

การจำลองการรั่วไหลของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OIL SPILL SIMULATION IN RAYONG COASTAL AREA



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Water Resources Engineering

Department of Water Resources Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองการรั่วไหลของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง
โดย	นายพงษ์สิทธิ์ ผลสมบูรณ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทโรยธา)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์)	
.....	กรรมการ
(ดร.บุศวรรณ บิตร)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธุ์ รั้ววิชัย)	

พงษ์สิทธิ์ ผลสมบูรณ์ : การจำลองการรั่วไหลของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง. (

OIL SPILL SIMULATION IN RAYONG COASTAL AREA) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์

การรั่วไหลของน้ำมันในทะเลส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม การคาดการณ์การเคลื่อนตัวของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเลจำเป็นต้องทราบการไหลเวียนของกระแสน้ำจึงจะทำให้การคาดการณ์ตำแหน่งที่น้ำมันจะเคลื่อนที่ไปได้ถูกต้อง อย่างไรก็ตามการได้มาของข้อมูลกระแสน้ำและลม ใช้วิธีการเก็บแบบตำแหน่งซึ่งไม่ครอบคลุมทั้งพื้นที่ จึงประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองการไหลเวียนของกระแสน้ำที่ปรับเทียบกับข้อมูลตรวจวัดในการจำลองการไหลเวียนของกระแสน้ำในพื้นที่ศึกษา การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการจำลองการรั่วไหลของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองย่อย 3 ชนิด คือแบบจำลอง SWAN ใช้ในการจำลองคลื่นที่เกิดจากลม, แบบจำลอง Delft3D ใช้ในการจำลองกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงและคลื่นลม และแบบจำลอง GNOME ใช้ในการจำลองการรั่วไหลของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง โดยในการจำลองการรั่วไหลของน้ำมัน จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจำลองคลื่นและกระแสน้ำในอ่าวไทย เพื่อนำกระแสน้ำสุทธิตามมาใช้ในการคาดการณ์การเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในส่วนที่สองต่อไป

แบบจำลอง SWAN ถูกสอบเทียบด้วยข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญจากทุนสมุทรศาสตร์ของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ ตั้งแต่ปี พ.ศ.2540 - พ.ศ.2545 จำนวน 6 สถานี ส่วนแบบจำลอง Delft3D ใช้ข้อมูลระดับน้ำทำนายนของกรมอุทกศาสตร์กองทัพเรือ ตั้งแต่ปี พ.ศ.2549 - พ.ศ.2559 จำนวน 10 สถานี, ข้อมูลระดับน้ำตรวจวัดสถานีสันดอนเจ้าพระยาของการท่าเรือแห่งประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2556 และข้อมูลกระแสน้ำตรวจวัดรายชั่วโมงบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยาตั้งแต่ปี พ.ศ.2554 - พ.ศ.2556 จากองค์การความร่วมมือระหว่างประเทศของญี่ปุ่น ในการสอบเทียบกระแสน้ำจากน้ำขึ้นน้ำลงและกระแสน้ำสุทธิตามลำดับ ผลการศึกษากระแสน้ำพบว่า อิทธิพลหลักที่มีผลต่อการไหลเวียนของกระแสน้ำในอ่าวไทยคือน้ำขึ้นน้ำลง แต่ก็มีบางพื้นที่ที่คลื่นลมมีอิทธิพลด้วยซึ่งจะมีผลในบริเวณที่เป็นน้ำตื้น เช่น สถานีเกาะสีชัง เป็นต้น

การสอบเทียบแบบจำลอง GNOME ใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศในช่วงที่เกิดเหตุการณ์น้ำมันรั่วบริเวณเกาะเสม็ด จังหวัดระยอง เมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2556 ผลจากการศึกษาด้วยแบบจำลอง GNOME พบว่าทิศทางเคลื่อนที่ของน้ำมันสอดคล้องกับทิศทางของลม โดยในช่วงฤดูลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ น้ำมันจะเคลื่อนตัวออกจากชายฝั่งทะเลระยองไปในทิศตะวันตกเฉียงใต้ ส่วนในช่วงเปลี่ยนฤดูลมมรสุมและช่วงฤดูลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ น้ำมันจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ชายฝั่งทะเลระยอง เช่นบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด อุทยานแห่งชาติเขาแหลมหญ้า-หมู่เกาะเสม็ด เป็นต้น ทั้งนี้ตำแหน่งและเวลาที่น้ำมันเคลื่อนตัวกระทบชายฝั่งจะขึ้นอยู่กับความเร็วและทิศทางของลม โดยในเดือนพฤษภาคมจะมีความเสี่ยงที่การรั่วไหลของน้ำมันเคลื่อนตัวกระทบชายฝั่งระยองเร็วที่สุดในรอบปี จึงควรมีการเฝ้าระวังเป็นพิเศษ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมแหล่งน้ำ

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5870194721 : MAJOR WATER RESOURCES ENGINEERING

KEYWORD: WAVE MODEL, CURRENT MODEL, OIL SPILL MODEL

Pongsit Polsomboon : OIL SPILL SIMULATION IN RAYONG COASTAL AREA. Advisor: Asst. Prof. Anurak Sriariyawat, Ph.D.

Oil spills cause serious problems not only to the environment, but also the economy. To predict movement of oil spill in a sea, it is necessary to know the current pattern and wind information. However, this information was obtained by observed stations which did not cover the study area; therefore, mathematical models calibrated by observed data were used to simulate current in the study area. The aim of this study was to simulate oil spill in Rayong coastal area using the numerical models. The oil spill simulation model in this study contained 3 sub-models. The SWAN model was used to simulate wind waves. The Delft3D model was used to simulate tidal current and wind induced current. The GNOME model was used to predict the movement of oil spills in the study area. In the simulation of the oil spill, the study was divided into two parts: the first part simulates waves and currents in the Gulf of Thailand. The net current was used to predict the movement of oil spill in the second part.

The significant wave height from the SWAN model was calibrated and verified by wave data from 6 GISTDA's buoys in 1997 - 2002. The Delft3D model was calibrated and verified using tide tables from 10 tide gages of Hydrographics Department, Thai Navy in 2006 - 2016, water level data from Bangkok Bar station of Port Authority of Thailand in 2013 and current data from JICA at the mouth of Chao Phraya. The results from wave and current model found that tidal was the major effect on the circulation pattern in the Gulf of Thailand. However, some shallow water areas such as Ko Sichang station where the circulation is influenced by both tidal and wind.

The oil spill model was calibrated using satellite image from GISTDA when the serious event of oil spill occurred near Ko Samet on 27 July 2013. From the model study, it found that the direction of oil spill movement corresponded to the direction of the wind. Oil moved off the coast of Rayong during the northeast monsoon, whereas oil moved toward to the coast of Rayong such as Maptaphut and Khao Leam Ya - Mu Ko Samet National Park during the monsoon transitions and the southwest monsoon. The position and time that the oil moving along the shoreline depend on the wind speed and direction. In May, there is a risk that oil spill will hit the Rayong coast the fastest in the year. It should have a special surveillance.

CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Water Resources Engineering
Academic Year: 2018

Student's Signature
Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า เรื่องการจำลองการรั่วไหลของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง ได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลต่างๆ หลายท่านที่ได้ให้คำแนะนำปรึกษา และแก้ไขรายละเอียดหรือข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้และคำปรึกษา แนะนำ สนับสนุน ตลอดจนการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ และได้กรุณาสั่งสอนปรัชญาในการดำรงชีวิตและการงาน ให้โอกาสร่วมโครงการวิจัย อันเป็นประโยชน์สูงสุดแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทโรยธา ประธานกรรมการ และรองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธุ์ รักวิจัย และอาจารย์ ดร.บุศวรรณ บิตร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา และอบรมสั่งสอนข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาของการศึกษาในสถาบันอันทรงเกียรติแห่งนี้

ขอขอบคุณ Delft University of Technology ประเทศเนเธอร์แลนด์ ผู้พัฒนาแบบจำลอง SWAN Deltares Academy ประเทศเนเธอร์แลนด์ ผู้พัฒนาแบบจำลอง Delft3D และ Hazardous Materials Response Division ผู้พัฒนาแบบจำลอง GNOME ขอขอบคุณหน่วยงานราชการต่างๆ ได้แก่ กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ การท่าเรือแห่งประเทศไทย กรมอุตุนิยมวิทยา และสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลสำหรับการศึกษานี้

ขอขอบคุณ นายภวิสร ชื่นชุ่ม นายภิศพัฒน์ มิเกล็ด ตลอดจนรุ่นพี่ เพื่อนและรุ่นน้องในภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ สำหรับมิตรภาพ ประสบการณ์ทำงาน กำลังใจ และความช่วยเหลือขณะทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ซึ่งดูแลด้านเอกสารให้แก่ข้าพเจ้า จนสำเร็จจุลวงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ นางสาวชลาภรณ์ เจตนาวณิชย์ ตลอดจนคณาจารย์ รุ่นพี่ เพื่อนและรุ่นน้องในภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยให้ความรู้ คำแนะนำและช่วยเหลือให้การศึกษานี้สำเร็จไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่สาว และครอบครัวอันอบอุ่นของข้าพเจ้าที่ให้โอกาส ให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของข้าพเจ้ามาโดยตลอด

พงษ์สิทธิ์ ผลสมบุรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 การดำเนินการศึกษา.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่ผ่านมา.....	6
2.1 สภาพภูมิศาสตร์อ่าวไทย.....	6
2.2 การไหลเวียนของน้ำในอ่าวไทย.....	7
2.2.1 กระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลง.....	7
2.2.2 กระแสน้ำเนื่องจากลมเหนือผิวน้ำ.....	12
2.2.3 กระแสน้ำเนื่องจากน้ำท่า.....	16
2.2.4 กระแสน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นน้ำ.....	17
2.3 การรั่วไหลของน้ำมันในทะเล.....	17
2.3.1 กระบวนการแปรสภาพของน้ำมัน.....	18

2.3.2	พื้นที่เสี่ยงต่อน้ำมันรั่วไหล.....	19
2.4	แบบจำลองคลื่น.....	22
2.4.1	สมการพื้นฐาน (governing equations).....	22
2.4.2	การคำนวณคลื่น.....	25
2.4.3	ขั้นตอนการแก้สมการ.....	26
2.4.4	หลักเกณฑ์ในการหยุดคำนวณ.....	27
2.4.5	การศึกษาผ่านมา.....	27
2.5	แบบจำลองกระแสน้ำ.....	30
2.5.1	สมการพื้นฐาน (governing equations).....	30
2.5.2	เงื่อนไขขอบเขต.....	34
2.5.3	ขั้นตอนการแก้สมการ.....	35
2.5.4	การศึกษาที่ผ่านมา.....	37
2.6	แบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหล.....	41
2.6.1	ทฤษฎีพื้นฐาน.....	41
2.6.2	แบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมัน.....	42
บทที่ 3	วิธีการศึกษา.....	44
3.1	รวบรวมข้อมูล.....	44
3.1.1	ความลึกพื้นท้องทะเล (Bathymetry).....	48
3.1.2	ขอบเขตชายฝั่ง (Coastal line).....	49
3.1.3	ระดับน้ำ (Water level).....	49
3.1.4	ลมที่ระดับความสูง 10 เมตร (Wind speed at 10 m).....	50
3.1.5	ข้อมูลคลื่น.....	51
3.1.6	กระแสน้ำ.....	53
3.1.7	ภาพถ่ายดาวเทียม.....	53

3.2	แบบจำลอง SWAN	54
3.3	แบบจำลอง Delft3D	56
3.4	แบบจำลอง GNOME	58
3.5	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	58
3.5.1	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองคลื่นและกระแสน้ำ	58
3.5.2	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเล... ..	60
บทที่ 4	ผลการจำลองคลื่นและกระแสน้ำ.....	61
4.1	การจำลองคลื่น	61
4.1.1	การวิเคราะห์ข้อมูลลม	62
4.1.2	การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis)	67
4.1.3	การสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง SWAN	69
4.1.4	ความสัมพันธ์ของความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลหุ่นสมุทรศาสตร์.....	75
4.1.5	การวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นที่ได้จากแบบจำลอง SWAN บริเวณชายฝั่งทะเลระยอง.....	79
4.2	การจำลองกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลง.....	85
4.2.1	การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis)	88
4.2.2	การสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง Delft3D	89
4.2.3	กระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงในช่วงน้ำเกิดและน้ำตายในบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง	101
4.3	การจำลองกระแสน้ำสุทธิ	104
4.3.1	การสอบเทียบแบบจำลอง.....	104
4.3.2	กระแสน้ำสุทธิในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย	113
4.4	อิทธิพลของคลื่นลมและน้ำขึ้นน้ำลง	116
4.4.1	อิทธิพลของคลื่นลมและน้ำขึ้นน้ำลงต่อความเร็วของกระแสน้ำสุทธิ	117

4.4.2	อิทธิพลของคลื่นลมและน้ำขึ้นน้ำลงต่อทิศทางของกระแสน้ำสุทธิ	117
บทที่ 5	ผลการจำลองน้ำมันที่รั่วไหลบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง	121
5.1	อิทธิพลของกระแสน้ำและลมต่อการจำลองการรั่วไหลของน้ำมัน	121
5.2	การสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง	122
5.3	การคาดการณ์การเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเลในพื้นที่ศึกษา	125
5.3.1	การคาดการณ์การเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในแต่ละเดือน	125
5.3.2	การคาดการณ์การเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย	137
บทที่ 6	สรุปและข้อเสนอแนะ	141
6.1	แบบจำลองคลื่น	141
6.2	แบบจำลองกระแสน้ำ	142
6.3	แบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหล	144
6.4	ข้อเสนอแนะ	146
บรรณานุกรม	148
ภาคผนวก	156
ภาคผนวก ก	สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา	157
ภาคผนวก ข	การกระจายขนาดและทิศทางของลม	160
ภาคผนวก ค	กระจายขนาดและทิศทางของความสูงคลื่นนัยสำคัญ	173
ภาคผนวก ง	การกระจายขนาดและทิศทางของความเร็วกระแสน้ำ	186
ประวัติผู้เขียน	202

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบฮาร์โมนิกของน้ำขึ้นน้ำลงที่สำคัญ (Deltares, 2014).....	10
ตารางที่ 2-2 สถิติเหตุการณ์น้ำมันรั่วไหลปริมาณมาก ระหว่างปี พ.ศ.2540 – พ.ศ.2556 (กรมเจ้าท่า, 2560).....	20
ตารางที่ 3-1 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา	45
ตารางที่ 4-1 การแจกแจงทิศทางและความเร็วลมที่พบเป็นส่วนใหญ่แต่ละเดือน ที่ชายฝั่งทะเลระยอง ตั้งแต่ปี พ.ศ.2540 - พ.ศ.2559	66
ตารางที่ 4-2 ทฤษฎีของกระบวนการทางกายภาพของคลื่นและค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในแบบจำลอง... 67	
ตารางที่ 4-3 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง SWAN จากทฤษฎีแรงเสียดทานท้องน้ำที่แตกต่างกัน ในช่วงระหว่างวันที่ 1 – 31 ตุลาคม พ.ศ.2540	69
ตารางที่ 4-4 ดัชนีการสอบเทียบค่าความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลที่ได้จากหุ่นสมุทรศาสตร์ ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ.2540 – เดือนธันวาคม พ.ศ.2542.....	74
ตารางที่ 4-5 ดัชนีการตรวจสอบค่าความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลที่ได้จากหุ่นสมุทรศาสตร์ ตั้งแต่ปี พ.ศ.2543 – พ.ศ.2545	75
ตารางที่ 4-6 ค่าความเบี่ยงเบนเฉลี่ย (เมตร) ระหว่างความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลที่ได้จากหุ่นสมุทรศาสตร์ ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ.2540 – เดือนธันวาคม พ.ศ. 2545.....	79
ตารางที่ 4-7 ความสูงคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ยของหุ่นสมุทรศาสตร์และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากแบบจำลอง SWAN เมื่อเทียบกับข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ยในปี พ.ศ.2540 - พ.ศ. 2545.....	81
ตารางที่ 4-8 ทิศทางและความสูงคลื่นนัยสำคัญรายชั่วโมงที่พบได้มากที่สุดจากแบบจำลอง SWAN ในแต่ละเดือน ตั้งแต่ปี พ.ศ.2540 - พ.ศ.2559	85
ตารางที่ 4-9 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบฮาร์โมนิกของน้ำขึ้นน้ำลงด้วยวิธี harmonic analysis จากข้อมูลระดับน้ำทำนายที่สถานีเกาะสมุย และแหลมงอบ ในปี พ.ศ.2557.....	86

ตารางที่ 4-10 ค่าแอมพลิจูดที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบฮาร์โมนิกของน้ำขึ้นน้ำลงด้วยวิธี harmonic analysis จากข้อมูลระดับน้ำทำนายที่สถานีเกาะสมุย และแหลมงอบในปี พ.ศ.2556 - พ.ศ.2558.....	87
ตารางที่ 4-11 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ทางกายภาพ โดยเปรียบเทียบข้อมูลระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ.....	90
ตารางที่ 4-12 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (เมตร) ระหว่างระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนาย ในเดือนมกราคม พ.ศ.2557	96
ตารางที่ 4-13 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (เมตร) ระหว่างระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายตั้งแต่ปี พ.ศ.2549 - พ.ศ.2557	99
ตารางที่ 4-14 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ระหว่างระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายตั้งแต่ปี พ.ศ.2549 - พ.ศ.2557	99
ตารางที่ 4-15 ค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) ระหว่างระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายตั้งแต่ปี พ.ศ.2549 - พ.ศ.2557	100
ตารางที่ 4-16 ค่าความเบี่ยงเบนเฉลี่ย (เมตร) ระหว่างระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายตั้งแต่ปี พ.ศ.2549 - พ.ศ.2557	100
ตารางที่ 4-17 ค่าพิสัยน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย	101
ตารางที่ 4-18 ดัชนีการเปรียบเทียบข้อมูลระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลตรวจวัดของการท่าเรือแห่งประเทศไทย ที่สถานีสันดอนเจ้าพระยา ในปี พ.ศ.2556	107
ตารางที่ 4-19 เปรียบเทียบค่าพิสัยน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลตรวจวัดของการท่าเรือแห่งประเทศไทย ที่สถานีสันดอนเจ้าพระยา ในปี พ.ศ.2556	108
ตารางที่ 4-20 การเปรียบเทียบข้อมูลระดับน้ำและกระแสน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลตรวจวัดของ Japanese International Cooperation Agency (JICA) ที่บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา จำนวน 9 ครั้ง ในปี พ.ศ.2554 - พ.ศ.2556	109
ตารางที่ 4-21 ความเร็วของกระแสน้ำสูงสุดทั้งในช่วงน้ำเกิดและน้ำตายรายเดือนระหว่างกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงและกระแสน้ำสุทธิบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง.....	116

ตารางที่ 4-22 อิทธิพลของทิศทางของกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงและคลื่นลมต่อทิศทางของ
กระแสน้ำสุทธิ 120

ตารางที่ 5-1 ความเร็วและทิศทางของลม ERA-Interim ที่ใช้ในการจำลองน้ำมันที่รั่วไหลบริเวณ
ชายฝั่งทะเลระยอง 127

ตารางที่ 5-2 เวลาที่น้ำมันกระทบชายฝั่งหลังจากเคลื่อนที่ออกจากจุดปล่อย (spill) ในช่วงความเร็ว
ลมปกติและความเร็วลมสูงสุด 129

ตารางที่ 5-3 เวลาที่น้ำมันกระทบชายฝั่งทะเลระยองหลังจากเคลื่อนที่ออกจากจุดปล่อย (spill)
ในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย 139



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1-1 เขตความเสี่ยงต่อน้ำมันรั่วไหลในน่านน้ำไทย (กรมควบคุมมลพิษ, 2553)	2
รูปที่ 2-1 ลักษณะภูมิประเทศของอ่าวไทย	6
รูปที่ 2-2 การไหลเวียนสุทธิของน้ำในอ่าวไทยจากอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง (Yanagi and Takao, 1998).....	8
รูปที่ 2-3 ลักษณะของน้ำขึ้นน้ำลงบริเวณชายฝั่งอ่าวไทย (สิน สิ้นสกุล และคณะ, 2545)	9
รูปที่ 2-4 แอมพลิจูดและเฟสขององค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลง Q1, O1, K1, P1, N2, M2, S2 และ K2 ที่สถานีระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ (Saramul, 2010)	11
รูปที่ 2-5 ทิศทางลมมรสุมที่พัดผ่านประเทศไทย (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2557).....	13
รูปที่ 2-6 องค์ประกอบคลื่น (U.S. Army Corps of Engineers, 1984).....	15
รูปที่ 2-7 ลักษณะของคลื่นบริเวณชายฝั่งอ่าวไทยและอันดามัน (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2552)	16
รูปที่ 2-8 กระบวนการแปรสภาพของน้ำมันที่รั่วไหล (National Research Council, 2014).....	19
รูปที่ 2-9 ขั้นตอนการแก้ปัญหาการแพร่กระจายพลังงานคลื่นในมิติทางภูมิศาสตร์ด้วยทิศทางที่เหมาะสม (พื้นที่ที่แรเงา) สำหรับแต่ละครั้งของการแก้สมการ (The SWAN team, 2015).....	27
รูปที่ 2-10 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง SWAN และข้อมูลหุ่นในทะเลดำ (Akpınar et al., 2012).....	28
รูปที่ 2-11 การเปรียบเทียบความสูงคลื่นที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับ (ก) ดาวเทียม ENVISAT เมื่อวันที่ 26 พฤศจิกายน พ.ศ.2547 เวลา 10.14 น., (ข) ดาวเทียม GFO เมื่อวันที่ 24 พฤศจิกายน พ.ศ.2547 เวลา 12.56 น. และ (ค) ดาวเทียม GFO เมื่อวันที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ.2547 เวลา 00.49 น. ในช่วงพายุไต้ฝุ่นหมู่ฟ้า (วาทิน ธนาธารพร และคณะ, 2554).....	29
รูปที่ 2-12 กริดที่ใช้ในโปรแกรม Delft3D-FLOW และตำแหน่งของตัวแปรที่วางตัวบนกริด รวมถึงการขนส่งของตะกอน (Lesser et al., 2004).....	36
รูปที่ 2-13 ลักษณะการไหลเวียนของกระแสน้ำในอ่าวไทยตอนบน (Buranapratheprat, 2008)..	38

รูปที่ 2-14 ลักษณะการไหลเวียนของกระแสน้ำในอ่าวไทย (Sojisuporn et al., 2010).....	39
รูปที่ 2-15 การเปรียบเทียบระดับน้ำจริงและระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง (เส้นทึบ คือ ระดับน้ำจริง และเส้นประ คือ ระดับที่ได้จากแบบจำลอง) (Saramul, 2010).....	40
รูปที่ 2-16 การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำรายเดือน (Saramul, 2010).....	40
รูปที่ 2-17 การเปรียบเทียบกระแสน้ำที่ได้จากแบบจำลองและจากข้อมูลตรวจวัด (Saramul, 2010).....	41
รูปที่ 2-18 การเคลื่อนที่ของคราบน้ำมันจากแบบจำลอง GNOME บริเวณอ่าวไทยตอนบนฝั่ง ตะวันออก (ก) ในช่วงน้ำเกิดในฤดูลมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ, (ข) ในช่วงน้ำตายในฤดูลมรสุม ตะวันออกเฉียงเหนือ, (ค) ในช่วงน้ำเกิดในฤดูลมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และ (ง) ในช่วงน้ำตายในฤดู ลมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (วัชระ เกษเดช และสุเพชร จิระจรกุล, 2560).....	43
รูปที่ 3-1 แผนภาพการศึกษา.....	44
รูปที่ 3-2 ความลึกพื้นที่ท้องทะเล และตำแหน่งของทุนสมุทรศาสตร์ สถานีวัดระดับน้ำ และสถานี ตรวจวัดลม ในอ่าวไทย.....	49
รูปที่ 3-3 การเปรียบเทียบความเร็วลมรายสถานีของกรมอุตุนิยมวิทยากับข้อมูล ERA-Interim ระหว่างปี พ.ศ.2553 - พ.ศ.2559.....	52
รูปที่ 3-4 จุดตรวจวัดกระแสน้ำรายชั่วโมงบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา (Japanese International Cooperation Agency, 2013).....	53
รูปที่ 3-5 ภาพถ่ายดาวเทียม RADARSAT-2 แสดงตำแหน่งของน้ำมัน เมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2556 เวลา 18.31 น. (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), 2556).....	55
รูปที่ 3-6 ภาพถ่ายดาวเทียม COSMO-SkyMed-1 แสดงตำแหน่งของน้ำมัน เมื่อวันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ.2556 เวลา 18.23 น. (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), 2556).....	55
รูปที่ 3-7 กริดที่ใช้ในแบบจำลอง SWAN.....	56
รูปที่ 3-8 กริดที่ใช้ในแบบจำลอง Delft3D.....	57

รูปที่ 4-1 ตำแหน่งน้ำมันรั่วไหล, สถานีระดับน้ำทำนาย และทุ่นสมุทรศาสตร์ บริเวณชายฝั่งทะเล ระยอง.....	62
รูปที่ 4-2 ผังข้อมูลลม (ก) จากทุ่นสมุทรศาสตร์ระยอง และ (ข) จากข้อมูล ERA-Interim ระหว่าง ปี พ.ศ.2541 – พ.ศ.2545	63
รูปที่ 4-3 ผังข้อมูลลมรายเดือนบริเวณชายฝั่งทะเลระยองในเดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม	64
รูปที่ 4-4 ผังข้อมูลลมรายปีบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง ระหว่างปี พ.ศ.2540 - พ.ศ.2559	66
รูปที่ 4-5 ผังการกระจายระหว่างข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN และกับ ข้อมูลตรวจวัดจากทุ่นสมุทรศาสตร์ ในเดือนตุลาคม พ.ศ.2540	68
รูปที่ 4-6 การสอบเทียบข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลตรวจวัด จากทุ่นสมุทรศาสตร์ ในเดือนสิงหาคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2540.....	70
รูปที่ 4-7 การสอบเทียบข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลตรวจวัด จากทุ่นสมุทรศาสตร์ ในปี พ.ศ.2541.....	71
รูปที่ 4-8 การสอบเทียบข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลตรวจวัด จากทุ่นสมุทรศาสตร์ ในปี พ.ศ.2542.....	72
รูปที่ 4-9 การสอบเทียบข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลตรวจวัด จากทุ่นสมุทรศาสตร์ในช่วงวันที่ 25 ตุลาคม – 9 พฤศจิกายน พ.ศ.2540 (พายุไต้ฝุ่นลินดา).....	73
รูปที่ 4-10 การตรวจสอบข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลตรวจวัด จากทุ่นสมุทรศาสตร์ ในปี พ.ศ.2543.....	76
รูปที่ 4-11 การตรวจสอบข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลตรวจวัด จากทุ่นสมุทรศาสตร์ ในปี พ.ศ.2544.....	77
รูปที่ 4-12 การตรวจสอบข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลตรวจวัด จากทุ่นสมุทรศาสตร์ ในปี พ.ศ.2545.....	78
รูปที่ 4-13 ผังข้อมูลคลื่น (ก) จากทุ่นสมุทรศาสตร์ระยอง และ (ข) จากข้อมูล ERA-Interim ระหว่างปี พ.ศ.2541 – พ.ศ.2545.....	80

รูปที่ 4-14 (ก) ผังข้อมูลลม ERA-Interim และ (ข) ผังข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN ที่ตำแหน่งน้ำมันรั่วไหลบริเวณชายฝั่งทะเลระยองตั้งแต่ปี พ.ศ.2540 - พ.ศ.2559	82
รูปที่ 4-15 ผังข้อมูลคลื่นนัยสำคัญรายเดือนบริเวณชายฝั่งระยองในเดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม	83
รูปที่ 4-16 การเปรียบเทียบระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณจากองค์ประกอบฮาร์มอนิกของน้ำขึ้นน้ำลงและข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ในเดือนมกราคม พ.ศ.2556	88
รูปที่ 4-17 ที่ตั้งของสถานีระดับน้ำทำนาย ก) สถานีระยอง ข) สถานีท่าจีน และ ค) สถานีชุมพร ของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ	89
รูปที่ 4-18 ระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายที่สถานีสันดอนเจ้าพระยา	91
รูปที่ 4-19 ผังการกระจายระหว่างข้อมูลระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D และกับข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ที่สถานีสันดอนเจ้าพระยาในเดือนมกราคม พ.ศ.2557 .	92
รูปที่ 4-20 ระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายที่สถานีสันดอนเจ้าพระยา	92
รูปที่ 4-21 ผังการกระจายระหว่างข้อมูลระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D และกับข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ที่สถานีสันดอนเจ้าพระยาในเดือนมกราคม พ.ศ.2557 .	93
รูปที่ 4-22 ความเร็วเฉลี่ยทั้งความลึกที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D ที่สถานีสันดอนเจ้าพระยา.....	94
รูปที่ 4-23 การเปรียบเทียบระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายที่สถานีสันดอนเจ้าพระยา ในปี พ.ศ.2557	97
รูปที่ 4-24 กระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงตามเวลาในช่วงน้ำเกิดบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง	102
รูปที่ 4-25 กระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงตามเวลาในช่วงน้ำตายที่บริเวณชายฝั่งทะเลระยอง.....	103
รูปที่ 4-26 การเปรียบเทียบระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลตรวจวัดของการท่าเรือแห่งประเทศไทย ที่สถานีสันดอนเจ้าพระยา ในปี พ.ศ.2556	105
รูปที่ 4-27 การเปรียบเทียบระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลตรวจวัดของ Japanese International Cooperation Agency ที่บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา จำนวน 7 ครั้ง ในปี พ.ศ.2554 - พ.ศ.2556	110

รูปที่ 4-28 การเปรียบเทียบกระแสที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลตรวจวัดของ Japanese International Cooperation Agency ที่บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา จำนวน 9 ครั้ง ใน ปี พ.ศ.2554 - พ.ศ.2556	111
รูปที่ 4-29 ผังข้อมูลกระแสน้ำสุทธิบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง ตั้งแต่ปี พ.ศ.2554 - พ.ศ.2556	113
รูปที่ 4-30 กระแสน้ำสุทธิตามเวลาในช่วงน้ำเกิดบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง	114
รูปที่ 4-31 กระแสน้ำสุทธิตามเวลาในช่วงน้ำตายบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง.....	115
รูปที่ 4-32 อิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงและคลื่นลมต่อขนาดของกระแสน้ำสุทธิ	118
รูปที่ 5-1 อิทธิพลของกระแสน้ำและลมต่อการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเล เมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2556 เวลา 18.35 น.....	122
รูปที่ 5-2 การสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของน้ำมัน (diffusion coefficient, D) แบบจำลอง GNOME เมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2556 เวลา 18.31 น.	124
รูปที่ 5-3 ตำแหน่งคราบน้ำมันรั่วไหลในทะเลที่เกาะเสม็ด เมื่อวันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ.2556 เวลา 18.23 น. หลังจากจำลองการรั่วไหล 60 ชั่วโมง	125
รูปที่ 5-4 พุนรับน้ำมันดิบ (single point mooring) (ที่มา: http://www.marinerthai.net/forum/index.php?topic=1023.0)	126
รูปที่ 5-5 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ในเดือนตุลาคม, พฤศจิกายน และเดือนมกราคม ช่วงที่ความเร็วลมปกติ (3 เมตร/วินาที).....	128
รูปที่ 5-6 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ในเดือนตุลาคม, พฤศจิกายน และเดือนมกราคม ช่วงที่ความเร็วลมสูงสุด (5 เมตร/วินาที) และในเดือนธันวาคม ช่วงที่ความเร็วลมปกติ (5 เมตร/วินาที).....	128
รูปที่ 5-7 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ในเดือนธันวาคม ช่วงที่ความเร็วลมสูงสุด (7 เมตร/วินาที)	129
รูปที่ 5-8 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศใต้ในเดือนกุมภาพันธ์, มีนาคม และเมษายน ช่วงที่ความเร็วลมปกติ (3 เมตร/วินาที).....	130
รูปที่ 5-9 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศใต้ในเดือนกุมภาพันธ์, มีนาคม และเมษายน ช่วงที่ความเร็วลมสูงสุด (5 เมตร/วินาที)	131

รูปที่ 5-10 ตำแหน่งของน้ำมันที่เคลื่อนที่กระทบชายฝั่งบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด เนื่องจาก
ลมจากทิศใต้ในเดือนกุมภาพันธ์, มีนาคม และเมษายน ในช่วงที่ความเร็วลมปกติ (3 เมตร/วินาที)
และช่วงที่ความเร็วลมสูงสุด (5 เมตร/วินาที)..... 131

รูปที่ 5-11 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ ใน
เดือนพฤษภาคม ช่วงที่ความเร็วลมปกติ (5 เมตร/วินาที) 132

รูปที่ 5-12 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ ใน
เดือนพฤษภาคม ช่วงที่ความเร็วลมสูงสุด (7 เมตร/วินาที)..... 133

รูปที่ 5-13 ตำแหน่งของน้ำมันที่เคลื่อนที่กระทบชายฝั่งบริเวณนิคมอุตสาหกรรมระยอง เนื่องจากลม
จากทิศตะวันตกเฉียงใต้ ในเดือนพฤษภาคม ในช่วงที่ความเร็วลมปกติ (5 เมตร/วินาที) และช่วงที่
ความเร็วลมสูงสุด (7 เมตร/วินาที) 133

รูปที่ 5-14 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อน
ไปทางตะวันตก ในเดือนมิถุนายนถึงเดือนสิงหาคม ช่วงที่ความเร็วลมปกติ (5 เมตร/วินาที)..... 134

รูปที่ 5-15 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อน
ไปทางตะวันตก ในเดือนมิถุนายนถึงเดือนสิงหาคม ช่วงที่ความเร็วลมสูงสุด (7 เมตร/วินาที) 135

รูปที่ 5-16 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อน
ไปทางตะวันตก ในเดือนกันยายน ช่วงที่ความเร็วลมปกติ (3 เมตร/วินาที)..... 136

รูปที่ 5-17 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อน
ไปทางตะวันตก ในเดือนกันยายน ช่วงที่ความเร็วลมปกติ (5 เมตร/วินาที)..... 136

รูปที่ 5-18 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ
ในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย 138

รูปที่ 5-19 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศใต้ ในช่วงน้ำเกิดและ
น้ำตาย..... 138

รูปที่ 5-20 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ ใน
เดือนพฤษภาคม ในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย..... 139

รูปที่ 5-21 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อน
ไปทางตะวันตก ในเดือนมิถุนายนถึงเดือนกันยายน ในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย..... 140

บทที่ 1

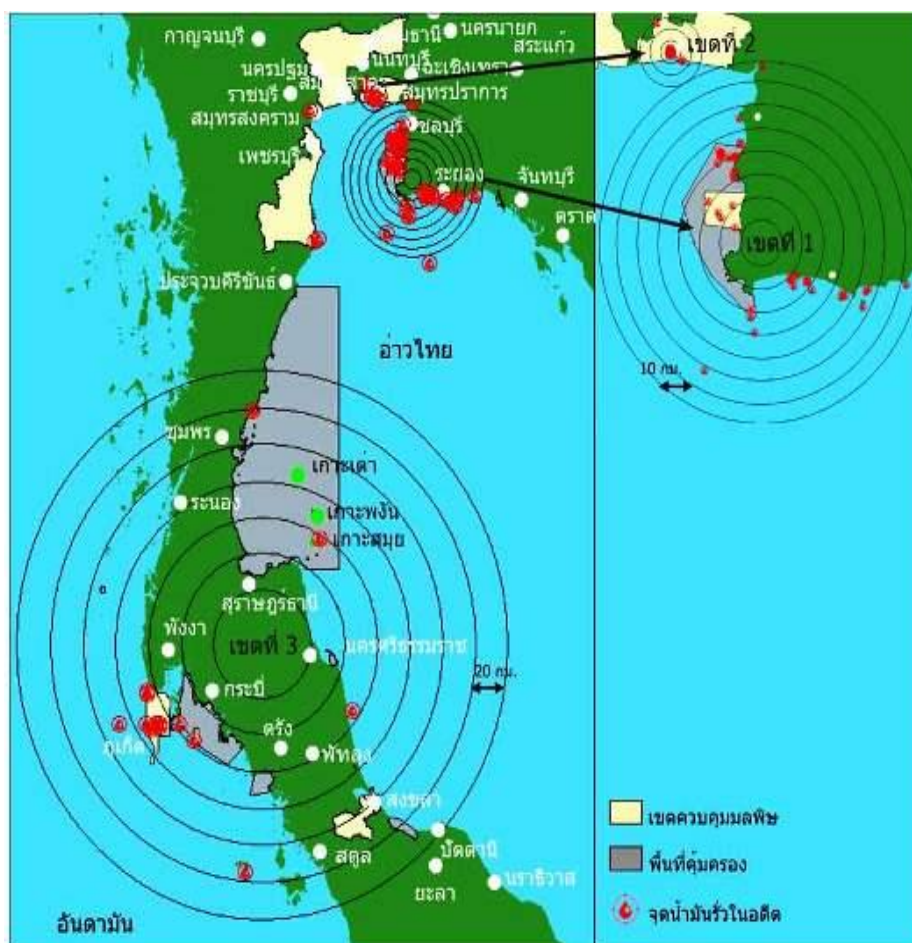
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การรั่วไหลของน้ำมันสามารถเกิดได้ทั้งตามธรรมชาติและจากการกระทำของมนุษย์ โดยสาเหตุหลักส่วนมากมาจากการขนถ่ายน้ำมันและเรืออัปปาง ซึ่งความรุนแรงของผลกระทบจากน้ำมันรั่วไหล ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยทั้งชนิดของน้ำมัน ปริมาณที่รั่วไหล สภาพภูมิศาสตร์ของบริเวณที่เกิดรั่วไหล กระแสน้ำ กระแสลม การขึ้น-ลงของน้ำทะเล ตลอดจนความหลากหลายและความสมบูรณ์ของทรัพยากรบริเวณนั้น ผลกระทบจากเหตุการณ์น้ำมันรั่วไหลนั้นส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศวิทยา อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจและสังคมอีกด้วย (กรมควบคุมมลพิษ, 2553)

จากสถิติเหตุการณ์น้ำมันที่รั่วไหลในประเทศไทยที่ได้ดำเนินการตรวจสอบและจัดการแก้ไขระหว่างปี พ.ศ.2516 – พ.ศ.2560 มีจำนวนทั้งสิ้น 252 เหตุการณ์ ส่วนใหญ่เป็นการรั่วไหลในปริมาณเล็กน้อย หากแบ่งเหตุการณ์การรั่วไหลของน้ำมันในปริมาณมากกว่า 20 ตันขึ้นไป พบว่ามีเหตุการณ์เกิดขึ้นทั้งสิ้น 12 ครั้ง โดยเกิดขึ้นทั้งในทะเลและชายฝั่งท่าเทียบเรือ ส่วนมากพบการรั่วไหลบริเวณท่าเทียบเรือเนื่องจากอุบัติเหตุระหว่างการขนถ่ายน้ำมัน และจากอุบัติเหตุต่างๆ (กรมเจ้าท่า, 2557, 2558, 2559, 2560, 2561)

กรมควบคุมมลพิษ (2553) ได้จำแนกเขตความเสี่ยงต่อน้ำมันรั่วไหลในน่านน้ำทะเลไทย ตามระดับความเสี่ยงและความรุนแรงต่อการได้รับผลกระทบจากน้ำมันรั่วไหล ออกเป็น 4 เขต ดังแสดงในรูปที่ 1-1 โดยเขตที่ 1 เป็นเขตที่มีความเสี่ยงสูงมากได้แก่ บริเวณชายฝั่งทะเลด้านตะวันออก ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดฉะเชิงเทรา ชลบุรี และระยอง เขตที่ 2 เป็นเขตที่มีความเสี่ยงสูงได้แก่ บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยาถึงท่าเรือคลองเตย เขตที่ 3 เป็นเขตที่มีความเสี่ยงสูงปานกลางได้แก่ฝั่งทะเลอ่าวไทยด้านตะวันตก ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช กระบี่ พัทลุง และสงขลา และฝั่งทะเลอันดามัน ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดตรัง พังงา กระบี่ ตรัง และสตูล และเขตที่ 4 เขตที่มีความเสี่ยงต่ำได้แก่ พื้นที่บริเวณฝั่งอ่าวไทยและทะเลอันดามันนอกเหนือจากที่ระบุไว้ใน 3 เขตข้างต้น



รูปที่ 1-1 เขตความเสี่ยงต่อน้ำมันรั่วไหลในน่านน้ำไทย (กรมควบคุมมลพิษ, 2553)

การคาดการณ์การเคลื่อนที่ของคราบน้ำมันที่รั่วไหลในทะเลต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องเช่น ทิศทางและความเร็วของกระแสน้ำ กระแสลม คลื่น สภาพอากาศ ลักษณะทางภูมิศาสตร์และสิ่งแวดล้อม เพื่อที่จะสามารถทราบตำแหน่งและทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำมันได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ (กรมควบคุมมลพิษ, 2553) แต่เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องการเก็บข้อมูลในประเทศไทยยังมีการเก็บข้อมูลไม่เพียงพอหรือไม่ครอบคลุมทั้งพื้นที่และเวลา เช่น ข้อมูลลมซึ่งมีเฉพาะข้อมูลลมตามสถานีของกรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งเป็นข้อมูลลมบนบก หรือข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ตรวจวัดจากหุ่นสมุทรศาสตร์ของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) ที่มีการเก็บข้อมูลแค่ในปี พ.ศ.2540 - พ.ศ.2545 และข้อมูลกระแสน้ำที่ยังไม่มีการเก็บข้อมูล แต่ทั้งนี้เราสามารถประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองการไหลเวียนของกระแสน้ำและนำไปใช้ในการคาดการณ์การเคลื่อนที่ของคราบน้ำมันที่รั่วไหลในทะเลต่อไป

การศึกษาวิทยานิพนธ์นี้ มีจุดมุ่งหมายเพื่อจำลองการรั่วไหลของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ในการจำลองคลื่นและกระแสน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง และนำข้อมูลกระแสน้ำที่ได้มาใช้ในการจำลองการรั่วไหลของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง จากแบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมัน ซึ่งผลการศึกษาในครั้งนี้จะเป็นแนวทางสำหรับการคาดการณ์รูปแบบการเคลื่อนที่และการกระจายตัวของคราบน้ำมันในทะเลและพื้นที่ที่เสี่ยงต่อน้ำมันที่รั่วไหล เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการกำหนดมาตรการลดผลกระทบและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากน้ำมันที่เคลื่อนตัวเข้าถึงชายฝั่ง

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสภาพคลื่นและกระแสน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง
2. ศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ในการจำลองคลื่นและกระแสน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง
3. ศึกษาการจำลองการรั่วไหลของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์

1.3 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อทำการศึกษากำหนดการรั่วไหลของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ซึ่งมีส่วนประกอบเป็นแบบจำลองย่อยทั้งสิ้น 3 ชนิด คือ แบบจำลองคลื่น (wave model) ซึ่งเลือกใช้แบบจำลอง SWAN มาใช้ในการจำลองคลื่นที่เกิดจากลม, แบบจำลองกระแสน้ำ (current model) โดยเลือกใช้แบบจำลอง Delft3D มาใช้ในการจำลองกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงและคลื่นลม และแบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหล (oil spill model) ที่เลือกใช้แบบจำลอง GNOME มาใช้ในการจำลองการรั่วไหลของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง เนื่องจากจังหวัดระยองเป็นที่ตั้งของนิคมอุตสาหกรรม มีกิจกรรมการขนถ่ายน้ำมันบริเวณท่าเทียบเรือและกลางทะเล มีการจราจรทางน้ำหนาแน่น และถูกจัดอยู่ในเขตที่มีความเสี่ยงต่อน้ำมันรั่วไหลที่สูงมาก

ข้อมูลหลักที่ใช้ในแบบจำลองคลื่นในการศึกษานี้ประกอบไปด้วย ข้อมูลขอบเขตชายฝั่งของ National Centers for Environmental Information (NCEI) ถูกนำมาใช้สำหรับกำหนดขอบเขตของพื้นที่ศึกษา, ข้อมูลความลึกพื้นท้องทะเลของ British Oceanographic Data Centre (BODC) ถูกนำมาใช้สำหรับค่าความลึกของกริดในแบบจำลอง, ข้อมูล ERA-Interim ซึ่งเป็นข้อมูลลมที่ระดับ

10 เมตรเหนือ น้ำทะเลของ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ถูกใช้สำหรับเป็นข้อมูลเริ่มต้นให้แบบจำลอง, ข้อมูลสเปกตรัมคลื่นจากแบบจำลอง WAVEWATCH III ถูกใช้สำหรับเป็นเงื่อนไขขอบเปิดของแบบจำลองเพื่อเป็นตัวแทนคลื่นจากทะเลจีนใต้ และใช้ข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญจากทฤษฎีสมุทรศาสตร์ของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) ในการสอบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ข้อมูลหลักที่ใช้ในแบบจำลองกระแสน้ำในการศึกษานี้ประกอบไปด้วยข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลงและถูกมาใช้ในการสอบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลง, และข้อมูลระดับน้ำของการท่าเรือแห่งประเทศไทย สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกระแสน้ำ โดยในการจำลองกระแสน้ำในการศึกษานี้จะไม่พิจารณาอิทธิพลของปริมาณน้ำท่าและผลของความหนาแน่นน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นน้ำ ไม่มีผลต่อการไหลเวียนสุทธิของน้ำในอ่าวไทย อีกทั้งในการจำลองการไหลเวียนของกระแสน้ำในครั้งจะไม่คำนึงถึงความเร็วในแนวตั้ง

ข้อมูลหลักที่ใช้ในแบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในการศึกษานี้คือข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) เมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2556 เวลา 18.31 น. และวันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ.2556 เวลา 18.23 น. สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหล โดยการจำลองการรั่วไหลของน้ำมันในการศึกษานี้จะคำนึงถึงกระบวนการแพร่กระจายของคราบน้ำมันเหนือผิวน้ำ (spreading) และกระบวนการแพร่กระจายของน้ำมันไปในชั้นน้ำ (dispersion) เท่านั้น

1.4 การดำเนินการศึกษา

ในการดำเนินการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้มีแนวทางการศึกษาเพื่อให้ครอบคลุมวัตถุประสงค์และขอบเขตดังนี้

- 1) ศึกษาและรวบรวมเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาและออกแบบแบบจำลองคณิตศาสตร์
- 3) รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
- 4) ประยุกต์ใช้แบบจำลองคลื่น
- 5) ทดสอบและสอบเทียบแบบจำลองคลื่น
- 6) ประยุกต์ใช้แบบจำลองกระแสน้ำ

- 7) ทดสอบและสอบเทียบแบบจำลองกระแสน้ำ
- 8) ประยุกต์ใช้แบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันในทะเล
- 9) ทดสอบและสอบเทียบแบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันในทะเล
- 10) วิเคราะห์และสรุปผลการศึกษา
- 11) จัดทำรายงานวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงสภาพของกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงและคลื่นลมบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง
2. สามารถจำลองคลื่นและกระแสน้ำบริเวณชายฝั่งทะเลระยองโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ได้
3. สามารถคาดการณ์การเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลบริเวณชายฝั่งทะเลระยองโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ได้

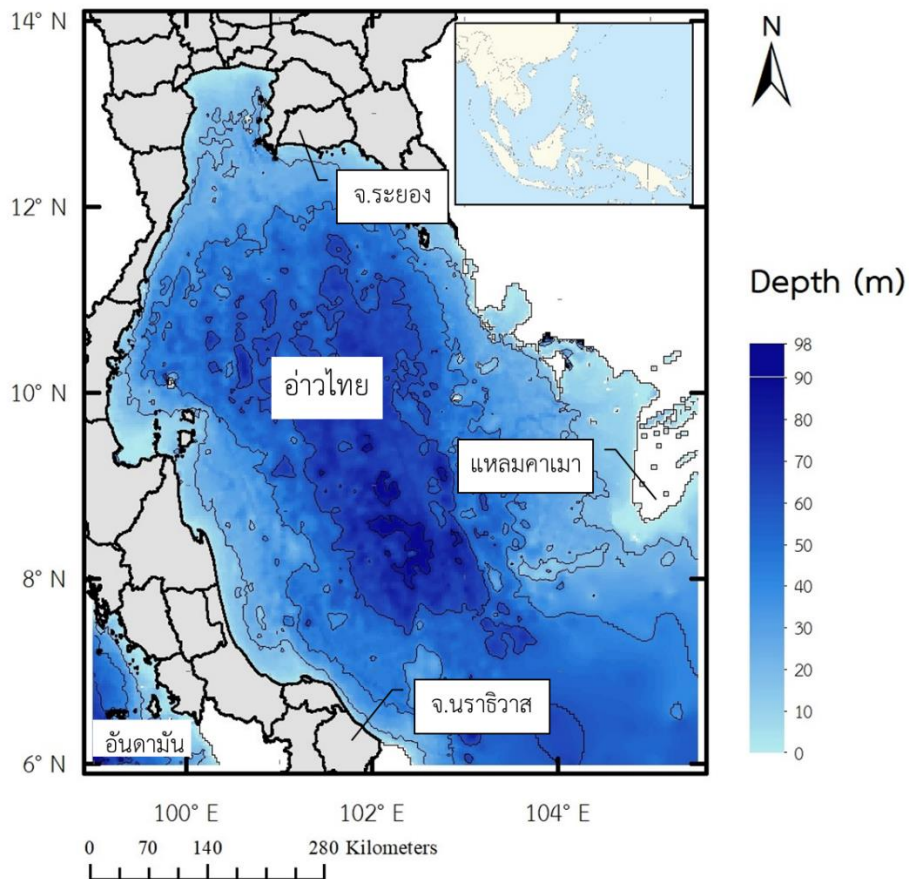


บทที่ 2

ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่ผ่านมา

2.1 สภาพภูมิศาสตร์อ่าวไทย

อ่าวไทยเป็นส่วนในสุดของมหาสมุทรแปซิฟิกตะวันตก เชื่อมต่อมาจากด้านตะวันตกของทะเลจีนใต้ ตั้งอยู่ระหว่างละติจูดที่ 6° - 13.5° เหนือ และลองจิจูดที่ 99° - 105° ตะวันออก มีลักษณะเป็นอ่าวกึ่งปิด ที่โอบล้อมด้วยชายฝั่งทะเลของคาบสมุทรลพบุรีและแผ่นดินของทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยมีช่องเปิดทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ ปากอ่าวนับจากร่องน้ำโก-ลก จังหวัดนราธิวาส (แม่น้ำอาณาเขตระหว่างประเทศไทยกับประเทศมาเลเซีย) ถึงแหลมคาเมา (Cape Ca Mau) ประเทศเวียดนาม ลักษณะภูมิศาสตร์ของพื้นที่อ่าวไทยมีลักษณะเป็นแอ่งกระทะ ดังแสดงในรูปที่ 2-1 มีความลึกเฉลี่ยประมาณ 44 เมตร บริเวณใจกลางของอ่าวเป็นส่วนที่ลึกที่สุดประมาณ 86 เมตร (กรมทรัพยากรธรณี, 2555)



รูปที่ 2-1 ลักษณะภูมิประเทศของอ่าวไทย

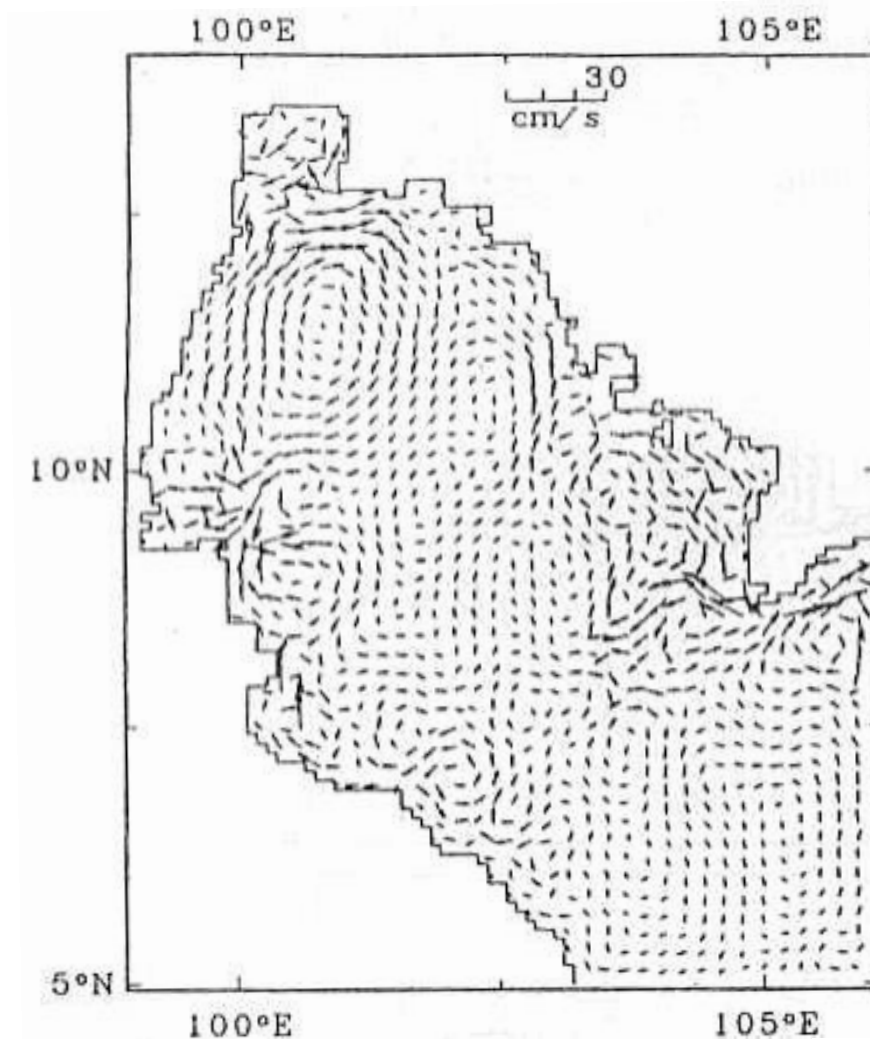
2.2 การไหลเวียนของน้ำในอ่าวไทย

โดยปกติแรงที่ทำให้เกิดการไหลเวียนของกระแสน้ำมี 4 ประการด้วยกัน คือ น้ำขึ้นน้ำลง, ลมเหนือผิวน้ำ, น้ำท่าและความแตกต่างของความหนาแน่น (Evelyn et al., 2001)

2.2.1 กระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลง

น้ำขึ้นน้ำลงทำให้กระแสน้ำไหลเปลี่ยนทิศทางตรงกันข้ามทุก 6 หรือ 12 ชั่วโมง จากการตรวจวัดกระแสน้ำรายชั่วโมงในบริเวณต่างๆ ทั่วอ่าวไทย พบว่ากระแสน้ำรายชั่วโมงขึ้นอยู่กับอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง โดยในช่วงที่น้ำขึ้นน้ำลงจะไหลเข้าสู่อ่าวไทยและช่วงที่น้ำลงน้ำไหลออกจากอ่าวไทย (กรมอุทกศาสตร์, 2538) ส่วนทิศทางของกระแสน้ำอยู่ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ตามการวางตัวของอ่าวไทย ทั้งนี้พบว่าความเร็วของกระแสน้ำรายชั่วโมงไม่เปลี่ยนแปลงตามความลึกเนื่องจากอิทธิพลของรูปร่างและความลึกน้ำของอ่าวไทยทำให้อิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงทำให้มวลน้ำทั้งคอลัมน์เคลื่อนที่ ทั้งนี้ข้อมูลกระแสน้ำที่ตรวจวัดได้รวมปัจจัยอื่นๆ เช่น ลมซึ่งทำให้เกิดกระแสน้ำเนื่องจากลมเหนือผิวน้ำ (wind-driven current) และความแตกต่างของระดับน้ำซึ่งทำให้เกิดกระแสน้ำที่เคลื่อนตัวเป็นวง (geostrophic current) หรือกระแสน้ำที่เกิดจากสมดุลของความแตกต่างของความดัน (pressure gradient) และแรงโคริโอลิส (Coriolis force) (Yanagi et al., 1997)

อิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของการไหลเวียนของน้ำในแต่ละชั่วโมง แต่การศึกษาการไหลเวียนสุทธิ (residual flow) จากอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง จำเป็นต้องใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ จากการศึกษาพบว่าน้ำขึ้นน้ำลงทำให้เกิดการไหลเวียนสุทธิของน้ำเป็นวง (eddy) หลายวงทั่วอ่าวไทยดังแสดงในรูปที่ 2-2 (Choi et al., 1996, Yanagi et al., 1997, Buranapratheprat and Bunpapong, 1998, Yanagi and Takao, 1998)



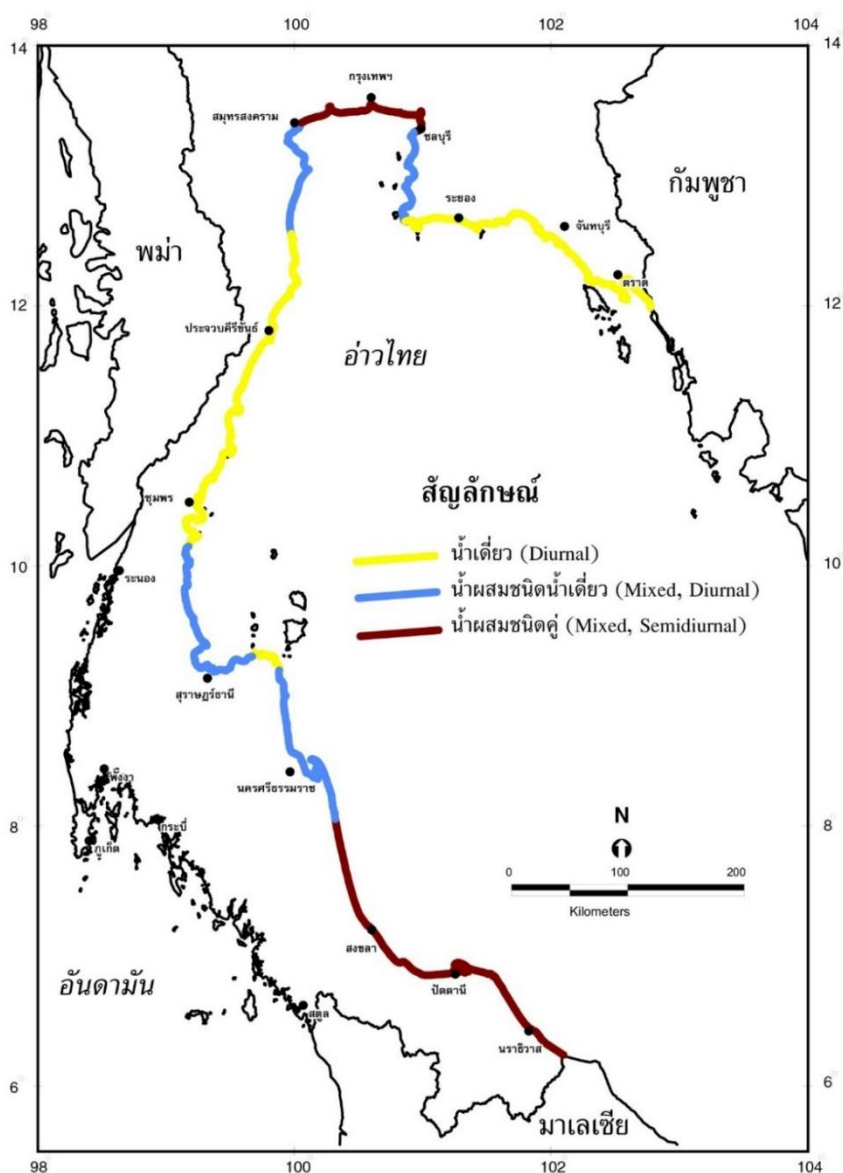
รูปที่ 2-2 การไหลเวียนสุทธิของน้ำในอ่าวไทยจากอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง (Yanagi and Takao, 1998)

2.2.1.1 น้ำขึ้นน้ำลง

น้ำขึ้นน้ำลงคือปรากฏการณ์ที่ระดับน้ำทะเล ณ บริเวณใดๆ ขึ้นลงวันละครั้งหรือ 2 ครั้ง น้ำขึ้นน้ำลงเกิดเนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างโลกกับดวงจันทร์และดวงอาทิตย์ร่วมกับแรงหนีศูนย์กลางของมวลน้ำที่ผิวโลกรอบจุดศูนย์กลางมวลของระบบโลก-ดวงจันทร์ หรือโลก-ดวงอาทิตย์ น้ำขึ้นน้ำลงที่เกิดจากดวงอาทิตย์มีคาบเวลาเท่ากับ 12 และ 24 ชั่วโมง เมื่อนำไปรวมกับองค์ประกอบฮาร์มอนิกของดวงจันทร์ทำให้เกิดยอดน้ำขึ้นสูงสุดทุกๆ 14 วันเรียกว่าน้ำเกิด (spring tide) และยอดน้ำขึ้นต่ำสุดทุกๆ 14 วันเรียกว่าน้ำตาย (neap tide) แต่เนื่องจากแนวดวงอาทิตย์กับโลกเอียงทำมุมกับเส้นศูนย์สูตรโลก ระยะห่างระหว่างโลก ดวงจันทร์ กับดวงอาทิตย์ไม่เท่ากันตลอดเวลาจึงก่อให้เกิด

องค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลงตัวอื่นๆ อีกมาก นอกจากนี้ สภาพภูมิอากาศในรอบปีก็มีผลต่อน้ำขึ้นน้ำลงเช่นกัน (Stacey, 1992)

น้ำขึ้นน้ำลงทางฝั่งทะเลอ่าวไทยจะเป็นทั้งน้ำเตี้ย (diurnal) และน้ำผสม (mixed tide) ดังแสดงในรูปที่ 2-3 (สิน สิ้นสกุล และคณะ, 2545) โดยน้ำเตี้ย คือ น้ำขึ้น 1 ครั้ง และน้ำลง 1 ครั้งต่อวัน และน้ำผสม คือ การขึ้น-ลงของน้ำทะเลเกิดขึ้นสองครั้งต่อวัน แต่ระดับน้ำทะเลที่ขึ้นลงสองครั้งมีขนาดไม่เท่ากัน ส่วนทางฝั่งทะเลอันดามันจะเป็นน้ำคู่ (semidiurnal) คือ น้ำขึ้น 2 ครั้ง และน้ำลง 2 ครั้งต่อวัน โดยมีขนาดใกล้เคียงกัน (กรมอุทกศาสตร์, 2538)



รูปที่ 2-3 ลักษณะของน้ำขึ้นน้ำลงบริเวณชายฝั่งอ่าวไทย (สิน สิ้นสกุล และคณะ, 2545)

นอกจากนี้พฤติกรรมของน้ำขึ้นน้ำลงยังขึ้นกับตำแหน่งของโลก, ดวงอาทิตย์ และดวงจันทร์ ถ้าโลก, ดวงอาทิตย์และดวงจันทร์อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน (new and full moon phases) จะทำให้เกิดน้ำขึ้นน้ำลงแตกต่างกันมากที่สุด โดยน้ำขึ้นจะสูงมาก ส่วนน้ำลงก็ต่ำมากเช่นกัน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าน้ำเกิด (spring tides) แต่ถ้าโลก, ดวงอาทิตย์และดวงจันทร์อยู่ในแนวตั้งฉาก จะทำให้เกิดน้ำขึ้นน้ำลงแตกต่างกันน้อยที่สุด โดยน้ำขึ้นจะน้อยมาก ส่วนน้ำลงก็ลงน้อยมากเช่นกัน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าน้ำตาย (neap tides) (Pugh, 1996)

2.2.1.2 องค์ประกอบฮาร์โมนิกของน้ำขึ้นน้ำลง

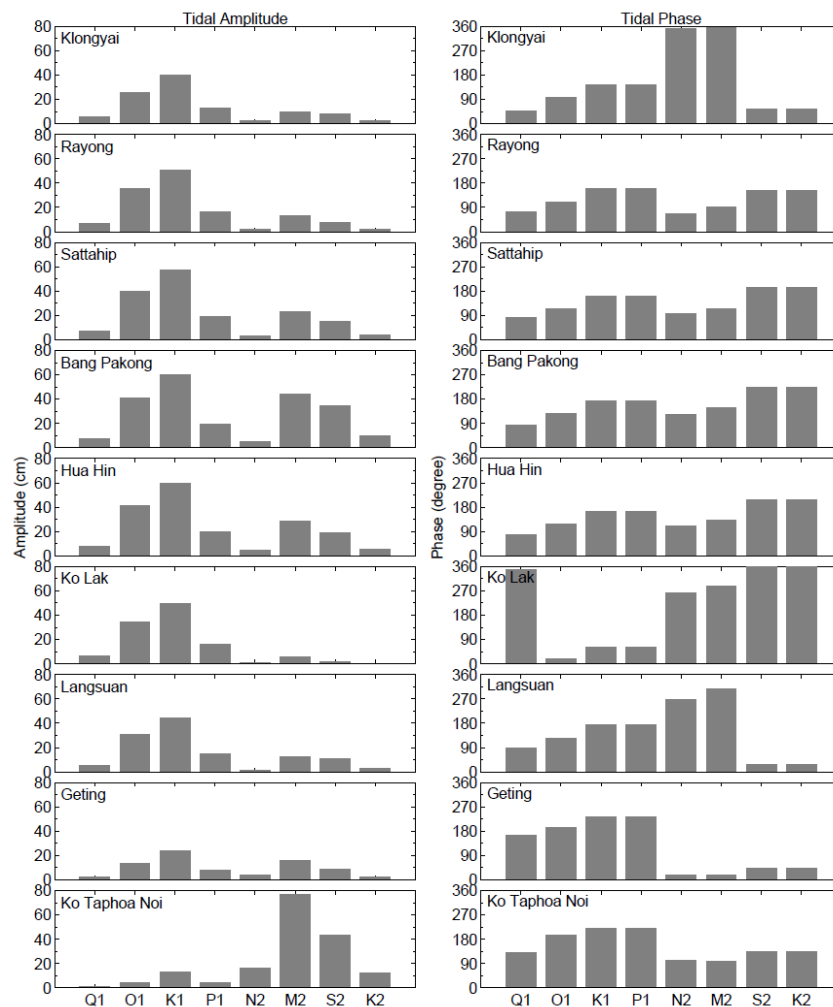
แรงที่ทำให้เกิดน้ำขึ้นน้ำลงเป็นผลรวมของค่าแอมพลิจูดและเฟสอย่างซับซ้อนขององค์ประกอบฮาร์โมนิกของน้ำขึ้นน้ำลงแต่ละชนิดในสมการ harmonic analysis (Pugh, 1996) ดังแสดงในตารางที่ 2-1 จากการศึกษาการไหลเวียนของกระแสน้ำในอ่าวไทยพบว่าผลจากแรงดึงดูดของดวงจันทร์ (M₂, O₁) ดวงอาทิตย์ (S₂) และดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ (K₁) มีผลต่อระดับน้ำขึ้นน้ำลงในอ่าวไทยมากกว่าองค์ประกอบฮาร์โมนิกตัวอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2-4 (Choi et al., 1996, Yanagi et al., 1997, Buranapratheprat and Bunpamong, 1998, Sorensen, 2006, Saramul, 2010)

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบฮาร์โมนิกของน้ำขึ้นน้ำลงที่สำคัญ (Deltares, 2014)

ชื่อ	สัญลักษณ์	คาบเวลา (ชั่วโมง)
Semidiurnal components (น้ำคู่)		
Principal lunar	M ₂	12.42
Principal solar	S ₂	12.00
Larger lunar elliptical	N ₂	12.66
Luni-solar	K ₂	11.97
Diurnal components (น้ำเดี่ยว)		
Luni-solar Declinational	K ₁	23.93
Principal lunar Declinational	O ₁	25.82
Principal solar Declinational	P ₁	24.07
Solar	S ₁	24.00

ตารางที่ 2-1 (ต่อ) องค์ประกอบฮาร์มอนิกของน้ำขึ้นน้ำลงที่สำคัญ (Deltares, 2014)

ชื่อ	สัญลักษณ์	คาบเวลา (ชั่วโมง)
Longer Period Tides		
Fortnightly lunar	M_f	327.86 (13.661 days)
Fortnightly luni-solar	M_{sf}	354.36 (14.765 days)
Monthly lunar	M_m	661.30 (27.555 days)
Semi-annual solar	S_{sa}	4,384.90 (182.621 days)
Annual solar	S	365.242 days



