตรน้ำในกระชัง และเพิ่มความเสี่ยงต่อการตายของปลาเนื่องจากการกระแทกและการขาดออกซิเจน (Abrahamsen et al., 2025)

#### 1.4.3 ดัชนีวัดปริมาณเชิงอุทกพลศาสตร์และบทบาทของดัชนี Exposure Velocity (EV-Index)

จากข้อจำกัดของการใช้ตัวชี้วัดแบบแยกส่วน แนวโน้มของการประเมินความเสี่ยงสมัยใหม่จึงมุ่งเน้นการพัฒนา "ดัชนีการวัดปริมาณเชิงอุทกพลศาสตร์" (Hydrodynamic Exposure Indices) เพื่อระบุระดับพลังงานของพื้นที่ในรูปแบบเชิงปริมาณที่ชัดเจนขึ้น โดยในเอกสารงานวิจัยของ Lojek et al. (2024) เสนอชุดดัชนีที่รวมปัจจัยความสูงคลื่น คาบคลื่น ความเร็วกระแสน้ำ และความลึกเข้าด้วยกัน โดยดัชนีที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพสูง ได้แก่ Exposure Velocity (EV) และ Specific Exposure Energy (SEE) ซึ่งคำนวณจากผลรวมความเร็วและพลังงานจลน์ของมวลน้ำที่กระทำต่อโครงสร้าง (Heasman et al., 2024)

ความสำคัญของดัชนี EV ได้รับการยืนยันผ่านงานวิจัยของ Dewhurst et al. (2025) ซึ่งพบว่าค่าดัชนี EV มีความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear correlation) ที่แข็งแกร่ง ( $R^2=0.69$ ) กับความสามารถในการรับแรงที่โครงสร้างต้องการของฟาร์มสัตว์น้ำชนิดต่างๆ ทั้งหอย สาหร่าย และปลา เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พารามิเตอร์แบบดั้งเดิมอย่างความสูงคลื่นนัยสำคัญ ( $H_s$ ) พบว่า  $H_s$  ไม่สามารถใช้เป็นตัวทำนายภาระแรงที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างทุกประเภทได้อย่างครอบคลุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของฟาร์มหอยและฟาร์มสาหร่ายที่  $H_s$  แทบไม่มีความสัมพันธ์กับแรงกระทำที่โครงสร้างต้องการเลย ( $R^2=0.01$  และ  $0.16$  ตามลำดับ) ดังนั้น การใช้ดัชนี EV ในการศึกษาจึงเป็น

แนวทางที่สอดคล้องกับความก้าวหน้าทางวิชาการระดับสากล และมีความเหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในบริบทของการบริหารจัดการฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งของประเทศไทย โดยสามารถใช้เป็น เกณฑ์เชิงวิทยาศาสตร์ในการคัดเลือกพื้นที่ตั้งฟาร์ม การกำหนดแนวทางการออกแบบ และปรับปรุงโครงสร้างให้สอดคล้องกับระดับพลังงานของพื้นที่ ตลอดจนเป็น เครื่องมือสนับสนุนการประเมินและสื่อสารความเสี่ยง ระหว่างผู้ประกอบการ หน่วยงานกำกับดูแล และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ได้อย่างเป็นระบบและมีประสิทธิภาพ

## 1.5 ทฤษฎี และ/หรือแนวความคิดที่นำมาใช้ในการศึกษา

### 1.5.1 ดัชนี Exposure Velocity

Exposure Velocity (EV) เป็นดัชนีเชิงอุทกพลศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้เป็นตัวแทนเชิงปริมาณของ “ระดับการเปิดรับพลังงาน” (hydrodynamic exposure) ที่โครงสร้างหรือพื้นที่หนึ่งต้องเผชิญจากการเคลื่อนที่ของมวลน้ำในทะเล โดยบูรณาการอิทธิพลจากทั้ง คลื่นทะเล และ กระแสน้ำ เข้าด้วยกันในรูปของความเร็วที่มีผลต่อแรงกระทำต่อโครงสร้าง

แนวคิดของ EV ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างทางทะเลและฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง ไม่ได้เกิดจากอิทธิพลของคลื่นหรือกระแสน้ำเพียงปัจจัยเดียว แต่เกิดจาก “ผลรวมของการเคลื่อนที่ของน้ำ” ที่โครงสร้างต้องเผชิญ ทั้งในช่วงสภาวะปกติและช่วงเหตุการณ์รุนแรง ดังนั้น EV จึงถูกใช้เป็นตัวชี้วัดที่สะท้อนระดับความเสี่ยงเชิงกายภาพได้เหมาะสมกว่าการใช้ตัวแปรเดียว

#### 1.5.1.1 การคำนวณ EV-Index

ในการศึกษานี้ ค่า Exposure Velocity (EV) ถูกคำนวณจากผลรวมของความเร็วกระแสน้ำและความเร็วการเคลื่อนที่เชิงวงโคจรของคลื่น โดยกำหนดนิยามดังสมการ

$$U_{EV} = U_c + U_w$$

โดยที่

- $U_{EV}$  คือ ค่า Exposure Velocity (m/s)
- $U_c$  คือ ขนาดความเร็วของกระแสน้ำ (current velocity magnitude)
- $U_w$  คือ ขนาดความเร็วเชิงวงโคจรของคลื่น (wave orbital velocity)

สมการดังกล่าวสะท้อนแนวคิดเชิงฟิสิกส์ว่า โครงสร้างเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งต้องเผชิญกับแรงจากการไหลของน้ำทั้งสองส่วนพร้อมกัน และแรงรวมที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของความเร็วรวมดังกล่าว ค่า EV ที่ได้จึงสามารถใช้เป็นตัวแทนของระดับพลังงานและแรงกระทำที่โครงสร้างต้องรับในแต่ละช่วงเวลา

### 1.5.1.2 การคำนวณค่าความเร็วเชิงวงโคจร (Orbital velocity) ของคลื่น

ความเร็วเชิงวงโคจรของคลื่น ( $U_w$ ) ถูกคำนวณจากทฤษฎีคลื่นเชิงเส้น (Linear wave theory) ซึ่งอธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำภายใต้อิทธิพลของคลื่นทะเล โดยในการศึกษานี้ ใช้ค่าความสูงคลื่นนัยสำคัญ ( $H_S$ ) และคาบคลื่นสูงสุด ( $T_p$ ) เป็นตัวแปรตั้งต้น ซึ่งความเร็วเชิงวงโคจรของคลื่นที่ระดับความลึก  $z$  จะถูกคำนวณจากสมการ

$$U_w(z) = \frac{\pi H_S}{T_p} \cdot \frac{\cosh(k(h-z))}{\sinh(kh)}$$

โดยที่

- $k$  คือ wave number ซึ่งคำนวณจากความสัมพันธ์การกระจายคลื่น (dispersion relation)
- $h$  คือ ความลึกของน้ำ
- $z$  คือ ระดับความลึกที่พิจารณา (เป็นค่าลบเมื่อวัดจากผิวน้ำลงด้านล่าง)
- **ความถี่เชิงมุมของคลื่น ( $\omega$ ):** สามารถคำนวณจากคาบคลื่นตามสมการดังนี้

$$\omega = 2\pi/T_p$$

ซึ่งความถี่เชิงมุมนี้จะถูกใช้เป็นตัวแปรหลักในการประมาณค่า wave number และการคำนวณการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำภายใต้คลื่น

- **ค่า wave number ( $k$ ):** เนื่องจากสมการความสัมพันธ์การกระจายคลื่น (dispersion relation)

$$\omega^2 = gk \tanh(kh)$$

ไม่สามารถแก้ในรูปแบบ closed-form ได้โดยตรง การศึกษานี้จึงใช้วิธีประมาณค่า  $k$  ตามสภาพน้ำลึกและน้ำตื้น โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีหลักดังนี้

1. กรณีน้ำลึก (Deep-water approximation)

ในกรณีน้ำลึก (เมื่อ  $kh \gg 1$ ) ค่า wave number ถูกประมาณจากสมการ

$$k_{\text{deep}} = \frac{\omega^2}{g}$$

2. กรณีน้ำตื้น (Shallow-water approximation)

ในกรณีน้ำตื้น (เมื่อ  $kh \ll 1$ ) ค่า wave number ถูกประมาณจากสมการ

$$k_{\text{shallow}} = \frac{\omega}{\sqrt{gh}}$$

สำหรับเกณฑ์ในการเลือกค่า  $k$  ในการคำนวณ จะทำการประมวลผลเชิงตัวเลข โดยใช้ค่า  $k_{\text{deep}}$  เป็นค่าหลัก และเลือกใช้งานตามเกณฑ์ดังนี้

- หาก  $k_{\text{deep}} \cdot h > 3.0$  ให้ถือว่าเป็นคลื่นน้ำลึก และใช้  $k = k_{\text{deep}}$
- หาก  $k_{\text{deep}} \cdot h < 0.3$  ให้ถือว่าเป็นคลื่นน้ำตื้น และใช้  $k = k_{\text{shallow}}$
- ในช่วงความลึกรอยต่อ (intermediate depth) เลือกใช้  $k_{\text{deep}}$  เพื่อความเสถียรของการคำนวณ

### 1.5.1.3 การคำนวณความเร็วของกระแสน้ำ

ความเร็วของกระแสน้ำ ( $U_c$ ) ถูกคำนวณจากองค์ประกอบความเร็วในแนวแกนตะวันออก-ตะวันตก ( $U_x$ ) และแนวแกนเหนือ-ใต้ ( $U_y$ ) ซึ่งได้จากแบบจำลองกระแสน้ำ HYCOM โดยคำนวณขนาดของเวกเตอร์ความเร็วดังสมการ

$$U_c = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}$$

ค่าความเร็วกระแสน้ำที่ได้สะท้อนความแรงของการไหลของน้ำในแนวนอน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อแรงดึง แรงเฉือน และการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ รวมถึงระบบยึดโยงกระชังในบริเวณชายฝั่ง

### 1.5.1.4 การกำหนดระดับความลึกของค่า EV ที่จะคำนวณ

ในการศึกษาี้ การประเมินความเสี่ยงเชิงกายภาพใช้ดัชนี Exposure Velocity at Reference Depth (EVRD) ซึ่งคำนวณที่ระดับความลึกมาตรฐาน 5 เมตร จากผิวน้ำ เพื่อใช้เป็นเกณฑ์กลางในการเปรียบเทียบระดับพลังงานของพื้นที่ (Site exposure) โดยไม่ขึ้นกับชนิดของโครงสร้าง เหตุผลที่เลือกระดับความลึก 5 เมตร เนื่องจากการประมาณค่าเฉลี่ยของความเร็วรวม (กระแสน้ำและคลื่น) ที่กระทำตลอดช่วงความลึกของโครงสร้างทั่วไปขนาด 10 เมตร ซึ่งครอบคลุมระบบโครงสร้างหลักของฟาร์มส่วนใหญ่ นอกจากนี้ ระดับความลึกดังกล่าวยังเป็นช่วงที่อิทธิพลของความเร็วเชิงวงโคจรของคลื่น ( $uw$ ) และกระแสน้ำ ( $U_c$ ) ยังคงมีความรุนแรงและส่งผลต่อแรงกระทำต่อโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตาม สำหรับการคำนวณค่า Exposure Velocity (EV) เพื่อการออกแบบโครงสร้างเฉพาะทางนั้น ในงานวิจัยของ Dewhurst et al. (2025) ระบุว่าควรคำนวณที่ระดับความลึกซึ่งเป็นตัวแทนของโครงสร้างนั้นๆ โดยเฉพาะ ได้แก่

- กระชังปลา (Finfish): คำนวณที่ความลึก 3 เมตร (โดยอ้างอิงจากจุดกึ่งกลางของกระชังมาตรฐานที่ลึก 6 เมตร)

- ฟาร์มสาหร่าย (Macroalgae): จำนวนที่ความลึก 2 เมตร ซึ่งเป็นระดับความลึกติดตั้งของเชือกเลี้ยง (Growline)
- ฟาร์มหอย (Shellfish): จำนวนที่ระดับความลึกของเชือกประธาน (Backbone depth) ซึ่งแตกต่างกันไปตามการออกแบบ

แม้การคำนวณตามความลึกเฉพาะเจาะจงจะให้ค่าความสัมพันธ์กับแรงกระทำได้แม่นยำที่สุด ( $R^2=0.69$ ) แต่การใช้ค่าที่ระดับ 5 เมตร (EVRD) ก็ได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิภาพเพียงพอในการทำนายความต้องการความแข็งแรงของโครงสร้าง ( $R^2=0.61$ ) และเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการประเมินความเสี่ยงและการสื่อสารข้อมูลในเชิงปฏิบัติเมื่อต้องเปรียบเทียบพื้นที่หลายแห่งที่มีลักษณะต่างกัน

### 1.5.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิติในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายลักษณะการกระจาย ความแปรปรวน และระดับความรุนแรงของค่า Exposure Velocity (EV) ทั้งในเชิงเวลาและเชิงพื้นที่ โดยอาศัยข้อมูล EV ราย 3 ชั่วโมง ย้อนหลังช่วงปี พ.ศ. 2558–2567 (ค.ศ. 2015–2024) ในพื้นที่ชายฝั่งอ่าวไทยที่มีความลึกของน้ำไม่เกิน 40 เมตร เทคนิคการวิเคราะห์ที่ใช้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

#### 1.5.2.1 การวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics)

ค่า EV ถูกนำมาคำนวณสถิติเชิงพรรณนาเพื่ออธิบายลักษณะทั่วไปของข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าสูงสุด (Maximum) และค่าต่ำสุด (Minimum) ในระดับรายวัน รายเดือน และรายปี เพื่อแสดงระดับการเปิดรับพลังงานจากคลื่นและกระแสน้ำในแต่ละช่วงเวลา สถิติเหล่านี้ช่วยให้เห็นภาพรวมของความรุนแรงโดยเฉลี่ยและการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของความเสี่ยงในพื้นที่ศึกษา

$$\overline{EV} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N EV_i$$

#### 1.5.2.2 การวิเคราะห์การกระจายตัวเชิงเวลา (Temporal Analysis)

ดำเนินการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่า EV ในเชิงเวลา เพื่อศึกษาลักษณะความแปรปรวนระยะสั้นและระยะยาว โดยพิจารณาแนวโน้มรายเดือน รายฤดูกาล และรายปี รวมถึงการเปรียบเทียบช่วงฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ เพื่อระบุช่วงเวลาที่มียกระดับความเสี่ยงสูงเด่นชัด

### 1.5.2.3 การวิเคราะห์ค่าสถิติส่วนปลายของการแจกแจง (Extreme Value-related Statistics)

เพื่อประเมินความเสี่ยงจากสภาวะรุนแรง ค่า EV ถูกนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติในส่วนปลายของการแจกแจง โดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ระดับสูง ได้แก่ P90 และ P95 ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของระดับการเปิดรับพลังงานที่สูงกว่าค่าสภาวะทั่วไป และเหมาะสมต่อการประเมินความเสี่ยงเชิงเหตุการณ์ (event-based risk) โดยไม่อ่อนไหวต่อค่าผิดปกติ (outliers) มากเกินไป

$$P_p(EV) = \inf\{x: F_{EV}(x) \geq p\}$$

### 1.5.2.4 การวิเคราะห์เหตุการณ์สุดขีด (Extreme Event Analysis)

ดำเนินการคัดเลือกเหตุการณ์ที่มีค่า EV สูงสุดในแต่ละพื้นที่และช่วงเวลา โดยพิจารณาทั้งค่าสูงสุดรายจุด (Peak EV) และค่าเฉลี่ยของเหตุการณ์รุนแรง (Top-N events) เพื่อศึกษาลักษณะความรุนแรงและความถี่ของเหตุการณ์สุดขีด การวิเคราะห์นี้ช่วยให้สามารถเชื่อมโยงค่า EV กับเหตุการณ์คลื่นลมและกระแสน้ำรุนแรงที่เกิดขึ้นจริงได้

$$EV_{\text{Top-N}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N EV_{(i)}$$

### 1.5.2.5 การวิเคราะห์ความถี่และโอกาสเกิด (Frequency and Likelihood Analysis)

ค่า EV ถูกนำมาวิเคราะห์ความถี่ของการเกินเกณฑ์ (threshold exceedance) โดยใช้ค่า P90 และ P95 เป็นเกณฑ์อ้างอิง เพื่อคำนวณสัดส่วนของช่วงเวลาที่พื้นที่หนึ่ง ๆ ต้องเผชิญกับสภาวะที่มีความเสี่ยงสูง การวิเคราะห์นี้ถูกใช้เป็นตัวแทนของ “โอกาสเกิด (Likelihood)” ในกรอบการประเมินความเสี่ยง

$$L = \frac{n(EV > T)}{N}$$

### 1.5.2.6 การวิเคราะห์เชิงพื้นที่และการจัดระดับความเสี่ยง (Spatial Statistical Analysis)

นำผลการวิเคราะห์ทางสถิติมาจัดทำแผนที่การกระจายตัวของค่า EV และสถิติที่เกี่ยวข้อง เช่น ค่าเฉลี่ย ค่า P95 และความถี่การเกินเกณฑ์ เพื่อระบุพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงเชิงพื้นที่ (hotspots) และจัดระดับความเสี่ยงในรูปแบบต่ำ ปานกลาง และสูง ซึ่งสามารถนำไปใช้สนับสนุนการวางแผนจัดการฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งได้

### 1.5.2.7 การเปรียบเทียบกับเหตุการณ์จริง (Event Validation)

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่า EV ถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลเหตุการณ์คลื่นลมและกระแสน้ำรุนแรงที่เกิดขึ้นจริงในอดีต เพื่อประเมินความสอดคล้องและศักยภาพของดัชนี EV ในการใช้เป็นตัวชี้วัดความเสี่ยงเชิงปฏิบัติการ

### 1.6 วิธีดำเนินการศึกษาโดยสรุป

การศึกษานี้มุ่งพัฒนาดัชนี Exposure Velocity (EV) เพื่อประเมินความเสี่ยงของฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งในอ่าวไทย โดยบูรณาการข้อมูลคลื่นทะเลและกระแสน้ำในเชิงเวลาและเชิงพื้นที่ กระบวนการดำเนินการศึกษาสรุปได้ดังนี้

1.6.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดัชนี Exposure Velocity (EV) รวมถึงแนวคิดวิธีการคำนวณ และเกณฑ์การประเมินความเสี่ยงที่ใช้ในงานด้านคลื่นทะเล กระแสน้ำ และการประเมินความเสี่ยงของโครงสร้างชายฝั่งและฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

1.6.2 การรวบรวมและเตรียมข้อมูล โดยใช้ข้อมูลคลื่นทะเลจากแบบจำลอง WAM และข้อมูลกระแสน้ำจากแบบจำลอง HYCOM ในรูปแบบราย 3 ชั่วโมง ครอบคลุมช่วงปี พ.ศ. 2558–2567 (ค.ศ. 2015–2024) รวมระยะเวลา 10 ปี โดยดำเนินการตรวจสอบความครบถ้วนและความสอดคล้องเชิงเวลา ก่อนการวิเคราะห์

1.6.3 การกำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษาและการปรับกริดข้อมูล จำกัดพื้นที่ศึกษาเฉพาะบริเวณชายฝั่งอ่าวไทยที่มีความลึกของน้ำไม่เกิน 40 เมตร และดำเนินการปรับกริดเชิงพื้นที่ของข้อมูลจากทั้งสองแบบจำลองให้มีความสอดคล้องกัน เพื่อให้สามารถใช้ข้อมูลร่วมกันได้อย่างถูกต้อง

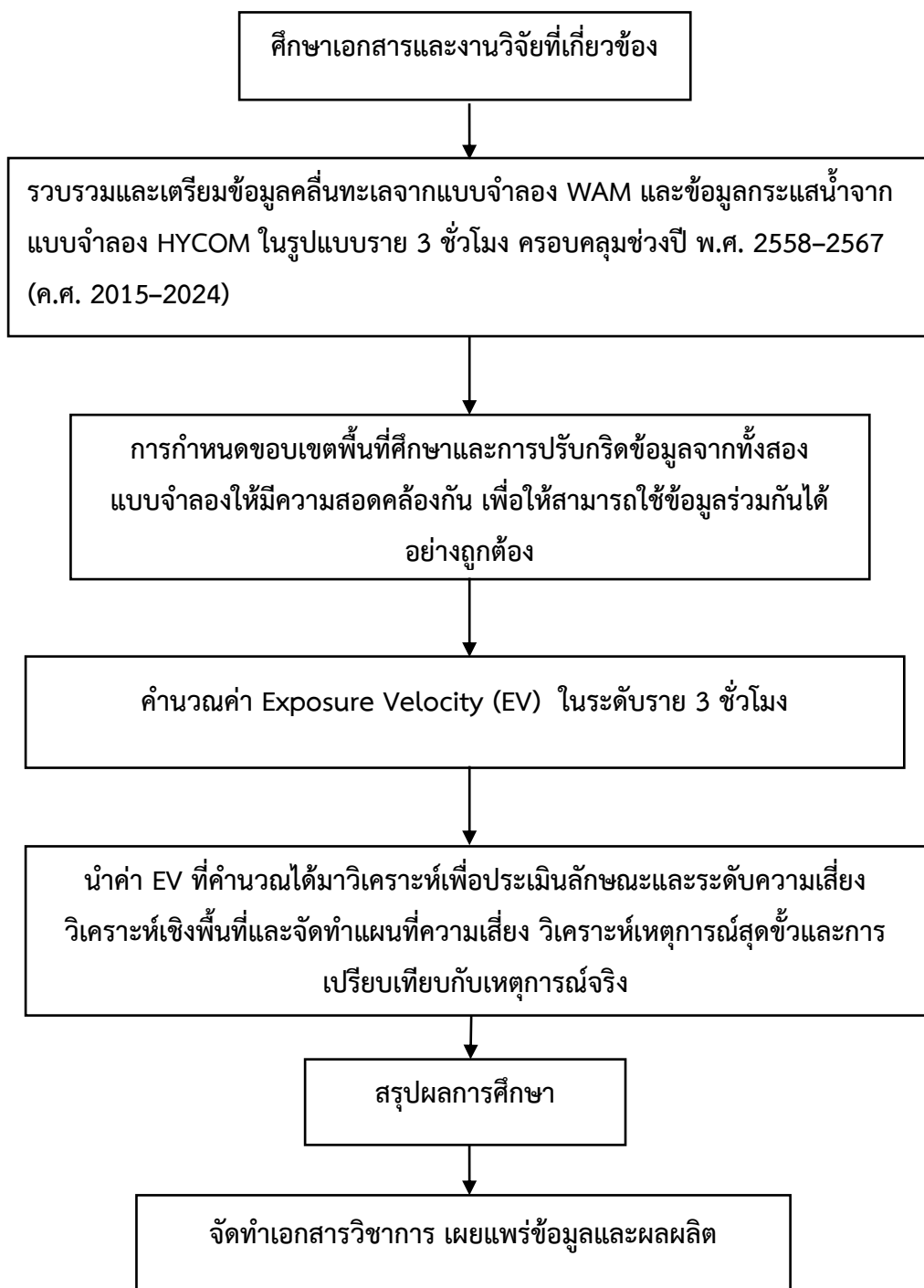
1.6.4 การคำนวณค่า EV ในระดับราย 3 ชั่วโมง โดยบูรณาการอิทธิพลจากคลื่นทะเลและกระแสน้ำ เพื่อสะท้อนระดับพลังงานที่โครงสร้างฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำต้องเผชิญในแต่ละช่วงเวลา

1.6.5 การวิเคราะห์เชิงเวลาและเชิงสถิติ นำค่า EV ที่คำนวณได้มาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยรายเดือน และรายปี รวมทั้งวิเคราะห์ค่าทางสถิติ เช่น ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ระดับสูง (P90, P95 และ P99) เพื่อประเมินลักษณะและระดับความเสี่ยง

1.6.6 การวิเคราะห์เชิงพื้นที่และการจัดทำแผนที่ความเสี่ยง จัดทำแผนที่การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของค่า EV และจำแนกระดับความเสี่ยงออกเป็นหลายระดับ เพื่อระบุพื้นที่เสี่ยงสำคัญสำหรับฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งอ่าวไทย

1.6.7 การวิเคราะห์เหตุการณ์สุดขีดและการเปรียบเทียบกับเหตุการณ์จริง วิเคราะห์เหตุการณ์ที่มีค่า EV อยู่ในระดับสูงสุด และเปรียบเทียบกับเหตุการณ์ความเสียหายจริงจากคลื่นลมและกระแสน้ำ เพื่อประเมินความสอดคล้องและศักยภาพของดัชนี EV ในการบ่งชี้ความเสี่ยง

1.6.8 สรุปผลการศึกษาและเผยแพร่ข้อมูลผ่านช่องทางโซเชียลมีเดียต่าง ๆ ของส่วน  
 อนุรักษ์วิทยาเกษตร เพื่อสนับสนุนการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์  
 โดยมีแผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการอย่างละเอียดของการศึกษานี้ (Flow Chart)

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้ดัชนี Exposure Velocity (EV-Index) ที่ได้รับการพัฒนาและประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับบริบทของฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งในอ่าวไทย ซึ่งสามารถสะท้อนระดับความเสี่ยงจากคลื่นทะเลและกระแสน้ำได้อย่างเป็นรูปธรรม

1.7.2 ได้ชุดข้อมูลค่า EV ราย 3 ชั่วโมง ย้อนหลัง 10 ปี สำหรับพื้นที่ชายฝั่งอ่าวไทย ซึ่งสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลด้านความเสี่ยงทางสมุทรศาสตร์สำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระยะยาว

1.7.3 ได้ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติและเชิงพื้นที่ที่แสดงถึงช่วงเวลาที่มีความเสี่ยงสูง แนวโน้มตามฤดูกาล และพื้นที่เสี่ยงสำคัญ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประกอบการวางแผนการจัดการฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้อย่างเหมาะสม

1.7.4 ได้แผนที่ความเสี่ยงของฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งอ่าวไทย ที่สามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจของหน่วยงานภาครัฐในการกำหนดพื้นที่ที่เหมาะสม การบริหารจัดการชายฝั่ง และการออกประกาศเตือนภัยเชิงรุก

1.7.5 ช่วยลดความสูญเสียต่อโครงสร้างกระชังและสัตว์น้ำที่เพาะเลี้ยง จากผลกระทบของคลื่นลมและกระแสน้ำรุนแรง โดยสนับสนุนการปรับตำแหน่งฟาร์ม การเสริมความแข็งแรงของโครงสร้าง และการวางแผนการผลิตให้สอดคล้องกับสภาพอากาศและทะเล

1.7.6 สนับสนุนการพัฒนางานด้านอุตุนิยามวิทยาเกษตรและสมุทรศาสตร์ประยุกต์ของประเทศ โดยสร้างองค์ความรู้ใหม่ด้านการประเมินความเสี่ยงจาก Exposure Velocity สำหรับฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งยังมีการศึกษาค่อนข้างจำกัดในประเทศไทย

## 2. ข้อมูลและวิธีดำเนินการ

การศึกษาครั้งนี้ดำเนินการภายใต้กระบวนการวิเคราะห์ที่เป็นระบบ ครอบคลุมตั้งแต่การรวบรวมข้อมูลจากแบบจำลองทางสมุทรศาสตร์ การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพข้อมูล การประมวลผลเชิงตัวเลข ตลอดจนการวิเคราะห์ทางสถิติและการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการประเมินลักษณะและรูปแบบการกระจายของดัชนีความเสี่ยงด้านพลังงานคลื่นและกระแสน้ำ (Exposure Velocity Index) ในพื้นที่อ่าวไทย รายละเอียดเกี่ยวกับแหล่งที่มาของข้อมูลและระเบียบวิธีดำเนินการวิจัยแสดงไว้ในลำดับถัดไป

### 2.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาครั้งนี้ครอบคลุมบริเวณอ่าวไทย ในช่วงพิกัดละติจูด  $5^{\circ}\text{N}$ – $15^{\circ}\text{N}$  และลองจิจูด  $99^{\circ}\text{E}$ – $103^{\circ}\text{E}$  ซึ่งเป็นบริเวณทะเลชายฝั่งและไหล่ทวีปที่มีลักษณะเป็นน้ำตื้นในพื้นที่ส่วนใหญ่ โดยในการศึกษานี้ได้คัดเลือกเฉพาะพื้นที่ที่มีความลึกของน้ำ ไม่เกิน 40 เมตร เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของพื้นที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งและกิจกรรมทางทะเลที่มีความเปราะบางต่อพลังงานจากคลื่นและกระแสน้ำ

ลักษณะภูมิประเทศใต้น้ำของอ่าวไทยตอนในและตอนกลางมีความลาดชันต่ำ ความลึกเพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป ส่งผลให้กระบวนการเปลี่ยนแปลงของคลื่นจากน้ำลึกสู่ตื้น (wave transformation) รวมถึงอิทธิพลของกระแสน้ำผิวหน้ามีบทบาทสำคัญต่อระดับพลังงานที่มากกระทำต่อโครงสร้างและระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ นอกจากนี้ พื้นที่ดังกล่าวยังได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตามฤดูกาล ทำให้รูปแบบของคลื่นและกระแสน้ำมีความแปรปรวนทั้งในเชิงเวลาและเชิงพื้นที่

พื้นที่ศึกษาในอ่าวไทยเป็นบริเวณที่มีกิจกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง เช่น กระชังเลี้ยงปลาและฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทะเล ซึ่งมีความอ่อนไหวต่อแรงกระทำจากคลื่นและกระแสน้ำมากกว่าพื้นที่น้ำลึกหรือทะเลเปิด พื้นที่ดังกล่าวมีความสำคัญทั้งในเชิงปฏิบัติและเชิงวิชาการ กล่าวคือ เป็นฐานการผลิตด้านการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีบทบาทต่อความมั่นคงทางเศรษฐกิจและอาหารของประเทศ และในขณะเดียวกัน อ่าวไทยยังเป็นแอ่งทะเลกึ่งปิดที่มีพลวัตของคลื่นและกระแสน้ำในสภาพน้ำตื้น เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ดัชนี EV เพื่อประเมินความเสี่ยงด้านพลังงานทะเลในบริบทที่การพิจารณาค่าความสูงคลื่นเพียงอย่างเดียวอาจไม่สะท้อนผลกระทบที่เกิดขึ้นได้อย่างครบถ้วน

## 2.2 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

### 2.2.1 ข้อมูลคลื่นทะเล

ข้อมูลคลื่นทะเลที่ใช้ในการศึกษานี้ได้มาจากแบบจำลองคลื่นทะเล WAM (Wave Model) ซึ่งดำเนินการโดย ศูนย์อุตุวิทยมหาสมุทรและกรมอุตุวิทยมหาสมุทร แบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบจำลองเชิงฟิสิกส์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์และพยากรณ์ลักษณะคลื่นทะเลในระดับปฏิบัติการ โดยสามารถอธิบายการพัฒนา การแพร่กระจาย และการสลายตัวของพลังงานคลื่นภายใต้อิทธิพลของลมและสภาพแวดล้อมทางทะเลได้อย่างเหมาะสม ซึ่งมีการพัฒนาและอธิบายไว้ในเอกสารต้นแบบของแบบจำลอง (Günther et al., 1992)

ตัวแปรคลื่นทะเลที่นำมาใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (Significant Wave Height:  $H_s$ ) และ คาบคลื่นสูงสุด (Peak Wave Period:  $T_p$ ) ซึ่งเป็นตัวแปรหลักในการสะท้อนระดับพลังงานของคลื่นที่ส่งผลต่อโครงสร้างของกระชังเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง ข้อมูลคลื่นมีความละเอียดเชิงพื้นที่ในแนวแกน  $x$  และแนวแกน  $y$  เท่ากับ 0.083 องศา และมีความละเอียดเชิงเวลาทุก 3 ชั่วโมง ครอบคลุมช่วงเวลาย้อนหลัง 10 ปี ระหว่าง พ.ศ. 2558–2567 (ค.ศ. 2015–2024) เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ลักษณะเฉลี่ย แนวโน้ม และเหตุการณ์สุดขีดของคลื่นทะเลได้อย่างครอบคลุม

ในด้านหน่วยของข้อมูล พบว่า ค่าความสูงคลื่น  $H_s$  จากแบบจำลอง WAM ถูกจัดเก็บในหน่วยเดซิเมตร (decimeter) ซึ่งได้ทำการแปลงเป็นหน่วยเมตร (meter) ก่อนนำไปใช้ในการคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์

$$1 \text{ dm} = 0.1 \text{ m}$$

ขณะที่ ค่าคาบคลื่นสูงสุด  $T_p$  ถูกจัดเก็บในหน่วยมิลลิวินาที (millisecond) จึงได้ทำการแปลงเป็นหน่วยวินาที (second) ตามความสัมพันธ์

$$1 \text{ ms} = 0.001 \text{ s}$$

เพื่อให้หน่วยของตัวแปรมีความสอดคล้องกับสมการทางฟิสิกส์ที่ใช้ในการคำนวณความเร็วอนุภาคคลื่นและดัชนี Exposure Velocity (EV-Index) ในขั้นตอนถัดไป การตรวจสอบและแปลงหน่วยดังกล่าวเป็นขั้นตอนสำคัญเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณและเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์

### 2.2.2 ข้อมูลกระแสน้ำ

ข้อมูลกระแสน้ำที่ใช้ในการศึกษานี้ได้มาจากแบบจำลองสมุทรศาสตร์ HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) ซึ่งเผยแพร่ผ่านระบบให้บริการข้อมูลแบบ THREDDS/OPeNDAP โดยโครงการ HYCOM Consortium

การศึกษานี้ได้รวบรวมข้อมูลองค์ประกอบความเร็วกระแสน้ำในแนวตะวันออก-ตะวันตก (u) และแนวเหนือ-ใต้ (v) แยกตามตัวแปร จากนั้นนำมารวมเป็นชุดข้อมูลเดียวเพื่อให้สามารถประมวลผลรวมกันได้ โดยกำหนดขอบเขตพื้นที่ที่ดาวนโพลดให้อยู่ในช่วงละติจูด  $5^{\circ}\text{N}$ – $15^{\circ}\text{N}$  และลองจิจูด  $95^{\circ}\text{E}$ – $105^{\circ}\text{E}$  ครอบคลุมพื้นที่อ่าวไทยและบริเวณโดยรอบที่อาจมีอิทธิพลต่อการไหลเวียนของกระแสน้ำในพื้นที่ศึกษา

เนื่องจากข้อมูลกระแสน้ำจาก HYCOM ถูกจัดเก็บในหลายระดับความลึก และไม่มียกระดับที่ตรงกับความลึก 5 เมตรโดยตรง การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการประมาณค่ากระแสน้ำที่ระดับความลึก 5 เมตรจากผิวน้ำ โดยเลือกใช้ข้อมูลกระแสน้ำจากสองระดับความลึกที่อยู่ใกล้เคียง ได้แก่ 4 เมตร และ 6 เมตร และทำการคำนวณค่าเฉลี่ยเชิงแนวตั้ง (vertical averaging) ระหว่างสองระดับดังกล่าว เพื่อใช้เป็นตัวแทนของความเร็วกระแสน้ำที่ระดับอ้างอิง 5 เมตร วิธีการนี้ช่วยลดความไม่แน่นอนจากการใช้ค่ากระแสน้ำเพียงระดับเดียว และเหมาะสมกับการประเมินแรงกระทำที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างกระชังเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง

ข้อมูลกระแสน้ำที่ผ่านการประมวลผลแล้วถูกจัดเก็บในรูปแบบรายเดือน โดยรักษาความละเอียดเชิงเวลาให้สอดคล้องกับข้อมูลต้นทาง และมีการตรวจสอบความต่อเนื่องของข้อมูลในแต่ละช่วงเวลา ก่อนนำไปใช้ในการปรับบริดเชิงพื้นที่ให้สอดคล้องกับข้อมูลคลื่นทะเลจากแบบจำลอง WAM และการคำนวณค่าความเร็วกระแสน้ำรวม เพื่อใช้ร่วมกับข้อมูลคลื่นทะเลในการประเมินค่า EV ในขั้นตอนถัดไป

### 2.2.3 ข้อมูลความลึกน้ำ

ข้อมูลความลึกน้ำที่ใช้ในการศึกษานี้ได้มาจากชุดข้อมูล ETOPO5 ซึ่งเป็นฐานข้อมูลความสูง-ความลึกของพื้นผิวโลกและพื้นทะเลในระดับโลก พัฒนาโดย NOAA โดยข้อมูลดังกล่าวครอบคลุมทั้งพื้นที่บกและทะเลในระบบพิกัดภูมิศาสตร์ และถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานสมุทรศาสตร์และการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ทางทะเล นอกจากนี้ ชุดข้อมูล ETOPO5 ยังเป็นฐานข้อมูลความลึกน้ำทะเลเดียวกับที่ใช้ในแบบจำลองคลื่นทะเล WAM ของศูนย์อุตุนิยมวิทยาทะเลในปัจจุบัน

ข้อมูล ETOPO5 มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 5 ลิปดา (5 arc-minutes) หรือประมาณ 9–10 กิโลเมตร (ขึ้นอยู่กับละติจูด) ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเชิงภูมิประเทศทะเล (background bathymetry) ในการจำแนกขอบเขตพื้นที่น้ำตื้นและน้ำลึกในระดับภูมิภาค ใน การศึกษานี้ ข้อมูลความลึกน้ำถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษาเชิงฟิสิกส์ และสนับสนุนการคัดเลือกพื้นที่ที่มีความเหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง

เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการประเมินความเสี่ยงด้านพลังงานทะเลต่อโครงสร้างกระชังเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ได้กำหนดเกณฑ์การคัดเลือกเฉพาะพื้นที่น้ำตื้นที่มีความลึกไม่เกิน 40 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง โดยอาศัยข้อมูล ETOPO5 เป็นตัวกรองเชิงพื้นที่ (spatial

mask) พื้นที่ที่มีความลึกมากกว่าเกณฑ์ดังกล่าวจะถูกตัดออกจากการวิเคราะห์ เนื่องจากโดยทั่วไปกิจกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งและกระชังเลี้ยงปลาแบบลอยน้ำมักตั้งอยู่ในบริเวณน้ำตื้นถึงปานกลาง ซึ่งโครงสร้างมีปฏิสัมพันธ์กับคลื่นและกระแสน้ำอย่างเด่นชัดมากกว่าพื้นที่น้ำลึก

## 2.3 วิธีการดำเนินการศึกษา

### 2.3.1 การเตรียมและประมวลผลข้อมูล (Data Pre-processing)

เพื่อให้ข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ สามารถนำมาวิเคราะห์ร่วมกันได้อย่างถูกต้องและสอดคล้องกัน การศึกษานี้ได้ดำเนินการเตรียมและประมวลผลข้อมูลคลื่นทะเล กระแสน้ำ และความลึกน้ำอย่างเป็นระบบ โดยครอบคลุมขั้นตอนการกำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษา การปรับข้อมูลให้อยู่ในกริดเดียวกัน การจัดการข้อมูลที่ขาดหาย การตัดช่วงเหตุการณ์รุนแรงที่อาจส่งผลกระทบต่อสถิติระยะยาว และการควบคุมคุณภาพข้อมูลก่อนนำไปคำนวณดัชนี Exposure Velocity

#### 2.3.1.1 การตัดขอบเขตพื้นที่ศึกษา (Region of Interest: ROI)

การศึกษานี้กำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษาให้อยู่ในช่วงละติจูด  $5^{\circ}\text{N}$ – $15^{\circ}\text{N}$  และลองจิจูด  $99^{\circ}\text{E}$ – $103^{\circ}\text{E}$  เพื่อครอบคลุมพื้นที่อ่าวไทยที่เป็นบริเวณเป้าหมายของการประเมินความเสี่ยง นอกจากนี้ ยังได้ใช้ข้อมูลความลึกน้ำจาก ETOPO5 เป็นตัวกรองเชิงพื้นที่ โดยคัดเลือกเฉพาะพื้นที่น้ำตื้นที่มีความลึกไม่เกิน 40 เมตร ซึ่งเป็นบริเวณที่กิจกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งและโครงสร้างกระชังมีการกระจุกตัว และมีความอ่อนไหวต่อแรงกระทำจากคลื่นและกระแสน้ำมากกว่าพื้นที่น้ำลึก ทั้งนี้ เพื่อหลีกเลี่ยงการปะปนของข้อมูลจากฝั่งทะเลอันดามันที่อาจอยู่ภายในกรอบพิกัดเดียวกัน ได้มีการใช้เทคนิค flood fill ในการคัดกรองพื้นที่ โดยเริ่มจากบริเวณอ่าวไทยและเชื่อมต่อเฉพาะกริดที่มีการติดต่อกันทางน้ำ (hydrologically connected cells) ส่งผลให้สามารถตัดข้อมูลจากบริเวณฝั่งอันดามันออกจากการวิเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 2.3.1.2 การปรับกริดและการประมาณค่าเชิงพื้นที่ (Regridding and Spatial Interpolation)

เนื่องจากข้อมูลคลื่นทะเลจากแบบจำลอง WAM และข้อมูลกระแสน้ำจากแบบจำลอง HYCOM มีความละเอียดเชิงพื้นที่และโครงสร้างกริดที่แตกต่างกัน การศึกษานี้จึงได้ดำเนินการปรับข้อมูลกระแสน้ำให้อยู่ในกริดเดียวกับข้อมูลคลื่นทะเล โดยทำการประมาณค่าเชิงพื้นที่ (spatial interpolation) จากกริดของ HYCOM ไปยังกริดของ WAM ซึ่งมีความละเอียดเชิงพื้นที่ 0.083 องศา การดำเนินการในลักษณะดังกล่าวช่วยลดความคลาดเคลื่อนเชิงพื้นที่ และทำให้การคำนวณดัชนี EV ซึ่งต้องอาศัยข้อมูลทั้งคลื่นและกระแสน้ำในตำแหน่งเดียวกันมีความถูกต้องและสอดคล้องกันในเชิงกายภาพ

### 2.3.1.3 การจัดการข้อมูลที่ขาดหาย (Missing Data Handling)

ในขั้นตอนการประมวลผลข้อมูล ได้มีการตรวจสอบความครบถ้วนของข้อมูลในเชิงเวลาและเชิงพื้นที่ หากพบช่วงเวลาหรือกริดที่ไม่มีข้อมูลจากแหล่งใดแหล่งหนึ่ง จะไม่นำข้อมูลในช่วงดังกล่าวเข้าสู่กระบวนการคำนวณ เพื่อหลีกเลี่ยงการบิดเบือนค่าทางสถิติ การจัดการข้อมูลที่ขาดหายดำเนินการภายใต้หลักการรักษาความต่อเนื่องของข้อมูลจริง และหลีกเลี่ยงการเติมค่าประมาณที่อาจไม่สะท้อนสภาพแวดล้อมทางทะเลที่แท้จริง

### 2.3.1.4 การตัดช่วงเหตุการณ์พายุ (Storm Window Removal)

เพื่อให้การวิเคราะห์เชิงสถิติสะท้อนลักษณะความเสี่ยงพื้นฐานในระยะยาว (baseline conditions) ของพื้นที่ศึกษา การศึกษานี้ได้ดำเนินการตัดช่วงเวลาที่เกิดเหตุการณ์พายุรุนแรงบางส่วนออกจากชุดข้อมูล โดยกำหนดช่วงเวลาเหตุการณ์พายุ (storm window) ตามข้อมูลเหตุการณ์ที่มีผลกระทบต่อคลื่นและกระแสน้ำอย่างชัดเจน การตัดช่วงเวลาดังกล่าวช่วยลดอิทธิพลของเหตุการณ์เฉพาะหน้าที่อาจครอบงำค่าสถิติ และทำให้ผลการวิเคราะห์ค่าค่าเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ไทล์ของค่า EV สะท้อนลักษณะความเสี่ยงเชิงพื้นที่ได้อย่างเหมาะสมยิ่งขึ้น

### 2.3.1.5 การควบคุมคุณภาพข้อมูล (Quality Control: QC)

ก่อนนำข้อมูลไปใช้ในการคำนวณค่า EV-Index ได้มีการดำเนินการควบคุมคุณภาพข้อมูลในทุกขั้นตอน โดยรวมถึงการตรวจสอบความสอดคล้องของหน่วย การจัดเรียงลำดับเวลา การตรวจสอบค่าผิดปกติ (outliers) และการยืนยันความต่อเนื่องของข้อมูลในแต่ละกริด ข้อมูลที่ไม่ผ่านเกณฑ์การควบคุมคุณภาพจะถูกตัดออกจากการวิเคราะห์ เพื่อให้ผลลัพธ์สุดท้ายมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ในการประเมินความเสี่ยงด้านพลังงานทะเลในพื้นที่อ่าวไทยได้อย่างเหมาะสม

## 2.3.2 การคำนวณดัชนี Exposure Velocity

การคำนวณดัชนี Exposure Velocity (EV-Index) ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินระดับการเปิดรับพลังงานจากคลื่นและกระแสน้ำที่กระทำต่อโครงสร้างกระชังเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง โดยใช้แนวคิดการรวมอิทธิพลของการเคลื่อนที่ของน้ำจากทั้งคลื่นและกระแสน้ำเข้าด้วยกัน ซึ่งรายละเอียดของสมการและหลักการทางฟิสิกส์ที่ใช้ในการคำนวณได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 1 เพื่อหลีกเลี่ยงความซ้ำซ้อน ในส่วนนี้จึงมุ่งเน้นการอธิบายขั้นตอนและกรอบแนวคิดของการคำนวณโดยสังเขป

### 2.3.2.1 การคำนวณความเร็วคลื่น ( $U_w$ )

ความเร็วของการเคลื่อนที่ของน้ำที่เกิดจากคลื่น ( $U_w$ ) ถูกคำนวณจากตัวแปรคลื่นทะเลที่ได้จากแบบจำลอง WAM ได้แก่ ความสูงคลื่นนัยสำคัญ ( $H_s$ ) และคาบคลื่นสูงสุด ( $T_p$ ) โดยการคำนวณอาศัยสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำจากทฤษฎีคลื่น ซึ่งมีการพิจารณาเงื่อนไขน้ำตื้นและน้ำลึกตามลักษณะของพื้นที่ศึกษา

ในการศึกษานี้ ได้กำหนดระดับความลึกอ้างอิงสำหรับการคำนวณ  $U_w$  ให้สอดคล้องกับระดับความลึกที่โครงสร้างกระชังเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีปฏิสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของน้ำ (ระดับอ้างอิง 5 เมตรจากผิวน้ำ) เพื่อให้ค่าความเร็วคลื่นที่ได้สะท้อนแรงกระทำต่อโครงสร้างในเชิงกายภาพได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้ ในขั้นตอนการประมวลผลได้ใช้ เงื่อนไขการทำหน้ากากข้อมูล (mask) เช่นเดียวกับที่ใช้ในโค้ด โดยคำนวณ  $U_w$  เฉพาะกริดที่เป็น “ทะเล” และมีความลึกน้ำมากกว่าหรือเท่ากับระดับอ้างอิง (กล่าวคือ กริดที่มีความลึกน้ำ  $< 5$  เมตรจะถูกกำหนดเป็นค่าว่าง/ไม่นำมาคำนวณ  $U_w$ ) เพื่อหลีกเลี่ยงการคำนวณในที่ระดับอ้างอิงอยู่ต่ำจนไม่สามารถแทนพฤติกรรมของน้ำได้อย่างเหมาะสมรวมถึงหลีกเลี่ยงผลกระทบจากกระบวนการนอกขอบเขตของทฤษฎีคลื่นเชิงเส้น เช่น การแตกตัวของคลื่นในเขตน้ำตื้นมาก นอกจากนี้ ยังใช้หน้ากากพื้นที่ศึกษาเดียวกัน (เช่น การกรองน้ำตื้น  $< 40$  เมตร และการใช้เทคนิค flood fill เพื่อคงไว้เฉพาะกริดที่เชื่อมต่อกันทางน้ำในอ่าวไทย) เพื่อให้ขอบเขตการคำนวณสอดคล้องกับพื้นที่วิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป

### 2.3.2.2 การคำนวณความเร็วกระแสน้ำ ( $U_c$ )

ความเร็วกระแสน้ำ ( $U_c$ ) ได้จากการประมวลผลองค์ประกอบความเร็วกระแสน้ำในแนวตะวันออก-ตะวันตก ( $U$ ) และแนวเหนือ-ใต้ ( $V$ ) ซึ่งได้จากแบบจำลอง HYCOM โดยใช้สมการการรวมเชิงเวกเตอร์เพื่อคำนวณค่าความเร็วรวมของกระแสน้ำ

การศึกษานี้เลือกใช้ค่าความเร็วกระแสน้ำที่ระดับความลึกอ้างอิง 5 เมตรจากผิวน้ำ ซึ่งเป็นระดับความลึกเชิงตัวแทนที่สอดคล้องกับตำแหน่งโดยทั่วไปของโครงสร้างกระชังและระบบยึดโยงในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง ที่ได้รับแรงกระทำจากกระแสน้ำอย่างต่อเนื่อง

### 2.3.2.3 การคำนวณดัชนี Exposure Velocity

ดัชนี Exposure Velocity ถูกคำนวณจากการรวมอิทธิพลของความเร็วคลื่น ( $U_w$ ) และความเร็วกระแสน้ำ ( $U_c$ ) เพื่อสะท้อนระดับพลังงานรวมของการเคลื่อนที่ของน้ำที่กระทำต่อโครงสร้างกระชังเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง โดยใช้สมการรวมที่ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 1

การใช้ค่า EV-Index แทนการพิจารณาค่าความสูงคลื่น ( $H_s$ ) เพียงอย่างเดียว มีข้อได้เปรียบในเชิงกายภาพ โดยเฉพาะในบริบทของพื้นที่น้ำตื้นและบริเวณชายฝั่ง ซึ่งโครงสร้างกระชังไม่ได้รับแรงกระทำจากคลื่นในลักษณะการทรงตัวหรือการลอยตัวเช่นเรือ แต่ได้รับแรงต้านและแรงดึง

จากการเคลื่อนที่ของน้ำอย่างต่อเนื่อง ทั้งจากคลื่นและกระแสน้ำ การรวมองค์ประกอบทั้งสองเข้าด้วยกันในรูปของค่า EV จึงสามารถสะท้อนระดับความเสี่ยงต่อโครงสร้างกระชังได้อย่างเหมาะสมและสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมทางทะเลในพื้นที่ศึกษา

### 2.3.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิติในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายลักษณะเชิงเวลาและเชิงพื้นที่ของค่า EV ในพื้นที่ศึกษา โดยครอบคลุมทั้งพฤติกรรมโดยรวมในระยะยาว ความแปรปรวนตามฤดูกาล และเหตุการณ์ที่อาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อโครงสร้างกระชังเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง การวิเคราะห์ดำเนินการบนชุดข้อมูลที่ผ่านกระบวนการควบคุมคุณภาพและการคัดกรองแล้ว