รูปที่ 2-4 แอมพลิจูดและเฟสขององค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลง Q1, O1, K1, P1, N2, M2, S2 และ K2 ที่สถานีระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ (Saramul, 2010)

2.2.2 กระแสน้ำเนื่องจากลมเหนือผิวน้ำ

จากการศึกษาการไหลเวียนของกระแสน้ำตามฤดูกาลโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่ากระแสน้ำเนื่องจากคลื่นลมมีอิทธิพลหลักต่อการไหลเวียนของกระแสน้ำในอ่าวไทย โดยพบว่าบริเวณอ่าวไทยตอนกลางกระแสน้ำไหลตามเข็มนาฬิกา โดยลมในช่วงมรสุมทำให้เกิดการไหลของน้ำเป็นวง (eddy) การผสมผสานและการแลกเปลี่ยนของมวลน้ำในอ่าวไทย (Siripong, 1984, Yanagi and Takao, 1998, Snidvongs and Sojisuporn, 1999)

2.2.2.1 ลมมรสุม (monsoon wind)

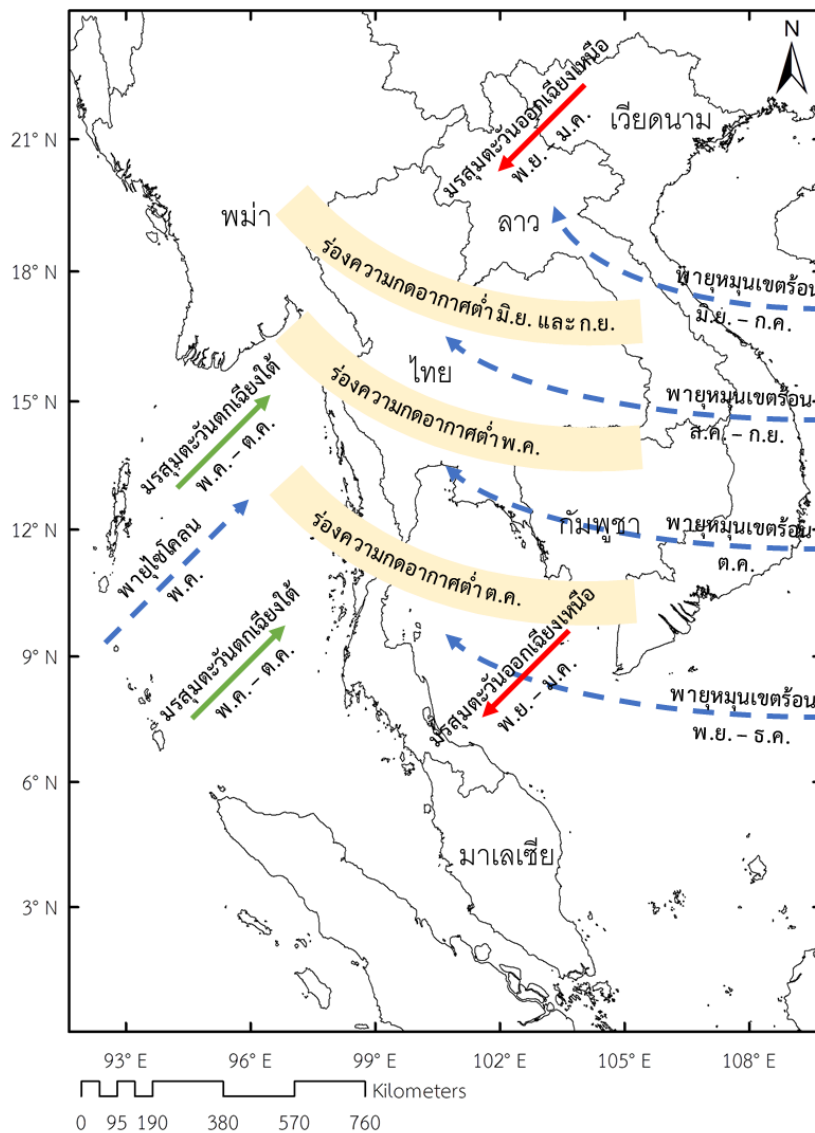
ประเทศไทยได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมหลัก 2 มรสุม ได้แก่ มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (Northeast monsoon) และมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (Southwest monsoon) ดังแสดงในรูปที่ 2-5 โดยลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจะพัดผ่านอ่าวไทยในช่วงกลางเดือนตุลาคมถึงเดือนมกราคม ทำให้เกิดคลื่นลมแรงและฝนตกในอ่าวไทยด้านตะวันตก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคใต้ ส่วนลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะเคลื่อนตัวผ่านอ่าวไทยในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนกันยายนซึ่งจะพัดพาความชุ่มชื้นจากอ่าวไทยเข้าฝั่งทำให้ฝนตก คลื่นลมแรงบริเวณชายฝั่งอ่าวไทยตอนบนและฝั่งตะวันออก และในช่วงลมมรสุมเปลี่ยนแปลงใน (เดือนกุมภาพันธ์และเมษายน) คลื่นลมในอ่าวไทยส่วนใหญ่ค่อนข้างสงบ (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2557)

ร่องความกดอากาศต่ำหรือร่องมรสุม (Intertropical Convergence Zone, Monsoon trough) เป็นบริเวณที่มีความกดอากาศต่ำกว่าบริเวณรอบๆ ส่งผลให้กระแสลมพัดเข้าหาร่องความกดอากาศต่ำนี้ โดยในซีกโลกเหนือลมจะหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา และในซีกโลกใต้ลมจะหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา ร่องความกดอากาศต่ำจะอยู่ในเขตร้อนใกล้ๆ เส้นศูนย์สูตร และจะมีการเคลื่อนขึ้น-ลงตามแนวโคจรของดวงอาทิตย์ แต่จะช้ากว่าแนวโคจรของดวงอาทิตย์ประมาณ 1 - 2 เดือน ดังแสดงในรูปที่ 2-5 ความกว้างของร่องความกดอากาศต่ำหรือร่องมรสุมประมาณ 6-8 องศาละติจูด เป็นบริเวณที่มีเมฆมากและฝนตกอย่างหนาแน่น ฉะนั้น เมื่อร่องนี้ประจำอยู่ที่ใดหรือผ่านที่ใดก็จะทำให้นั้นฝนตกอย่างหนาแน่นได้ (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2557)

2.2.2.2 พายุหมุนเขตร้อน (tropical cyclones)

ประเทศไทยได้รับผลกระทบจากพายุทางฝั่งทะเลอ่าวไทยเป็นหลัก โดยพายุจะเกิดขึ้นในทะเลที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 26°C และมีปริมาณไอน้ำสูง เมื่อเกิดขึ้นแล้วก็จะเคลื่อนตัวตามกระแสลมจากทิศตะวันออกไปทิศตะวันตก และเคลื่อนจากบริเวณละติจูดต่ำไปสู่ละติจูดสูง ก่อนที่จะเวียนโค้ง

กลับมาทางทิศตะวันออก โดยพายุที่เกิดขึ้นจะพิจารณาความรุนแรงตามความเร็วของลมสูงสุด แบ่งได้เป็น พายุดีเปรสชัน (tropical depression) ความเร็วลมใกล้ศูนย์กลางน้อยกว่า 63 กิโลเมตร/ชั่วโมง, พายุโซนร้อน (tropical storm) ความเร็วลมใกล้ศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 63-118 กิโลเมตร/ชั่วโมง และ ไต้ฝุ่น (typhoon) ความเร็วสูงสุดใกล้ศูนย์กลางมากกว่า 118 กิโลเมตร/ชั่วโมง ขึ้นไป (สิน สินสกุล และคณะ, 2545, กรมอุตุนิยมวิทยา, 2557)



รูปที่ 2-5 ทิศทางลมมรสุมที่พัดผ่านประเทศไทย (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2557)

กรมอุตุนิยมวิทยา (2561) รายงานว่าพายุหมุนเขตร้อนเริ่มเคลื่อนเข้าสู่ภาคใต้ตั้งแต่เดือนกันยายน โดยมีโอกาสเคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทยได้มากโดยเฉพาะในเดือนตุลาคม จากสถิติพบว่าพายุ

พายุเขตร้อนเคลื่อนที่เข้ามามากที่สุดในรอบ 67 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ.2494 – พ.ศ.2560 เท่ากับ 27.7% สำหรับช่วงปลายปีตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนพายุจะเคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทยตอนบนได้น้อยลงและมีโอกาสเคลื่อนเข้าสู่ภาคใต้มากขึ้น เมื่อถึงเดือนธันวาคมพายุมีแนวโน้มเคลื่อนเข้าสู่ภาคใต้เท่านั้นโดยไม่มีพายุเคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทยตอนบนอีกเนื่องจากในช่วงปลายปีบริเวณความกดอากาศสูงจากประเทศมองโกเลียและจีนนำความหนาวเย็นลงมาสู่ละติจูดต่ำกว่า ระบบอากาศในช่วงนี้จึงไม่เอื้อให้พายุที่เกิดขึ้นเหนือทะเลเคลื่อนตัวขึ้นสู่บริเวณประเทศไทยตอนบน

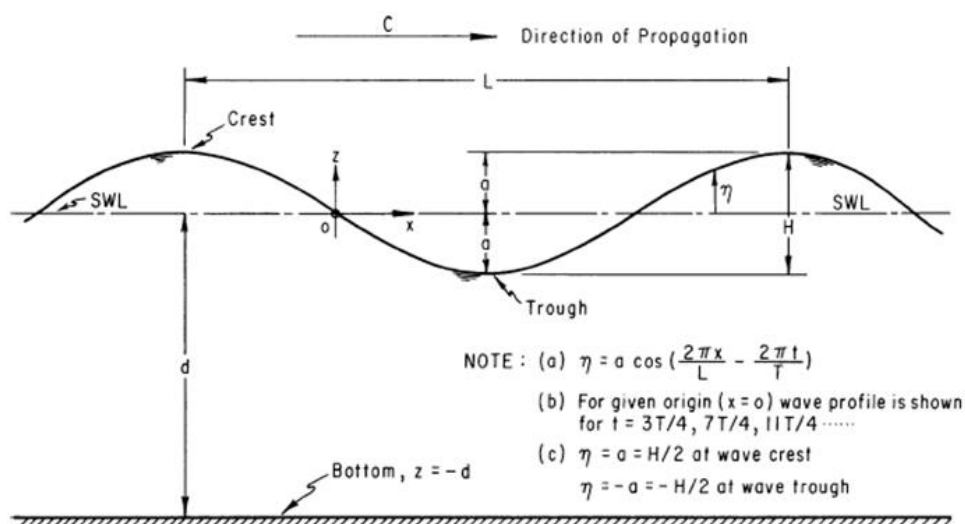
ในพื้นที่ชายฝั่งในประเทศไทย บริเวณอ่าวไทยเป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากพายุพายุเขตร้อนเสมอโดยพายุจะก่อตัวในทะเลจีนใต้แล้วเคลื่อนตัวเข้าสู่อ่าวไทย และเนื่องจากชายฝั่งทะเลอ่าวไทยภาคใต้เปิดโล่งสู่ทะเล จึงได้รับผลกระทบโดยตรงจากพายุพายุเขตร้อนที่เคลื่อนที่ขึ้นฝั่ง โดยเฉพาะบริเวณชายฝั่งทะเลของจังหวัดชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราชและสงขลา พายุพายุเขตร้อนที่รุนแรงที่เคยเคลื่อนผ่านประเทศไทย ได้แก่ พายุไต้ฝุ่นเกย์ในช่วงต้นเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2532 และพายุไต้ฝุ่นลินดาในช่วงปลายเดือนตุลาคม พ.ศ.2540 (กรมทรัพยากรธรณี, 2546)

2.2.2.3 คลื่น (waves)

นิยามองค์ประกอบของคลื่นตามทฤษฎีคลื่นเชิงเส้นตรง (linear wave theory) ประกอบด้วยยอดคลื่น (crest) คือจุดที่สูงที่สุดของคลื่น, ท้องคลื่น (trough) คือจุดที่ต่ำที่สุดของคลื่น, ความยาวคลื่น (wave length, L) คือระยะทางตามแนวราบระหว่างยอดคลื่น 2 ยอดที่อยู่ติดกัน, ความสูงคลื่น (wave height, H) คือระยะทางตามแนวตั้งจากยอดคลื่นถึงท้องคลื่น, คาบคลื่น (wave period, T) คือระยะเวลาที่ 2 ยอดคลื่นที่อยู่ติดกันเคลื่อนที่ผ่านจุดคงที่ใดๆ, ความลึกน้ำ (depth, d) คือระยะทางตามแนวตั้งจากพื้นท้องทะเลถึงระดับน้ำนิ่ง (still-water level, SWL) และแอมพลิจูดคลื่น (wave amplitude, a) คือระยะทางตามแนวตั้งจากยอดคลื่นถึงระดับน้ำนิ่ง หรือจากระดับน้ำนิ่งถึงท้องคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2-6 (U.S. Army Corps of Engineers, 1984)

คลื่นที่เกิดในทะเลส่วนใหญ่เกิดจากอิทธิพลของลม (wind-generated wave) เป็นหลัก โดยเมื่อลมพัดผ่านผิวน้ำทะเล จะถ่ายเทพลังงานจากลมไปให้กับน้ำ ส่งผลให้อนุภาคน้ำเคลื่อนตัวขึ้นลงตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนตัวของพลังงาน คลื่นที่เกิดขึ้นภายใต้อิทธิพลของลมในพื้นที่กำเนิด (generating area) เรียกว่า wind wave จากนั้นเมื่อคลื่นจากลมเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่กำเนิด และไม่ได้อยู่ภายใต้อิทธิพลของลมอีกต่อไป เรียกว่า swell โดย swell สามารถเคลื่อนตัวออกไปได้ไกลหลายกิโลเมตรจากพื้นที่กำเนิด แต่พลังงานคลื่นจะลดลงไปเรื่อยๆ เนื่องจากแรงเสียดทานของผิวน้ำ

และอากาศ, แรงเสียดทานจากพื้นท้องทะเลในเขตนํ้าตื้น หรือเกิดการแตกตัว (World Meteorological Organization, 1998)



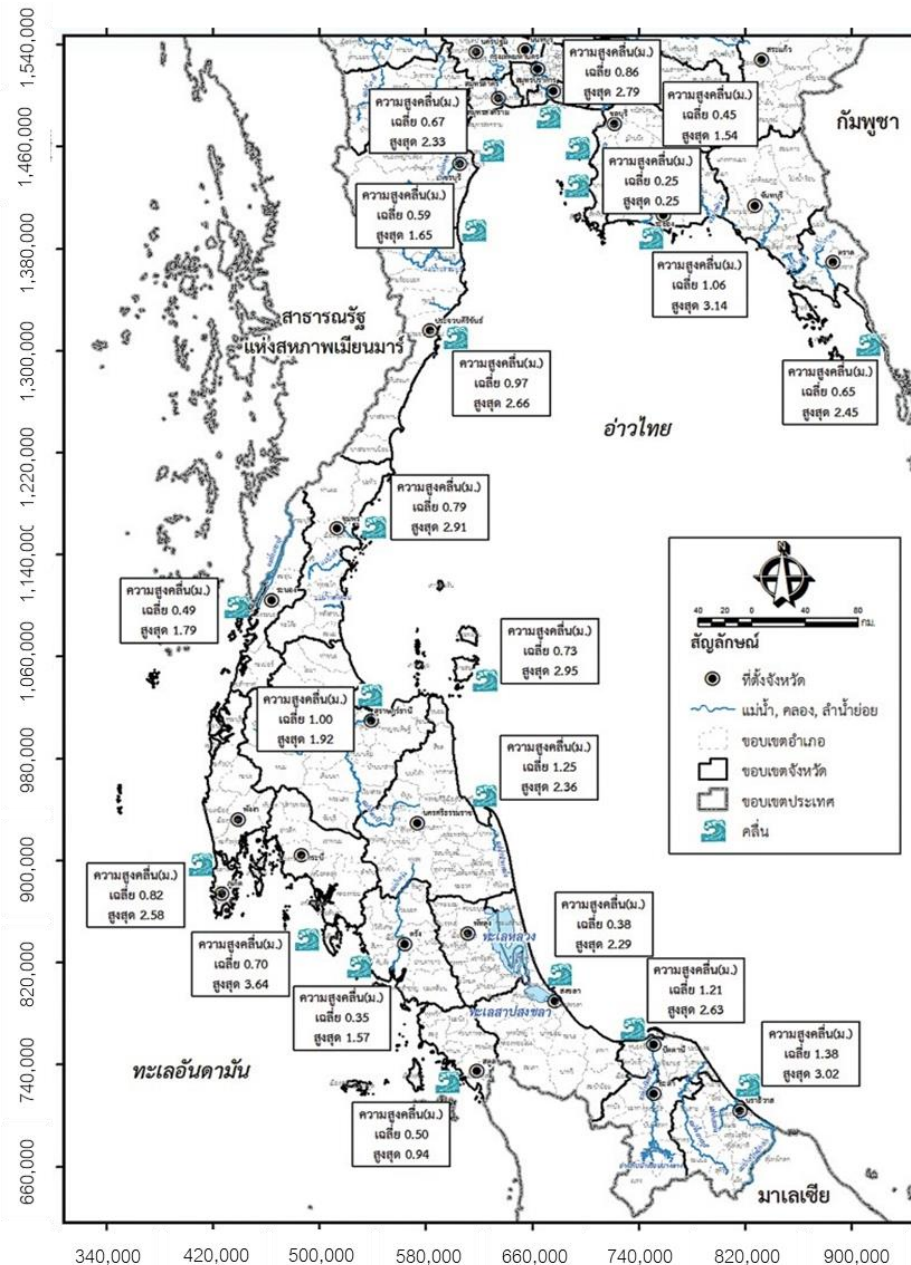
รูปที่ 2-6 องค์ประกอบคลื่น (U.S. Army Corps of Engineers, 1984)

ขนาดของความสูงคลื่นของคลื่นผิวนํ้าขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัย คือ ความเร็วลม (wind speed), ระยะเวลาที่ลมพัด (wind duration) และระยะทางของผิวนํ้า (Fetch length) ซึ่งความเร็วลมจะเป็นตัวกำหนดความสูงคลื่นสูงสุดที่จะเป็นไปได้ ส่วนระยะเวลาที่ลมพัดต้องนานพอที่จะทำให้เกิดคลื่นสูงสุดเท่าที่ความเร็วลมจะถ่ายเทพลังงานให้ได้ และจะต้องใช้ระยะทางของผิวนํ้ายาวที่เพียงพอเพื่อให้คลื่นพัฒนาได้เต็มที่ (Sorensen, 2006)

ถ้าระยะเวลาที่ลมพัดและระยะทางของผิวนํ้าไม่จำกัดจะได้ความสูงคลื่นผิวนํ้าสูงสุดเท่าที่กระแสนลมแต่ละความเร็วจะให้ได้ เราเรียกคลื่นที่พัฒนาเต็มที่แบบนี้ว่า Fully arisen sea หรือ Fully developed sea เมื่อกระแสนลมแรงจะทำให้คลื่นผิวนํ้ามีพลังงานสะสมเพิ่มขึ้น แต่ความถี่ของคลื่นที่มีพลังงานสูงสุดจะต่ำลงทำให้คาบยาวขึ้น (Sorensen, 2006, ปราโมทย์ โศจิศุกร และคณะ, 2546)

ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (significant wave height) เป็นความสูงคลื่นเฉลี่ยของหนึ่งในสามของชุดคลื่นที่มีความสูงมากที่สุด สำหรับฝั่งทะเลอ่าวไทย คลื่นเกิดตามช่วงฤดูลมมรสุม โดยมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจะทำให้เกิดคลื่นขนาดใหญ่กว่าปกติในบริเวณอ่าวไทยด้านตะวันตก ส่วนลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะทำให้เกิดคลื่นขนาดใหญ่กว่าปกติในบริเวณอ่าวไทยด้านตะวันออก สำหรับอ่าวไทยตอนบนลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่พัดผ่านจะมีกำลังอ่อนและเกิดช่วงสั้นๆ จึงทำให้คลื่นในบริเวณนี้มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก โดยปกติคลื่นในอ่าวไทยจะมีขนาดเล็ก โดยมีความสูงคลื่นเฉลี่ยจะ

น้อยกว่า 2 เมตร ยกเว้นในช่วงที่เกิดพายุความสูงคลื่นอาจสูงถึง 3 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 2-7 (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2552)



รูปที่ 2-7 ลักษณะของคลื่นบริเวณชายฝั่งอ่าวไทยและอันดามัน (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2552)

2.2.3 กระแสน้ำเนื่องจากน้ำท่า

น้ำท่าทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (gravitational circulation) คือน้ำท่าที่เป็นน้ำจืดจะไหลออกสู่ทะเลทางผิวน้ำด้านบนขณะที่น้ำเค็มจะไหลเข้าแม่น้ำทางท้องน้ำด้านล่าง น้ำท่าจะมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำทะเลจึงลอยตัวอยู่เหนือน้ำทะเลจนกว่าจะมี

กระแสน้ำหรือคลื่น ช่วยเร่งการผสมผสานน้ำท่ากับน้ำทะเลด้านล่างเกิดเป็นน้ำกร่อยซึ่งมีความเค็มต่ำกว่าน้ำทะเล

ปริมาณน้ำท่าจากแผ่นดินที่ล้อมรอบอ่าวไทยยังไม่เป็นที่แน่ชัดนักเนื่องจากสถานีตรวจวัดน้ำท่าจะอยู่เหนือเขตอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงจึงอยู่เข้าไปในแม่น้ำหลายกิโลเมตร ดังนั้นข้อมูลน้ำท่าจากสถานีต่ำสุดของลำน้ำก็ไม่ได้เป็นตัวแทนน้ำท่าของแม่น้ำสายนั้นๆ ดังนั้นในการศึกษากระแสน้ำในครั้งนี้จะไม่พิจารณาถึงผลของปริมาณน้ำท่าเนื่องจากไม่มีข้อมูลปริมาณน้ำท่าสุทธิที่ไหลลงสู่อ่าวไทย

2.2.4 กระแสน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นน้ำ

ความหนาแน่นน้ำที่แตกต่างกันทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำทั้งในแนวราบและแนวตั้ง โดยมวลน้ำทะเลจืดจะมีอุณหภูมิต่ำ และความเค็มสูงกว่ากับมวลน้ำในอ่าวไทย ทำให้มีความหนาแน่นมากกว่ามวลน้ำในอ่าวไทย มวลน้ำทะเลจืดที่ไหลเข้ามาในเขตอ่าวไทยจึงเป็นมวลน้ำชั้นล่าง (Yanagi et al., 2001, เพ็ญจันทร์ ละอองฉวี, 2544) จากข้อมูลอุณหภูมิและความเค็มที่ได้จากการสำรวจสมุทรศาสตร์ในวันที่ 5-28 กันยายน พ.ศ.2538 และวันที่ 24 เมษายน ถึง 17 พฤษภาคม พ.ศ. 2539 พบว่ามวลน้ำทะเลจืดได้มีการแลกเปลี่ยนกับมวลน้ำในอ่าวไทยมากในช่วงเดือนมีนาคมถึงเดือนพฤษภาคม เนื่องจากกระแสน้ำบริเวณชายฝั่งที่มีความแรงมาก ประกอบกับลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่มีกำลังอ่อน (Yanagi et al., 2001) ขณะที่ในช่วงเดือนมิถุนายนถึงเดือนสิงหาคมมวลน้ำทะเลจืดไหลเข้ามาในอ่าวไทยในในมวลน้ำชั้นลึก (มากกว่า 40 เมตร) สามารถเข้าไปได้ถึงละติจูด 10 องศาเหนือ (Snidvongs and Sojisuporn, 1999) โดยความหนาแน่นของน้ำจะส่งผลต่อการไหลเวียนของกระแสน้ำในแต่ละชั้นของความลึกน้ำ แต่เมื่อพิจารณากระแสน้ำสุทธิในอ่าวไทยโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพบว่าไม่แตกต่างกัน (Yanagi and Takao, 1998)

2.3 การรั่วไหลของน้ำมันในทะเล

การรั่วไหลของน้ำมันสามารถเกิดได้ทั้งตามธรรมชาติ เช่น รั่วจากแหล่งน้ำมันใต้ดิน หรือจากการกระทำของมนุษย์ เช่น อุบัติเหตุจากเรือ การขุดเจาะน้ำมัน หรือการลักลอบปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำ การรั่วไหลส่วนมากมักมีที่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ ซึ่งสาเหตุหนึ่งของน้ำมันรั่วไหลในทะเลมาจากกิจกรรมการขนส่งทางทะเล การพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศและความต้องการพลังงานภายในประเทศที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้มีการขุดและนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศเพิ่มขึ้น และอาจเกิดอุบัติเหตุทำให้น้ำมันบางส่วนเกิดรั่วไหลลงสู่ทะเลได้เสมอ ถึงแม้จะมีมาตรการป้องกันต่างๆ แล้วก็ตาม (กรมควบคุมมลพิษ, 2553)

2.3.1 กระบวนการแปรสภาพของน้ำมัน

เมื่อน้ำมันรั่วไหลลงสู่ทะเล จะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพหลายๆ อย่าง เรียกกระบวนการเหล่านี้โดยรวมว่ากระบวนการแปรสภาพของน้ำมัน (weathering) (Sebastião and Guedes Soares, 1995, Mishra and Kumar, 2015) ดังแสดงในรูปที่ 2-8 ซึ่งประกอบไปด้วย

- Spreading คือ การแพร่กระจายของคราบน้ำมันเหนือผิวน้ำโดยอาจมีสาเหตุจากลมและการไหลเวียนของกระแสน้ำ

- Evaporation คือ การระเหยของคราบน้ำมันเมื่อโดนความร้อนจากแสงอาทิตย์ โดยอัตราการระเหยขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมัน, อุณหภูมิและความเร็วลม หากน้ำมันที่หนืดมากอาจจะไม่ระเหยเลย

- Dispersion คือการแพร่กระจายของน้ำมันไปในชั้นน้ำ คลื่นและกระแสน้ำจะทำให้คราบน้ำมันแตกตัวเป็นหยดเล็กที่มีขนาดแตกต่างกัน

- Sinking/Sedimentation คือ การจมตัวหรือตกตะกอนของส่วนประกอบหนักของน้ำมัน ซึ่งอาจไปเกาะกับตะกอนที่ฝังอยู่ในน้ำและจมลงสู่ท้องน้ำ ซึ่งรูปแบบนี้เป็นตัวการที่ก่อให้เกิดก้อนน้ำมันดิน (tarball) ตามชายฝั่ง หรือเกิดเป็นตะกอนน้ำมันที่ปนเปื้อนในระบบนิเวศน์ของท้องทะเล

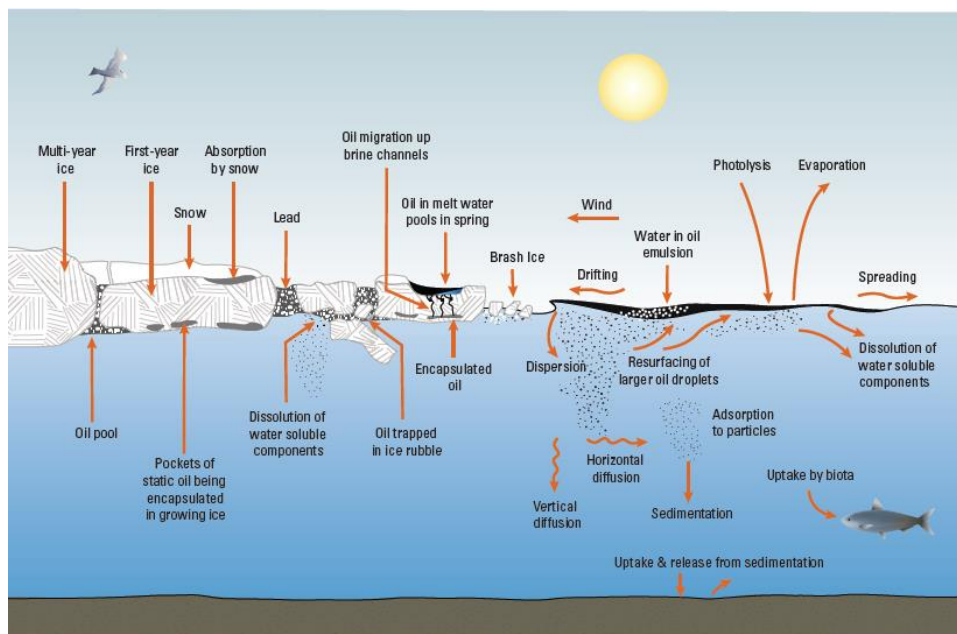
- Dissolution เป็นกระบวนการที่น้ำมันละลายในน้ำ ซึ่งมักเกิดขึ้นกับองค์ประกอบเบาของน้ำมัน (light components) โดยเฉพาะ aromatic hydrocarbon ในขณะที่ benzene จะละลายน้ำได้นิดหน่อย

- Emulsification หมายถึง การผสมระหว่างน้ำมันกับน้ำ และทำให้เกิดการแตกตัวของมวลน้ำมันออกเป็นอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กกลวง รวมถึงส่งผลทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นอิมัลชันของคราบน้ำมัน ซึ่งมีความหนืดเพิ่มขึ้น

- Photo-oxidation จัดเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างคราบน้ำมัน (ไฮโดรคาร์บอน) และออกซิเจนในอากาศ โดยมีแสงแดดเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา โดยส่งผลต่อการเกิดสารที่ละลายน้ำ (soluble product) หรือก้อนน้ำมันคงตัว (persistent tars) นอกจากนี้กระบวนการ Photo-oxidation ไม่สามารถทำให้คราบน้ำมันสลายได้มากนักถึงแม้จะอยู่ในสถานะที่มีแสงอาทิตย์จัด (น้อยกว่า 0.1% ต่อวัน) รวมถึงชั้นน้ำมันหนืดที่หนาหรือมีลักษณะเป็นอิมัลชัน มีโอกาสที่จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจนเกิดเป็นสารที่ไม่ย่อยสลายหรือมีความอันตรายเพิ่มขึ้น

- Bio-degradation หมายถึง การย่อยสลายของคราบน้ำมันโดยกระบวนการธรรมชาติ โดยทั่วไป ในน้ำทะเลจะมีสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เช่น แบคทีเรีย ยีสต์ รา สาหร่าย และโปรโตซัว เป็นต้น

อาศัยอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งมีความสามารถย่อยน้ำมันได้ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการย่อยน้ำมันทางธรรมชาติ ได้แก่ คุณสมบัติของน้ำมัน (อิมัลชันทำให้ย่อยได้ยากขึ้น), ออกซิเจน, สารอาหาร (ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส) และอุณหภูมิ เป็นต้น



รูปที่ 2-8 กระบวนการแปรสภาพของน้ำมันที่รั่วไหล (National Research Council, 2014)

2.3.2 พื้นที่เสี่ยงต่อน้ำมันรั่วไหล

แผนป้องกันและขจัดมลพิษทางน้ำเนื่องจากน้ำมันแห่งชาติ (กระทรวงคมนาคม, 2545, กรมควบคุมมลพิษ, 2553) จำแนกปริมาณน้ำมันรั่วไหลเป็น 3 ระดับ (Tier) ได้แก่

1. ระดับที่ 1 (Tier I) ปริมาณรั่วไหลไม่เกิน 20 ตัน ส่วนใหญ่เกิดขึ้นระหว่างขนถ่ายน้ำมัน ผู้ที่ทำให้เกิดน้ำมันรั่วไหลต้องเป็นผู้รับผิดชอบในการจัดคราบน้ำมัน และ/หรือได้รับความช่วยเหลือจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง โดยต้องแจ้งให้กรมเจ้าท่าทราบก่อน

2. ระดับที่ 2 (Tier II) รั่วไหลมากกว่า 20 - 1,000 ตัน อาจเกิดจากเรือโดนกัน การขจัดคราบน้ำมันต้องร่วมมือกันระหว่างภาคเอกชนและภาครัฐ ตามแผนป้องกันและขจัดมลพิษทางน้ำเนื่องจากน้ำมันแห่งชาติ และต้องแจ้งให้กรมเจ้าท่าทราบก่อน หากเกินขีดความสามารถของทรัพยากรที่มี อาจต้องขอรับการสนับสนุนจากต่างประเทศ

3. ระดับที่ 3 (Tier III) ปริมาณรั่วไหลมากกว่า 1,000 ตัน อาจเกิดจากอุบัติเหตุที่รุนแรง การขจัดคราบน้ำมันในระดับนี้ต้องการความร่วมมือจากหน่วยงานต่างๆในประเทศ และต้องอาศัยความช่วยเหลือระดับนานาชาติ

กรมควบคุมมลพิษ (2553) รายงานว่าในระหว่างปี พ.ศ.2519 – พ.ศ.2553 เกิดเหตุน้ำมันรั่วไหลที่ได้ดำเนินการตรวจสอบและจัดการแก้ไขร่วมกับหน่วยงานอื่นที่เกี่ยวข้อง 124 เหตุการณ์ ส่วนใหญ่เป็นการรั่วไหลในปริมาณเล็กน้อย และจากสถิติกรมเจ้าท่า ระหว่างปี พ.ศ.2540 – พ.ศ.2556 พบการรั่วไหลของน้ำมันในปริมาณมาก (20 ต้นขึ้นไป) ทั้งหมด 12 ครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 2-2 พบเกิดในทะเลและชายฝั่งท่าเทียบเรือ ส่วนมากพบการรั่วไหลบริเวณท่าเทียบเรือจากอุบัติเหตุระหว่างการขนถ่ายน้ำมัน

ตารางที่ 2-2 สถิติเหตุการณ์น้ำมันรั่วไหลปริมาณมาก ระหว่างปี พ.ศ.2540 – พ.ศ.2556 (กรมเจ้าท่า, 2560)

ลำดับ	วัน เดือน ปี	ชนิด น้ำมัน	สถานที่เกิด	สาเหตุ	ปริมาณ (ตัน)
1	22 พ.ค. 44	น้ำมันดิบ	ท่าขนถ่ายน้ำมันกลางทะเล บริษัท อัลลายแอนซ์ รีไฟน์นิ่ง จำกัด ท่าเรือมาบตาพุด จ.ระยอง	Brakeaway Coupling ขนาด 16 นิ้ว ที่กำลังขนถ่ายจากเรือ Tokachi หลุดออกจากกัน	30
2	15 ม.ค. 45	น้ำมันเตา	หินฉลาม เกาะจวง นอกฝั่ง อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี	เรือ Eastern Fortitude สัญชาติปานามา ขนหินฉลาม	234
3	17 ธ.ค. 45	น้ำมันเตา	ทางเข้าท่าเรือแหลมฉบัง ด้านใต้ของเกาะสีชัง จ.ชลบุรี	เรือ Kota Wijaya ขนกับเรือ Sky Ace	210
4	26 ธ.ค. 47	น้ำมันดิบ	เกาะครก พัทยา จ.ชลบุรี	เรือ Dragon 1 จมและเกยตื้นบริเวณเกาะครก	150
5	20 พ.ย. 48	น้ำมันดิบ	บริเวณท่นผูกเรือ SBM ของบริษัทไทยออยล์ จำกัด (มหาชน) อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	ท่อเชื่อมต่อหลุดขณะส่งถ่ายน้ำมัน เนื่องจากคลื่นลมแรง	20
6	4 พ.ค. 49	น้ำมันเตา	บริเวณหน้าท่าเทียบเรือ บริษัท อัลลายแอนซ์ รีไฟน์นิ่ง จำกัด อ.มาบตาพุด จ.ระยอง	รั่วไหลจากรอยรั่วที่ระวางหมายเลข 2 ของเรือบรรทุกน้ำมัน CP 34	20

ตารางที่ 2-2 (ต่อ) สถิติเหตุการณ์น้ำมันรั่วไหลปริมาณมาก ระหว่างปี พ.ศ.2540 – พ.ศ.2556 (กรมเจ้าท่า, 2560)

ลำดับ	วัน เดือน ปี	ชนิด น้ำมัน	สถานที่เกิด	สาเหตุ	ปริมาณ (ตัน)
7	6 ต.ค. 50	Saraline 185V	บริเวณแท่น Trident-16 (Offshore Mobile Drilling Unit) ของ บริษัท Chevron Thailand	รั่วไหลจาก Storage Tank	35
8	9 ธ.ค. 50	น้ำมัน ดีเซลและ น้ำมันเตา	ในทะเลห่างชายฝั่ง ประมาณ 6 ไมล์ทะเล อ. สหิงพระ จ.สงขลา	เรือบรรทุกแก๊สของ บริษัท เวิร์ลไวต์ทรานสปอร์ต จำกัด จม	20
9	15 มิ.ย. 51	น้ำมันเตา	บริเวณอู่เรือบริษัท เอเชียน มารีน เซอร์วิส จำกัด(มหาชน) อ.พระสมุทรเจดีย์ จ.สมุทรปราการ	รั่วไหลจากเรือสินค้า Chol Han Vong Chong Nyon Ho สัญชาติเกาหลีเหนือ	40
10	4 ก.ย. 54	ดีเซล (B5)	ห่างจากเกาะราชาใหญ่ ทางด้านตะวันออก ประมาณ 4 ไมล์ทะเล จ.ภูเก็ต	เรือบรรทุกน้ำมันชื่อ ส. โชคถาวร 6 จม เนื่องจากมีคลื่นลมแรง	40
11	22 มี.ค. 56	น้ำมันเตา	คลองท่าจีน อ.เมือง จังหวัดภูเก็ต	เรือประมงดัดแปลงชื่อ ”เปรมิกา” จม	20
12	27 ก.ค. 56	น้ำมันดิบ	ทุ่นรับน้ำมันดิบกลางทะเล (single point mooring: SPM) รวมทั้ง ด้านเหนือและทิศตะวันตกของเกาะเสม็ด จ.ระยอง	รั่วไหลจากท่อรับ น้ำมันดิบขนาด16 นิ้ว รั่ว บริเวณทุ่น SPM ของ บริษัท PTTGC	50

2.4 แบบจำลองคลื่น

ในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้แบบจำลอง SWAN ในการจำลองคลื่น โดยแบบจำลอง SWAN เป็นแบบจำลองคลื่นรุ่นที่สามที่พัฒนาโดย Delft University of Technology ประเทศเนเธอร์แลนด์ ใช้ในการหาค่าประมาณของพารามิเตอร์ต่างๆของคลื่นในพื้นที่ชายฝั่งทะเล ทะเลสาบและปากแม่น้ำ จากข้อมูลลม, สภาพพื้นท้องน้ำและกระแสน้ำ ซึ่งจะแสดงถึงผลของการเคลื่อนที่ของคลื่น, การสะท้อนของคลื่น, การหักเหของคลื่น, การแตกตัวของคลื่น, การเคลื่อนที่ของคลื่นไปสู่บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความลึก และกระบวนการปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นกับคลื่นแบบไม่เชิงเส้น (The SWAN team, 2015)

2.4.1 สมการพื้นฐาน (governing equations)

แบบจำลอง SWAN พัฒนาจากสมการอนุรักษ์พลังงานของคลื่น (action balance equation) (Booij et al., 1999) ดังแสดงในสมการที่ 2-1

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (2-1)$$

โดยที่ $N(\sigma, \theta)$ คือ action density spectrum ซึ่งประกอบด้วยความถี่ของคลื่น (σ) และทิศทางของคลื่น (θ) พจน์แรกทางซ้ายมือของสมการอธิบายอัตราการเปลี่ยนแปลงของ $N(\sigma, \theta)$ เทียบกับเวลา พจน์ที่ 2 และ 3 อธิบายการถ่ายเทคลื่นในแนวแกน $-x$ และ $-y$ (ด้วยความเร็วคลื่น c_x และ c_y ในแนวแกน $-x$ และ $-y$ ตามลำดับ) พจน์ที่ 4 อธิบายการเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นเมื่อความลึกของน้ำและกระแสน้ำเปลี่ยนแปลงไป (ด้วยความเร็วคลื่น c_σ และในแนวแกน $-\sigma$) พจน์ที่ 5 อธิบายการหักเหของคลื่นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความลึกของน้ำ (ด้วยความเร็วคลื่น c_θ และในแนวแกน $-\theta$) ส่วนพจน์ด้านขวาของสมการคือ energy density spectrum ($E(\sigma, \theta)$) ประกอบด้วยพลังงานที่ทำให้เกิดคลื่นดังแสดงในสมการที่ 2-2

$$\frac{S_{tot}}{\sigma} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad (2-2)$$

โดยที่ S_{in} (input by wind) คือ พลังงานที่ถูกถ่ายเทจากลม, S_{nl} (nonlinear wave-wave interactions) คือ กระบวนการปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นกับคลื่นแบบไม่เชิงเส้น และ S_{ds} (dissipation of wave energy) คือ กระบวนการสลายตัวของพลังงานคลื่น

2.4.1.1 พลังงานที่ถูกถ่ายทอดจากลม

พลังงานที่ถูกถ่ายทอดจากลม สามารถอธิบายได้ดังแสดงในสมการที่ 2-3

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (2-3)$$

เมื่อ $S_{in}(\sigma, \theta)$ คือพลังงานที่ถูกถ่ายทอดจากลม, A เป็นตัวแทนของการเกิดคลื่นแบบเชิงเส้น ซึ่งอธิบายโดย Cavaleri and Malanotte-Rizzoli (1981) ดังแสดงในสมการที่ 2-4 ,B เป็นตัวแทนของการเกิดคลื่นแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) ดังแสดงในสมการที่ 2-5 (Komen et al., 1984) และ $E(\sigma, \theta)$ คือ energy density spectrum

$$A = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{2\pi g^2} (U_* \max[0, \cos(\theta - \theta_w)])^4 H, H = \exp\left\{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_{PM}^*}\right)^{-4}\right\}, \sigma_{PM}^* = \frac{0.13g}{28U_*} 2\pi \quad (2-4)$$

เมื่อ U_* คือ ความเร็วลมเฉือน (friction velocity), θ_w คือ ทิศทางลม, σ_{PM}^* คือ ความถี่สูงสุดของ fully developed sea state ซึ่งอธิบายโดย Pierson and Moskowitz (1964)

$$B = \max\left[0, 0.25 \frac{\rho_a}{\rho} \left(28 \frac{U_*}{c_{ph}} \cos(\theta - \theta_w) - 1\right)\right] \sigma \quad (2-5)$$

เมื่อ c_{ph} คือเฟสความเร็ว และ ρ_a และ ρ คือความหนาแน่นของอากาศและน้ำ ตามลำดับลมที่ใช้สำหรับสมการเป็นข้อมูลลมที่ความสูง 10 เมตรจากระดับน้ำทะเล (U_{10}) ซึ่งถูกคำนวณเป็น friction velocity (U_*) (Wu, 1982) ดังแสดงในสมการที่ 2-6

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad (2-6)$$

เมื่อ C_D คือ drag coefficient ตามเงื่อนไขดังแสดงในสมการที่ 2-7

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} 1.2875 \times 10^{-3} & ; U_{10} < 7.5 \text{ เมตร/วินาที} \\ (0.8 + 0.065 \times U_{10}) \times 10^{-3} & ; U_{10} \geq 7.5 \text{ เมตร/วินาที} \end{cases} \quad (2-7)$$

2.4.1.2 กระบวนการปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นกับคลื่นแบบไม่เชิงเส้น

กระบวนการสำคัญที่เกิดขึ้นเพื่อถ่ายทอดพลังงานของคลื่นจากความถี่หนึ่งไปสู่ความถี่อื่นๆ เมื่อคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากหลายๆ สาเหตุ เช่น การแตกตัวของยอดคลื่น การเคลื่อนที่ของคลื่นไปสู่บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความลึก โดยแบบจำลอง SWAN อธิบายกระบวนการปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นกับคลื่นแบบไม่เชิงเส้นไว้ 3 รูปแบบคือ

1. Triad wave-wave interactions เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบริเวณน้ำตื้นเพื่อถ่ายทอดพลังงานจากคลื่นที่มีความถี่ต่ำไปยังคลื่นที่มีความถี่สูงกว่า (Abreu et al., 1992)

2. Quadruplet wave-wave interactions เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบริเวณน้ำลึกเพื่อถ่ายทอดพลังงานจากคลื่นที่มีความถี่สูงสุดไปคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่า (Young and Vledder, 1993)

3. Diffraction เป็นการเลี้ยวเบนเนื่องจากรูปร่างของชายฝั่งและการเปลี่ยนแปลงความลึกของน้ำที่ส่งผลให้คลื่นแต่ละความถี่เกิดการเลี้ยวเบนแตกต่างกันและมีผลกระทบต่อคลื่นที่มีความถี่อื่นๆ

2.4.1.3 กระบวนการสลายตัวของพลังงานคลื่น

แบบจำลอง SWAN อธิบายการสลายตัวของพลังงานคลื่นไว้ 3 รูปแบบคือ

1. Whitecapping คือ การแตกตัวของยอดคลื่น โดย Hasselmann (1974) ได้อธิบายการแตกตัวของยอดคลื่น ดังแสดงในสมการที่ 2-8

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \bar{\sigma} \frac{k}{k} E(\sigma, \theta) \quad (2-8)$$

เมื่อ Γ คือ steepness dependent coefficient, k คือ จำนวนคลื่น (wave number) และ $\bar{\sigma}$ และ \bar{k} คือ ค่าเฉลี่ยความถี่และค่าเฉลี่ยจำนวนคลื่น ตามลำดับ

2. Bottom friction คือ แรงเสียดทานจากพื้นท้องน้ำ Bertotti and Cavaleri (1994) อธิบายดังสมการที่ 2-9

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_b \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) \quad (2-9)$$

เมื่อ C_b คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานท้องน้ำ ทั้งนี้แบบจำลอง SWAN มีรูปแบบของแรงเสียดทานท้องน้ำอยู่หลายทฤษฎี เช่น Hasselmann et al. (1973), Collins (1972) และ Madsen and Sørensen (1993) เป็นต้น

3. Depth-induced wave breaking คือ การแตกตัวของคลื่นเนื่องจากการเหนี่ยวนำของความลึก (Battjes and Janssen, 1978) ดังแสดงในสมการที่ 2-10

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta) \quad (2-10)$$

เมื่อ D_{tot} คือ อัตราการกระจายพลังงานเฉลี่ยต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เมื่อคลื่นแตกตัว และ E_{tot} คือ พลังงานคลื่นทั้งหมด

2.4.2 การคำนวณคลื่น

การคำนวณค่า $N(\sigma, \theta)$ (action density spectrum) จะใช้หลักการเปรียบเทียบวิธีผลต่างสลับเนื่อง (finite difference method) โดยแบ่งค่าต่อเนื่องออกเป็นช่วงย่อยๆ (discretization) โดยในแต่ละกริดที่มีขนาด Δx และ Δy ในแนวแกน $-x$ และ $-y$ ตามลำดับ ในมิติของสเปกตรัมจะแบ่งด้วยค่าความละเอียดทิศทางคงที่ $\Delta \theta$ และค่าความถี่สัมพันธ์คงที่ $\Delta \sigma / \sigma$ กำหนดให้ค่าดัชนีของแต่ละกริดเป็น $1 \leq i \leq N_x$, $1 \leq j \leq N_y$, $1 \leq l \leq N_\sigma$ และ $1 \leq m \leq N_\theta$ ในแนวแกน $-x$, $-y$, $-\sigma$ และ $-\theta$ ตามลำดับ สำหรับการคำนวณตามช่วงเวลาจะใช้วิธี implicit Euler technique (The SWAN team, 2015) ดังแสดงในสมการที่ 2-11

$$\begin{aligned} \frac{N^n - N^{n-1}}{\Delta t} \Big|_{i,j,l,m} &= \frac{[c_x N]_{i+1/2} - [c_x N]_{i-1/2}}{\Delta x} \Big|_{j,l,m}^t + \frac{[c_y N]_{j+1/2} - [c_y N]_{j-1/2}}{\Delta y} \Big|_{i,l,m}^t + \\ &\quad \frac{[c_\sigma N]_{l+1/2} - [c_\sigma N]_{l-1/2}}{\Delta \sigma} \Big|_{i,j,m}^t + \frac{[c_\theta N]_{m+1/2} - [c_\theta N]_{m-1/2}}{\Delta \theta} \Big|_{i,j,l}^t \end{aligned} \quad (2-11)$$

เมื่อ t คือ เวลา และ Δt คือ ช่วงเวลา

2.4.2.1 การแบ่งค่าการคำนวณในมิติของภูมิศาสตร์ (discretization in geographical space)

ในการคำนวณค่า N และความเร็วคลื่นที่ตำแหน่ง (i,j,l,m) จะถูกประมาณด้วยวิธีแบบ first order upwind scheme หรือวิธีแบบ first order, backward space, backward time (BSBT) โดยการประมาณค่าฟลักซ์ $c_x N$ ที่ตำแหน่ง $(i+1/2,j,l,m)$ และ $c_y N$ ที่ตำแหน่ง $(i,j+1/2,l,m)$ (The SWAN team, 2015) ดังแสดงในสมการที่ 2-12 และสมการที่ 2-13

$$c_x N \Big|_{i+1/2,j,l,m} = \begin{cases} c_x N \Big|_{i,j,l,m} & ; c_x N \Big|_{i,j,l,m} > 0 \\ c_x N \Big|_{i+1,j,l,m} & ; c_x N \Big|_{i+1,j,l,m} < 0 \end{cases} \quad (2-12)$$

$$c_y N \Big|_{i,j+1/2,l,m} = \begin{cases} c_y N \Big|_{i,j,l,m} & ; c_y N \Big|_{i,j,l,m} > 0 \\ c_y N \Big|_{i,j+1,l,m} & ; c_y N \Big|_{i,j+1,l,m} < 0 \end{cases} \quad (2-13)$$

สำหรับค่าฟลักซ์ที่ตำแหน่ง $(i-1/2,j,l,m)$ และ $c_y N$ ที่ตำแหน่ง $(i,j-1/2,l,m)$ จะถูกประมาณในทำนองเดียวกัน

2.4.2.2 การแบ่งค่าการคำนวณในมิติของสเปกตรัม (discretization in spectral space)

ค่าพลักซ์ในมิติของสเปกตรัม (σ, θ) จะไม่ได้ถูกประมาณด้วยวิธี first order upwind scheme เนื่องจากการแพร่กระจายความถี่จะเข้าใกล้ความถี่ที่ปิดกั้น (blocking frequency) หรือเมื่อกระแสน้ำที่มีความถี่สัมพัทธ์ที่สูง จะใช้วิธี central difference เนื่องจากการประมาณค่าอันดับสองให้มีความแม่นยำที่สูงกว่า แต่อย่างไรก็ตามอาจเกิดการสั่นที่ไม่เป็นจริงทางกายภาพได้ ดังนั้นจึงใช้รูปแบบผสมผสาน hybrid central/upwind scheme ในการคำนวณ (The SWAN team, 2015) ดังแสดงในสมการที่ 2-14 และสมการที่ 2-15

$$c_{\sigma} N_{i,j,l+1/2,m} = \begin{cases} (1-0.5\mu)c_{\sigma} N_{i,j,l,m} + 0.5\mu c_{\sigma} N_{i,j,l+1,m} & ; c_{\sigma} N_{i,j,l,m} > 0 \\ (1-0.5\mu)c_{\sigma} N_{i,j,l+1,m} + 0.5\mu c_{\sigma} N_{i,j,l,m} & ; c_{\sigma} N_{i,j,l+1,m} < 0 \end{cases} \quad (2-14)$$

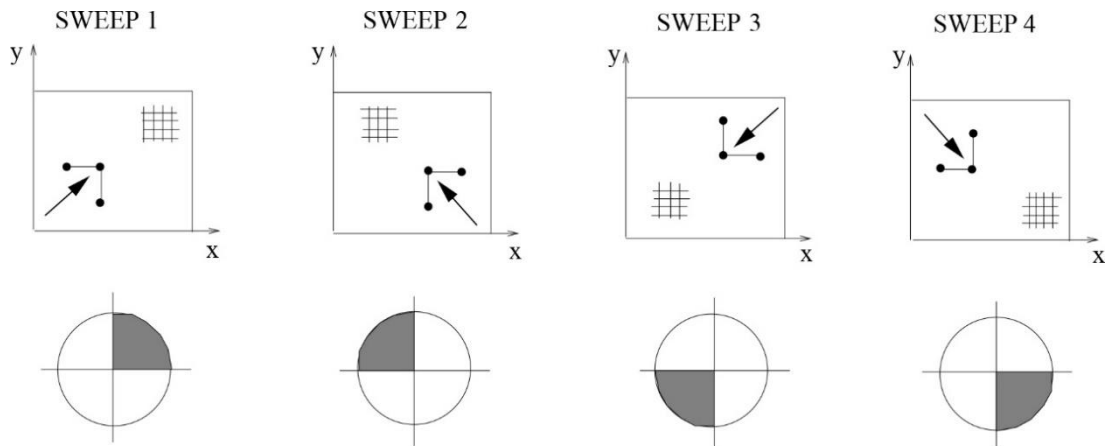
$$c_{\theta} N_{i,j,l,m+1/2} = \begin{cases} (1-0.5\nu)c_{\theta} N_{i,j,l,m} + 0.5\nu c_{\theta} N_{i,j,l,m+1} & ; c_{\theta} N_{i,j,l,m} > 0 \\ (1-0.5\nu)c_{\theta} N_{i,j,l,m+1} + 0.5\nu c_{\theta} N_{i,j,l,m} & ; c_{\theta} N_{i,j,l,m+1} < 0 \end{cases} \quad (2-15)$$

เมื่อ μ และ ν คือค่าคงที่ โดยที่ $\mu \in [0,1]$ และ $\nu \in [0,1]$

2.4.3 ขั้นตอนการแก้สมการ

จากการแบ่งค่าการคำนวณออกเป็นช่วงๆ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น จะได้ระบบสมการในรูปแบบของเมทริกซ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับกริดการถ่ายทอดพลังงานคลื่นในมิติของภูมิศาสตร์ และแก้ระบบสมการด้วยวิธี Gauss-Seidel (Wesseling, 1992) โดยทั่วไปแล้วค่าความเร็วคลื่น c_x และ c_y อาจแตกต่างกันในแต่ละโดเมนทางภูมิศาสตร์จึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนเพิ่มเติม โดยในแต่ละการคำนวณซ้ำ (iteration) การแก้สมการในแต่ละแถวและคอลัมน์จะเริ่มต้นในแต่ละมุมของโดเมนกริด (sweeps) หลังจากดำเนินการแก้สมการครบสี่รอบจะมีการปรับแก้ค่าความเร็วคลื่น c_x และ c_y ดังแสดงในรูปที่ 2-9

หลังจากการปรับแก้ค่าในตำแหน่งกริดทางภูมิศาสตร์แล้วจะทำการปรับแก้ค่าในมิติของสเปกตรัมต่อไป พลังงานคลื่นที่ตำแหน่งเชิงพื้นที่เดียวกันจะขึ้นอยู่กับจุด the upwind grid เท่านั้นซึ่งเพียงพอที่จะปรับแก้ค่าในการกวาดครั้งแรก (90° quadrant) ในแนวแกน (σ, θ)



รูปที่ 2-9 ขั้นตอนการแก้ปัญหาการแพร่กระจายพลังงานคลื่นในมิติทางภูมิศาสตร์ด้วยทิศทางที่เหมาะสม (พื้นที่ที่แรเงา) สำหรับแต่ละครั้งของการแก้สมการ (The SWAN team, 2015)

2.4.4 หลักเกณฑ์ในการหยุดคำนวณ

โดยทั่วไปการคำนวณซ้ำ (iterative method) ควรหยุดเมื่อค่าที่ได้จากการประมาณมีความแม่นยำที่เพียงพอ สำหรับหลักเกณฑ์ในการหยุดการคำนวณของแบบจำลอง SWAN ดังแสดงในสมการที่ 2-16 และสมการที่ 2-17

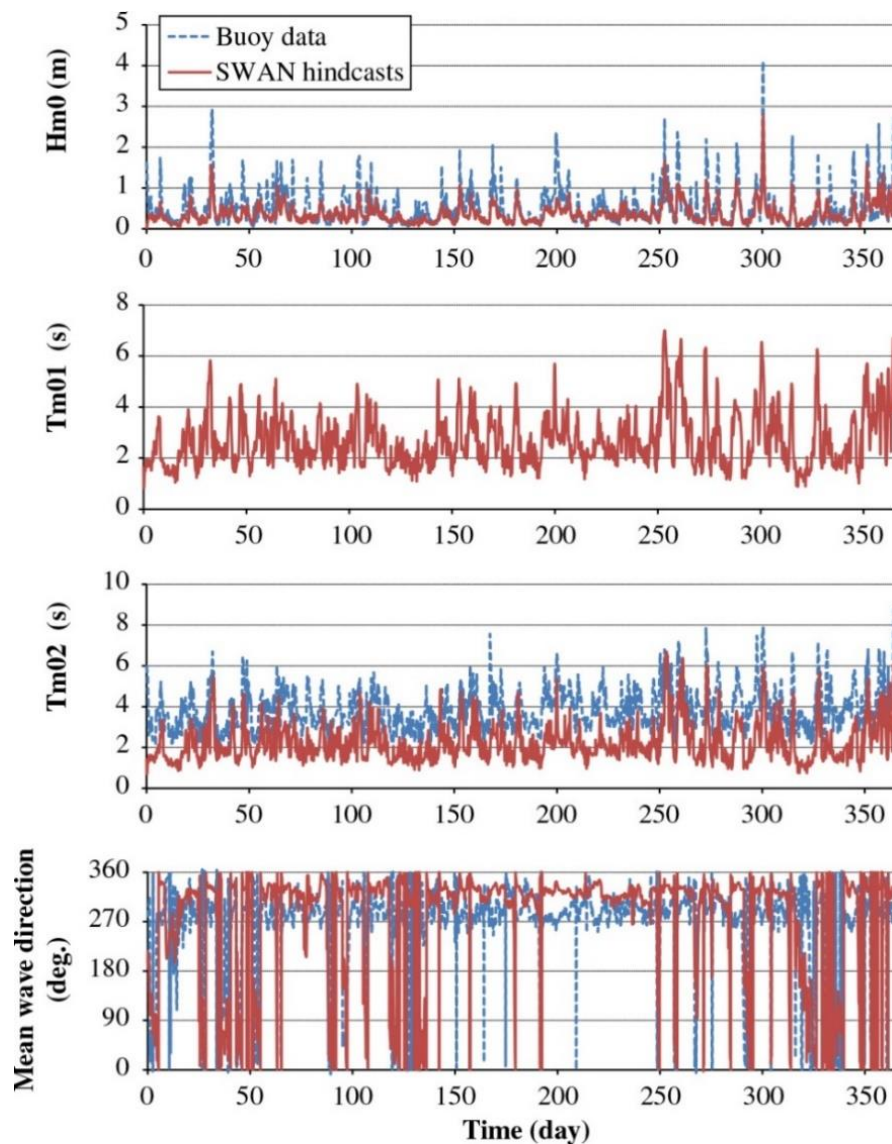
$$\frac{|\Delta H_{m0}^s(i,j)|}{H_{m0}^{s-1}(i,j)} < \epsilon_H^r \quad \text{หรือ} \quad |\Delta H_{m0}^s(i,j)| < \epsilon_H^a \quad (2-16)$$

$$\frac{|\Delta T_{m0}^s(i,j)|}{T_{m0}^{s-1}(i,j)} < \epsilon_T^r \quad \text{หรือ} \quad |\Delta T_{m0}^s(i,j)| < \epsilon_T^a \quad (2-17)$$

เมื่อ $\Delta Q \equiv Q^s - Q^{s-1}$ โดยที่ Q คือตัวแปรต่างๆ สำหรับค่าเริ่มต้นเกณฑ์ในการหยุดการคำนวณทางแบบจำลองกำหนดให้ $\epsilon_H^r = \epsilon_T^r = 0.02$, $\epsilon_H^a = 0.02$ m และ $\epsilon_T^a = 0.2$ s

2.4.5 การศึกษาผ่านมา

การประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAN ในการคำนวณความสูงคลื่นในพื้นที่จริงเกิดขึ้นในหลายๆ พื้นที่ เช่น Akpinar et al. (2012) ใช้แบบจำลอง SWAN ในคำนวณความสูงคลื่นในทะเลดำ โดยใช้ข้อมูลลม ERA-Interim ราย 6 ชั่วโมงซึ่งเป็นข้อมูลลมที่สังเคราะห์โดย ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลอง SWAN สามารถคำนวณความสูงคลื่น คาบคลื่นและทิศทางคลื่นที่ได้ใกล้เคียงกับข้อมูลทุ่นตรวจวัด ทั้งนี้พบว่าข้อมูลคลื่นที่คำนวณได้จะน้อยกว่าความสูงคลื่นที่ตรวจวัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 2-10

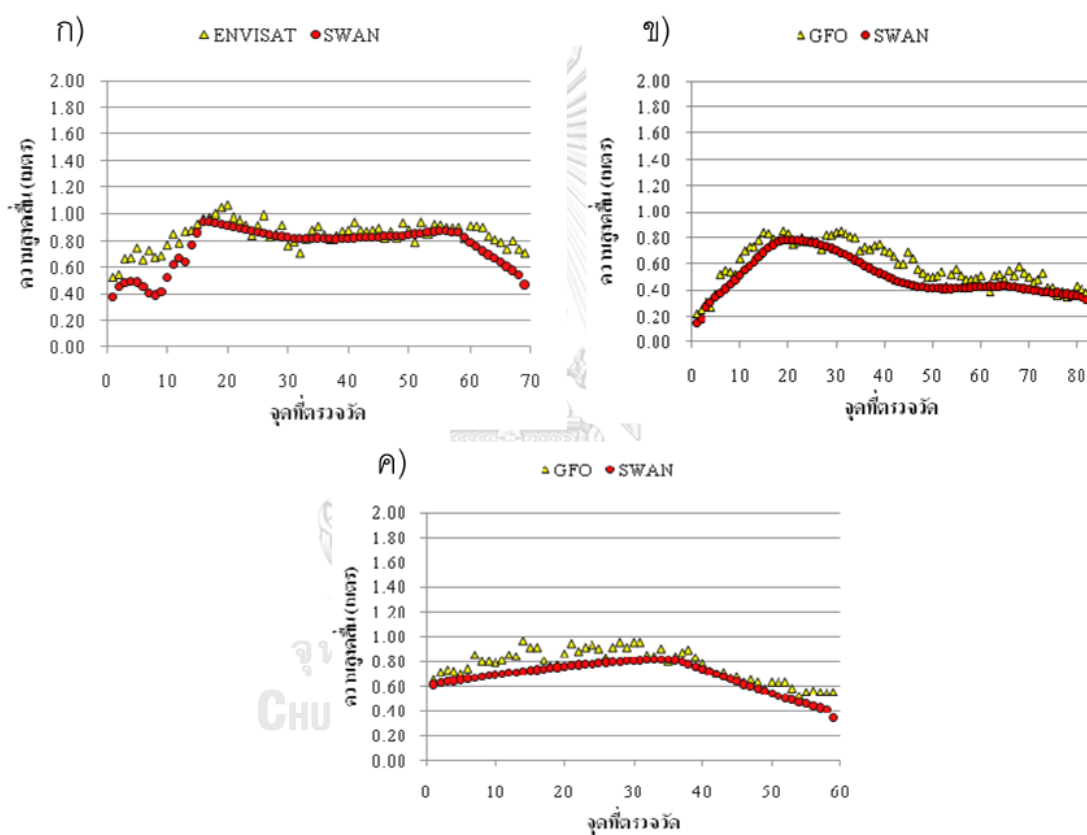


รูปที่ 2-10 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง SWAN และข้อมูลทุ่นในทะเลดำ (Akpınar et al., 2012)

วิริยะ เหลืองอร่าม (2547) ศึกษาคลื่นในอ่าวไทยด้วยแบบจำลอง SWAN โดยใช้ข้อมูลลมจากแบบจำลอง NOGAPS (Navy Operational Global Atmosphere Prediction System) ของกองทัพเรือสหรัฐอเมริกา ทำเปรียบเทียบความสูงคลื่นที่ได้จากแบบจำลองกับทุ่นสมุทรศาสตร์ระยะไกลและดาวเทียม JASON1 และ GFO ผลการศึกษาพบความสูงคลื่นที่คำนวณได้จากแบบจำลอง SWAN ส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าความสูงคลื่นที่ได้จากทุ่นสมุทรศาสตร์

นอกจากนี้แบบจำลอง SWAN ยังถูกนำไปใช้ในการศึกษาค้นคว้าในกรณีสภาพอากาศรุนแรง โดยวาทีน ธนาธารพร และคณะ (2554) มีการประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAN ในการคำนวณความสูง

คลื่นในช่วงที่เกิดพายุไต้ฝุ่นหมู่ฟ้าที่พัดผ่านอ่าวไทยระหว่างวันที่ 25 – 26 พฤศจิกายน พ.ศ.2547 โดยใช้ข้อมูลลมราย 12 ชั่วโมงจากแบบจำลอง NOGAPS (Navy Operational Global Atmosphere Prediction System) ของกองทัพเรือสหรัฐอเมริกา ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลอง SWAN สามารถจำลองคลื่นได้ใกล้เคียงกับความสูงคลื่นที่ตรวจวัดจากดาวเทียม ENVISAT และ GFO ประมาณ 85 – 90 % แต่ยังคงต่ำกว่าความสูงคลื่นที่ตรวจวัดได้จากดาวเทียม ดังแสดงในรูปที่ 2-11 และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) 0.83 – 0.92 ทั้งนี้ความแตกต่างที่พบนั้นสามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น ข้อมูลลมที่ได้ หรือข้อมูลดาวเทียมเนื่องจากไม่ได้เป็นข้อมูลที่ได้จากตรวจวัดโดยตรง



รูปที่ 2-11 การเปรียบเทียบความสูงคลื่นที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับ (ก) ดาวเทียม ENVISAT เมื่อวันที่ 26 พฤศจิกายน พ.ศ.2547 เวลา 10.14 น., (ข) ดาวเทียม GFO เมื่อวันที่ 24 พฤศจิกายน พ.ศ.2547 เวลา 12.56 น. และ (ค) ดาวเทียม GFO เมื่อวันที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ.2547 เวลา 00.49 น. ในช่วงพายุไต้ฝุ่นหมู่ฟ้า (วาทิน ธนาธารพร และคณะ, 2554)

2.5 แบบจำลองกระแสน้ำ

การศึกษาการไหลเวียนกระแสน้ำที่ผ่านมามีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มากมาย ไม่ว่าจะเป็นแบบจำลอง Princeton Ocean Model (POM) ทั้งแบบ 2 มิติและแบบ 3 มิติหรือแบบจำลอง Delft3D ทั้งนี้ในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้แบบจำลอง Delft3D ซึ่งพัฒนาโดย Delft Hydraulics Lab ประเทศเนเธอร์แลนด์ มาใช้ในการจำลองกระแสน้ำ โดยแบบจำลอง Delft3D ประกอบด้วยโปรแกรมย่อยๆ ดังนี้ คือ Delft3D-FLOW, Delft3D-MOR, Delft3D-WAVE, Delft3D-TIDE, Delft3D-WAQ, Delft3D-ECO และ Delft3D-PART นอกจากนี้โปรแกรมย่อยเหล่านี้แล้ว ยังมีเครื่องมือที่ใช้ช่วยในการสร้างแบบจำลองด้วย เช่น RGFGRID (โปรแกรมที่ใช้ในการสร้างกริดสำหรับแบบจำลอง) และ QUICKIN (โปรแกรมที่ใช้เตรียมความลึกน้ำ หรือค่าเริ่มต้นให้กับแบบจำลอง) เป็นต้น โดยในการศึกษานี้จะประยุกต์ใช้แบบจำลอง Delft3D-FLOW เพื่อจำลองกระแสน้ำในอ่าวไทย

2.5.1 สมการพื้นฐาน (governing equations)

โปรแกรม Delft3D-FLOW พัฒนาโดยการแก้สมการ unsteady shallow-water ทั้งแบบ 2 มิติ (เฉลี่ยตามความลึก) และ 3 มิติ โดยสมการประกอบไปด้วยสมการโมเมนตัมในแนวตั้ง สมการโมเมนตัมในแนวระนาบ สมการความต่อเนื่อง สมการการขนส่ง และแบบจำลองการไหลปั่นป่วน (turbulence closure) โดยในการศึกษานี้เลือกจำลองกระแสน้ำในแบบ 2 มิติ (เฉลี่ยตามความลึก) ดังนั้นในส่วนของสมการโมเมนตัมในแนวตั้งจะลดรูปลงเป็นสมการความดันของไหลแบบสถิต เนื่องจากความเร็วในแนวตั้งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ดังนั้น Delft3D-FLOW จึงนำมาใช้วิเคราะห์กระแสน้ำในบริเวณน้ำตื้น ทะเลชายฝั่ง ซากทะเล ลากูน แม่น้ำ และทะเลสาบ การแก้สมการอุทกพลศาสตร์สามารถทำได้ทั้งบนกริดแบบสี่เหลี่ยมบนระบบคาร์ทีเซียน, กริดแบบ orthogonal curvilinear หรือกริดแบบ spherical ในกรณีการแก้สมการ 3 มิติ กริดในแนวตั้งสามารถใช้ระบบพิกัดแบบ sigma (σ) (Lesser et al., 2004, Deltares, 2014) ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.5.1.1 ระบบพิกัด sigma (σ)

สำหรับพิกัดในแนวตั้ง สามารถกำหนดให้มีค่าระหว่าง -1 กับ 0 ดังแสดงในสมการ

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d} \quad (2-18)$$

เมื่อ ζ คือระดับผิวน้ำเหนือระดับน้ำนิ่ง และ d คือความลึกน้ำ โดยกำหนดให้ค่า -1 คือค่าที่พื้นท้องน้ำ ส่วน 0 คือค่าที่ผิวน้ำ ในกรณีของแบบจำลอง 3 มิติ ค่า σ จะบอกชั้นของแบบจำลอง ซึ่งอาจจะเป็นค่าคงที่หรือแตกต่างกันในแต่ละชั้นความลึกก็ได้ เช่น น้ำชั้นบนและน้ำชั้นล่างอาจจะมีค่า σ น้อย แต่ตรงกลางน้ำมีค่ามากกว่า เป็นต้น การแก้สมการการอนุรักษ์พลังงานใน 3 มิติ จะแยกแก้สมการในแต่ละชั้นความลึก สมการเชิงอนุพันธ์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนจะถูกแปลงให้อยู่ในระบบพิกัด sigma โดยใช้กฎลูกโซ่

2.5.1.2 เฟรมอ้างอิง Generalized Lagrangian Mean (GLM)

หากการจำลองมีการรวมคลื่นเข้าไว้กับแบบจำลองอุทกพลศาสตร์แล้ว การแก้สมการจะต้องแก้บนเฟรมอ้างอิง Generalized Lagrangian Mean (GLM) (Andrews and McIntyre, 1978, Groeneweg and Klopman, 1998, Groeneweg, 1999) สมการความลึกเฉลี่ย (2 มิติ) และ 3 มิติบนเฟรมอ้างอิงชนิดนี้จะมีลักษณะคล้ายกับสมการออยเลอร์ (Euler equations) แต่อย่างไรก็ตามแรงเฉลี่ยใน 1 คาบคลื่นที่เกิดเนื่องจากคลื่นจะสามารถเขียนออกมาได้ชัดเจนมากกว่า สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว GLM และความเร็ว Eulerian (Walstra et al., 2001) สามารถเขียนได้ดังแสดงในสมการที่ 2-19 และสมการที่ 2-20

$$U = u + u_s \quad (2-19)$$

$$V = v + v_s \quad (2-20)$$

เมื่อ U และ V คือความเร็วบนเฟรมอ้างอิง GLM, u และ v คือความเร็วบนเฟรมอ้างอิง Euler และ u_s และ v_s คือ Stokes' drift

2.5.1.3 สมมติฐานของสมการความดันของไหลแบบสถิต (hydrostatic equation)

สำหรับสมมติฐานในพื้นที่ที่น้ำตื้น สมการโมเมนตัมในแนวตั้งจะลดรูปเป็นสมการความดันของไหลแบบสถิต ดังแสดงในสมการ 2-21

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -\rho g h \quad (2-21)$$

2.5.1.4 สมการโมเมนตัมในแนวระนาบ (horizontal momentum equation)

สมการโมเมนตัมในแนวระนาบ ดังแสดงในสมการที่ 2-22 และสมการที่ 2-23

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\omega}{h} \frac{\partial U}{\partial \sigma} - fV = -\frac{1}{\rho} P_x + F_x + M_x + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\mathbf{V}_V \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) \quad (2-22)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\omega}{h} \frac{\partial V}{\partial \sigma} - fU = -\frac{1}{\rho} P_y + F_y + M_y + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\mathbf{V}_V \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) \quad (2-23)$$

ความดันในแนวระนาบ (P_x และ P_y) พิจารณาจาก Boussinesq approximation ดังแสดง
ในสมการที่ 2-24 และสมการที่ 2-25

$$\frac{1}{\rho} P_x = g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \frac{h}{\rho} \int_{\sigma}^0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \sigma'}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma'} \right) d\sigma' \quad (2-24)$$

$$\frac{1}{\rho} P_y = g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g \frac{h}{\rho} \int_{\sigma}^0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \sigma'}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma'} \right) d\sigma' \quad (2-25)$$

Reynold's stresses ในแนวระนาบ (F_x และ F_y) คำนวณได้โดยใช้ eddy viscosity concept (Rodi, 1984) ในกรณีของการจำลองในขนาดใหญ่ซึ่งค่าความเค้นเฉือน (shear stress) ตามขอบเขตอาจไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา ดังนั้นจะลดรูป F_x และ F_y ได้ดังแสดงในสมการที่ 2-26

$$F_x = \mathbf{V}_H \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \quad \text{และ} \quad F_y = \mathbf{V}_H \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \quad (2-26)$$

โดยที่พิจารณาเกรเดียนต์ตามระนาบ sigma และในสมการ M_x และ M_y เป็นส่วนที่มาจาก external source/sink ของโมเมนตัม เช่น แรงภายนอกเนื่องจากโครงสร้าง อัตราการไหล หรือ ความเค้นเนื่องจากคลื่น เป็นต้น

2.5.1.5 สมการความต่อเนื่อง (continuity equation)

สมการความต่อเนื่องเฉลี่ยตามความลึก (2 มิติ) สามารถเขียนได้ดังแสดงในสมการที่ 2-27

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [h\bar{U}]}{\partial x} + \frac{\partial [h\bar{V}]}{\partial y} = S \quad (2-27)$$

โดยที่ \bar{U} และ \bar{V} คือความเร็วกระแสน้ำในแนวแกน -x และ -y ตามลำดับ S คือคุณสมบัติทางกายภาพใดๆ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ซึ่งอาจเป็นอัตราการไหลภายนอก การระเหย หรือฝน เป็นต้น

2.5.1.6 สมการขนส่ง (Transport equation)

สมการขนส่งถูกเขียนอยู่ในรูปของสมการ advection-diffusion ดังแสดงในสมการที่ 2-28

$$\frac{\partial[hC]}{\partial t} + \frac{\partial[hUc]}{\partial x} + \frac{\partial[hVc]}{\partial y} + \frac{\partial[wC]}{\partial \sigma} = h \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_H \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_H \frac{\partial c}{\partial y} \right) \right] + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) + hS \quad (2-28)$$

ในการแก้สมการความหนืดในแนวระนาบและแนวตั้ง (\mathbf{v}_H และ \mathbf{v}_V) และค่าการแพร่ (diffusivity) ในแนวระนาบและแนวตั้ง (D_H และ D_V) ต้องกำหนดรูปแบบเอาไว้ด้วย สำหรับโปรแกรม Delft3D-FLOW จะสมมติให้ ค่าความหนืดในแนวระนาบและค่าการแพร่มาจาก 3 ส่วนย่อยรวมกันคือ 1) molecular viscosity 2) 3D turbulence และ 3) 2D turbulence โดยค่า molecular viscosity ของน้ำมีค่าคงที่และมีค่าประมาณ $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ สำหรับการจำลองใน 3 มิติ ค่า 3D turbulence จะคำนวณมาจาก turbulence closure ส่วนค่า 2D turbulence เป็นการวัดการผสมผสานในแนวระนาบ ซึ่งไม่สามารถทำได้โดยกระบวนการ advection บนกริดในแนวระนาบ ค่าของ 2D turbulence อาจพิจารณาจากการกำหนดโดยผู้ใช้ซึ่งจะเป็นได้ทั้งแบบคงที่หรือเปลี่ยนแปลงตามพื้นที่ หรืออาจหาได้จากการใช้แบบจำลอง subgrid สำหรับ horizontal large eddy simulation (HLES) ซึ่งมีอยู่ในโปรแกรม Delft3D-FLOW (Vossen, 2000)

ในการใช้สมการขนส่ง ค่า vertical eddy diffusivity จะถูกลดรูปลงมาจาก vertical eddy viscosity ดังแสดงในสมการที่ 2-29

$$D_V = \frac{\nu_V}{\sigma_C} \quad (2-29)$$

เมื่อ σ_C คือ Prandtl-Schmidt number ซึ่งมีค่าดังแสดงในสมการที่ 2-30

$$\sigma_C = \sigma_{C0} F_\sigma(Ri) \quad (2-30)$$

เมื่อ σ_{C0} คือ Prandtl-Schmidt number สำหรับการขนส่ง ในกรณีที่เป็นแบบจำลอง algebraic turbulence ค่า $F_\sigma(Ri)$ เป็น damping function ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของการแบ่งชั้นที่ได้จากเกรเดียนต์ของ Richardson's number และจะมีค่าเท่ากับ 1 ถ้าแบบจำลอง $\mathbf{k} - \epsilon$ turbulence ถูกนำมาใช้ โดยที่เทอมแรงลอยตัวในแบบจำลอง $\mathbf{k} - \epsilon$ turbulence จะถูกนำมาใช้โดยอัตโนมัติเพื่อพิจารณาถึงผลจาก turbulence-damping ที่เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นในแนวตั้ง

2.5.1.7 แบบจำลอง Turbulence closure

ในโปรแกรม Delft3D-FLOW ได้ติดตั้งแบบจำลอง Turbulence closure ไว้หลายรูปแบบ โดยทุกรูปแบบอยู่ในหลักการของ eddy viscosity (Kolmogorov, 1942) ดังแสดงในสมการที่ 2-31

$$\nu_V = c_\mu' L \sqrt{k} \quad (2-31)$$

เมื่อ c_μ' คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการปรับแก้, L คือ ความยาวของการผสมผสาน และ k คือ turbulent kinetic energy

2.5.2 เงื่อนไขขอบเขต

2.5.2.1 เงื่อนไขขอบเขตที่พื้นและที่ผิวน้ำอิสระ

ในระบบพิกัด σ ที่พื้นและที่ผิวน้ำอิสระจะสัมพันธ์กับระยะ σ ดังนั้นความเร็วในแนวตั้งที่ขอบเขตจะมีค่าดังแสดงในสมการที่ 2-32 ส่วนแรงเสียดทานที่พื้นแสดงในสมการที่ 2-33 และความเสียดทานเนื่องจากลมบริเวณผิวน้ำแสดงในสมการที่ 2-34

$$\omega(-1) = 0 \quad \text{และ} \quad \omega(0) = 0 \quad (2-32)$$

$$\left. \frac{v_V}{h} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right|_{\sigma=-1} = \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad \text{และ} \quad \left. \frac{v_V}{h} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right|_{\sigma=-1} = \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (2-33)$$

$$\left. \frac{v_V}{h} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right|_{\sigma=0} = \frac{\tau_{sx}}{\rho} \quad \text{และ} \quad \left. \frac{v_V}{h} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right|_{\sigma=0} = \frac{\tau_{sy}}{\rho} \quad (2-34)$$

เมื่อ τ_{bx} และ τ_{by} คือ ความเค้นเฉือนที่พื้นท้องน้ำ และ τ_{sx} และ τ_{sy} คือ ความเค้นเฉือนที่ผิวน้ำ ในแนวแกน $-x$ และ $-y$ ตามลำดับ

ในการคำนวณแบบ 2 มิติ ความเค้นเฉือนที่ผิวน้ำเกิดจากการไหลแบบปั่นป่วน ดังแสดงในสมการที่ 2-35

$$\vec{\tau}_{bx} = \frac{\rho g \vec{U} |\vec{U}|}{C_d^2} \quad (2-35)$$

เมื่อ τ_b คือความเค้นเฉือนที่พื้นท้องน้ำ, ρ คือความหนาแน่นของน้ำ, \vec{U} คือขนาดของความเร็วเฉลี่ยทั้งความลึกน้ำ และ C_d คือสัมประสิทธิ์แรงต้าน ซึ่งหาได้จากสมการของ Manning's ดังสมการที่ 2-36

$$C_d = \frac{\sqrt[6]{d}}{n} \quad (2-36)$$

เมื่อ d คือความลึกน้ำ และ n คือสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง

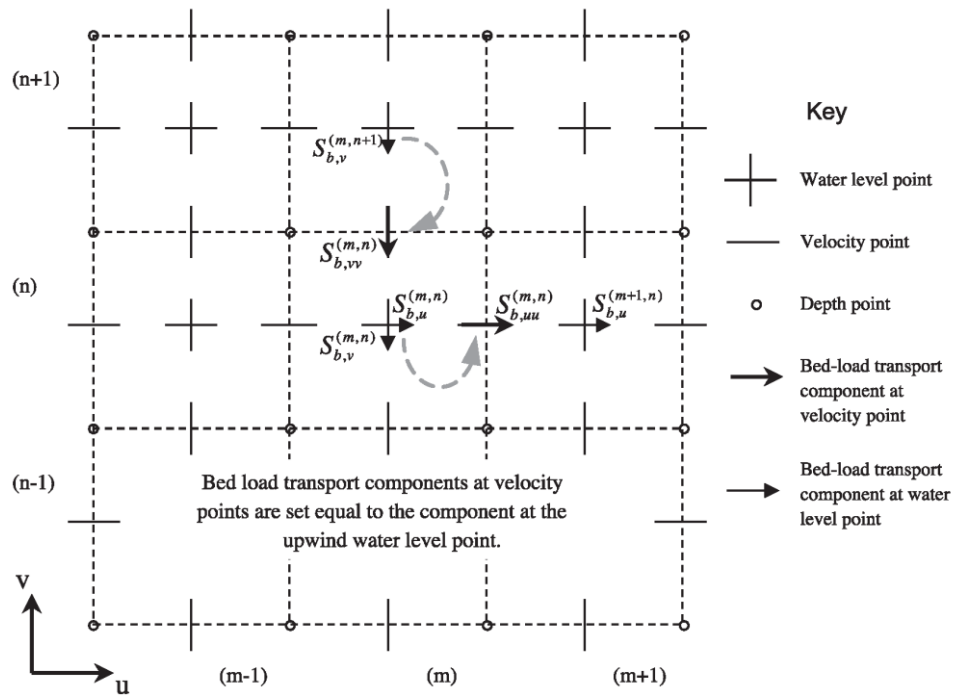
2.5.2.2 เงื่อนไขขอบเขตด้านข้าง (lateral boundary conditions)

ขอบเขตปิด (close boundary) คือแนวเส้นที่ขอบเขตของพื้นที่ศึกษา ซึ่งเป็นแนวที่ไม่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรต่างๆ เช่น แนวชายฝั่ง เป็นต้น ส่วนขอบเขตเปิด (open boundary) จะเป็นแนวที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรต่างๆ สำหรับในแบบจำลองนี้บริเวณขอบเขตปิด ความเร็วที่ตั้งฉากกับขอบเขตปิดจะมีค่าเป็นศูนย์เสมอ (free slip condition) ส่วนการกำหนดค่าที่บริเวณขอบเขตเปิด สามารถกำหนดค่าได้หลายรูปแบบ เช่น ระดับน้ำ ความเร็ว (ในทิศทางที่ตั้งฉากกับขอบเขต) อัตราน้ำไหล หรือค่าการสะท้อนกลับขนาดเล็กลงๆ ที่บริเวณขอบเขต (linearized Riemann invariant) (Verboom and Slob, 1984) เป็นต้น ในกรณีของแบบจำลอง 3 มิติ ผู้ใช้ต้องกำหนดว่าจะให้การไหลบริเวณขอบเขตเปิดเป็นแบบคงที่หรือลอการิทึม

2.5.3 ขั้นตอนการแก้สมการ

โปรแกรม Delft3D-FLOW เป็นแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้หลักการเบี่ยงวิธีผลต่างสลับเนื่อง (finite difference method) สามารถแบ่งสมการน้ำตื้นที่มีความต่อเนื่องออกเป็นช่วงย่อยๆ (discretization) ได้หลายรูปแบบ เช่น ทรงสี่เหลี่ยม curvilinear หรือกริดทรงกลม ตัวแปรแต่ละตัวจะถูกจัดเรียงให้อยู่อย่างมีรูปแบบที่แน่นอนบนกริด ใน Delft3D-FLOW ตัวแปรจะถูกจัดเรียงบนกริดในแบบที่เรียกว่า Arakawa C-grid หรือ staggered grid โดยที่จุดของระดับน้ำ (ความดัน) จะถูกกำหนดไว้ที่จุดกลางของกริดเซลล์ ส่วนความเร็วจะตั้งฉากกับเส้นกริดที่จุดของความเร็วอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2-12

การแก้สมการความต่อเนื่อง และสมการโมเมนตัมในแนวระนาบในโปรแกรม Delft3D-FLOW จะใช้วิธีการที่เรียกว่า Alternative Direction Implicit (ADI) (Stelling and Leendertse, 1991) โดยแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ second order central upwind scheme และ third order upwind scheme ดังแสดงในสมการที่ 2-37 ถึงสมการที่ 2-41 ซึ่งจะทำให้การคำนวณในเชิงตัวเลขมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยแต่ละช่วงเวลา (time step) จะถูกควบคุมเสถียรภาพของแบบจำลองโดยใช้ Courant-Friedrichs-Lewy condition (CFL condition) ดังแสดงในสมการที่ 2-42



รูปที่ 2-12 กริดที่ใช้ในโปรแกรม Delft3D-FLOW และตำแหน่งของตัวแปรที่วางตัวบนกริด รวมถึงการขนส่งของตะกอน (Lesser et al., 2004)

$$\frac{\vec{U}^{l+1/2} - \vec{U}^l}{\frac{1}{2}\Delta t} + \frac{1}{2}A_x \vec{U}^{l+1/2} + \frac{1}{2}A_y \vec{U}^l + BU^{l+1/2} = d \quad (2-37)$$

$$\frac{\vec{U}^{l+1} - \vec{U}^{l+1/2}}{\frac{1}{2}\Delta t} + \frac{1}{2}A_x \vec{U}^{l+1/2} + \frac{1}{2}A_y \vec{U}^{l+1} + BU^{l+1} = d \quad (2-38)$$

$$A_x = \begin{bmatrix} 0 & -f & g \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} & 0 \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

$$A_y = \begin{bmatrix} u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} & 0 & 0 \\ -f & 0 & g \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & h \frac{\partial}{\partial y} & v \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2-40)$$

$$B = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-41)$$

$$CFL = 2\Delta t \sqrt{gh \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)} < 4\sqrt{2} \quad (2-42)$$

เมื่อ \vec{U} คือ $(u, v, \zeta)^T$, λ คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานท้องน้ำ, \vec{d} คือ แรงจากภายนอก เช่น ลมหรือความกดอากาศ เป็นต้น, Δt คือ ช่วงเวลา และ $\Delta x, \Delta y$ คือ ระยะห่างของกริดในแนวแกน $-x$ และ $-y$

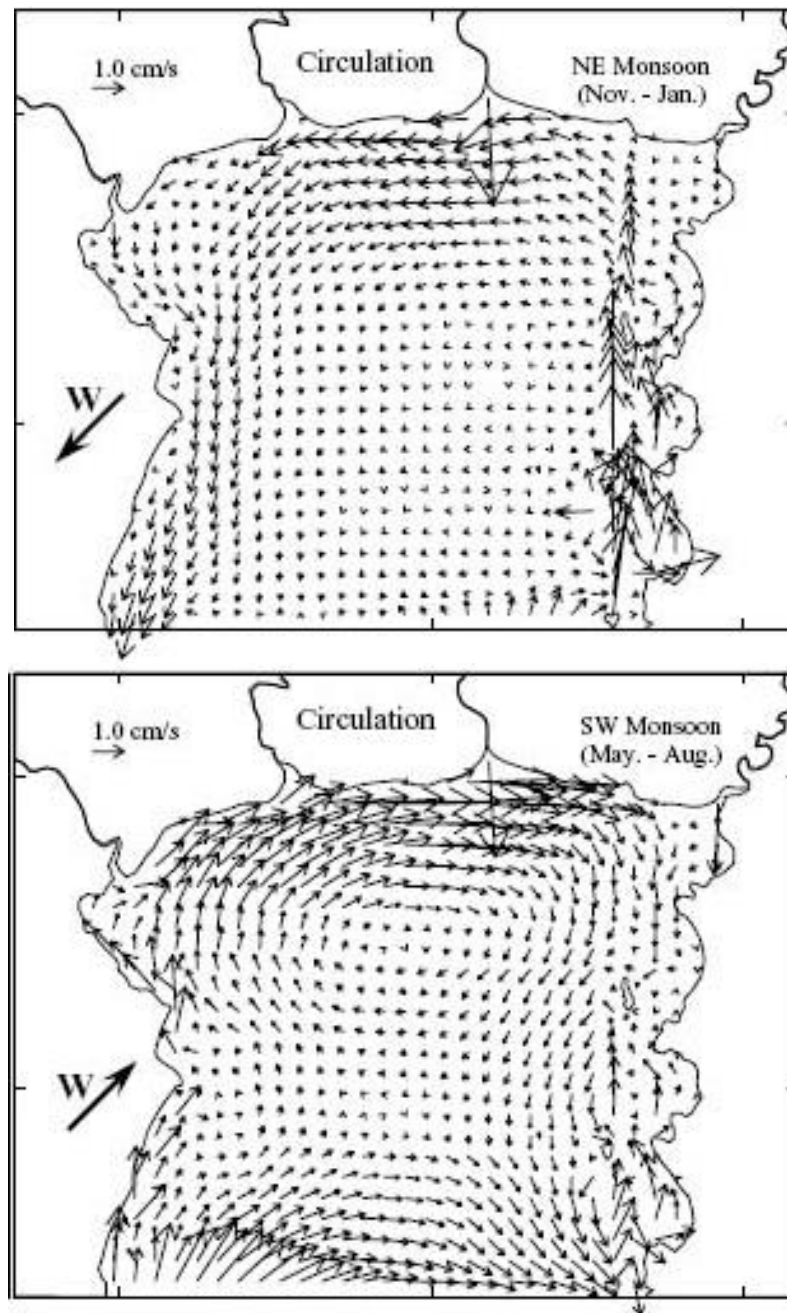
ในส่วนของการ diffusion tensor มันจะถูกกำหนดขึ้นมาใหม่ให้อยู่บนระบบพิกัด sigma โดยสมมติให้สเกลความยาวในแนวระนาบมีค่ามากกว่าความลึกน้ำมากๆ (Mellor and Blumberg, 1985) และการไหลเป็นแบบ boundary layer type ซึ่งความเร่งในแนวตั้งมีค่าน้อยมากๆ ทำให้การกระจายความดันในแนวตั้งถูกลดรูปลงเป็นสมการความดันของไหลแบบสถิต

2.5.4 การศึกษาที่ผ่านมา

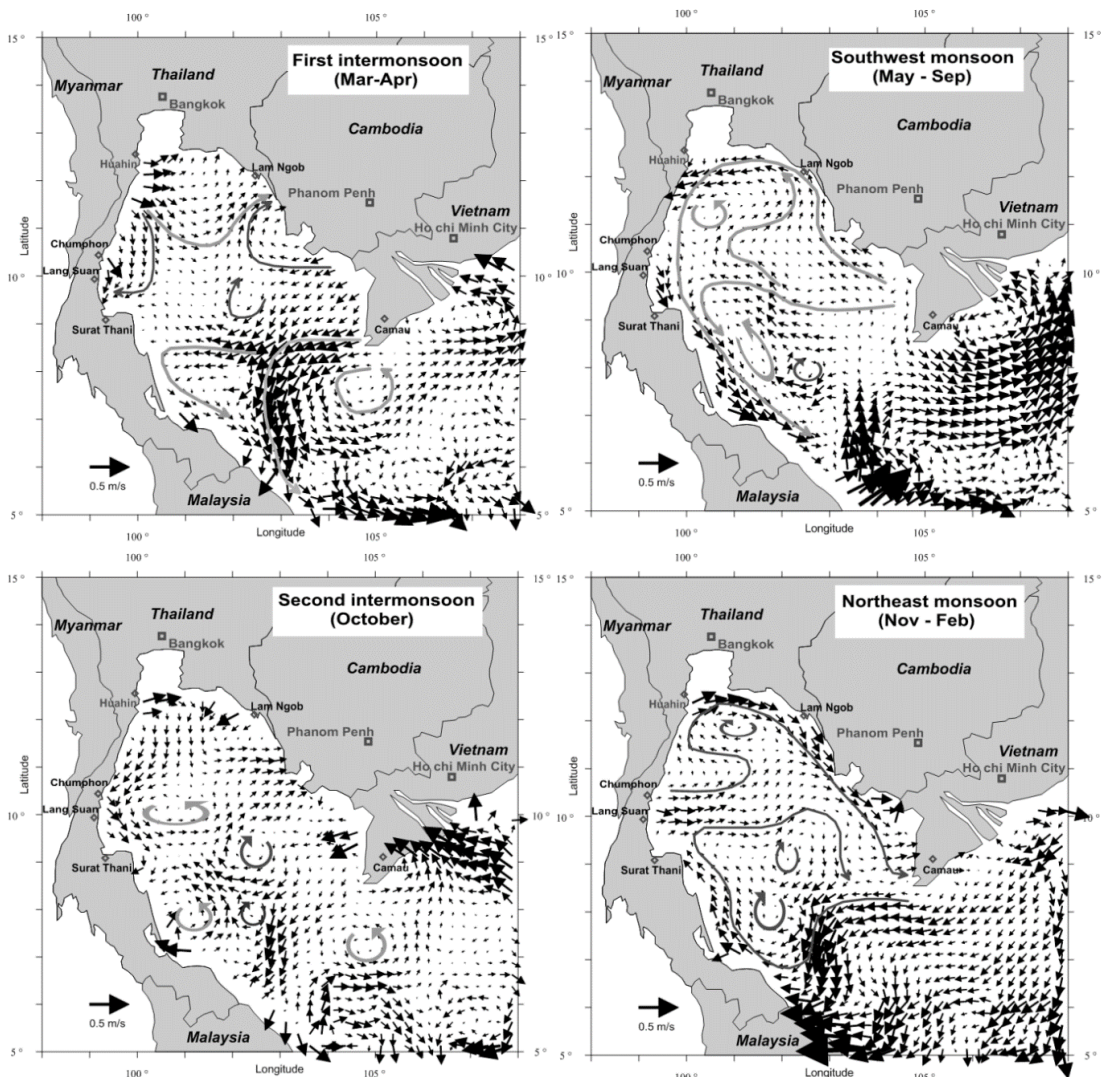
การศึกษาการไหลเวียนกระแสน้ำในอ่าวไทยที่มีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มากมาย ไม่ว่าจะเป็นแบบจำลอง Princeton Ocean Model (POM) ทั้งแบบ 2 มิติและแบบ 3 มิติ หรือแบบจำลอง Delft3D

Buranapratheprat (2008) ใช้แบบจำลอง POM แบบ 3 มิติจำลองกระแสน้ำในอ่าวไทยตอนบนโดยใช้ข้อมูลระดับน้ำขึ้นน้ำลงและลม มาคำนวณทิศทางการเคลื่อนที่ในแต่ละเดือน ทั้งนี้ได้กำหนดให้ความเร็วลมคงที่ พบว่าในช่วงลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่ลมพัดมาจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ กระแสน้ำในอ่าวไทยตอนบนมีการไหลเวียนเป็นวงวนเข็มนาฬิกา และในช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่ลมพัดมาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ กระแสน้ำในอ่าวไทยตอนบนไหลเป็นวงตามเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 2-13

Sojisuporn et al. (2010) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงกระแสน้ำรายฤดูกาลในอ่าวไทย โดยใช้ข้อมูลความเค็ม อุณหภูมิ จากฐานข้อมูลมหาสมุทรโลก (World Ocean Database) ของ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) และข้อมูลระดับน้ำรายเดือนจากดาวเทียม TOPEX/Poseidon และดาวเทียม ERS-2 พบว่ากระแสน้ำไหลวนเข็มนาฬิกาในช่วงลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และไหลเป็นวงตามเข็มนาฬิกาเมื่อได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือดังแสดงในรูปที่ 2-14



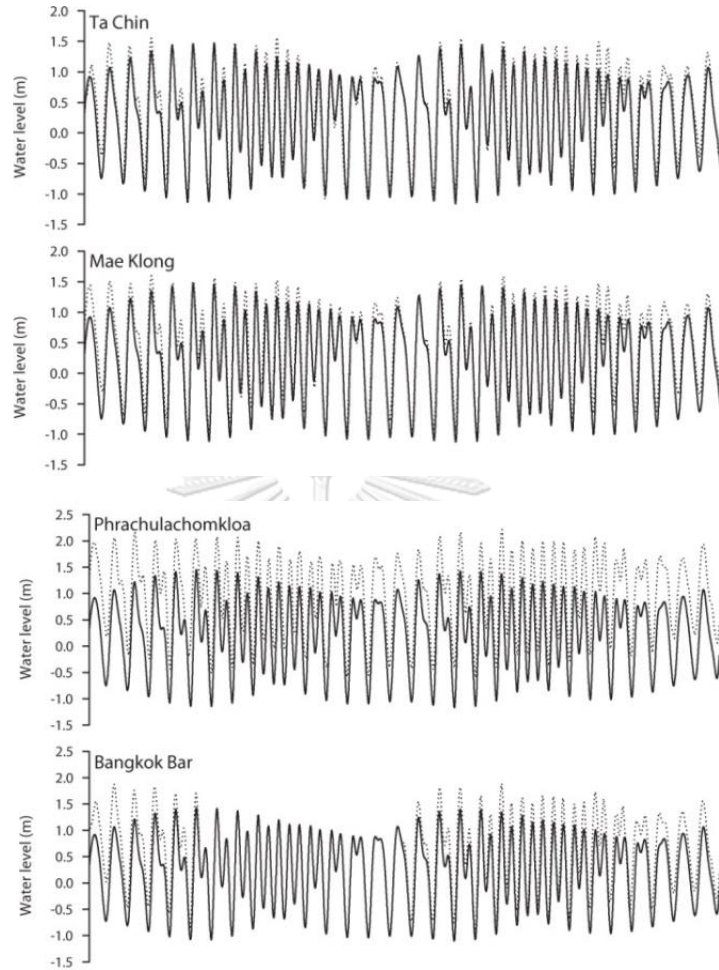
รูปที่ 2-13 ลักษณะการไหลเวียนของกระแสน้ำในอ่าวไทยตอนบน (Buranapratheprat, 2008)



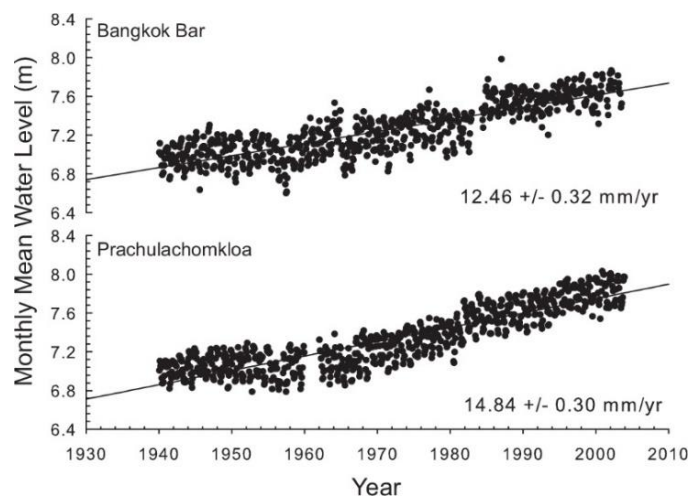
รูปที่ 2-14 ลักษณะการไหลเวียนของกระแสน้ำในอ่าวไทย (Sojisuorn et al., 2010)

Saramul (2010) ได้เปรียบเทียบข้อมูลระดับน้ำจากสถานีตรวจวัดและระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D ในบริเวณอ่าวไทยตอนบน พบว่าแบบจำลอง Delft3D สามารถจำลองระดับน้ำได้ใกล้เคียงกับระดับน้ำจริง แต่มีอยู่บางสถานีพบว่าค่าระดับน้ำมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2-15 ซึ่งคาดว่าความแตกต่างของระดับน้ำที่สถานีป้อมพระจุลและสันดอนเจ้าพระยาน่าจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลที่เพิ่มขึ้นทุกปี และมีการทรุดตัวของพื้นดินในสถานีตรวจวัดทำให้ระดับน้ำที่ได้จากตรวจวัดคลาดเคลื่อนไป โดยจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำรายเดือนที่สถานีสันดอนเจ้าพระยาและป้อมพระจุลจอมเกล้าตั้งแต่ปี พ.ศ.2483 - พ.ศ.2527 พบว่าระดับน้ำเฉลี่ยมีการเปลี่ยนแปลงประมาณ 12.5 และ 14.8 มิลลิเมตรต่อปี ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 2-16 และเมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลกระแสน้ำที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลทฤษฎีพบว่า

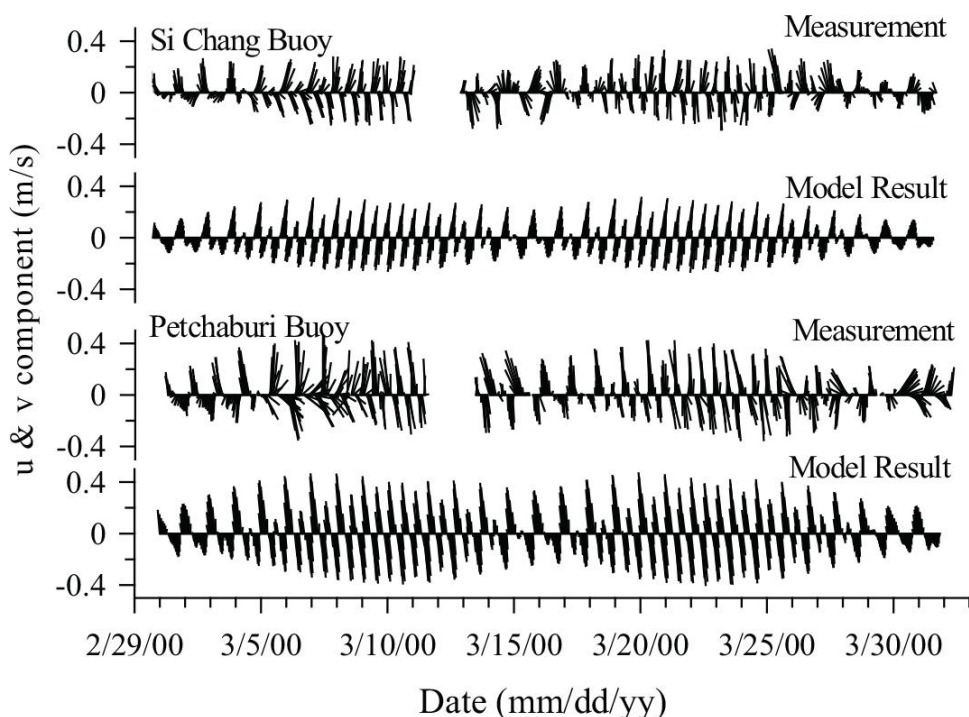
กระแสน้ำที่ได้จากแบบจำลองมีทิศทางตามน้ำขึ้นน้ำลง ทั้งนี้ในการศึกษานี้ไม่ได้นำข้อมูลลมเข้ามาใช้ในการจำลองด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2-17



รูปที่ 2-15 การเปรียบเทียบระดับน้ำจริงและระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง (เส้นทึบ คือ ระดับน้ำจริง และเส้นประ คือ ระดับที่ได้จากแบบจำลอง) (Saramul, 2010)



รูปที่ 2-16 การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำรายเดือน (Saramul, 2010)



รูปที่ 2-17 การเปรียบเทียบกระแสหน้าที่ได้จากแบบจำลองและจากข้อมูลตรวจวัด (Saramul, 2010)

2.6 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหล

การคาดการณ์การเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลประยุกต์ใช้แบบจำลอง GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment) (Zelenke et al., 2012) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาโดย Hazardous Materials Response Division (HAZMAT) ของ NOAA ใช้ในการประมาณเส้นทางการรั่วไหลของน้ำมัน จากข้อมูลลม, สภาพอากาศ, กระแสน้ำ และการรั่วไหลน้ำมัน

2.6.1 ทฤษฎีพื้นฐาน

ในการคำนวณการเคลื่อนที่ของน้ำมัน เป็นการคำนวณเวกเตอร์ลัพธ์ระหว่างข้อมูลกระแสน้ำ, ข้อมูลลม และการแพร่กระจายในแนวราบของน้ำมัน (diffusion) ในช่วงเวลาต่างๆ (Beegle-Krause, 1999) ดังสมการที่ 2-43

$$\frac{\partial x}{\partial t} = U_h + k_w U_w + D \quad (2-43)$$

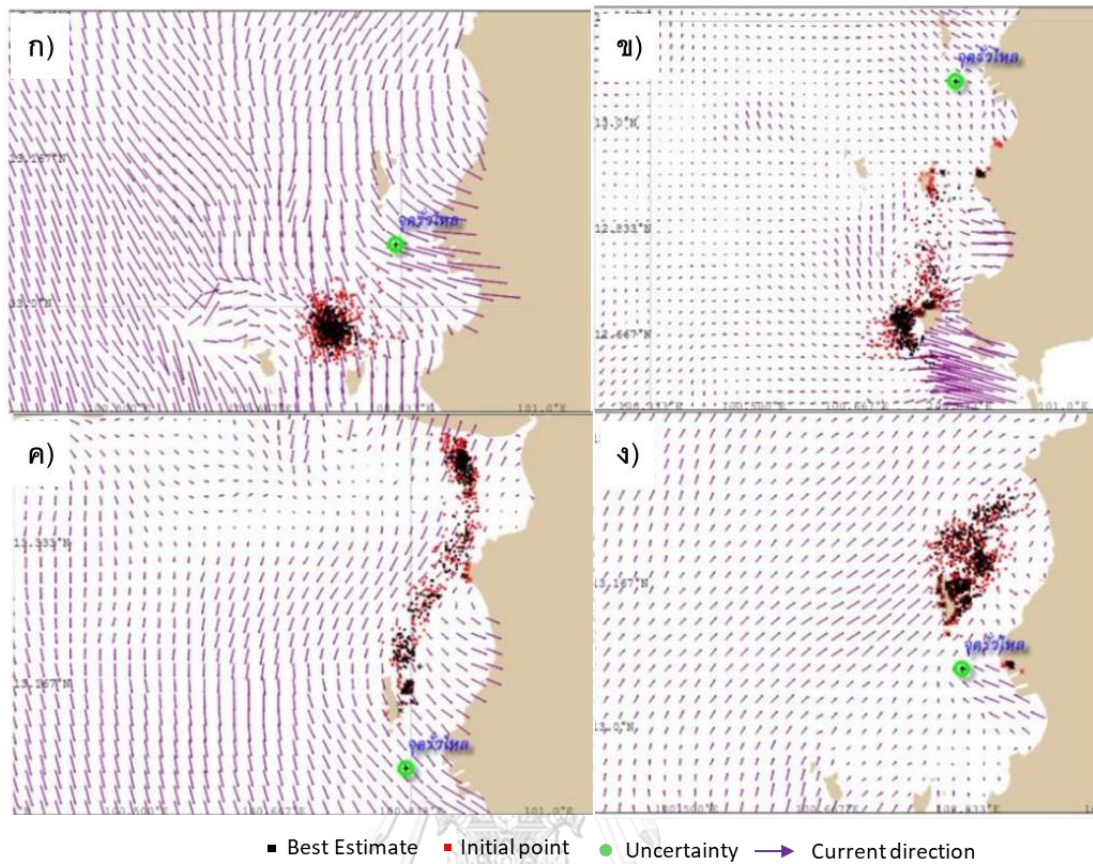
เมื่อ $\frac{\partial x}{\partial t}$ คือ ความเร็วการเคลื่อนตัวของอนุภาค (คราบน้ำมัน), U_h คือ ความเร็วกระแสน้ำ, k_w คือ สัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่เนื่องจากลม (Windage coefficient), U_w คือ ความเร็วลม และ D คือ อัตราการแพร่กระจาย (turbulent diffusion)

การคาดการณ์การเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลจำเป็นต้องระบุชนิดของน้ำมัน เนื่องจากน้ำมันแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่ต่างกัน โดยชนิดของน้ำมันในแบบจำลอง GNOME มี 7 ชนิด ได้แก่ น้ำมันเบนซิน (gasoline), น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน (kerosene/jet fuels), น้ำมันดีเซล (diesel), น้ำมันเตาประเภทที่ 4 และ 6 (fuel oil #4 and #6), น้ำมันดิบความหนาแน่นปานกลาง (medium crude) และน้ำมันประเภทที่ไม่มีการสลายตัว (non-weathering)

2.6.2 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมัน

กรมควบคุมมลพิษ (2553) ได้สร้างภาพการจำลองน้ำมันที่รั่วไหลในบริเวณอ่าวไทยตอนบน และชายฝั่งทะเลตะวันออกโดยใช้โปรแกรม OILMAP 6.4 (Applied Science Associates, 2009) เพื่อจำแนกเขตความเสี่ยงต่อน้ำมันรั่วไหล โดยจำลอง 6 เหตุการณ์น้ำมันรั่วในบริเวณอ่าวไทยตอนบน ในปี พ.ศ.2548 และ พ.ศ.2552 โดยใช้ข้อมูลกระแสน้ำเฉลี่ยรายเดือนที่ได้จากแบบจำลอง HYDROMAP (Applied Science Associates, 2009) และใช้ข้อมูลลมราย 3 ชั่วโมงจากสถานีตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยาที่สถานีใกล้เคียง พบว่าการเคลื่อนที่และกระจายตัวของน้ำมันรายเดือนในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย มีรูปแบบไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของน้ำมัน, ปริมาณที่รั่วไหล, กระแสลม, น้ำขึ้นน้ำลง และกระแสน้ำในอ่าวไทย ทั้งนี้พบว่าข้อมูลกระแสน้ำเฉลี่ยรายเดือนยังไม่ละเอียดเพียงพอในการคาดการณ์ให้มีความถูกต้องแม่นยำ

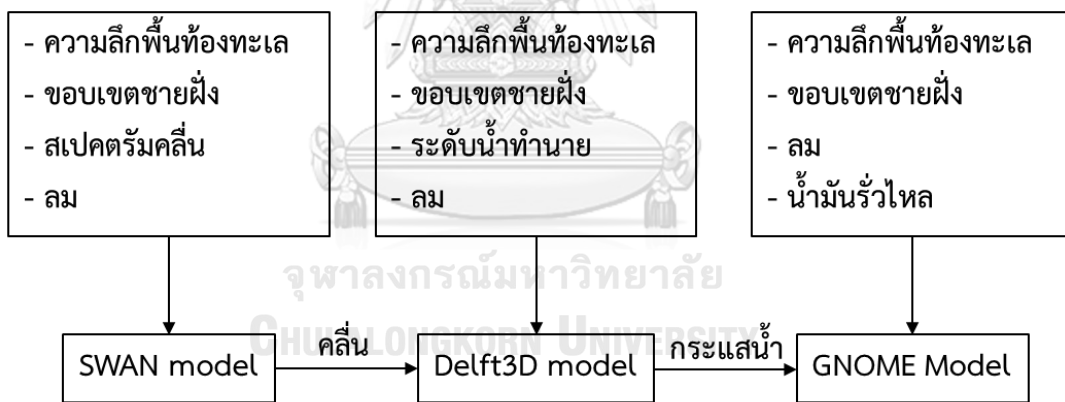
วัชร เกษเดช และสุเพชร จิระจรกุล (2560) คาดการณ์การเคลื่อนที่ของน้ำมันในทะเลบริเวณอ่าวไทยตอนบนฝั่งตะวันออก ตั้งแต่จังหวัดฉะเชิงเทราถึงจังหวัดชลบุรี โดยใช้แบบจำลอง GNOME ซึ่งใช้ข้อมูลความเร็วและทิศทางกระแสน้ำที่ผิวหน้าน้ำทะเลรายชั่วโมงจากระบบเรดาร์คลื่นวิทยุความถี่สูง พบว่าการเคลื่อนที่ของคราบน้ำมันในฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ มีทิศทางการเคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ ส่วนในฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ มีทิศทางการเคลื่อนที่ไปทางตะวันออกเฉียงเหนือเข้าหาชายฝั่ง ทั้งในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย ดังแสดงในรูปที่ 2-18 ทั้งนี้พบว่าตัวแปรที่สำคัญต่อรูปแบบการเคลื่อนที่ของน้ำมัน คือ กระแสลม และรูปแบบการไหลเวียนของกระแสน้ำที่ผิวหน้า ซึ่งถ้าข้อมูลมีความละเอียดในเชิงพื้นที่และเวลาน่าจะทำให้การคาดการณ์มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2-18 การเคลื่อนที่ของคราบน้ำมันจากแบบจำลอง GNOME บริเวณอ่าวไทยตอนบนฝั่ง
 ตะวันออก (ก) ในช่วงน้ำเกิดในฤดูลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ, (ข) ในช่วงน้ำตายในฤดูลมมรสุม
 ตะวันออกเฉียงเหนือ, (ค) ในช่วงน้ำเกิดในฤดูลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และ (ง) ในช่วงน้ำตายในฤดู
 ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (วัชร เกษเดช และสุเพชร จิรขจรกุล, 2560)

บทที่ 3 วิธีการศึกษา

ในการศึกษานี้มีจุดประสงค์ที่จะศึกษาการจำลองการรั่วไหลของน้ำมันที่บริเวณชายฝั่งทะเลระยอง โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ ซึ่งวิธีการคาดการณ์การเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลโดยใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจำลองคลื่นและกระแสน้ำในอ่าวไทย เพื่อนำกระแสน้ำสู่ทิศทางใช้ในการคาดการณ์การเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในส่วนที่สองต่อไป โดยในการศึกษาคลื่นและกระแสน้ำในอ่าวไทยนั้นจะใช้แบบจำลอง SWAN (Simulating WAves Nearshore) ในการจำลองคลื่นที่เกิดจากลม และใช้แบบจำลอง Delft3D (Deltares, 2014) ในการจำลองกระแสน้ำ และสำหรับการคาดการณ์การเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเลจะใช้แบบจำลอง GNOME (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2012) ดังที่นำเสนอในบทที่ 2 เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการศึกษา วิธีการศึกษาสามารถแสดงดังรูปที่ 3-1 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3-1 แผนภาพการศึกษา

3.1 รวบรวมข้อมูล

ในการศึกษานี้มีการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์หลายแบบจำลอง ซึ่งในแต่ละแบบจำลองใช้ข้อมูลนำเข้าที่แตกต่างกัน โดยข้อมูลนำเข้าของแบบจำลอง SWAN ประกอบด้วยข้อมูลความลึกพื้นท้องทะเล, ขอบเขตชายฝั่ง และข้อมูลลม สำหรับในบริเวณขอบเขตเปิดในแบบจำลอง SWAN ควรมีข้อมูลสเปกตรัมคลื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา สำหรับแบบจำลอง Delft3D ข้อมูลนำเข้าที่สำคัญประกอบด้วยข้อมูลความลึกพื้นท้องทะเล, ขอบเขตชายฝั่ง, ข้อมูลลม, ข้อมูลคลื่น และ

ข้อมูลน้ำขึ้นน้ำลง และสุดท้ายแบบจำลอง GNOME ข้อมูลนำเข้าที่สำคัญคือข้อมูลความลึกพื้นที่ท้องทะเล, ขอบเขตชายฝั่ง, ข้อมูลกระแสน้ำ, ข้อมูลลม และข้อมูลทางกายภาพของน้ำมัน

สำหรับข้อมูลหลักที่ใช้ในแบบจำลองในการศึกษานี้ประกอบไปด้วย ขอบเขตชายฝั่ง (coastal line) ใช้สำหรับกำหนดขอบเขตของพื้นที่ศึกษา, ความลึกของพื้นมหาสมุทร (bathymetry) สำหรับค่าความลึกของกริดในแบบจำลอง, ค่าระดับน้ำ (water level) สำหรับกำหนดเงื่อนไขขอบเปิด (open boundary) และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกระแสน้ำ, ความเร็วลมที่ระดับ 10 เมตรเหนือน้ำทะเล (wind speed at 10 meter) และสเปกตรัมคลื่น (wave spectrum) สำหรับเป็นเงื่อนไขขอบเปิดของแบบจำลองคลื่น, ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (significant wave height) สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองคลื่น, ข้อมูลกระแสน้ำ สำหรับใช้ในการตรวจสอบแบบจำลองกระแสน้ำ และข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม (satellite image) ใช้สำหรับการตรวจสอบแบบจำลองการรั่วไหลของน้ำมัน ดังแสดงในตารางที่ 3-1 สำหรับรายละเอียดของข้อมูลแต่ละชนิดจะอธิบายในลำดับต่อไป

ตารางที่ 3-1 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

ข้อมูล	แหล่งที่มา	รายละเอียด	ระยะเวลาของข้อมูล (พ.ศ.)
1. ความลึกท้องทะเล	British Oceanographic Data Centre	- GEBCO 30 ความละเอียด ~1 กิโลเมตร - ใช้สำหรับระบุความลึกน้ำของกริดในแบบจำลอง SWAN, Delft3D และ GNOME	2557
2. ขอบเขตชายฝั่ง	National Centers for Environmental Information	- Marine Trackline Geophysical - ใช้สำหรับระบุขอบเขตชายฝั่งในแบบจำลอง SWAN, Delft3D และ GNOME	2014

ตารางที่ 3-1 (ต่อ) ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

ข้อมูล	แหล่งที่มา	รายละเอียด	ระยะเวลาของข้อมูล (พ.ศ.)
3. ระดับน้ำ	กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ	- ระดับน้ำทำนายราย ชั่วโมงจำนวน 10 สถานี - ใช้สำหรับวิเคราะห์ องค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลง และตรวจสอบความถูกต้อง ของแบบจำลอง Delft3D	2549 – 2559
	การทำเรือแห่ง ประเทศไทย	- ระดับน้ำจริงรายชั่วโมงที่ สถานีสันดอนเจ้าพระยา - ใช้สำหรับตรวจสอบความ ถูกต้องของแบบจำลอง Delft3D	2556
	Japanese International Cooperation Agency	- ระดับน้ำรายชั่วโมง บริเวณปากแม่น้ำ เจ้าพระยา จำนวน 24 ชั่วโมง - ใช้สำหรับตรวจสอบความ ถูกต้องของแบบจำลอง Delft3D	7 ครั้ง ในปี 2554 - 2556
4. ลมที่ระดับ ความสูง 10 เมตร	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	- ERA-Interim ราย 6 ชั่วโมง ความละเอียด ~13.8 กิโลเมตร - ใช้สำหรับเป็นข้อมูล นำเข้าไปในแบบจำลอง SWAN, Delft3D และ GNOME	2540 – 2559

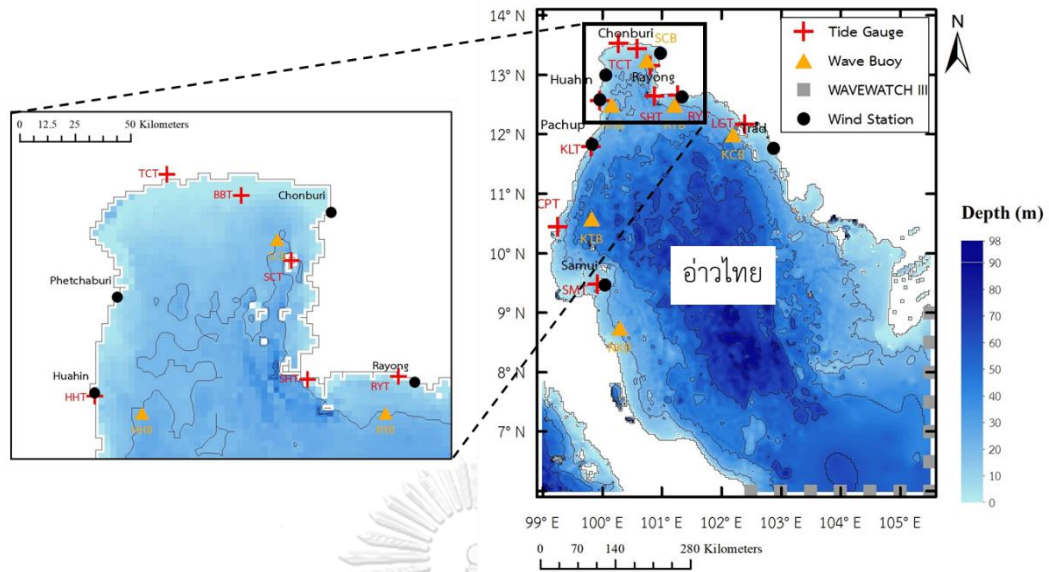
ตารางที่ 3-1 (ต่อ) ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

ข้อมูล	แหล่งที่มา	รายละเอียด	ระยะเวลาของข้อมูล (พ.ศ.)
5. คลื่น	NOAA/ National Weather Service	- WAVEWATCH III ราย 6 ชั่วโมง ความละเอียด ~55.2 กิโลเมตร - ใช้สำหรับเป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลอง SWAN	2540 – 2559
	สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ	- ความสูงและทิศทางคลื่นนัยสำคัญรายชั่วโมงจำนวน 6 สถานี - ใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง SWAN	สิงหาคม 2540 – ธันวาคม 2545
6. กระแสน้ำ	Japanese International Cooperation Agency	- กระแสน้ำรายชั่วโมงบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา จำนวน 24 ชั่วโมง - ใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง Delft3D	9 ครั้ง ในปี 2554 - 2556
7. ภาพถ่ายดาวเทียม	สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ	- ภาพถ่ายดาวเทียมจากเหตุการณ์น้ำมันรั่วไหลที่ในทะเล จังหวัดระยอง - ใช้สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง GNOME	27 กรกฎาคม 2556 เวลา 18.31 น. และ 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2556 เวลา 18.23 น.

3.1.1 ความลึกพื้นท้องทะเล (Bathymetry)

การสำรวจความลึกพื้นท้องทะเลทำได้โดยวิธีการหยั่งความลึกซึ่งต้องใช้เรือสำรวจ ในประเทศไทยหน่วยงานที่มีข้อมูลการสำรวจข้อมูลความลึกพื้นท้องทะเลคือกองสร้างแผนที่ กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ครอบคลุมพื้นที่ชายฝั่งของประเทศไทยทั้งหมด แต่ก็ไม่ได้ครอบคลุมบริเวณอ่าวไทยทั้งหมดและไม่ได้มีการสำรวจบ่อยนัก ทั้งนี้ได้มีการประยุกต์ใช้ข้อมูลความลึกพื้นท้องทะเลแบบ global bathymetry ที่มีการเผยแพร่มากมาย ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีการรวบรวมข้อมูลสำรวจทางเรือด้วยวิธีหยั่งความลึกด้วยเสียงสะท้อน และการประมาณค่าจากข้อมูลตรวจวัดจากดาวเทียม เช่น ข้อมูล ETOPO ของ National Geophysical Data Center (NGDC) หรือข้อมูล GEBCO ของ British Oceanographic Data Centre (BODC) เป็นต้น สำหรับอ่าวไทยได้มีการนำข้อมูลความลึกพื้นท้องทะเลเหล่านี้มาใช้ในการศึกษาการไหลเวียนของกระแสน้ำมากมาย แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลประเภทนี้ยังมีข้อจำกัดด้านความละเอียดของข้อมูล

จากการศึกษาตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของแผนที่พื้นท้องทะเล ETOPO 1 arc-minute (ETOPO1) และข้อมูล GEBCO 1 arc-minute (GEBCO1) กับข้อมูลแผนที่เดินเรือของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ พบว่ายังมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 5-20 เมตร (เผชญิโชค จินตเศรษฐี และอนุกุล บุรณประทีปรัตน์, 2555) และมีการเปรียบเทียบผลการจำลองคลื่นโดยใช้ข้อมูลพื้นท้องทะเล 3 ชุด อันได้แก่ข้อมูล ETOPO1, ข้อมูล GEBCO1 และข้อมูล GEBCO 30 arc-second (GEBCO30) พบว่าข้อมูล GEBCO30 ซึ่งมีความละเอียด 30 arc-second หรือประมาณ 1 กิโลเมตร ให้ผลการคำนวณคลื่นได้สอดคล้องกับข้อมูลตรวจวัดจากดาวเทียม Jason-2 กว่าข้อมูล GEBCO1 และ ETOPO1 (ณรงค์ฤทธิ์ เหลืองดิลก และคณะ, 2559) ด้วยการศึกษาที่พิจารณาการเคลื่อนตัวของกระแสน้ำทั้งอ่าวไทย จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้อัตราข้อมูลที่ครอบคลุมทั้งบริเวณอ่าวไทย ดังนั้นในการศึกษานี้จึงใช้ข้อมูลความลึกพื้นท้องทะเล GEBCO 30 สำหรับระบุความลึกน้ำของกริดในแบบจำลอง SWAN, Delft3D และ GNOME ดังแสดงในรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-2 ความลึกพื้นท้องทะเล และตำแหน่งของทุ่นสมุทรศาสตร์ สถานีวัดระดับน้ำ และสถานีตรวจวัดลม ในอ่าวไทย

3.1.2 ขอบเขตชายฝั่ง (Coastal line)

เส้นขอบเขตชายฝั่งเป็นข้อมูลที่ใช้ในการกำหนดขอบเขตของแบบจำลอง ซึ่งเส้นชายฝั่งจะแบ่งขอบเขตของพื้นดินและน้ำออกจากกัน ทั้งนี้หากขอบเขตชายฝั่งมีความละเอียดมากก็จะทำให้การคำนวณมีความถูกต้อง โดยเส้นขอบเขตชายฝั่งได้มาจากการสำรวจ หรือได้มาจากการนำแผนที่เดินเรือของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ มาตรงพิกัดตำแหน่งและระบุแนวชายฝั่งโดยใช้วิธีการดิจิทัล (digitize) แต่ด้วยข้อจำกัดด้านงบประมาณ ดังนั้นในการศึกษานี้ได้ใช้เส้นขอบเขตชายฝั่งจากฐานข้อมูล Marine Trackline Geophysical ของ NCEI (National Centers for Environmental Information) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้มาจากการหยั่งความลึกพื้นท้องทะเล, การสำรวจด้วยแรงแม่เหล็ก (magnetics) และคลื่นสั่นสะเทือนแบบสะท้อน (seismic reflection) ซึ่งถูกรวบรวมระหว่างการเดินเรือตั้งแต่ปี พ.ศ.2482 ถึงปัจจุบันจากสถาบันวิจัยทางทะเลทั่วโลก

3.1.3 ระดับน้ำ (Water level)

ข้อมูลระดับน้ำเป็นข้อมูลนำเข้าของแบบจำลอง Delft3D ในการจำลองการไหลเวียนของกระแสน้ำ ทั้งนี้ไม่มีข้อมูลระดับน้ำที่บริเวณกลางทะเลจึงต้องทำการวิเคราะห์ข้อมูลระดับน้ำที่สถานีบริเวณชายฝั่งทะเลด้วยวิธี harmonic analysis จากนั้นจึงทำการประมาณค่าในช่วงเส้นตรง (linear interpolation) นอกจากนี้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกระแสน้ำควรจะเปรียบเทียบกับข้อมูลกระแสน้ำโดยตรง แต่ข้อจำกัดในการเก็บข้อมูลในประเทศไทยยังไม่มี

ตรวจวัดกระแสน้ำในทะเลโดยตรงอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน ดังนั้นจึงเลือกใช้ข้อมูลระดับน้ำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแทน ซึ่งกำหนดข้อสมมติฐานที่ว่าหากแบบจำลองจำลองระดับน้ำได้ใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดแสดงว่าแบบจำลองจำลองกระแสน้ำได้ใกล้เคียงกับความ เป็นจริงด้วย โดยในการศึกษานี้ใช้ทั้งข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ซึ่งเป็น ข้อมูลระดับน้ำทำนายรายชั่วโมงตั้งแต่ปี พ.ศ.2549 – พ.ศ.2559 จำนวน 10 สถานี ได้แก่สถานีแหลม งาม (LGT), ระยอง (RYT), อ่าวสัตหีบ (SHT), เกาะสีชัง (SCT), สันดอนเจ้าพระยา (BBT), สถานีท่า จิน (TCT), หัวหิน (HHT), เกาะหลัก (KLT), ชุมพร (CPT) และเกาะสมุย (SMT) และข้อมูลระดับน้ำ ตรวจวัดรายชั่วโมงในปี พ.ศ.2556 ของการทำเรือแห่งประเทศไทยที่สถานีสันดอนเจ้าพระยา (BBT) ดังแสดงตำแหน่งของแต่ละสถานีในรูปที่ 3-2

3.1.4 ลมที่ระดับความสูง 10 เมตร (Wind speed at 10 m)

ข้อมูลความเร็วลมที่ความสูง 10 เมตรเหนือระดับน้ำทะเลเป็นข้อมูลนำเข้าที่สำคัญสำหรับแบบจำลอง SWAN ในการจำลองคลื่นให้มีความถูกต้องควรใช้ข้อมูลลมที่ครอบคลุมพื้นที่ศึกษา แต่เนื่องจากข้อจำกัดในการตรวจวัดข้อมูลลมในทะเลที่ไม่ครอบคลุมทั้งพื้นที่และเวลา ซึ่งแต่เดิมในประเทศไทยเคยมีการตรวจวัดข้อมูลจากหุ่นสมุทรศาสตร์ของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) จำนวน 6 สถานี ได้แก่ หุ่นเกาะช้าง (KCB), ระยอง (RYB), เกาะสีชัง (SCB), หัวหิน (HHB), เกาะเต่า (KTB) และนครศรีธรรมราช (NKB) มีการเก็บข้อมูลในปี พ.ศ.2540 - พ.ศ.2545 เท่านั้น ดังนั้นในการศึกษาในครั้งนี้จึงใช้ข้อมูลลม ERA-Interim ของ ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ถูกรวบรวมและวิเคราะห์โดยผ่านกระบวนการสอบเทียบข้อมูลให้สอดคล้องกับข้อมูลตรวจวัดด้วยการวิเคราะห์ตัวแปร 4 มิติ (4-dimensional variation assimilation) ด้วยใช้ข้อมูลลมจากสถานีตรวจวัด ดาวเทียมหุ่นในทะเล และเรือ มาใช้สอบเทียบข้อมูล (Dee et al., 2011) ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้ข้อมูลลม ERA-Interim ตั้งแต่ตำแหน่งลองจิจูดที่ 99° - 105.5° ตะวันออก ละติจูดที่ 6° - 14° เหนือ มีความละเอียด 0.125° (~13.8 กิโลเมตร) ซึ่งเป็นข้อมูลลมเฉลี่ยราย 6 ชั่วโมง ตั้งแต่ปี พ.ศ.2540 – พ.ศ.2560

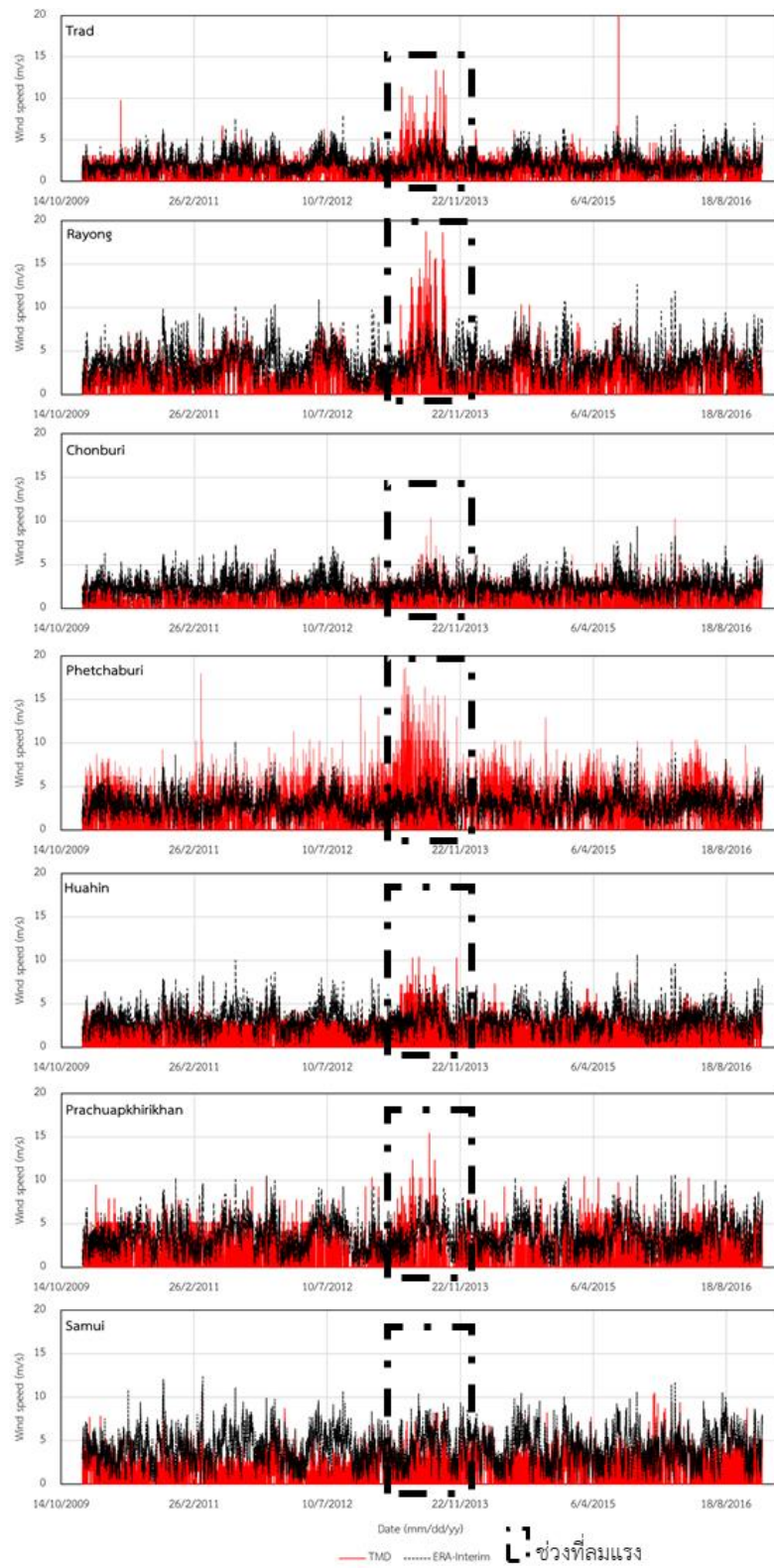
Song et al. (2014) ทำการเปรียบเทียบข้อมูลลม ERA-Interim กับข้อมูลลมจากหุ่นในทะเลเหลืองและทะเลจีนตะวันออก (Yellow and East China seas) ในปี พ.ศ.2553 - พ.ศ.2554 พบว่าข้อมูลลมทั้งสองสอดคล้องกัน โดยมีค่าสหสัมพันธ์ในเทอมความเร็วและทิศทางเท่ากับ 0.7 และ 0.8 ตามลำดับ และมีค่าความเบี่ยงเบนเฉลี่ย (bias) 1.8 เมตร/วินาที

ในการศึกษานี้ได้มีการวิเคราะห์ข้อมูลลม ERA-Interim กับข้อมูลลมตรวจวัดราย 3 ชั่วโมงของกรมอุตุนิยมวิทยาที่สถานีตราด, ระยอง, ชลบุรี, เพชรบุรี, หัวหิน, ประจวบคีรีขันธ์ และเกาะสมุย ในปี พ.ศ.2553 - พ.ศ.2559 เมื่อทำการเปรียบเทียบความเร็วลมพบว่ามีความเบี่ยงเบนเฉลี่ย (bias) ประมาณ -0.5 ถึง -2.5 เมตร/วินาที นั่นคือข้อมูลลม ERA-Interim โดยส่วนใหญ่จะมีความเร็วลมมากกว่าข้อมูลลมตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยา เมื่อพิจารณาในช่วงที่ข้อมูลลมตรวจวัดมีความเร็วลมสูง ข้อมูลลม ERA-Interim จะมีความเร็วลมที่ต่ำกว่า เช่นในช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2556 ความเร็วลม ERA-Interim มีค่าน้อยกว่าความเร็วลมตรวจวัดทุกสถานี ดังแสดงในรูปที่ 3-3 ซึ่งแสดงช่วงเวลาที่มีความเร็วลมตรวจวัดสูงในกรอบสี่เหลี่ยม ดังนั้นในการนำข้อมูลลม ERA-Interim ไปใช้ในแบบจำลองคลื่นอาจทำให้การคำนวณคลื่นในช่วงที่ความเร็วลมสูงมีความคลาดเคลื่อนไปได้ เนื่องจากข้อมูลลมที่ใช้น้อยกว่าความเร็วลมที่ตรวจวัดจริง