ทั้งนี้ การศึกษานี้ให้ความสำคัญกับการแยกแยะระหว่างลักษณะความเสี่ยงพื้นฐานในระยะยาว (baseline risk) กับผลกระทบจากเหตุการณ์รุนแรงเฉพาะหน้า (event-driven extremes) โดยเฉพาะเหตุการณ์พายุหมุนเขตร้อน เช่น พายุปาบิก ซึ่งอาจครอบงำค่าทางสถิติหากถูกรวมเข้ากับการวิเคราะห์ระยะยาวโดยตรง จึงได้ดำเนินการตัดช่วงเวลาเหตุการณ์พายุรุนแรง (storm window) ออกจากการคำนวณสถิติพื้นฐาน เพื่อให้ผลลัพธ์สะท้อนลักษณะความเสี่ยงเชิงพื้นที่และเชิงฤดูกาลที่เกิดขึ้นเป็นปกติในระบบชายฝั่ง ทั้งนี้ การตัดช่วงเวลาดังกล่าวมิได้มีวัตถุประสงค์เพื่อละเลยความรุนแรงของเหตุการณ์ แต่เป็นการแยกการวิเคราะห์เชิงพื้นฐานออกจากการวิเคราะห์เหตุการณ์เฉพาะหน้า เพื่อเพิ่มความชัดเจนในการตีความผลลัพธ์ และทำให้การใช้ EV-Index มีความเหมาะสมต่อการประเมินความเสี่ยงในบริบทการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

#### 2.3.3.1 ค่าเฉลี่ยรายเดือนและรายปี

เพื่ออธิบายลักษณะพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงค่า EV-Index ในเชิงเวลา จึงได้ทำการคำนวณค่าเฉลี่ยรายเดือนและรายปีของค่า EV-Index ในแต่ละกริดภายในพื้นที่ศึกษา การวิเคราะห์ในลักษณะนี้ช่วยให้สามารถมองเห็นรูปแบบความแปรปรวนตามฤดูกาล (seasonal variability) รวมถึงความแตกต่างของระดับความเสี่ยงในแต่ละช่วงเวลาของปี และแนวโน้มโดยรวมในช่วงเวลาการศึกษา

#### 2.3.3.2 การวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ (Percentile Analysis)

เพื่อประเมินลักษณะของเหตุการณ์ที่มีค่าความรุนแรงสูงกว่าปกติ จึงได้ทำการวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ของค่า EV-Index โดยพิจารณาค่า P90, P95 และ P99 ในแต่ละกริดเชิงพื้นที่ ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ดังกล่าวถูกใช้เป็นตัวแทนของระดับความรุนแรงที่แตกต่างกัน ตั้งแต่เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นไม่บ่อยไปจนถึงเหตุการณ์สุดขั้ว (extreme events) การใช้เปอร์เซ็นต์ไทล์ช่วยลดอิทธิพลของค่าผิดปกติ (outliers) และทำให้การเปรียบเทียบระดับความเสี่ยงระหว่างพื้นที่ต่าง ๆ มีความเหมาะสมในเชิงสถิติ

### 2.3.3.3 การคัดเลือกเหตุการณ์รุนแรง (Extreme Event Selection)

นอกเหนือจากการวิเคราะห์เชิงสถิติแบบกระจายค่าแล้ว การศึกษานี้ยังได้ดำเนินการคัดเลือกเหตุการณ์รุนแรงของค่า EV โดยใช้วิธีการจัดอันดับค่า EV-Index สูงสุดในช่วงเวลาการศึกษา (Top-N events) เพื่อระบุช่วงเวลาในพื้นที่ศึกษามีการเปิดรับพลังงานจากคลื่นและกระแสน้ำในระดับสูงผิดปกติ การวิเคราะห์ในลักษณะนี้ช่วยให้สามารถเชื่อมโยงผลการคำนวณเชิงสถิติเข้ากับเหตุการณ์จริงในเชิงเวลา และสนับสนุนการตีความผลลัพธ์ในบริบทของความเสี่ยงเชิงปฏิบัติ

### 2.3.3.4 การสร้างแผนที่การกระจายเชิงพื้นที่ (Spatial Distribution)

เพื่อแสดงรูปแบบการกระจายตัวของความเสี่ยงเชิงพื้นที่ ได้สร้างแผนที่แสดงค่า EV-Index ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ค่าเฉลี่ยรายเดือน รายปี และค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ (P90, P95, P99) โดยการนำเสนอในลักษณะเชิงพื้นที่ช่วยให้สามารถระบุพื้นที่ที่มีระดับความเสี่ยงสูงอย่างต่อเนื่อง (persistent high-risk areas) รวมถึงพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงเฉพาะบางช่วงเวลา การวิเคราะห์เชิงพื้นที่ดังกล่าวมีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนการวางแผนและการจัดการพื้นที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งในเชิงนโยบายและเชิงปฏิบัติ

### 3. ผลการดำเนินการ

การศึกษานี้มุ่งเน้นการประเมินลักษณะเชิงพื้นที่และเชิงเวลา ของดัชนี Exposure Velocity (EV-Index) ในบริเวณอ่าวไทย โดยอาศัยข้อมูลคลื่นทะเลและกระแสน้ำที่ผ่านการคัดเลือก และประมวลผลจากแบบจำลองมาตรฐาน เพื่อสะท้อนระดับความรุนแรงของแรงกระทำทางกายภาพที่เกิดขึ้นในเขตนํ้าตื้น ซึ่งมีความสำคัญต่อกิจกรรมทางทะเลและการเพาะเลี้ยงสัตว์นํ้าชายฝั่ง

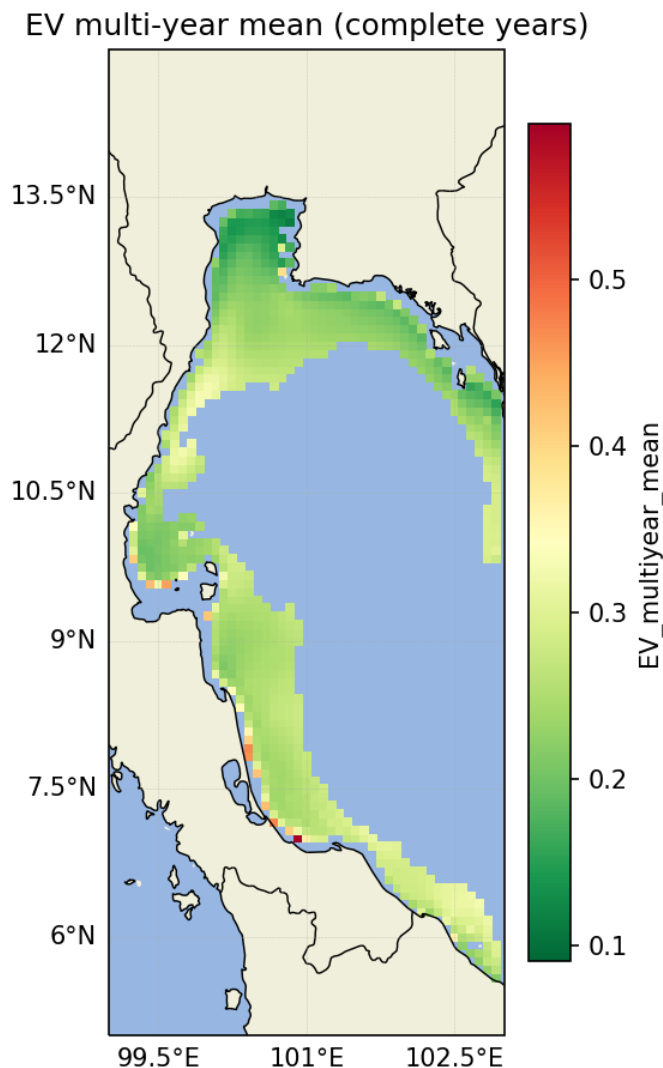
การนำเสนอผลการศึกษาในบทนี้เริ่มจากการแสดงลักษณะการกระจายเชิงพื้นที่ของค่า EV-Index เฉลี่ยระยะยาว เพื่อให้เห็นภาพรวมของพื้นที่อ่าวไทย จากนั้นจึงวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลและรายเดือน เพื่ออธิบายความสัมพันธ์กับระบบมรสุมและพลวัตทางสมุทรศาสตร์ในอ่าวไทย ต่อด้วยการวิเคราะห์ค่า EV-Index ในลักษณะเหตุการณ์สุดขั้ว (Extreme events) โดยใช้ค่าสถิติระดับเปอร์เซ็นต์ไทล์และค่าสูงสุด เพื่อระบุพื้นที่ที่มีความเสี่ยงเชิงรุนแรง แม้จะไม่เกิดขึ้นบ่อย

ในส่วนสุดท้ายของบทนี้ ได้มีการสังเคราะห์ผลการวิเคราะห์ทั้งหมดเพื่อจัดทำแผนที่แบ่งระดับความเสี่ยงตามค่า EV-Index ซึ่งสามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการเฝ้าระวังและการบริหารจัดการความเสี่ยงในเชิงปฏิบัติการ ทั้งในระดับพื้นที่เฉพาะและระดับภูมิภาค

#### 3.1 แผนที่แสดงค่าเฉลี่ยระยะยาวของ EV-Index

การนำเสนอแผนที่ค่าเฉลี่ยระยะยาวของดัชนี Exposure Velocity ในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงลักษณะความเสี่ยงพื้นฐาน (baseline exposure) เชิงพื้นที่ของบริเวณอ่าวไทย ซึ่งสะท้อนระดับแรงกระทำทางกายภาพจากคลื่นและกระแสน้ำที่พื้นที่ต่าง ๆ เฉลี่ยโดยเฉลี่ยในระยะยาว โดยไม่ถูกรบกวนด้วยเหตุการณ์รุนแรงเฉพาะหน้าเพียงช่วงสั้น ๆ

แผนที่ดังกล่าวคำนวณจากข้อมูลรายปีที่มีความสมบูรณ์ครบถ้วนจำนวน 6 ปี ได้แก่ ปี ค.ศ. 2015 และช่วงปี ค.ศ. 2020–2024 โดยไม่นำปีที่มีข้อมูลรายเดือนไม่ครบมาร่วมในการคำนวณ เพื่อหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนเชิงฤดูกาล และเพื่อให้ค่าเฉลี่ยที่ได้สามารถใช้เป็นตัวแทนของสภาพความเสี่ยงระยะยาวของพื้นที่ศึกษาได้อย่างเหมาะสม



ภาพที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยของ EV-Index ในพื้นที่ศึกษา จากข้อมูลย้อนหลังเฉพาะปีที่มีข้อมูลรายเดือนครบถ้วนจำนวน 6 ปี ได้แก่ ปี ค.ศ. 2015 และช่วงปี ค.ศ. 2020–2024

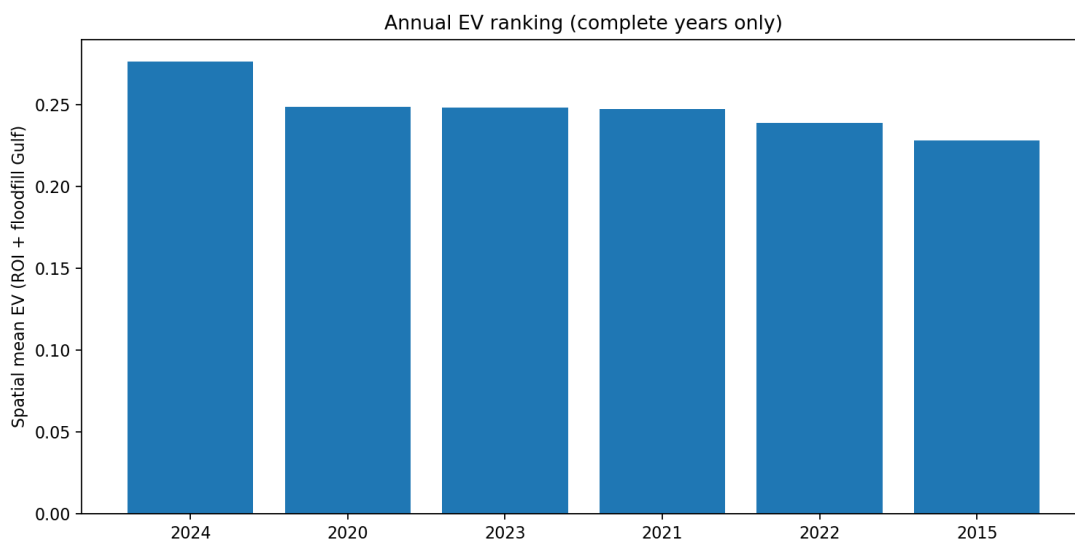
จากภาพที่ 2 แสดงแผนที่ค่าเฉลี่ยระยะยาวของ EV-Index ซึ่งคำนวณจากข้อมูลรายปีที่มีความสมบูรณ์ครบถ้วนจำนวน 6 ปี (ค.ศ. 2015 และช่วงปี ค.ศ. 2020–2024) พบว่าค่าเฉลี่ย EV-Index ของพื้นที่ศึกษาทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 0.25 สะท้อนระดับแรงกระทำทางกายภาพจากคลื่นและกระแสน้ำในภาพรวมของอ่าวไทยภายใต้สภาวะเฉลี่ยระยะยาว

ในเชิงพื้นที่ บริเวณที่มีค่า EV-Index เฉลี่ยต่ำที่สุดปรากฏเด่นชัดในพื้นที่ อ่าวไทยตอนบน รูปตัว ก เมื่อเทียบกับพื้นที่อื่นของอ่าวไทย

ในทางตรงกันข้าม พื้นที่ที่มีแนวโน้มค่า EV-Index เฉลี่ยสูงที่สุดพบตามแนว ฟังตะวันตกของอ่าวไทย โดยเฉพาะบริเวณตั้งแต่จังหวัด ชุมพรลงมาถึงปัตตานี ซึ่งปรากฏเป็นแถบค่าดัชนีระดับ

ปานกลางถึงสูงต่อเนื่องตลอดแนวชายฝั่ง ลักษณะดังกล่าวสะท้อนถึงการได้รับแรงกระทำจากคลื่น และกระแสน้ำอย่างสม่ำเสมอในระยะยาว

นอกจากนี้ ยังพบว่าพื้นที่น้ำลึกบริเวณตอนกลางของอ่าวไทยมีค่า EV-Index เฉลี่ยอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลางเมื่อเทียบกับพื้นที่ชายฝั่ง แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยระยะยาวของดัชนี EV มีความไวต่อปฏิสัมพันธ์ระหว่างความลึกของน้ำและลักษณะชายฝั่ง



**ภาพที่ 3** กราฟแท่งแสดงค่าเฉลี่ยรายปีของ EV-Index สำหรับปี ค.ศ. 2015 และช่วงปี ค.ศ. 2020–2024

จากกราฟการจัดอันดับค่าเฉลี่ยรายปีของค่า EV-Index สำหรับปีที่มีข้อมูลครบถ้วนจำนวน 6 ปี (ภาพที่ 3) พบว่า ปี ค.ศ. 2024 เป็นปีที่มีค่า EV-Index เฉลี่ยตลอดปีสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.28 สะท้อนถึงระดับแรงกระทำจากคลื่นและกระแสน้ำในภาพรวมของปีดังกล่าวที่อยู่ในระดับสูงเมื่อเทียบกับปีอื่นในช่วงการศึกษา

ในทางตรงกันข้าม ปี ค.ศ. 2015 เป็นปีที่มีค่า EV-Index เฉลี่ยตลอดปีต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.23 แสดงถึงสภาวะพลังงานทางกายภาพโดยรวมที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับปีอื่น ๆ ที่นำมาวิเคราะห์

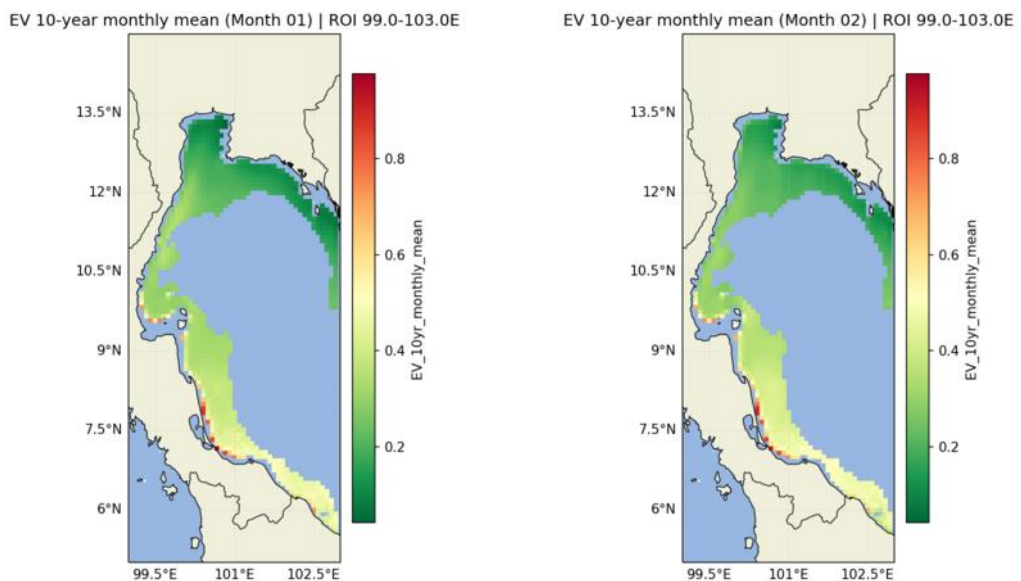
สำหรับปีที่เหลือ ได้แก่ ค.ศ. 2020, 2021, 2022 และ 2023 พบว่าค่า EV-Index เฉลี่ยรายปีมีค่าใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วงประมาณ 0.24–0.25 ซึ่งบ่งชี้ว่าระดับแรงกระทำเฉลี่ยในแต่ละปีมีความแปรปรวนไม่สูงมากนัก

### 3.2 แผนที่แสดงค่า EV-Index เฉลี่ยรายเดือน

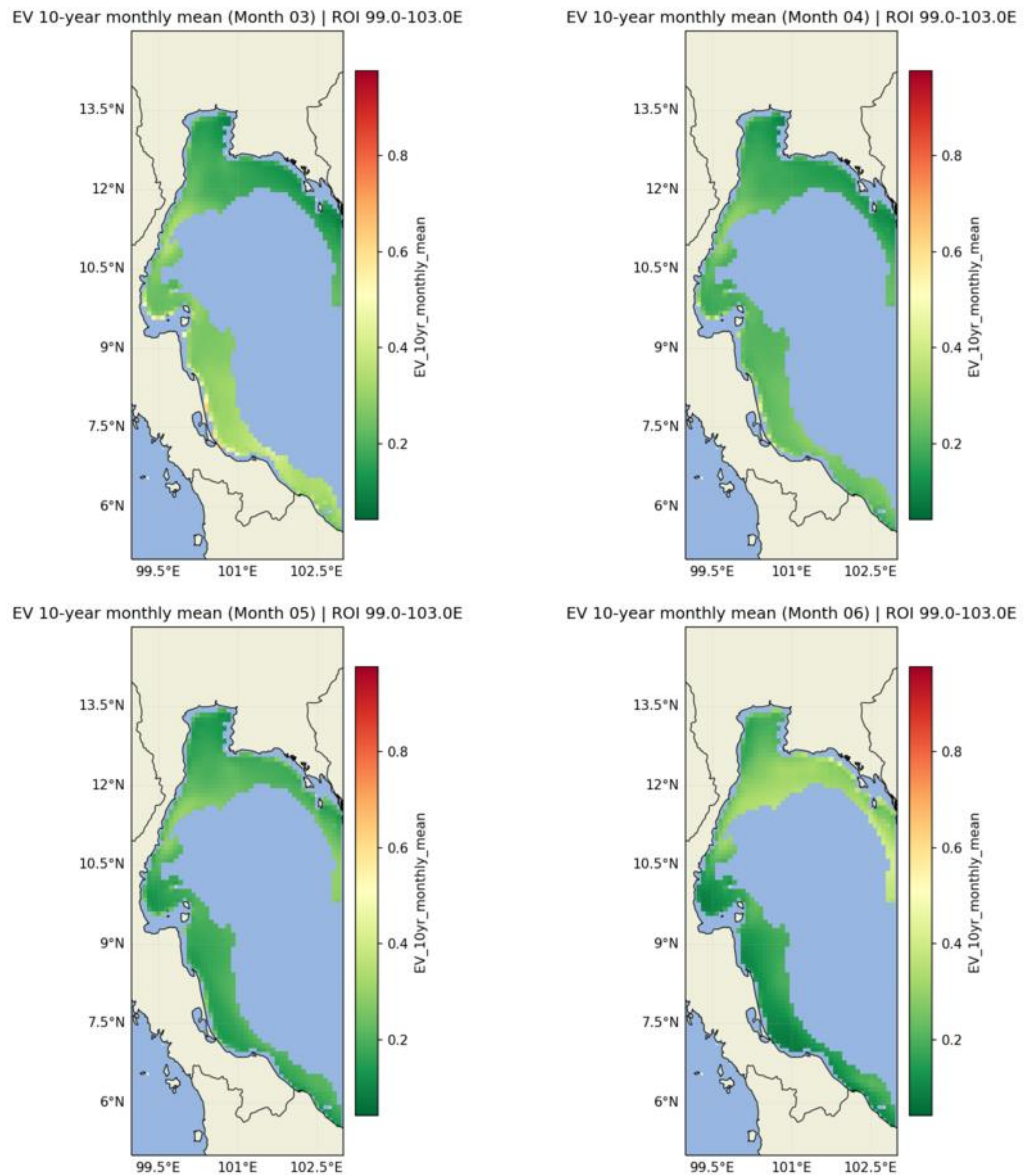
การคำนวณค่าเฉลี่ยรายเดือนดำเนินการโดยเริ่มจากการคำนวณค่า EV-Index เฉลี่ยรายเดือนของแต่ละปีจากข้อมูลความถี่เวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำค่าเฉลี่ยรายเดือนของปีต่าง ๆ มาคำนวณค่าเฉลี่ยรวมข้ามปี (multi-year monthly mean) สำหรับแต่ละเดือน โดยพิจารณาเฉพาะชุดข้อมูลรายเดือนที่ผ่านเกณฑ์การควบคุมคุณภาพข้อมูล เพื่อหลีกเลี่ยงอคติจากข้อมูลที่ขาดหายหรือไม่สมบูรณ์

นอกจากนี้ ได้ตัดช่วงเหตุการณ์พายุปาบิกในเดือนมกราคม พ.ศ. 2562 (ค.ศ. 2019) ออกจากกระบวนการคำนวณ เพื่อป้องกันไม่ให้เหตุการณ์รุนแรงเฉพาะหน้าส่งผลกระทบต่อค่าลักษณะเฉลี่ยเชิงฤดูกาล

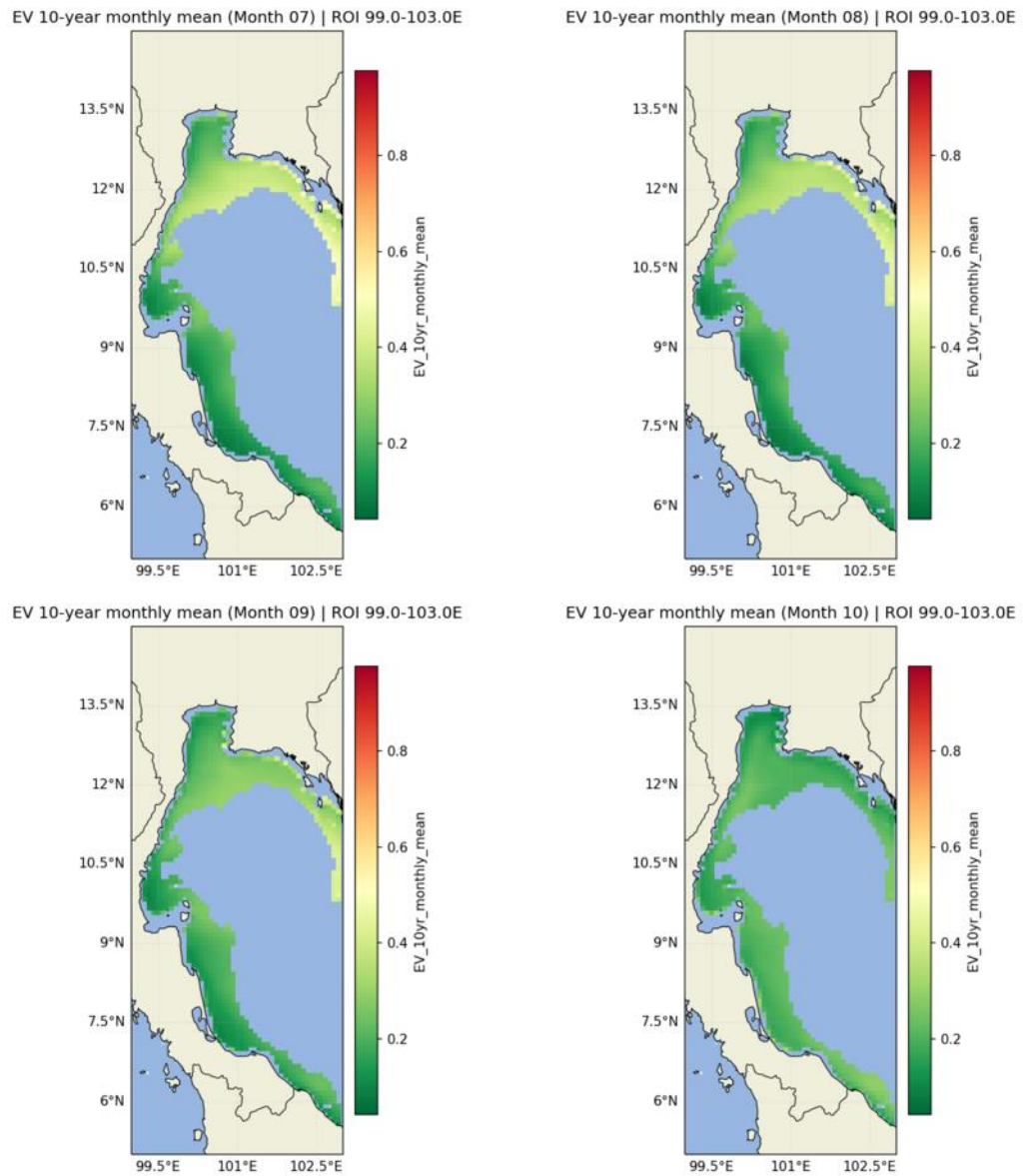
แผนที่ค่าเฉลี่ยรายเดือนที่ได้จึงสะท้อนลักษณะความเสี่ยงเชิงฤดูกาลของ EV-Index ภายใต้สภาวะเฉลี่ยระยะยาว และสามารถนำไปใช้เป็นฐานในการระบุช่วงเดือนที่มีแนวโน้มความเสี่ยงสูง รวมถึงเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์เหตุการณ์รุนแรงในหัวข้อถัดไปของการศึกษา