3.1.5 ข้อมูลคลื่น

ข้อมูลคลื่นบริเวณปากอ่าวไทยเป็นข้อมูลที่สำคัญข้อมูลหนึ่ง เนื่องจากเป็นข้อมูลที่แสดงถึงการเคลื่อนที่ของคลื่นระหว่างอ่าวไทยและทะเลจีนใต้ แต่เนื่องจากไม่ได้มีข้อมูลคลื่นที่ได้จากการตรวจวัดในบริเวณนั้น ดังนั้นข้อมูลคลื่นที่เป็นตัวแทนในของคลื่นจากทะเลจีนใต้ที่เคลื่อนที่เข้าสู่อ่าวไทย จึงเลือกใช้ข้อมูลคลื่นจากแบบจำลอง WAVEWATCH III ของ NCEP (National Centers for Environmental Prediction) ที่ตำแหน่งลองจิจูดที่ 102.5° - 105.5° ตะวันออก ละติจูดที่ 6° - 9° เหนือ จำนวน 13 ตำแหน่ง โดยแต่ละตำแหน่งห่างกัน 0.5° (~55.2 กิโลเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 3-2 เป็นข้อมูลราย 6 ชั่วโมง ตั้งแต่ปี พ.ศ.2540 - พ.ศ.2559 โดยข้อมูลคลื่นที่ได้จากแบบจำลอง WAVEWATCH III จะประกอบไปด้วยข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญ, คาบคลื่น และทิศทางของคลื่น

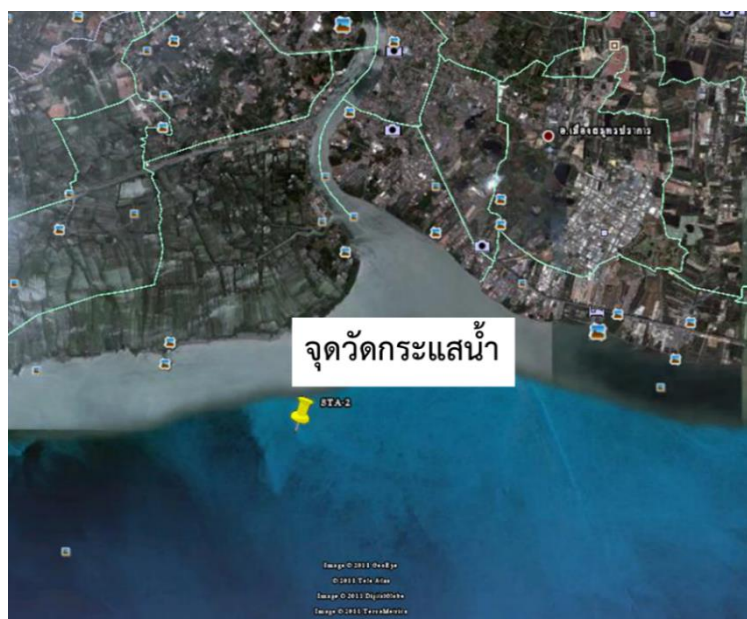
ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง SWAN ใช้ข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากการตรวจวัดโดยหุ่นสมุทรศาสตร์ของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) จำนวน 6 สถานี ได้แก่ หุ่นเกาะช้าง (KCB), ระยอง (RYB), เกาะสีชัง (SCB), หัวหิน (HHB), เกาะเต่า (KTB) และนครศรีธรรมราช (NKB) ดังแสดงในรูปที่ 3-2 โดยข้อมูลคลื่นที่ได้จากการตรวจวัดเป็นข้อมูลราย 3 ชั่วโมง ตั้งแต่ปี พ.ศ.2540 - พ.ศ.2545



รูปที่ 3-3 การเปรียบเทียบความเร็วลมรายสถานีของกรมอุตุนิยมวิทยากับข้อมูล ERA-Interim ระหว่างปี พ.ศ.2553 - พ.ศ.2559

3.1.6 กระแสน้ำ

ข้อมูลทิศทางและความเร็วของกระแสน้ำ เป็นข้อมูลที่สำคัญในการตรวจสอบแบบจำลองกระแสน้ำ โดยในการศึกษาในครั้งนี้ใช้ข้อมูลกระแสน้ำรายชั่วโมงจำนวน 24 ชั่วโมง ที่ได้จากการตรวจวัดที่บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา ดังแสดงในรูปที่ 3-4 จำนวน 9 ครั้งในปี พ.ศ.2554 - พ.ศ. 2556 (Japanese International Cooperation Agency, 2013) มาใช้ในการตรวจสอบแบบจำลองกระแสน้ำ



รูปที่ 3-4 จุดตรวจวัดกระแสน้ำรายชั่วโมงบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา (Japanese International Cooperation Agency, 2013)

3.1.7 ภาพถ่ายดาวเทียม

จากเหตุการณ์น้ำมันปริมาณ 50 ตันรั่วไหลบริเวณละติจูดที่ 12.5° เหนือ ลองจิจูดที่ 101.175° ตะวันออก ห่างจากชายฝั่งมาบตาพุดไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ค่อนข้างไปทางทิศใต้ประมาณ 20 กิโลเมตรเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2556 เวลา 06.50 น. และเคลื่อนที่กระทบชายฝั่งที่บริเวณอ่าวพร้าว เกาะเสม็ด จังหวัดระยอง เมื่อวันที่ 29 – 30 กรกฎาคม พ.ศ.2556 โดยข้อมูลตำแหน่งการเคลื่อนที่ของน้ำมัน เป็นข้อมูลที่จำเป็นในการสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมัน แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดด้านข้อมูลเหตุการณ์ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเลที่ไม่ได้มีการบันทึกข้อมูลลม, คลื่นและกระแสน้ำขณะที่เกิดเหตุการณ์น้ำมันรั่ว มีเพียงข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) เท่านั้น ดังนั้นจึงใช้

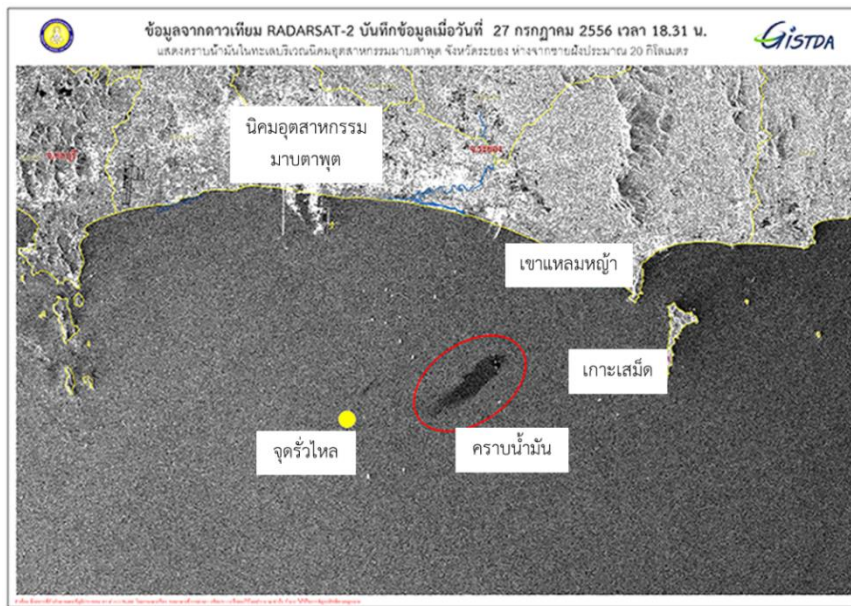
ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) ในช่วงเหตุการณ์น้ำมันรั่วไหลที่บริเวณเกาะเสม็ด จังหวัดระยอง เมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2556 เวลา 18.31 น. ดังแสดงในรูปที่ 3-5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าน้ำมันได้เคลื่อนตัวออกห่างจากจุดที่รั่วไหล ประมาณ 12 – 15 กิโลเมตร โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ และวันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ.2556 เวลา 18.23 น. ดังแสดงในรูปที่ 3-6 โดยจากรูปจะเห็นได้ว่าการสะสมของคราบน้ำมันบริเวณอ่าวพร้าว และพบคราบน้ำมันบริเวณชายฝั่งด้านเหนือของเกาะเสม็ด โดยตำแหน่งของคราบน้ำมันที่ได้จากภาพถ่ายทางดาวเทียมทั้ง 2 เวลา จะนำมาใช้ในการสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเล

3.2 แบบจำลอง SWAN

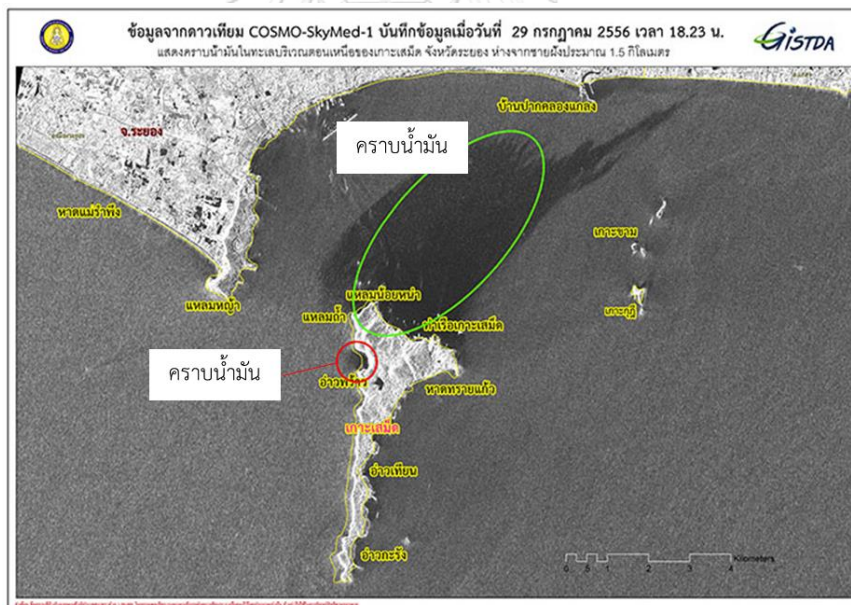
ในการศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAN เพื่อจำลองคลื่นในอ่าวไทย โดยใช้กริดในแนวระนาบแบบสี่เหลี่ยม (rectangular grid) ซึ่งครอบคลุมอ่าวไทยทั้งหมดตั้งแต่ลองจิจูดที่ $99^{\circ} - 105.5^{\circ}$ ตะวันออก และละติจูดที่ $6^{\circ} - 14^{\circ}$ เหนือ มีความละเอียดกริด 0.1° (~ 11.13 กิโลเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 3-7 ใช้ข้อมูล GEPCO 30 ที่มีความละเอียดประมาณ 1 กิโลเมตร ในการประมาณค่าความลึกของพื้นที่อ่าวทะเล

สำหรับข้อมูลลมใช้ข้อมูล ERA-Interim ซึ่งครอบคลุมพื้นที่กริดทั้งหมดตั้งแต่ลองจิจูดที่ $99^{\circ} - 105.5^{\circ}$ ตะวันออก และละติจูดที่ $6^{\circ} - 14^{\circ}$ เหนือ มีความละเอียด 0.125×0.125 องศา (~ 13.8 กิโลเมตร) เป็นข้อมูลลมราย 6 ชั่วโมงตั้งแต่ปี พ.ศ.2540 – พ.ศ.2559 และบริเวณขอบเขตเปิด (open boundary) ที่ใช้คำนวณจะใช้ข้อมูลสเปกตรัมของคลื่นที่ประกอบด้วยความสูงคลื่นนัยสำคัญ คาบคลื่น และทิศทางของคลื่นจากแบบจำลอง WAVEWATCH III มาใช้เป็นตัวแทนข้อมูลคลื่นที่เคลื่อนตัวมาจากทะเลจีนใต้

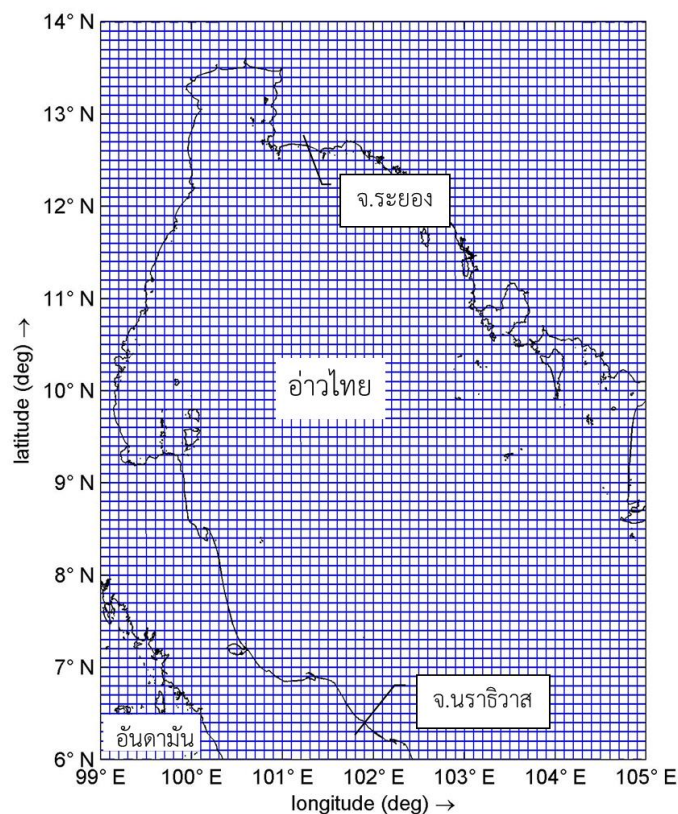
โดยผลลัพธ์ของแบบจำลอง SWAN คือข้อมูลคลื่นในอ่าวไทยที่ประกอบด้วยข้อมูลความสูงคลื่น คาบคลื่น และทิศทางคลื่น ซึ่งจะนำไปใช้เป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลอง Delft3D ในการจำลองกระแสน้ำสุทธิซึ่งรวมอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงและคลื่นลม ดังจะกล่าวในส่วนถัดไป



รูปที่ 3-5 ภาพถ่ายดาวเทียม RADARSAT-2 แสดงตำแหน่งของน้ำมัน เมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2556 เวลา 18.31 น. (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), 2556)



รูปที่ 3-6 ภาพถ่ายดาวเทียม COSMO-SkyMed-1 แสดงตำแหน่งของน้ำมัน เมื่อวันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ.2556 เวลา 18.23 น. (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), 2556)



รูปที่ 3-7 กริดที่ใช้ในแบบจำลอง SWAN

3.3 แบบจำลอง Delft3D

แบบจำลอง Delft3D เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองกระแสน้ำ เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพภูมิประเทศ โดยสร้างกริดในแนวระนาบแบบ curvilinear grid ความละเอียดประมาณ 1 กิโลเมตร และใช้ความลึกน้ำจากข้อมูล GEPCO30 ที่มีความละเอียด 30 พิลิปดา (30 arc-second) หรือประมาณ 1 กิโลเมตรในการประมาณค่าความลึกของน้ำในแต่ละกริด

การสร้างขอบเขตเปิด (open boundary) ในแบบจำลองกระแสน้ำนี้ใช้ที่แนวเส้นตรงที่ลากจากเกาะสมุย จังหวัดสุราษฎร์ธานี ถึง อำเภอแหลมงอบ จังหวัดตราด ดังแสดงในรูปที่ 3-8 สำหรับข้อมูลที่บริเวณขอบเขตเปิดแบ่งออกเป็น 2 ชนิด โดยในการจำลองกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงจะใช้ข้อมูลองค์ประกอบฮาร์โมนิกน้ำขึ้นน้ำลง ซึ่งวิเคราะห์ได้จากข้อมูลระดับน้ำ ด้วยวิธี harmonic analysis ดังแสดงในสมการที่ 3-1

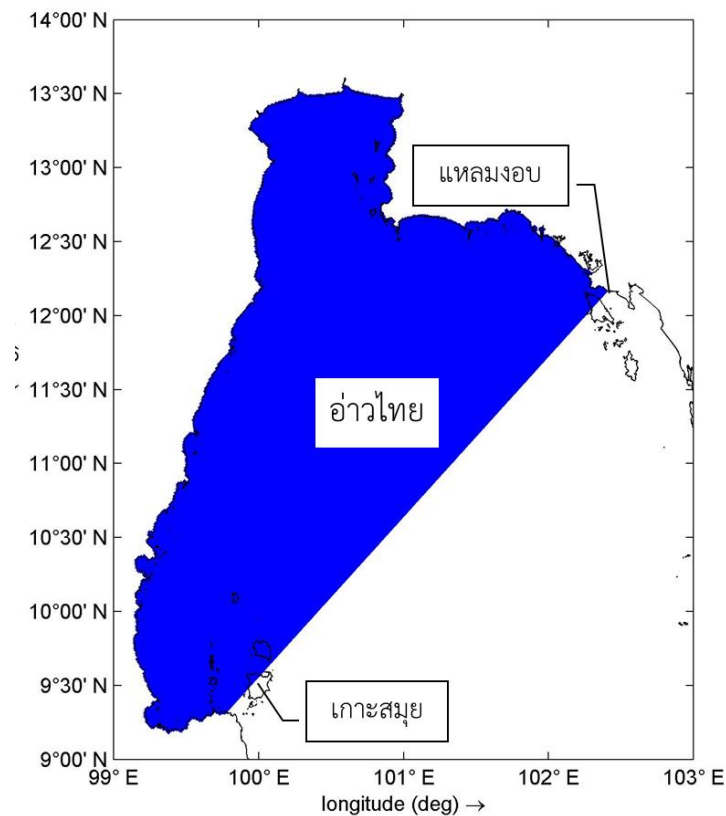
$$\zeta(t) = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i F_i \cos(\omega_i t + (V_0 + u)_i - G_i) \quad (3-1)$$

เมื่อ A_0 คือ ระดับน้ำเฉลี่ยบริเวณจุดกลางของกริด (cm), i และ k คือ ค่าดัชนีขององค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลง, A_i คือ แอมพลิจูดน้ำขึ้นน้ำลงเฉพาะถิ่น (cm), F_i คือ nodal amplitude, ω_i คือ ความเร็วเชิงมุม(deg/hr), $(V_0+u)_i$ คือ astronomical argument (deg) และ G_i คือ improved kappa number (local phase lag)

ทั้งนี้ใช้ข้อมูลระดับน้ำทำนายจากกรมอุทกศาสตร์ที่สถานีเกาะสมุย และแหลมฉบัง มาคำนวณองค์ประกอบฮาร์โมนิกน้ำขึ้นน้ำลงของทั้งสองสถานีด้วยโปรแกรม Delft3D-TIDE ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ใช้องค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลงทั้งหมด 13 ตัวแบ่งเป็นองค์ประกอบน้ำคู่ 4 ตัว ได้แก่ M2, S2, N2 และ K2 องค์ประกอบน้ำเดี่ยว 4 ตัว ได้แก่ K1, O1, P1 และ Q1 องค์ประกอบ non-linear 3 ตัว ได้แก่ M4, MS4 และ MN4 และองค์ประกอบระยะยาว 2 ตัว ได้แก่ MF และ MM

สำหรับการจำลองกระแสน้ำสุทธิต่อรวมอิทธิพลทั้งน้ำขึ้นน้ำลงและคลื่นลม จะใช้ข้อมูลองค์ประกอบฮาร์โมนิกน้ำขึ้นน้ำลง และข้อมูลสเปกตรัมคลื่นที่ได้จากแบบจำลอง SWAN มาเป็นข้อมูลบริเวณขอบเขตเปิดของแบบจำลองกระแสน้ำสุทธิ

ผลลัพธ์ของแบบจำลอง Delft3D นี้คือกระแสน้ำสุทธิ ซึ่งจะนำไปเป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับแบบจำลอง GNOME ในการจำลองการรั่วไหล ดังจะกล่าวในลำดับต่อไป



รูปที่ 3-8 กริดที่ใช้ในแบบจำลอง Delft3D

3.4 แบบจำลอง GNOME

การประยุกต์ใช้แบบจำลอง GNOME มีการนำข้อมูลกระแสน้ำสุทธิต่างที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D ซึ่งได้รวมอิทธิพลของคลื่นลมและน้ำขึ้นน้ำลงไว้แล้ว โดยเลือกข้อมูลกระแสน้ำตั้งแต่ลองจิจูดที่ 100.6° - 102° ตะวันออก และละติจูดที่ 11.7° - 12.7° เหนือ ความละเอียดกริด 0.01° (~ 1.1132 กิโลเมตร) และข้อมูลลม ERA-Interim ซึ่งครอบคลุมพื้นที่กริดตั้งแต่ลองจิจูดที่ 100.5° - 102.125° ตะวันออก และละติจูดที่ 11.625° - 12.875° เหนือ มีความละเอียด 0.125×0.125 องศา (~ 13.8 กิโลเมตร) ตั้งแต่ปี พ.ศ.2549 – 2557 ครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลกความถี่ทุก 6 ชั่วโมง

สำหรับตำแหน่งของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเล ใช้ตำแหน่งลองจิจูดที่ 101.175° ตะวันออก ละติจูดที่ 12.5° เหนือ ปริมาณ 50 ตัน ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกันกับเหตุการณ์ที่เกิดการรั่วไหลบริเวณ ชายฝั่งทะเลระยอง เมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2556

3.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

3.5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองคลื่นและกระแสน้ำ

ข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลองคลื่นจะนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลคลื่นตรวจวัดที่ได้จากหุ่นสมุทรศาสตร์ของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) จำนวน 8 สถานี ได้แก่ สถานีเกาะช้าง (KCB), ระยอง (RYB), เกาะสีชัง (SCB), ประจวบคีรีขันธ์ (PCB), หัวหิน (HHB), เกาะเต่า (KTB), นครศรีธรรมราช (NKB) และสงขลา (SKB) ดังแสดงในรูปที่ 3-2 สำหรับใช้ในการตรวจสอบและปรับค่าระดับน้ำจากแบบจำลอง SWAN

ข้อมูลระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลองกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงจะนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลระดับน้ำทำนายจากสถานีวัดระดับน้ำ (tide gauge) ในอ่าวไทยของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ จำนวน 9 สถานี ได้แก่ สถานีแหลมงอบ (LGT), อ่าวสัทธิษ (SHT), เกาะสีชัง (SCT), สันดอนเจ้าพระยา (BBT), หัวหิน (HHT), เกาะหลัก (KLT), ชุมพร (CPT) และเกาะสมุย (SMT) ดังแสดงในรูปที่ 3-1 สำหรับใช้ในการตรวจสอบและปรับค่าระดับน้ำจากแบบจำลองกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลง และข้อมูลระดับน้ำจริงที่ได้จากการตรวจวัดที่สถานีสันดอนเจ้าพระยาของการท่าเรือแห่งประเทศไทย และข้อมูลกระแสน้ำรายชั่วโมงที่ได้จากการสำรวจของ JICA ที่บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา สำหรับใช้ในการตรวจสอบและปรับค่าระดับน้ำจากแบบจำลองกระแสน้ำสุทธิ โดยทำการเปรียบเทียบระดับน้ำและความสูงคลื่นจากค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (mean absolute error: MAE) (Daniel, 2006) ดังสมการที่ 3-2

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \quad (3-2)$$

เมื่อ x_i คือ ข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัด, y_i คือ ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง และ n คือ จำนวนข้อมูล

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination : R^2) ในการอธิบายถึงความแปรปรวน (variance) ของตัวแปรทั้งสองว่ามีความสอดคล้องกันหรือไม่ (Daniel, 2006) ดังสมการที่ 3-3

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

เมื่อ x_i คือ ข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัด, y_i คือ ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง, \bar{x} คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัด และ \bar{y} คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง

อีกทั้งมีการวิเคราะห์ค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) ซึ่งเป็นดัชนีที่ใช้ในการบอกค่าความแม่นยำของแบบจำลอง (model accuracy) (Daniel, 2006) ดังสมการที่ 3-4

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3-4)$$

เมื่อ x_i คือ ข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัด, y_i คือ ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง และ \bar{x} คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัด

ค่า NSE จะมีค่าอยู่ในช่วง $-\infty$ ถึง 1 ซึ่งถ้าค่า NSE มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึงแบบจำลองสามารถจำลองผลได้โดยไม่มีผิดพลาด (Perfect fit) หากค่า NSE อยู่ในช่วง 0 - 1 หมายถึงแบบจำลองสามารถจำลองผลได้โดยมีความแม่นยำมากกว่าการใช้ค่าเฉลี่ย หากค่า NSE มีค่าเท่ากับ 0 หมายถึงแบบจำลองสามารถจำลองผลได้โดยมีความแม่นยำไม่ต่างจากการใช้ค่าเฉลี่ย และหากค่า NSE มีค่าน้อยกว่า 0 หมายถึงแบบจำลองสามารถจำลองผลได้โดยมีความแม่นยำน้อยกว่าการใช้ค่าเฉลี่ย

จากการศึกษาของ Yuri et al. (1999) พบว่าถ้าค่า NSE มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.75 แสดงว่าแบบจำลองมีความแม่นยำดี (Good prediction) และหากค่า NSE อยู่ในช่วง 0.36 - 0.75 หมายถึงแบบจำลองมีความแม่นยำพอใช้ (Satisfactory prediction)

สำหรับการวิเคราะห์ค่าความเบี่ยงเบนเฉลี่ย (bias) เพื่อใช้ในการอธิบายว่าแบบจำลองสามารถจำลองผลลัพธ์ได้มากกว่าหรือน้อยกว่าค่าจริงอย่างไร (Daniel, 2006) ดังสมการที่ 3-5

$$\text{bias} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - x_i}{n} \quad (3-5)$$

เมื่อ y_i คือ ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง, x_i คือ ข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัด และ n คือ จำนวนข้อมูล

3.5.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเล

ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองจะนำมาเปรียบเทียบกับทิศทางของน้ำมันที่รั่วกับภาพถ่ายดาวเทียมของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) ซึ่งมี 2 เวลา คือเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม 2556 เวลา 18.31 น. และเมื่อวันที่ 29 กรกฎาคม 2556 เวลา 18.23 น.



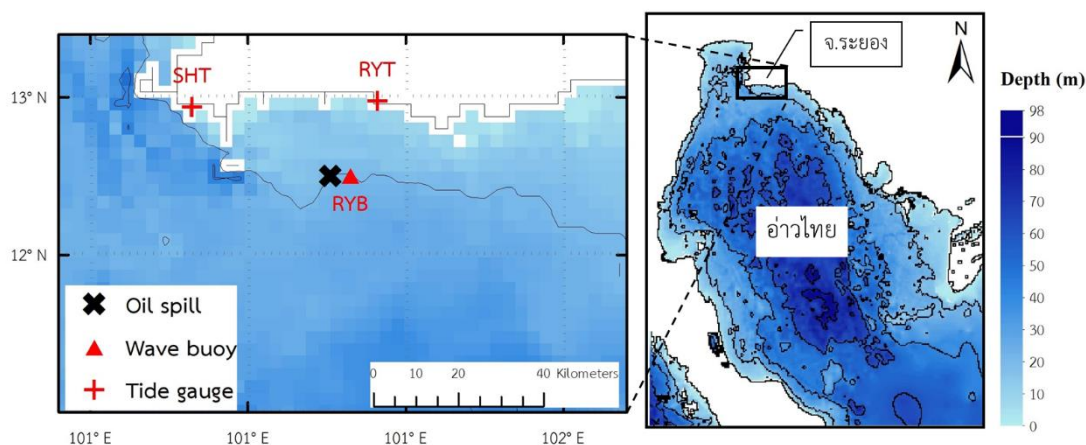
บทที่ 4

ผลการจำลองคลื่นและกระแสน้ำ

ในการคาดการณ์การเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเลให้มีประสิทธิภาพต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง เช่น ลม คลื่น ทิศทางและความเร็วของกระแสน้ำ เป็นต้น อย่างไรก็ตามการได้มาของข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ใช้วิธีการเก็บแบบตำแหน่งซึ่งไม่ครอบคลุมทั้งพื้นที่ จึงประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองการไหลเวียนของกระแสน้ำในพื้นที่ศึกษา โดยจะใช้แบบจำลอง SWAN ในการจำลองคลื่นที่เกิดจากลม และใช้แบบจำลอง Delft3D ในการจำลองกระแสน้ำ โดยจากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังที่กล่าวในบทที่ 2 จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อคลื่นและกระแสน้ำในอ่าวไทย คือ น้ำขึ้นน้ำลง และลมเหนือผิวน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่จะศึกษากระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลง หรือกระแสน้ำเนื่องจากลมเหนือผิวน้ำอย่างใดอย่างหนึ่ง แต่ยังไม่ได้มีการรวมผลจาก 2 ปัจจัยเข้าด้วยกัน ดังนั้นในการศึกษาในครั้งนี้จะทำการศึกษากระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงและคลื่นลม แต่จะไม่พิจารณาถึงผลของปริมาณน้ำท่าและความหนาแน่นน้ำ เนื่องจากอิทธิพลของปริมาณน้ำท่าและความหนาแน่นน้ำมีผลต่อการไหลเวียนสุทธิของน้ำในอ่าวไทยน้อย ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงผลของการจำลองคลื่นและกระแสน้ำ และจะนำกระแสน้ำสุทธิที่ได้มาใช้ในการคาดการณ์การเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหล ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

4.1 การจำลองคลื่น

ในการจำลองคลื่นด้วยแบบจำลอง SWAN ข้อมูลที่สำคัญในการคำนวณคลื่นด้วยคือข้อมูลลม เนื่องจากลมจะถ่ายทอดพลังงานไปสู่ทำให้เกิดคลื่น ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ข้อมูลลม การสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลทุนสมุทรศาสตร์ของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) ดังที่กล่าวไปในบทที่ 3 โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 พื้นที่คือบริเวณตำแหน่งทุนสมุทรศาสตร์และตำแหน่งน้ำมันรั่วไหลบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง ที่ตำแหน่งละติจูดที่ 12.5° เหนือ ลองจิจูดที่ 101.175° ตะวันออก เพื่อใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลลมในพื้นที่ศึกษาที่เป็นตำแหน่งน้ำมันรั่วไหลบริเวณชายฝั่งจังหวัดระยอง ดังแสดงในรูปที่ 4-1



รูปที่ 4-1 ตำแหน่งน้ำมันรั่วไหล, สถานีระดับน้ำทำนายน และทุ่นสมุทรศาสตร์ บริเวณชายฝั่งทะเล

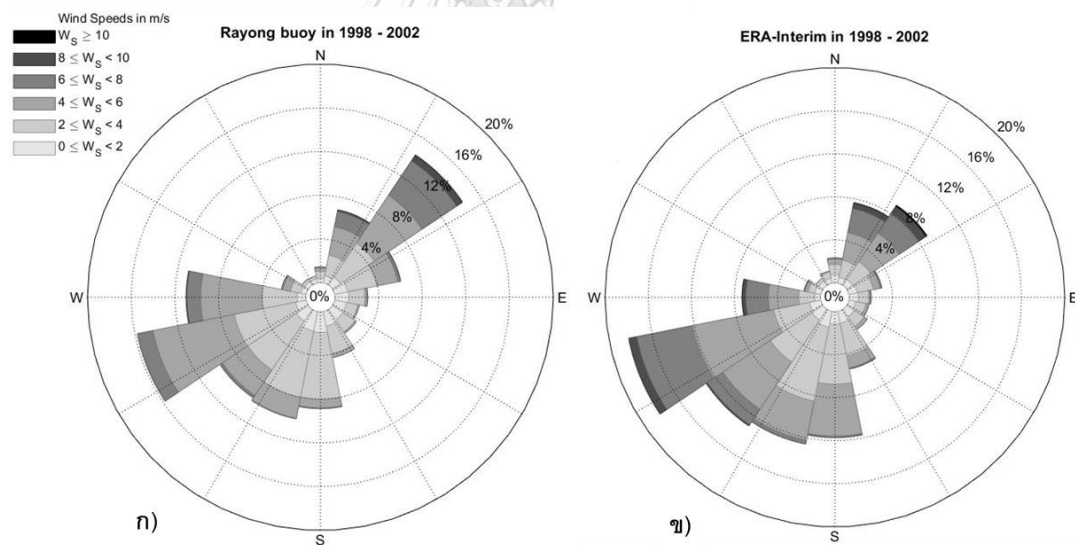
ระยอง

4.1.1 การวิเคราะห์ข้อมูลลม

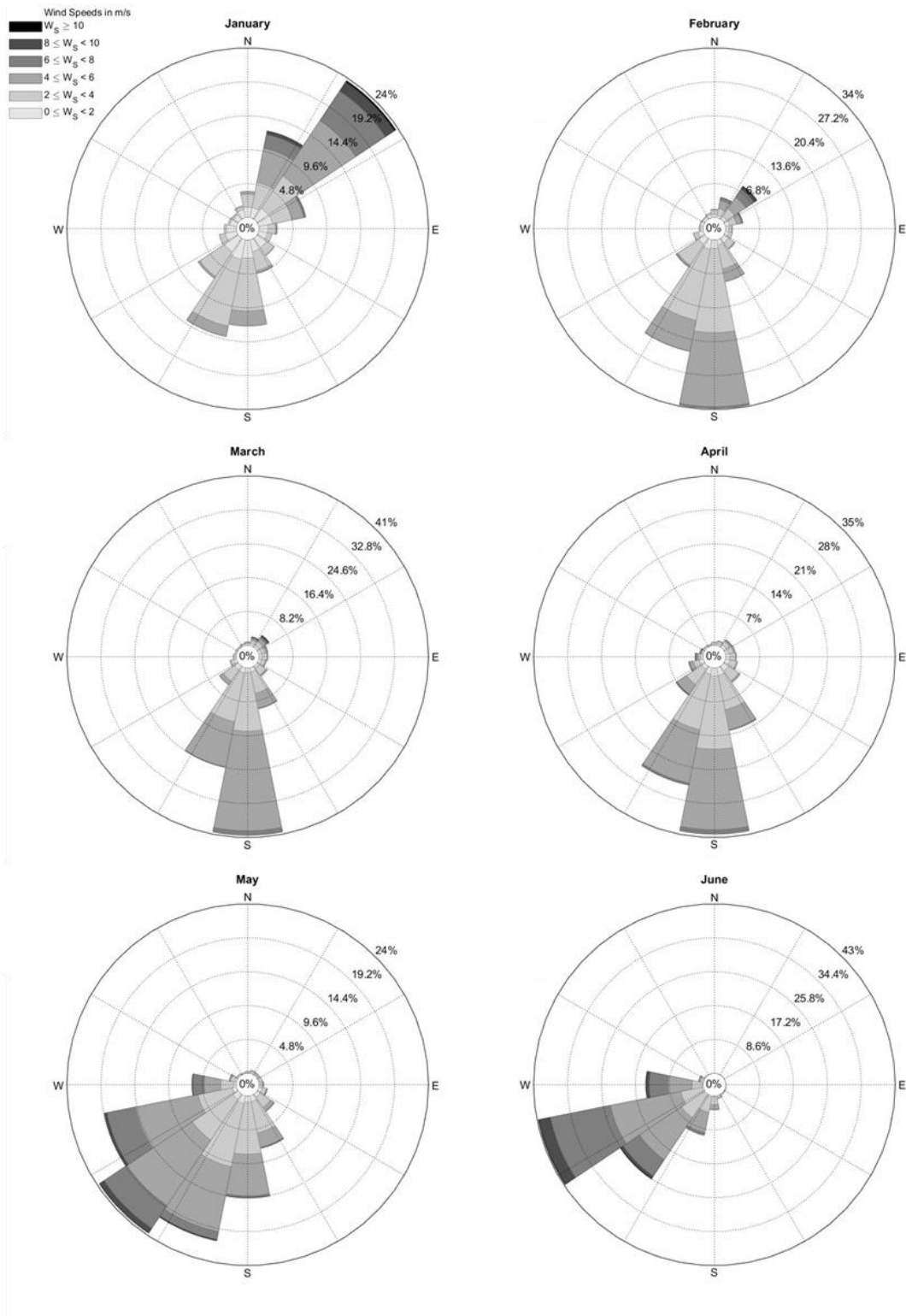
ข้อมูลลมที่ใช้ในการศึกษานี้ใช้ข้อมูล ERA-Interim ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ทำการวิเคราะห์ข้อมูล ERA-Interim กับข้อมูลทุ่นสมุทรศาสตร์ระยอง ในปี พ.ศ.2541 - พ.ศ.2545 พบว่าข้อมูล ERA-Interim มีทิศทางลมสอดคล้องกับทิศทางลมตรวจวัดจากทุ่นสมุทรศาสตร์ โดยทิศทางที่ลมเคลื่อนมามากที่สุดเหมือนกันคือมาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันตก (WSW) ซึ่งข้อมูลจาก ERA-Interim พบประมาณ 18% ส่วนทุ่นสมุทรศาสตร์พบประมาณ 16% แต่จะพบความแตกต่างในลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) และทิศตะวันตก (W) ที่ข้อมูล ERA-Interim ตรวจพบน้อยกว่าข้อมูลจากทุ่นสมุทรศาสตร์ โดยแตกต่างกันประมาณ 4 - 5% ในส่วนของความเร็วลมที่พบมากที่สุดในช่วงความเร็วลม 2-4 เมตร/วินาที โดยข้อมูลสมุทรศาสตร์พบประมาณ 43% ส่วนข้อมูล ERA-Interim พบประมาณ 36% ดังแสดงในรูปที่ 4-2 สรุปได้ว่าข้อมูล ERA-Interim มีทิศทางที่สอดคล้องกับข้อมูลตรวจวัด แต่ส่วนใหญ่จะมีความเร็วลมต่ำกว่าข้อมูลตรวจวัด

เพื่อศึกษาความเร็วและทิศทางของลมที่เคลื่อนที่ผ่านในตำแหน่งน้ำมันรั่วไหลบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง ทำการวิเคราะห์การกระจายขนาดและทิศทางของลมในตำแหน่งที่ใช้เป็นตัวแทนพื้นที่ศึกษานั้น โดยเลือกใช้ข้อมูลเฉลี่ยราย 6 ชั่วโมง ตั้งแต่ปี พ.ศ.2540 - พ.ศ.2559 มาใช้ในการวิเคราะห์ โดยพบว่าทิศทางของลมที่พบมากที่สุดในแต่ละเดือนแบ่งออกเป็น 4 ทิศทาง คือ ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ในเดือนตุลาคมถึงเดือนมกราคม, ทิศใต้ (S) ในเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน, ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ในเดือนพฤษภาคม และทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันตก (WSW) ในเดือนมิถุนายนถึงเดือนกันยายน ดังแสดงในรูปที่ 4-3 และตารางที่ 4-1 ซึ่งสอดคล้องกับ

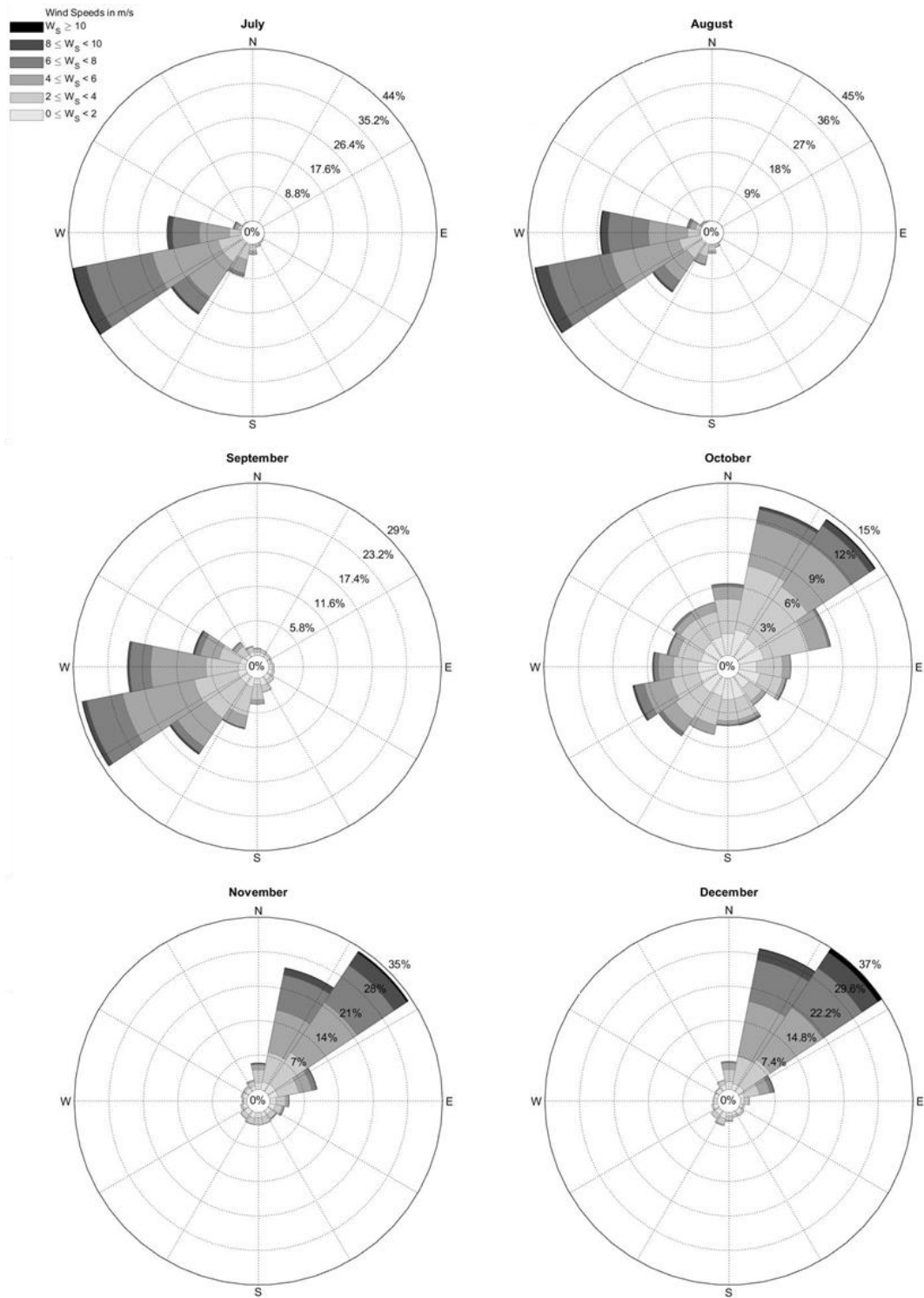
ทิศทางของลมมรสุมที่เคลื่อนที่ผ่านประเทศไทย โดยในฤดูลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือในช่วงเดือนตุลาคมถึงเดือนมกราคม ลมจะเคลื่อนตัวมาทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ส่วนในเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายนเป็นช่วงฤดูเปลี่ยนลมมรสุม และฤดูลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่ลมเคลื่อนที่มาทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนกันยายน โดยความเร็วลมส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 2 – 6 เมตร/วินาที และพบว่าในเดือนธันวาคมมีความเร็วลมแรงมากกว่า 10 เมตร/วินาที ซึ่งพบมากกว่า 1% ของลมในเดือนนั้น ทั้งนี้หากดูการกระจายขนาดและทิศทางของลมทั้งหมดตั้งแต่ปี พ.ศ.2540 - พ.ศ.2559 จะพบว่าทิศทางหลักที่ลมเคลื่อนที่มาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันตก (WSW) โดยพบประมาณ 15% รองมาเป็นทิศใต้ (S), ทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางใต้ (SSW), ทิศตะวันตกเฉียงใต้ และทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ที่พบประมาณ 10 – 13% และความเร็วลมส่วนใหญ่ที่พบอยู่ในช่วง 2 – 6 เมตร/วินาที และ 4 – 6 เมตร/วินาที พบประมาณ 36% และ 34% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4-4 สำหรับผลการคำนวณการแจกแจงความเร็วลมทั้งหมดและรายเดือน แสดงไว้ในภาคผนวก ข



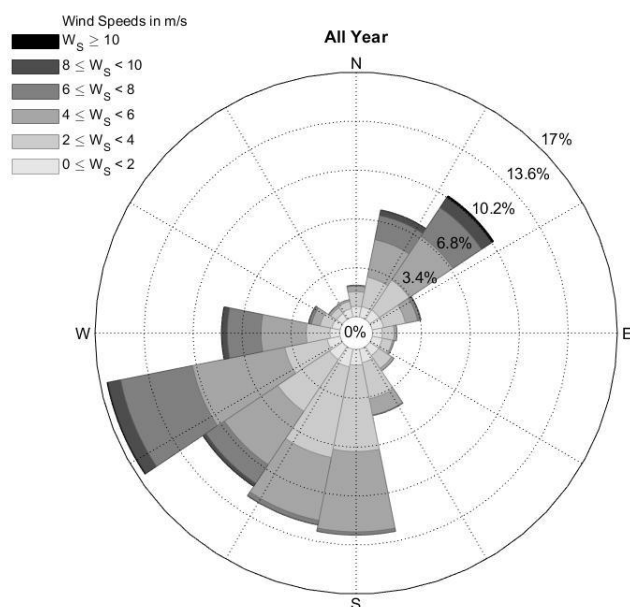
รูปที่ 4-2 ผังข้อมูลลม (ก) จากทุ่นสมุทรศาสตร์ระยอง และ (ข) จากข้อมูล ERA-Interim ระหว่างปี พ.ศ.2541 – พ.ศ.2545



รูปที่ 4-3 ฝั่งข้อมูลลมรายเดือนบริเวณชายฝั่งทะเลระยองในเดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม



รูปที่ 4-3 (ต่อ) ผังข้อมูลลมรายเดือนบริเวณชายฝั่งทะเลระยองในเดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม



รูปที่ 4-4 ฝั่งข้อมูลลมรายปีบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง ระหว่างปี พ.ศ.2540 - พ.ศ.2559

ตารางที่ 4-1 การแจกแจงทิศทางและความเร็วลมที่พบเป็นส่วนใหญ่แต่ละเดือน ที่ชายฝั่งทะเลระยอง ตั้งแต่ปี พ.ศ.2540 - พ.ศ.2559

เดือน	ทิศทางลม	ความเร็วลมเฉลี่ยราย 6 ชั่วโมง (เมตร/วินาที)
มกราคม	NE	2 - 4
กุมภาพันธ์	S	2 - 4
มีนาคม	S	2 - 4
เมษายน	S	2 - 4
พฤษภาคม	SW	4 - 6
มิถุนายน	WSW	4 - 6
กรกฎาคม	WSW	4 - 6
สิงหาคม	WSW	4 - 6
กันยายน	WSW	2 - 4
ตุลาคม	NE	2 - 4
พฤศจิกายน	NE	2 - 4
ธันวาคม	NE	4 - 6
รวมทั้งปี	WSW	4 - 6

4.1.2 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis)

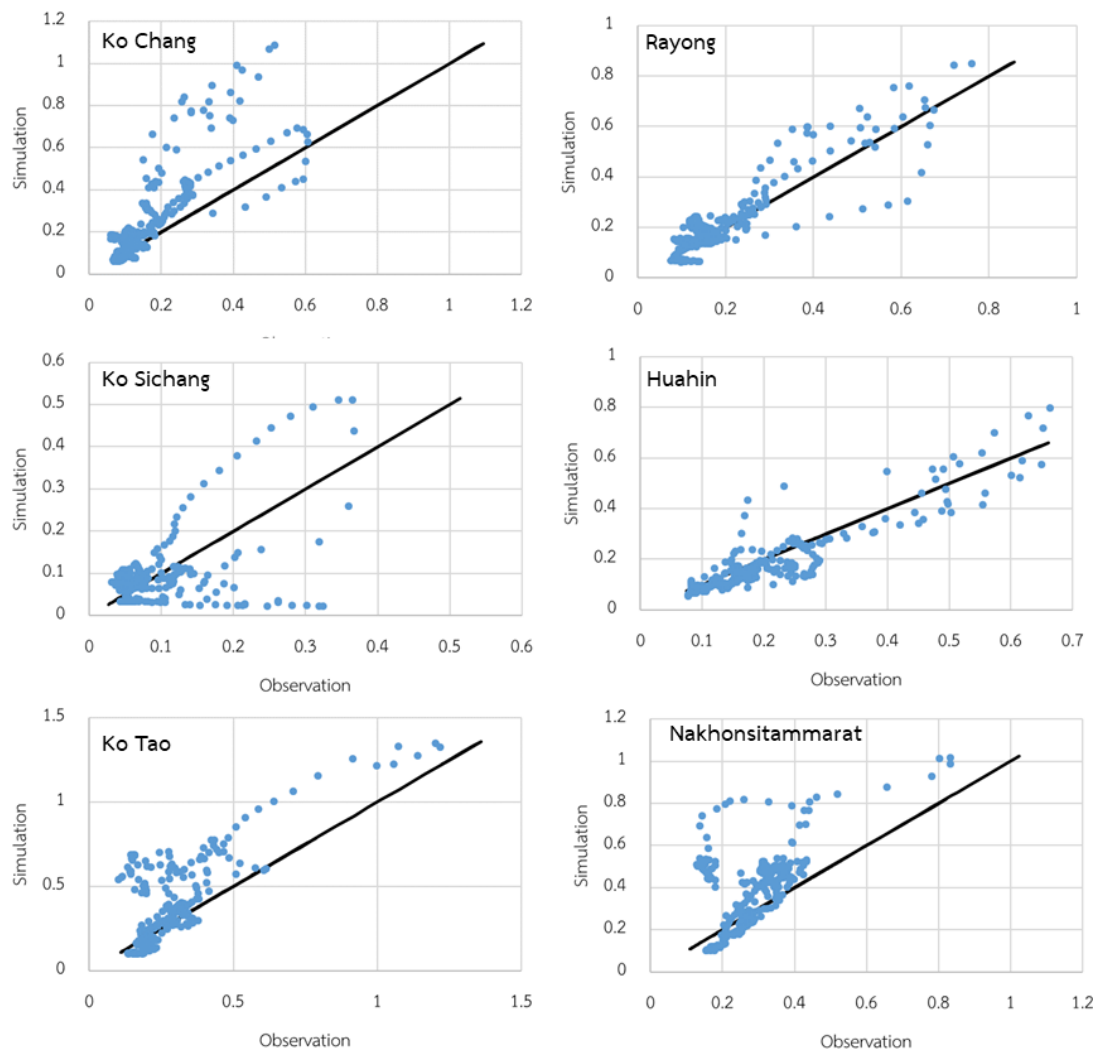
จากการเปรียบเทียบความสูงคลื่นนัยสำคัญจากแบบจำลอง SWAN และข้อมูลตรวจวัดจากทุ่นสมุทรศาสตร์จำนวน 6 สถานี ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ในการสอบเทียบแบบจำลอง (calibration) ทำการจำลองคลื่นในช่วงระหว่างวันที่ 1 – 31 ตุลาคม พ.ศ.2540 ซึ่งเป็นช่วงที่พายุไต้ฝุ่นลินดาเคลื่อนที่ผ่านประเทศไทย และกำหนดกระบวนการทางกายภาพของคลื่น เช่น กระบวนการกำเนิดคลื่นโดยลม (wind growth), การแตกตัวของคลื่น (wave breaking), การแตกตัวของยอดคลื่น (whitecapping), แรงเสียดทานท้องน้ำ (bottom friction) และกระบวนการปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นกับคลื่นแบบไม่เชิงเส้น สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์ในทฤษฎีของกระบวนการทางกายภาพของคลื่นที่เลือกใช้ในการศึกษาในครั้งนี้เลือกมาจากค่าที่แบบจำลองแนะนำมา เนื่องจากยังไม่มีการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมในอ่าวไทย ดังแสดงในตารางที่ 4-2 โดยในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวในครั้งนี้จะวิเคราะห์ค่าแรงเสียดทานท้องน้ำที่แตกต่างกัน 3 สมการคือ Hasselmann et al. (1973) หรือ JONSWAP, Collins (1972) และ Madsen and Sørensen (1993) เพื่อหาสมการที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 4-2 ทฤษฎีของกระบวนการทางกายภาพของคลื่นและค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในแบบจำลอง

กระบวนการ	ทฤษฎี	ค่าสัมประสิทธิ์
Wave growth	Komen et al. (1984)	$C_{ds}=2.36 \times 10^{-5}$ $S_{pm}=3.02 \times 10^{-3}$
Whitecapping	Komen et al. (1984)	$C_{ds}=2.36 \times 10^{-5}$ $S_{pm}=3.02 \times 10^{-3}$
Bottom friction	Hasselmann et al. (1973)	$C_{f_{jon}}=0.038$
	Collins (1972)	$C_{f_w}=0.015$
	Madsen and Sørensen (1993)	$Kn=0.02$
Wave breaking	Battjes and Janssen (1978)	$\alpha_{bj}=1$ $\gamma_{bj}=0.73$

ผลการศึกษาพบว่าความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลองกับความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ตรวจวัดได้ทุ่นสมุทรศาสตร์มีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) ไม่แตกต่างกันทั้ง 3 สมการ ดังแสดงในตารางที่ 4-3 เมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN

กับข้อมูลที่ได้จากหุ่นสมุทรศาสตร์พบว่าข้อมูลมีการกระจายไปในทิศทางเดียวกัน แต่ความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN จะน้อยกว่าความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากหุ่นสมุทรศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 4-5 ทั้งนี้จะเลือกใช้ค่าแรงเสียดทานท้องน้ำจากทฤษฎี JONSWAP (Hasselmann et al., 1973) ในการจำลองคลื่นต่อไป เนื่องจากเป็นทฤษฎีที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการศึกษาที่ผ่านมา (Booij et al., 1999, Akpinar et al., 2012, Amrutha et al., 2016, วาทิน ธนาธารพร และคณะ, 2554)



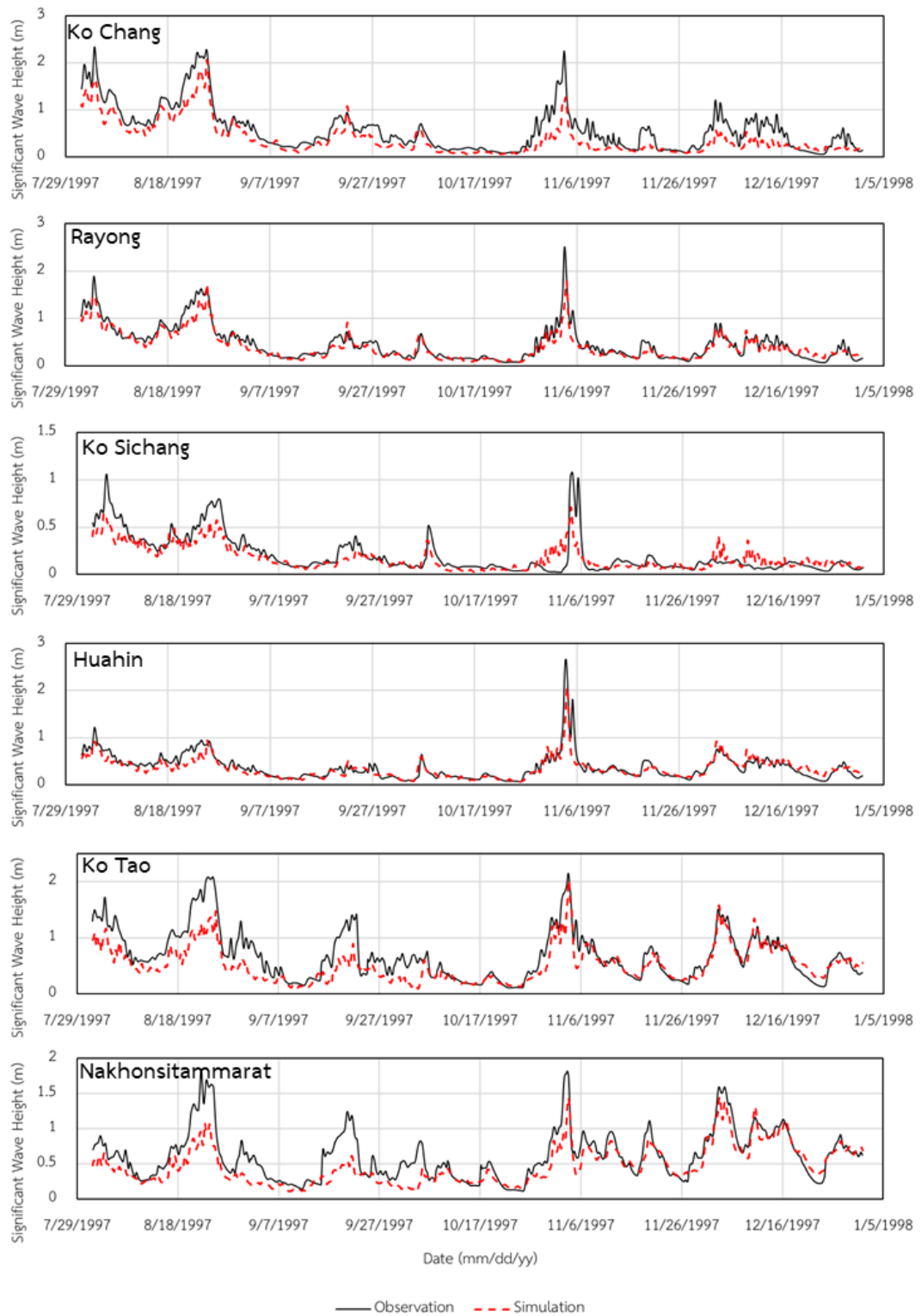
รูปที่ 4-5 ผังการกระจายระหว่างข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN และกับข้อมูลตรวจวัดจากหุ่นสมุทรศาสตร์ ในเดือนตุลาคม พ.ศ.2540

ตารางที่ 4-3 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง SWAN จากทฤษฎีแรงเสียดทานท้องน้ำที่แตกต่างกัน ในช่วงระหว่างวันที่ 1 – 31 ตุลาคม พ.ศ.2540

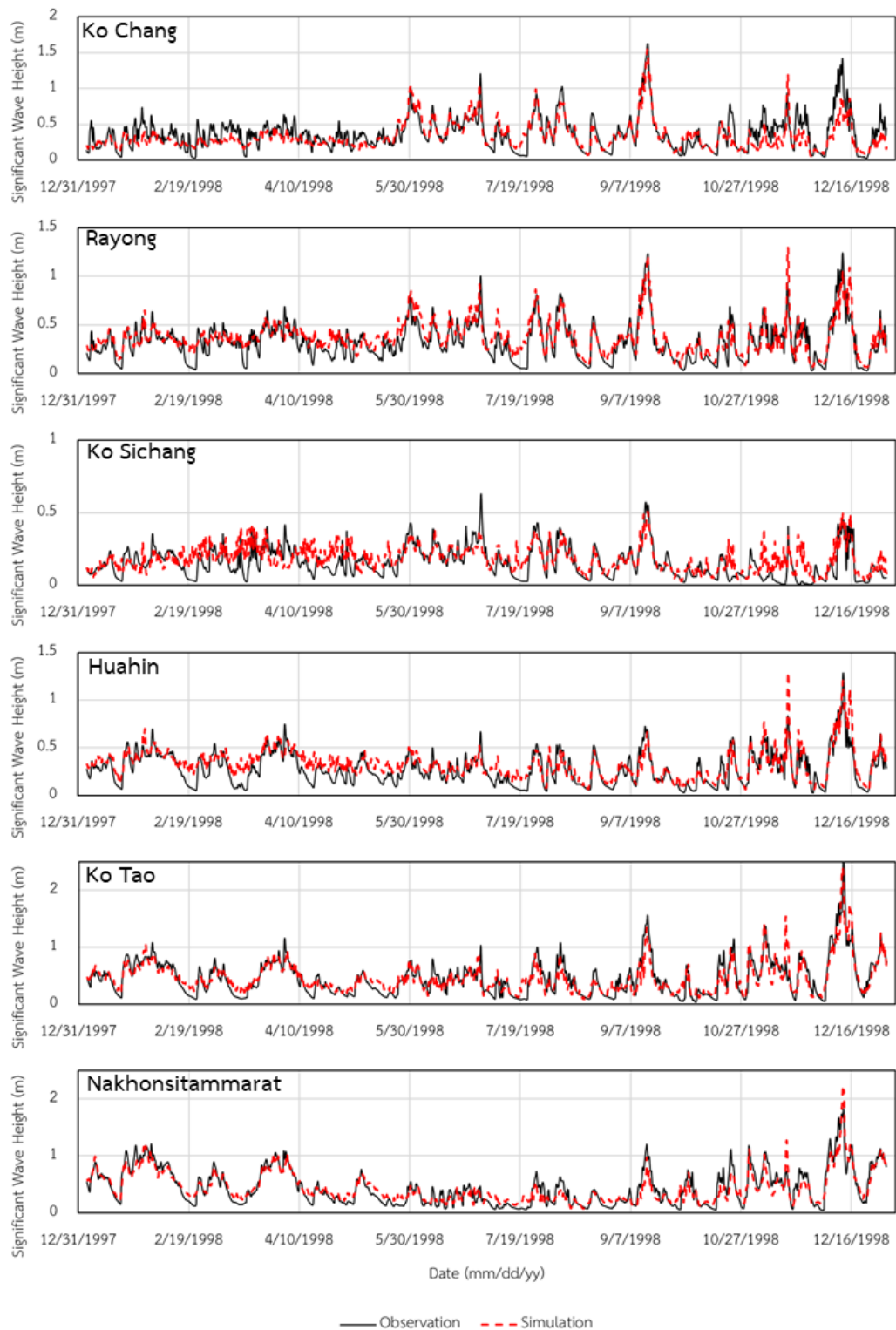
สถานี	ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (เมตร)		
	Hasselmann et al. (1973)	Collins (1972)	Madsen and Sørensen (1993)
เกาะช้าง	0.12	0.12	0.12
ระยอง	0.05	0.05	0.05
เกาะสีชัง	0.06	0.06	0.06
หัวหิน	0.04	0.04	0.04
เกาะเต่า	0.10	0.10	0.10
นครศรีธรรมราช	0.12	0.12	0.12

4.1.3 การสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง SWAN

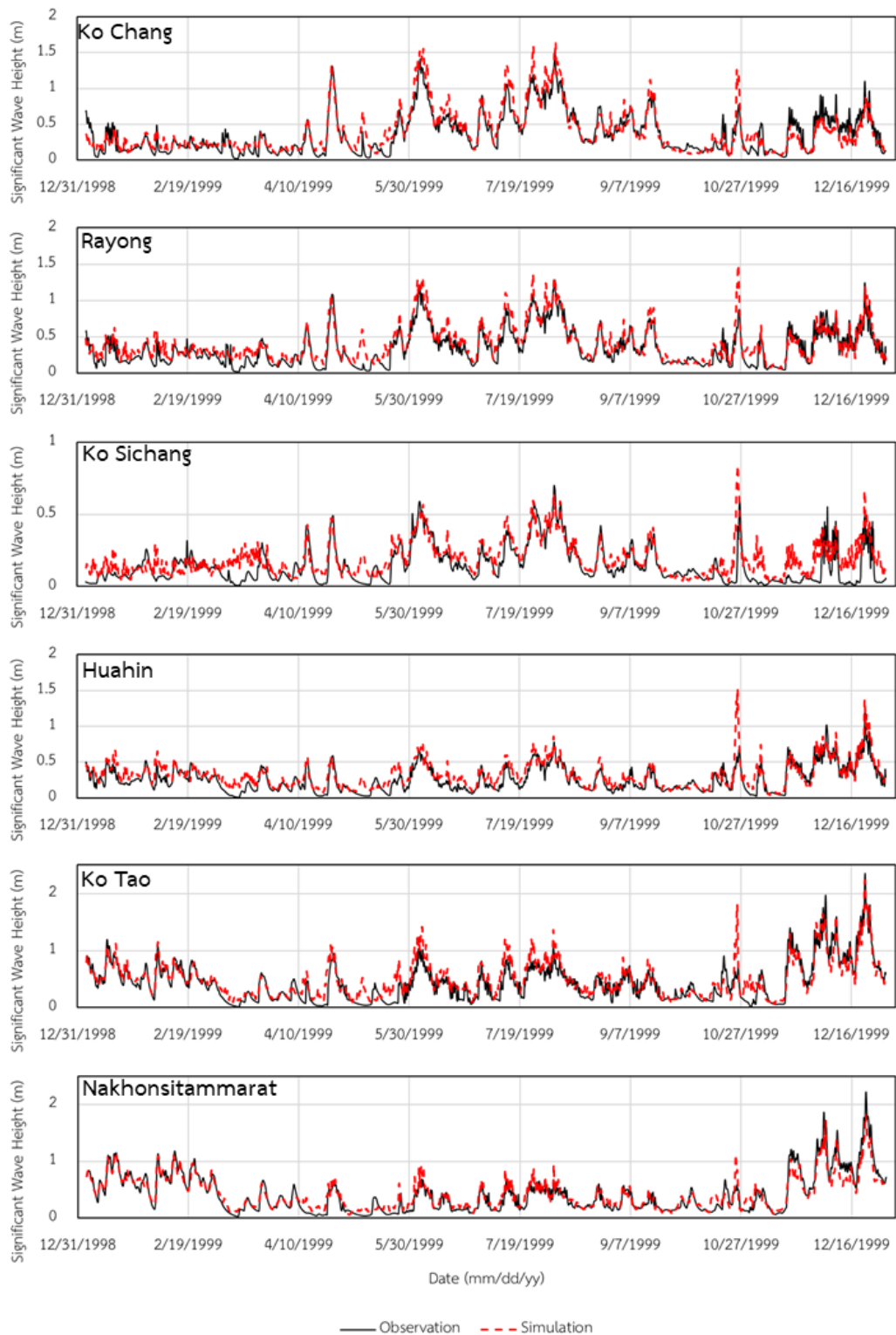
ในการสอบเทียบแบบจำลอง SWAN ใช้ข้อมูลลม ERA-Interim ราย 6 ชั่วโมง ทำการจำลองคลื่นตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ.2540 – เดือนธันวาคม พ.ศ.2542 ทำการเปรียบเทียบความสูงคลื่นที่สำคัญที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลคลื่นที่ได้จากการตรวจวัดด้วยทุ่นสมุทรศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 4-6 ถึงรูปที่ 4-8 พบว่าแบบจำลอง SWAN สามารถจำลองความสูงคลื่นสำคัญได้ใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดจากทุ่นสมุทรศาสตร์ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) อยู่ส่วนใหญ่อยู่ประมาณ 0.1 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 4-4 ทั้งนี้จะพบว่าในปี พ.ศ.2540 ที่สถานีเกาะช้าง, เกาะเต่า และ นครศรีธรรมราช มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) ที่สูงประมาณ 0.2 เมตร ซึ่งพบว่าแบบจำลอง SWAN สามารถจำลองได้ดีความสูงคลื่นสำคัญน้อยกว่า 1 เมตร ซึ่งเป็นสภาพปกติของพื้นที่ศึกษา แต่จะมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความสูงคลื่นสำคัญสูงเกิน 1 เมตร และเมื่อทำการเปรียบเทียบความสูงคลื่นสำคัญในช่วงพายุไต้ฝุ่นลินดาที่เคลื่อนที่ผ่านประเทศไทยในช่วงวันที่ 25 ตุลาคม – 9 พฤศจิกายน พ.ศ.2540 พบว่าแบบจำลองไม่สามารถจำลองคลื่นได้สูงเท่ากับข้อมูลที่ตรวจวัดได้โดยในช่วงที่ตรวจวัดคลื่นได้สูงที่สุด แบบจำลองคำนวณคลื่นได้ต่ำกว่าข้อมูลตรวจวัดประมาณ 0.4 - 0.5 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4-9 จึงเป็นเหตุให้มีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์สูงกว่า 0.1 เมตร



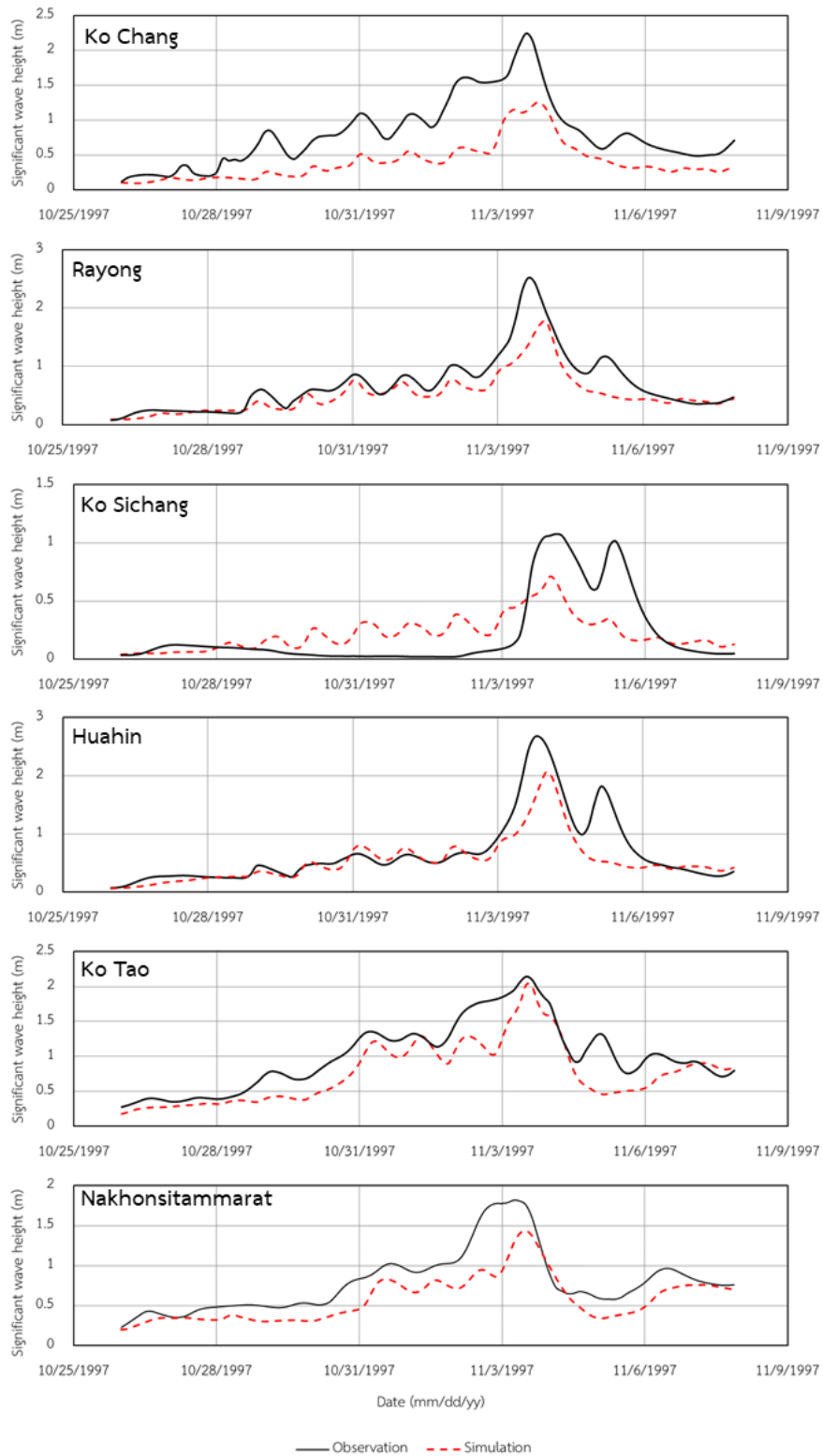
รูปที่ 4-6 การเปรียบเทียบข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลตรวจวัดจากหุ่นสมุทรศาสตร์ ในเดือนสิงหาคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2540



รูปที่ 4-7 การสอบเทียบข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลตรวจวัดจากหุ่นสมุทรศาสตร์ ในปี พ.ศ.2541



รูปที่ 4-8 การสอบเทียบข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลตรวจวัดจากหุ่นสมุทรศาสตร์ ในปี พ.ศ.2542



รูปที่ 4-9 การสอบเทียบข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลตรวจวัดจากหุ่นสมุทรศาสตร์ในช่วงวันที่ 25 ตุลาคม – 9 พฤศจิกายน พ.ศ.2540 (พายุไต้ฝุ่นลินดา)

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ระหว่างความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลที่ได้จากหุ่นสมุทรศาสตร์ พบว่าส่วนใหญ่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ อยู่ในช่วง 0.7 – 0.9 และเมื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองโดยใช้ค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) พบว่าค่า NSE ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.6 - 0.8 ดังแสดงในตารางที่ 4-4 ซึ่งแสดงว่าแบบจำลอง SWAN มีความแม่นยำพอใช้ (Yuri et al., 1999) แต่ยังมีบางปีและบางสถานีที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจและค่า NSE ที่ต่ำ เช่น สถานีเกาะสีซัง ในปี พ.ศ.2541 ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.4 และค่า NSE เท่ากับ 0.3 ซึ่งแสดงได้ว่าแบบจำลอง SWAN ไม่สามารถจำลองคลื่นได้ใกล้เคียงเสมอไปในแต่ละที่และเวลา ทั้งนี้เกณฑ์ของค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) ที่ใช้บอกถึงความแม่นยำของแบบจำลองนั้นเป็นเพียงแนวทางหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากเกณฑ์ดังกล่าวอาจเหมาะสมกับบางพื้นที่เท่านั้นซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงได้

ตารางที่ 4-4 ดัชนีการสอบเทียบค่าความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลที่ได้จากหุ่นสมุทรศาสตร์ ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ.2540 – เดือนธันวาคม พ.ศ.2542

สถานี	MAE (เมตร)			R^2			NSE		
	2540	2541	2542	2540	2541	2542	2540	2541	2542
เกาะช้าง	0.20	0.11	0.10	0.88	0.64	0.82	0.68	0.59	0.78
ระยอง	0.09	0.08	0.09	0.90	0.72	0.81	0.85	0.68	0.73
เกาะสีซัง	0.07	0.07	0.07	0.73	0.39	0.59	0.66	0.29	0.47
หัวหิน	0.08	0.08	0.08	0.79	0.68	0.74	0.75	0.61	0.61
เกาะเต่า	0.20	0.11	0.12	0.74	0.78	0.79	0.59	0.78	0.76
นครศรีธรรมราช	0.16	0.10	0.09	0.72	0.83	0.89	0.57	0.83	0.88

สำหรับการตรวจสอบแบบจำลอง (validation) ทำการจำลองคลื่นตั้งแต่ปี พ.ศ.2543 – พ.ศ. 2545 พบว่าแบบจำลอง SWAN สามารถจำลองความสูงคลื่นนัยสำคัญได้ใกล้เคียงกับความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากหุ่นสมุทรศาสตร์ในทุกสถานี ดังแสดงในรูปที่ 4-10 ถึงรูปที่ 4-12 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) ส่วนใหญ่อยู่ประมาณ 0.06 – 0.10 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 4-5 ทั้งนี้เพราะความสูงคลื่นส่วนใหญ่มีค่าไม่เกิน 1 เมตร ซึ่งต่างจากในช่วงสอบเทียบแบบจำลองที่มีบางช่วงที่คลื่นมีความสูงมากกว่า 1 เมตร โดยแบบจำลอง SWAN จำลองคลื่นที่สูงกว่า 1 เมตรไม่ค่อยแม่นยำนัก และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจระหว่างความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลที่ได้จากหุ่นสมุทรศาสตร์ พบว่าส่วนใหญ่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ อยู่ในช่วง 0.7

– 0.9 ยกเว้นสถานีเกาะสีซังที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ในช่วง 0.5 – 0.6 และเมื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองโดยใช้ค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) พบว่าค่า NSE ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.6 - 0.8 ยกเว้นสถานีเกาะสีซังที่มีค่า NSE ประมาณ 0.5 ดังแสดงในตารางที่ 4-5 ซึ่งแสดงว่าแบบจำลอง SWAN มีความแม่นยำพอใช้ (Yuri et al., 1999) ซึ่งแสดงว่าแบบจำลอง SWAN จำลองคลื่นที่บริเวณเกาะสีซังไม่สอดคล้องและแม่นยำมากนัก

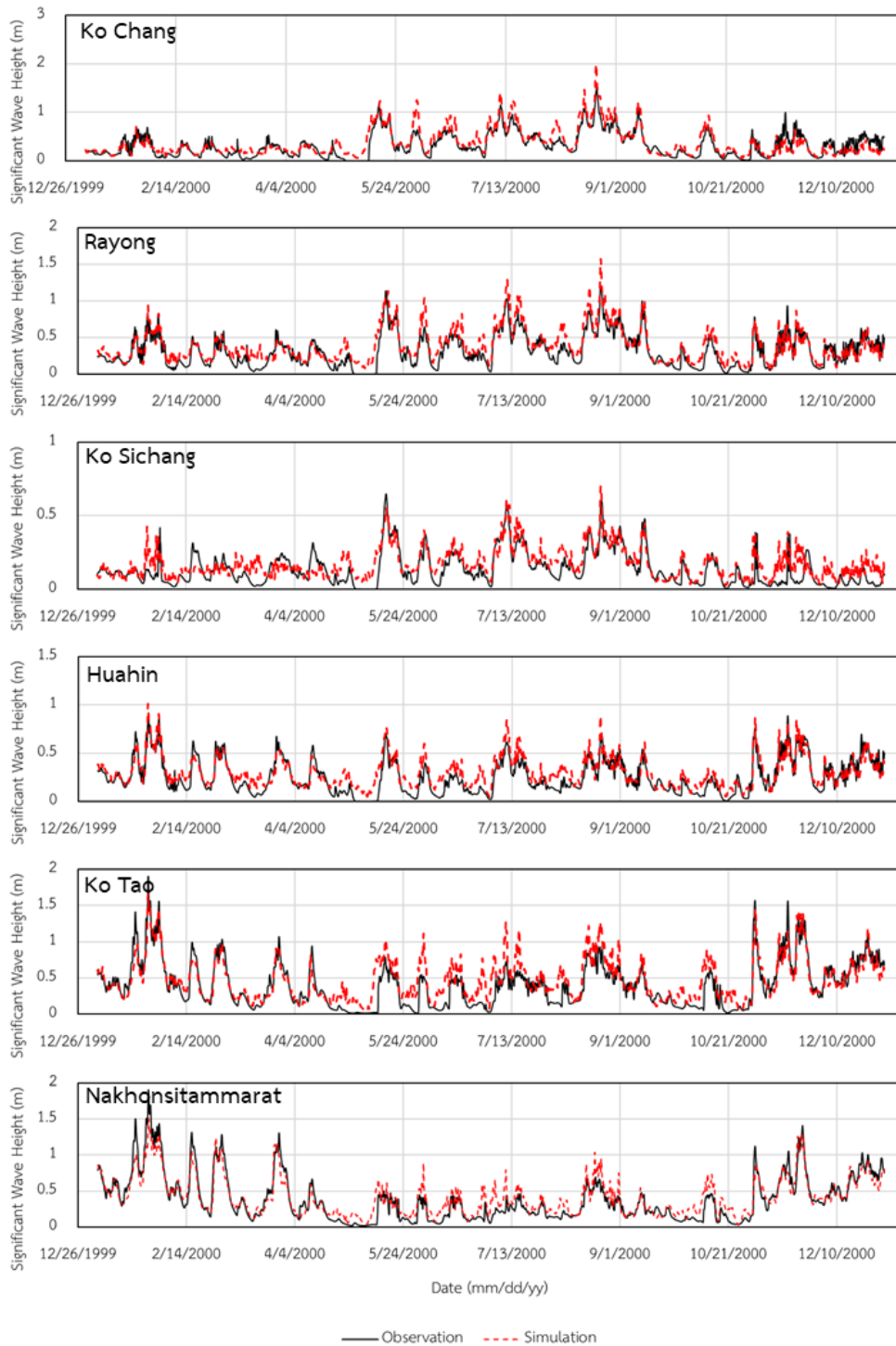
ตารางที่ 4-5 ดัชนีการตรวจสอบค่าความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลที่ได้จากหุ่นสมุทรศาสตร์ ตั้งแต่ปี พ.ศ.2543 – พ.ศ.2545

สถานี	MAE (เมตร)			R ²			NSE		
	2543	2544	2545	2543	2544	2545	2543	2544	2545
เกาะช้าง	0.11	0.10	0.08	0.76	0.80	0.86	0.66	0.77	0.82
ระยอง	0.10	0.10	0.08	0.78	0.80	0.82	0.68	0.68	0.73
เกาะสีซัง	0.06	0.06	0.05	0.59	0.56	0.63	0.47	0.49	0.57
หัวหิน	0.08	0.08	0.07	0.77	0.76	0.63	0.70	0.70	0.61
เกาะเต่า	0.13	0.12	0.11	0.73	0.77	0.66	0.68	0.74	0.65
นครศรีธรรมราช	0.10	0.10	0.09	0.85	0.88	0.86	0.84	0.85	0.84

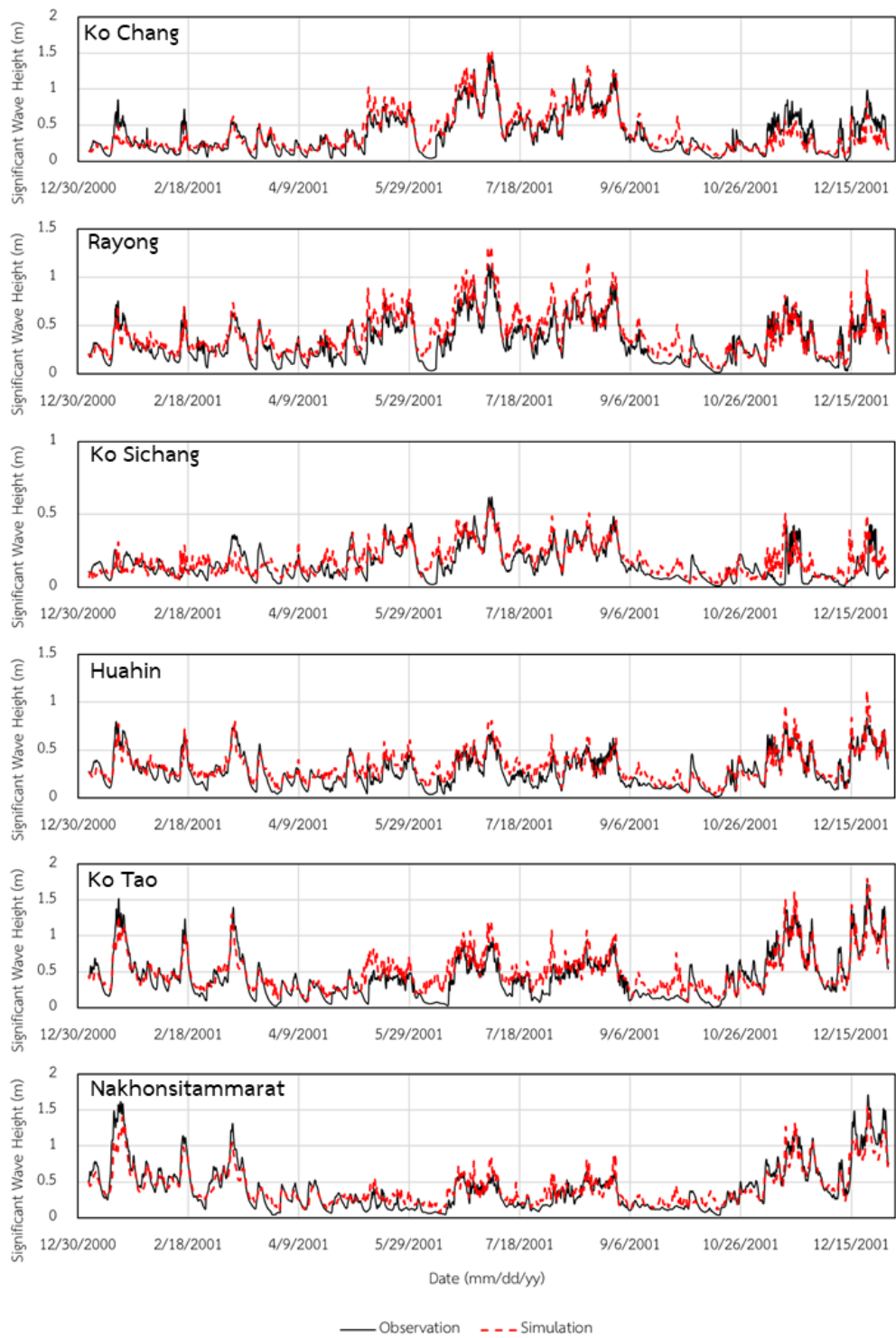
4.1.4 ความสัมพันธ์ของความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลหุ่นสมุทรศาสตร์

เมื่อพิจารณาค่าความเบี่ยงเบนเฉลี่ย (bias) ระหว่างความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลที่ได้จากหุ่นสมุทรศาสตร์ ถ้าค่าความเบี่ยงเบนเฉลี่ย มีค่าเป็นบวกแสดงว่าแบบจำลอง SWAN จำลองความสูงคลื่นนัยสำคัญค่าได้สูงกว่าข้อมูลจริงและหากว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยมีค่าติดลบแสดงว่า SWAN จำลองความสูงคลื่นนัยสำคัญได้ค่าต่ำกว่าข้อมูลจริง จากการวิเคราะห์พบว่าค่าความเบี่ยงเบนเฉลี่ยส่วนใหญ่อยู่ประมาณ 0 – 0.7 เมตรซึ่งแสดงว่าแบบจำลอง SWAN จำลองความสูงคลื่นนัยสำคัญได้สูงกว่าความสูงคลื่นที่ตรวจวัดได้ แต่พบว่าในปี พ.ศ.2540 ที่แบบจำลอง SWAN จำลองความสูงคลื่นได้น้อยกว่าค่าจริงเนื่องจากช่วงปี พ.ศ.2540 มีพายุลินดาเคลื่อนตัวเข้าสู่อ่าวไทย ซึ่งทำให้เกิดคลื่นสูงกว่า 1 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 4-6 ซึ่งสอดคล้องกับการเปรียบเทียบความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งพบว่าแบบจำลอง SWAN จำลองคลื่น

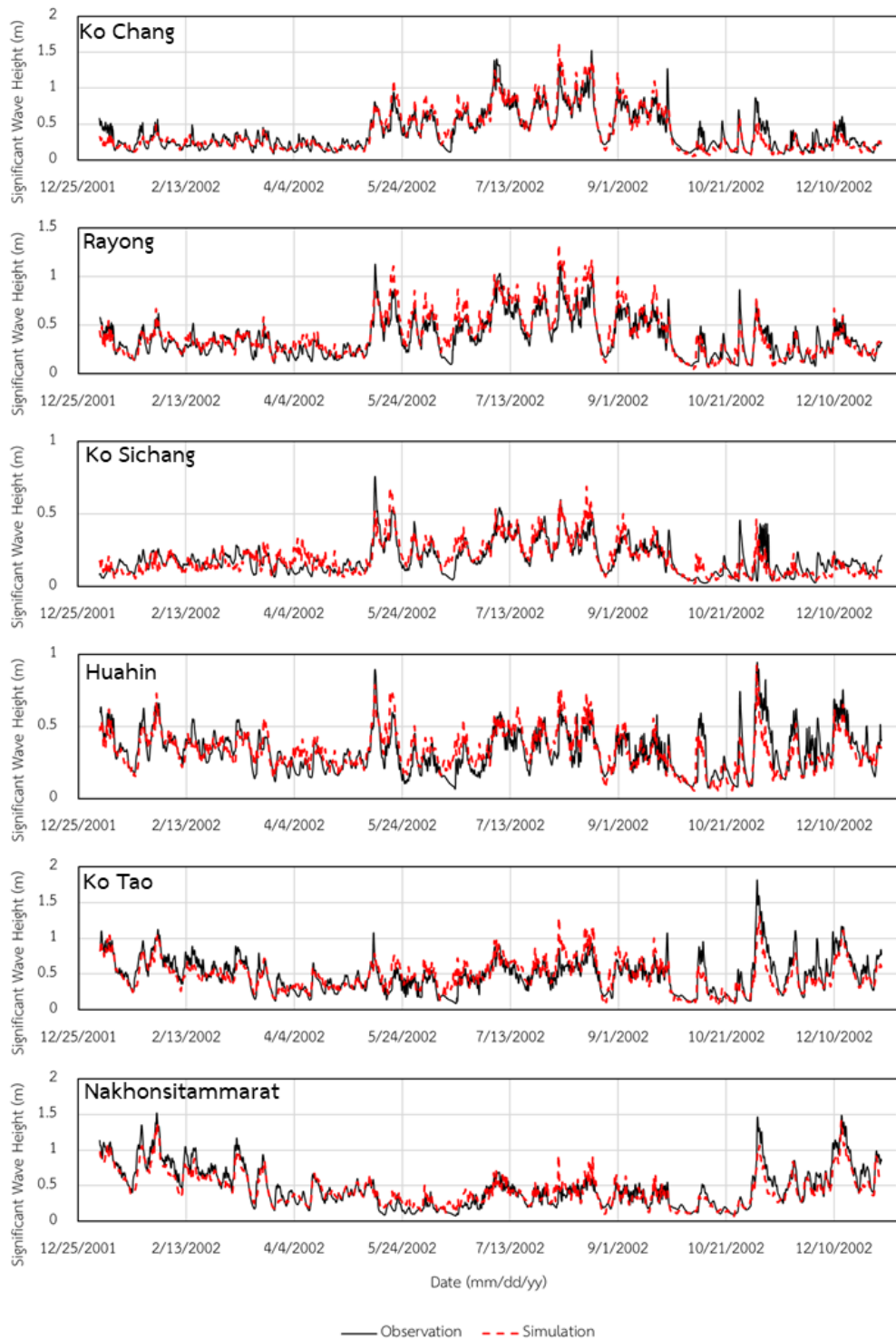
ได้ใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดที่ความสูงคลื่นไม่เกิน 1 เมตร แต่ถ้าคลื่นสูงมากกว่า 1 เมตรแบบจำลอง SWAN ไม่สามารถจำลองคลื่นได้ใกล้เคียงความเป็นจริงได้



รูปที่ 4-10 การตรวจสอบข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลตรวจวัดจากหุ่นสมุทรศาสตร์ ในปี พ.ศ.2543



รูปที่ 4-11 การตรวจสอบข้อมูลความสูงคลื่นน้ำสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลตรวจวัดจากหุ่นสมุทรศาสตร์ ในปี พ.ศ.2544



รูปที่ 4-12 การตรวจสอบข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลตรวจวัดจากหุ่นสมุทรศาสตร์ ในปี พ.ศ.2545

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลที่ได้จากหุ่นสมุทรศาสตร์ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ.2540 - เดือนธันวาคม พ.ศ.2545 พบว่าส่วนใหญ่ที่สถานีเกาะช้าง, ระยอง, เกาะสีชัง, หัวหิน, เกาะเต่า และนครศรีธรรมราชมีความสูงคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ยประมาณ 0.41, 0.36, 0.17, 0.30, 0.49 และ 0.46 เมตร ตามลำดับ โดยพบว่าแบบจำลอง SWAN ส่วนใหญ่มีการจำลองคลื่นคลาดเคลื่อนประมาณ 10 – 20 % เมื่อเทียบกับข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ย ดังแสดงในตารางที่ 4-7 ทั้งนี้จะพบว่าในปี พ.ศ.2540 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสูงกว่าในปีอื่นๆ เนื่องจากในปี พ.ศ.2540 ที่พายุลินดาเคลื่อนที่เข้าสู่อ่าวไทย ซึ่งแบบจำลอง SWAN ไม่สามารถจำลองคลื่นใกล้เคียงความจริงได้ อีกทั้งข้อมูลที่ได้จากหุ่นตรวจวัดในปี พ.ศ.2540 มีเพียงในเดือนสิงหาคมถึงเดือนธันวาคม ซึ่งเป็นช่วงที่มีแต่คลื่นสูงเป็นส่วนใหญ่ ส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงกว่าในปีอื่นๆ ที่มีข้อมูลตลอดทั้งปีและมีทั้งช่วงที่ความสูงคลื่นไม่มากซึ่งแบบจำลอง SWAN จำลองคลื่นได้ใกล้เคียง

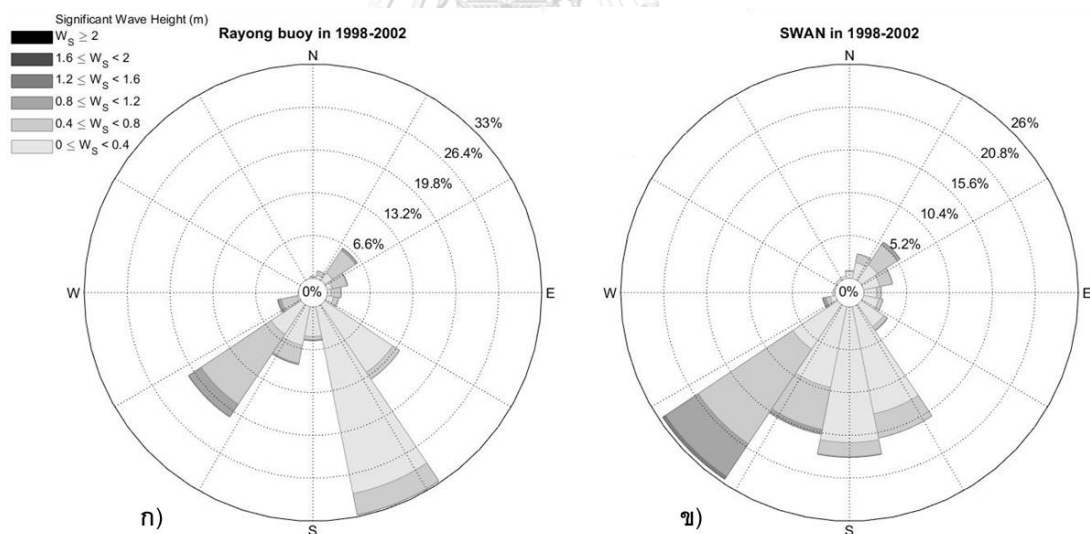
ตารางที่ 4-6 ค่าความเบี่ยงเบนเฉลี่ย (เมตร) ระหว่างความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลที่ได้จากหุ่นสมุทรศาสตร์ ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ.2540 – เดือนธันวาคม พ.ศ. 2545

สถานี	ค่าความเบี่ยงเบนเฉลี่ย (เมตร)					
	2540	2541	2542	2543	2544	2545
เกาะช้าง	-0.19	-0.05	0.03	0.04	0.02	-0.01
ระยอง	-0.06	0.04	0.06	0.06	0.07	0.03
เกาะสีชัง	-0.03	0.02	0.04	0.04	0.02	0.00
หัวหิน	-0.03	0.04	0.06	0.05	0.04	0.00
เกาะเต่า	-0.16	0.00	0.05	0.07	0.06	-0.01
นครศรีธรรมราช	-0.13	-0.02	0.00	0.03	0.01	-0.03

4.1.5 การวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นที่ได้จากแบบจำลอง SWAN บริเวณชายฝั่งทะเลระยอง

เมื่อวิเคราะห์การกระจายขนาดและทิศทางความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN ในตำแหน่งน้ำมันรั่วไหลบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง ดังแสดงในรูปที่ 4-1 ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งที่ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายขนาดและทิศทางของความเร็วลม โดยวิเคราะห์ข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญราย 3 ชั่วโมงที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลความสูงคลื่น

นัยสำคัญที่ได้จากหุ่นสมุทรศาสตร์ระยอง ตั้งแต่ปี พ.ศ.2541 - พ.ศ.2545 พบว่าทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่มามากที่สุดแตกต่างกัน โดยแบบจำลอง SWAN สามารถจำลองคลื่นที่มาจากทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ประมาณ 25% รองลงมามาจากทิศใต้ (S) และทิศตะวันออกเฉียงใต้ก่อนมาทางใต้ (SSE) 18% และ 16% ตามลำดับ แต่คลื่นที่ตรวจวัดได้เป็นคลื่นที่มาจากทิศตะวันออกเฉียงใต้ก่อนมาทางใต้ (SSE) เป็นส่วนใหญ่ซึ่งพบประมาณ 30% รองลงมาเป็นคลื่นที่มาจากทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ประมาณ 21% สำหรับความสูงคลื่นนัยสำคัญที่พบมากที่สุดมีความสูงประมาณ 0 - 0.4 เมตร ซึ่งพบประมาณ 60% เหมือนกันทั้งจากแบบจำลอง SWAN และข้อมูลที่ได้จากหุ่นสมุทรศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 4-13 เมื่อพิจารณาฝั่งข้อมูลคลื่นที่ได้จากหุ่นสมุทรศาสตร์ระยองจะพบว่าคลื่นเคลื่อนที่มาจากทิศตะวันออกเฉียงใต้ก่อนมาทางใต้ (SSE) เป็นส่วนใหญ่ซึ่งน่าจะเป็นคลื่น swell ที่เคลื่อนที่เข้ามาจากทะเลจีนใต้ ซึ่งแตกต่างจากแบบจำลอง SWAN จำลองได้เพียง 16% แต่ทั้งนี้เนื่องจากไม่มีการเก็บข้อมูลคลื่นจากหุ่นสมุทรศาสตร์หลังจากปี พ.ศ.2545 แล้วทำให้ข้อมูลคลื่นที่เก็บได้ไม่มีความต่อเนื่องถึงปัจจุบัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลอง SWAN ในการจำลองคลื่นเพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับแบบจำลอง Delft3D ต่อไป



รูปที่ 4-13 ฝั่งข้อมูลคลื่น (ก) จากหุ่นสมุทรศาสตร์ระยอง และ (ข) จากข้อมูล ERA-Interim ระหว่างปี พ.ศ.2541 - พ.ศ.2545

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญรายชั่วโมงที่ได้จากแบบจำลอง SWAN บริเวณชายฝั่งทะเลระยอง ตั้งแต่ปี พ.ศ.2540 - พ.ศ.2559 จะพบว่าความสูงคลื่นนัยสำคัญส่วนใหญ่จะสูงประมาณ 0.4 - 0.8 เมตร และพบว่าทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่มามากที่สุดจะเคลื่อนที่มาจากทิศ

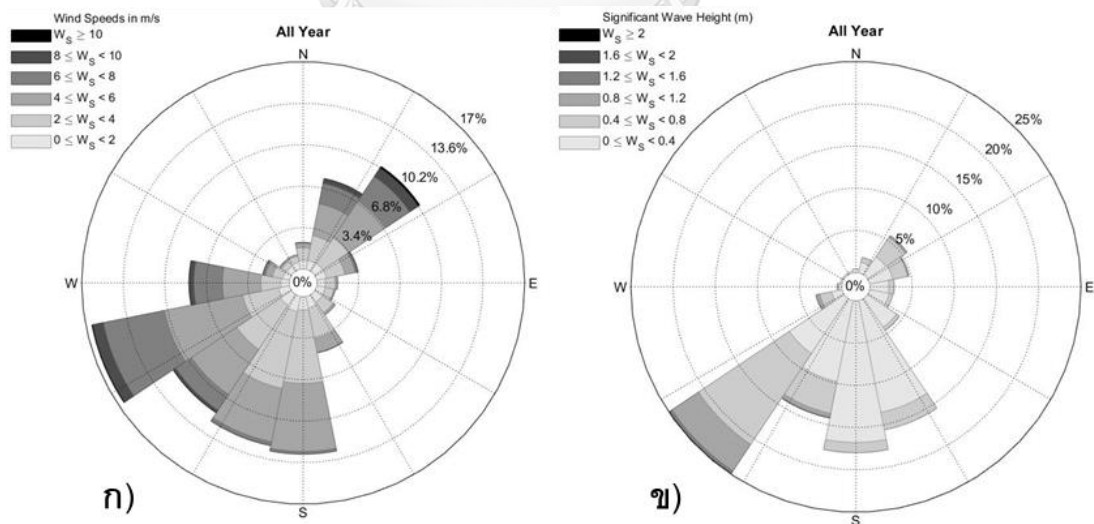
ตะวันตกเฉียงใต้ (SW) เป็นส่วนใหญ่ประมาณ 25% รองลงมาเป็นทิศใต้ (S) 18% ซึ่งเบี่ยงเบนไปจากทิศของลมเล็กน้อยซึ่งลมเคลื่อนที่มาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันตก (WSW) ดังแสดงในรูปที่ 4-14

ตารางที่ 4-7 ความสูงคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ยของทุ่นสมุทรศาสตร์และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากแบบจำลอง SWAN เมื่อเทียบกับข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ยในปี พ.ศ.2540 - พ.ศ. 2545

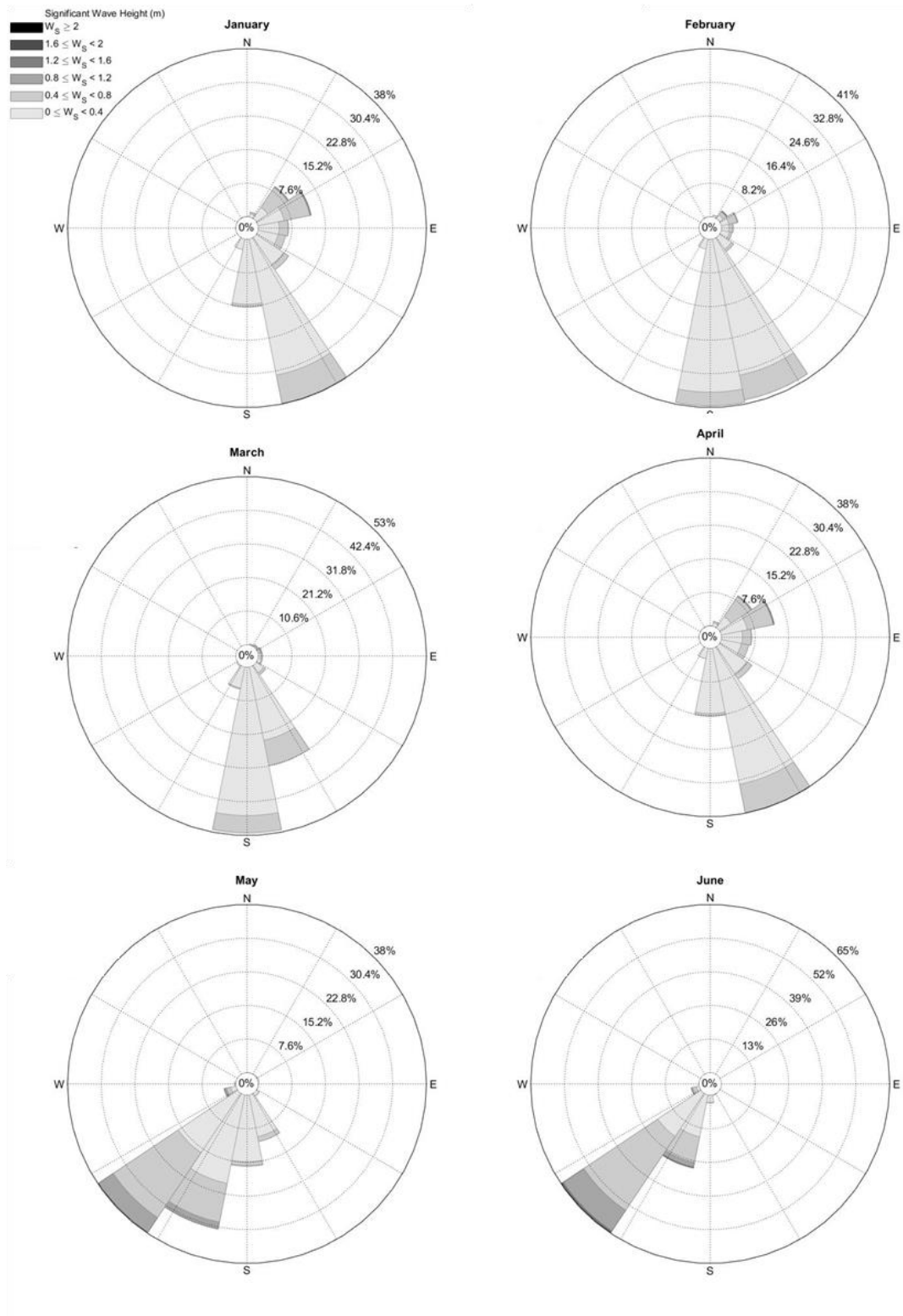
สถานี	ความสูงคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ย (เมตร)						
	ปี พ.ศ.	2540	2541	2542	2543	2544	2545
เกาะช้าง	ทุ่นสมุทรศาสตร์	0.58	0.38	0.37	0.33	0.38	0.40
	แบบจำลอง SWAN	0.39	0.33	0.40	0.37	0.40	0.39
	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)	32.55	12.66	7.96	12.87	5.78	2.29
ระยอง	ทุ่นสมุทรศาสตร์	0.46	0.34	0.34	0.32	0.35	0.38
	แบบจำลอง SWAN	0.40	0.37	0.41	0.38	0.41	0.41
	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)	12.84	11.28	18.04	19.24	19.13	9.24
เกาะสีชัง	ทุ่นสมุทรศาสตร์	0.20	0.16	0.15	0.14	0.16	0.19
	แบบจำลอง SWAN	0.17	0.18	0.19	0.17	0.18	0.19
	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)	14.01	15.73	28.85	26.07	15.23	0.86
หัวหิน	ทุ่นสมุทรศาสตร์	0.37	0.29	0.27	0.26	0.29	0.33
	แบบจำลอง SWAN	0.34	0.33	0.32	0.31	0.33	0.33
	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)	9.19	15.54	20.81	18.25	14.00	1.21
เกาะเต่า	ทุ่นสมุทรศาสตร์	0.69	0.46	0.45	0.41	0.44	0.50
	แบบจำลอง SWAN	0.53	0.47	0.50	0.48	0.50	0.49
	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)	23.20	0.54	11.80	17.53	12.58	1.74
นครศรีธรรมราช	ทุ่นสมุทรศาสตร์	0.61	0.45	0.42	0.39	0.42	0.48
	แบบจำลอง SWAN	0.48	0.43	0.43	0.42	0.43	0.45
	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)	21.87	3.60	0.93	7.93	2.80	5.64

เมื่อเปรียบเทียบกับทิศทางลมหลักในแต่ละเดือน พบว่าทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่มาในแต่ละเดือนแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ ทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางใต้ (SSE) และทิศใต้ (S) ในเดือนมกราคมถึงเมษายน, ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ในเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม และทิศตะวันออกเฉียงใต้ (NE) ในเดือนพฤศจิกายนและเดือนธันวาคม ดังแสดงในรูปที่ 4-15 เมื่อเปรียบเทียบทิศทางของคลื่นและลม พบว่าในเดือนกุมภาพันธ์, มีนาคม, พฤษภาคม, พฤศจิกายน และธันวาคมที่ทิศทาง

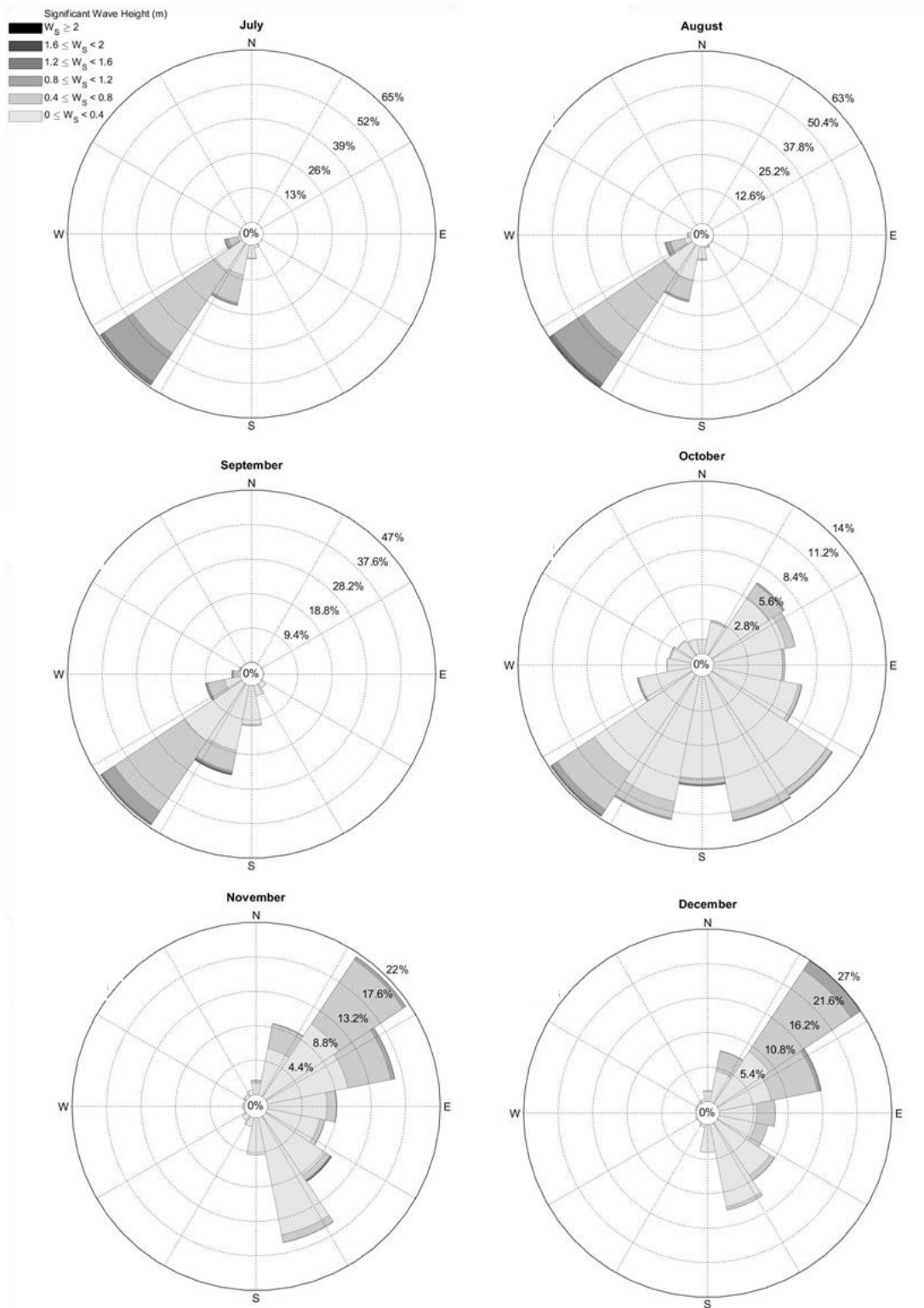
ของคลื่นและลมมีทิศทางเดียวกัน ส่วนในเดือนเมษายน และเดือนมิถุนายนถึงเดือนกันยายนทิศทางของคลื่นมีการเบี่ยงเบนต่างจากทิศทางลมเล็กน้อย ทั้งนี้จะพบว่าในเดือนมกราคมและเดือนตุลาคมทิศทางของคลื่นและลมแตกต่างกันมาก ดังแสดงในตารางที่ 4-8 โดยสอดคล้องกับช่วงฤดูลมมรสุมที่ในช่วงฤดูลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ในเดือนพฤษภาคมถึงเดือนกันยายน ทิศทางลมเคลื่อนที่มาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) และทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันตก (WSW) คลื่นที่ได้ก็เคลื่อนที่มาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) เช่นเดียวกัน ส่วนในฤดูลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือในช่วงเดือนตุลาคมถึงเดือนมกราคม ลมเคลื่อนที่มาจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) พบว่าคลื่นในเดือนพฤศจิกายนและเดือนธันวาคมเคลื่อนที่มาจากทิศเดียวกันกับทิศทางลม แต่ในเดือนตุลาคมและเดือนมกราคม พบว่าทิศทางของคลื่นไม่ได้มาจากทิศทางเดียวกับลม อาจเป็นเพราะความเร็วลมและระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ (fetch) ไม่มากพอทำให้พบคลื่นในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ถึงทิศตะวันออกเฉียงใต้ (SE) ซึ่งเป็นทิศทางที่มีระยะทางที่มากพอที่ทำให้คลื่นก่อตัวสูงขึ้นได้ และในเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายนเป็นช่วงฤดูเปลี่ยนลมมรสุม ทิศทางคลื่นหลักมาจากทางทิศใต้ (S) และทิศตะวันออกเฉียงใต้ค่อนไปทางใต้ (SSE) ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกันกับทิศทางที่ลมพัดมา ส่วนความสูงคลื่นนัยสำคัญในฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจะสูงประมาณ 0 – 0.4 เมตร และความสูงคลื่นนัยสำคัญสูงประมาณ 0.4 – 0.8 เมตร ในช่วงฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ สำหรับผลการคำนวณการแจกแจงความสูงคลื่นนัยสำคัญรวมและรายเดือน แสดงไว้ในภาคผนวก ค



รูปที่ 4-14 (ก) พังข้อมูลลม ERA-Interim และ (ข) พังข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN ที่ตำแหน่งน้ำมันรั่วไหลบริเวณชายฝั่งทะเลระยองตั้งแต่ปี พ.ศ.2540 - พ.ศ.2559



รูปที่ 4-15 ฝั่งข้อมูลคลื่นนัยสำคัญรายเดือนบริเวณชายฝั่งระยองในเดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม



รูปที่ 4-15 (ต่อ) ผังข้อมูลคลื่นนัยสำคัญรายเดือนบริเวณชายฝั่งระยองในเดือนมกราคมถึงเดือน ธันวาคม

ตารางที่ 4-8 ทิศทางและความสูงคลื่นนัยสำคัญรายชั่วโมงที่พบได้มากที่สุดจากแบบจำลอง SWAN ในแต่ละเดือน ตั้งแต่ปี พ.ศ.2540 - พ.ศ.2559

เดือน	ทิศทางลม	ทิศทางคลื่น	ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (เมตร)
มกราคม	NE	SSE	0 – 0.4
กุมภาพันธ์	S	SSE และ S	0 – 0.4
มีนาคม	S	S	0 – 0.4
เมษายน	S	SSE	0 – 0.4
พฤษภาคม	SW	SW	0.4 – 0.8
มิถุนายน	WSW	SW	0.4 – 0.8
กรกฎาคม	WSW	SW	0.4 – 0.8
สิงหาคม	WSW	SW	0.4 – 0.8
กันยายน	WSW	SW	0.4 – 0.8
ตุลาคม	NE	SW ถึง SE	0 – 0.4
พฤศจิกายน	NE	NE และ SSE	0 – 0.4
ธันวาคม	NE	NE	0.4 – 0.8

4.2 การจำลองกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลง

ในส่วนนี้จะเป็นการจำลองกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงอย่างเดียว ซึ่งยังไม่ได้รวมอิทธิพลของคลื่นลมเข้าไป สำหรับกระแสน้ำสุทธิที่รวมอิทธิพลของทั้งน้ำขึ้นน้ำลงและคลื่นลมจะกล่าวในหัวข้อ 4.3 โดยในการจำลองกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงด้วยแบบจำลอง Delft3D ข้อมูลที่สำคัญคือข้อมูลองค์ประกอบฮาร์โมนิกของน้ำขึ้นน้ำลง เนื่องจากแรงที่ทำให้เกิดน้ำขึ้นน้ำลงเป็นผลรวมอย่างซับซ้อนขององค์ประกอบฮาร์โมนิกของน้ำขึ้นน้ำลง ดังนั้นในการส่วนนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์องค์ประกอบฮาร์โมนิกของน้ำขึ้นน้ำลง การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง Delft3D การสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลองกับข้อมูลระดับน้ำทำนายซึ่งเป็นข้อมูลระดับน้ำที่เกิดจากน้ำขึ้นน้ำลงเพียงอย่างเดียว โดยการสอบเทียบและการตรวจสอบแบบจำลองใช้ข้อมูลระดับน้ำทำนาย และทำการวิเคราะห์กระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D

สำหรับข้อมูลการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบริเวณขอบเขตของแบบจำลอง (boundary condition) ได้จากการคำนวณองค์ประกอบฮาร์โมนิกของน้ำขึ้นน้ำลง ทั้งนี้ข้อมูลองค์ประกอบฮาร์โมนิกของน้ำขึ้นน้ำลงของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือเป็นข้อมูลที่ไม่ได้มีการเผยแพร่ ดังนั้นจึงประยุกต์

มาจากการวิเคราะห์ข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ด้วยวิธีฮาร์โมนิก (harmonic analysis) แทน โดยใช้ข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ที่สถานีเกาะสมุย และแหลมงอบ ปี พ.ศ.2556 – พ.ศ.2558 เนื่องจากเป็นสถานีทำนายระดับน้ำที่ตั้งอยู่ปลายของเส้นขอบเขตของแบบจำลอง เพื่อคำนวณองค์ประกอบฮาร์โมนิกของน้ำขึ้นน้ำลง พบว่าทั้งสองสถานีมีค่าแอมพลิจูด (amplitude) ขององค์ประกอบ K1 มีค่าสูงสุด รองลงมาคือ O1 และ M2 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-9 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา (นริสรา นุธรรมโชติ, 2546, ญัฐริตา จันทศิริ, 2557) และเมื่อเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ด้วยวิธี harmonic analysis โดยใช้ข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ในปี พ.ศ.2556 - พ.ศ.2558 พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญของค่าแอมพลิจูดขององค์ประกอบฮาร์โมนิกของน้ำขึ้นน้ำลงมากนัก ดังแสดงในตารางที่ 4-10

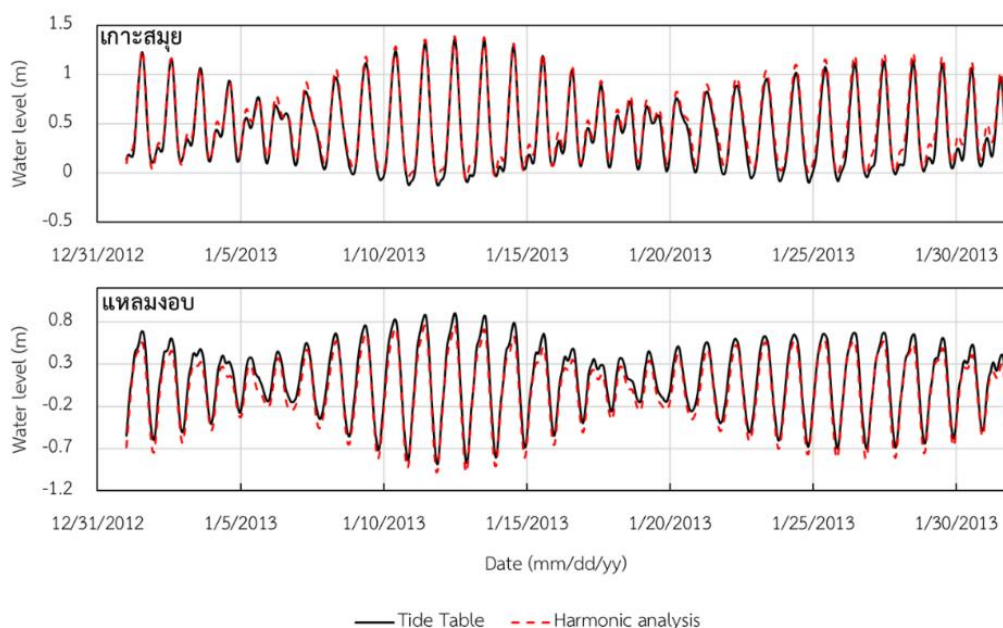
ตารางที่ 4-9 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบฮาร์โมนิกของน้ำขึ้นน้ำลงด้วยวิธี harmonic analysis จากข้อมูลระดับน้ำทำนายที่สถานีเกาะสมุย และแหลมงอบ ในปี พ.ศ.2557

องค์ประกอบ ฮาร์โมนิกของ น้ำขึ้นน้ำลง	สถานีเกาะสมุย				สถานีแหลมงอบ			
	A_i (cm)	G_i (deg)	V_0+u (deg)	F	A_i (cm)	G_i (deg)	V_0+u (deg)	F
M2	16.2	310.9	211.8	1.0	10.9	31.6	211.8	1.0
S2	8.6	31.1	330.0	1.0	6.1	87.6	330.0	1.0
N2	2.7	269.9	5.1	1.0	2	6	5.1	1.0
K2	3.4	27.4	178.7	0.8	1.8	70.1	178.7	0.8
K1	36.5	176.7	359.7	0.9	44.8	152.3	359.7	0.9
O1	25.6	126.3	209.7	0.8	30.7	103.9	209.7	0.8
P1	5	170.8	334.6	1.0	12.8	150.9	334.6	1.0
Q1	0.8	105.4	3.1	0.8	5.7	82.1	3.1	0.8
M4	0.8	323.4	63.5	1.1	1.1	309	63.5	1.1
MS4	0.8	18	181.8	1.0	1.2	357	181.8	1.0
MN4	0.3	280	216.9	1.1	0.5	267.2	216.9	1.1
MF	1.3	9.9	332.3	0.7	0.7	13.1	332.3	0.7
MM	0.8	7.1	206.6	1.1	1.3	39.8	206.6	1.1

ตารางที่ 4-10 ค่าแอมพลิจูดที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบฮาร์โมนิกของน้ำขึ้นน้ำลงด้วยวิธี harmonic analysis จากข้อมูลระดับน้ำทำนายนที่สถานีเกาะสมุย และแหลมงอบในปี พ.ศ.2556 - พ.ศ.2558

องค์ประกอบฮาร์โมนิก ของน้ำขึ้นน้ำลง	สถานีเกาะสมุย			สถานีแหลมงอบ		
	2556	2557	2558	2556	2557	2558
M2	16.2	16.2	16.2	10.9	10.9	10.9
S2	8.6	8.6	8.6	6.1	6.1	6.1
N2	2.8	2.7	2.8	2	2	2.1
K2	3.3	3.4	3.4	1.8	1.8	1.8
K1	36.4	36.5	36.4	44.7	44.8	44.7
O1	25.5	25.6	25.6	30.6	30.7	30.7
P1	11.4	11.4	11.3	12.7	12.8	12.7
Q1	4.9	5	5.3	5.6	5.7	5.9
M4	0.8	0.8	0.8	1.1	1.1	1.1
MS4	0.8	0.8	0.8	1.2	1.2	1.2
MN4	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5
MF	1.5	1.3	0.3	1	0.7	0.3
MM	0.1	0.8	0.8	0.8	1.3	0.9

เมื่อนำข้อมูลองค์ประกอบฮาร์โมนิกของน้ำขึ้นน้ำลงทั้ง 13 องค์ประกอบที่ได้มาทำการคำนวณค่าระดับน้ำและเปรียบเทียบกับข้อมูลระดับน้ำทำนายเดิม พบว่าระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณจากค่าองค์ประกอบฮาร์โมนิกของน้ำขึ้นน้ำลงใกล้เคียงกับข้อมูลระดับน้ำทำนาย ดังแสดงในรูปที่ 4-16 แต่ทั้งนี้พบว่ายังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างโดยที่สถานีเกาะสมุย และแหลมงอบมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) 0.24 และ 0.14 เมตร ตามลำดับ หรือคิดเป็น 16% และ 10% จากพิสัยน้ำสูงสุดตามลำดับ ทั้งนี้จากรูปที่ 4-16 จะเห็นได้ว่าที่สถานีแหลมงอบระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณมีการยกกระดืบ (shift) ของระดับน้ำ และระดับน้ำขึ้นสูงสุดในช่วงน้ำตายต่ำกว่าข้อมูลระดับน้ำทำนาย ดังนั้นผลของความคลาดเคลื่อนนี้อาจส่งผลกระทบต่อการใช้งานในรูปแบบต่างๆ ในการศึกษาต่อไป



รูปที่ 4-16 การเปรียบเทียบระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณจากองค์ประกอบฮาร์โมนิกของน้ำขึ้นน้ำลง และข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ในเดือนมกราคม พ.ศ.2556

4.2.1 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis)

สำหรับพารามิเตอร์ทางกายภาพในแบบจำลอง Delft3D มี 2 ตัวแปรคือสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (roughness coefficient) และค่าความหนืดของความปั่นป่วน (eddy viscosity) ทำวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ทางกายภาพทั้งสองตัวแปรเพื่อศึกษาว่าพารามิเตอร์ทางกายภาพทั้งสองตัวแปรนั้นมีผลต่อการจำลองกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงในอ่าวไทยหรือไม่ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาตำแหน่งที่ตั้งของสถานีระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ พบว่ามีอยู่ 3 สถานีจาก 8 สถานี ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 เป็นสถานีที่ตั้งอยู่ในแม่น้ำ คือ สถานีระยอง, ท่าจีน และ ชุมพร ดังแสดงในรูปที่ 4-17 ซึ่งขอบเขตของการศึกษานี้ไม่ได้พิจารณาอิทธิพลของน้ำที่ไหลจากแม่น้ำ จึงไม่ได้จำลองในพื้นที่ปากแม่น้ำที่เข้าไปในตัวแม่น้ำ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จะไม่นำสถานีทั้ง 3 สถานีดังกล่าวมาพิจารณาในการศึกษาด้วยแบบจำลอง Delft3D

จากการทดสอบความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ทางกายภาพในแบบจำลองระหว่างวันที่ 1 – 31 มกราคม พ.ศ.2557 โดยเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ n ของ Manning (Manning's n) ตั้งแต่ 0.01 – 0.06 วินาที/เมตร^{1/3} เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) ของทางน้ำที่เป็นดิน มีค่าประมาณ 0.02 วินาที/เมตร^{1/3} (Chow, 1959) และค่าความหนืดของความปั่นป่วน (eddy viscosity) ตั้งแต่ 0 – 10 เมตร²/วินาที ซึ่งค่าความหนืดของความปั่นป่วนโดย

ปกติแล้วจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและขนาดของกริดที่ใช้ในการจำลอง โดยมีค่าอยู่ประมาณ 10 เมตร²/วินาที (Deltares, 2014) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระมีผลต่อระดับน้ำ แต่ค่าความหนืดของความปั่นป่วนไม่มีผลต่อระดับน้ำ เนื่องจากเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) ระหว่างข้อมูลระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายมีการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของความปั่นป่วนพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในตารางที่ 4-11 แสดงว่าในการจำลองกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงในอ่าวไทยค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในอ่าวไทยมากกว่าค่าความหนืดของความปั่นป่วน



รูปที่ 4-17 ที่ตั้งของสถานีระดับน้ำทำนาย ก) สถานีระยอง ข) สถานีท่าจีน และ ค) สถานีชุมพร ของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ

4.2.2 การสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง Delft3D

ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) นั้นขึ้นอยู่กับหลายอิทธิพล ไม่ว่าจะเป็นวัชพืชกอนท้องน้ำ, พืชที่ปกคลุม, การกัดเซาะหรือตกตะกอน, สิ่งกีดขวาง, ความลึกน้ำ หรือการแปรผันตามฤดูกาล เป็นต้น (Chow, 1959) โดยปกติแล้วในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) ที่เหมาะสม ควรจะทำการวิเคราะห์จากการกระจายความเร็วบนหน้าตัดการไหล และจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองวัดค่าความเร็วและความขรุขระในพื้นที่ศึกษาหรือห้องปฏิบัติการ แต่ในการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้ทำการสำรวจชลศาสตร์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ

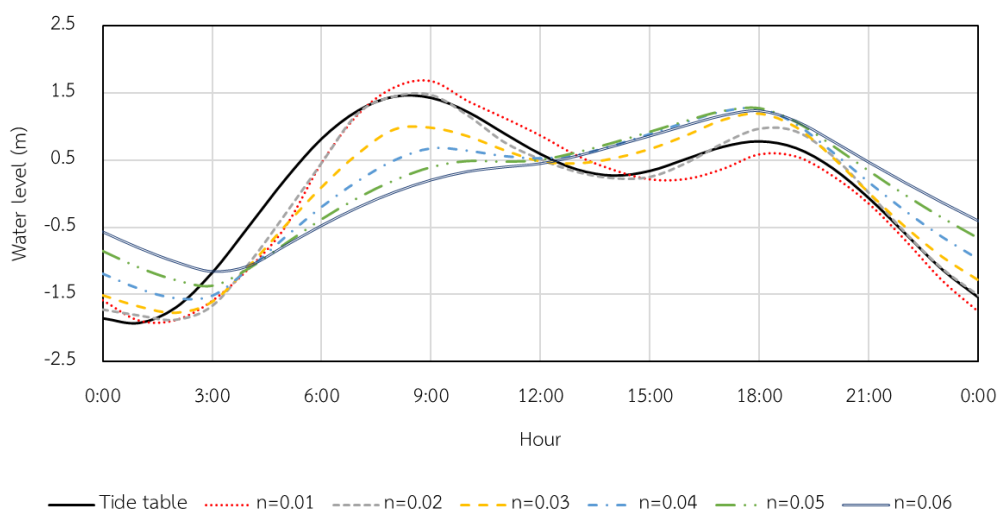
ของแมนนิง (Manning's n) ที่เหมาะสมกับพื้นที่จริงเนื่องจากข้อจำกัดด้านเวลาและงบประมาณในการศึกษา อีกทั้งการศึกษาที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) ของพื้นที่ท้องทะเลอ่าวไทยโดยการวัดจากพื้นที่จริงหรือทำให้ห้องปฏิบัติการ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้วิธีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) ในแบบจำลองให้มีค่าระดับน้ำใกล้เคียงกับค่าระดับน้ำของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ และตรวจสอบกับสภาพวัสดุท้องน้ำจริงในอ่าวไทยเพื่อหาช่วงของค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) ที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้แบบจำลองต่อไป

ตารางที่ 4-11 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ทางกายภาพ โดยเปรียบเทียบข้อมูลระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ

สัมประสิทธิ์ความขรุขระ (s/m ^{1/3})	ค่าความหนืดของความปั่นป่วน (m ² /s)	ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (เมตร)				
		อ่าวสัดทีบ	เกาะสีชัง	สันดอนเจ้าพระยา	หัวหิน	เกาะหลัก
0.01	5	0.162	0.273	0.300	0.206	0.146
0.02	5	0.128	0.186	0.203	0.155	0.141
0.03	5	0.149	0.213	0.225	0.141	0.164
0.04	5	0.172	0.289	0.314	0.217	0.182
0.05	5	0.191	0.364	0.403	0.259	0.190
0.06	5	0.211	0.422	0.472	0.298	0.192
0.03	1	0.149	0.213	0.225	0.141	0.164
0.03	5	0.149	0.213	0.225	0.141	0.164
0.03	10	0.149	0.213	0.225	0.141	0.164

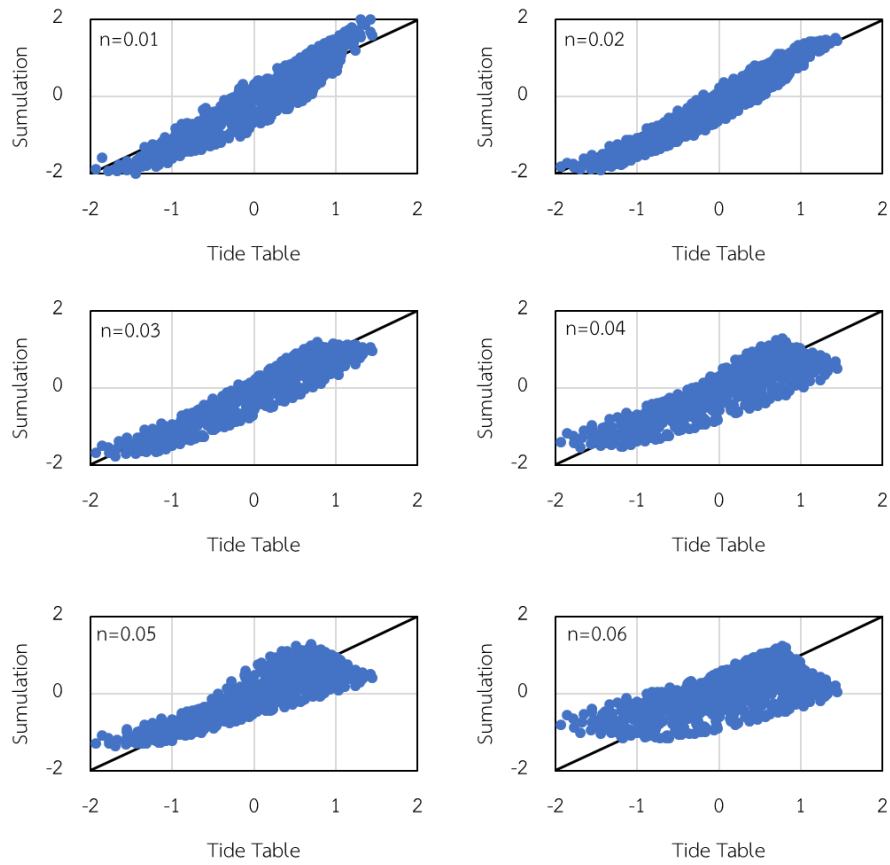
ปกติแล้วในการปรับเทียบแบบจำลองควรทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด แต่การศึกษาในครั้งนี้ไม่ได้ทำการเก็บข้อมูลระดับน้ำ อีกทั้งไม่มีหน่วยงานใดเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำได้รับอิทธิพลจากน้ำขึ้นน้ำลงเพียงอย่างเดียว เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดเป็นข้อมูลที่รวมอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงและคลื่นลมไว้ ดังนั้นในส่วนของการปรับเทียบแบบจำลองกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงในการศึกษานี้จึงใช้ข้อมูลระดับน้ำทำนายที่สถานีของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ จำนวน 5 สถานี มาใช้ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง ทำการเปรียบเทียบระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D รายชั่วโมง เมื่อกำหนดค่า

สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) ตั้งแต่ 0.01 – 0.06 กับข้อมูลระดับน้ำทำนาย พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) ที่เหมาะสมอยู่ช่วง 0.02 ดังแสดงในรูปที่ 4-18 และรูปที่ 4-19 ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) ของทางน้ำที่เป็นดิน ซึ่งมีค่าประมาณ 0.02 (Chow, 1959) และเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) ที่เหมาะสม

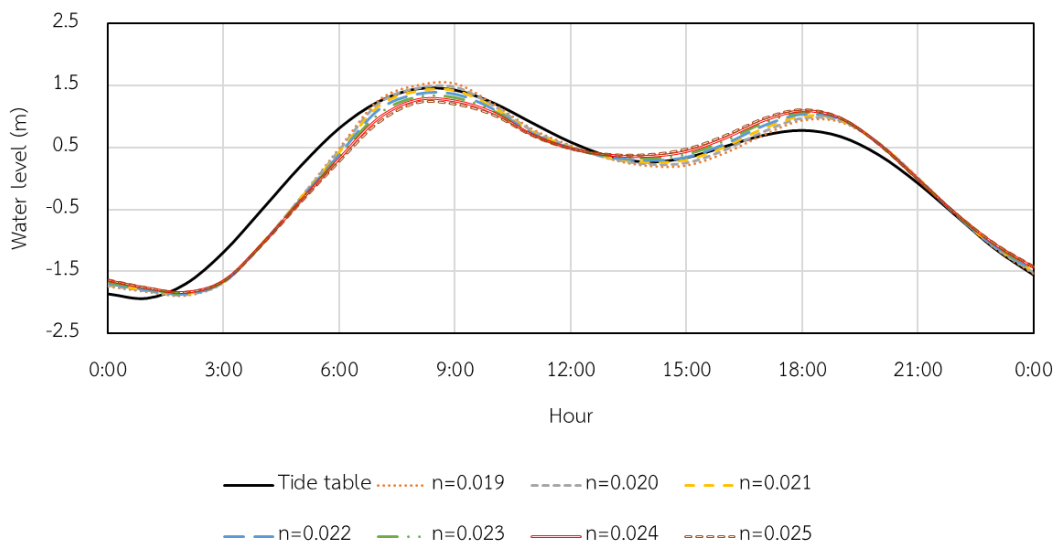


รูปที่ 4-18 ระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายที่สถานีสันดอนเจ้าพระยา