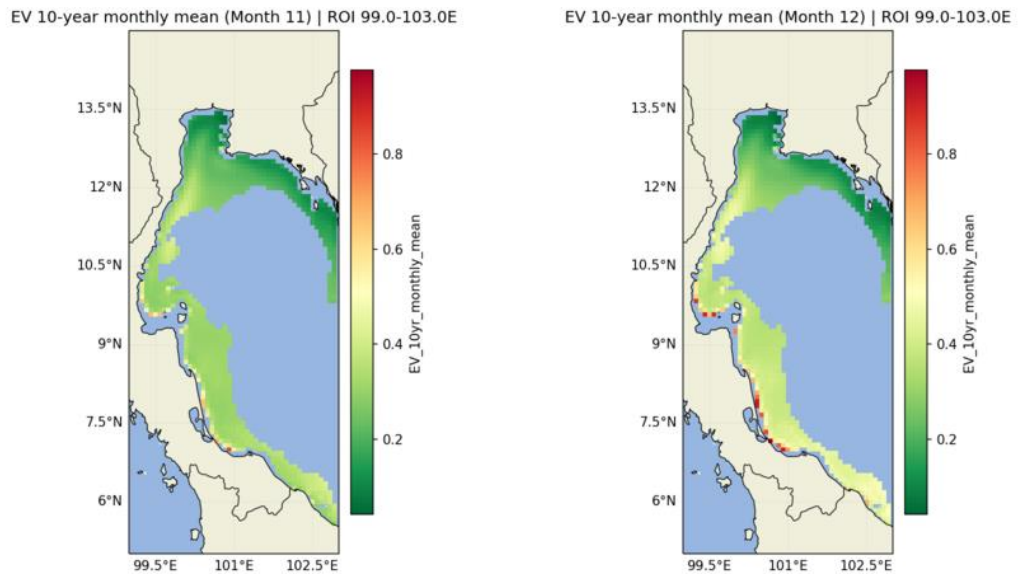
ภาพที่ 4 ค่า EV-Index เฉลี่ยรายเดือน 12 เดือน (multi-year monthly mean) แสดงลักษณะความเสี่ยงเชิงฤดูกาลภายใต้สภาวะเฉลี่ยระยะยาว



ภาพที่ 4 (ต่อ) ค่า EV-Index เฉลี่ยรายเดือน 12 เดือน (multi-year monthly mean) แสดงลักษณะความเสี่ยงเชิงฤดูกาลภายใต้สภาวะเฉลี่ยระยะยาว



ภาพที่ 4 (ต่อ) ค่า EV-Index เฉลี่ยรายเดือน 12 เดือน (multi-year monthly mean) แสดงลักษณะความเสี่ยงเชิงฤดูกาลภายใต้สภาวะเฉลี่ยระยะยาว

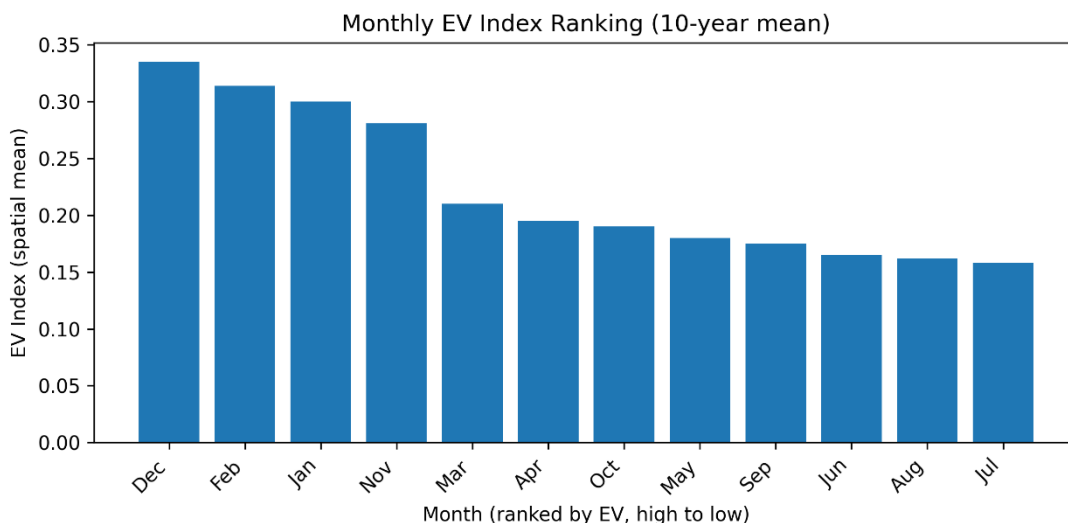


ภาพที่ 4 (ต่อ) ค่า EV-Index เฉลี่ยรายเดือน 12 เดือน (multi-year monthly mean) แสดงลักษณะความเสี่ยงเชิงฤดูกาลภายใต้สภาวะเฉลี่ยระยะยาว

จากแผนภาพดังกล่าวสามารถสังเกตเห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่า EV-Index ทั้งในเชิงเวลาและเชิงพื้นที่ ซึ่งสะท้อนความแตกต่างของระดับแรงกระทำทางกายภาพที่พื้นที่ศึกษาเผชิญในแต่ละช่วงเดือน โดยความแปรปรวนดังกล่าวมีความเชื่อมโยงกับปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาในระดับภูมิภาค เช่น ลักษณะของลมมรสุมที่เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

เมื่อพิจารณาค่า EV-Index เฉลี่ยเชิงพื้นที่ของทั้งพื้นที่ศึกษา พบว่าเดือนที่มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุดได้แก่ เดือนธันวาคม (0.34) รองลงมาคือ เดือนกุมภาพันธ์ (0.31), เดือนมกราคม (0.30) และ เดือนพฤศจิกายน (0.28) ซึ่งบ่งชี้ว่าช่วงปลายปีถึงต้นปีหรือช่วงที่ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือพัดผ่านประเทศไทยเป็นช่วงที่พื้นที่ศึกษาโดยรวมเผชิญแรงกระทำจากคลื่นและกระแสน้ำในระดับสูงกว่าค่าเฉลี่ยของปี

ในทางตรงกันข้าม เดือนกรกฎาคม เป็นเดือนที่มีค่า EV-Index เฉลี่ยเชิงพื้นที่ต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.16 สะท้อนถึงสภาวะพลังงานทางกายภาพที่อยู่ในระดับต่ำกว่าเดือนอื่น ๆ ในรอบปี ทั้งนี้รายละเอียดการกระจายเชิงพื้นที่ของค่า EV-Index ในแต่ละเดือนแสดงไว้ในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดงค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่รายเดือนของ EV-Index ในพื้นที่ศึกษา จากข้อมูลย้อนหลังหลายปี โดยเรียงลำดับเดือนจากค่ามากที่สุดไปหาน้อยที่สุด

### 3.3 การแยกวิเคราะห์สัดส่วนคลื่นและกระแสน้ำต่อค่า EV-Index ในอ่าวไทย

จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อก่อนหน้า พบว่าค่า EV-Index มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา อาทิ ฤดูกาล ทิศทางลมมรสุม และการแผ่ลงมาของมวลอากาศความกดอากาศสูง นอกจากนี้ ค่า EV-Index ยังได้รับอิทธิพลจากปัจจัยทางสมุทรศาสตร์และลักษณะภูมิประเทศชายฝั่ง เช่น ระดับความลึกของน้ำ รูปร่างของแนวชายฝั่ง และสภาพการเปิดรับคลื่นของพื้นที่ ซึ่งความแตกต่างเชิงพื้นที่ดังกล่าวส่งผลต่อสัดส่วนขององค์ประกอบความเร็วที่เกิดจากคลื่น ( $U_w$ ) และกระแสน้ำ ( $U_c$ ) ที่รวมกันเป็นค่า EV-Index

ในการศึกษานี้ ค่า EV-Index ถูกนิยามเป็นผลรวมของความเร็วที่เกิดจากคลื่นและกระแสน้ำ ดังสมการ

$$EV = U_w + U_c$$

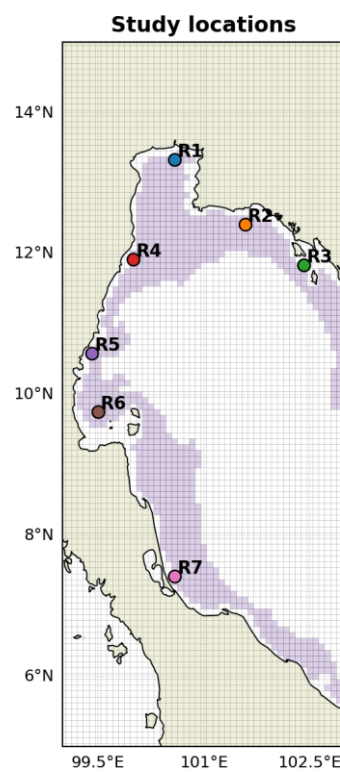
เพื่อวิเคราะห์บทบาทสัมพัทธ์ของทั้งสององค์ประกอบ จึงกำหนดตัวแปรสัดส่วนของความเร็วจากคลื่น (wave fraction) เป็น

$$f_w = \frac{U_w}{U_w + U_c}$$

โดยที่  $f_w$  มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 หากค่า  $f_w$  เข้าใกล้ 1 แสดงว่าคลื่นมีบทบาทเด่นในการกำหนดค่า EV-Index ขณะที่ค่าใกล้ 0 สะท้อนบทบาทของกระแสน้ำที่เด่นกว่า ส่วนค่าใกล้ 0.5 บ่งชี้ถึงระบบที่ทั้งคลื่นและกระแสน้ำมีบทบาทใกล้เคียงกัน

เพื่อทำความเข้าใจกลไกเชิงกายภาพที่กำหนดค่า EV-Index ในแต่ละพื้นที่ การศึกษานี้ได้คัดเลือกพื้นที่ตัวแทนจำนวน 7 พื้นที่ในอ่าวไทย ดังแสดงในตารางที่ 1 และภาพที่ 6 และทำการวิเคราะห์สัดส่วนของความเร็วจากคลื่นและกระแสน้ำต่อค่า EV-Index ของแต่ละพื้นที่ โดยพิจารณาทั้งสภาวะปกติ (baseline conditions) และช่วงเหตุการณ์ที่มีค่า EV-Index สูง (extreme conditions) ผลการวิเคราะห์ถูกนำเสนอในรูปแบบแผนภาพกล่อง (boxplot) เพื่อสะท้อนลักษณะการกระจายตัว ความแปรปรวน และแนวโน้มของสัดส่วนแรงกระทำในแต่ละบริเวณ

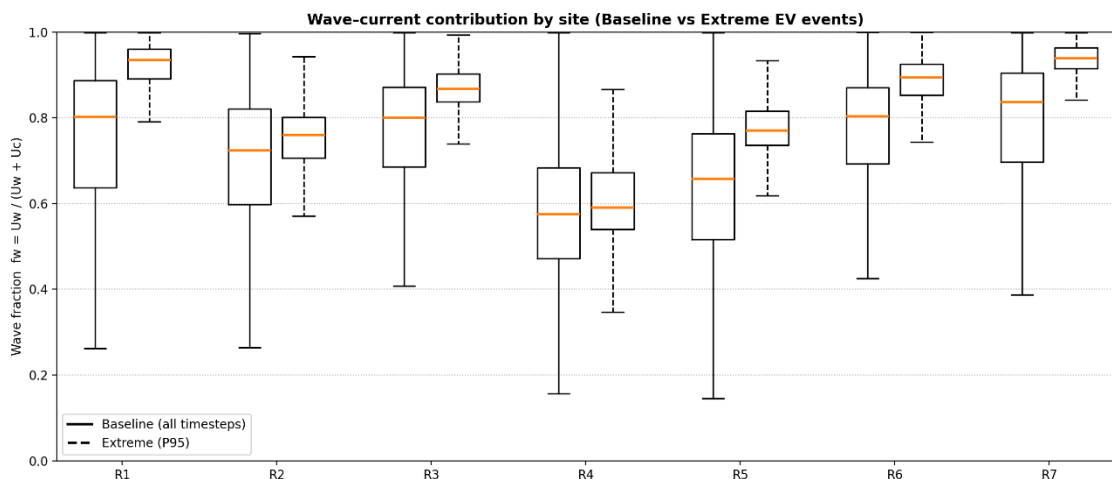
การวิเคราะห์ดังกล่าวช่วยให้สามารถจำแนกพื้นที่ตามลักษณะกลไกหลักที่ควบคุมค่า EV-Index ได้อย่างชัดเจน ว่าพื้นที่ใดมีลักษณะเป็นระบบที่คลื่นเป็นปัจจัยนำ (wave-dominant regime) พื้นที่ใดเป็นระบบผสม (mixed regime) หรือพื้นที่ใดมีการเปลี่ยนแปลงกลไกเด่นในช่วงเหตุการณ์รุนแรง (regime shift under extreme conditions)



ภาพที่ 6 แสดงตำแหน่งจุดศึกษาทั้ง 7 พื้นที่ (R1–R7) ในอ่าวไทยที่ใช้ในการวิเคราะห์สัดส่วนความเร็วจากคลื่น ( $U_w$ ) และกระแสน้ำ ( $U_c$ ) ต่อค่า EV-Index โดยพื้นที่สีม่วงแสดงขอบเขตพื้นที่ศึกษาที่ผ่านการคัดกรองข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์

ตารางที่ 1 แสดงพิกัดภูมิศาสตร์ของจุดศึกษาทั้ง 7 พื้นที่ (R1-R7) ในอ่าวไทย พร้อมค่ามัธยฐานของสัดส่วนความเร็วจากคลื่นต่อค่า EV-Index ( $f_w$ ) ในสภาวะปกติ และในช่วงเหตุการณ์รุนแรง

| ตำแหน่ง | สถานที่         | ละติจูด | ลองจิจูด | มัธยฐานของค่าปกติ | มัธยฐานของค่าสุดขีด |
|---------|-----------------|---------|----------|-------------------|---------------------|
| R1      | สมุทรปราการ     | 13.33   | 100.58   | 0.80              | 0.93                |
| R2      | ระยอง           | 12.42   | 101.58   | 0.72              | 0.76                |
| R3      | ตราด            | 11.83   | 102.42   | 0.80              | 0.87                |
| R4      | ประจวบคีรีขันธ์ | 11.92   | 100.00   | 0.58              | 0.59                |
| R5      | ชุมพร           | 10.58   | 99.42    | 0.66              | 0.77                |
| R6      | สุราษฎร์ธานี    | 9.75    | 99.50    | 0.80              | 0.89                |
| R7      | สงขลา           | 7.42    | 100.58   | 0.84              | 0.94                |



ภาพที่ 7 แผนภาพกล่องแสดงค่ามัธยฐานและช่วงควอไทล์ของสัดส่วนความเร็วจากคลื่น ( $f_w$ ) ต่อค่า EV-Index ของจุดศึกษาทั้ง 7 พื้นที่ โดยเปรียบเทียบระหว่างสภาวะปกติและช่วงเหตุการณ์รุนแรง เพื่อใช้จำแนกลักษณะกลไกหลักที่ควบคุมค่า EV-Index ในแต่ละพื้นที่

จากภาพที่ 7 ซึ่งแสดงแผนภาพกล่องของสัดส่วนความเร็วจากคลื่นต่อค่า EV-Index ( $f_w$ ) ในสภาวะปกติและช่วงเหตุการณ์รุนแรง พบว่าลักษณะกลไกที่ควบคุมค่า EV-Index แตกต่างกันอย่างชัดเจนในแต่ละพื้นที่ของอ่าวไทย

สำหรับพื้นที่ R1 (อ่าวไทยตอนบน) ค่า  $f_w$  มีค่ามัธยฐานสูงทั้งในสภาวะปกติและช่วงเหตุการณ์รุนแรง โดยเฉพาะในช่วง extreme conditions ที่ค่ามัธยฐานเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน สะท้อนลักษณะระบบที่คลื่นเป็นกลไกหลักในการกำหนดค่า EV-Index อย่างต่อเนื่อง พื้นที่ R3 และ

R6 มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยแสดงค่า  $f_w$  ในระดับสูงทั้งสองสถานะ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงเหตุการณ์รุนแรง บ่งชี้ถึงบทบาทเด่นของคลื่นในพื้นที่ดังกล่าว ขณะที่ R7 แสดงค่ามัธยฐานของ  $f_w$  สูงที่สุดในช่วงเหตุการณ์รุนแรง สะท้อนระบบที่คลื่นครอบงำค่า EV-Index อย่างชัดเจน

ในทางตรงกันข้าม พื้นที่ R2 และ R5 แสดงลักษณะกึ่งผสม (mixed regime) โดยในสถานะปกติค่า  $f_w$  อยู่ในช่วงปานกลาง และแม้ในช่วงเหตุการณ์รุนแรงค่ามัธยฐานจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ยังไม่สูงเพียงพอที่จะจัดเป็นระบบที่คลื่นครอบงำอย่างสมบูรณ์ สะท้อนว่ากระแสน้ำยังคงมีบทบาทร่วมอย่างมีนัยสำคัญในการกำหนดค่า EV-Index ของพื้นที่ดังกล่าว

พื้นที่ R4 มีลักษณะเด่นแตกต่างจากพื้นที่อื่น กล่าวคือ ในสถานะปกติค่า  $f_w$  มีค่ามัธยฐานใกล้เคียงค่ากึ่งกลาง แสดงถึงระบบที่คลื่นและกระแสน้ำมีบทบาทใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม ในช่วงเหตุการณ์รุนแรงการกระจายของข้อมูลมีแนวโน้มเอนไปทางค่าที่สูงขึ้น สะท้อนการเพิ่มขึ้นของบทบาทคลื่นในช่วงที่ค่า EV-Index สูง จึงสามารถตีความได้ว่าพื้นที่นี้มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงกลไกเด่นภายใต้เงื่อนไขเหตุการณ์รุนแรง (regime shift under extreme conditions)

โดยสรุป ผลการวิเคราะห์จากแผนภาพกล่องแสดงให้เห็นว่า จากตำแหน่งที่เลือกศึกษาในพื้นที่อ่าวไทยสามารถจำแนกได้เป็นสามกลุ่มหลัก ได้แก่ พื้นที่ที่คลื่นเป็นกลไกควบคุมหลักอย่างต่อเนื่อง (R1, R3, R6 และ R7) พื้นที่ที่มีลักษณะกึ่งผสมระหว่างคลื่นและกระแสน้ำ (R2 และ R5) และพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงกลไกเด่นในช่วงเหตุการณ์รุนแรง (R4) ซึ่งสะท้อนถึงความแตกต่างเชิงภูมิประเทศและสมุทรศาสตร์ที่มีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของค่า EV-Index ในแต่ละบริเวณของอ่าวไทย

### 3.4 การวิเคราะห์ค่า EV-Index ในลักษณะของเหตุการณ์สุดขีด

เพื่อประเมินลักษณะความเสี่ยงจากแรงกระทำทางกายภาพที่อาจก่อให้เกิดผลกระทบสูงต่อพื้นที่ชายฝั่งและกิจกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ การศึกษานี้จึงวิเคราะห์ค่า EV-Index ในมิติของเหตุการณ์รุนแรง โดยใช้ค่าสถิติระดับเปอร์เซ็นต์ไทล์จากข้อมูลย้อนหลัง แทนการพิจารณาค่าเฉลี่ยเพียงอย่างเดียว ซึ่งอาจไม่สามารถสะท้อนระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในบางช่วงเวลาได้อย่างเพียงพอ

การแยกการวิเคราะห์ออกเป็นระดับ P90, P95 และ P99 มีความสำคัญต่อการอธิบายลักษณะความเสี่ยงที่แตกต่างกันทั้งในด้านความถี่และความรุนแรงของเหตุการณ์ โดยระดับ P90 สามารถตีความได้ว่าเป็นความเสี่ยงพื้นฐานในระยะยาว (baseline) ซึ่งสะท้อนพื้นที่ที่มีค่า EV สูงเกิดขึ้นบ่อย เหมาะสำหรับการใช้ประกอบการวางผังพื้นที่ การเลือกทำเลเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และการประเมินความเหมาะสมของพื้นที่ในเชิงโครงสร้างระยะยาว

ระดับ P95 แสดงถึงเหตุการณ์ที่มีความรุนแรงสูงขึ้นและมีศักยภาพในการก่อให้เกิดผลกระทบต่อโครงสร้างหรือการดำเนินงานมากกว่าระดับ P90 แม้จะไม่ใช่เหตุการณ์รุนแรงที่สุด แต่ยังเป็นเหตุการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงเวลาศึกษา ระดับนี้จึงเหมาะสำหรับการใช้เป็นเกณฑ์ในการ

เผ่าระวัง การเตือนภัยเชิงปฏิบัติการ และการกำหนดระดับความเสี่ยงที่เริ่มมีนัยสำคัญต่อการเกิดความเสียหาย

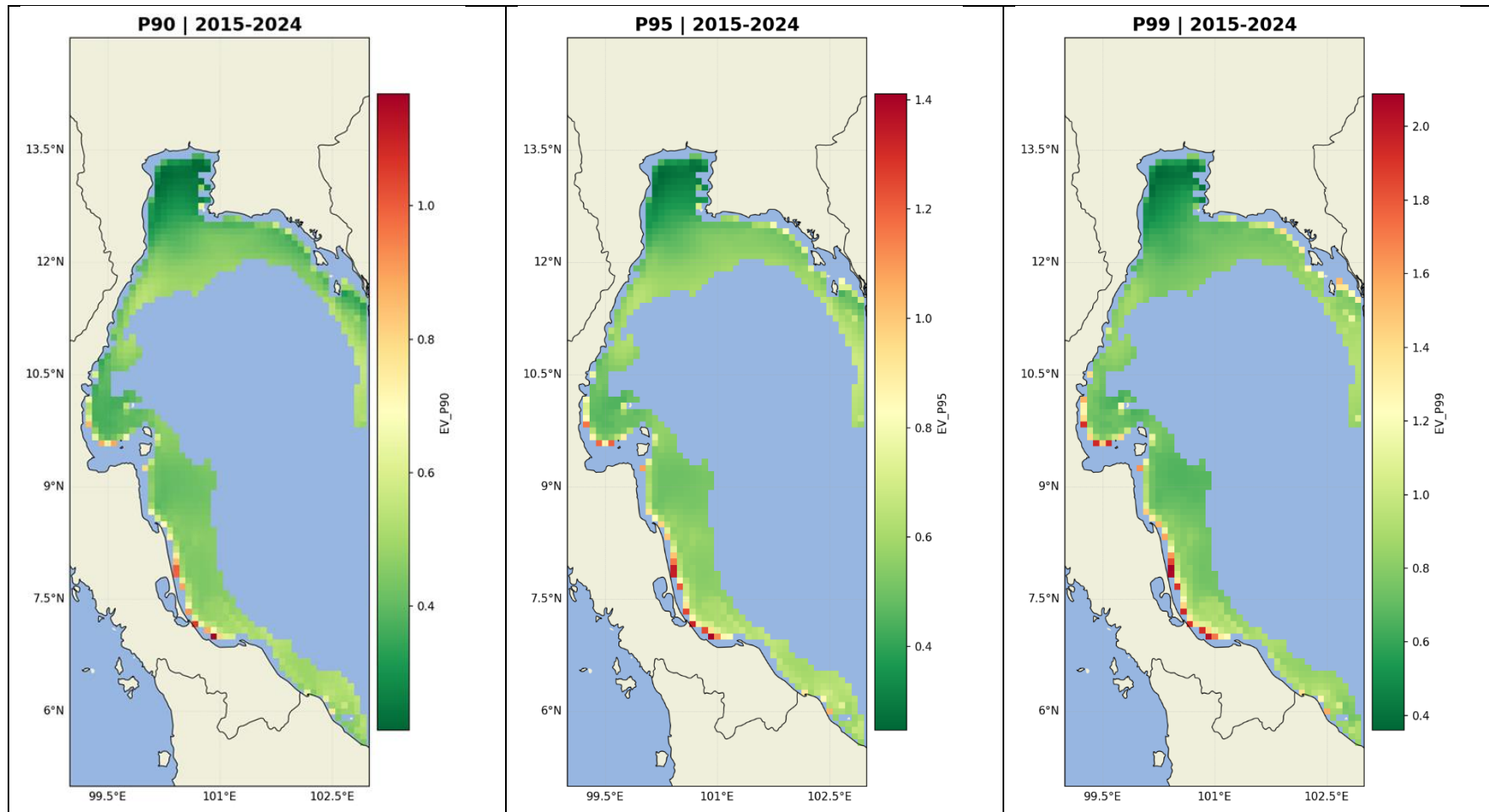
ระดับ P99 เป็นตัวแทนของเหตุการณ์รุนแรงระดับสุดขีดในช่วงเวลาศึกษา ซึ่งสะท้อนขอบเขตบนของความเสี่ยง (extreme exposure) และสามารถใช้เป็นกรอบอ้างอิงสำหรับการประเมินสถานการณ์เลวร้ายที่สุด รวมถึงการพิจารณาความมั่นคงและขีดจำกัดความทนทานของโครงสร้างภายใต้เหตุการณ์รุนแรงระดับสูงมาก