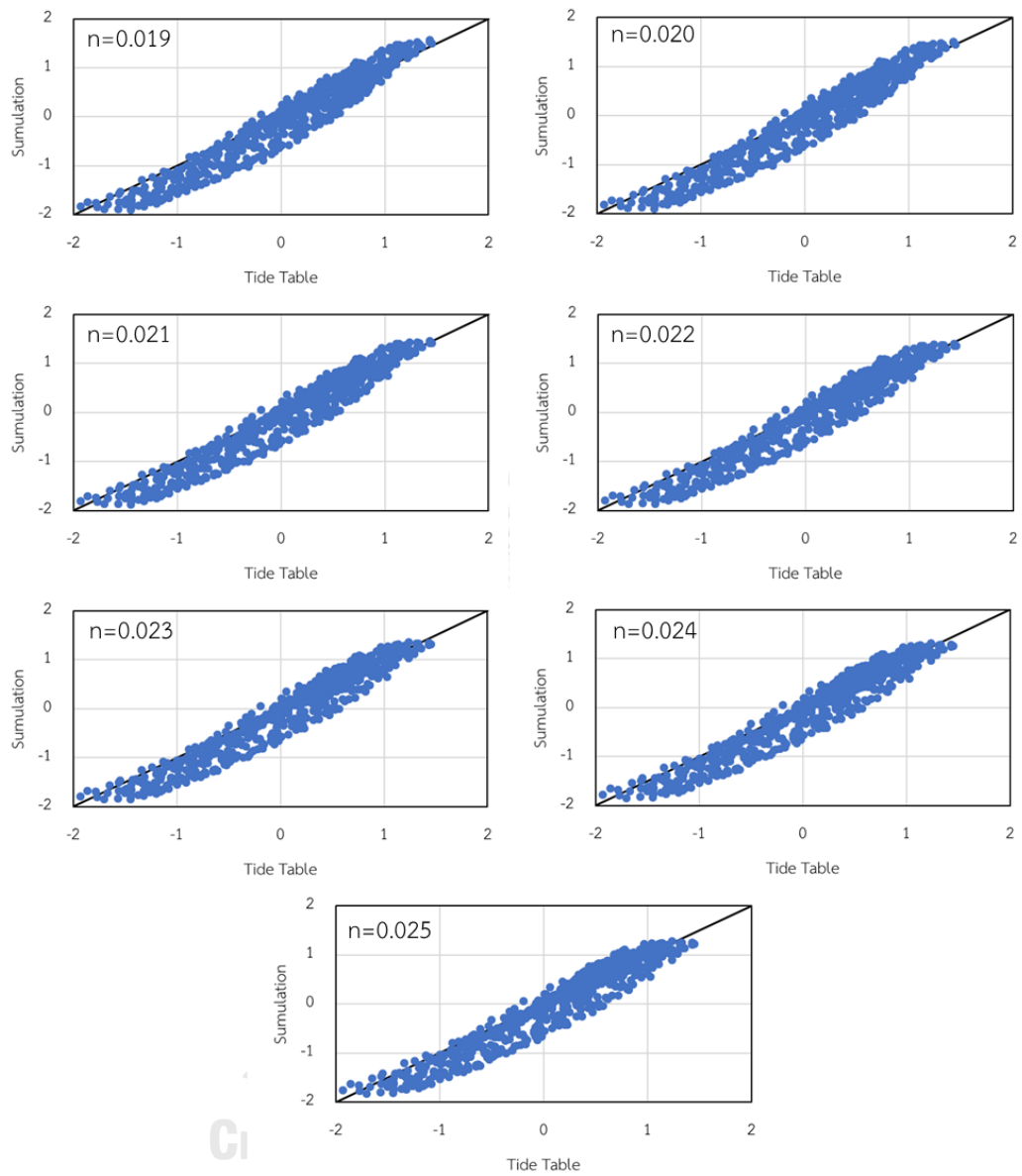
ทำการจำลองระดับน้ำโดยเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) ตั้งแต่ 0.015 – 0.030 โดยในช่วงการสอบเทียบแบบจำลอง (calibration) ระหว่างวันที่ 1 – 31 มกราคม พ.ศ.2557 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D และข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ในช่วงค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) 0.019 – 0.025 พบว่าค่าระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ไม่แตกต่างกัน โดยมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4-20 และรูปที่ 4-21 ทั้งนี้จะพบว่าไม่มีความแตกต่างมากนักระหว่างการจำลองระดับน้ำด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) ที่แตกต่างกันซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.94 เท่ากันทุกกรณี เช่นเดียวกันค่าความเร็วเฉลี่ยทั้งความลึกน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D ที่พบว่าไม่มีความแตกต่างกันมากนัก โดยมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4-22



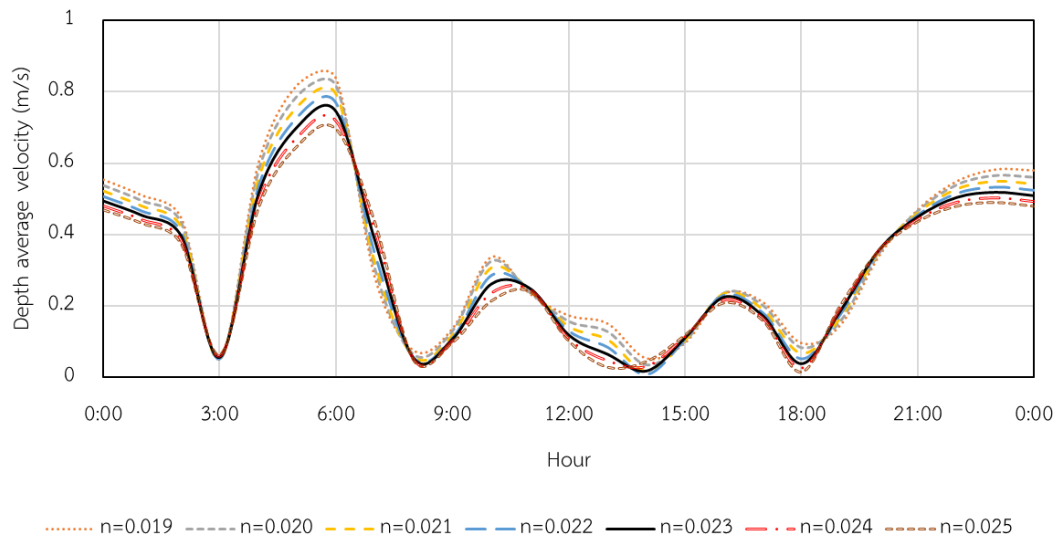
รูปที่ 4-19 ผังการกระจายระหว่างข้อมูลระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D และกับข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ที่สถานีสำนดอนเจ้าพระยาในเดือนมกราคม พ.ศ.2557



รูปที่ 4-20 ระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายที่สถานีสำนดอนเจ้าพระยา



รูปที่ 4-21 ผังการกระจายระหว่างข้อมูลระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D และกับข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ที่สถานีสันดอนเจ้าพระยาในเดือนมกราคม พ.ศ.2557



รูปที่ 4-22 ความเร็วเฉลี่ยทั้งความลึกที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D ที่สถานีสันดอนเจ้าพระยา

สำหรับค่าระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D ที่ระดับน้ำไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) เปลี่ยนแปลงไป มีข้อสังเกตว่าในแบบจำลอง Delft3D ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) เป็นตัวแปรหนึ่งในการคำนวณความเค้นเฉือน (shear stress) ดังแสดงในสมการที่ 4-1 และสมการที่ 4-2

$$\vec{\tau}_b = \frac{\rho g \bar{U} |U|}{C_d^2} \quad (4-1)$$

$$C_d = \frac{\sqrt{h}}{n} \quad (4-2)$$

เมื่อ τ_b คือความเค้นเฉือนที่พื้นท้องน้ำ, ρ คือความหนาแน่นของน้ำ, \bar{U} คือขนาดของความเร็วจเฉลี่ยทั้งความลึกน้ำ, C_d คือสัมประสิทธิ์แรงต้าน, h คือความลึกน้ำ และ n คือสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n)

โดยพจน์ของความลึกน้ำ (h) และความเร็วจเฉลี่ยทั้งความลึกน้ำ (\bar{U}) นั้นเป็นตัวแปรตามที่เป็นผลลัพธ์ของการแก้สมการในแบบจำลอง Delft3D โดยตัวแปรความลึกน้ำ (h) และความเร็วจเฉลี่ยทั้งความลึกน้ำ (\bar{U}) นี้ขึ้นอยู่กับหลายเทอมและหลายสมการ เช่น สมการโมเมนตัมในแนวระนาบ ซึ่งมีพจน์ของระดับน้ำอยู่ในเทอมของการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามความลึก ($\frac{\omega}{h} \frac{\partial U}{\partial \sigma}$), เทอมของ Reynold's stresses (F_x และ F_y) หรือเทอมของการแพร่ ($\frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (\mathbf{V}_V \frac{\partial u}{\partial \sigma})$) ดังแสดงในสมการที่ 4-3

และสมการที่ 4-4 ในส่วนของสมการความต่อเนื่องก็มีพจน์ของระดับน้ำอยู่เช่นกัน ดังแสดงในสมการที่ 4-5 หรืออยู่ในสมการการขนส่ง ดังแสดงในสมการที่ 4-6

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\omega}{h} \frac{\partial U}{\partial \sigma} - fV = -\frac{1}{\rho} P_x + F_x + M_x + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\mathbf{v}_V \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) \quad (4-3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\omega}{h} \frac{\partial V}{\partial \sigma} - fU = -\frac{1}{\rho} P_y + F_y + M_y + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\mathbf{v}_V \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) \quad (4-4)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [h\bar{U}]}{\partial x} + \frac{\partial [h\bar{V}]}{\partial y} = S \quad (4-5)$$

$$\frac{\partial [hc]}{\partial t} + \frac{\partial [hUc]}{\partial x} + \frac{\partial [hVc]}{\partial y} + \frac{\partial [\omega c]}{\partial \sigma} = h \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_H \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_H \frac{\partial c}{\partial y} \right) \right] + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) + hS \quad (4-6)$$

เมื่อ U และ V คือความเร็วเฉลี่ยทั้งความลึก, ω คือ ความเร็วในแนวตั้ง, h คือความลึกน้ำ, f คือแรงโคริโอลิส, ρ คือความหนาแน่นของน้ำ, P คือความดันในแนวระนาบ, F คือ Reynold's stresses ในแนวระนาบ, M คือ external source/sink ของโมเมนตัม, \mathbf{v}_V คือความหนืดในแนวตั้ง, ζ คือระดับผิวน้ำเหนือระดับน้ำนิ่ง, S คือคุณสมบัติทางกายภาพใดๆ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ และ D คือค่าการแพร่ (diffusivity)

ทั้งนี้ในการคำนวณเมื่อเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อตรงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าระดับน้ำเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลของน้ำอีกด้วย ซึ่งส่งผลให้เมื่อเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) ระดับน้ำจึงไม่ได้เปลี่ยนแปลงแบบสัดส่วนคงที่

สำหรับในการแก้ระบบสมการอนุพันธ์นาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes) ที่ประกอบด้วยพจน์เชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสอง ที่ต้องประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสลับเนื่อง (finite difference method) เนื่องจากมีเทอมของการแพร่ที่เป็นพจน์แบบไม่เชิงเส้น จึงส่งผลให้การแก้ระบบสมการชุดนี้เป็นไปได้โดยลำบากมากยิ่งขึ้น โดยขั้นตอนในการคำนวณจำเป็นต้องประยุกต์ระเบียบวิธีการทำซ้ำ (iteration method) มาใช้ในการแก้สมการซึ่งผลของการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) ในแบบจำลอง Delft3D ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในรายละเอียดในการศึกษาต่อไป

จากการสอบเทียบแบบจำลอง (calibration) ในช่วงค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) 0.019 – 0.025 ซึ่งพบว่าค่าระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับ

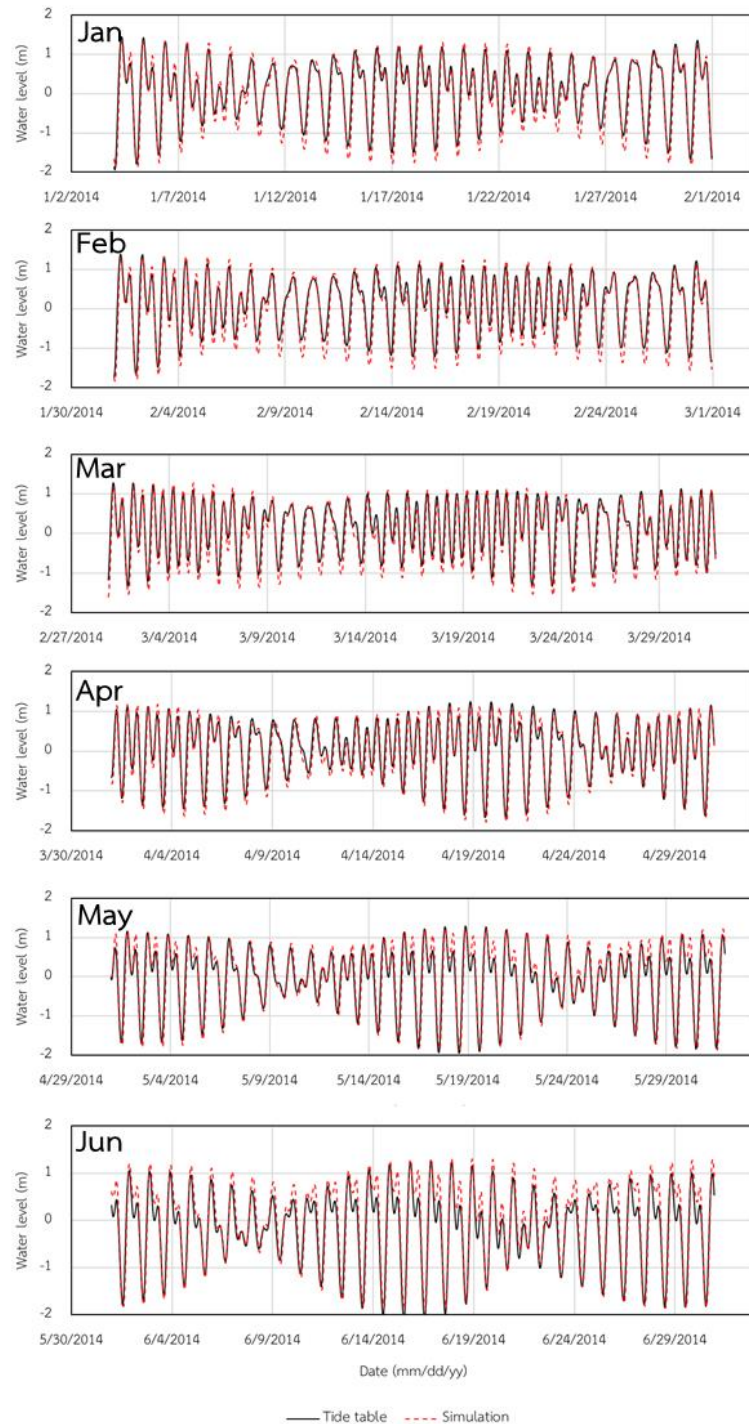
น้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ไม่แตกต่างกัน แต่ด้วยข้อจำกัดของแบบจำลอง Delft3D ที่ใส่ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) ได้เพียงค่าเดียว จึงประยุกต์ใช้ค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) ในการเปรียบเทียบความแตกต่างของระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลระดับน้ำทำนาย พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) ที่เหมาะสมประมาณ 0.020 – 0.023 ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์น้อยที่สุด ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) ที่เหมาะสมในแต่ละสถานีมีความแตกต่างกันบ้าง ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) เท่ากับ 0.022 ในแบบจำลอง Delft3D ในการจำลองกระแสน้ำต่อไป เนื่องจากเป็นค่าที่เหมาะสมในแต่ละสถานีเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (เมตร) ระหว่างระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนาย ในเดือนมกราคม พ.ศ.2557

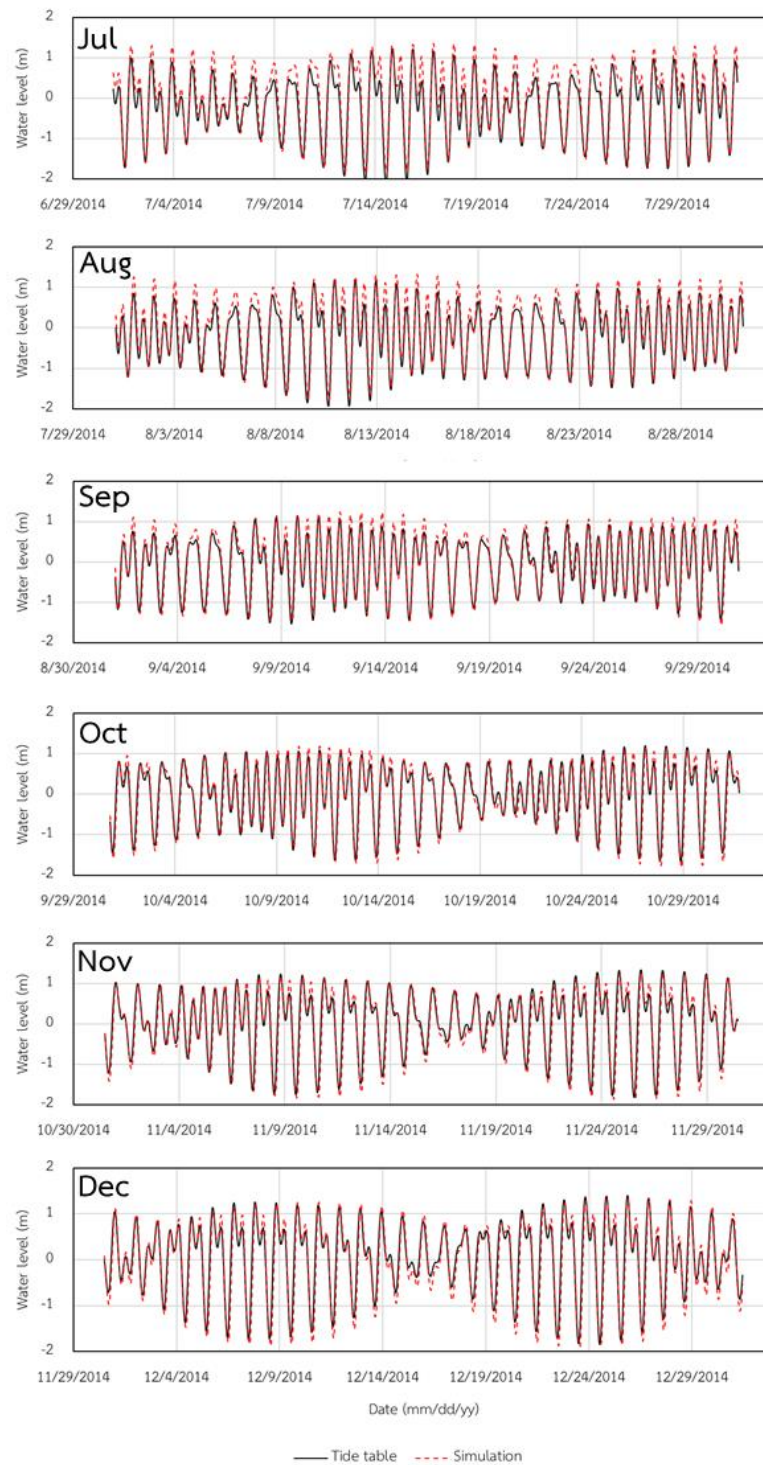
สถานี	ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (เมตร)							
	Manning's n	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	0.025
อ่าวสัดหีบ		0.129	0.128	0.128	0.129	0.130	0.132	0.135
เกาะสีซัง		0.191	0.186	0.183	0.181	0.181	0.183	0.186
สันดอนเจ้าพระยา		0.209	0.203	0.198	0.196	0.196	0.197	0.200
หัวหิน		0.157	0.155	0.154	0.154	0.156	0.158	0.160
เกาะหลัก		0.140	0.141	0.143	0.145	0.147	0.150	0.152

ในการตรวจสอบแบบจำลอง (validation) ได้ทำการจำลองระดับน้ำตั้งแต่ปี พ.ศ.2549 - พ.ศ.2557 เมื่อทำการเปรียบเทียบระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ดังแสดงตัวอย่างของสถานีสันดอนเจ้าพระยาในรูปที่ 4-23 พบว่าแบบจำลอง Delft3D ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) ของระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ อยู่ประมาณ 0.10 – 0.25 เมตร หรือประมาณ 10 – 20% ของค่าพิสัยน้ำเฉลี่ย ดังแสดงในตารางที่ 4-13 และมีข้อสังเกตว่าในปี พ.ศ.2557 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) ที่ได้จากการเปรียบเทียบข้อมูลระดับน้ำที่ได้แบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) น้อยลงในทุกสถานี ซึ่งอาจเป็นเพราะมีการ

ปรับปรุงและพัฒนาการคำนวณข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น



รูปที่ 4-23 การเปรียบเทียบระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายที่สถานี
สันดอนเจ้าพระยา ในปี พ.ศ.2557



รูปที่ 4-23 (ต่อ) การเปรียบเทียบระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายที่

สถานีสันดอนเจ้าพระยา ในปี พ.ศ.2557

ตารางที่ 4-13 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (เมตร) ระหว่างระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายนายตั้งแต่ปี พ.ศ.2549 - พ.ศ.2557

สถานี	ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (เมตร)									
	ปี (พ.ศ.)	2549	2550	2551	2552	2553	2554	2555	2556	2557
อ่าวสัตหีบ		0.17	0.17	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.15	0.09
เกาะสีซัง		0.26	0.26	0.25	0.25	0.24	0.24	0.22	0.23	0.17
สันดอนเจ้าพระยา		0.23	0.23	0.23	0.22	0.21	0.21	0.18	0.20	0.18
หัวหิน		0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19	0.18	0.18	0.13
เกาะหลัก		0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.11

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสิ้นใจ (R^2) ระหว่างระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ พบว่าแบบจำลอง Delft3D สามารถจำลองระดับน้ำได้สอดคล้องกับข้อมูลระดับน้ำทำนายนาย โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสิ้นใจในช่วง 0.7 - 0.9 ดังแสดงในตารางที่ 4-14 และเมื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองโดยใช้ค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) มีค่า NSE ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.8 - 0.9 ดังแสดงในตารางที่ 4-15 แสดงว่าแบบจำลอง Delft3D มีการจำลองระดับน้ำได้แม่นยำดี (Yuri et al., 1999) สามารถประยุกต์ใช้แบบจำลองในการศึกษาต่อไป ทั้งนี้เกณฑ์ของค่า NSE ที่ใช้บอกถึงความแม่นยำของแบบจำลองนั้น เป็นเพียงแนวทางหนึ่งที่ใช้ประกอบการตัดสิ้นใจเท่านั้น เนื่องจากเกณฑ์ดังกล่าวอาจเปลี่ยนแปลงไปตามความเหมาะสมของข้อมูลที่ใช้ หรือพื้นที่ศึกษาได้

ตารางที่ 4-14 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสิ้นใจ (R^2) ระหว่างระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายนายตั้งแต่ปี พ.ศ.2549 - พ.ศ.2557

สถานี	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสิ้นใจ (R^2)									
	ปี (พ.ศ.)	2549	2550	2551	2552	2553	2554	2555	2556	2557
อ่าวสัตหีบ		0.77	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.69	0.77
เกาะสีซัง		0.87	0.88	0.88	0.87	0.87	0.87	0.87	0.86	0.87
สันดอนเจ้าพระยา		0.85	0.85	0.85	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81	0.85
หัวหิน		0.87	0.87	0.87	0.87	0.88	0.88	0.89	0.88	0.87
เกาะหลัก		0.92	0.92	0.92	0.92	0.91	0.91	0.91	0.90	0.92

ตารางที่ 4-15 ค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) ระหว่างระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายนายตั้งแต่ปี พ.ศ.2549 - พ.ศ.2557

สถานี	ค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)									
	ปี (พ.ศ.)	2549	2550	2551	2552	2553	2554	2555	2556	2557
อ่าวสัทธิบ		0.93	0.93	0.92	0.93	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
เกาะสีซัง		0.89	0.90	0.89	0.88	0.89	0.90	0.91	0.88	0.88
สันดอนเจ้าพระยา		0.89	0.89	0.88	0.88	0.88	0.89	0.90	0.87	0.88
หัวหิน		0.91	0.91	0.90	0.91	0.91	0.91	0.91	0.90	0.91
เกาะหลัก		0.90	0.90	0.89	0.88	0.88	0.88	0.86	0.85	0.85

เมื่อพิจารณาค่าความเบี่ยงเบนเฉลี่ย (bias) ระหว่างระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายนาย พบว่าค่าความเบี่ยงเบนเฉลี่ย ส่วนใหญ่อยู่ประมาณ 0 – 0.12 เมตร ที่แสดงให้เห็นว่าค่าระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D มีค่ามากกว่าระดับน้ำทำนายนาย ดังแสดงในตารางที่ 4-16 ซึ่งแสดงว่าแบบจำลอง Delft3D ส่วนใหญ่จะจำลองระดับน้ำจากน้ำขึ้นน้ำลงได้สูงกว่าข้อมูลระดับน้ำทำนายนาย

ตารางที่ 4-16 ค่าความเบี่ยงเบนเฉลี่ย (เมตร) ระหว่างระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายนายตั้งแต่ปี พ.ศ.2549 - พ.ศ.2557

สถานี	ค่าความเบี่ยงเบนเฉลี่ย (เมตร)									
	ปี (พ.ศ.)	2549	2550	2551	2552	2553	2554	2555	2556	2557
อ่าวสัทธิบ		0.07	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07
เกาะสีซัง		0.12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10
สันดอนเจ้าพระยา		0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
หัวหิน		0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
เกาะหลัก		0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05

เมื่อเปรียบเทียบค่าพิสัยน้ำทั้งในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย พบว่าที่สถานีอ่าวสัทธิบและหัวหิน เป็นสถานีที่ค่าพิสัยน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D ใกล้เคียงกับข้อมูลระดับน้ำทำนายนายทั้งในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย ซึ่งมีความแตกต่างประมาณ 5% ส่วนสถานีสันดอนเจ้าพระยาและเกาะหลัก แบบจำลอง Delft3D จำลองพิสัยน้ำใกล้เคียงกับข้อมูลระดับน้ำทำนายนายเฉพาะในช่วงน้ำเกิดเท่านั้น

โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 5% ส่วนในช่วงน้ำตาย มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 20 – 40% และสถานีเกาะสีชังแบบจำลอง Delft3D จำลองพิสัยน้ำแตกต่างกับข้อมูลระดับน้ำทำนายทั้งในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 20% ดังแสดงในตารางที่ 4-17 โดยมีข้อสังเกตว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นน่าจะมีสาเหตุมาจากตำแหน่งที่ตั้งที่อยู่ใกล้ชายฝั่ง ดังนั้นการใช้แบบจำลอง Delft3D ให้ผลดีในทะเลแต่มีข้อจำกัดในการคำนวณผลบริเวณใกล้ชายฝั่ง

ตารางที่ 4-17 ค่าพิสัยน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย

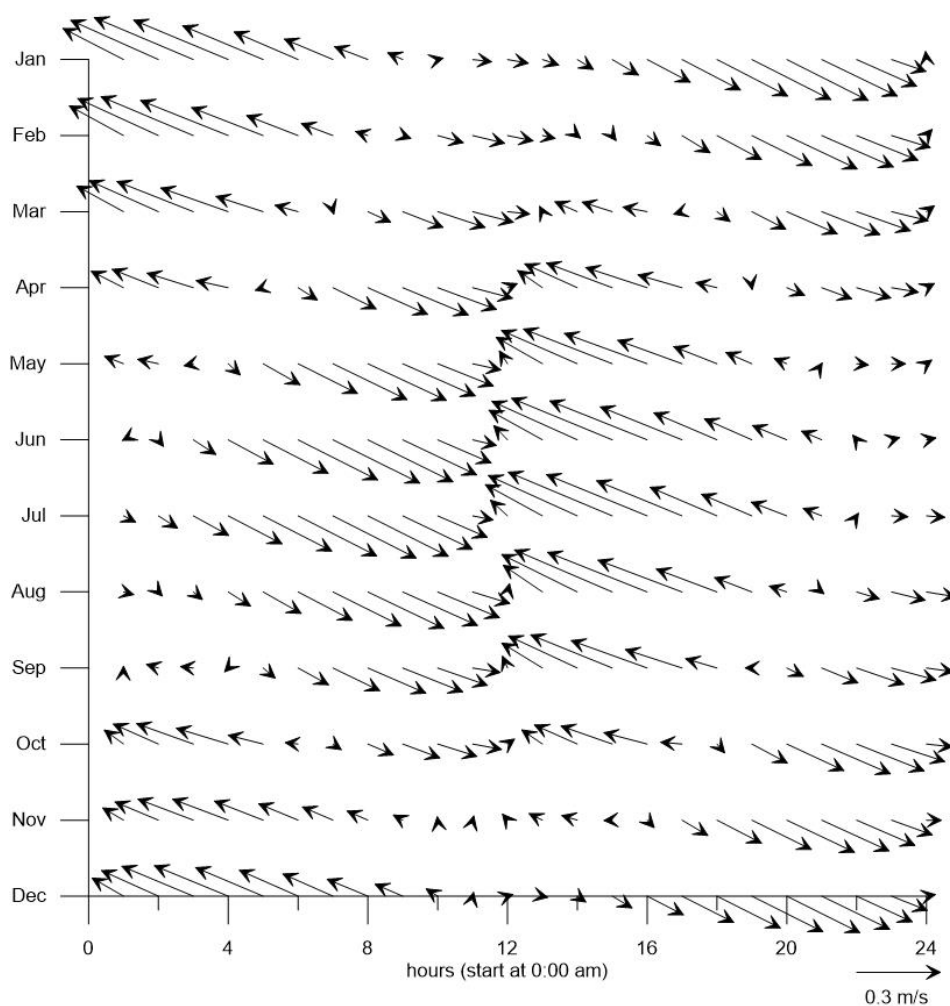
สถานี	พิสัยน้ำเกิด (เมตร)			พิสัยน้ำตาย (เมตร)		
	ระดับน้ำทำนาย	แบบจำลอง Delft3D	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)	ระดับน้ำทำนาย	แบบจำลอง Delft3D	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
อ่าวสัตหีบ	2.16	2.25	4.52	0.92	0.97	7.03
เกาะสีชัง	2.90	2.40	16.50	1.36	1.66	22.28
สันดอนเจ้าพระยา	3.13	3.02	4.91	1.47	1.80	22.61
หัวหิน	2.40	2.41	3.23	1.14	1.11	4.87
เกาะหลัก	1.74	1.89	8.64	0.45	0.58	40.04

4.2.3 กระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงในช่วงน้ำเกิดและน้ำตายในบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง

จากการเปรียบเทียบกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงเฉลี่ยในจุดน้ำมันรั้วไหลบริเวณชายฝั่งทะเลระยองในช่วงที่เป็นน้ำเกิด (spring tide) และช่วงน้ำตาย (neap tide) โดยมีสมมติฐานว่า เป็นข้อมูลช่วง 25 ชั่วโมง ในวันขึ้น 15 ค่ำ หรือแรม 15 ค่ำ ตามปฏิทินจันทรคติ เวลา 0.00 น. – 0.00 น. เป็นวันน้ำเกิด และวันขึ้น 8 ค่ำ หรือแรม 8 ค่ำ ตามปฏิทินจันทรคติ เวลา 0.00 น. – 0.00 น. เป็นวันน้ำตาย ซึ่งในความจริงแล้วช่วงที่เกิดน้ำเกิด-น้ำตายในแต่ละบริเวณจะไม่ตรงกัน แต่มีความคลาดเคลื่อนจากวันที่กำหนดไว้เล็กน้อยเท่านั้น

จากการเปรียบเทียบข้อมูลกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D ตามเวลาในช่วงน้ำเกิดและน้ำตายรายเดือนบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง พบว่าทิศทางของกระแสน้ำไม่แตกต่างกันทั้งในช่วงน้ำเกิดและน้ำตายในแต่ละเดือน โดยกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงจะเคลื่อนที่ในทิศตะวันตกเฉียงเหนือค่อนไปทางตะวันตก (WNW) ในช่วงที่น้ำขึ้น และเคลื่อนที่ไปทิศ

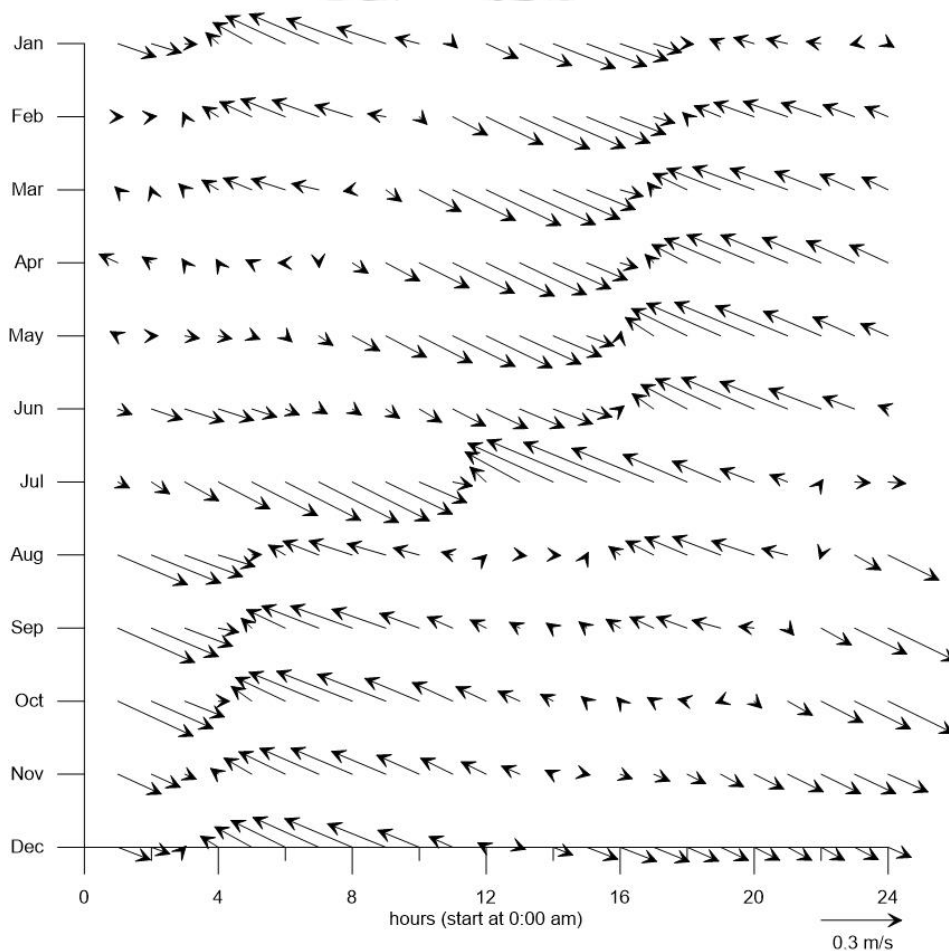
ตะวันออกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันออก (ESE) ในช่วงน้ำลง และพบว่าในช่วงน้ำเกิด ในเดือนตุลาคม ถึงเดือนกุมภาพันธ์ กระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงจะมีความเร็วสูงตอนกลางคืน (เวลาประมาณ 00.00 น.) โดยมีความเร็วประมาณ 0.3 เมตร/วินาที ส่วนในเดือนมีนาคมถึงเดือนกันยายน กระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงจะมีความเร็วสูงในตอนกลางวัน (เวลาประมาณ 12.00 น.) โดยมีความเร็วประมาณ 0.3 เมตร/วินาที ทั้งนี้จะพบว่าในเดือนพฤษภาคมถึงเดือนสิงหาคม กระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงในช่วงน้ำเกิดมีความเร็วประมาณ 0.4 เมตร/วินาที ซึ่งมีความเร็วของกระแสน้ำแรงกว่าในเดือนอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4-24



รูปที่ 4-24 กระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงตามเวลาในช่วงน้ำเกิดบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง

ส่วนกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงตามเวลาในช่วงน้ำตาย พบว่ากระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงจะมีความเร็วของกระแสน้ำสูงในตอนเย็น (เวลาประมาณ 18.00 น.) ในเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนมิถุนายน โดยมีความเร็วของกระแสน้ำประมาณ 0.28 เมตร/วินาที และความเร็วของกระแสน้ำสูง

ในช่วงเช้า (เวลาประมาณ 05.00 น.) ในเดือนกรกฎาคมถึงเดือนมกราคม โดยมีความเร็วประมาณ 0.28 เมตร/วินาที เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4-25 ทั้งนี้จะพบว่าความเร็วของกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงในช่วงน้ำเกิดจะมีความเร็วของกระแสน้ำมากกว่าในช่วงน้ำตายเนื่องจากในช่วงน้ำเกิดเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในช่วงน้ำขึ้นและน้ำลงมากกว่าในช่วงน้ำตาย ซึ่งส่งผลให้กระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงในช่วงน้ำเกิดเร็วกว่าในช่วงน้ำตาย แต่ทั้งนี้ความเร็วของกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงอาจมีความคลาดเคลื่อนได้ เพราะจากข้อจำกัดการไม่มีข้อมูลกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงมาสอบเทียบ และตรวจสอบของแบบจำลอง Delft3D อีกทั้งในการเปรียบเทียบระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ จะพบว่าแบบจำลอง Delft3D ยังมีการจำลองที่คลาดเคลื่อนอยู่



รูปที่ 4-25 กระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงตามเวลาในช่วงน้ำตายที่บริเวณชายฝั่งทะเลระยอง

4.3 การจำลองกระแสน้ำสุทธิ

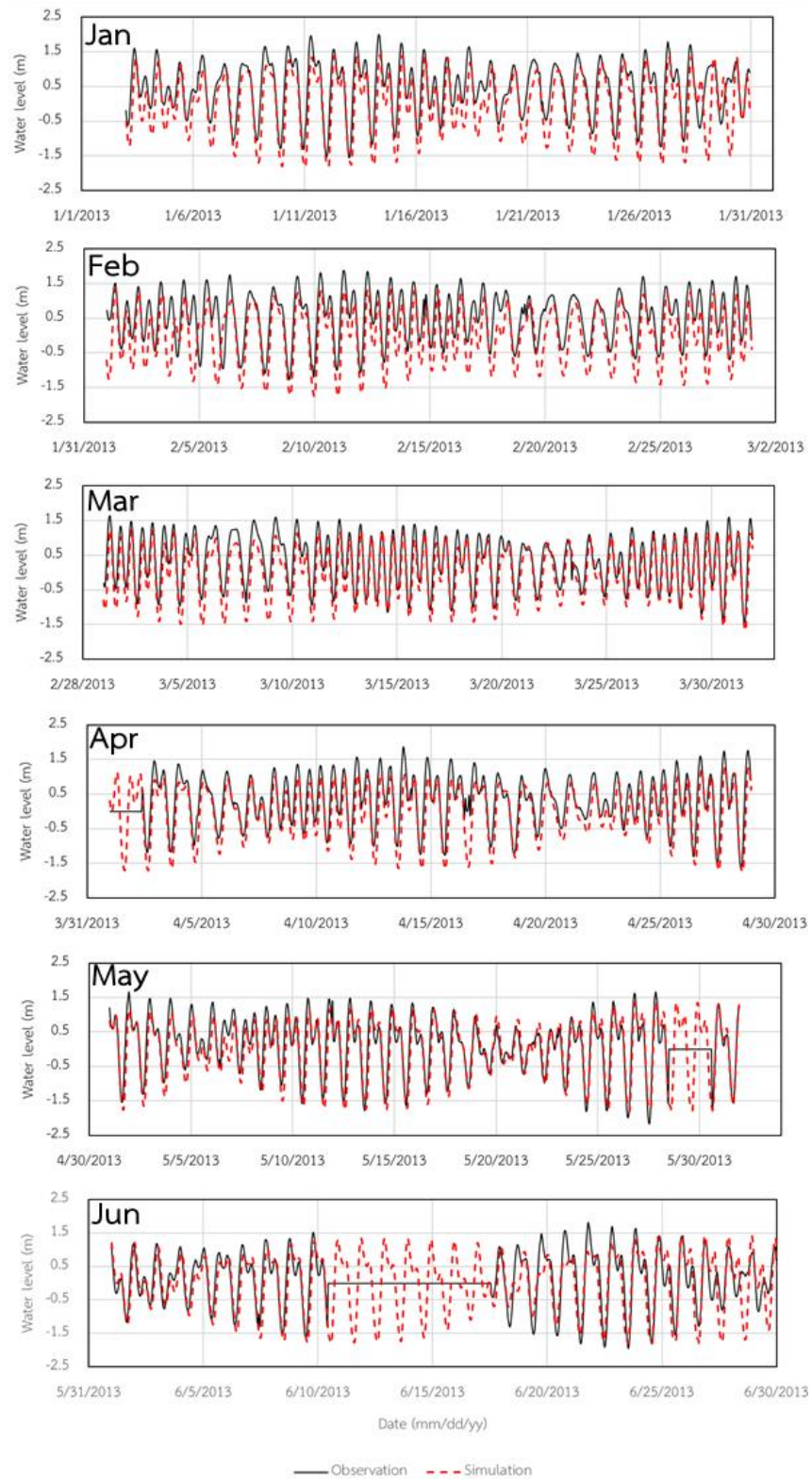
กระแสน้ำสุทธิคือกระแสน้ำที่รวมอิทธิพลของทั้งน้ำขึ้นน้ำลงและคลื่นลม โดยในการจำลองกระแสน้ำสุทธิด้วยแบบจำลอง Delft3D โดยใช้ข้อมูลองค์ประกอบฮาร์มอนิกของน้ำขึ้นน้ำลงที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลระดับน้ำทำนายด้วยวิธี harmonic analysis และข้อมูลสเปกตรัมคลื่นที่ได้จากแบบจำลอง SWAN

4.3.1 การสอบเทียบแบบจำลอง

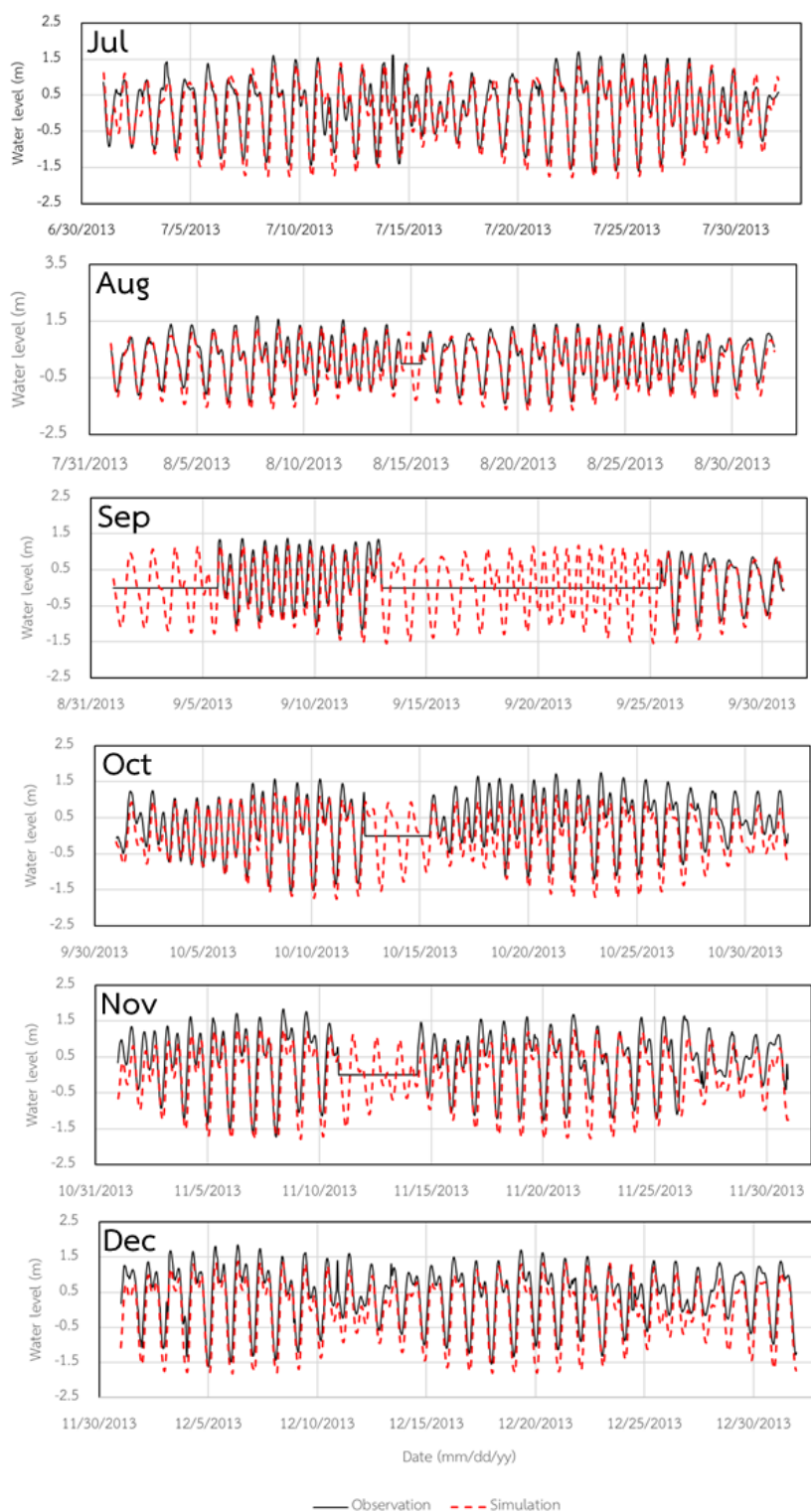
การสอบเทียบแบบจำลองกระแสน้ำสุทธิที่รวมอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงและคลื่นลมเข้าด้วยกัน ใช้ข้อมูลระดับน้ำจริงที่ได้จากการตรวจวัดของการท่าเรือแห่งประเทศไทยที่สถานีสำนดอนเจ้าพระยา ในปี พ.ศ.2556 มาใช้ในการสอบเทียบแบบจำลองกระแสน้ำสุทธิ เมื่อเปรียบเทียบระดับน้ำรายเดือนที่ได้จากการจำลองกระแสน้ำสุทธิด้วยแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลตรวจวัดของการท่าเรือแห่งประเทศไทย พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) ที่ค่าที่สูงประมาณ 0.25 - 0.50 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 4-18 เมื่อพิจารณาระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลตรวจวัดของการท่าเรือแห่งประเทศไทย พบว่าส่วนใหญ่ระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D ในช่วงน้ำลงต่ำสุด จะมีระดับน้ำต่ำกว่าข้อมูลตรวจวัดของการท่าเรือแห่งประเทศไทยประมาณ 0.25 - 0.50 เมตร ในทุกเดือน ดังแสดงในรูปที่ 4-26

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) พบว่าส่วนใหญ่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ อยู่ในช่วง 0.64 - 0.91 ดังแสดงในตารางที่ 4-18 ซึ่งถือวาระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับข้อมูลตรวจวัดของการท่าเรือแห่งประเทศไทย และเมื่อพิจารณาค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) ในแต่ละเดือนพบว่าโดยส่วนใหญ่ค่า NSE ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.5 - 0.7 แสดงว่าแบบจำลอง Delft3D มีการจำลองได้แม่นยำอยู่ในเกณฑ์พอใช้ (Yuri et al., 1999) ยกเว้นในเดือนมกราคม และเดือนกุมภาพันธ์ที่ค่า NSE ต่ำอยู่ในช่วง 0 - 0.3 กล่าวคือแบบจำลอง Delft3D ยังทำการจำลองได้คลาดเคลื่อนกับระดับน้ำจริงอยู่มากและไม่มีความแม่นยำเท่าที่ควร

เมื่อพิจารณาค่าความเบี่ยงเบนเฉลี่ย (bias) ระหว่างระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลตรวจวัดของการท่าเรือแห่งประเทศไทย พบว่าค่าความเบี่ยงเบนเฉลี่ย ส่วนใหญ่อยู่ประมาณ -0.20 - -0.50 เมตร ซึ่งมีค่าความเบี่ยงเบนเฉลี่ยเป็นลบแสดงว่าแบบจำลอง Delft3D จำลองระดับน้ำสุทธิได้ต่ำกว่าข้อมูลตรวจวัดจริง ดังแสดงในตารางที่ 4-18



รูปที่ 4-26 การเปรียบเทียบระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลตรวจวัดของการท่าเรือ
แห่งประเทศไทย ที่สถานีสันดอนเจ้าพระยา ในปี พ.ศ.2556



รูปที่ 4-26 (ต่อ) การเปรียบเทียบระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลตรวจวัดของการ
ท่าเรือแห่งประเทศไทย ที่สถานีสันดอนเจ้าพระยา ในปี พ.ศ.2556

ตารางที่ 4-18 ดัชนีการเปรียบเทียบข้อมูลระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลตรวจวัดของการท่าเรือแห่งประเทศไทย ที่สถานีสันดอนเจ้าพระยา ในปี พ.ศ.2556

เดือน	MAE (เมตร)	R ²	NSE	Bias (เมตร)
มกราคม	0.49	0.76	0.34	-0.45
กุมภาพันธ์	0.58	0.64	-0.06	-0.53
มีนาคม	0.38	0.81	0.53	-0.36
เมษายน	0.37	0.80	0.55	-0.35
พฤษภาคม	0.28	0.82	0.78	-0.14
มิถุนายน	0.41	0.64	0.55	-0.13
กรกฎาคม	0.29	0.83	0.74	-0.17
สิงหาคม	0.26	0.89	0.79	-0.21
กันยายน	0.24	0.91	0.80	-0.22
ตุลาคม	0.42	0.79	0.49	-0.39
พฤศจิกายน	0.45	0.79	0.46	-0.42
ธันวาคม	0.44	0.86	0.52	-0.42
รายปี	0.39	0.77	0.55	-0.32

การเปรียบเทียบค่าพิสัยน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับพิสัยน้ำจริง พบว่าในช่วงน้ำเกิดพิสัยของน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D ส่วนใหญ่จะมีค่าต่ำกว่าพิสัยน้ำจริงประมาณ 0.2 – 0.3 เมตร หรือมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 10% ส่วนในช่วงน้ำตาย ค่าพิสัยน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D จะสูงกว่าพิสัยน้ำจริงประมาณ 0.3 – 0.5 เมตร หรือมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 30% ดังแสดงในตารางที่ 4-19 ซึ่งแสดงว่าแบบจำลอง Delft3D ยังจำลองระดับน้ำที่ได้ไม่แม่นยำในการศึกษา

ตารางที่ 4-19 เปรียบเทียบค่าพิสัยน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลตรวจวัดของการท่าเรือแห่งประเทศไทย ที่สถานีสันดอนเจ้าพระยา ในปี พ.ศ.2556

เดือน	พิสัยน้ำเกิด (เมตร)			พิสัยน้ำตาย (เมตร)		
	ข้อมูลตรวจวัด	แบบจำลอง Delft3D	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (%)	ข้อมูลตรวจวัด	แบบจำลอง Delft3D	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (%)
มกราคม	3.44	3.15	8.32	1.60	2.16	34.99
กุมภาพันธ์	2.92	2.98	2.17	1.50	2.28	52.06
มีนาคม	3.00	2.83	5.76	1.36	1.80	32.37
เมษายน	3.40	3.02	11.23	1.26	1.39	10.13
พฤษภาคม	3.82	3.09	19.23	1.10	1.39	26.44
มิถุนายน	3.62	2.50	31.01	1.52	1.82	19.51
กรกฎาคม	3.26	3.08	5.51	1.42	2.12	49.59
สิงหาคม	3.06	2.92	4.44	1.78	2.26	26.80
กันยายน	2.56	2.57	0.32	-	-	-
ตุลาคม	3.10	2.84	8.41	1.20	1.40	16.73
พฤศจิกายน	3.54	3.01	14.96	1.34	1.60	19.13
ธันวาคม	3.42	3.12	8.68	1.36	1.91	40.44

หมายเหตุ: ในเดือนกันยายนไม่มีข้อมูลระดับน้ำตรวจวัดในช่วงน้ำตาย

ผลการเปรียบเทียบข้อมูลระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลตรวจวัดด้วยเครื่องมือ AWAC ของ Japanese International Cooperation Agency (JICA) ที่บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา จำนวน 7 ครั้ง ในปี พ.ศ.2554 - พ.ศ.2556 พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) อยู่ประมาณ 0.2 - 0.3 เมตร ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร ทั้งนี้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ อยู่ในช่วง 0.7 - 0.9 ดังแสดงในตารางที่ 4-20 เมื่อพิจารณาดูค่าระดับน้ำแล้วจะพบว่าระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำสอดคล้องกับข้อมูลระดับน้ำที่ได้จากการตรวจวัด แต่เวลาในการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำยังช้ากว่าอยู่ประมาณ 1 ชั่วโมงส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์มีค่าสูง 0.2 - 0.3 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4-27

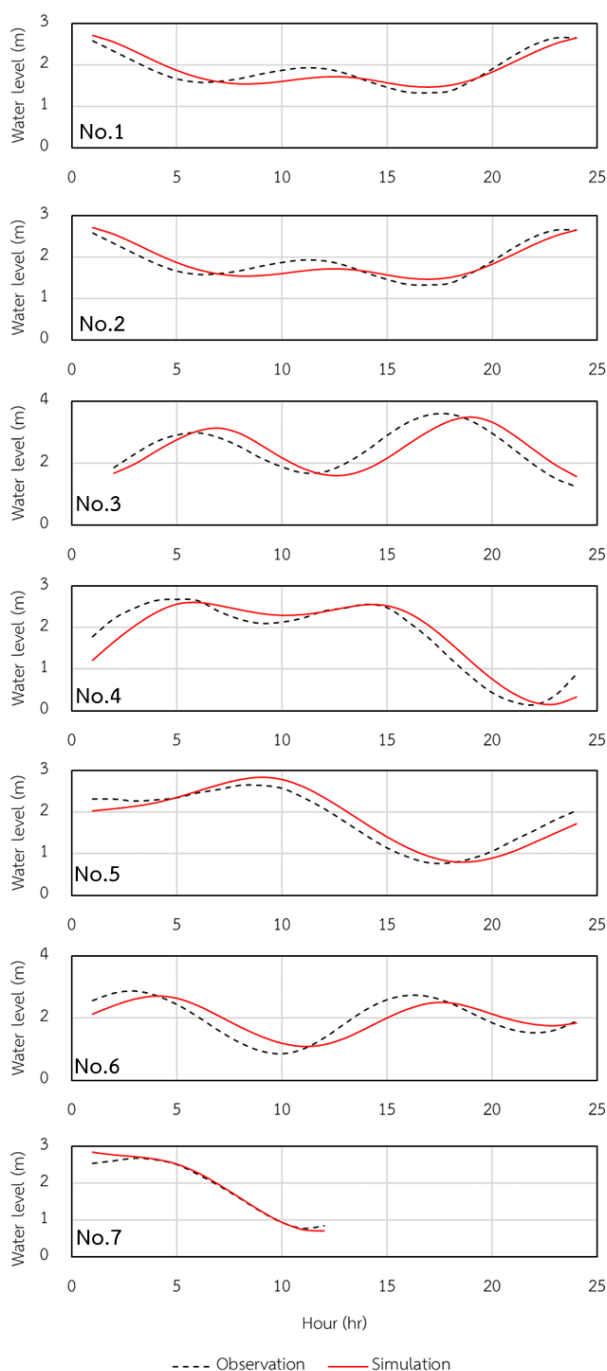
ตารางที่ 4-20 การเปรียบเทียบข้อมูลระดับน้ำและกระแสน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลตรวจวัดของ Japanese International Cooperation Agency (JICA) ที่บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา จำนวน 9 ครั้ง ในปี พ.ศ.2554 - พ.ศ.2556

ข้อมูล		ระดับน้ำ		กระแสน้ำ	
ครั้งที่	ช่วงวันที่	MAE (เมตร)	R ²	MAE (เมตร/วินาที)	R ²
1	5-6 พ.ย. 54	0.15	0.84	0.10	0.03
2	17-18 ธ.ค. 54	0.28	0.70	0.11	0.04
3	12-13 ก.พ. 55	0.34	0.66	0.09	0.14
4	2-3 มี.ย. 55	0.23	0.89	0.08	0.06
5	11-12 ส.ค. 55	0.19	0.90	0.08	0.32
6	27-28 ต.ค. 55	0.31	0.69	0.19	0.04
7	26-27 ม.ค. 56	0.05	0.96	0.09	0.74
8	27-28 ก.ค. 56	-	-	0.05	0.62
9	14-15 ก.ย. 56	-	-	0.07	0.01

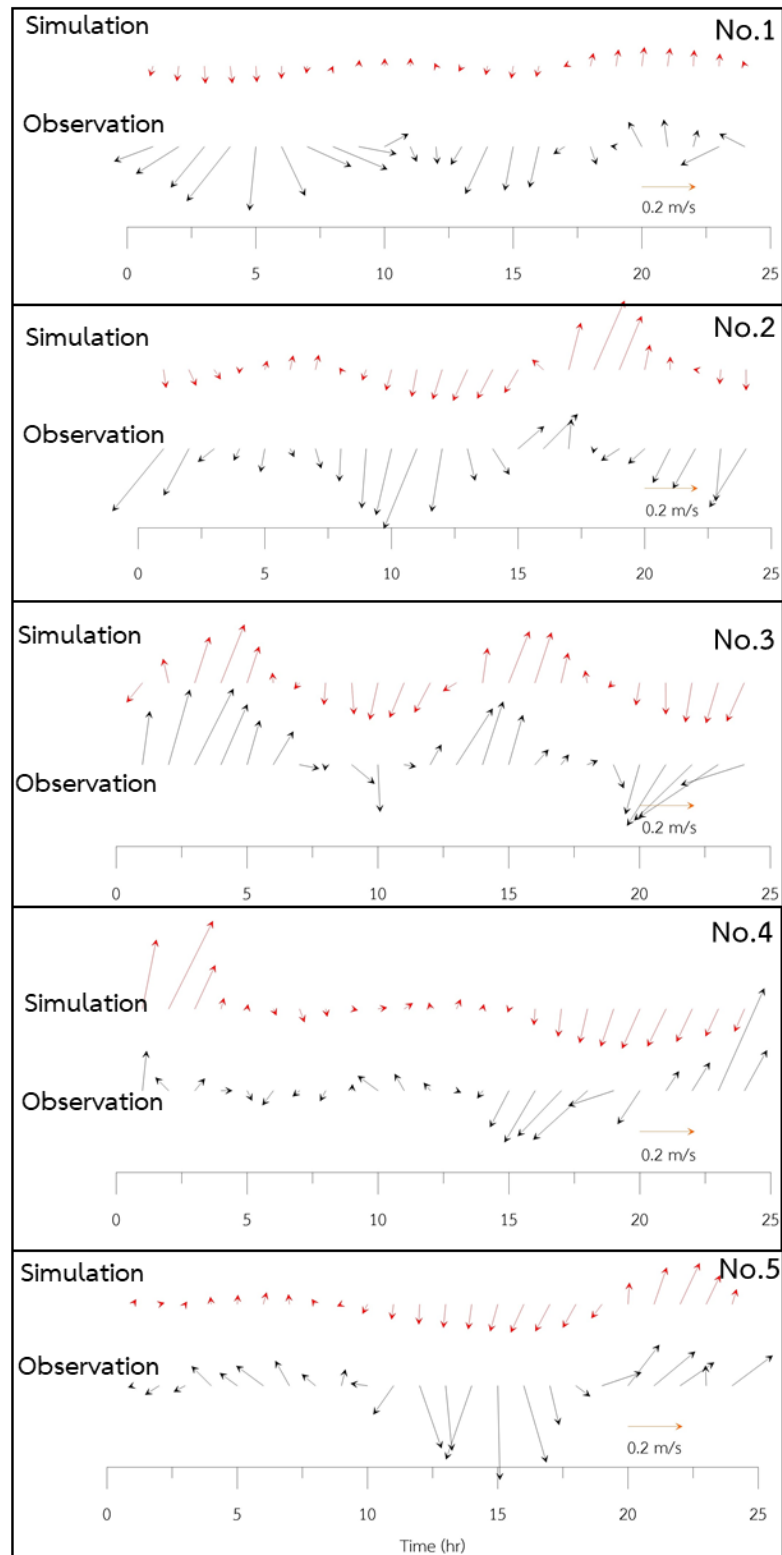
หมายเหตุ: ในครั้งที่ 8 และ 9 ไม่มีข้อมูลระดับน้ำตรวจวัด

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลกระแสน้ำรายชั่วโมงที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลตรวจวัดของ จำนวน 9 ครั้ง ในปี พ.ศ.2554 - พ.ศ.2556 พบว่าส่วนใหญ่ความเร็วกระแสน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) ของความเร็วประมาณ 0.05 - 0.10 เมตร/วินาที แต่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R²) ที่ต่ำคืออยู่ในช่วง 0.1 - 0.4 ดังแสดงในตารางที่ 4-20 จากการวิเคราะห์กระแสน้ำรายชั่วโมง พบว่ามีเพียงบางช่วงเท่านั้นที่ทิศทางของกระแสน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D คล้ายกับทิศทางของกระแสน้ำที่ได้จากการตรวจวัด แต่ความเร็วของกระแสน้ำที่ได้จากแบบจำลองมีความเร็วน้อยกว่าความเร็วของกระแสน้ำที่ได้จากการตรวจวัดประมาณ 0.1 เมตร/วินาที สอดคล้องกับค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4-28 ซึ่งแสดงว่าแบบจำลอง Delft3D จำลองกระแสน้ำไม่สอดคล้องกับความจริงทั้งอาจเป็นผลมาจากกระแสน้ำที่ได้จากแบบจำลองเป็นการคำนวณแบบ 2 มิติ คือเป็นค่ากระแสน้ำที่เฉลี่ยตามความลึก (depth averaged velocity) แต่กระแสน้ำที่ได้จากการตรวจวัดเป็นกระแสน้ำที่วัด ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามความลึกทุกๆ 0.50 เมตร แล้วนำค่ามาเฉลี่ยตลอดความลึก ซึ่งกระแสน้ำที่วัดจริงนี้จะมีการไหลกลับไปกลับมาตลอด

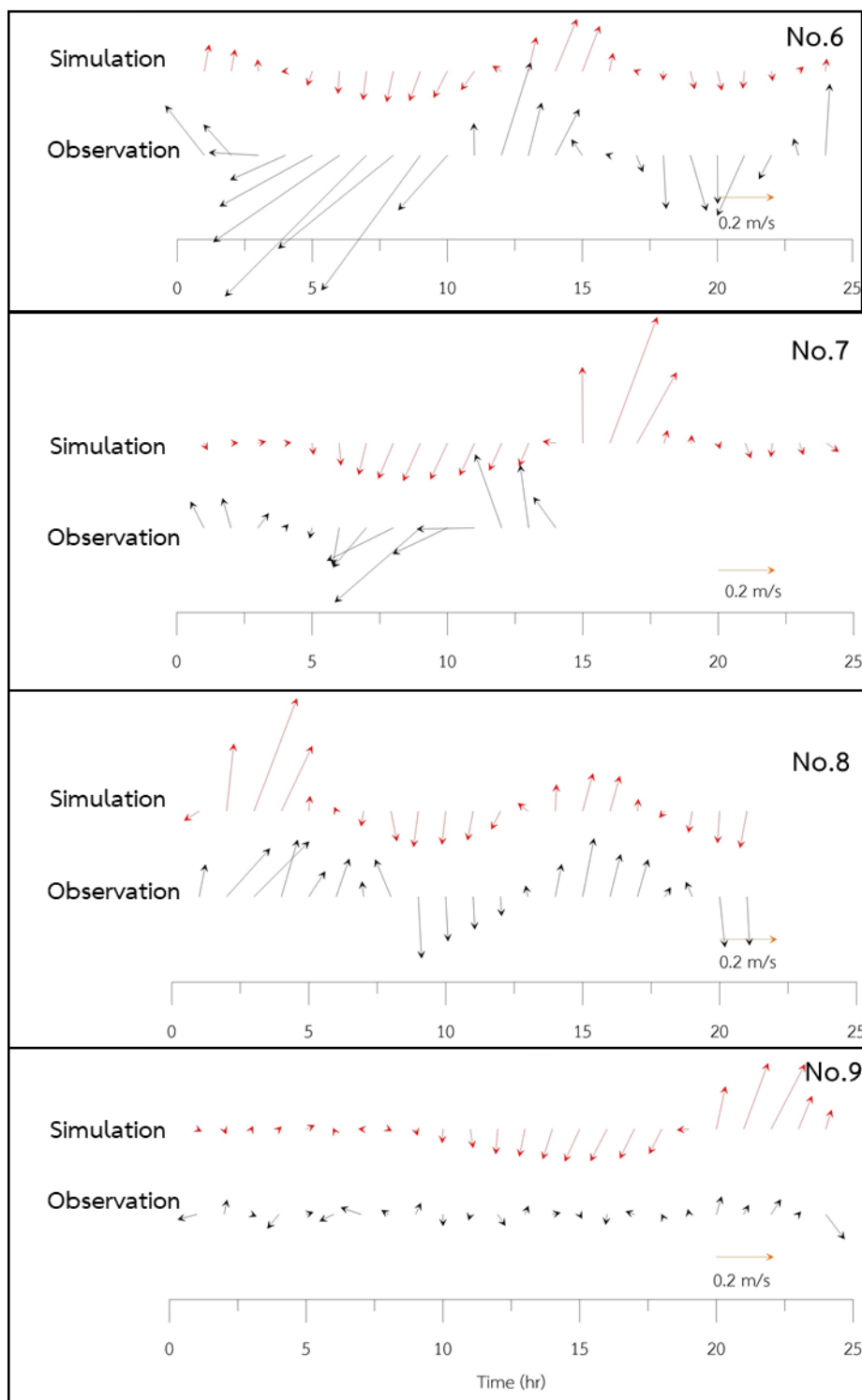
ความลึก ซึ่งเป็นข้อจำกัดของแบบจำลองที่ไม่ได้พิจารณาในจุดนี้จึงเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น อีกทั้งตำแหน่งที่ตรวจวัดอยู่ใกล้จากปากแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งอาจได้รับผลกระทบจากการไหลของน้ำที่ปากแม่น้ำด้วย ซึ่งเป็นข้อจำกัดส่วนหนึ่งของแบบจำลองที่ไม่ได้พิจารณาในการศึกษาในครั้งนี้



รูปที่ 4-27 การเปรียบเทียบระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลตรวจวัดของ Japanese International Cooperation Agency ที่บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา จำนวน 7 ครั้ง ในปี พ.ศ.2554



รูปที่ 4-28 การเปรียบเทียบกระแสน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลตรวจวัดของ Japanese International Cooperation Agency ที่บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา จำนวน 9 ครั้ง ใน ปี พ.ศ.2554 - พ.ศ.2556

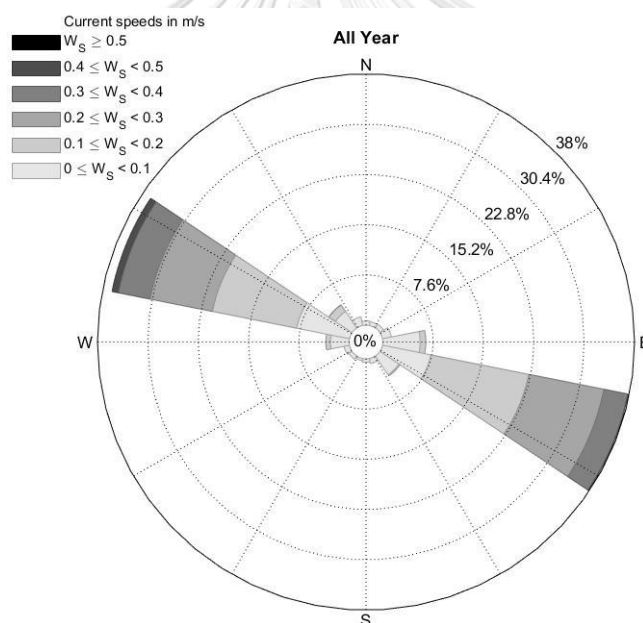


รูปที่ 4-27 (ต่อ) การเปรียบเทียบกระแสน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลตรวจวัดของ Japanese International Cooperation Agency ที่บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา จำนวน 9 ครั้ง ใน ปี พ.ศ.2554 - พ.ศ.2556

4.3.2 กระแสน้ำสุทธิตามช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย

จากการเปรียบเทียบกระแสน้ำสุทธิในบริเวณชายฝั่งทะเลระยองในช่วงที่เป็นน้ำเกิด (spring tide) และช่วงน้ำตาย (neap tide) โดยเลือกวันที่เป็นน้ำเกิดและน้ำตายวันเดียวกันกับการวิเคราะห์กระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงที่กล่าวไว้ข้างต้น