การวิเคราะห์ค่า EV-Index ในลักษณะเหตุการณ์รุนแรงช่วยให้สามารถแยกแยะระหว่างพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสะสมในระยะยาวกับพื้นที่ที่มีแนวโน้มเผชิญเหตุการณ์รุนแรงเฉพาะช่วงเวลาได้อย่างชัดเจน ซึ่งในบางกรณีอาจเป็นพื้นที่เดียวกัน และในบางกรณีอาจแตกต่างกัน ข้อมูลดังกล่าวจึงมีความสำคัญต่อการจัดทำแผนที่ความเสี่ยงเชิงพื้นที่และการวางแผนเผ่าระวังเชิงปฏิบัติการในลำดับขั้นถัดไป

จากการเปรียบเทียบแผนที่ดัชนี Exposure Velocity ที่ระดับเปอร์เซ็นต์ไทล์ P90, P95 และ P99 พบว่าตำแหน่งของพื้นที่เสี่ยงสูง (hotspot) มีความสอดคล้องกันเชิงพื้นที่อย่างชัดเจน กล่าวคือ พื้นที่ที่ปรากฏค่า EV สูงในระดับ P90 ยังคงเป็นพื้นที่เดียวกันเมื่อพิจารณาที่ระดับ P95 และ P99 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าพื้นที่เสี่ยงของอ่าวไทยมีลักษณะการคงอยู่เชิงพื้นที่ (spatial persistence) มากกว่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามเหตุการณ์รุนแรงเฉพาะครั้ง

พื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงที่สุดปรากฏเด่นชัดบริเวณใกล้ชายฝั่งด้านตะวันตกของอ่าวไทย ตั้งแต่จังหวัดชุมพรลงมาถึงจังหวัดปัตตานี โดยพบการเกิดค่าดัชนี EV สูงซ้ำ ๆ ในตำแหน่งใกล้เคียงกันตลอดช่วงการวิเคราะห์ ขณะที่พื้นที่เสี่ยงรองลงมาพบตามแนวชายฝั่งด้านตะวันออกของอ่าวไทย ตั้งแต่จังหวัดระยองถึงตราด ซึ่งแม้จะปรากฏรูปแบบเชิงพื้นที่ที่คล้ายคลึงกัน แต่มีระดับความรุนแรงต่ำกว่าบริเวณฝั่งตะวันตกอย่างเห็นได้ชัด

รูปแบบการเกิดซ้ำในตำแหน่งเดิมของพื้นที่เสี่ยงดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงบทบาทสำคัญของปัจจัยทางกายภาพพื้นฐานของพื้นที่ เช่น ลักษณะภูมิประเทศใต้น้ำ ความตื้นของน้ำบริเวณชายฝั่ง แนวชายฝั่งที่มีความโค้งเว้า รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นและกระแสน้ำ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดตำแหน่งที่มีแนวโน้มเกิดค่า EV สูงซ้ำ ๆ ภายใต้สภาพอุตุนิยมวิทยาที่แตกต่างกันในแต่ละเหตุการณ์



ภาพที่ 8 แผนที่ EV-Index ระดับ (a) P90 (ความเสี่ยงพื้นฐาน) (b) P95 (ความเสี่ยงหลัก) และ (c) P99 (ความเสี่ยงระดับสูงสุด) ในอ่าวไทยช่วงปี 2015–2024 โดยใช้สเกลต่างกันเพื่อการเปรียบเทียบเชิงพื้นที่และความรุนแรง

### 3.5 เหตุการณ์ EV-Index สูงสุด 20 อันดับแรกเฉลี่ยทั้งพื้นที่ศึกษา

เพื่อทำความเข้าใจลักษณะความเสี่ยงจากแรงกระทำทางกายภาพที่เกิดขึ้นในลักษณะของเหตุการณ์เฉพาะหน้า (event-driven extremes) การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์เหตุการณ์ที่มีค่า EV-Index สูงสุดจำนวน 20 อันดับแรก จากชุดข้อมูลย้อนหลัง โดยใช้ค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ของทั้งพื้นที่ศึกษาเป็นเกณฑ์ในการจัดอันดับ ทั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อระบุช่วงเวลาที่เกิดความรุนแรงสูงเป็นพิเศษในระดับภาพรวมของอ่าวไทย

ตารางที่ 2 แสดงลำดับที่ 1–20 ของช่วงเวลามีค่า EV Index เฉลี่ยเชิงพื้นที่สูงสุดตลอดช่วงระยะเวลาการศึกษา พร้อมทั้งรายงานค่า EV-Index สูงสุดที่ปรากฏในแต่ละเหตุการณ์ นอกจากนี้ยังได้แสดงค่าสัดส่วนขององค์ประกอบจากกระแสน้ำและคลื่นในช่วงเวลาเดียวกัน เพื่อสนับสนุนการพิจารณาเชิงลึกถึงลักษณะและแหล่งที่มาของแรงกระทำที่ควรเฝ้าระวังในแต่ละเหตุการณ์

จากผลการจัดอันดับดังกล่าว ได้คัดเลือกเหตุการณ์บางรายการที่มีลักษณะโดดเด่นแตกต่างกัน ทั้งในแง่ระดับความรุนแรงและรูปแบบการกระจายเชิงพื้นที่ ให้นำเสนอในรูปแบบแผนที่ตัวแทนของเหตุการณ์ เพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ และเพื่อสังเคราะห์ลักษณะร่วมของเหตุการณ์ที่มีค่า EV-Index สูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2 การจัดอันดับเหตุการณ์ที่มีค่า EV-Index เฉลี่ยเชิงพื้นที่สูงสุด 20 อันดับแรก พร้อมสัดส่วนอิทธิพลจากคลื่น (Frac\_Uc) และกระแสน้ำ (Frac\_Uw)

| อันดับ | วัน | เดือน | ปี   | ค่า EV เฉลี่ย | ค่า EV สูงสุด | Frac_Uc | Frac_Uw |
|--------|-----|-------|------|---------------|---------------|---------|---------|
| 1      | 18  | 12    | 2022 | 0.96          | 3.46          | 0.16    | 0.84    |
| 2      | 7   | 2     | 2016 | 0.91          | 3.67          | 0.14    | 0.86    |
| 3      | 14  | 12    | 2024 | 0.87          | 2.59          | 0.35    | 0.65    |
| 4      | 24  | 1     | 2016 | 0.81          | 3.04          | 0.21    | 0.79    |
| 5      | 30  | 11    | 2021 | 0.80          | 4.31          | 0.24    | 0.76    |
| 6      | 24  | 12    | 2023 | 0.80          | 3.46          | 0.19    | 0.81    |
| 7      | 2   | 8     | 2020 | 0.74          | 2.98          | 0.22    | 0.78    |
| 8      | 25  | 2     | 2022 | 0.72          | 3.37          | 0.15    | 0.85    |
| 9      | 19  | 9     | 2020 | 0.71          | 2.99          | 0.20    | 0.80    |
| 10     | 7   | 12    | 2019 | 0.70          | 2.88          | 0.19    | 0.81    |
| 11     | 25  | 1     | 2023 | 0.68          | 2.71          | 0.17    | 0.83    |
| 12     | 3   | 12    | 2019 | 0.68          | 2.33          | 0.18    | 0.82    |
| 13     | 29  | 11    | 2024 | 0.67          | 2.29          | 0.26    | 0.74    |
| 14     | 17  | 12    | 2024 | 0.67          | 1.50          | 0.57    | 0.43    |
| 15     | 17  | 6     | 2018 | 0.67          | 3.04          | 0.17    | 0.83    |
| 16     | 18  | 7     | 2023 | 0.66          | 2.54          | 0.21    | 0.79    |
| 17     | 30  | 12    | 2021 | 0.66          | 2.48          | 0.21    | 0.79    |
| 18     | 31  | 8     | 2019 | 0.65          | 2.93          | 0.22    | 0.78    |
| 19     | 11  | 2     | 2017 | 0.65          | 2.41          | 0.22    | 0.78    |
| 20     | 18  | 7     | 2018 | 0.65          | 2.71          | 0.18    | 0.82    |

จากการพิจารณาตารางเหตุการณ์ 20 อันดับแรกในตาราง 2 ที่มีค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ของดัชนี Exposure Velocity สูงสุด พบว่าเหตุการณ์ดังกล่าวมิได้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดช่วงเวลาศึกษา แต่มีรูปแบบการกระจุกตัวตามฤดูกาลและช่วงเวลาที่ยืดหยุ่นชัดเจน

เมื่อพิจารณาการกระจายตามเดือน เหตุการณ์จำนวนมากเกิดขึ้นในช่วงปลายปีถึงต้นปี โดยเฉพาะในเดือนธันวาคม ซึ่งปรากฏเหตุการณ์มากกว่าหนึ่งในสามของเหตุการณ์ทั้งหมด ขณะที่เดือนกุมภาพันธ์พบเหตุการณ์ในลำดับถัดมา ส่วนช่วงกลางปี โดยเฉพาะเดือนกรกฎาคมและสิงหาคม แม้จะมีจำนวนเหตุการณ์น้อยกว่า แต่ยังคงปรากฏอยู่ในกลุ่ม Top 20 อย่างต่อเนื่อง สะท้อนให้เห็นว่าค่า area-mean EV สูงสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในช่วงฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและช่วงฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ แม้ลักษณะเชิงกายภาพของระบบอากาศและทะเลในแต่ละฤดูจะแตกต่างกัน

ในด้านการกระจายตามปี เหตุการณ์ Top 20 กระจายตัวครอบคลุมเกือบทุกปีในช่วงเวลาศึกษา โดยบางปีปรากฏเหตุการณ์มากกว่าหนึ่งครั้ง เช่น ปี 2019, 2021, 2023 และ 2024 ขณะที่บางปีมีเพียงเหตุการณ์เดียว ทั้งนี้ไม่พบว่ามีปีใดปีหนึ่งที่มีเหตุการณ์กระจุกตัวมากผิดปกติเมื่อเทียบกับปีอื่น ๆ ลักษณะดังกล่าวสะท้อนว่าเหตุการณ์ที่มีค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ของ EV สูงไม่ได้เป็นผลจากปีใดปีหนึ่งโดยเฉพาะ แต่เป็นลักษณะของความแปรปรวนระหว่างปีที่เกิดขึ้นเป็นระยะตลอดช่วงเวลาการศึกษา

เมื่อพิจารณาค่าดัชนีค่าสูงสุด (max) พบว่าเหตุการณ์ที่มีค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ของ EV สูง ไม่จำเป็นต้องเป็นเหตุการณ์ที่มีค่าดัชนี EV สูงสุดมากที่สุดเสมอไป ในหลายกรณี ค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ที่มีค่าสูงในขณะที่ค่าดัชนี EV สูงสุดอยู่ในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับเหตุการณ์อื่น ๆ ในกลุ่มเดียวกัน ลักษณะเช่นนี้สะท้อนว่าเหตุการณ์ดังกล่าวมีการยกระดับของพลังงานการไหลและคลื่นในพื้นที่กว้างมากกว่าการเกิดค่ารุนแรงเฉพาะจุดเพียงบางตำแหน่ง

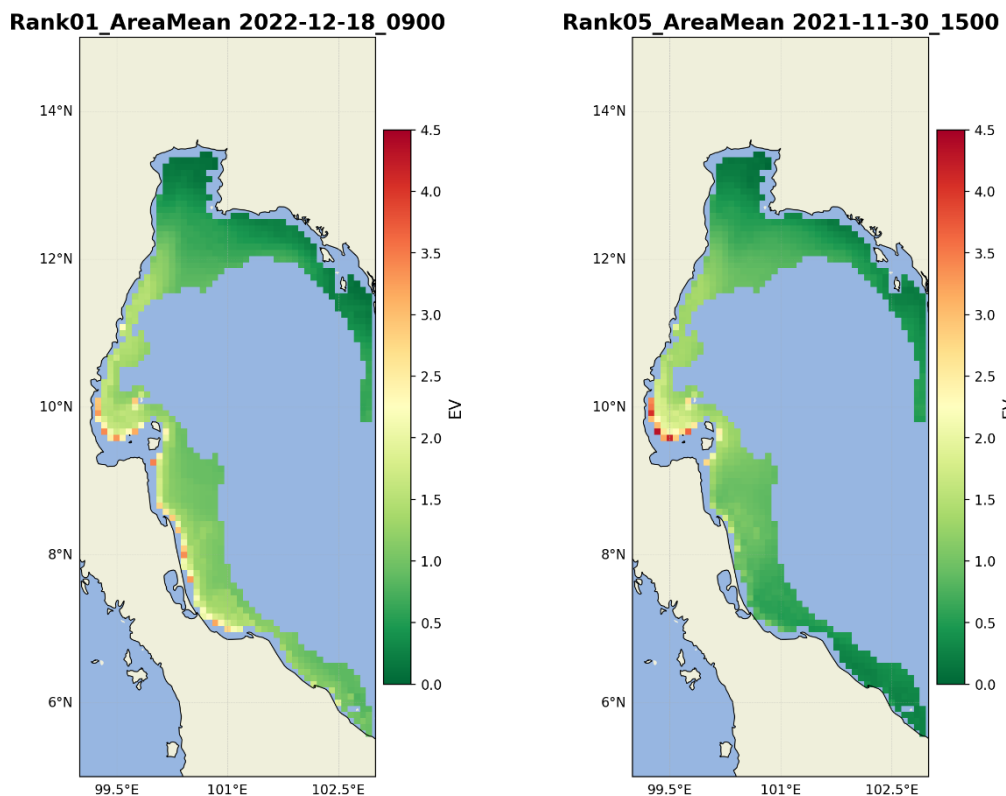
โดยรวมแล้ว ตารางที่ 2 แสดงให้เห็นรูปแบบของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นซ้ำในบางช่วงฤดูกาล มีการกระจายตัวข้ามหลายปี และมีลักษณะเด่นด้านความต่อเนื่องเชิงพื้นที่ที่มากกว่าความรุนแรงเฉพาะจุด ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงประจักษ์ที่ช่วยอธิบายลักษณะของเหตุการณ์พลังงานทะเลในอ่าวไทยได้ในเชิงเวลาและเชิงพื้นที่

เมื่อพิจารณาสัดส่วนอิทธิพลขององค์ประกอบจากคลื่นและกระแสน้ำที่มีต่อดัชนี Exposure Velocity พบว่าโดยภาพรวมแล้ว ค่า EV-Index ในอ่าวไทยมีอิทธิพลมาจากคลื่นเป็นองค์ประกอบหลัก ขณะที่กระแสน้ำมีบทบาทรองลงมาอย่างชัดเจน โดยเฉลี่ยแล้วสัดส่วนอิทธิพลของกระแสน้ำมีค่าประมาณ ร้อยละ 15–20 ของค่า EV-Index ทั้งหมด ส่วนที่เหลือเป็นอิทธิพลจากคลื่น

อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ที่ในระดับเหตุการณ์รายครั้งแสดงให้เห็นว่า บทบาทของกระแสน้ำไม่ได้คงที่ตลอดเวลา โดยในบางเหตุการณ์พบว่าสัดส่วนอิทธิพลจากกระแสน้ำมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยอย่างชัดเจน ตัวอย่างเช่น เหตุการณ์ใน ลำดับที่ 3, 13 และ 14 ซึ่งกระแสน้ำมีส่วนร่วมต่อค่า

EV Index ในระดับที่สูงกว่าปกติเมื่อเทียบกับเหตุการณ์อื่น ๆ ในกลุ่มเดียวกัน สะท้อนให้เห็นว่าในบางช่วงเวลา แรงกระทำจากกระแสน้ำสามารถมีบทบาทสำคัญต่อความรุนแรงโดยรวมของเหตุการณ์ได้ แม้ว่าโดยทั่วไปคลื่นจะยังคงเป็นปัจจัยหลักก็ตาม

ลักษณะดังกล่าวบ่งชี้ว่า EV-Index สามารถทำหน้าที่เป็นตัวชี้วัดเชิงบูรณาการที่สะท้อนปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นและกระแสน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในการแยกแยะเหตุการณ์ที่มีลักษณะขับเคลื่อนด้วยคลื่นเป็นหลัก ออกจากเหตุการณ์ที่กระแสน้ำมีบทบาทเด่นมากขึ้น ซึ่งมีนัยสำคัญต่อการประเมินความเสี่ยงของโครงสร้างชายฝั่งและกิจกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในบริบทที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 9 การเปรียบเทียบรูปแบบการกระจายเชิงพื้นที่ของค่า EV-Index ระหว่างเหตุการณ์รุนแรงลำดับที่ 1 และลำดับที่ 5

จากภาพที่ 9 แสดงให้เห็นว่า ค่า EV-Index เฉลี่ยเชิงพื้นที่ ที่สูงกว่าไม่ได้หมายความว่า จะก่อให้เกิดอันตรายต่อกระชังเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระดับพื้นที่ที่ย่อมมากกว่าเสมอไป โดยเฉพาะในกรณีที่มีรูปแบบการกระจายเชิงพื้นที่ของแรงกระทำแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

จากการเปรียบเทียบเหตุการณ์ที่มีความรุนแรง ลำดับที่ 1 กับเหตุการณ์ ลำดับที่ 5 พบว่า เหตุการณ์ลำดับที่ 1 มีลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่า EV-Index ครอบคลุมพื้นที่กว้างกว่า โดยเฉพาะตามแนวชายฝั่งด้านตะวันตกของอ่าวไทยตั้งแต่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ลงมาจนถึงจังหวัดปัตตานี ซึ่งส่งผลให้ค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ของทั้งอ่าวอยู่ในระดับสูง อย่างไรก็ตาม ค่า EV-Index สูงสุดรายจุดของเหตุการณ์นี้มีค่าเพียง 3.46

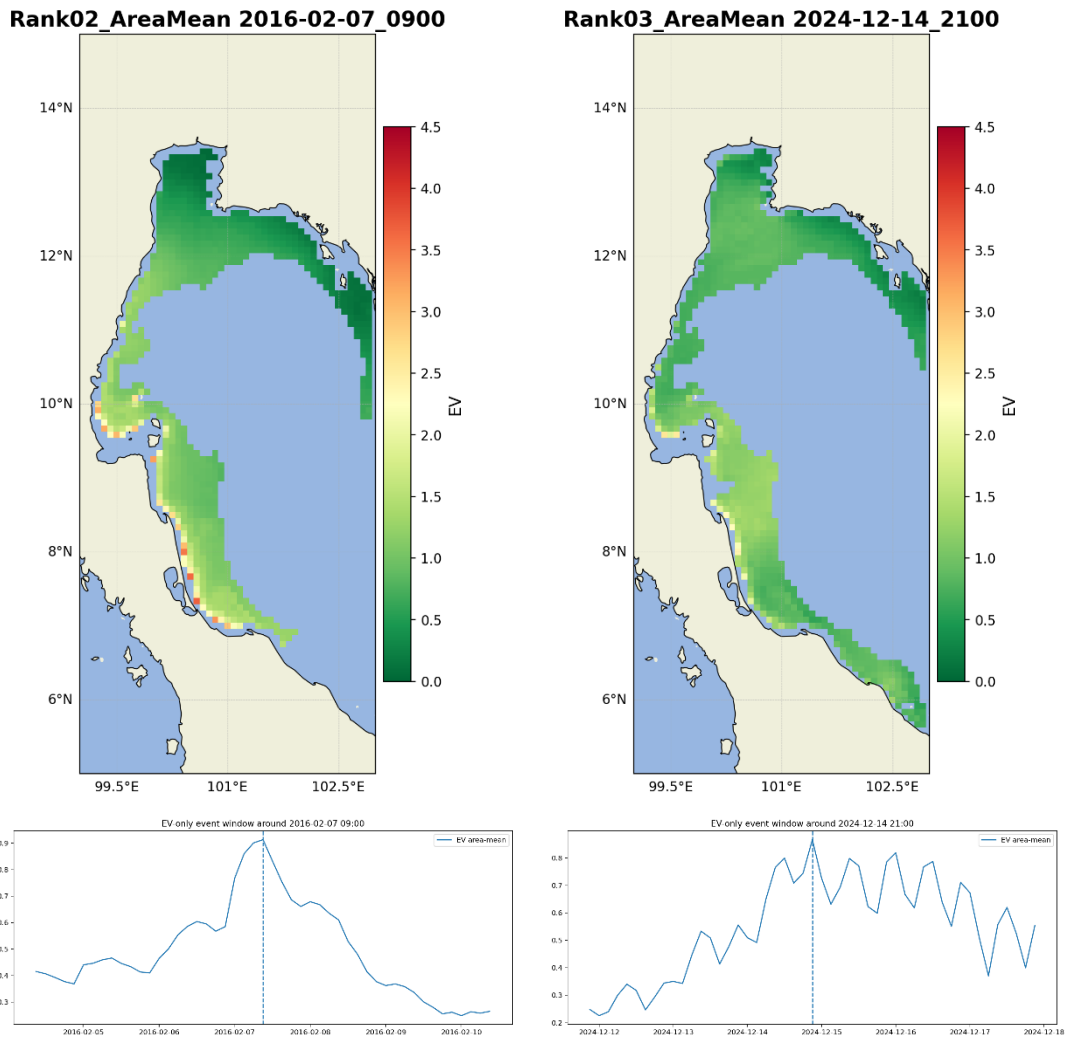
ในทางตรงกันข้าม เหตุการณ์ลำดับที่ 5 แสดงรูปแบบการเพิ่มขึ้นของค่า EV-Index ที่มีขอบเขตเชิงพื้นที่แคบกว่า แต่มีความรุนแรงเฉพาะจุดสูงกว่าอย่างชัดเจน โดยพบค่า EV-Index สูงสุดรายจุดสูงถึง 4.31 ซึ่งมากกว่าค่า EV สูงสุดของเหตุการณ์ลำดับที่ 1 แม้ว่าค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ของเหตุการณ์ลำดับที่ 5 จะต่ำกว่า

ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การจัดอันดับเหตุการณ์โดยอาศัยค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ (*area-average ranking*) มีความเหมาะสมในการประเมินภาพรวมของความรุนแรงในระดัทั้งอ่าว และการระบุเหตุการณ์ที่ส่งผลกระทบต่อในวงกว้าง อย่างไรก็ตาม วิธีดังกล่าวอาจไม่สามารถเป็นตัวแทนของเหตุการณ์สุดขั้วที่ส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงในระดับพื้นที่ย่อยหรือเฉพาะจุดได้อย่างเพียงพอ ซึ่งมีนัยสำคัญต่อการประเมินความเสี่ยงของกระชังเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระดับพื้นที่เฉพาะ

จากภาพที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ของค่า EV-Index ระหว่างเหตุการณ์ที่มีความรุนแรง ลำดับที่ 2 และ ลำดับที่ 3 ซึ่งมีค่า EV-Index เฉลี่ยเชิงพื้นที่ใกล้เคียงกัน คือ 0.91 และ 0.87 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม แม้ค่าความรุนแรงโดยรวมจะอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน แต่ทั้งสองเหตุการณ์มีลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่า EV-Index ตามเวลาแตกต่างกันอย่างชัดเจน

สำหรับเหตุการณ์ลำดับที่ 2 ค่า EV-Index ได้รับอิทธิพลหลักจากคลื่น โดยมีสัดส่วนจากคลื่นประมาณ ร้อยละ 86 และจากกระแสน้ำประมาณ ร้อยละ 14 ส่งผลให้รูปแบบการเพิ่มขึ้นของค่า EV Index ตามเวลาเป็นไปอย่างค่อนข้างเรียบ มีการสะสมพลังงานอย่างต่อเนื่อง และปรากฏยอดค่าสูงสุดที่ค่อนข้างชัดเจน โดยมีค่า EV-Index สูงสุดรายจุดเท่ากับ 3.67

ในทางตรงกันข้าม เหตุการณ์ลำดับที่ 3 แสดงให้เห็นบทบาทของกระแสน้ำที่เด่นชัดมากขึ้น โดยมีสัดส่วนอิทธิพลจากกระแสน้ำสูงถึงประมาณ ร้อยละ 35 ขณะที่อิทธิพลจากคลื่นอยู่ที่ประมาณ ร้อยละ 65 ลักษณะดังกล่าวสะท้อนออกมาในรูปแบบกราฟเชิงเวลาที่มีความผันผวนถี่กว่า โดยค่า EV-Index เพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันเป็นช่วง ๆ คล้ายลักษณะ “ฟันเลื่อย” และให้ค่า EV-Index สูงสุดรายจุดที่ต่ำกว่า คือ 2.59



ภาพที่ 10 การเปรียบเทียบรูปแบบเชิงพื้นที่และเชิงเวลาของค่า EV-Index ระหว่างเหตุการณ์รุนแรง ลำดับที่ 2 และลำดับที่ 3

จากการเปรียบเทียบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า เหตุการณ์ที่ขับเคลื่อนด้วยอิทธิพลของ กระแสน้ำในสัดส่วนที่สูงกว่ามักแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า EV-Index ที่มีความถี่สูงและผันผวนมากกว่า ขณะที่เหตุการณ์ที่มีอิทธิพลจากคลื่นเป็นหลักจะมีรูปแบบการเพิ่มขึ้นของค่า EV-Index ที่เรียกว่า และให้ยอดค่าสูงสุดที่เด่นชัดกว่าในช่วงเวลาสั้น ๆ ซึ่งสะท้อนถึงความแตกต่างของกลไกทางกายภาพที่ควบคุมความรุนแรงของแต่ละเหตุการณ์

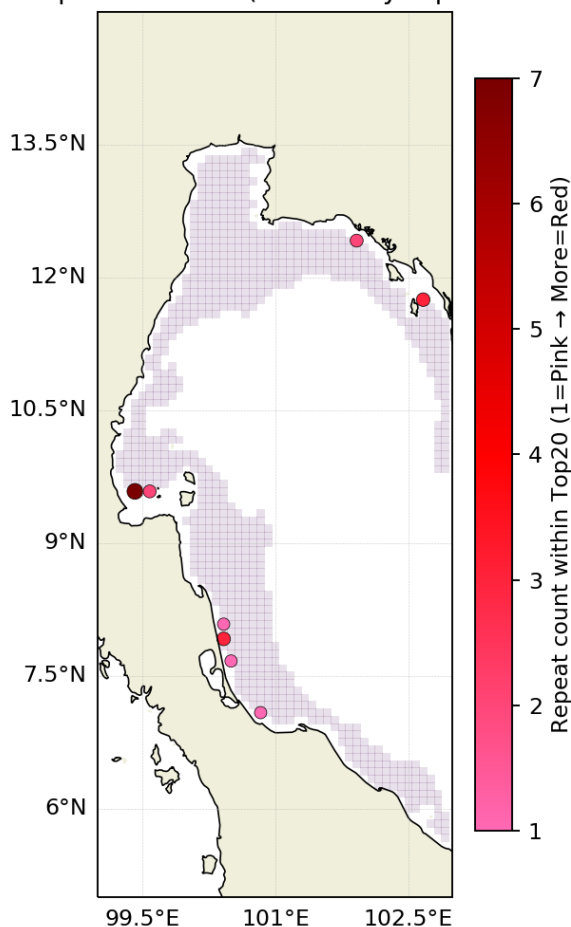
### 3.6 การวิเคราะห์เหตุการณ์ EV-Index สูงสุด 20 อันดับแรกและรูปแบบการเกิดซ้ำเชิงพื้นที่

เพื่อทำความเข้าใจลักษณะเชิงพื้นที่ของเหตุการณ์ที่มีค่า EV-Index สูงสุด การศึกษานี้ได้คัดเลือกเหตุการณ์ที่มีค่า EV-Index สูงสุด 20 อันดับแรกจากชุดข้อมูลย้อนหลัง โดยใช้หลักการ declustering เพื่อหลีกเลี่ยงการนับเหตุการณ์ที่เกิดใกล้เคียงกันในเชิงเวลา จากนั้นได้ระบุตำแหน่งกริดที่มีค่า EV-Index สูงสุดในแต่ละเหตุการณ์ และวิเคราะห์ความถี่ของการเกิดซ้ำในตำแหน่งเดียวกัน โดยข้อมูลตำแหน่งและค่าดัชนีของแต่ละเหตุการณ์ถูกจัดเก็บในรูปแบบตาราง และนำมาสร้างแผนที่แสดงตำแหน่งการเกิดซ้ำเพื่อวิเคราะห์รูปแบบการกระจุกตัวเชิงพื้นที่

**ตารางที่ 3** รายละเอียดเหตุการณ์ EV-Index สูงสุด 20 อันดับแรก ประกอบด้วยลำดับเหตุการณ์ วัน เวลาเกิดเหตุ พิกัดตำแหน่งกริดที่มีค่า EV สูงสุด และค่า EV ที่ตรวจพบ

| อันดับ | เวลา             | ปี   | เดือน | lon    | lat   | ค่า EV |
|--------|------------------|------|-------|--------|-------|--------|
| 1      | 30/11/2021 12:00 | 2021 | 11    | 99.58  | 9.58  | 4.87   |
| 2      | 7/2/2016 3:00    | 2016 | 2     | 99.42  | 9.58  | 3.88   |
| 3      | 25/2/2022 15:00  | 2022 | 2     | 100.42 | 8.08  | 3.58   |
| 4      | 18/12/2022 21:00 | 2022 | 12    | 99.42  | 9.58  | 3.50   |
| 5      | 24/12/2023 3:00  | 2023 | 12    | 99.42  | 9.58  | 3.46   |
| 6      | 5/11/2017 3:00   | 2017 | 11    | 99.42  | 9.58  | 3.18   |
| 7      | 25/1/2016 18:00  | 2016 | 1     | 100.50 | 7.67  | 3.17   |
| 8      | 3/8/2020 0:00    | 2020 | 8     | 102.67 | 11.75 | 3.17   |
| 9      | 17/9/2015 3:00   | 2015 | 9     | 102.67 | 11.75 | 3.16   |
| 10     | 4/12/2022 15:00  | 2022 | 12    | 99.58  | 9.58  | 3.15   |
| 11     | 6/12/2019 9:00   | 2019 | 12    | 99.42  | 9.58  | 3.07   |
| 12     | 17/6/2018 21:00  | 2018 | 6     | 102.67 | 11.75 | 3.04   |
| 13     | 19/9/2020 9:00   | 2020 | 9     | 101.92 | 12.42 | 2.99   |
| 14     | 30/12/2016 12:00 | 2016 | 12    | 99.42  | 9.58  | 2.96   |
| 15     | 30/11/2017 6:00  | 2017 | 11    | 100.42 | 7.92  | 2.94   |
| 16     | 31/8/2019 3:00   | 2019 | 8     | 101.92 | 12.42 | 2.93   |
| 17     | 16/12/2024 3:00  | 2024 | 12    | 99.42  | 9.58  | 2.90   |
| 18     | 26/2/2017 21:00  | 2017 | 2     | 100.42 | 7.92  | 2.88   |
| 19     | 31/12/2021 9:00  | 2021 | 12    | 100.83 | 7.08  | 2.87   |
| 20     | 27/12/2015 21:00 | 2015 | 12    | 100.42 | 7.92  | 2.87   |

Max Top20 locations (colored by repeat count)



ภาพที่ 11 ตำแหน่งกริดที่มีค่า EV-Index สูงสุดของเหตุการณ์ 20 อันดับแรกในพื้นที่ศึกษา โดยสีของจุดแสดงจำนวนครั้งที่ตำแหน่งดังกล่าวปรากฏอยู่ในกลุ่ม Top-20

จากภาพที่ 11 พบว่าเหตุการณ์ EV-Index สูงสุด 20 อันดับแรกไม่ได้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ศึกษา แต่มีแนวโน้มกระจุกตัวในบางบริเวณของอ่าวไทยอย่างชัดเจน โดยเฉพาะบริเวณชายฝั่งด้านตะวันตกและบางส่วนของชายฝั่งตะวันออก ซึ่งบางตำแหน่งปรากฏซ้ำมากกว่า 1 ครั้งในกลุ่ม Top-20 สะท้อนถึงความอ่อนไหวเชิงพลวัตของพื้นที่ดังกล่าวต่อแรงกระทำจากคลื่นและกระแสน้ำ

เมื่อพิจารณาร่วมกับข้อมูลในตารางที่ 3 พบว่าเหตุการณ์ที่มีค่า EV-Index สูงสุดส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่วงฤดูกลางฤดูร้อนตะวันออกเฉียงเหนือ โดยเฉพาะในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงกุมภาพันธ์ ซึ่งเป็นช่วงที่ลมมรสุมมีความต่อเนื่องและมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของคลื่นและกระแสน้ำในอ่าวไทยอย่างชัดเจน

นอกจากนี้ ตำแหน่งที่ปรากฏซ้ำในกลุ่มเหตุการณ์ Top-20 ยังมีแนวโน้มกระจุกตัวในบางบริเวณอย่างสม่ำเสมอ สะท้อนถึงความอ่อนไหวเชิงพลวัตของพื้นที่ดังกล่าวต่อแรงกระทำทางกายภาพจากทะเล ไม่เพียงแต่ในลักษณะเหตุการณ์เฉียบพลัน แต่รวมถึงความเสี่ยงสะสมในระยะยาว ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับการวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ระดับสูงในหัวข้อก่อนหน้านี้ ซึ่งแสดงแนวโน้มความรุนแรงที่เพิ่มขึ้นในช่วงฤดูกาลเดียวกัน

รูปแบบการเกิดซ้ำเชิงพื้นที่ดังกล่าวสนับสนุนแนวคิดที่ว่า EV-Index สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการระบุ “พื้นที่เสี่ยงสูงเชิงพลวัต” ของอ่าวไทย และมีศักยภาพในการนำไปใช้กำหนดพื้นที่เฝ้าระวังหรือจัดระดับความเสี่ยงเชิงพื้นที่ในขั้นตอนการวิเคราะห์ถัดไป

### 3.7 การแบ่งพื้นที่เสี่ยงตามระดับ EV-Index

เพื่อจัดทำแผนที่ “การแบ่งเขตความเสี่ยง” (risk zoning) ของ EV-Index ให้สอดคล้องกับการประเมินความเสี่ยงเชิงพื้นที่ การศึกษานี้กำหนดให้ความเสี่ยงประกอบด้วย 2 มิติหลัก ได้แก่ (1) ความรุนแรงของแรงกระทำ และ (2) โอกาส/ความถี่ในการเกิดเหตุการณ์รุนแรง จึงนำเสนอเป็นแผนที่ 2 แฉก โดยแฉกซ้ายใช้ค่า Intensity (P95) ของ EV-Index ในแต่ละกริดจากข้อมูลทุกช่วงเวลาในรอบปี 2015–2024 (ภายในขอบเขตพื้นที่ศึกษา) เพื่อแทน “ระดับความรุนแรงสูงที่เกิดขึ้นเป็นครั้งคราวแต่ไม่ใช่ค่าสุดโต่งที่สุด” ซึ่งเหมาะกับการสื่อสารความเสี่ยงมากกว่าค่า Pmax ที่ไวต่อค่าผิดปกติ

แฉกขวาแสดงค่า Hotspot Fraction ซึ่งเป็นตัวชี้วัดว่า “ตำแหน่งใดเกิดเหตุการณ์รุนแรงซ้ำบ่อยเพียงใด” โดยมีวิธีคำนวณทำเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นแรก เรากำหนดก่อนว่า “ช่วงเวลาใดถือว่าเป็นเหตุการณ์รุนแรง” โดยพิจารณาค่า EV-Index สูงสุดของทั้งพื้นที่ในแต่ละช่วงเวลา หากค่าสูงสุดนั้นมีค่าสูงกว่าค่าระดับวิกฤต (ซึ่งกำหนดจากค่าเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 95 ของข้อมูลทั้งหมด) จะถือว่าช่วงเวลานั้นเป็นเหตุการณ์รุนแรงหนึ่งครั้ง

ขั้นที่สอง สำหรับแต่ละเหตุการณ์รุนแรงดังกล่าว จะเลือกดู 20 ตำแหน่งที่มีค่า EV สูงที่สุดในช่วงเวลานั้น (Top-20) และเพิ่มตัวนับให้กับตำแหน่งเหล่านั้น

ขั้นสุดท้าย เมื่อนับครบทุกเหตุการณ์แล้ว จะนำจำนวนครั้งที่แต่ละตำแหน่งถูกนับ มาหารด้วยจำนวนเหตุการณ์รุนแรงทั้งหมด เพื่อให้ได้ค่าเป็น “สัดส่วน” หรือความถี่ของการเกิดซ้ำ

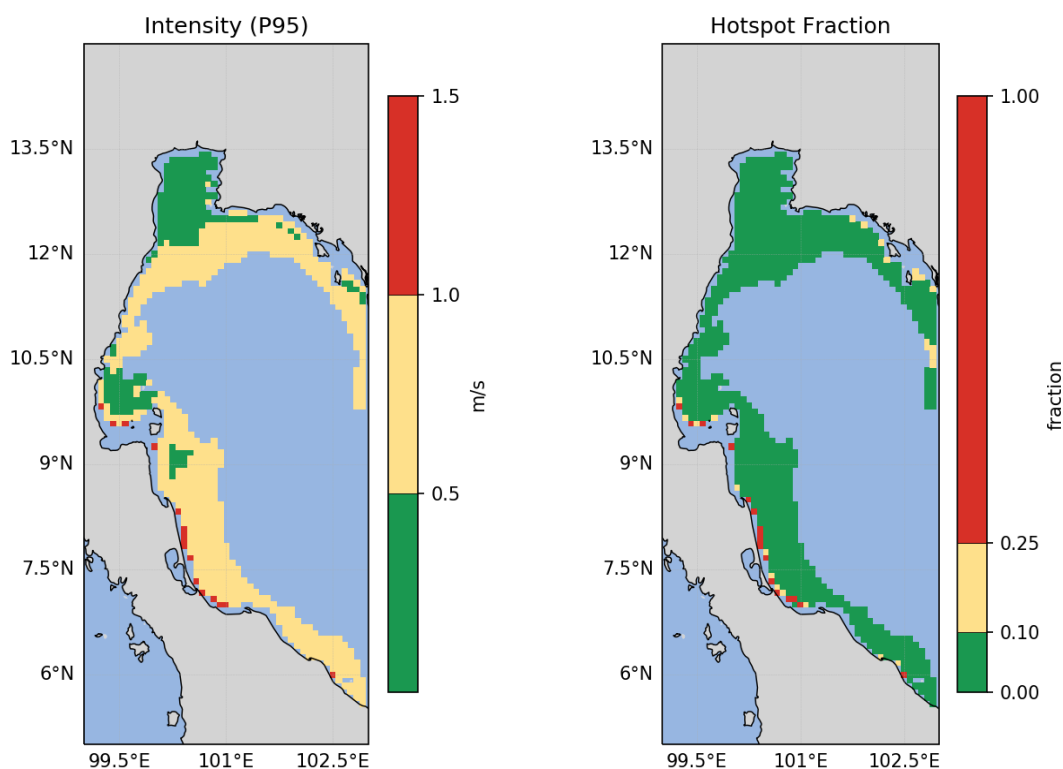
ดังนั้น ค่า Hotspot Fraction จึงสะท้อนว่า บริเวณนั้น ๆ ปรากฏเป็นจุดที่มีค่า EV สูงบ่อยเพียงใด เมื่อเกิดเหตุการณ์รุนแรงในอ่าวไทย ยกตัวอย่างเช่น หากพื้นที่หนึ่งมีค่า Hotspot Fraction เท่ากับ 0.25 หมายความว่า เมื่อเกิดเหตุการณ์รุนแรง 4 ครั้ง พื้นที่นั้นจะปรากฏเป็นหนึ่งในตำแหน่งที่มีค่า EV สูงที่สุดอย่างน้อย 1 ครั้ง

ในด้านการกำหนดสเกล สีของทั้งสองแฉกใช้การแบ่งระดับ 3 ชั้น (เขียว-เหลือง-แดง) เพื่อให้ตีความเป็น “เขตความเสี่ยง” ได้โดยตรง โดยแฉกซ้าย (Intensity) สร้างขอบเขตชั้นสีจากค่า P95 สูงสุดของพื้นที่ศึกษา แล้วปรับเพดานให้เป็นค่ากลมด้วยช่วงชั้น 0.5 ก่อนแบ่งเป็น 3 ช่วงหลัก

(low/medium/high) ส่วนแหวงขวา (Hotspot Fraction) ใช้เกณฑ์แบ่งชั้นที่ 0.10 และ 0.25 (และถึง 1.00) เพื่อสะท้อนความถี่การเกิดซ้ำของจุดเสี่ยงในระดับต่ำ-ปานกลาง-สูงอย่างชัดเจน

ในการกำหนดช่วงระดับของค่า Hotspot Fraction มิได้แบ่งช่วงแบบเชิงเส้น (linear interval) ที่มีระยะเท่ากัน แต่ใช้เกณฑ์ 0.10 และ 0.25 เป็นค่าขีดแบ่ง เนื่องจากการกระจายของค่า Hotspot Fraction มีลักษณะเบ้ไปทางค่าต่ำ (skewed distribution) กล่าวคือ กริดส่วนใหญ่มีความถี่ใกล้ศูนย์ ขณะที่มียังบางบริเวณที่มีค่าความถี่สูงเด่นอย่างชัดเจน

ค่าขีด 0.10 สะท้อนกริดที่ปรากฏในกลุ่มเหตุการณ์รุนแรงอย่างน้อยประมาณร้อยละ 10 ของเหตุการณ์ทั้งหมด ขณะที่ค่าขีด 0.25 แสดงถึงการเกิดซ้ำในระดับหนึ่งในสี่ของเหตุการณ์ ซึ่งสามารถตีความได้ว่าเป็นจุดเสี่ยงที่มีความต่อเนื่องเชิงพลวัตมากกว่าพื้นที่ทั่วไป การเลือกช่วงดังกล่าวจึงมีพื้นฐานจากทั้งลักษณะการกระจายของข้อมูลและการตีความเชิงความเสี่ยง มากกว่าการแบ่งช่วงตัวเลขแบบสม่ำเสมอ



ภาพที่ 12 แผนที่ความเสี่ยง EV-Index ในพื้นที่ศึกษา (2015–2024) แสดง 2 แฉง ได้แก่ (ซ้าย) Intensity (P95) และ (ขวา) Hotspot Fraction (Top-20 ภายใต้เหตุการณ์รุนแรง)

เมื่อพิจารณาแผนที่ทั้งสองแฉงร่วมกัน พบว่า บริเวณอ่าวไทยตอนบน (รูปตัว ก) แสดงค่า Intensity (P95) และ Hotspot Fraction อยู่ในระดับต่ำโดยส่วนใหญ่ สะท้อนว่าพื้นที่ดังกล่าวมี

ความรุนแรงของค่า EV ไม่สูงเมื่อเทียบกับส่วนอื่นของอ่าว และไม่ปรากฏเป็นจุดที่เกิดซ้ำบ่อยในกลุ่มเหตุการณ์รุนแรง ทั้งนี้อาจสัมพันธ์กับลักษณะอ่าวที่ตื้นและได้รับการกำบังจากแนวชายฝั่ง ทำให้พลังงานคลื่นและการไหลเวียนของกระแสน้ำมีแนวโน้มลดทอนลงก่อนเข้าสู่พื้นที่ตอนใน

ในเชิงเปรียบเทียบ พบว่าฝั่งตะวันออกของอ่าวไทย (แนวชายฝั่งจังหวัดชลบุรี ระยอง จันทบุรี และตราด) มีค่า Intensity อยู่ในระดับปานกลางถึงค่อนข้างสูงในบางช่วง แต่ค่า Hotspot Fraction โดยรวมไม่สูงเด่นมากนัก แสดงลักษณะของพื้นที่ที่อาจเผชิญความรุนแรงสูงเป็นครั้งคราว ตามทิศลมมรสุมหรือพายุเฉพาะเหตุการณ์ อย่างไรก็ตาม ความถี่ของการเกิดซ้ำยังไม่สูงมากเมื่อเทียบกับบางส่วนของฝั่งตะวันตก

ขณะที่ ฝั่งตะวันตกของอ่าวไทย โดยเฉพาะแนวชายฝั่งจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ชุมพร และบางส่วนของสุราษฎร์ธานี แสดงค่า Hotspot Fraction ค่อนข้างสูงต่อเนื่องตามแนวชายฝั่ง และในบางจุดมีค่า Intensity อยู่ในระดับสูงร่วมด้วย สะท้อนว่าพื้นที่ดังกล่าวมีแนวโน้มเป็น “พื้นที่เสี่ยงสูงเชิงพลวัต” กล่าวคือ ไม่เพียงแต่เผชิญความรุนแรงของแรงกระทำจากคลื่นและกระแสน้ำในระดับสูงเท่านั้น แต่ยังมีการเกิดซ้ำบ่อยในเหตุการณ์รุนแรงหลายครั้ง

โดยเฉพาะบริเวณชายฝั่งตอนล่างของจังหวัดชุมพร ต่อเนื่องถึงแนวชายฝั่งตอนบนของจังหวัดสุราษฎร์ธานี และบางช่วงของจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ปรากฏเป็นจุดสีแดงในทั้งสองฝั่ง ซึ่งหมายถึงพื้นที่ที่มีทั้งความรุนแรงสูงและความถี่ของการเกิดซ้ำสูง พื้นที่เหล่านี้สอดคล้องกับแนวชายฝั่งที่เปิดรับลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือโดยตรง และมีการรับพลังงานจากคลื่นอย่างต่อเนื่องตามแนวชายฝั่ง ทำให้เป็นบริเวณที่ควรได้รับการพิจารณาเป็นพิเศษในการกำหนดเขตเฝ้าระวังหรือวางแผนการจัดการพื้นที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง

การพิจารณาทั้งสองมิติร่วมกันจึงช่วยให้เห็นภาพความแตกต่างเชิงพื้นที่ของอ่าวไทยอย่างชัดเจน ตั้งแต่อ่าวไทยตอนบนที่มีความเสี่ยงต่ำ ไปจนถึงแนวชายฝั่งตะวันตกตอนกลางและตอนล่างที่มีลักษณะความเสี่ยงสูงทั้งในเชิงความรุนแรงและความถี่ของการเกิดซ้ำ ซึ่งมีนัยสำคัญต่อการจัดระดับความเสี่ยงเชิงพื้นที่ในระดับจังหวัดและระดับชายฝั่ง

### 3.8 การประเมินความสอดคล้องของค่า EV-Index กับเหตุการณ์รุนแรงที่รายงานจริง

เพื่อประเมินความสอดคล้องระหว่างค่า EV-Index กับเหตุการณ์ความเสียหายที่เกิดขึ้นจริง การศึกษานี้ได้คัดเลือกเหตุการณ์รุนแรงจำนวน 4 เหตุการณ์ที่มีรายงานผ่านสื่อมวลชนและแหล่งข้อมูลออนไลน์ในช่วงปี 2015–2024 และนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่า EV-Index ในบริเวณเดียวกัน

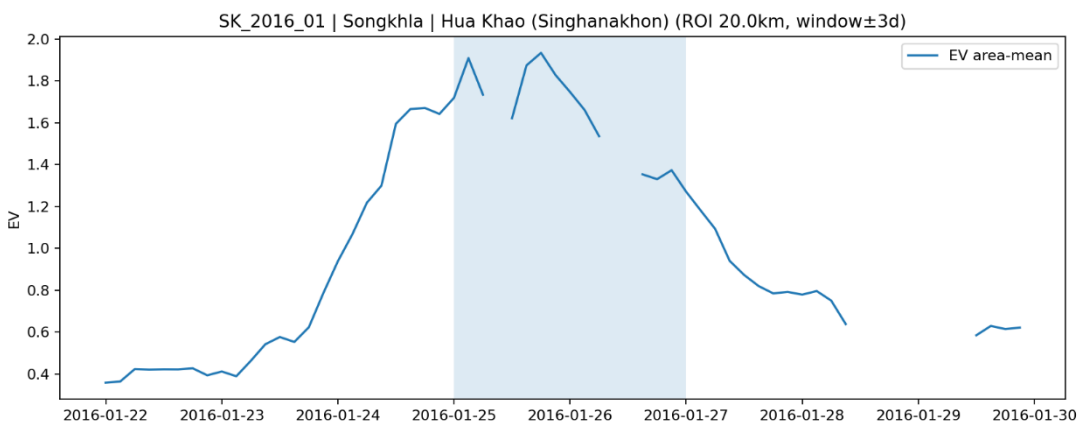
กระบวนการวิเคราะห์ดำเนินการโดยใช้สคริปต์ภาษา Python ที่พัฒนาเฉพาะสำหรับการดึงข้อมูล EV-Index ราย 3 ชั่วโมง จากฐานข้อมูลย้อนหลัง (2015–2024) ภายในรัศมี 20 กิโลเมตร

รอบตำแหน่งเหตุการณ์ (ROI radius) พร้อมทั้งปรับตำแหน่งจุดอ้างอิงให้สอดคล้องกับกริดทะเลที่มีข้อมูล EV จริง เพื่อลดผลกระทบจากตำแหน่งที่อาจตกอยู่บนพื้นดินหรือพื้นที่ไม่มีข้อมูล

สำหรับแต่ละเหตุการณ์ ได้ทำการดึงข้อมูลในช่วง ±3 วันจากวันเกิดเหตุ เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่า EV-Index ก่อน ระหว่าง และหลังเหตุการณ์ พร้อมทั้งคำนวณค่า EV เฉลี่ยเชิงพื้นที่ (EV area-mean) ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ (percentile rank) เมื่อเทียบกับฐานข้อมูลระยะยาว และค่า EV สูงสุดในพื้นที่ดังกล่าว