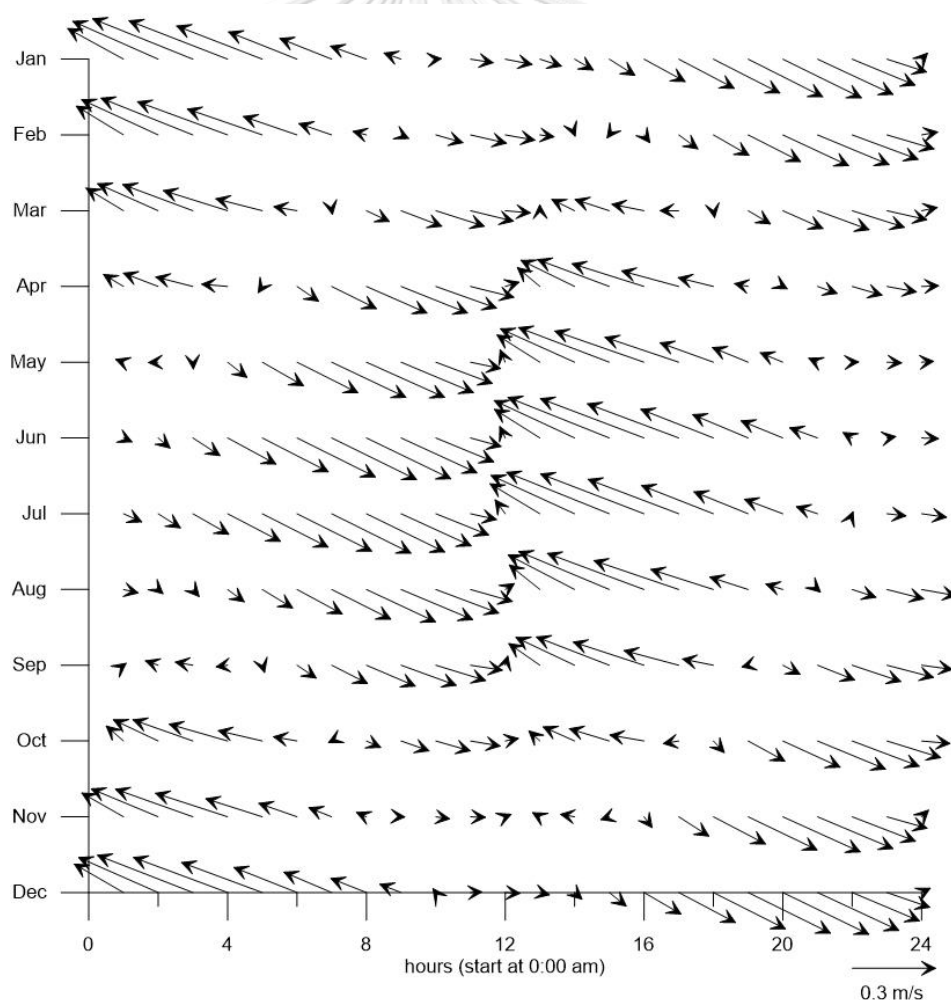
เมื่อวิเคราะห์การกระจายขนาดและทิศทางของกระแสน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D ในบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง ตั้งแต่ปี พ.ศ.2554 - พ.ศ.2556 พบว่าทิศทางกระแสน้ำส่วนใหญ่เคลื่อนที่ในทิศตะวันตกเฉียงเหนือค่อนไปทางตะวันตก-ตะวันออกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันออก (WNW-ESE) เป็นตลอดทั้งปี โดยพบประมาณ 37% ทั้งสองทิศดังกล่าว ในส่วนของความเร็วกระแสน้ำส่วนใหญ่ประมาณ 38% มีความเร็ว 0 - 0.2 เมตร/วินาที รองลงมาคือความเร็ว 0.2 - 0.4 เมตร/วินาที ซึ่งพบประมาณ 31% ดังแสดงในรูปที่ 4-29 สำหรับผลการคำนวณการแจกแจงกระแสน้ำรวมและรายเดือน แสดงไว้ในภาคผนวก ง



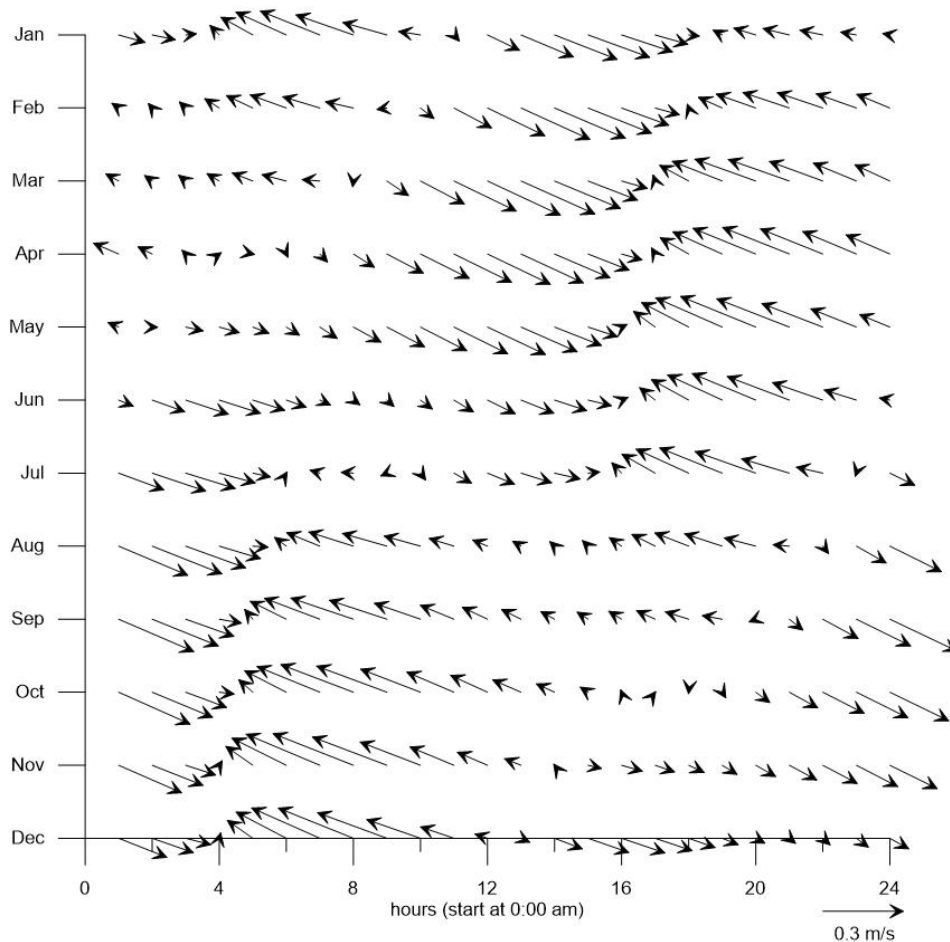
รูปที่ 4-29 ผังข้อมูลกระแสน้ำสุทธิบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง ตั้งแต่ปี พ.ศ.2554 - พ.ศ.2556

จากการเปรียบเทียบข้อมูลกระแสน้ำสุทธิตามเวลาในช่วงน้ำเกิดและน้ำตายรายเดือน ที่บริเวณชายฝั่งทะเลระยอง เช่นเดียวกับที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงดังกล่าวไว้ข้างต้น พบว่าทิศทางและความเร็วของกระแสน้ำสุทธิไม่แตกต่างกับกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงมากนัก โดยกระแสน้ำสุทธิจะเคลื่อนที่ในทิศตะวันตกเฉียงเหนือค่อนไปทางตะวันตก (WNW) ในช่วงที่น้ำขึ้น และเคลื่อนที่ไปในทิศตะวันออกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันออก (ESE) ในช่วงน้ำลง และ

พบว่าในช่วงน้ำเกิด ในเดือนตุลาคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ กระแสน้ำสุทธิตั้งมีความเร็วสูงตอนกลางคืน (เวลาประมาณ 00.00 น.) โดยมีความเร็วประมาณ 0.3 เมตร/วินาที ส่วนในเดือนมีนาคมถึงเดือนกันยายน กระแสน้ำสุทธิตั้งมีความเร็วสูงในตอนกลางวัน (เวลาประมาณ 12.00 น.) โดยมีความเร็วประมาณ 0.3 เมตร/วินาที ทั้งนี้จะพบว่าในเดือนพฤษภาคมถึงเดือนสิงหาคม กระแสน้ำสุทธิในช่วงน้ำเกิดมีความเร็วประมาณ 0.4 เมตร/วินาที ซึ่งมีความเร็วของกระแสน้ำแรงกว่าในเดือนอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4-30 ส่วนกระแสน้ำสุทธิตามเวลาในช่วงน้ำตาย พบว่ากระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงจะมีความเร็วของกระแสน้ำสูงในตอนเย็น (เวลาประมาณ 18.00 น.) ในเดือนมกราคมถึงเดือนมิถุนายน โดยมีความเร็วของกระแสน้ำประมาณ 0.28 เมตร/วินาที และความเร็วของกระแสน้ำสูงในช่วงเช้า (เวลาประมาณ 05.00 น.) ในเดือนสิงหาคมถึงเดือนมกราคม โดยมีความเร็วประมาณ 0.28 เมตร/วินาที เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4-31



รูปที่ 4-30 กระแสน้ำสุทธิตามเวลาในช่วงน้ำเกิดบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง



รูปที่ 4-31 กระแสน้ำสุทธิตามเวลาในช่วงน้ำตายบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง

เมื่อเปรียบเทียบความเร็วของกระแสน้ำสูงสุดทั้งในช่วงน้ำเกิดและน้ำตายรายเดือนระหว่างกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงและกระแสน้ำสุทธิ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ส่วนใหญ่ความเร็วของกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงและกระแสน้ำสุทธิมีความเร็วประมาณ 0.006 เมตร/วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4-21

จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอิทธิพลของคลื่นลมในการจำลองกระแสน้ำสุทธิด้วยแบบจำลอง Delft3D กระแสน้ำสุทธิที่เกิดขึ้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลระยอง ให้ผลไม่แตกต่างกันกับกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงเลย แต่ทั้งนี้ในการตรวจสอบแบบจำลองได้ทำการตรวจสอบเพียงบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยาเท่านั้น ยังไม่มีข้อมูลตรวจวัดที่บริเวณอื่นๆ ยืนยันเพิ่มเติม เพราะแบบจำลอง Delft3D อาจมีความถูกต้องแม่นยำในบางพื้นที่หรือบางเวลาเท่านั้น

ตารางที่ 4-21 ความเร็วของกระแสน้ำสูงสุดทั้งในช่วงน้ำเกิดและน้ำตายรายเดือนระหว่างกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงและกระแสน้ำสุทธิบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง

เดือน	น้ำเกิด		น้ำตาย	
	กระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลง (เมตร/วินาที)	กระแสน้ำสุทธิ (เมตร/วินาที)	กระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลง (เมตร/วินาที)	กระแสน้ำสุทธิ (เมตร/วินาที)
มกราคม	0.005	0.005	0.003	0.002
กุมภาพันธ์	0.003	0.002	0.004	0.004
มีนาคม	0.002	0.002	0.006	0.004
เมษายน	0.004	0.006	0.002	0.002
พฤษภาคม	0.008	0.007	0.001	0.003
มิถุนายน	0.007	0.005	0.005	0.005
กรกฎาคม	0.003	0.002	0.004	0.004
สิงหาคม	0.005	0.007	0.006	0.007
กันยายน	0.009	0.010	0.012	0.011
ตุลาคม	0.010	0.010	0.015	0.012
พฤศจิกายน	0.004	0.009	0.007	0.010
ธันวาคม	0.003	0.006	0.003	0.005

4.4 อิทธิพลของคลื่นลมและน้ำขึ้นน้ำลง

จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังที่กล่าวในบทที่ 2 จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อกระแสน้ำในอ่าวไทยคือคลื่นลมและน้ำขึ้นน้ำลง ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาอิทธิพลของคลื่นลมและน้ำขึ้นน้ำลงต่อกระแสน้ำสุทธิ เพื่อศึกษาว่าปัจจัยใดจะมีผลต่อกระแสน้ำสุทธิตกกว่ากัน โดยพิจารณาที่ตำแหน่งน้ำมันรั่วไหลบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง และสถานีระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ จำนวน 5 สถานี ซึ่งจะแบ่งการพิจารณาเป็น 2 มิติ คือ ขนาดและทิศทาง

สำหรับการแยกกระแสน้ำเนื่องจากคลื่นลมออกจากกระแสน้ำสุทธิจะแยกโดยการหักกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงออกจากกระแสน้ำสุทธิ เนื่องจากการจำลองกระแสน้ำสุทธินั้นมีอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงและคลื่นลมเท่านั้น ดังสมการที่ 4-7

$$u_w = u_n - u_t \text{ และ } v_w = v_n - v_t \quad (4-7)$$

เมื่อ u_w, v_w คือ ความเร็วของกระแสน้ำเนื่องจากคลื่นลม, u_n, v_n คือ ความเร็วของกระแสน้ำสุทธิ และ u_t, v_t คือ ความเร็วของกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงในแนวแกน -x และ -y

4.4.1 อิทธิพลของคลื่นลมและน้ำขึ้นน้ำลงต่อความเร็วของกระแสน้ำสุทธิ

สำหรับการคำนวณผลกระทบของคลื่นและน้ำขึ้นน้ำลงต่อขนาดของกระแสน้ำสุทธิ คำนวณได้จากสมการที่ 4-8 และสมการที่ 4-9 โดยถือว่าผลกระทบทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1

$$\text{Tidal influence} = \frac{\|C_t\|}{\|C_t + C_w\|} \quad (4-8)$$

$$\text{Wave influence} = 1 - \text{Tidal influence} \quad (4-9)$$

เมื่อ C_t คือ ความเร็วของกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลง และ C_w คือ ความเร็วของกระแสน้ำเนื่องจากคลื่นลม

จากการวิเคราะห์ผลกระทบของคลื่นลมและน้ำขึ้นน้ำลงต่อขนาดของกระแสน้ำสุทธิที่บริเวณชายฝั่งทะเลระยอง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดเหตุการณ์น้ำมันรั่ว และสถานีระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ พบว่าส่วนใหญ่ความเร็วของกระแสน้ำสุทธิได้รับอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงมีมากกว่าคลื่นลมโดยมีค่า tidal influence ประมาณ 0.7 - 0.8 ทั้งนี้สถานีเกาะสีชัง และเกาะหลัก กระแสน้ำสุทธิได้รับอิทธิพลทั้งจากน้ำขึ้นน้ำลงและคลื่นลม ซึ่งอาจเป็นเพราะตำแหน่งที่ตั้งของสถานีอยู่ใกล้ฝั่งทำให้กระแสน้ำได้รับอิทธิพลทั้งจากน้ำขึ้นน้ำลงและคลื่นลม ดังแสดงในรูปที่ 4-32 ดังนั้นจะเห็นได้ว่าน้ำขึ้นน้ำลงมีอิทธิพลต่อกระแสน้ำสุทธิมากกว่าคลื่นลม โดยคลื่นลมจะเริ่มมีผลต่อกระแสน้ำสุทธิในช่วงที่ความลึกน้ำตื้น

4.4.2 อิทธิพลของคลื่นลมและน้ำขึ้นน้ำลงต่อทิศทางของกระแสน้ำสุทธิ

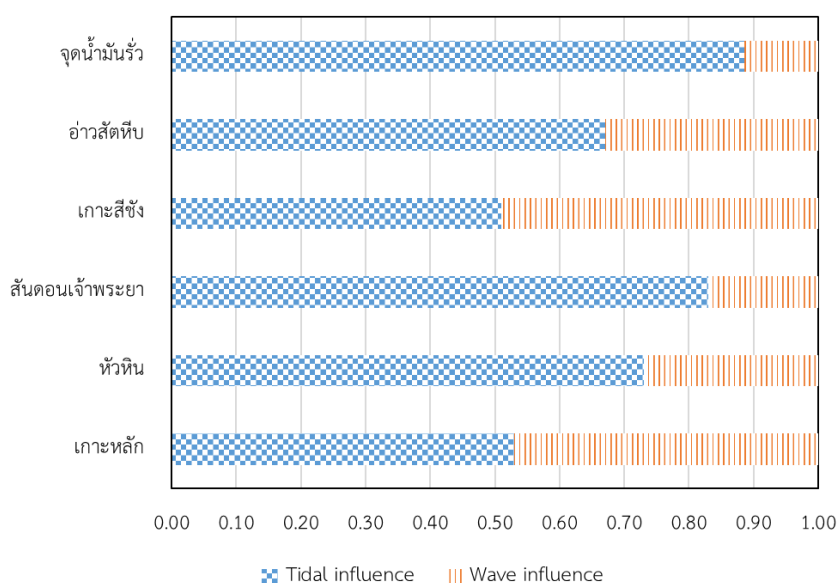
สำหรับการคำนวณผลกระทบของคลื่นลมและน้ำขึ้นน้ำลงต่อทิศทางของกระแสน้ำสุทธิ จะคำนวณโดยแบ่งทิศทางออกเป็น 8 ทิศได้แก่ ทิศเหนือ (N), ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE), ทิศตะวันออก (E), ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (SE), ทิศใต้ (S), ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW), ทิศตะวันตก (W) และทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NW) ซึ่งจะพิจารณามุมดังสมการที่ 4-10 และทำการเปรียบเทียบทิศทางของกระแสน้ำสุทธิกับกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลง และกระแสน้ำเนื่องจากคลื่นลม ถ้ากระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงหรือกระแสน้ำเนื่องจากคลื่นลมไปทางทิศเดียวกันกับกระแสน้ำสุทธิ จะกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์เปรียบเทียบทิศทาง (β) มีค่าเท่ากับศูนย์ แต่หากว่ากระแสน้ำเนื่องจากน้ำ

ขึ้นน้ำลงหรือกระแสน้ำเนื่องจากคลื่นลมต่างไปจากกระแสน้ำสุทธิ 45° , 90° และ 135° จะกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์เปรียบเทียบทิศทาง (β) มีค่าเท่ากับ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ และถ้ากระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงหรือกระแสน้ำเนื่องจากคลื่นลมมีทิศตรงข้ามกับกระแสน้ำสุทธิจะกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์เปรียบเทียบทิศทาง (β) มีค่าเท่ากับสี่ ดังสมการที่ 4-11

$$\theta = \begin{cases} N & ; & 337.5 < \theta < 22.5 \\ NE & ; & 22.5 < \theta < 67.5 \\ E & ; & 67.5 < \theta < 112.5 \\ SE & ; & 112.5 < \theta < 157.5 \\ S & ; & 157.5 < \theta < 202.5 \\ SW & ; & 202.5 < \theta < 247.5 \\ W & ; & 247.5 < \theta < 292.5 \\ NW & ; & 292.5 < \theta < 447.5 \end{cases} \quad (4-10)$$

$$\beta = \begin{cases} 0 & ; & \theta_n \text{ and } \theta_t, \theta_w \text{ were same direction} \\ 1 & ; & \theta_n \text{ and } \theta_t, \theta_w \text{ were } 45^\circ \text{ difference} \\ 2 & ; & \theta_n \text{ and } \theta_t, \theta_w \text{ were } 90^\circ \text{ difference} \\ 3 & ; & \theta_n \text{ and } \theta_t, \theta_w \text{ were } 135^\circ \text{ difference} \\ 4 & ; & \theta_n \text{ and } \theta_t, \theta_w \text{ were opposite direction} \end{cases} \quad (4-11)$$

เมื่อ β คือ พารามิเตอร์เปรียบเทียบทิศทาง, θ_n คือ ทิศทางของกระแสน้ำสุทธิ, θ_t คือ ทิศทางของกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลง, θ_w คือ ทิศทางของกระแสน้ำเนื่องจากคลื่นลม



รูปที่ 4-32 อิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงและคลื่นลมต่อขนาดของกระแสน้ำสุทธิ

คำนวณเปอร์เซ็นต์ของพารามิเตอร์เปรียบเทียบทิศทาง ดังสมการที่ 4-12 เพื่อหาผลกระทบของคลื่นลมและน้ำขึ้นน้ำลงต่อทิศทางของกระแสน้ำสุทธิ โดยผลของเปอร์เซ็นต์ของพารามิเตอร์เปรียบเทียบทิศทาง ($\% \beta$) จะแสดงถึงทิศทางของกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงและกระแสน้ำเนื่องจากคลื่นลมว่ามีทิศทางเดียวกันหรือแตกต่างกันกับกระแสน้ำสุทธิ ถ้า $\% \beta_0$ มากแสดงว่ากระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงหรือกระแสน้ำเนื่องจากคลื่นลมส่วนใหญ่มีทิศทางเดียวกันกับทิศทางของกระแสน้ำสุทธิ แต่หาก $\% \beta_4$ มากแสดงว่ากระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงหรือกระแสน้ำเนื่องจากคลื่นลมส่วนใหญ่มีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของกระแสน้ำสุทธิ และหาก $\% \beta_1$, $\% \beta_2$ หรือ $\% \beta_3$ มากแสดงว่ากระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงหรือกระแสน้ำเนื่องจากคลื่นลมส่วนใหญ่มีทิศทางเบี่ยงเบนไปจากทิศทางของกระแสน้ำสุทธิ

$$\% \beta = \frac{N\beta_i}{N} \quad (4-12)$$

เมื่อ $N\beta$ คือ จำนวนของพารามิเตอร์เปรียบเทียบทิศทาง, i คือ ค่าของพารามิเตอร์เปรียบเทียบทิศทาง ($\beta=0, 1, 2, 3$ และ 4 ตามลำดับ) และ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

จากการคำนวณเปอร์เซ็นต์ของพารามิเตอร์เปรียบเทียบทิศทาง ดังแสดงในตารางที่ 4-22 พบว่าที่สถานีอ่าวสัตหีบ, สันดอนเจ้าพระยา และหัวหิน ทิศทางของกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงมีอิทธิพลต่อทิศทางของกระแสน้ำสุทธิมากกว่ากระแสน้ำเนื่องจากคลื่นลม ซึ่งสังเกตได้จากทิศทางของกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับทิศทางของกระแสน้ำสุทธิ ($\% \beta_0$ มีค่าสูงที่สุด) โดยที่ตำแหน่งน้ำม่นรู่จะพบว่าทิศทางของกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงสอดคล้องกับทิศทางของกระแสน้ำสุทธิถึง 66% แต่ทิศทางของกระแสน้ำเนื่องจากคลื่นลมที่เหมือนกับทิศทางของกระแสน้ำสุทธิมีค่าเพียง 17% ทั้งนี้ที่สถานีเกาะสีชัง และเกาะหลัก ทิศทางของกระแสน้ำสุทธิได้รับอิทธิพลทั้งจากน้ำขึ้นน้ำลงและคลื่นลม โดยส่งผลให้กระแสน้ำสุทธิเบี่ยงไปจากทิศทางของกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลง ($\% \beta_1$ ค่าสูงที่สุด)

จากผลที่สอดคล้องกันทั้งขนาดและทิศทางของอิทธิพลของคลื่นและน้ำขึ้นน้ำลง พบว่าส่วนใหญ่กระแสน้ำสุทธิได้รับอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงมากกว่า เช่นบริเวณสันดอนเจ้าพระยา หรือหัวหิน เป็นต้น แต่ในอู่ใกล้ฝั่งยังมีอิทธิพลของคลื่นลมมีผลต่อทิศทางของกระแสน้ำสุทธิควบคู่ไปกับน้ำขึ้นน้ำลง เช่นในสถานีเกาะสีชัง และเกาะหลัก ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง SWAN และแบบจำลอง Delft3D ยังมีการจำลองที่คลาดเคลื่อนและยังมีความแม่นยำไม่มากนัก ซึ่งความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ อาจมีมากจากหลายสาเหตุ เช่น แบบจำลองที่ไม่สามารถจำลองปรากฏการณ์

ธรรมชาติได้ถูกต้อง และแม่นยำ 100% หรือแม้กระทั่งข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองที่ไม่ได้เป็นข้อมูลที่ตรวจวัดจริง ผลที่ได้ย่อมไม่ถูกต้องตามไปด้วย แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดด้านข้อมูลกระแสน้ำในประเทศไทย โดยในการจำลองคลื่นและกระแสน้ำในการศึกษาในครั้งนี้จึงเป็นเพียงแนวทางในการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อนำกระแสน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D ไปใช้ในการจำลองการรั่วไหลของน้ำมันในแบบจำลอง GNOME ต่อไป

ตารางที่ 4-22 อิทธิพลของทิศทางของกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงและคลื่นลมต่อทิศทางของกระแสน้ำสุทธิ

Tidal influence						
สถานี	% β_0	% β_1	% β_2	% β_3	% β_4	รวม
จุดน้ำมันรั่ว	65.60	22.25	10.61	1.26	0.28	100
อ่าวสัตหีบ	65.15	23.65	2.18	3.39	5.62	100
เกาะสีชัง	20.16	47.38	5.78	22.42	4.26	100
สันดอนเจ้าพระยา	89.70	7.87	1.39	0.75	0.28	100
หัวหิน	85.32	9.22	0.69	1.19	3.58	100
เกาะหลัก	10.21	71.02	14.53	2.61	1.63	100
Wave influence						
สถานี	% β_0	% β_1	% β_2	% β_3	% β_4	รวม
จุดน้ำมันรั่ว	17.44	20.72	21.84	25.29	14.71	100
อ่าวสัตหีบ	15.32	8.41	11.86	31.12	33.29	100
เกาะสีชัง	18.23	30.67	12.72	31.89	6.49	100
สันดอนเจ้าพระยา	51.28	25.77	7.71	10.74	4.49	100
หัวหิน	8.69	21.82	23.35	39.68	6.46	100
เกาะหลัก	2.48	3.57	26.79	60.31	6.85	100

บทที่ 5

ผลการจำลองน้ำมันที่รั่วไหลบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง

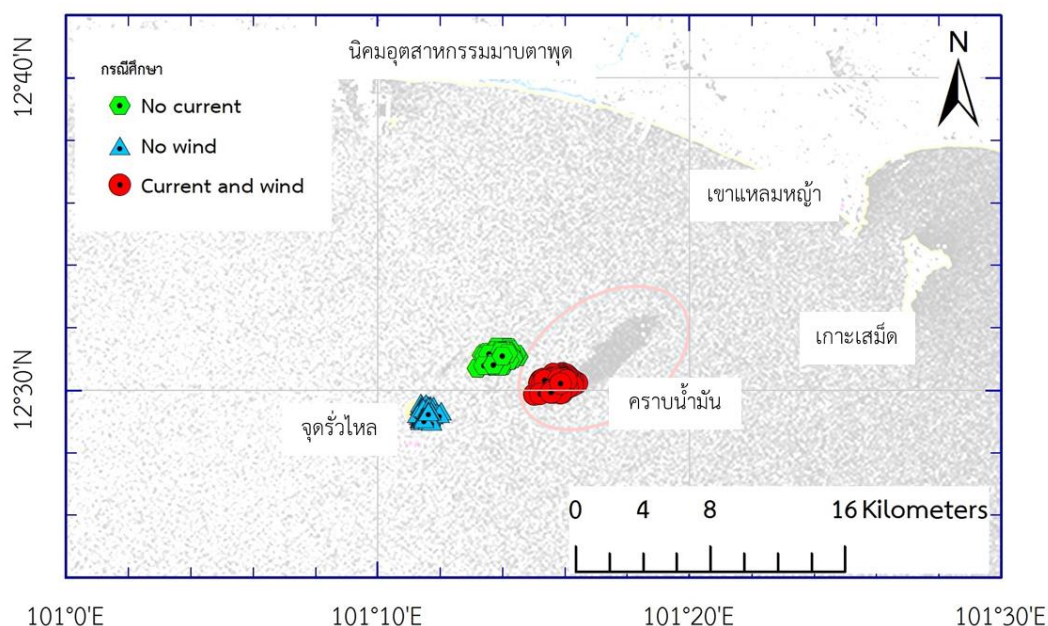
ในการจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลระยองด้วยแบบจำลอง GNOME โดยใช้ข้อมูลกระแสน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D และข้อมูลลม ERA-Interim ราย 6 ชั่วโมงในการสอบเทียบแบบจำลอง และในการจำลองการรั่วไหลของน้ำมันในเดือนต่างๆ จะใช้ข้อมูลลมแบบ uniform คือสม่ำเสมอทั้งทิศทางและความเร็วลม ซึ่งจะอธิบายในลำดับต่อไป

5.1 อิทธิพลของกระแสน้ำและลมต่อการจำลองการรั่วไหลของน้ำมัน

เนื่องจากการจำลองการรั่วของน้ำมัน ข้อมูลนำเข้าที่สำคัญประกอบข้อมูลกระแสน้ำ ข้อมูลลมและข้อมูลคุณสมบัติของน้ำมัน ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดด้านข้อมูลกระแสน้ำในประเทศไทยไม่ได้มีการตรวจวัด และข้อมูลลมของกรมอุตุนิยมวิทยาไม่ได้เป็นตัวแทนของลมที่เกิดขึ้นจริงในทะเล ดังนั้นการศึกษานี้จึงใช้ข้อมูลกระแสน้ำสุทธิรายชั่วโมงจากแบบจำลอง Delft3D และใช้ข้อมูลลม ERA-Interim ราย 6 ชั่วโมง เป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเล โดยเลือกในช่วงวันที่ 27 กรกฎาคม – 1 สิงหาคม พ.ศ.2556 ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดเหตุการณ์น้ำมันรั่วที่บริเวณชายฝั่งทะเลระยอง มาเป็นกรณีศึกษา

การศึกษาคำถามอ่อนไหวของแบบจำลอง GNOME ซึ่งเป็นการจำลองการรั่วไหลของน้ำมันในทะเลโดยพิจารณาจากข้อมูลนำเข้า เบื้องต้นแบ่งการจำลองการรั่วไหลของน้ำมันในทะเลออกเป็น 3 กรณีคือ กรณีแรกใช้เพียงข้อมูลลม ERA-Interim เท่านั้น ถือว่ากระแสน้ำมีค่าเป็นศูนย์ กรณีที่สองใช้เพียงข้อมูลกระแสน้ำสุทธิที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D เพียงอย่างเดียวซึ่งถือว่าความเร็วลมเป็นศูนย์ และกรณีสุดท้ายคือใช้ทั้งข้อมูลกระแสน้ำสุทธิที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D และข้อมูลลม ERA-Interim ผลการศึกษาพบว่า ทั้งกระแสน้ำและลมมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเลมาก หากขาดข้อมูลใดข้อมูลหนึ่งจะทำให้ไม่สามารถคาดการณ์การรั่วไหลของน้ำมันได้ เพราะเมื่อจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเลโดยไม่ใช้ข้อมูลลม พบว่าคราบน้ำมันเคลื่อนที่ไม่ห่างจากจุดรั่วไหลเลยโดยเคลื่อนที่ไปในทิศตะวันตกเฉียงเหนือก่อนไปทางตะวันตกและตะวันออกเฉียงใต้ก่อนไปทางตะวันออก (WNW-ESE) ตามทิศทางของกระแสน้ำสุทธิ หรือหากจำลองการรั่วไหลของน้ำมันโดยใช้ข้อมูลลมเพียงอย่างเดียว จะพบว่าน้ำมันเคลื่อนที่ออกจากจุดรั่วไหลไปตามทิศทางของลม โดยเคลื่อนที่ออกไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือประมาณ 6 กิโลเมตร แต่ตำแหน่งที่ได้ไม่ถูกต้องซึ่งจะ

พบว่าตำแหน่งจะห่างจากตำแหน่งของน้ำมันที่ภาพถ่ายดาวเทียมของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยี อวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) เก็บข้อมูลไว้ได้ประมาณ 7 กิโลเมตร และเมื่อใช้ข้อมูล ลมและกระแสน้ำควบคู่ไปด้วย พบว่าน้ำมันมีการเคลื่อนที่ออกจากจุดเริ่มต้นไปทางทิศ ตะวันออกเฉียงเหนือก่อนไปทางตะวันออกประมาณ 8 กิโลเมตร ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวสอดคล้องกับ ตำแหน่งของน้ำมันที่มีการตรวจวัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 5-1 แสดงให้เห็นว่าในการจำลองการรั่วไหล ของน้ำมันด้วยแบบจำลอง GNOME จำเป็นต้องใช้ข้อมูลทั้งกระแสน้ำและข้อมูลลมในพื้นที่ร่วมกัน



รูปที่ 5-1 อิทธิพลของกระแสน้ำและลมต่อการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเล เมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2556 เวลา 18.35 น.

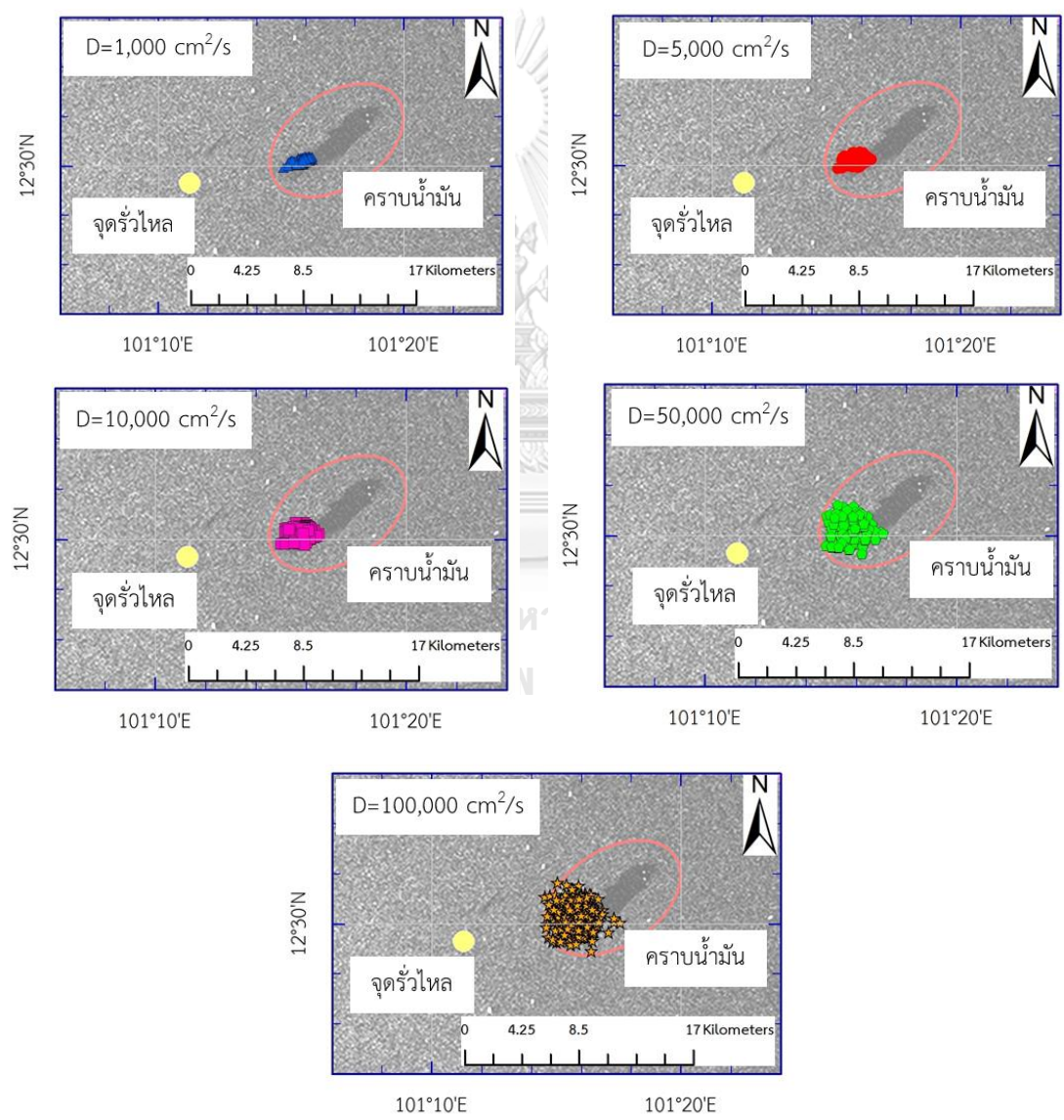
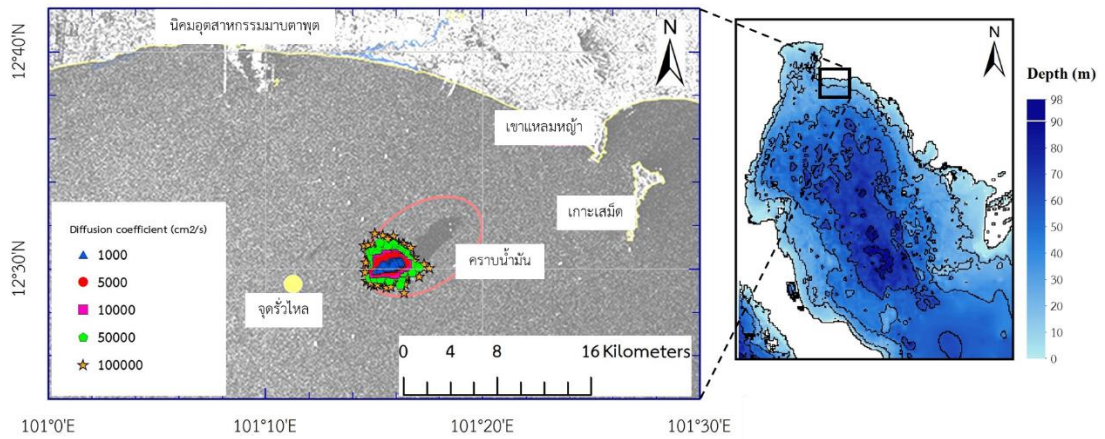
5.2 การสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง

สำหรับการสอบเทียบแบบจำลอง GNOME ซึ่งใช้ในการคาดการณ์การเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเลโดยเลือกช่วงที่เกิดเหตุการณ์น้ำมันรั่วที่บริเวณชายฝั่งทะเลระยอง ในวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2556 เวลา 06.50 น. ซึ่งเป็นเวลาที่เกิดการรั่วไหลของน้ำมัน ถึงวันที่ 1 สิงหาคม พ.ศ. 2556 เนื่องจากเป็นเวลาที่น้ำมันเคลื่อนที่กระทบชายฝั่งแล้ว แต่เนื่องจากข้อจำกัดด้านข้อมูลตำแหน่งของน้ำมันที่รั่วไหลในแต่ละเวลา จึงใช้ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยี อวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) ซึ่งมี 2 เวลา คือเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2556 เวลา 18.31 น. และเมื่อวันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ.2556 เวลา 18.23 น. ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยการรั่วไหลของน้ำมันนี้เป็นน้ำมันดิบ (medium crude) ปริมาณ 316 บาร์เรล (~50 ตัน) สำหรับ

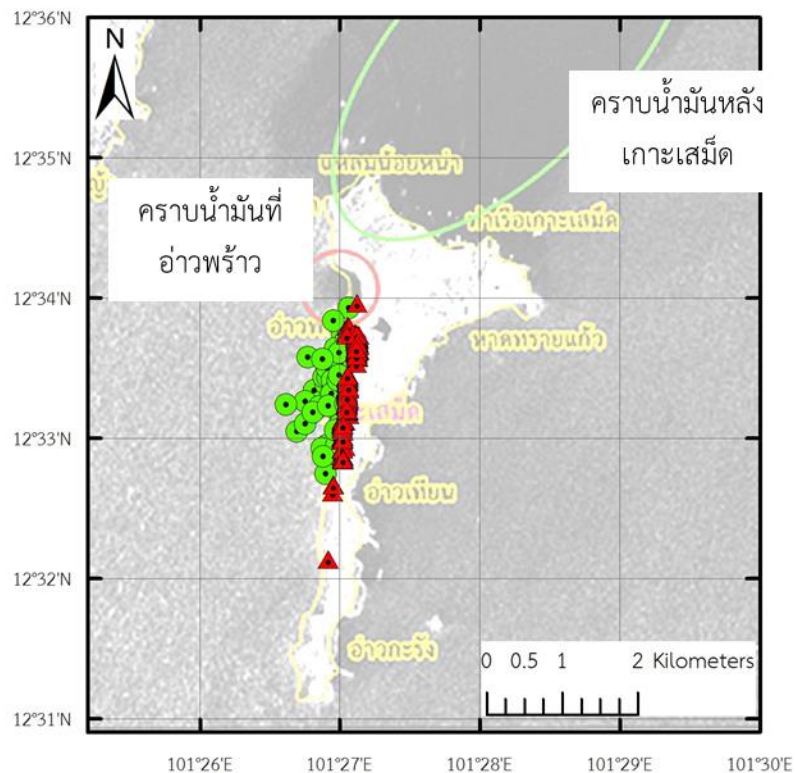
ตำแหน่งที่รั่วไหลคือลองติจูดที่ 101.18° ตะวันออก ละติจูดที่ 12.50° เหนือ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของน้ำมัน (diffusion coefficient, D) เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่จะต้องใช้ในแบบจำลอง GNOME โดยปกติในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของน้ำมันสามารถหาได้จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการ แต่เนื่องจากไม่มีข้อมูลในการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของน้ำมันที่รั่วไหลที่บริเวณชายฝั่งทะเลระยองมาก่อน จึงทำการจำลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของน้ำมันที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของน้ำมันยังมีค่ามาก น้ำมันจะยิ่งกระจายเป็นวงกว้าง โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของน้ำมันที่เหมาะสมคือ $5,000 \text{ cm}^2/\text{s}$ โดยสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา (Hamam, 1987, Ao-leong et al., 2012) ซึ่งจะพบว่าคราบของน้ำมันจะมีความกว้างใกล้เคียงกับความกว้างของคราบน้ำมันที่ตรวจวัดได้ คือกว้างประมาณ 1.5 กิโลเมตร แต่ยังคงพบว่ามีตำแหน่งศูนย์กลางของน้ำมันยังมีความคลาดเคลื่อนจากจุดศูนย์กลางของคราบน้ำมันที่ตรวจวัดได้ประมาณ 4 กิโลเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5-2

สำหรับการสอบเทียบแบบจำลอง GNOME โดยเปรียบเทียบตำแหน่งของคราบน้ำมันเมื่อวันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ.2556 เวลา 18.23 น. พบว่าคราบน้ำมันเคลื่อนตัวขึ้นฝั่งที่เกาะเสม็ด โดยตำแหน่งของคราบน้ำมันจุดแรกที่ขึ้นฝั่งห่างจากอ่าวพร้าว ซึ่งเป็นชายหาดที่น้ำมันขึ้นกระทบฝั่งในเหตุการณ์จริง โดยตำแหน่งของชายฝั่งที่ได้จากแบบจำลองห่างจากอ่าวพร้าวประมาณ 2.5 กิโลเมตร และคราบน้ำมันทั้งหมดไม่ได้เคลื่อนที่ต่อไปด้านหลังเกาะเสม็ดเหมือนกับตำแหน่งที่ได้จากภาพถ่ายทางอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 5-3 สำหรับสาเหตุที่แบบจำลอง GNOME จำลองคราบน้ำมันไม่ได้เคลื่อนที่ต่อไปด้านหลังเกาะเสม็ดน่าจะเป็นเพราะข้อจำกัดของกระแสน้ำใกล้ชายฝั่งที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D ซึ่งยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ ทำให้ตำแหน่งของน้ำมันกระทบชายฝั่งก่อนถึงอ่าวพร้าวและไม่ได้เคลื่อนต่อไปด้านหลังเกาะเสม็ด

จากการสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง GNOME ในการคาดการณ์การเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเล พบว่าตำแหน่งที่น้ำมันเคลื่อนที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ตรวจวัดได้แต่ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ประมาณ 3 – 4 กิโลเมตร



รูปที่ 5-2 การสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของน้ำมัน (diffusion coefficient, D) แบบจำลอง GNOME เมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2556 เวลา 18.31 น.



ตำแหน่งของน้ำมันที่ได้จากแบบจำลอง

- Oil spills at water surface
- ▲ Oil spills on land

รูปที่ 5-3 ตำแหน่งคราบน้ำมันรั่วไหลในทะเลที่เกาะเสม็ด เมื่อวันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ.2556 เวลา 18.23 น. หลังจากจำลองการรั่วไหล 60 ชั่วโมง

5.3 การคาดการณ์การเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเลในพื้นที่ศึกษา

5.3.1 การคาดการณ์การเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในแต่ละเดือน

สำหรับการจำลองการรั่วไหลน้ำมันในทะเลภายใต้กรณีศึกษาต่างๆ จะทำการจำลองโดยคำนึงถึงความเร็วและทิศทางของลมในเดือนต่างๆ จากการวิเคราะห์ข้อมูลลมตั้งที่กล่าวในบทที่ 4 ทั้งนี้จะกำหนดความเร็วและทิศทางของลมเป็นแบบ uniform คือไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วและทิศทาง และใช้ชนิดและปริมาณของน้ำมันเหมือนกับเหตุการณ์ที่เคยเกิดขึ้นเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2556 คือ น้ำมันดิบความหนาแน่นปานกลาง (medium crude) ปริมาณ 50 ตัน เนื่องจากในตำแหน่งดังกล่าวเป็นตำแหน่งของทุ่นรับน้ำมันดิบ (single point mooring) ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนถ่ายน้ำมันจากเรือลำใหญ่สู่เรือลำเล็กและขนถ่ายน้ำมันเข้าฝั่งต่อมา ดังแสดงในรูปที่ 5-4 ที่มีความเสี่ยงต่อการรั่วไหลของน้ำมันสูงในบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเป็นจุดที่ใช้ในการศึกษา และเลือกกระแสน้ำสุทธิตาม

รายชั่วโมงในช่วงเป็นน้ำเกิด (Spring tide) ที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลอง Delft3D โดยเลือกวันในแต่ละเดือนมาใช้ในการจำลองการรั่วไหล 5 วัน มาใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหล สำหรับความเร็วและทิศทางของลมที่ใช้ในแบบจำลอง GNOME พิจารณาจากการวิเคราะห์ข้อมูลลม ERA-Interim ราย 6 ชั่วโมง โดยพิจารณาใน 2 กรณี คือ กรณีทิศทางที่ลมเคลื่อนที่มาจากทิศทางที่ลมเคลื่อนที่มามากที่สุดในเดือนต่างๆ และกรณีความเร็วลมเฉลี่ยในเดือนต่างๆ โดยความเร็วลมปกติพิจารณาจากช่วงความเร็วลมที่เกิดขึ้นมากที่สุดในเดือนต่างๆ ส่วนความเร็วลมสูงสุดพิจารณาจากช่วงความเร็วสูงสุดที่พบ ดังแสดงในตารางที่ 5-1



รูปที่ 5-4 ท่อนรับน้ำมันดิบ (single point mooring)

(ที่มา: <http://www.marinerthai.net/forum/index.php?topic=1023.0>)

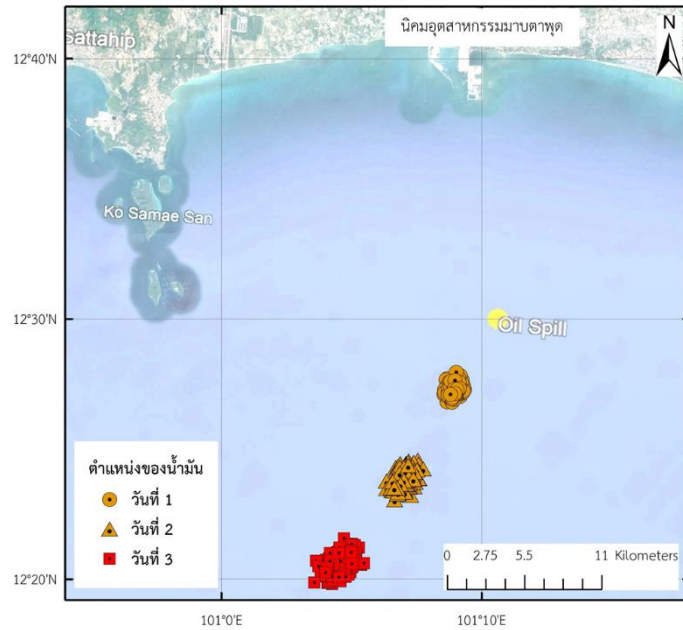
ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเลด้วยแบบจำลอง GNOME พบว่า ทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำมันสอดคล้องกับทิศทางของลม ซึ่งจากทิศทางของลมที่ใช้ในแต่ละเดือนสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือ

ลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ในเดือนตุลาคมถึงเดือนมกราคม ซึ่งตรงกับช่วงฤดูลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ในกรณีความเร็วปกติ (3 เมตร/วินาที) ในเดือนตุลาคม, พฤศจิกายน และเดือนมกราคมส่งผลให้คราบน้ำมันเคลื่อนตัวห่างออกจากฝั่งไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ โดยหลังจากรั่วไหล 1, 2 และ 3 วัน จะพบว่าน้ำมันจะเคลื่อนที่ไป 6, 13 และ 20 กิโลเมตรจากจุดรั่วไหลตามลำดับ ทั้งนี้จะพบว่ายิ่งผ่านไปหลายวัน น้ำมันจะกระจายตัวเป็นวงกว้างขึ้นโดยในวันที่สามหลังจากรั่วไหล จะพบว่าคราบน้ำมันมีขนาดประมาณ 2.4×3.8 กิโลเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5-5 ส่วนถ้าความเร็วลมสูงสุด (5 เมตร/วินาที) พบว่าคราบน้ำมันเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน แต่จะพบว่าจะเคลื่อนที่ไปได้ไกลกว่าโดยในวันที่ 1 และ 2 พบว่าน้ำมันจะเคลื่อนที่ไป 10.5 และ 22.7 กิโลเมตรจาก

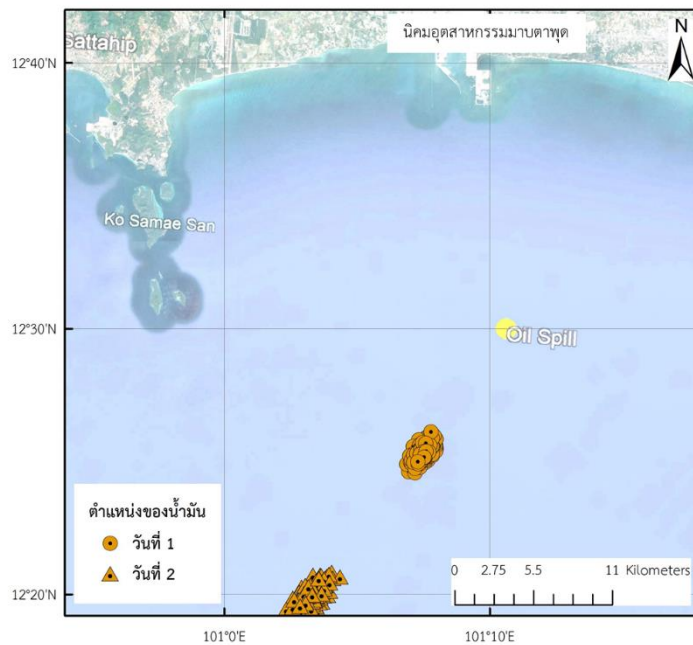
จุดรั่วไหล ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5-6 สำหรับการรั่วไหลในเดือนธันวาคม ในช่วงที่ความเร็วปกติ (5 เมตร/วินาที) จะพบว่าตำแหน่งของน้ำมันที่รั่วไหลจะเหมือนกับช่วงเดือนตุลาคม, พฤศจิกายน และเดือนมกราคม ที่ความเร็วสูงสุด เนื่องจากความเร็วลมมีค่าเท่ากัน ส่วนเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นเป็น 7 เมตร/วินาที ตำแหน่งของน้ำมันจะเคลื่อนที่ห่างจากจุดรั่วไหลไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้เป็นระยะทางประมาณ 16 กิโลเมตร ดังแสดงในรูป 5-7 จากทิศทางการเคลื่อนที่ในเดือนตุลาคมถึงเดือนมกราคม จะพบว่าคราบน้ำมันจะเคลื่อนที่ออกจากชายฝั่งระยอง

ตารางที่ 5-1 ความเร็วและทิศทางของลม ERA-Interim ที่ใช้ในการจำลองน้ำมันที่รั่วไหลบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง

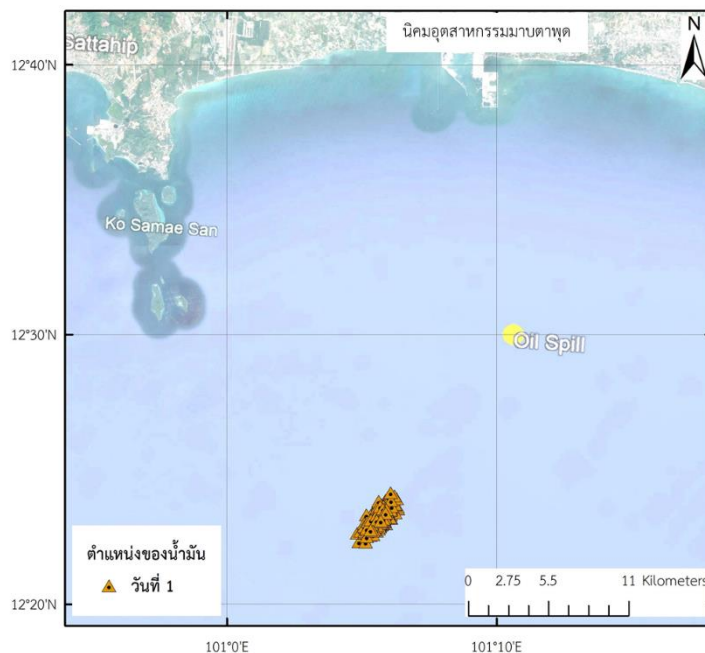
เดือน	ทิศทาง	ความเร็วลมปกติ (เมตร/วินาที)	ความเร็วลมสูงสุด (เมตร/วินาที)
มกราคม	NE	3	5
กุมภาพันธ์	S	3	5
มีนาคม	S	3	5
เมษายน	S	3	5
พฤษภาคม	SW	5	7
มิถุนายน	WSW	5	7
กรกฎาคม	WSW	5	7
สิงหาคม	WSW	5	7
กันยายน	WSW	3	5
ตุลาคม	NE	3	5
พฤศจิกายน	NE	3	5
ธันวาคม	NE	5	7



รูปที่ 5-5 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ
ในเดือนตุลาคม, พฤศจิกายน และเดือนมกราคม ช่วงที่ความเร็วลมปกติ (3 เมตร/วินาที)



รูปที่ 5-6 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ
ในเดือนตุลาคม, พฤศจิกายน และเดือนมกราคม ช่วงที่ความเร็วลมสูงสุด (5 เมตร/วินาที) และใน
เดือนธันวาคม ช่วงที่ความเร็วลมปกติ (5 เมตร/วินาที)



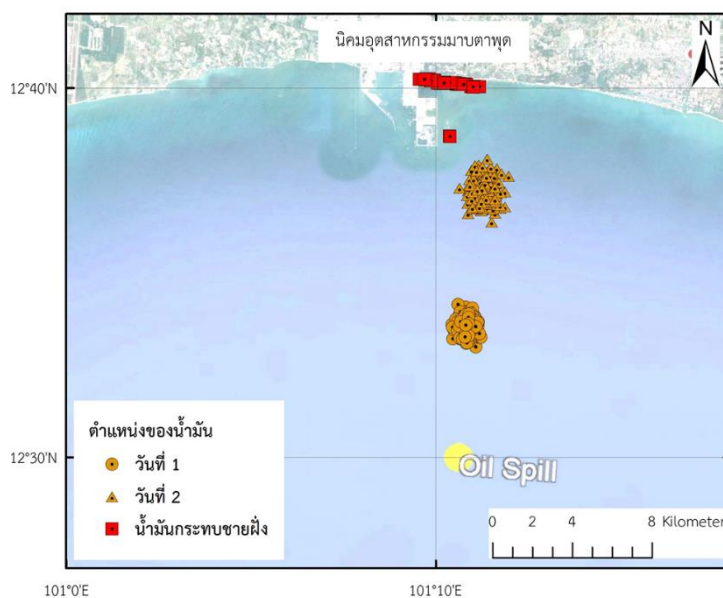
รูปที่ 5-7 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือในเดือนธันวาคม ช่วงที่ความเร็วลมสูงสุด (7 เมตร/วินาที)

ตารางที่ 5-2 เวลาที่น้ำมันกระทบชายฝั่งหลังจากเคลื่อนที่ออกจากจุดปล่อย (spill) ในช่วงความเร็วลมปกติและความเร็วลมสูงสุด

เดือน	เวลา (ชั่วโมง)	
	ความเร็วลมปกติ	ความเร็วลมสูงสุด
กุมภาพันธ์	64	38
มีนาคม	66	39
เมษายน	65	40
พฤษภาคม	46	33
มิถุนายน	57	40
กรกฎาคม	57	40
สิงหาคม	58	41
กันยายน	91	56

ลมจากทิศใต้ (S) ในเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน ซึ่งอยู่ในช่วงเปลี่ยนฤดูลมมรสุม โดยเมื่อเป็นช่วงความเร็วลมปกติ 3 เมตร/วินาที จะส่งผลให้คราบน้ำมันเคลื่อนตัวไปทางทิศเหนือโดย

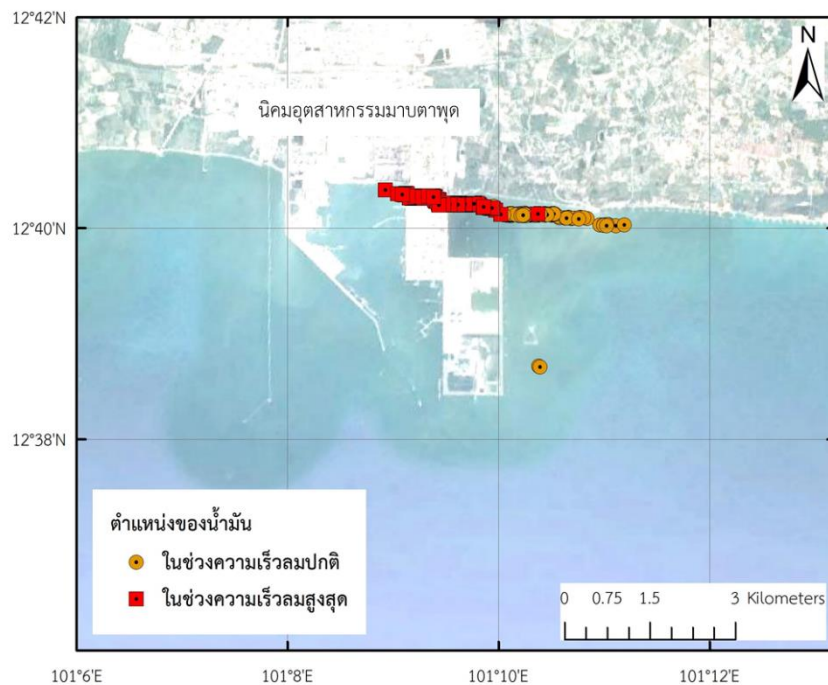
กระทบบชายฝั่งระยอง บริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด โดยหลังจากรั่วไหล 1 และ 2 วัน จะพบว่า น้ำมันจะเคลื่อนที่ไป 6.6 และ 13.6 กิโลเมตรจากจุดรั่วไหล ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5-8 และเคลื่อนที่กระทบบชายฝั่งบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ใช้เวลาประมาณ 65 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 5-2 ส่วนในช่วงที่ความเร็วลมสูงสุด 5 เมตร/วินาที พบว่าในวันแรกหลังจากน้ำมันรั่วไหล น้ำมันเคลื่อนที่ไปในทิศเหนือเป็นระยะทาง 11.6 กิโลเมตร และเคลื่อนที่กระทบบชายฝั่งบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 5-9 แต่ใช้เวลาเพียง 39 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 5-2 เมื่อเปรียบเทียบระยะทางที่น้ำมันเคลื่อนที่กระทบบชายฝั่งจะพบว่าถ้าความเร็วปกติ คราบน้ำมันจะกระทบบเป็นชายฝั่งยาวประมาณ 3 กิโลเมตร ส่วนในช่วงความเร็วลมสูงสุด คราบน้ำมันจะเคลื่อนที่กระทบบชายฝั่งยาวประมาณ 2 กิโลเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5-10 ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของน้ำมันที่เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น น้ำมันจะแพร่กระจายตัวกว้างทำให้ระยะทางของชายฝั่งที่น้ำมันเคลื่อนที่กระทบบในช่วงลมปกติมีระยะทางที่ยาวกว่าช่วงความเร็วลมสูงสุดประมาณ 1 กิโลเมตร แต่จะเห็นได้ว่าเนื่องจากในแบบจำลอง GNOME ไม่ได้ใช้ขอบเขตชายฝั่งที่ละเอียด ทำให้คราบน้ำมันเคลื่อนที่ผ่านท่าเทียบเรือในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ซึ่งในความจริงแล้วคราบน้ำมันน่าจะกระทบบท่าเทียบเรือที่ยื่นออกมาในทะเลแล้ว



รูปที่ 5-8 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศใต้ในเดือนกุมภาพันธ์, มีนาคม และเมษายน ช่วงที่ความเร็วลมปกติ (3 เมตร/วินาที)

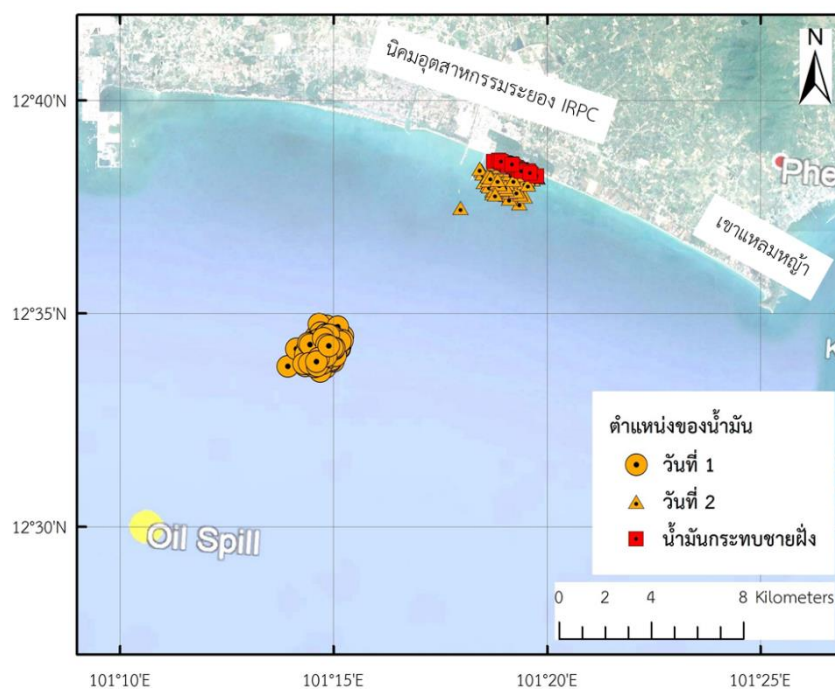


รูปที่ 5-9 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศใต้ในเดือนกุมภาพันธ์, มีนาคม และเมษายน ช่วงที่ความเร็วลมสูงสุด (5 เมตร/วินาที)

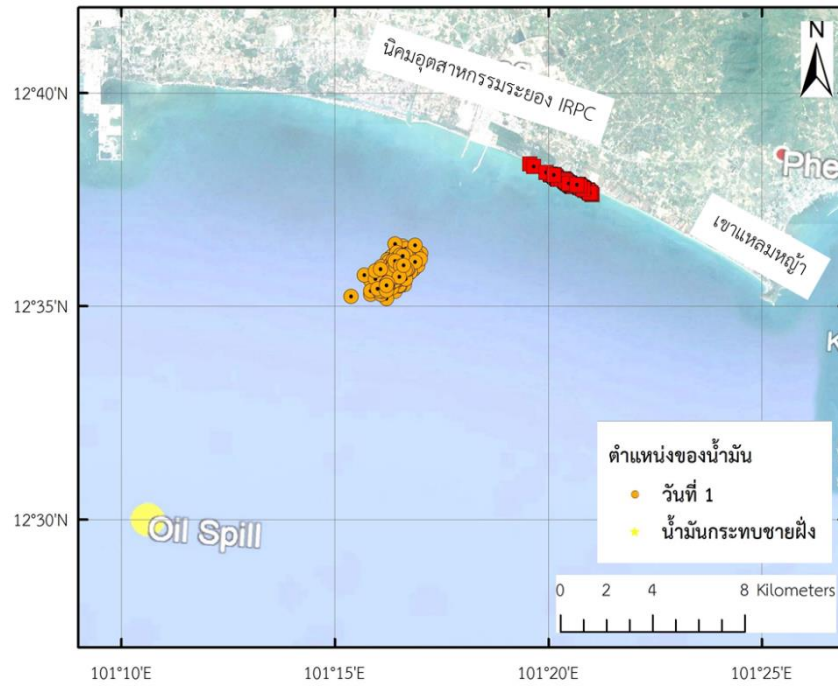


รูปที่ 5-10 ตำแหน่งของน้ำมันที่เคลื่อนที่กระทบชายฝั่งบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด เนื่องจากลมจากทิศใต้ในเดือนกุมภาพันธ์, มีนาคม และเมษายน ในช่วงที่ความเร็วลมปกติ (3 เมตร/วินาที) และช่วงที่ความเร็วลมสูงสุด (5 เมตร/วินาที)

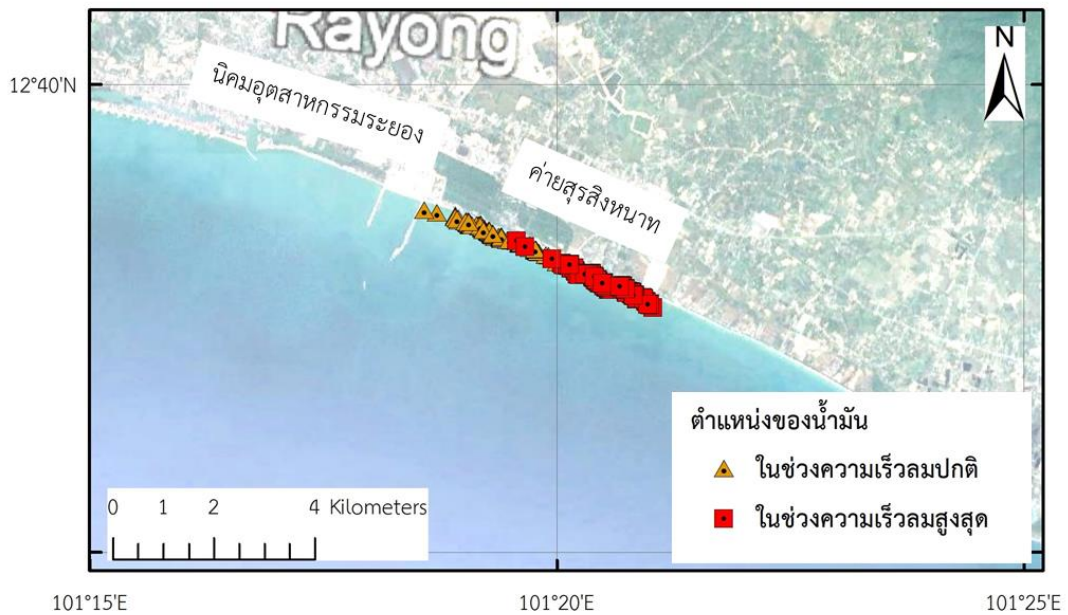
ในเดือนพฤษภาคม ลมเคลื่อนที่มาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ซึ่งเป็นช่วงฤดูลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งในช่วงความเร็วลมปกติ 5 เมตร/วินาที พบว่าน้ำมันเคลื่อนตัวไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ โดยหลังจากรั่วไหล 1 และ 2 วัน จะพบว่าน้ำมันจะเคลื่อนที่ไป 10.8 และ 21 กิโลเมตรจากจุดรั่วไหล ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5-11 โดยกระทบชายฝั่งหลังจากรั่วไหลประมาณ 46 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 5-2 ส่วนในช่วงความเร็วลมสูงสุด 7 เมตร/วินาที พบว่าในวันแรกหลังจากน้ำมันรั่วไหล น้ำมันเคลื่อนที่ไปในทิศตะวันออกเฉียงเหนือเป็นระยะทาง 15 กิโลเมตร และกระทบชายฝั่งระยองบริเวณนิคมอุตสาหกรรมระยอง (IRPC) ดังแสดงในรูปที่ 5-12 แต่ถ้าความเร็วสูงสุดใช้เวลาเพียง 33 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 5-2 เมื่อเปรียบเทียบระยะทางที่น้ำมันเคลื่อนที่กระทบชายฝั่งจะพบว่าถ้าความเร็วปกติ คราบน้ำมันจะกระทบเป็นชายฝั่งบริเวณนิคมอุตสาหกรรมระยองยาวไปทางทิศตะวันออกประมาณ 3.5 กิโลเมตร ซึ่งเป็นบริเวณค่ายมหาสุรสิงหนาท ส่วนในช่วงความเร็วลมสูงสุด คราบน้ำมันจะเคลื่อนที่กระทบชายฝั่งบริเวณค่ายมหาสุรสิงหนาท ยาวประมาณ 2.5 กิโลเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5-13



รูปที่ 5-11 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ ในเดือนพฤษภาคม ช่วงที่ความเร็วลมปกติ (5 เมตร/วินาที)