แนวทางนี้ช่วยให้สามารถประเมินได้ว่า เหตุการณ์ที่มีรายงานความเสียหายจริงนั้น มีลักษณะสอดคล้องกับสัญญาณความรุนแรงของ EV-Index มากน้อยเพียงใด ทั้งในแง่ของระดับความรุนแรง (intensity) และระดับความผิดปกติเมื่อเทียบกับสภาพปกติในระยะยาว

1. วันที่ 25-26 มกราคม 2559 มีรายงานว่า ผลกระทบจากคลื่นลมแรงในทะเลอ่าวไทย สร้างความเสียหายให้แก่กลุ่มเกษตรกรที่เลี้ยงปลาช่อนทะเลในกระชัง ในพื้นที่หมู่ 1 ต.หัวเขา อ.สิงหนคร จ.สงขลา กระชังเลี้ยงปลาซึ่งอยู่ในเวียงอ่าวชายฝั่งทะเลถูกคลื่นซัดพังราบเหลือเพียงเศษซากโครงสร้างจำนวนมาก ทั้งนี้ เหตุการณ์ดังกล่าวได้รับการรายงานผ่านสื่อมวลชนออนไลน์ในช่วงเวลาดังกล่าว (ผู้จัดการออนไลน์, 2559)



ภาพที่ 13 การเปลี่ยนแปลงค่า EV-Index แบบค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ (EV area-mean) ภายในรัศมี ROI 20 กม. รอบ อ.สิงหนคร ในช่วง ±3 วันจากวันเกิดเหตุ โดยพื้นที่แรเงาแสดงช่วงเวลาที่มียุทธการเหตุการณ์จริง

ตารางที่ 4 สรุปค่าดัชนี EV-Index สูงสุดที่ตรวจพบในช่วงเหตุการณ์เมื่อวันที่ 25 มกราคม 2559

| province | peak_time       | Peak_mean | mean_pct | peak_max | max_pct |
|----------|-----------------|-----------|----------|----------|---------|
| สงขลา    | 25/1/2016 21:00 | 1.83      | 99.94    | 2.35     | 99.71   |

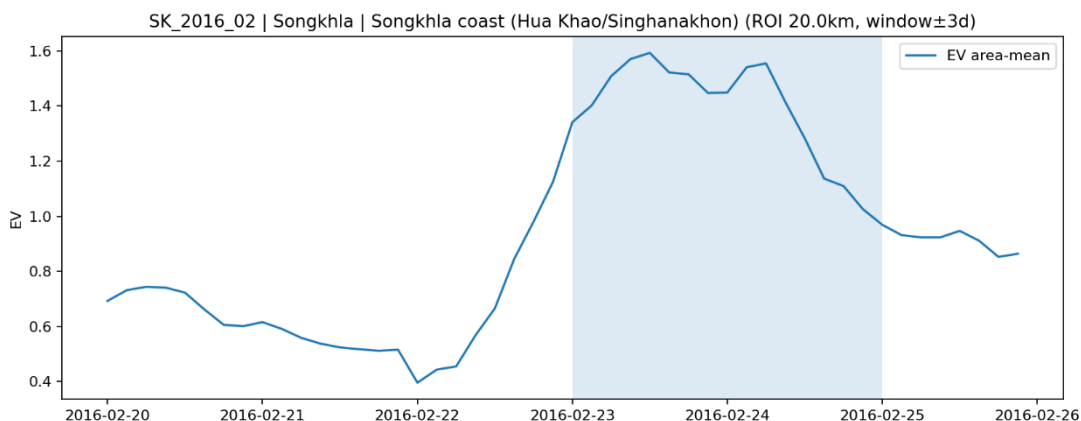
จากภาพที่ 13 และตารางที่ 4 พบว่า ในช่วงเหตุการณ์คลื่นลมแรงที่สร้างความเสียหายต่อ กระชังเลี้ยงปลาช่อนทะเลในอำเภอสิงหนคร จังหวัดสงขลา ค่า EV-Index เฉลี่ยเชิงพื้นที่ (EV area-mean) ภายในรัศมี 20 กิโลเมตร รอบจุดเกิดเหตุ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนก่อนเข้าสู่ช่วงเวลา ที่มีรายงานความเสียหาย และมีค่าสูงสุดที่ 1.83 เมื่อวันที่ 25 มกราคม 2559 เวลา 21:00 น.

ค่าดังกล่าวคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 99.94 เมื่อเทียบกับฐานข้อมูลย้อนหลังปี 2015–2024 แสดงให้เห็นว่าอยู่ในระดับสูงสุดเกือบที่สุดของสถิติทั้งหมดที่เคยเกิดขึ้นในพื้นที่เดียวกัน ขณะเดียวกัน ค่า EV-Index สูงสุดรายกริด (peak\_max) ภายในพื้นที่ศึกษามีค่าเท่ากับ 2.35 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ไทม์ที่ 99.71 ซึ่งสะท้อนว่ามีบางตำแหน่งในพื้นที่ได้รับแรงกระทำจากคลื่นและกระแสน้ำในระดับรุนแรง มากเป็นพิเศษ

จากลักษณะกราฟเส้นจะเห็นได้ว่าค่า EV-Index มีการไต่ระดับอย่างต่อเนื่องก่อนถึง จุดสูงสุด และคงอยู่ในระดับสูงหลายช่วงเวลา ก่อนจะค่อย ๆ ลดลงภายหลังเหตุการณ์ ซึ่งบ่งชี้ว่าพื้นที่ ดังกล่าวเผชิญแรงกระทำสะสมต่อเนื่องในช่วงเวลาหลายชั่วโมง ไม่ใช่เพียงค่าพุ่งสูงแบบฉับพลันระยะสั้น

ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานความเสียหายที่เกิดขึ้นจริง และสนับสนุนแนวคิดที่ว่า EV-Index สามารถสะท้อนทั้งระดับความรุนแรงและความผิดปกติเมื่อเทียบกับสภาพปกติในระยะยาว ได้อย่างมีนัยสำคัญ

2. ในช่วงวันที่ 26 กุมภาพันธ์ 2559 มีรายงานสภาพคลื่นลมในทะเลอ่าวไทยซึ่งมีกำลังแรงขึ้นอย่างต่อเนื่องมาก่อนหน้า ได้ส่งผลกระทบต่อกลุ่มเกษตรกรผู้เลี้ยงปลาในกระชังในพื้นที่ ต. หัวเขา อ.สิงหนคร จ.สงขลา เนื่องจากคลื่นได้ซัดกระหน่ำกระชังเลี้ยงปลาบริเวณชายฝั่งอย่างหนัก ทำให้อยู่ในภาวะเสี่ยงที่เสถียร และกระชังขาดจากคลื่นที่ซัดแรงตลอดเวลา ทั้งนี้ เหตุการณ์ดังกล่าวได้รับการรายงานผ่านสื่อมวลชนออนไลน์ในช่วงเวลาดังกล่าว (ผู้จัดการออนไลน์, 2559)



ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงค่า EV-Index แบบค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ (EV area-mean) ภายในรัศมี ROI 20 กม. รอบ อ.สิงหนครในช่วง  $\pm 3$  วันจากวันเกิดเหตุ โดยพื้นที่แรเงาแสดงช่วงเวลาที่มีรายงานเหตุการณ์จริง

ตารางที่ 5 สรุปค่าดัชนี EV-Index สูงสุดที่ตรวจพบในช่วงเหตุการณ์เมื่อวันที่ 26 กุมภาพันธ์ 2559

| province | peak_time       | Peak_mean | mean_pct | peak_max | max_pct |
|----------|-----------------|-----------|----------|----------|---------|
| สงขลา    | 23/2/2016 12:00 | 1.59      | 99.82    | 2.67     | 99.91   |

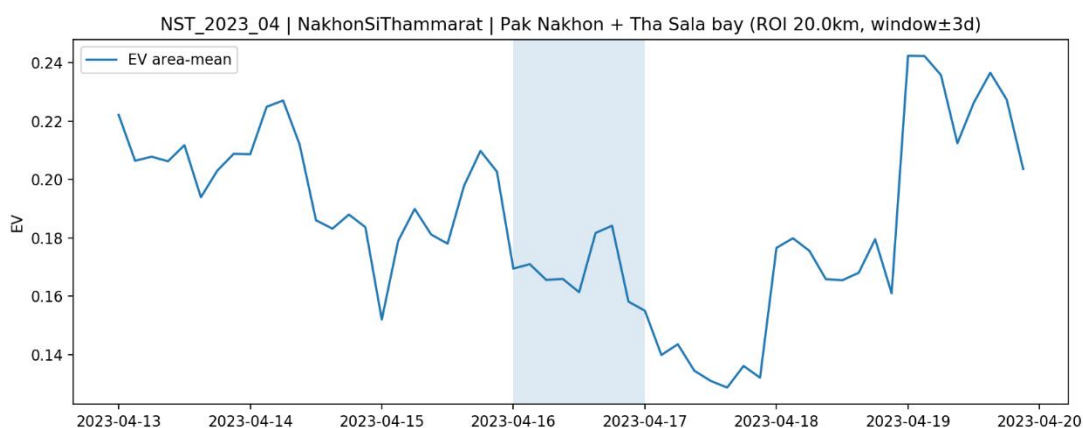
จากภาพที่ 14 และตารางที่ 5 พบว่า ในช่วงเหตุการณ์คลื่นลมแรงบริเวณชายฝั่งจังหวัดสงขลาเมื่อวันที่ 26 กุมภาพันธ์ 2559 ค่า EV-Index เฉลี่ยเชิงพื้นที่ (EV area-mean) ภายในรัศมี 20 กิโลเมตร รอบตำแหน่งเหตุการณ์ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนตั้งแต่ก่อนเข้าสู่ช่วงเวลาที่มียางานความเสียหาย และมีค่าสูงสุดที่ 1.59 เมื่อวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 12:00 น. ค่าดังกล่าวคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ 99.82 เมื่อเทียบกับฐานข้อมูลย้อนหลังปี 2015–2024 แสดงให้เห็นว่าอยู่ในกลุ่มค่าสูงสุดที่เคยเกิดขึ้นในพื้นที่เดียวกัน ขณะเดียวกัน ค่า EV-Index สูงสุดรายกริด (peak\_max) ภายในพื้นที่ศึกษามีค่าเท่ากับ 2.67 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ 99.91 ซึ่งสะท้อนว่ามีบางตำแหน่งในพื้นที่ชายฝั่งได้รับแรงกระทำจากคลื่นและกระแสน้ำในระดับรุนแรงมากเป็นพิเศษ

จากลักษณะกราฟเส้นจะเห็นว่าค่า EV-Index เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาไม่นานก่อนเข้าสู่ช่วงที่มีรายงานเหตุการณ์ และคงอยู่ในระดับสูงต่อเนื่องหลายช่วงเวลา ก่อนจะเริ่มลดลงภายหลังเหตุการณ์ ลักษณะดังกล่าวบ่งชี้ถึงแรงกระทำที่มีทั้งความรุนแรงสูงและมีความต่อเนื่องเชิงเวลา ซึ่งเพิ่มโอกาสในการสะสมความเสียหายต่อโครงสร้างกระชังเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง

ผลการวิเคราะห์ครั้งนี้จึงสะท้อนให้เห็นว่า แม้ค่า EV-Index เฉลี่ยเชิงพื้นที่จะต่ำกว่าเหตุการณ์ลำดับแรกเล็กน้อย แต่ค่ารายกริดสูงสุดกลับอยู่ในระดับสูงมาก และมีเปอร์เซ็นต์เกินร้อยละ 99

เช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานความเสียหายที่เกิดขึ้นจริง และสนับสนุนบทบาทของ EV-Index ในการใช้เป็นตัวชี้วัดความรุนแรงของแรงกระทำทางทะเลในพื้นที่ชายฝั่ง

- วันที่ 16 เมษายน 2566 อ่าวท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช เกิดพายุคลื่นลมแรงอากาศเปลี่ยนแปลงฉับพลันจากพายุหัวด้วน (Squall Line) เรือล่มนับ 20 ลำ สูญหายหลายคน ทั้งนี้ เหตุการณ์ดังกล่าวได้รับการรายงานผ่านสื่อมวลชนออนไลน์ในช่วงเวลาดังกล่าว (ไทยรัฐออนไลน์, 2566)



ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลงค่า EV-Index แบบค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ (EV area-mean) ภายในรัศมี ROI 20 กม. รอบอ่าวท่าศาลา ในช่วง  $\pm 3$  วันจากวันเกิดเหตุ โดยพื้นที่แรเงาแสดงช่วงเวลาที่มียุทธการเหตุการณ์จริง

ตารางที่ 6 สรุปค่าดัชนี EV-Index สูงสุดที่ตรวจพบในช่วงเหตุการณ์เมื่อวันที่ 16 เมษายน 2566

| province      | peak_time      | peak_mean | mean_pct | peak_max | max_pct |
|---------------|----------------|-----------|----------|----------|---------|
| นครศรีธรรมราช | 19/4/2023 0:00 | 0.25      | 63.81    | 0.34     | 65.69   |

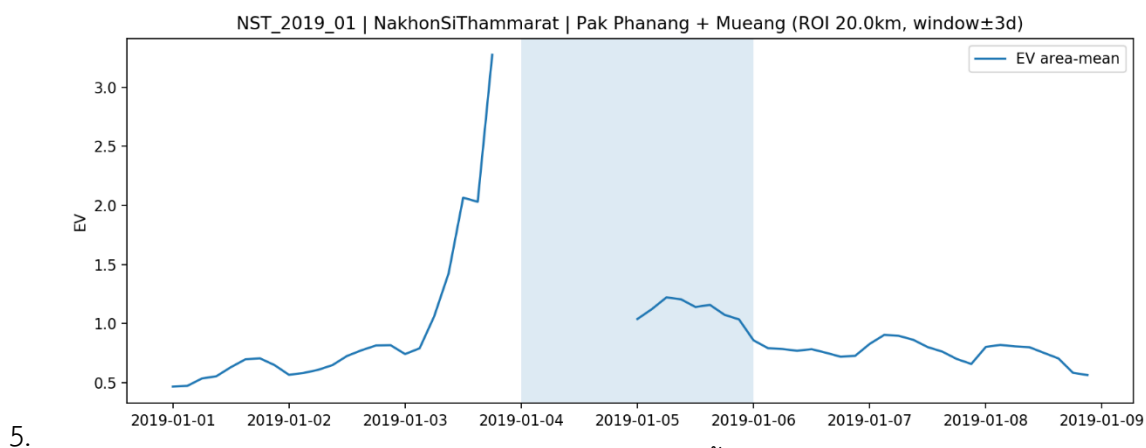
จากภาพที่ 15 และตารางที่ 6 พบว่า ในช่วงเหตุการณ์พายุหัวด้วน (Squall Line) ที่เกิดขึ้นบริเวณอ่าวปากนครและอ่าวท่าศาลา เมื่อวันที่ 16 เมษายน 2566 ค่า EV-Index เฉลี่ยเชิงพื้นที่ (EV area-mean) ภายในรัศมี 20 กิโลเมตร รอบตำแหน่งเหตุการณ์ มีค่าสูงสุดเพียง 0.25 เมื่อวันที่ 19 เมษายน 2566 เวลา 00:00 น. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ 63.81 เมื่อเทียบกับฐานข้อมูลย้อนหลังปี 2015–2024 ขณะที่ค่า EV-Index สูงสุดรายกริด (peak\_max) มีค่าเท่ากับ 0.34 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ 65.69 ซึ่งอยู่ในระดับปานกลางของสถิติทั้งหมด

จากลักษณะกราฟเส้นจะเห็นว่า ค่า EV-Index ไม่ได้มีแนวโน้มพุ่งสูงผิดปกติในช่วงเวลาที่มีรายงานความเสียหาย และไม่ปรากฏช่วงเวลาที่มีการคงอยู่ของค่าระดับสูงอย่างต่อเนื่องเหมือนกรณีเหตุการณ์มรสุมที่วิเคราะห์ก่อนหน้านี้

แม้จะมีรายงานคลื่นสูงประมาณ 2-3 เมตร และเกิดความเสียหายต่อกระชังเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและเรือประมงเป็นจำนวนมาก แต่ลักษณะของพายุหัวด้วนเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลัน มีช่วงเวลาสั้น และมีขอบเขตเชิงพื้นที่จำกัด แรงกระทำสูงสุดจึงเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้นกว่าความละเอียดเชิงเวลาของข้อมูลแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณ EV-Index นอกจากนี้ กระแสน้ำในพื้นที่อาจยังไม่ทันพัฒนาให้มีความเร็วสูงสุดคล้อยกับแรงลมฉับพลัน ทำให้ค่า EV-Index ซึ่งสะท้อนแรงกระทำสะสมในระดับเวลาหลายชั่วโมง ไม่สามารถแสดงค่าสูงเด่นชัดได้

กรณีศึกษาที่สะท้อนให้เห็นว่า EV-Index ที่คำนวณจากแบบจำลองคลื่น WAM และแบบจำลองกระแสน้ำ HYCOM นั้นมีความเหมาะสมในการประเมินเหตุการณ์ที่มีแรงกระทำต่อเนื่องในเชิงเวลา เช่น มรสุมหรือระบบลมแรงที่คงอยู่นานหลายชั่วโมงถึงหลายวัน ขณะที่เหตุการณ์ลมกระโชกหรือพายุฝนฟ้าคะนองระยะสั้นอาจไม่ถูกสะท้อนอย่างครบถ้วน ดังนั้น ในการประเมินความเสี่ยงเชิงปฏิบัติการ ควรใช้ EV-Index ร่วมกับตัวชี้วัดที่ไวต่อเหตุการณ์ฉับพลัน เพื่อให้ครอบคลุมลักษณะความเสี่ยงทั้งสองประเภท

4. อิทธิพลจาก พายุโซนร้อนปาบึก (PABUK) คลื่นซัดฝั่ง (Storm Surge) ที่ ต.ท่าบอน อ.ระโนด จ.สงขลา เมื่อวันที่ 4 - 5 มกราคม พ.ศ. 2562 (แนวนหน้า, 2562)



ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงค่า EV-Index แบบค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ (EV area-mean) ภายในรัศมี ROI 20 กม. รอบ อ.ระโนด ในช่วง  $\pm 3$  วันจากวันเกิดเหตุ โดยพื้นที่แรเงาแสดงช่วงเวลาที่มีรายงานเหตุการณ์จริง

ในเหตุการณ์พายุโซนร้อนปาบึกที่พัดขึ้นฝั่งบริเวณอ่าวไทยตอนล่างเมื่อวันที่ 4 มกราคม พ.ศ. 2562 แม้ว่าภาวะวิเคราะห์สถิติระยะยาวในงานวิจัยนี้จะตัดช่วงเหตุการณ์ดังกล่าวออกจากฐานข้อมูลหลัก เนื่องจากเป็นเหตุการณ์สุดขั้วที่อาจทำให้ค่าทางสถิติระยะยาวเกิดความเบ้และไม่สะท้อนภาพเฉลี่ยทั่วไปของ EV-Index ในอ่าวไทย แต่เมื่อพิจารณาเหตุการณ์นี้แยกต่างหาก พบว่าค่า EV-Index เฉลี่ยเชิงพื้นที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีค่าสูงเกินกว่า 3.0 ตั้งแต่วันที่ 4 มกราคม ซึ่งถือเป็นระดับที่สูงกว่าค่าปกติอย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตาม ภายหลังจากช่วงเวลาพายุขึ้นฝั่ง ไม่สามารถคำนวณค่า EV-Index ต่อเนื่องได้ ดังแสดงในภาพที่ 16 เมื่อทำการตรวจสอบข้อมูลต้นทางพบว่า ตัวแปรคาบคลื่นสูงสุด (Tp) จากแบบจำลองคลื่น WAM ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการคำนวณค่า EV ไม่สามารถคำนวณค่าได้ในช่วงเวลาที่พายุมีความรุนแรงสูงสุด ส่งผลให้การคำนวณค่า EV ในช่วงเวลาดังกล่าวไม่สมบูรณ์

กรณีศึกษาที่สะท้อนให้เห็นข้อจำกัดเชิงระบบของ EV-Index ซึ่งพึ่งพาข้อมูลจากแบบจำลองคลื่นและกระแสน้ำ หากแบบจำลองต้นทางไม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่เสถียรภายใต้สภาวะสุดขั้วได้ ค่า EV-Index ก็จะไม่สามารถสะท้อนความรุนแรงของเหตุการณ์ได้อย่างครบถ้วน ทั้งนี้ มิได้หมายความว่าเหตุการณ์ดังกล่าวไม่มีแรงกระทำรุนแรง แต่เป็นผลจากข้อจำกัดของเครื่องมือแบบจำลองที่ใช้ในการประมวลผล

ดังนั้น เหตุการณ์ปาบึกจึงชี้ให้เห็นทั้งศักยภาพของ EV-Index ในการตอบสนองต่อเหตุการณ์รุนแรงก่อนถึงจุดสูงสุด และในขณะเดียวกันก็สะท้อนข้อจำกัดด้านความเสถียรของแบบจำลองคลื่นภายใต้สภาวะสุดขั้ว ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญที่ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาระบบประเมินความเสี่ยงให้มีความครอบคลุมมากยิ่งขึ้นในอนาคต

## 4. สรุปการดำเนินการ

จากการศึกษาในบทที่ผ่านมา ได้ดำเนินการพัฒนาและวิเคราะห์ดัชนี Exposure Velocity (EV-Index) โดยบูรณาการข้อมูลความเร็วกระแสน้ำจากแบบจำลอง HYCOM และข้อมูลคลื่นทะเลจากแบบจำลอง WAM ย้อนหลังเป็นระยะเวลา 10 ปี ครอบคลุมพื้นที่อ่าวไทยทั้งหมด ภายใต้กรอบการประเมินความเสี่ยงเชิงกายภาพต่อฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง การประมวลผลข้อมูลประกอบด้วยการคำนวณค่าความเร็วเชิงวงโคจรของคลื่นและความเร็วกระแสน้ำในระดับความลึกที่เหมาะสม จากนั้นนำมาผสานเป็นดัชนี EV เพื่อสะท้อนแรงกระทำรวมที่โครงสร้างกระชังต้องเผชิญจริงในสภาพแวดล้อมทางทะเล

การวิเคราะห์เชิงสถิติได้ครอบคลุมทั้งค่าเฉลี่ยรายเดือน รายฤดูกาล และรายปี การวิเคราะห์แนวโน้มตามฤดูกาลมรสุม ตลอดจนการประเมินเหตุการณ์รุนแรงในระดับสุดโต่ง (extreme conditions) โดยใช้ค่าสถิติเปอร์เซ็นต์ไทล์ระดับสูง เช่น P90, P95 และ P99 แทนการพิจารณาค่าสูงสุดเพียงอย่างเดียว เพื่อให้สามารถสะท้อนระดับความเสี่ยงที่เกิดขึ้นซ้ำได้จริงและลดอิทธิพลของค่าผิดปกติในเชิงแบบจำลอง นอกจากนี้ ยังได้ดำเนินการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ (spatial analysis) เพื่อจำแนกความแตกต่างของระดับความเสี่ยงระหว่างพื้นที่อ่าวไทยตอนบน ตอนกลาง และตอนล่าง รวมถึงพื้นที่ชายฝั่งที่มีลักษณะภูมิประเทศแตกต่างกัน

ผลการดำเนินงานสามารถสรุป วิเคราะห์ และอภิปรายในเชิงวิชาการพร้อมทั้งข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาและการประยุกต์ใช้ในอนาคต ดังต่อไปนี้

### 4.1 สรุปผลการดำเนินการ

จากการศึกษาและวิเคราะห์ค่า EV-Index ในอ่าวไทย โดยใช้ข้อมูลคลื่นจากแบบจำลอง WAM และข้อมูลกระแสน้ำจากแบบจำลอง HYCOM ย้อนหลัง 10 ปี สามารถสรุปผลการดำเนินการที่ตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ของการศึกษาได้ 5 ประเด็นหลัก ดังนี้

#### 4.1.1 การศึกษา EV-Index ในอ่าวไทยและความเหมาะสมเชิงกายภาพในการประเมินความเสี่ยง

การคำนวณดัชนี Exposure Velocity (EV) จากผลรวมของความเร็วเชิงวงโคจรของคลื่น ( $U_w$ ) และความเร็วกระแสน้ำ ( $U_c$ ) ในระดับทราย 3 ชั่วโมง ตลอดช่วงปี พ.ศ. 2558–2567 แสดงให้เห็นว่า EV-Index สามารถสะท้อนระดับแรงกระทำรวมที่โครงสร้างฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งต้องเผชิญในแต่ละช่วงเวลาได้อย่างชัดเจน

ผลการวิเคราะห์สัดส่วนองค์ประกอบของ  $U_w$  และ  $U_c$  ในพื้นที่ตัวแทน 7 พื้นที่ พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ของอ่าวไทยมีลักษณะเป็นระบบที่คลื่นเป็นองค์ประกอบหลัก โดยเฉพาะในช่วง

เหตุการณ์รุนแรง ซึ่งคลื่นมีสัดส่วนเฉลี่ยประมาณร้อยละ 80–85 ของค่า EV ทั้งหมด ขณะที่กระแสน้ำมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 15–20 อย่างไรก็ตาม ในบางพื้นที่และบางเหตุการณ์พบว่ากระแสน้ำมีบทบาทเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ส่งผลให้เกิดลักษณะกึ่งผสม (mixed regime) หรือการเปลี่ยนแปลงกลไกเด่นภายใต้เงื่อนไขสุดขีด

ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า EV-Index สามารถสะท้อนแรงกระทำรวมจากคลื่นและกระแสน้ำ และจำแนกลักษณะกลไกที่ควบคุมความเสี่ยงในแต่ละพื้นที่ของอ่าวไทยได้อย่างเป็นระบบ

#### 4.1.2 ลักษณะเชิงพื้นที่ของความเสี่ยงและการเกิดซ้ำในพื้นที่เสี่ยงสูง

การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยระยะยาวและค่าสถิติระดับเปอร์เซ็นต์ไทล์สูง (P90, P95 และ P99) แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างความเสี่ยงของอ่าวไทยมีลักษณะการเกิดซ้ำเชิงพื้นที่อย่างชัดเจน โดยพื้นที่ที่มีค่า EV สูงในระดับ P90 ยังคงเป็นพื้นที่เดียวกันเมื่อพิจารณาในระดับ P95 และ P99

แนวชายฝั่งด้านตะวันตกของอ่าวไทย โดยเฉพาะบริเวณจังหวัดชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช และพื้นที่ต่อเนื่องลงไปทางภาคใต้ตอนล่างปรากฏเป็นพื้นที่ที่มีค่าความรุนแรงสูง และมีความถี่ของการเกิดซ้ำของเหตุการณ์รุนแรงอย่างต่อเนื่อง ในทางตรงกันข้าม พื้นที่อ่าวไทยตอนบนรูปตัว “ก” แสดงค่า EV อยู่ในระดับต่ำทั้งในเชิงค่าเฉลี่ยและระดับสุดขีด ขณะที่ฝั่งตะวันออกของอ่าวไทยมีลักษณะความรุนแรงสูงเป็นครั้งคราว แต่มีความถี่ของการเกิดซ้ำต่ำกว่าฝั่งตะวันตก

ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งกริดที่มีค่า EV สูงสุดในกลุ่มเหตุการณ์ Top-20 ยังพบการกระจุกตัวซ้ำในแนวชายฝั่งด้านตะวันตกตอนกลางถึงตอนล่าง สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ไทล์ระดับสูง และสามารถใช้ระบุพื้นที่เสี่ยงสูงเชิงพื้นที่ได้อย่างเป็นระบบ

#### 4.1.3 ลักษณะเชิงฤดูกาลและช่วงเวลาที่มีความเสี่ยงสูง

ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยรายเดือนแบบหลายปี (multi-year monthly mean) แสดงให้เห็นว่าค่า EV-Index มีลักษณะเชิงฤดูกาลชัดเจน โดยเดือนธันวาคม มกราคม และกุมภาพันธ์ เป็นช่วงที่มีค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่สูงสุด สอดคล้องกับช่วงมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่ส่งผลให้เกิดคลื่นลมแรงต่อเนื่องในอ่าวไทย

การจัดอันดับเหตุการณ์ค่า EV-Index เฉลี่ยเชิงพื้นที่สูงสุด 20 อันดับแรก พบว่ากว่าหนึ่งในสามของเหตุการณ์เกิดขึ้นในเดือนธันวาคม และส่วนใหญ่กระจุกตัวในช่วงปลายปีถึงต้นปี สะท้อนว่าความเสี่ยงระดับสูงไม่ได้เกิดแบบสุ่มตลอดปี แต่มีรูปแบบเชิงฤดูกาลที่ชัดเจน ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการวางแผนการผลิตและการบริหารความเสี่ยงของฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง

#### 4.1.4 ความแตกต่างระหว่างความรุนแรงเชิงพื้นที่ที่กว้างและความรุนแรงเฉพาะจุด

การเปรียบเทียบเหตุการณ์ที่มีค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ที่สูงกับเหตุการณ์ที่มีค่าสูงสุดรายกริดสูง แสดงให้เห็นว่าเหตุการณ์ที่ส่งผลกระทบในวงกว้าง (wide-impact events) ไม่จำเป็นต้องเป็นเหตุการณ์ที่มีค่ารุนแรงเฉพาะจุดสูงที่สุดเสมอไป ในบางกรณี เหตุการณ์ที่มีค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่สูงมีการเพิ่มขึ้นของค่า EV-Index ครอบคลุมพื้นที่ที่กว้าง แต่มีค่าสูงสุดรายจุดต่ำกว่าเหตุการณ์ที่มีลักษณะการกระจายเชิงพื้นที่แคบกว่า

การประเมินความเสี่ยงจาก EV-Index จึงควรพิจารณาทั้งมิติความรุนแรงเชิงพื้นที่ที่กว้างและความรุนแรงเฉพาะจุดควบคู่กัน เพื่อสะท้อนลักษณะผลกระทบที่แตกต่างกันต่อโครงสร้างฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และใช้ร่วมกันเพื่ออธิบายลักษณะเหตุการณ์รุนแรงได้ครบถ้วนมากขึ้น

#### 4.1.5 ความสอดคล้องของ EV-Index กับเหตุการณ์ความเสียหายจริงและขอบเขตการประยุกต์ใช้

การเปรียบเทียบค่า EV-Index กับเหตุการณ์ความเสียหายที่มีรายงานจริง พบว่าเหตุการณ์ที่มีลักษณะต่อเนื่องและแรงกระทำสะสมหลายชั่วโมงถึงหลายวัน มีค่า EV-Index อยู่ในระดับเปอร์เซ็นต์ไทล์สูงมาก (มากกว่าร้อยละ 99) และแสดงรูปแบบการเพิ่มขึ้นต่อเนื่องก่อนเกิดความเสียหาย สะท้อนความสามารถของดัชนีในการบ่งชี้ระดับความผิดปกติเมื่อเทียบกับสภาพปกติระยะยาว

ในทางตรงกันข้าม เหตุการณ์ลมกระโชกฉับพลันหรือพายุหัวด้วนซึ่งมีช่วงเวลาสั้นและขอบเขตจำกัด ไม่ปรากฏค่า EV-Index สูงเด่นชัด เนื่องจากข้อจำกัดด้านความละเอียดเชิงเวลาของข้อมูลแบบจำลองและลักษณะกลไกที่แตกต่างกัน กรณีพายุปากบึกยังสะท้อนข้อจำกัดของแบบจำลองต้นทางอย่าง WAM ภายใต้อาการสูงสุดแล้ว จึงอาจกล่าวได้ว่า EV-Index มีความเหมาะสมในการใช้ประเมินเหตุการณ์ที่มีแรงกระทำต่อเนื่องเชิงเวลา เช่น มรสุมและคลื่นลมต่อเนื่อง และมีศักยภาพในการใช้เป็นฐานข้อมูลสนับสนุนการเฝ้าระวังและการจัดการความเสี่ยงเชิงระบบ แม้จะมีข้อจำกัดต่อเหตุการณ์ฉับพลันบางประเภทก็ตาม

## 4.2 วิจารณ์ผลการดำเนินการ

จากผลการศึกษานำมาอภิปรายผล โดยเชื่อมโยงกับแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

### 4.2.1 ความสอดคล้องกับทฤษฎีอุทกพลศาสตร์และแนวคิด Hydrodynamic Exposure

แนวคิดการบูรณาการคลื่นและกระแสน้ำเข้าด้วยกันในรูปของความเร็วที่ต้องเผชิญ (Exposure Velocity) ได้รับการเสนอในงานวิจัยสากลว่าเป็นตัวแทนที่เหมาะสมของระดับพลังงาน

เชิงอุทกพลศาสตร์ที่กระชังเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำถูกกระทำ เนื่องจากโครงสร้างของกระชังในทะเลนั้นต้องเผชิญแรงรวมจากการเคลื่อนที่ของมวลน้ำทั้งสองส่วนพร้อมกัน

ผลการศึกษาพบว่าอ่าวไทยมีลักษณะเป็นระบบที่คลื่นเป็นปัจจัยนำในช่วงเหตุการณ์รุนแรง (wave-dominant regime) ซึ่งสอดคล้องกับหลักอุทกพลศาสตร์ในเขตน้ำตื้นที่คลื่นเป็นตัวกำหนดพลังงานหลักของระบบ โดยเฉพาะในช่วงมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ขณะเดียวกัน การตรวจพบพื้นที่ที่มีลักษณะกึ่งผสม (mixed regime) และการเปลี่ยนแปลงกลไกเด่นภายใต้สภาวะรุนแรง (regime shift under extreme conditions) สนับสนุนแนวคิดของ Liu et al. (2024) ที่ระบุว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นและกระแสน้ำสามารถเพิ่มการตอบสนองเชิงพลวัตของโครงสร้างได้อย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ การคำนวณความเร็วเชิงวงโคจรของคลื่นจากทฤษฎีคลื่นเชิงเส้น (Linear Wave Theory) และการเลือกใช้ระดับความลึกอ้างอิง 5 เมตร (Exposure Velocity at Reference Depth: EVRD) ยังให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับแนวทางที่เสนอโดย Dewhurst et al. (2025) ซึ่งชี้ว่าค่า EVRD มีประสิทธิภาพเพียงพอในการประเมินระดับการเปิดรับพลังงานของพื้นที่ (site exposure) แม้จะไม่ใช่ค่าที่คำนวณเฉพาะตามความลึกของโครงสร้างแต่ละประเภทโดยตรง

ดังนั้น ผลการศึกษาจึงสนับสนุนความถูกต้องเชิงทฤษฎีของการใช้ดัชนี Exposure Velocity (EV) เป็นตัวชี้วัดระดับพลังงานเชิงอุทกพลศาสตร์ที่กระชังเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำถูกกระทำในบริบทของอ่าวไทยได้อย่างเหมาะสม

#### 4.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะเชิงสถิติของค่า EV-Index ในอ่าวไทย

ในบทที่ 1 ได้กำหนดกรอบการวิเคราะห์สภาวะรุนแรงโดยใช้ค่าสถิติเปอร์เซ็นต์ไทล์ระดับสูง (P90 และ P95) แทนการพิจารณาค่าสูงสุดเพียงค่าเดียว ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่ที่มีค่า P95 และ P99 สูงมีความคงอยู่เชิงพื้นที่อย่างต่อเนื่อง และสอดคล้องกับตำแหน่งของค่า Peak EV ในกลุ่มเหตุการณ์รุนแรง 20 อันดับแรก สะท้อนว่าสถิติเปอร์เซ็นต์ไทล์สามารถระบุพื้นที่เสี่ยงสูงที่มีการเกิดซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยรายเดือนแบบหลายปีและแนวโน้มเชิงฤดูกาล ยังแสดงให้เห็นรูปแบบความเสี่ยงที่แตกต่างกันตามช่วงเวลา โดยช่วงมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือมีการขยายตัวของพื้นที่เสี่ยงสูงตามแนวชายฝั่งด้านตะวันตกของอ่าวไทย ขณะที่ช่วงฤดูอื่นระดับความรุนแรงและขอบเขตพื้นที่ได้รับผลกระทบลดลงอย่างชัดเจน

ผลลัพธ์ดังกล่าวสนับสนุนการใช้ค่าสถิติเปอร์เซ็นต์ไทล์เป็นตัวแทนของความเสี่ยงระดับสูง เนื่องจากช่วยลดอิทธิพลของค่าผิดปกติและสะท้อนความถี่ของการเกิดซ้ำได้ดีกว่าการใช้ค่าสูงสุดเพียงค่าเดียว อย่างไรก็ตาม ค่าความรุนแรงเฉพาะจุดยังมีความสำคัญต่อการประเมินผลกระทบในระดับพื้นที่จำกัด ดังนั้น การประเมินความเสี่ยงจึงควรพิจารณาทั้งค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่และค่ารุนแรงเฉพาะจุดควบคู่กัน เพื่อให้สะท้อนทั้งมิติความถี่และความรุนแรงของเหตุการณ์ได้อย่างครบถ้วน

#### 4.2.3 อิทธิพลของลมมรสุมและลักษณะภูมิประเทศต่อความเสี่ยงของฟาร์มกระชังในอ่าวไทย

ผลการศึกษาพบว่าแนวชายฝั่งด้านตะวันตกของอ่าวไทย โดยเฉพาะช่วงจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ชุมพร และสุราษฎร์ธานี มีระดับความเสี่ยงสูงอย่างต่อเนื่องทั้งในมิติค่าเฉลี่ย เปอร์เซ็นไทล์ระดับสูง และเหตุการณ์รุนแรงสูงสุด ลักษณะดังกล่าวสัมพันธ์โดยตรงกับอิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งพัดตามแนวแกนยาวของอ่าวไทย ทำให้พื้นที่ฝั่งตะวันตกเปิดรับคลื่นโดยตรง และมีระยะทางการก่อดำของคลื่น (fetch) ยาวต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดการพัฒนาของคลื่นจนมีคาบยาวและพลังงานสูง คลื่นที่พัฒนาเต็มที่ภายใต้ลมมรสุมต่อเนื่องหลายวันมีลักษณะเป็นคลื่นคาบยาวที่สามารถถ่ายทอดพลังงานเข้าสู่เขตน้ำตื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อประกอบกับกระแสน้ำตามแนวชายฝั่งที่ถูกขับเคลื่อนโดยลมและคลื่น จึงเกิดแรงกระทำรวมต่อโครงสร้างกระชังในระดับสูงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสะท้อนออกมาในค่า EV-Index ที่เพิ่มขึ้นเด่นชัดในช่วงฤดูมรสุม

ในทางตรงกันข้าม พื้นที่อ่าวไทยตอนบนรูปตัว “ก” มีลักษณะกึ่งปิดและมีระยะ fetch จำกัด ทำให้การพัฒนาของคลื่นถูกจำกัดโดยภูมิประเทศชายฝั่ง ขณะที่ฝั่งตะวันออกของอ่าวไทยแม้จะมีบางช่วงเปิดรับคลื่น แต่แนวการวางตัวของชายฝั่งและการกระจายพลังงานคลื่นทำให้ความรุนแรงสูงเกิดเป็นครั้งคราวมากกว่าการเกิดซ้ำอย่างต่อเนื่อง

ดังนั้น ความเสี่ยงที่สูงขึ้นของฟาร์มกระชังบริเวณชายฝั่งด้านตะวันตกของอ่าวไทยจึงเป็นผลจากการเปิดรับคลื่นมรสุมที่พัฒนาเต็มที่ร่วมกับกระแสน้ำชายฝั่ง และแรงกระทำสะสมที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ

#### 4.2.4 ข้อจำกัดของข้อมูลแบบจำลองและขอบเขตการประยุกต์ใช้

แม้ว่าผลการศึกษาแสดงความสอดคล้องกับเหตุการณ์มรสุมต่อเนื่องในระดับเปอร์เซ็นไทล์สูงมาก (>99th percentile) แต่เหตุการณ์ลมกระโชกฉับพลันหรือ squall line ไม่ปรากฏค่า EV สูงเด่นชัด เนื่องจากข้อจำกัดของข้อมูลแบบจำลองที่มีความละเอียดเชิงเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งอาจไม่สามารถสะท้อนเหตุการณ์สั้นระดับนาที่ถึงชั่วโมงได้ครบถ้วน รวมทั้งเหตุการณ์ที่ไม่ปรากฏในข้อมูลการพยากรณ์ของแบบจำลอง HYCOM และ WAM นอกจากนี้ ในกรณีพายุปากบึกยังสะท้อนข้อจำกัดของแบบจำลองคลื่น (WAM) ภายใต้สภาวะสุดขีด ซึ่งเป็นประเด็นที่พบได้ทั่วไปในงานแบบจำลองเชิงตัวเลข

ดังนั้น EV-Index จึงเหมาะสมกับการประเมินความเสี่ยงจากแรงกระทำต่อเนื่องเชิงเวลา มากกว่าการเตือนภัยเหตุการณ์ฉับพลันระยะสั้น และควรใช้ร่วมกับข้อมูลลมความละเอียดสูงหรือระบบเตือนภัยเฉพาะเหตุการณ์เพื่อสนับสนุนการใช้งานในระดับปฏิบัติการ

### 4.3 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาครั้งนี้ มีข้อเสนอแนะแนวทางการนำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์และการศึกษาต่อยอดในอนาคต ดังนี้

#### 4.3.1 การพัฒนาฐานข้อมูลเหตุการณ์ความเสียหายเพื่อสอบเทียบค่า EV-Index

เนื่องจากข้อมูลเหตุการณ์ความเสียหายของกระชังเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่เผยแพร่ผ่านสื่อสาธารณะมีจำนวนจำกัด การประสานความร่วมมือกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมประมง หรือหน่วยงานบริหารจัดการชายฝั่ง เพื่อรวบรวมข้อมูลตำแหน่งและช่วงเวลาที่เกิดเหตุการณ์ความเสียหายจริง จะช่วยให้สามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาสอบเทียบ (validation) กับค่า EV-Index ได้โดยตรง การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า EV-Index กับเหตุการณ์ความเสียหายจริงจะช่วยประเมินความแม่นยำของดัชนี และอาจนำไปสู่การกำหนดค่าเกณฑ์วิกฤต (threshold) สำหรับการจัดการเตือนภัยที่เหมาะสมต่อกระชังเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในอ่าวไทยในเชิงปฏิบัติการ

#### 4.3.2 การพัฒนา EV-Index ตามระดับความลึกเฉพาะของโครงสร้างแต่ละประเภท

ในการศึกษานี้ได้กำหนดระดับความลึกอ้างอิงที่ 5 เมตร ซึ่งเหมาะสมสำหรับการประเมินความเสี่ยงในระดับพื้นที่โดยรวม อย่างไรก็ตาม ฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแต่ละประเภทมีระดับความลึกของโครงสร้างแตกต่างกัน เช่น กระชังปลาอาจมีจุดกึ่งกลางที่ระดับประมาณ 3 เมตร ดังนั้น การพัฒนาและคำนวณค่า EV-Index ที่ระดับความลึกเฉพาะของโครงสร้างแต่ละประเภทจะช่วยเพิ่มความแม่นยำและความเฉพาะเจาะจงของการประเมินความเสี่ยง ทำให้สามารถนำไปใช้สนับสนุนการออกแบบโครงสร้างและการจัดการฟาร์มได้ตรงเป้าหมายมากยิ่งขึ้น

#### 4.3.3 การปรับปรุงการคำนวณค่า EV-Index ในช่วงเหตุการณ์สุดขีด

ผลการศึกษาพบข้อจำกัดในการคำนวณค่า EV-Index ในช่วงเหตุการณ์รุนแรงบางกรณี เช่น พายุโซนร้อนหรือพายุเขตร้อน ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับข้อจำกัดของค่าคาบคลื่นสูงสุด (Peak period) หรือเสถียรภาพของแบบจำลองคลื่น WAM ภายใต้สภาวะสุดขีด ดังนั้น ในการศึกษาต่อไปควรพิจารณาปรับปรุงวิธีการคำนวณความเร็วเชิงวงโคจรของคลื่น เช่น การเลือกใช้ตัวแปรคาบคลื่นชนิดอื่น หรือพัฒนาแนวทางประมวลผลข้อมูลให้เหมาะสมกับสภาวะรุนแรง รวมถึงการใช้แบบจำลองคลื่นรุ่นที่มีความสามารถรองรับเหตุการณ์สุดขีดได้ดีขึ้น เพื่อให้สามารถคำนวณและพยากรณ์ค่า EV-Index ได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพในช่วงเหตุการณ์รุนแรง

#### 4.3.4 การขยายการศึกษาไปยังพื้นที่ทะเลอันดามัน

ในการศึกษาครั้งนี้ได้มุ่งเน้นเฉพาะพื้นที่อ่าวไทย ซึ่งมีลักษณะความลึก รูปแบบภูมิประเทศ ชายฝั่ง และระบบการไหลเวียนของกระแสน้ำที่แตกต่างจากทะเลอันดามันอย่างชัดเจน จึงมิได้นำพื้นที่ทั้งสองฝั่งมาศึกษาร่วมกันในกรอบเดียวกัน อย่างไรก็ตาม พื้นที่ชายฝั่งทะเลอันดามันก็มีฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ได้รับผลกระทบจากคลื่นลมและกระแสน้ำรุนแรงเช่นเดียวกัน อีกทั้งยังมีลักษณะการเปิดรับคลื่นจากมหาสมุทรอินเดียโดยตรง และได้รับอิทธิพลจากมรสุมตะวันตกเฉียงใต้เป็นสำคัญ

ดังนั้น การศึกษาลักษณะค่า EV-Index ในบริบทของทะเลอันดามันจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ควรดำเนินการต่อไป เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างความเสี่ยงระหว่างสองฝั่งทะเลของประเทศ และเพื่อพัฒนาแนวทางการประเมินความเสี่ยงและระบบเตือนภัยที่เหมาะสมกับลักษณะสมุทรศาสตร์และสภาพแวดล้อมเฉพาะพื้นที่ของแต่ละภูมิภาค

#### 4.3.5 การพัฒนา EV-Index สู่ระบบเฝ้าระวังและเตือนภัยเชิงปฏิบัติการ

จากผลการศึกษาที่สามารถระบุช่วงเวลาที่มีความเสี่ยงสูงเชิงฤดูกาล และพื้นที่เสี่ยงสำคัญได้อย่างชัดเจน ควรมีการต่อยอดพัฒนา EV-Index ให้เป็นส่วนหนึ่งของระบบเฝ้าระวังเชิงปฏิบัติการ โดยเชื่อมโยงกับข้อมูลพยากรณ์คลื่นและกระแสน้ำล่วงหน้า เพื่อคำนวณค่า EV-Index แบบเรียลไทม์ หรือรายวัน และจัดทำระดับการเตือนภัยตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ การดำเนินการดังกล่าวจะช่วยให้เกษตรกรสามารถเตรียมความพร้อม ปรับลดความเสี่ยง หรือเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างล่วงหน้าได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจของหน่วยงานภาครัฐในการบริหารจัดการพื้นที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งในระยะยาว

บรรณานุกรม

## บรรณานุกรม

### เอกสารภาษาอังกฤษ

- Abrahamsen, H. I., Johannesen, T. T., Patursson, Ø., á Norði, G., & Simonsen, K. (2025). Wave-generated currents threaten aquaculture sites. *Ocean Engineering*, *334*, 121574. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117296>
- Arthur, J. R., Bondad-Reantaso, M. G., Campbell, M. L., Hewitt, C. L., Phillips, M. J., & Subasinghe, R. P. (2009). *Understanding and applying risk analysis in aquaculture: A manual for decision-makers* (FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 519/1). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Buck, B. H., Bjelland, H. V., Bockus, A., Chambers, M., Costa-Pierce, B. A., Dewhurst, T., Ferreira, J. G., Føre, H. M., Fredriksson, D. W., Goseberg, N., Holmyard, J., Isbert, W., Krause, G., Markus, T., Papandroulakis, N., Sclodnick, T., Silkes, B., Strand, Å., Troell, M., Wiczorek, D., van den Burg, S. W. K., & Heasman, K. G. (2024). Resolving the term “offshore aquaculture” by decoupling “exposed” and “distance from the coast”. *Frontiers in Aquaculture*, *3*, 1428056. <https://doi.org/10.3389/faqc.2024.1428056>
- Dewhurst, T., Rickerich, S., MacNicoll, M., Baker, N., & Moscicki, Z. (2025). The effect of site exposure index on the required capacities of aquaculture structures. *Frontiers in Aquaculture*, *3*, 1428299. <https://doi.org/10.3389/faqc.2024.1428299>
- Günther, H., Hasselmann, S., & Janssen, P. A. E. M. (1992). *The WAM Model cycle 4* (Report No. 4). DKRZ WAM Model Documentation.
- Heasman, K. G., Sclodnick, T., Goseberg, N., Scott, N., Chambers, M., Dewhurst, T., Rickerich, S., Føre, H. M., & Buck, B. H. (2024). Utilisation of the site assessment energy indices for aquaculture in exposed waters: biology, technology, operations and maintenance. *Frontiers in Aquaculture*, *3*, 1427168. <https://doi.org/10.3389/faqc.2024.1427168>

- Liu, F., Jiang, Z., Cheng, T., Xu, Y., Zhu, H., Wang, G., Sun, G., & Zhang, Y. (2024). Study on the dynamic response of mooring system of multiple fish cages under the combined effects of waves and currents. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(9), 1648. <https://doi.org/10.3390/jmse12091648>
- Lojek, O., Goseberg, N., Føre, H. M., Dewhurst, T., Bölder, T., Heasman, K. G., Buck, B. H., Fredriksson, D. W., & Rickerich, S. (2024). Hydrodynamic exposure – on the quest to deriving quantitative metrics for mariculture sites. *Frontiers in Aquaculture*, 3, 1388280. <https://doi.org/10.3389/faqc.2024.1388280>

### เอกสารภาษาไทย

- ผู้จัดการออนไลน์. (2559, 26 มกราคม). คลื่นลมแรงซัดกระชังปลาช่อนทะเลสิงหนครพังเสียหาย. <https://mgronline.com/south/detail/9590000009431>
- ผู้จัดการออนไลน์. (2559, 26 กุมภาพันธ์). คลื่นลมแรงซัดฝั่งสงขลา กระชังปลาเสียหายหนัก. <https://mgronline.com/south/detail/95900000020583>
- มติชนออนไลน์. (2561, 2 มกราคม). สงขลาคลื่นลมแรงจัดซัดถล่มชายฝั่งสิงหนคร. [https://www.matichon.co.th/region/news\\_787940](https://www.matichon.co.th/region/news_787940)
- แนวหน้า. (2562, 5 มกราคม). อิทธิพลพายุ ‘ปาบีก’ ทำคลื่นซัดฝั่งระโนดพังยับ. <https://www.naewna.com/local/387073>
- ไทยรัฐออนไลน์. (2566, 17 เมษายน). พายุหัวด้วนถล่มอ่าวปากนคร-ท่าศาลา เรือล่มกว่า 40 ลำ. <https://www.thairath.co.th/news/local/south/2681211>