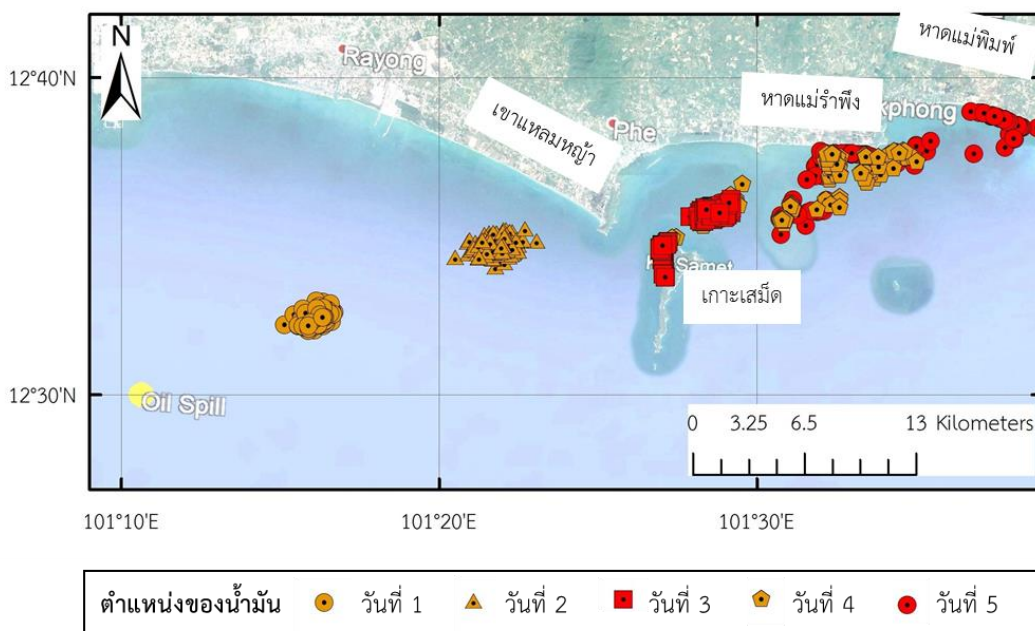


รูปที่ 5-12 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ ในเดือนพฤษภาคม ช่วงที่ความเร็วลมสูงสุด (7 เมตร/วินาที)

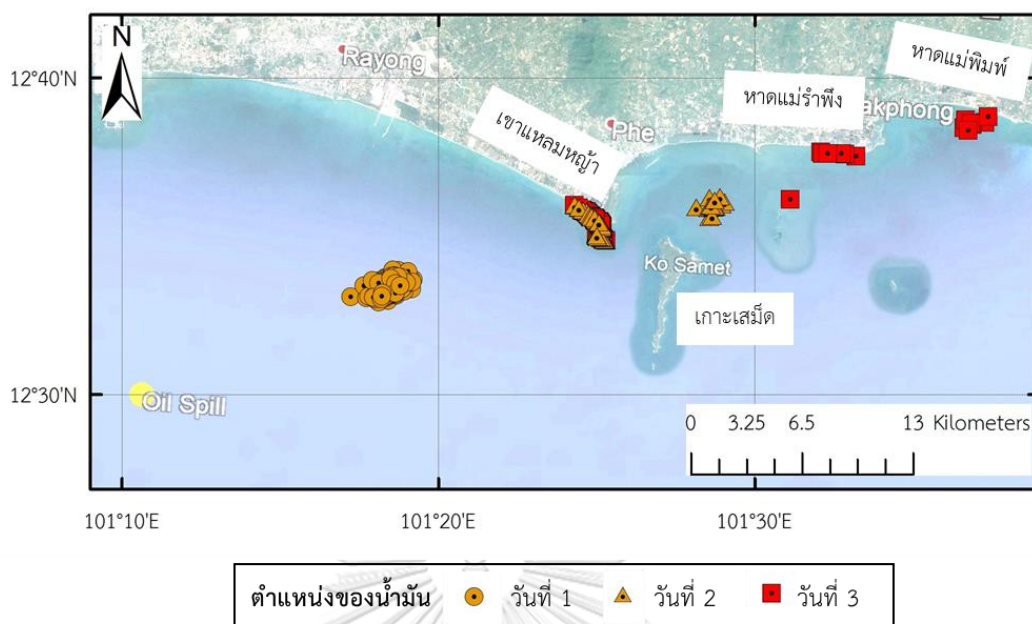


รูปที่ 5-13 ตำแหน่งของน้ำมันที่เคลื่อนที่กระทบชายฝั่งบริเวณนิคมอุตสาหกรรมระยอง เนื่องจากลมจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ ในเดือนพฤษภาคม ในช่วงที่ความเร็วลมปกติ (5 เมตร/วินาที) และช่วงที่ความเร็วลมสูงสุด (7 เมตร/วินาที)

ลมที่เคลื่อนมาทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางตะวันตก (WSW) ในเดือนมิถุนายนถึงเดือนสิงหาคม ในช่วงความเร็วลมปกติที่มีความเร็ว 5 เมตร/วินาที น้ำมันเคลื่อนตัวไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือก่อนไปทางตะวันออก โดยหลังจากรั่วไหล 1 - 2 วัน จะพบว่าน้ำมันจะเคลื่อนที่ไป 11 และ 22 กิโลเมตรจากจุดรั่วไหล และในวันที่สามน้ำมันบางส่วนจะเคลื่อนที่กระทบชายฝั่งอ่าวพร้าว เกาะเสม็ด เป็นระยะทาง 2 กิโลเมตร ซึ่งใช้เวลาประมาณ 57 ชั่วโมงหลังจากรั่วไหล ดังแสดงในตารางที่ 5-2 และมีบางส่วนเคลื่อนที่ต่อไปทางทิศเหนือของเกาะเสม็ด หลังจากนั้นในวันที่สี่ คราบน้ำมันเคลื่อนที่กระจายไปทั่วบริเวณหาดแม่รำพึง และในวันที่ 5 คราบน้ำมันจะเคลื่อนที่ไปกระทบชายฝั่งบริเวณหาดแม่พิมพ์ ซึ่งห่างจากจุดรั่วไหลประมาณ 52 กิโลเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5-14 ส่วนในช่วงที่ความเร็วลมสูงสุด พบว่าคราบน้ำมันเคลื่อนที่ไปในทิศทิศตะวันออกเฉียงเหนือก่อนไปทางตะวันออกเช่นกัน แต่ในวันแรกเคลื่อนที่ห่างจากจุดรั่วไหลประมาณ 16 กิโลเมตร และกระทบชายฝั่งในบริเวณอุทยานแห่งชาติเขาแหลมหญ้าเป็นทางยาวประมาณ 3 กิโลเมตรหลังจากรั่วไหล 40 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 5-2 ทั้งนี้ยังมีน้ำมันที่บางส่วนหลุดไปด้านหลังเกาะเสม็ดด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5-15

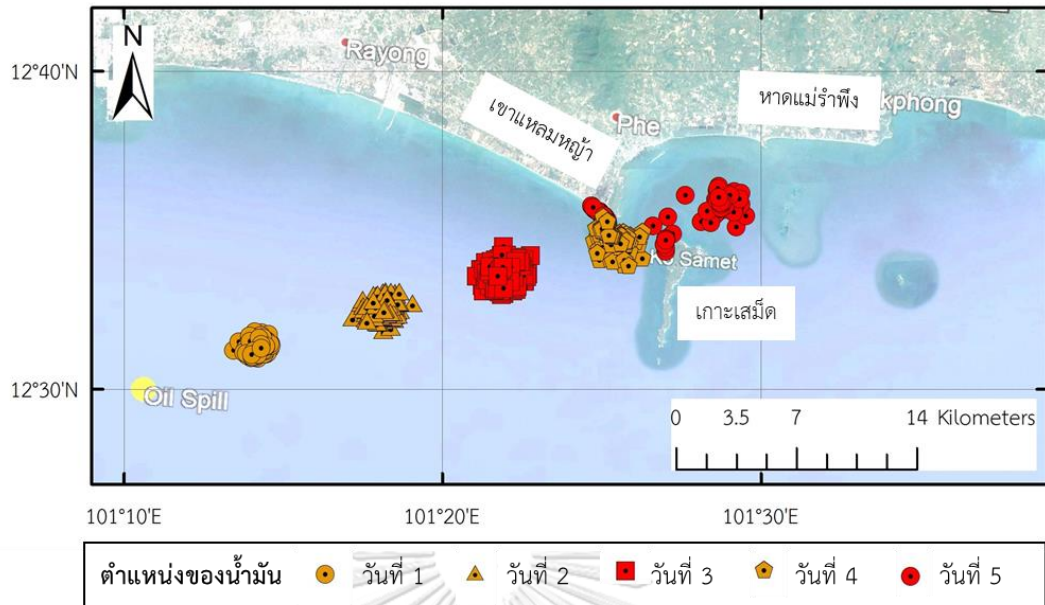


รูปที่ 5-14 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางตะวันตก ในเดือนมิถุนายนถึงเดือนสิงหาคม ช่วงที่ความเร็วลมปกติ (5 เมตร/วินาที)

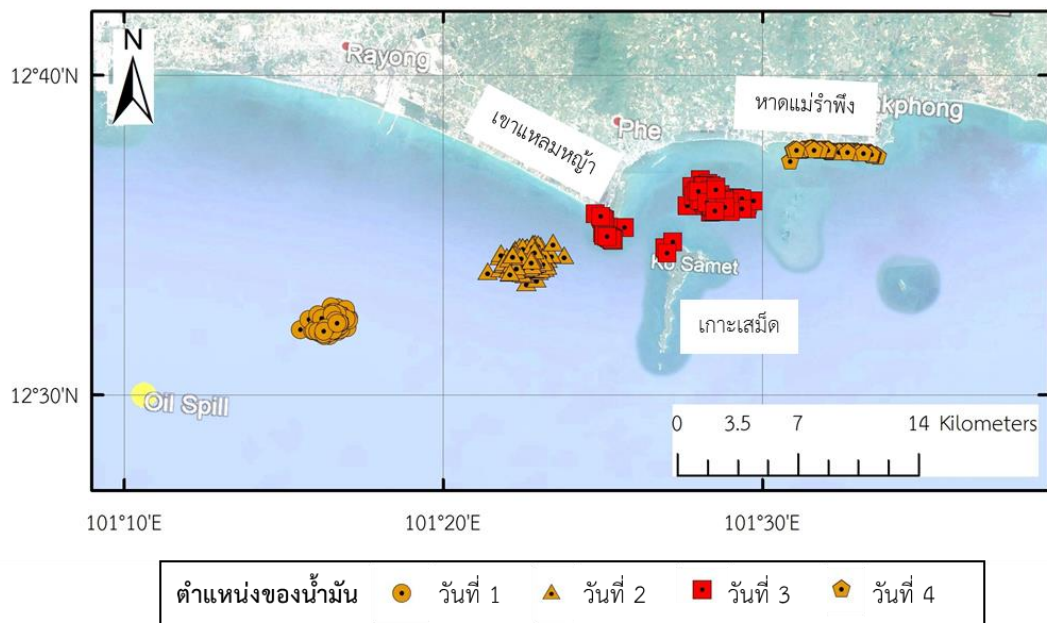


รูปที่ 5-15 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันตก ในเดือนมิถุนายนถึงเดือนสิงหาคม ช่วงที่ความเร็วลมสูงสุด (7 เมตร/วินาที)

ในเดือนกันยายน ลมเคลื่อนที่มาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันตก แต่ในช่วงที่ความเร็วลมปกติมีความเร็วลม 3 เมตร/วินาที พบว่าเมื่อน้ำมันรั่วไหล น้ำมันจะเคลื่อนที่ไปในทิศตะวันออกเฉียงเหนือค่อนไปทางตะวันออก โดยหลังจากรั่วไหล 1 – 3 วัน น้ำมันเคลื่อนตัวห่างจากจุดรั่วไหลประมาณ 7, 14.5 และ 21 กิโลเมตร ตามลำดับ และเคลื่อนตัวกระทบชายฝั่งบริเวณอุทยานแห่งชาติเขาแหลมหญ้า ซึ่งใช้เวลาประมาณ 91 ชั่วโมงหลังจากรั่วไหล ดังแสดงในตารางที่ 5-2 แต่น้ำมันบางส่วนยังเคลื่อนที่ไปทางด้านทิศเหนือของเกาะเสม็ด ดังแสดงในรูปที่ 5-16 ส่วนในช่วงความเร็วลมสูงสุดพบว่าหลังจากน้ำมันรั่วไหล 1 – 2 วัน คราบน้ำมันจะเคลื่อนที่ไปในทิศตะวันออกเฉียงเหนือค่อนไปทางตะวันออก ห่างจากจุดรั่วไหลประมาณ 12 และ 24 กิโลเมตร ตามลำดับ คราบน้ำมันบางส่วนจะเคลื่อนกระทบชายฝั่งที่บริเวณเขาแหลมหญ้าหลังจากรั่วไหล 56 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 5-2 และบางส่วนเคลื่อนกระทบที่เกาะเสม็ด ทั้งนี้ น้ำมันส่วนใหญ่จะเคลื่อนไปทางด้านทิศเหนือของเกาะเสม็ด และวันที่ที่น้ำมันจะเคลื่อนที่กระทบชายฝั่งบริเวณหาดแม่รำพึงเป็นระยะทางประมาณ 5 กิโลเมตร ทั้งนี้จะพบว่าในเดือนกันยายนเป็นช่วงเปลี่ยนฤดูลมมรสุมความเร็วลมในเดือนนี้จึงน้อยกว่าในเดือนก่อนหน้าทำให้เวลาในการเคลื่อนที่ของน้ำมันในทะเลนานกว่าปกติ



รูปที่ 5-16 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันตก ในเดือนกันยายน ช่วงที่ความเร็วลมปกติ (3 เมตร/วินาที)



รูปที่ 5-17 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันตก ในเดือนกันยายน ช่วงที่ความเร็วลมปกติ (5 เมตร/วินาที)

เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่น้ำมันเคลื่อนตัวกระทบชายฝั่งระหว่างความเร็วลมปกติและความเร็วลมสูงสุด พบว่าโดยหากความเร็วลมมากคราบน้ำมันก็จะเคลื่อนที่ไปได้ไกลและกระทบชายฝั่งก่อน โดยระยะเวลากระทบกับชายฝั่งต่างกันประมาณ 18 - 24 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 5-2 จากผลการศึกษาพบว่าเดือนพฤษภาคมเป็นเดือนที่น้ำมันเคลื่อนตัวกระทบชายฝั่งใช้เวลาน้อยที่สุด แม้ว่าความเร็วลมจะเท่ากันเดือนมิถุนายนถึงเดือนสิงหาคม (5 เมตร/วินาที) และถ้าความเร็วลมสูงสุดจะใช้เวลาเพียง 33 ชั่วโมง ที่น้ำมันจะเคลื่อนตัวกระทบชายฝั่ง

5.3.2 การคาดการณ์การเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย

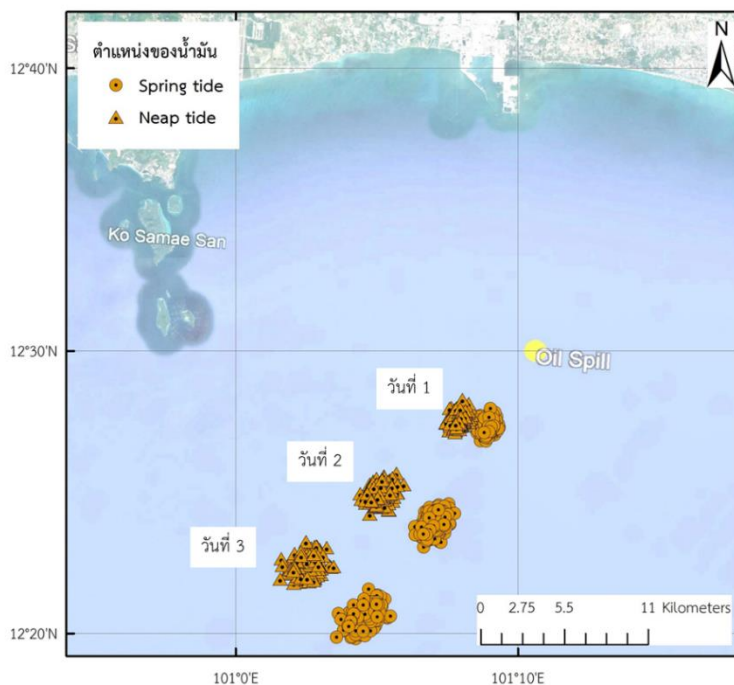
เมื่อทำการจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเลเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในช่วงน้ำเกิดและน้ำตายในแต่ละเดือน โดยกำหนดตำแหน่ง ชนิด และปริมาณของน้ำมันเหมือนกัน และใช้ข้อมูลความเร็วและทิศทางของลมปกติในแต่ละเดือนดังแสดงในตารางที่ 5-1

ผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเลทั้งในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย ในช่วงที่ลมเคลื่อนที่มาจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่าทิศทางของคราบน้ำมันที่เคลื่อนตัวจากจุดรั่วไหลไปในทิศตะวันตกเฉียงใต้เช่นเดียวกัน โดยในวันแรกหลังจากรั่วไหลตำแหน่งของน้ำมันทั้ง 2 ช่วงจะอยู่ห่างกันประมาณ 2.5 กิโลเมตร แต่เมื่อเวลาผ่านไป 2 - 3 วัน ตำแหน่งของคราบน้ำมันจะห่างกันมากขึ้น โดยห่างกันประมาณ 4.5 และ 5 กิโลเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5-18

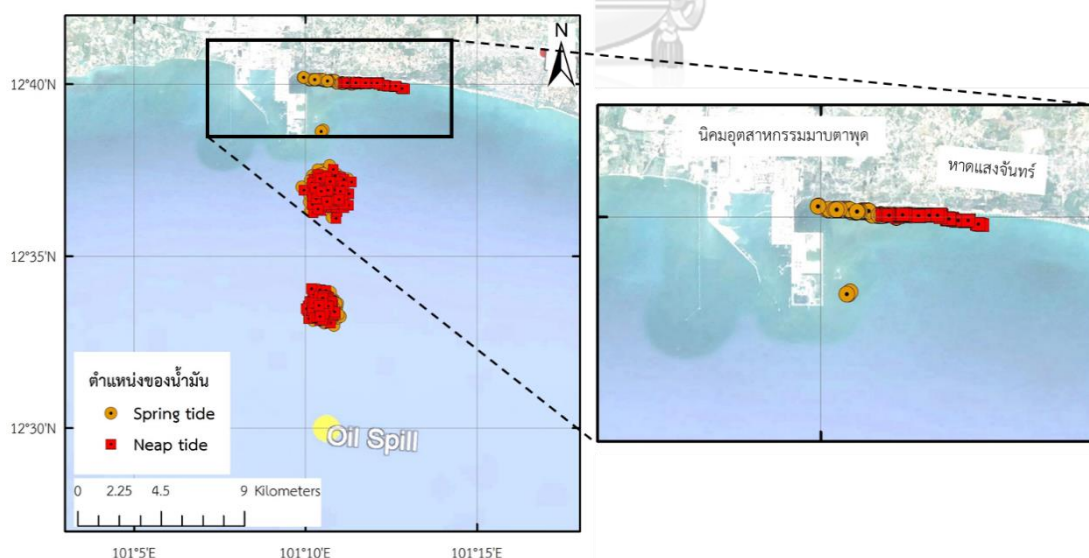
ในเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน ซึ่งลมเคลื่อนที่มาจากทิศใต้ พบว่าหลังจากน้ำมันรั่วไหล 1 - 2 วัน ตำแหน่งของคราบน้ำมันทั้งในช่วงน้ำเกิดและน้ำตายอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน แต่ตำแหน่งที่น้ำมันเคลื่อนที่กระทบชายฝั่งห่างกันประมาณ 2 กิโลเมตร โดยในช่วงน้ำเกิดน้ำมันกระทบชายฝั่งตั้งแต่บริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดยาวไปทางตะวันออกเฉียงประมาณ 3.2 กิโลเมตร ส่วนในช่วงน้ำตายคราบน้ำมันเคลื่อนที่กระทบชายฝั่งบริเวณหาดแสงจันทร์เป็นระยะทางยาวประมาณ 3.4 กิโลเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5-19 ส่วนเวลาที่คราบน้ำมันเคลื่อนที่กระทบชายฝั่งแตกต่างกันประมาณ 1 - 3 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 5-3

ในเดือนพฤษภาคม ลมเคลื่อนที่มาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) พบว่าตำแหน่งของคราบน้ำมันหลังจากรั่วไหล 1 วันอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน ส่วนตำแหน่งของน้ำมันที่กระทบชายฝั่งแตกต่างกัน โดยในช่วงน้ำเกิด คราบน้ำมันเคลื่อนตัวกระทบชายฝั่งที่บริเวณนิคมอุตสาหกรรมระยอง (IRPC) ยาวประมาณ 2 กิโลเมตร ส่วนในช่วงน้ำตายคราบน้ำมันเคลื่อนตัวกระทบชายฝั่งที่บริเวณค่ายสุรสิงหนาท ซึ่งอยู่ห่างจากนิคมอุตสาหกรรมระยอง (IRPC) ประมาณ 1.6 กิโลเมตร โดยคราบน้ำมันที่กระทบชายฝั่งมีความยาวประมาณ 2 กิโลเมตรเช่นกัน ส่วนเวลาที่คราบน้ำมันเคลื่อนที่กระทบชายฝั่ง

ในช่วงน้ำตายใช้เวลาถึงฝั่งก่อนช่วงน้ำเกิดประมาณ 5 ชั่วโมง ซึ่งมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5-20



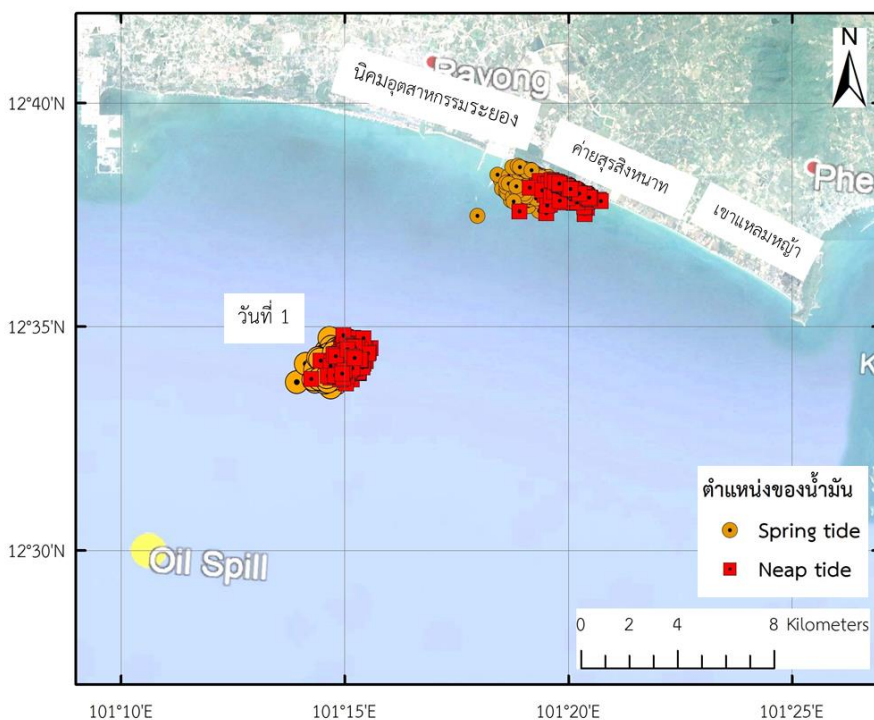
รูปที่ 5-18 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย



รูปที่ 5-19 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศใต้ ในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย

ตารางที่ 5-3 เวลาที่น้ำมันกระทบชายฝั่งทะเลระยองหลังจากเคลื่อนที่ออกจากจุดปล่อย (spill) ในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย

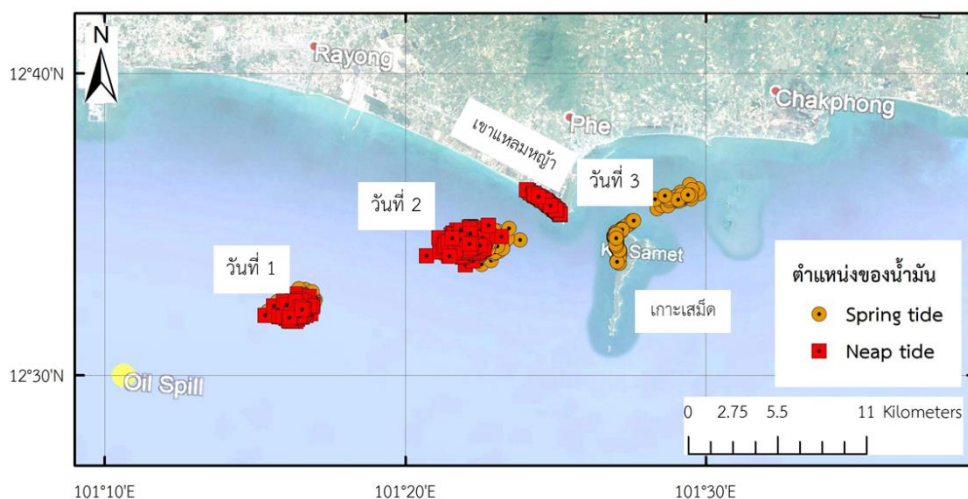
เดือน	เวลา (ชั่วโมง)	
	น้ำเกิด	น้ำตาย
กุมภาพันธ์	64	67
มีนาคม	66	68
เมษายน	65	64
พฤษภาคม	46	41
มิถุนายน	57	57
กรกฎาคม	57	57
สิงหาคม	58	58
กันยายน	91	94



รูปที่ 5-20 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ ในเดือนพฤษภาคม ในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย

ช่วงฤดูลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ระหว่างเดือนมิถุนายนถึงเดือนกันยายน ซึ่งลมที่เคลื่อนมาทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนข้างไปทางตะวันตก (WSW) พบว่าในเดือนมิถุนายนถึงเดือนกันยายน

หลังจากน้ำมันรั่วไหล 1 วัน คราบน้ำมันทั้งสองอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน แต่เมื่อผ่านไปอีกหนึ่งวันพบว่า น้ำมันในช่วงน้ำเกิดเคลื่อนที่ไปไกลกว่าคราบน้ำมันในช่วงน้ำตายประมาณ 1.5 กิโลเมตร ทั้งนี้พบว่า คราบน้ำมันในช่วงน้ำเกิดจะเคลื่อนกระทบชายฝั่งบริเวณอ่าวพร้าว เกาะเสม็ด ส่วนในช่วงน้ำตายจะเคลื่อนกระทบชายฝั่งบริเวณอุทยานแห่งชาติเขาแหลมหญ้า ดังแสดงในรูปที่ 5-21 ทั้งนี้คราบน้ำมันจะใช้เวลาเคลื่อนที่กระทบชายฝั่งใช้เวลาเท่ากันทั้งในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย ดังแสดงในตารางที่ 5-3



รูปที่ 5-21 การเคลื่อนที่ของน้ำมันบริเวณชายฝั่งทะเลระยองเนื่องจากลมจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ก่อนไปทางตะวันตก ในเดือนมิถุนายนถึงเดือนกันยายน ในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่น้ำมันเคลื่อนตัวกระทบชายฝั่งทะเลระยองระหว่างช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย พบว่าในเดือนมิถุนายนถึงเดือนสิงหาคมไม่มีความแตกต่างของเวลาที่คราบน้ำมันเคลื่อนที่กระทบชายฝั่ง ส่วนในเดือนอื่นๆ เวลาที่น้ำมันเคลื่อนกระทบชายฝั่งทะเลระยองแตกต่างกันประมาณ 1 - 5 ชั่วโมง ทั้งนี้พบว่าในเดือนพฤษภาคมและเดือนกันยายนที่ในช่วงน้ำตายระยะเวลาที่น้ำมันกระทบชายฝั่งเร็วกว่าช่วงน้ำเกิดแต่ก็เร็วกว่าประมาณ 3 - 5 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 5-3

จากการจำลองการรั่วไหลของน้ำมันในทะเลในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย แม้ว่าทิศทางการเคลื่อนที่น้ำมันจะมีทิศทางไปในทางเดียวกันก็ตาม แต่ตำแหน่งของน้ำมันที่เคลื่อนที่และตำแหน่งที่น้ำมันเคลื่อนที่กระทบชายฝั่งจะแตกต่างกัน ส่วนเวลาที่น้ำมันเคลื่อนที่กระทบชายฝั่งส่วนใหญ่ในช่วงน้ำตายจะใช้เวลาช้ากว่า 1 - 3 ชั่วโมงหรือใช้เวลาเท่ากัน ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละเดือน ดังนั้นในการศึกษาการคาดการณ์การรั่วไหลของน้ำมันในทะเล จะต้องพิจารณาผลทั้งสิ้น ลม และกระแสน้ำในช่วงเวลาที่เกิด เพราะตำแหน่งของน้ำมันจะเปลี่ยนแปลงตามทุกปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อทำการศึกษาการคาดการณ์การเคลื่อนตัวของน้ำมันที่รั่วไหล บริเวณชายฝั่งทะเล จังหวัดระยอง โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ ซึ่งมีส่วนประกอบเป็นแบบจำลองย่อยทั้งสิ้น 3 ชนิด คือ แบบจำลองคลื่น (wave model), แบบจำลองกระแสน้ำ (current model) และแบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหล (oil spill model) โดยสรุปผลการศึกษาดังนี้

6.1 แบบจำลองคลื่น

ความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง SWAN โดยใช้ข้อมูลลม ERA-Interim และใช้ข้อมูลสเปกตรัมคลื่นจากแบบจำลอง WAVEWATCH III ซึ่งเป็นตัวแทนคลื่นที่เคลื่อนที่มาจากทะเลจีนใต้ ทำการเปรียบเทียบความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN กับข้อมูลที่ได้จากหุ่นสมุทรศาสตร์ พบว่าแบบจำลอง SWAN จะให้ผลการคำนวณความสูงคลื่นนัยสำคัญได้ใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดที่ความสูงคลื่นไม่เกิน 1 เมตร แต่ถ้าคลื่นสูงมากกว่า 1 เมตรแบบจำลอง SWAN ไม่สามารถจำลองคลื่นได้ใกล้เคียงความเป็นจริงได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 25 – 30 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ย และเมื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลอง SWAN โดยใช้ค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) พบว่าแบบจำลอง SWAN มีความแม่นยำพอใช้ (Yuri et al., 1999) โดยสถานีส่วนใหญ่มีค่า NSE อยู่ประมาณ 0.6 - 0.7 ทั้งนี้ในการจำลองคลื่นด้วยแบบจำลอง SWAN ใช้ข้อมูล ERA-Interim และข้อมูลสเปกตรัมคลื่นจากแบบจำลอง WAVEWATCH III ซึ่งไม่ใช่ข้อมูลตรวจวัดจริง ทำให้คลื่นที่จำลองได้มีความคลาดเคลื่อนมากไปด้วย โดยเฉพาะเรื่องของทิศทางคลื่นจากทะเลจีนใต้ที่เคลื่อนที่เข้าสู่อ่าวไทย

เมื่อพิจารณาการกระจายขนาดและทิศทางของความสูงคลื่นนัยสำคัญเทียบกับข้อมูลหุ่นสมุทรศาสตร์ระยอง ในปี พ.ศ.2540 - พ.ศ.2545 พบว่าทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่มากที่สุดแตกต่างกัน โดยแบบจำลอง SWAN พบคลื่นที่มาจากทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ประมาณ 25% รองลงมาจากทิศใต้ (S) และทิศตะวันออกเฉียงใต้ค่อนมาทางใต้ (SSE) 18% และ 16% ตามลำดับ แต่คลื่นที่ตรวจวัดได้เป็นคลื่นที่มาจากทิศตะวันออกเฉียงใต้ค่อนมาทางใต้ (SSE) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งพบประมาณ 30% รองลงมาเป็นคลื่นที่มาจากทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ประมาณ 21% ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของคลื่นจากทะเลจีนใต้ที่เคลื่อนที่เข้าสู่อ่าวไทย

ความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ได้จากแบบจำลอง SWAN ส่วนใหญ่จะสูงประมาณ 0.4 – 0.8 เมตร และคลื่นจะเคลื่อนที่มาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับปัจจัยที่ทำให้เกิดคลื่น คือ ระยะทางของผิวน้ำ (Fetch length), ระยะเวลาที่ลมพัด (wind duration) และความเร็วลม (wind speed) ทั้งนี้สอดคล้องกับช่วงฤดูลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและฤดูลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งเป็นช่วงที่ลมมรสุมที่พัดผ่านประเทศไทยมีทิศทางค่อนข้างแน่นอนตลอดเวลา โดยคลื่นในช่วงฤดูลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะมีความสูงคลื่นนัยสำคัญมากกว่าคลื่นในช่วงฤดูลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ เนื่องจากมีระยะทางที่ลมพัดมากกว่า

จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลอง SWAN ยังมีความคลาดเคลื่อนในประเด็นความสูงคลื่นและทิศทางจากคลื่นในทะเลจีนใต้ที่เคลื่อนที่เข้าสู่อ่าวไทย ดังนั้นในการจำลองคลื่นสำหรับนำไปใช้ในงานออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมต้องมีความระมัดระวังเนื่องจากความสูงคลื่นที่จำลองในช่วงคลื่นแรงยังไม่มีข้อมูลถูกต้อง

6.2 แบบจำลองกระแสน้ำ

ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง (Manning's n) นั้นขึ้นอยู่กับหลายอิทธิพล ไม่ว่าจะเป็นวัสดุตะกอนท้องน้ำ, พืชที่ปกคลุม, การกัดเซาะหรือตกตะกอน, สิ่งกีดขวาง, ความลึกน้ำ หรือการแปรผันตามฤดูกาล เป็นต้น โดยปกติแล้วในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง (Manning's n) ที่เหมาะสม ควรจะทำการวิเคราะห์จากการกระจายความเร็วบนหน้าตัดการไหล และจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองวัดค่าความเร็วและความขรุขระในพื้นที่ศึกษาหรือห้องปฏิบัติการ แต่ในการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้ทำการสำรวจชลศาสตร์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง (Manning's n) ที่เหมาะสมกับพื้นที่จริง อีกทั้งยังไม่มีการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง (Manning's n) ของพื้นที่อ่าวไทย ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ทำการจำลองระดับน้ำเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง (Manning's n) ที่เหมาะสม

ในการทดสอบความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ทางกายภาพในแบบจำลองกระแสน้ำ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำมากกว่าค่าความหนืดของความปั่นป่วน และจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง (Manning's n) ที่เหมาะสมอยู่ในช่วงประมาณ 0.020 – 0.023 แม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิ่ง (Manning's n) นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของตะกอนซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ตะกอนในอ่าวไทยไม่ได้มีลักษณะเดียวกันหมดทำให้ในแต่ละพื้นที่ควรมีค่า Manning's n ที่แตกต่างกันแต่ด้วยข้อจำกัดของแบบจำลอง Delft3D จึงเลือกใช้ค่า

Manning's n ค่าเดียวคือ 0.022 เนื่องจากเป็นค่าที่เหมาะสมเป็นส่วนใหญ่ในแต่ละสถานีระดับน้ำ ทำนายของกรมอุทกศาสตร์

ในการจำลองกระแสน้ำในการศึกษานี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือศึกษากระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงเพียงอย่างเดียว และกระแสน้ำที่รวมอิทธิพลของคลื่นลมไว้ด้วย เพื่อวิเคราะห์หาอิทธิพลของคลื่นลมและน้ำขึ้นน้ำลงที่มีผลต่อกระแสน้ำ โดยในการวิเคราะห์กระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงนั้น ได้เปรียบเทียบค่าระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายซึ่งเป็นข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ เนื่องจากข้อมูลระดับน้ำที่ได้จากการตรวจวัดจากหน่วยงานต่างๆ เป็นข้อมูลระดับน้ำที่รวมอิทธิพลต่างๆไว้ด้วยกัน ทำให้จึงต้องประยุกต์ใช้ข้อมูลระดับน้ำทำนายที่ได้มาจากวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบน้ำขึ้นน้ำลง ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลอง Delft3D ยังถือว่ายังมีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) ของระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลระดับน้ำทำนายของกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ อยู่ประมาณ 0.10 – 0.25 เมตร และเมื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองโดยใช้ค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) พบว่าที่สถานีอ่าวสัตหีบ, เกาะสีชัง, สันดอนเจ้าพระยา, หัวหิน และเกาะหลัก มีค่า NSE ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.8 - 0.9 แสดงว่าแบบจำลอง Delft3D สามารถจำลองระดับได้มีความแม่นยำดี (Yuri et al., 1999) ทั้งนี้เกณฑ์ของค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) ที่ใช้บอกถึงความแม่นยำของแบบจำลองนั้นเป็นเพียงแนวทางหนึ่งในการศึกษานี้เท่านั้น เนื่องจากเกณฑ์ดังกล่าวอาจเหมาะสมกับบางพื้นที่เท่านั้น ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงได้ตามพื้นที่และเวลา

การจำลองกระแสน้ำสุทธิได้รวมอิทธิพลของคลื่นลมที่คำนวณได้จากแบบจำลอง SWAN พบว่าค่าระดับน้ำที่คำนวณได้นั้นมีความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลระดับน้ำจริงที่ได้จากการตรวจวัดของการท่าเรือแห่งประเทศไทยที่สถานีสันดอนเจ้าพระยาในปี พ.ศ.2556 อยู่มาก ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) ประมาณ 0.25 - 0.50 เมตร สอดคล้องกับผลการเปรียบเทียบข้อมูลระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D กับข้อมูลตรวจวัดของ Japanese International Cooperation Agency (JICA) ที่บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา จำนวน 9 ครั้ง ในปี พ.ศ.2554 - พ.ศ.2556 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) อยู่ประมาณ 0.2 เมตรเช่นกัน โดยความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจเป็นผลจากการคำนวณมาจากหลายแบบจำลองทำให้มีค่าคลาดเคลื่อนสะสมสูง อีกทั้งข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลองก่อนหน้าก็ไม่ได้เป็นข้อมูลตรวจวัด

จากการเปรียบเทียบข้อมูลกระแสน้ำสุทธิตามเวลาในช่วงน้ำเกิดและน้ำตายรายเดือน ที่บริเวณจุดรั่วไหลของน้ำมันที่บริเวณชายฝั่งทะเลระยองในช่วงวันที่ 27 กรกฎาคม - 1 สิงหาคม พ.ศ.

2556 พบว่ากระแสน้ำสุทธีจะเคลื่อนที่ในทิศตะวันตกเฉียงเหนือค่อนไปทางตะวันตก (WNW) ในช่วงที่น้ำขึ้น และเคลื่อนที่ไปในทิศตะวันออกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันออก (ESE) ในช่วงน้ำลง ทั้งนี้พบว่าเมื่อเพิ่มอิทธิพลของคลื่นลมในการจำลองกระแสน้ำสุทธีด้วยแบบจำลอง Delft3D กระแสน้ำสุทธีที่เกิดขึ้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลระยอง ให้ผลไม่แตกต่างกันกับกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงเลย แต่ทั้งนี้ในการตรวจสอบแบบจำลองได้ทำการตรวจสอบเพียงบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยาเท่านั้น ยังไม่มีข้อมูลตรวจวัดหรือการศึกษาที่บริเวณอื่นๆ ยืนยันในเชิงวิชาการได้เพิ่มเติม เพราะแบบจำลอง Delft3D อาจจำลองได้แม่นยำในบางพื้นที่หรือบางเวลาเท่านั้น อีกทั้งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนสะสมที่เกิดมาตั้งแต่แบบจำลอง SWAN เพราะหากข้อมูลคลื่นที่ได้จากแบบจำลอง SWAN มีความคลาดเคลื่อนมากก่อนอยู่แล้ว ผลที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D ก็จะมี ความคลาดเคลื่อนตามไปด้วย

การศึกษาอิทธิพลของคลื่นและน้ำขึ้นน้ำลงต่อกระแสน้ำสุทธีจะแบ่งการพิจารณาเป็น 2 มิติ คือ ขนาด และทิศทาง พบว่าอิทธิพลหลักที่มีผลต่อกระแสน้ำสุทธีคือน้ำขึ้นน้ำลงทั้งในแง่ของขนาด และทิศทาง แต่ก็มีบางพื้นที่ที่ลมมีอิทธิพลด้วย โดยจะพบว่ากระแสน้ำเนื่องจากคลื่นลมจะมีผลในบริเวณที่เป็นน้ำตื้น เช่น สถานีเกาะสีชัง และเกาะหลัก เป็นต้น

จากการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง SWAN และแบบจำลอง Delft3D ยังพบความคลาดเคลื่อนอยู่และยังมีความแม่นยำไม่มากนัก ซึ่งความคลาดเคลื่อนต่างๆ อาจมีมาจากหลายสาเหตุ เช่น แบบจำลองมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถจำลองปรากฏการณ์ธรรมชาติได้ถูกต้องและแม่นยำ หรือประเด็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองที่ไม่ได้เป็นข้อมูลที่ตรวจวัดจริง ผลที่ได้ย่อมไม่ถูกต้องตามไปด้วย แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดด้านข้อมูลกระแสน้ำในประเทศไทยจึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลดาวเทียม ข้อมูลที่ได้จากการสังเคราะห์หรือการวิเคราะห์จากแหล่งข้อมูลต่างประเทศที่เป็นภาพกว้างมาเป็นข้อมูลนำเข้าแทน โดยในการจำลองคลื่นและกระแสน้ำในการศึกษาในครั้งนี้จึงเป็นเพียงแนวทางในการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อนำกระแสน้ำที่ได้จากแบบจำลองไปใช้ในงานด้านอื่นๆ ได้ อีกมากมาย เช่น การคาดการณ์การเคลื่อนที่ของน้ำมัน หรือนำไปใช้ในงานออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมต่อไป

6.3 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหล

การจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลระยองด้วยแบบจำลอง GNOME โดยใช้ข้อมูลกระแสน้ำสุทธีที่ได้จากแบบจำลอง Delft3D และใช้ข้อมูลลม ERA-Interim โดยเปรียบเทียบตำแหน่งของคราบน้ำมันกับช่วงที่เกิดเหตุการณ์น้ำมันรั่วที่บริเวณชายฝั่งทะเลระยอง

ในช่วงวันที่ 27 กรกฎาคม - 1 สิงหาคม พ.ศ.2556 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของน้ำมันยังมีค่ามาก น้ำมันจะยิ่งกระจายเป็นวงกว้าง โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของน้ำมันที่เหมาะสมคือ $5,000 \text{ cm}^2/\text{s}$ ทั้งนี้ในการจำลองการรั่วไหลของน้ำมันยังจำเป็นต้องใช้ข้อมูลทั้งกระแสน้ำและข้อมูลลม เนื่องจากข้อมูลทั้งสองมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวของน้ำมันที่รั่วไหลในแบบจำลอง GNOME ซึ่งจะส่งผลต่อความแม่นยำของการจำลองการรั่วไหลของน้ำมันในทะเล

การเคลื่อนที่ของน้ำมันที่รั่วไหลในทะเล บริเวณชายฝั่งทะเลระยอง พบว่าทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำมันสอดคล้องกับทิศทางของลมที่ใช้ในแบบจำลอง GNOME โดยลมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ส่งผลให้คราบน้ำมันเคลื่อนตัวห่างออกจากฝั่ง ส่วนลมจากทิศใต้ (S) จะส่งผลให้คราบน้ำมันเคลื่อนตัวไปทางเหนือกระทบชายฝั่งระยองบริเวณนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด เป็นระยะทางยาวประมาณ 2 - 3 กิโลเมตร ลมเคลื่อนที่มาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) น้ำมันจะเคลื่อนที่ไปในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ และกระทบชายฝั่งระยองบริเวณนิคมอุตสาหกรรมระยอง (IRPC) เป็นระยะทางประมาณ 2 กิโลเมตร และลมที่เคลื่อนมาทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนไปทางตะวันตก (WSW) น้ำมันจะเคลื่อนตัวไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือค่อนไปทางตะวันออก และเคลื่อนที่กระทบชายฝั่งอ่าวพร้าว เกาะเสม็ด เป็นระยะทาง 2 กิโลเมตร และมีบางส่วนเคลื่อนที่ต่อไปทางทิศเหนือของเกาะเสม็ด และคราบน้ำมันเคลื่อนที่กระจายไปทั่วบริเวณหาดแม่รำพึง แต่หากความเร็วลมแรง 7 เมตร/วินาที น้ำมันจะเคลื่อนที่กระทบชายฝั่งในบริเวณอุทยานแห่งชาติเขาแหลมหญ้าแทน โดยส่วนใหญ่ที่รั่วบริเวณชายฝั่งทะเลระยองจะใช้เวลาประมาณ 40 - 60 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับความเร็วลม ถ้าความเร็วลมน้อยเวลาที่น้ำมันจะเคลื่อนที่กระทบชายฝั่งก็จะใช้เวลามาก แต่หากความเร็วลมมากเวลาที่น้ำมันเคลื่อนที่กระทบชายฝั่งก็จะน้อยลง ทั้งนี้พบว่าเดือนพฤษภาคมเป็นเดือนที่ควรเฝ้าระวังในกรณีเกิดเหตุการณ์น้ำมันรั่วไหลในทะเลมากที่สุด เนื่องจากเป็นเดือนที่มีความเร็วลมสูงและแนวการเคลื่อนตัวของชายฝั่งสั้นจึงทำให้น้ำมันใช้เวลาน้อยที่สุดในการเคลื่อนตัวกระทบชายฝั่ง

ทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำมันในช่วงน้ำเกิดและน้ำตาย พบว่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่จะแตกต่างกันที่ตำแหน่งของคราบน้ำมัน โดยในช่วงแรกตำแหน่งของคราบน้ำมันจะอยู่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น ตำแหน่งของคราบน้ำมันมีโอกาสเคลื่อนที่ห่างจากกันมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ตำแหน่งที่คราบน้ำมันเคลื่อนตัวกระทบชายฝั่งแตกต่างกันได้โดยส่วนใหญ่จะห่างกันประมาณ 2 - 3 กิโลเมตร ยกเว้นในเดือนสิงหาคมและเดือนกันยายน ซึ่งในช่วงน้ำเกิดน้ำมันจะเคลื่อนตัวกระทบชายฝั่งที่บริเวณ

อ่าวพร้าว หมู่เกาะเสม็ด ส่วนในช่วงน้ำตายน้ำมันจะเคลื่อนตัวกระทบชายฝั่งที่บริเวณอุทยานแห่งชาติเขาแหลมหญ้า

การศึกษานี้เป็นเพียงแนวทางหนึ่งในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการติดตามตำแหน่ง และเตรียมตัวรับมือกับน้ำมันที่รั่วไหลบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง แต่ด้วยข้อจำกัดด้านข้อมูล, ข้อมูลคลื่น, ข้อมูลท้องน้ำ ที่ยังไม่มีเก็บข้อมูลได้ครอบคลุมทั้งพื้นที่และเวลา ทำให้เมื่อนำข้อมูลที่ไม่ได้มาจากการตรวจวัดจริงไปใช้ในแบบจำลอง ผลการจำลองย่อมมีความคลาดเคลื่อนตามไปด้วย

6.4 ข้อเสนอแนะ

1. ข้อจำกัดด้านข้อมูลที่นำมาใช้ในการสอบเทียบแบบจำลองทั้งแบบจำลอง SWAN, แบบจำลอง Delft3D และแบบจำลอง GNOME พบว่าในประเทศไทยยังมีการเก็บข้อมูลไม่เพียงพอหรือไม่ครอบคลุมทั้งพื้นที่และเวลา เช่น ข้อมูลลมซึ่งมีแค่ข้อมูลลมตามสถานีของกรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งเป็นข้อมูลลมบนบก หรือข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ตรวจวัดจากหุ่นสมุทรศาสตร์ของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) ที่มีการเก็บข้อมูลแค่ในปี พ.ศ.2540 - พ.ศ.2545 หรือข้อมูลกระแสน้ำที่ยังไม่มีการเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา เป็นต้น ดังนั้นการตรวจวัดหรือติดตั้งสถานีตรวจวัดที่ครอบคลุมและต่อเนื่องยังเป็นสิ่งสำคัญ หากมีข้อมูลครบถ้วนหรือลดการใช้ข้อมูลดาวเทียมและข้อมูลที่ได้จากการสังเคราะห์หรือการวิเคราะห์จากแหล่งข้อมูลต่างประเทศ น่าจะทำให้การสอบเทียบแบบจำลองมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

2. การมีข้อมูลคลื่นของทะเลจีนใต้ที่เคลื่อนที่เข้าสู่อ่าวไทย โดยข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริงจะมีอิทธิพลหลักในการพิจารณาความถูกต้องด้านทิศทางของคลื่นในอ่าวไทย หรือการเก็บตัวอย่างตะกอนพื้นท้องทะเลมาหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) ในห้องปฏิบัติการหรือทดสอบจริงในพื้นที่ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) เป็นค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพที่สำคัญในแบบจำลอง Delft3D

3. การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง (Manning's n) ที่เหมาะสมโดยใช้ทั้งข้อมูลระดับน้ำและความเร็วมาวิเคราะห์ เนื่องจากสมการในแบบจำลอง Delft3D มีหลายตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เช่น ความลึกน้ำ (h) และความเร็วเฉลี่ยทั้งความลึกน้ำ (\bar{U}) ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายเทอมและหลายสมการ

4. ในการจำลองกระแสน้ำด้วยแบบจำลอง Delft3D ยังมีปัจจัยอื่นๆ อีกที่มีอิทธิพลต่อกระแสน้ำ เช่น น้ำท่า เป็นต้น ซึ่งควรมีการเพิ่มปัจจัยอื่นๆ เข้ามาเพื่อให้ผลลัพธ์มีความถูกต้องเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งในการศึกษานี้ยังไม่คำนึงถึงกระแสน้ำตามความลึก จึงควรจำลองการไหลเวียนของน้ำแบบ 3 มิติ เนื่องจากในความจริงแล้วกระแสน้ำไม่ได้มีการไหลในทิศทางและความเร็วเดียวกันตลอดทั้งความลึก จะทำให้การจำลองสอดคล้องกับความพฤติกรรมการไหลของน้ำในธรรมชาติมากยิ่งขึ้น

5. ในการจำลองการรั่วไหลของน้ำมันในทะเลควรถูกใช้ในการจำลองแบบการติดตามอนุภาค (particle tracking) ซึ่งจะสามารถแสดงผลถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณตามเวลาต่างๆ หรืออิทธิพลของกระบวนการทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมัน (Weathering) ซึ่งจะทำให้ผลการศึกษาสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันในทะเลจริง



บรรณานุกรม

ภาษาไทย

กรมควบคุมมลพิษ (2553). การคาดการณ์การเคลื่อนที่ของคราบน้ำมันในทะเล ผลกระทบต่อทรัพยากรธรรมชาติ และแนวทางการแก้ไข. ส่วนแหล่งน้ำทะเล, สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, กรมควบคุมมลพิษ: 69.

กรมเจ้าท่า. (2557). "สถิติน้ำมันรั่วไหลในประเทศไทย." Retrieved 1 สิงหาคม, 2559, from <http://www.md.go.th/md/index.php/2014-01-19-05-02-28/2014-01-19-05-20-44/-oil-spill>.

กรมเจ้าท่า. (2557). "สถิติน้ำมันรั่วไหลปี 2540 - 2546." Retrieved 1 สิงหาคม, 2559, from <http://www.md.go.th/md/index.php/2014-01-19-05-02-28/2014-01-19-05-20-44/-oil-spill>.

กรมเจ้าท่า. (2557). "สถิติน้ำมันรั่วไหลปี 2547." Retrieved 1 สิงหาคม, 2559, from <http://www.md.go.th/md/index.php/2014-01-19-05-02-28/2014-01-19-05-20-44/-oil-spill>.

กรมเจ้าท่า. (2557). "สถิติน้ำมันรั่วไหลปี 2548." Retrieved 1 สิงหาคม, 2559, from <http://www.md.go.th/md/index.php/2014-01-19-05-02-28/2014-01-19-05-20-44/-oil-spill>.

กรมเจ้าท่า. (2557). "สถิติน้ำมันรั่วไหลปี 2549." Retrieved 1 สิงหาคม, 2559, from <http://www.md.go.th/md/index.php/2014-01-19-05-02-28/2014-01-19-05-20-44/-oil-spill>.

กรมเจ้าท่า. (2557). "สถิติน้ำมันรั่วไหลปี 2550." Retrieved 1 สิงหาคม, 2559, from <http://www.md.go.th/md/index.php/2014-01-19-05-02-28/2014-01-19-05-20-44/-oil-spill>.

กรมเจ้าท่า. (2557). "สถิติน้ำมันรั่วไหลปี 2551." Retrieved 1 สิงหาคม, 2559, from <http://www.md.go.th/md/index.php/2014-01-19-05-02-28/2014-01-19-05-20-44/-oil-spill>.

กรมเจ้าท่า. (2557). "สถิติน้ำมันรั่วไหลปี 2552." Retrieved 1 สิงหาคม, 2559, from <http://www.md.go.th/md/index.php/2014-01-19-05-02-28/2014-01-19-05-20-44/-oil-spill>.

- กรมเจ้าท่า. (2557). "สถิติน้ำมันรั่วไหลปี 2553." Retrieved 1 สิงหาคม, 2559, from <http://www.md.go.th/md/index.php/2014-01-19-05-02-28/2014-01-19-05-20-44/-oil-spill>.
- กรมเจ้าท่า. (2557). "สถิติน้ำมันรั่วไหลปี 2554." Retrieved 1 สิงหาคม, 2559, from <http://www.md.go.th/md/index.php/2014-01-19-05-02-28/2014-01-19-05-20-44/-oil-spill>.
- กรมเจ้าท่า. (2557). "สถิติน้ำมันรั่วไหลปี 2555." Retrieved 1 สิงหาคม, 2559, from <http://www.md.go.th/md/index.php/2014-01-19-05-02-28/2014-01-19-05-20-44/-oil-spill>.
- กรมเจ้าท่า. (2557). "สถิติน้ำมันรั่วไหลปี 2556." Retrieved 1 สิงหาคม, 2559, from <http://www.md.go.th/md/index.php/2014-01-19-05-02-28/2014-01-19-05-20-44/-oil-spill>.
- กรมเจ้าท่า. (2558). "สถิติน้ำมันรั่วไหลปี 2557." Retrieved 4 กรกฎาคม, 2561, from <http://www.md.go.th/md/index.php/2014-01-19-05-02-28/2016-07-25-03-15-33/2016-11-23-07-40-37/1605--2557-35>.
- กรมเจ้าท่า. (2559). "สถิติน้ำมันรั่วไหลปี 2558." Retrieved 4 กรกฎาคม, 2561, from <http://www.md.go.th/md/index.php/2014-01-19-05-02-28/2016-07-25-03-15-33/2016-11-23-07-40-37/2195-13-2558>.
- กรมเจ้าท่า. (2560). "สถิติน้ำมันรั่วไหลปี 2559." Retrieved 4 กรกฎาคม, 2561, from <http://www.md.go.th/md/index.php/2014-01-19-05-02-28/2016-07-25-03-15-33/2016-11-23-07-40-37/2982--2559-35>.
- กรมเจ้าท่า. (2561). "สถิติน้ำมันรั่วไหลปี 2560." Retrieved 4 กรกฎาคม, 2559, from <http://www.md.go.th/md/index.php/2014-01-19-05-02-28/2016-07-25-03-15-33/2016-11-23-07-40-37/3342-15-2560>.
- กรมทรัพยากรธรณี (2546). การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ชายฝั่งทะเลของ 8 จังหวัด บริเวณอ่าวไทยและทะเลอันดามัน. ก. 004. กองธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมและธรณีพิบัติภัย กรมทรัพยากรธรณี.
- กรมทรัพยากรธรณี (2555). ธรณีวิทยาภาพพื้นที่ทะเลอ่าวไทยตอนบน. รายงานวิชาการ เลขที่ สทช. 9/2555. ส่วนธรณีวิทยาทางทะเล สำนักเทคโนโลยีธรณี: 89.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง (2552). รายงานการศึกษาจัดทำแบบมาตรฐานแนะนำงานออกแบบก่อสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำขนาดใหญ่และริมทะเลทั่วประเทศให้ท้องถิ่น.
- กรมอุตุฯ (2557). "ลมมรสุม." หนังสืออุตุฯ Retrieved 1 สิงหาคม, 2559, from

<https://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=52>.

กรมอุตุนิยมวิทยา (2561). พายุหมุนเขตร้อนที่เคลื่อนที่เข้าสู่ประเทศไทย รายเดือนคาบ 67 ปี (พ.ศ. 2494-2560). กรมอุตุนิยมวิทยา, ศูนย์ภูมิภาค สำนักรับผิดชอบอุตุนิยมวิทยา.

กรมอุทกศาสตร์ (2538). รายงานการวิเคราะห์ข้อมูลสมุทรศาสตร์เขตกลางอ่าวไทย 2525-2536. กองสมุทรศาสตร์ กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ.

กระทรวงคมนาคม. (2545). "แผนป้องกันและขจัดมลพิษทางน้ำเนื่องจากน้ำมันแห่งชาติ." Retrieved 1 กรกฎาคม, 2560, from <http://www.md.go.th/hr/index.php/2014-02-20-15-59-51/2014-02-21-05-52-05/-41/--9/-43/-51/259--23>.

ณรงค์ฤทธิ์ เหลืองติลก และคณะ (2559). อิทธิพลของความละเอียดของข้อมูลความลึกพื้นท้องทะเลต่อการคำนวณความสูงคลื่นบริเวณอ่าวไทยด้วยแบบจำลอง SWAN. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21. สงขลา: 2127-2134.

ณัฐธิดา จันทศิริ (2557). การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของการกระจายของตัวอ่อนปะการังบริเวณชายฝั่งสตัทป์ จังหวัดชลบุรี. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นริศรา นุธรรมโชติ (2546). ระดับน้ำและการไหลของน้ำขึ้นน้ำลงโดยใช้แบบจำลอง POM. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปราโมทย์ โคจิศุกร และคณะ (2546). Eye on the Ocean หน่วยการเรียนรู้ที่ 1: ฟิสิกส์ในทะเล.

เผชิญโชค จินตเศรณี และอนุกุล บุรณประทีปรัตน์ (2555). "ความคลาดเคลื่อนของแผนที่พื้นมหาสมุทรทั่วไป (GEBCO1 และ ETOPO1) ในบริเวณอ่าวไทยตอนบน." วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 17: 72-81.

เพ็ญจันทร์ ละอองมณี (2544). ความสัมพันธ์ระหว่างมวลน้ำกับการกระจายของแพลงก์ตอนและความอุดมสมบูรณ์สัมพันธ์ของปลาผิวน้ำบริเวณอ่าวไทยและนอกฝั่งตะวันออกของแหลมมลายู. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วัชร เกษเดข และสุเพชร จิระจรกุล (2560). "การประยุกต์ข้อมูลจากระบบเรดาร์คลื่นวิทยุความถี่สูงแบบจำลอง GNOME และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์สำหรับคาดการณ์การเคลื่อนที่ของคราบน้ำมันในทะเล." วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 25(1): 14-26.

วาทีน ธนาธารพร และคณะ (2554). "การใช้แบบจำลอง SWAN เพื่อศึกษาลักษณะคลื่นในอ่าวไทยในช่วงที่เกิดพายุไต้ฝุ่นหมุนฟ้า." วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 19 3: 40-50.

วิริยะ เหลืองอร่าม (2547). การจำลองเชิงตัวเลขของคลื่นใกล้ฝั่งในอ่าวไทย. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) (2556). ข้อมูลดาวเทียม COSMO-SkyMed-1.

สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) (2556). ข้อมูลดาวเทียม RADARSAT-2

สิน สิ้นสกุล และคณะ (2545). การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ชายฝั่งทะเลอ่าวไทย. กองธรณีวิทยา, กรมทรัพยากรธรณี: 173.

ภาษาอังกฤษ

Abreu, M., A. Larraza and E. Thornton (1992). "Nonlinear transformation of directional wave spectra in shallow water." Journal of Geophysical Research Atmospheres 97: 15579-15589.

Akpınar, A., G. P. van Vledder, M. İ. Kömürçü and M. Özger (2012). "Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea." Continental Shelf Research 50-51: 80-99.

Amrutha, M. M. et al. (2016). "Wave hindcast studies using SWAN nested in WAVEWATCH III - comparison with measured nearshore buoy data off Karwar, eastern Arabian Sea." Ocean Engineering 119: 114-124.

Andrews, D. G. and M. E. McIntyre (1978). "An exact theory of nonlinear waves on a Lagrangian-mean flow." Journal of Fluid Mechanics 89(4): 609-646.

Ao-leong, E., A. Chang and S. Gu (2012). Modeling the BP Oil Spill of 2010: A Simplified Model of Oil Diffusion in Water: 14.

Applied Science Associates (2009). OILMAP South Kingstown, Rhode Island, USA.

Battjes, J. A. and J. P. F. M. Janssen (1978). "Energy loss and set-up due to breaking of random waves." Coastal Engineering: 569-587.

Beegle-Krause, C. J. (1999). GNOME: NOAA's Next-Generation Spill Trajectory Model. Oceans '99 MTS/IEEE Proceedings, Escondido, CA.

Bertotti, L. and L. Cavaleri (1994). "Accuracy of wind and wave evaluation in coastal." Coastal Engineering: 57-67.

Booij, N., R. C. Ris and L. H. Holthuisen (1999). "A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation." Journal of Geophysical Research: Oceans 104(C4): 7649-7666.

Buranapratheprat, A. (2008). "Circulation in the Upper Gulf of Thailand: A review." Burapha Science Journal 13(1): 75-83.

- Buranapratheprat, A. and M. Bunpapong (1998). "A Two-Dimensional Hydrodynamic Model for the Gulf of Thailand." Proceedings of The IOC/WESTPAC Fourth International Scientific Symposium: 469-478.
- Cavaleri, L. and P. Malanotte-Rizzoli (1981). "Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications." Journal of Geophysical Research Atmospheres 86(C11): 10961-10973.
- Choi, B. H., D. G. Kim and D. H. Kim (1996). "A numerical tidal model for the Southeast Asian sea." Proceeding of the Regional Workshop on Oil Spill Modelling: 38-53.
- Chow, V. T. (1959). Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Company.
- Collins, J. I. (1972). "Prediction of shallow water spectra." Journal of Geophysical Research Atmospheres 44(15): 2693-2707.
- Daniel, W. (2006). "Statistical Methods in the Atmospheric Sciences." international Geophysics Series 90: 704.
- Dee, D. P. et al. (2011). "The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system." Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 137(656): 553-597.
- Deltares (2014). Delft3D-FLOW, User Manual. MH Delft, The Netherlands: 686.
- Evelyn, B. et al. (2001). Ocean Circulation, Butterworth-Heinemann.
- Groeneweg, J. (1999). Wave-current interactions in a generalized Lagrangian mean formulation. PhD Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Groeneweg, J. and G. Klopman (1998). "Changes of the mean velocity profiles in the combined wave-current motion described in a GLM formulation." Journal of Fluid Mechanics 370: 271-296.
- Hamam, S. E. M. (1987). "Diffusion of crude oil in water." Journal of Environmental Science and Health . Part A: Environmental Science and Engineering 22(5): 445-456.
- Hasselmann, K. (1974). "On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping." Boundary-Layer Meteorology 6(1-2): 107-127.
- Hasselmann, K. et al. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Deutsches Hydrographisches Institut. 12.

- Japanese International Cooperation Agency (2013). Oceanographic Data Observation Survey.
- Kolmogorov, A. N. (1942). "Equations of turbulent motion of an incompressible fluid." *IZV Akad. Nauk. USSR, Ser. Phys.* 6: 56-58.
- Komen, G. J., S. Hasselmann and K. Hasselmann (1984). "On the existence of a fully developed wind-sea spectrum." *Journal of Physical Oceanography* 14: 1271-1285.
- Lesser, G. R., J. A. Roelvink, J. A. T. M. van Kester and G. S. Stelling (2004). "Development and validation of a three-dimensional morphological model." *Coastal Engineering* 51(8-9): 883-915.
- Madsen, P. A. and O. R. Sørensen (1993). "Bound waves and triad interactions in shallow." *Ocean Engineering* 20(4): 359-388.
- Mellor, G. L. and A. F. Blumberg (1985). "Modeling Vertical and Horizontal Diffusivities with the Sigma Coordinate System." *Monthly Weather Review* 113: 1379-1383.
- Mishra, A. K. and G. S. Kumar (2015). "Weathering of Oil Spill: Modeling and Analysis." *Aquatic Procedia* 4: 435-442.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (2012). *General NOAA Oil Modeling Environment*.
- National Research Council (2014). Responding to Oil Spills in the U.S. Arctic Marine Environment. The national academies press, Washington, D.C.
- Pierson, W. J. and L. Moskowitz (1964). "A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii." *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 69(24): 5181-5190.
- Pugh, D. T. (1996). *Tides, surges and mean sea-level*. UK, John Wiley & Sons Ltd.
- Rodi, W. (1984). *Turbulence models and their application in hydraulics : a state of the art review*. Delft :, International Association for hydraulic research.
- Saramul, S. (2010). Development of Circulation Model for the Upper Gulf of Thailand (UGOT). *2010 Student Capstone Conference*. VMASC, Suffolk, Virginia.
- Sebastião, P. and C. Guedes Soares (1995). "Modeling the fate of oil spills at sea." *Spill Science & Technology Bulletin* 2(2-3): 121-131.
- Siripong, A. (1984). *Surface circulation in the Gulf of Thailand and South China Sea in 4*

- seasons from direct measurement. The Third Seminar on the Water Quality and the Quality of the Living Resource in Thai Waters, Srinakharinwirot University, Chonburi.
- Snidvongs, A. and P. Sojisuorn (1999). Numerical Simulations of The Net Current in the Gulf of Thailand Under Different Monsoon Regimes. Proceedings of the First Technical Seminar on Marine Fishery Resources Survey in the South China Sea area I: Gulf of Thailand and East Coast of Peninsular Malaysia.
- Sojisuorn, P., A. Morimoto and T. Yanagi (2010). "Seasonal variation of sea surface current in the Gulf of Thailand." Coastal Marine Science 34(1): 91-102.
- Song, L., Z. Liu and F. Wang (2014). "Comparison of wind data from ERA-Interim and buoys in the Yellow and East China Seas." Chinese Journal of Oceanology and Limnology 33(1): 282-288.
- Sorensen, R. M. (2006). Basic Coastal Engineering, Springer.
- Stacey, F. D. (1992). Physics of the Earth, Brookfield Press.
- Stelling, G. S. and J. J. Leendertse (1991). Approximation of convective processes by cyclic AOI methods. Proceeding of the 2nd ASCE Conference on Estuarine and Coastal Modelling, Tampa. ASCE, New York.
- The SWAN team (2015). SWAN SCIENTIFIC AND TECHNICAL DOCUMENTATION. Delft University of Technology: 130.
- The SWAN team (2015). SWAN USER MANUAL. Delft University of Technology: 130.
- U.S. Army Corps of Engineers (1984). Shore Protection Manual. Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, USA.
- Verboom, G. K. and A. Slob (1984). Weakly-reflective boundary conditions for two-dimensional shallow water flow problems. 5th International Conference on Finite Elements in Water Resources. Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands., Advances in Water Resources. 7: 192-197.
- Vossen, B. V. (2000). Horizontal Large Eddy Simulations; Evaluation of Computations with DELFT3D-FLOW. Report MEAH-197. Delft University of Technology, The Netherlands.
- Walstra, D. J. R., J. A. Roelvink and J. Groeneweg (2001). Calculation of Wave-Driven Currents in a 3D Mean Flow Model. Coastal Engineering 2000: 1050-1063.

- Wesseling, P. (1992). An introduction to multigrid methods, John Wiley and Sons.
- World Meteorological Organization (1998). Guide to wave analysis and forecasting. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- Wu, J. (1982). "Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane." Journal of Geophysical Research Atmospheres 87(C12): 9704-9706.
- Yanagi, T., A. Morimoto and K. Ichikawa (1997). "Co-tidal and co-range charts in the South China Sea derived from satellite altimetry data." Journal of Oceanography 53: 303-309.
- Yanagi, T., S. I. Sachoemar, T. Takao and S. Fujiwara (2001). "Seasonal Variation of Stratification in the Gulf of Thailand." Journal of Oceanography 57: 461-470.
- Yanagi, T. and T. Takao (1998). "Seasonal variation of three-dimensional circulations in the Gulf of Thailand." La mer 36: 43-55.
- Young, I. R. and G. P. V. Vledder (1993). "A Review of the Central Role of Nonlinear Interactions in Wind-Wave Evolution." Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 342(1666): 505-524.
- Yuri, G. M., G. Lars, E. Kolbjørn and R. Allan (1999). "Validation of a distributed hydrological model against spatial observations." Agricultural and Forest Meteorology 98-99: 257-277.
- Zelenke, B. et al. (2012). General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) Technical Documentation, Seattle, WA: Emergency Response Division, NOAA.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

A_0	ระดับน้ำเฉลี่ยบริเวณจุดกลางของกริด
A_i	แอมพลิจูดน้ำขึ้นน้ำลงเฉพาะถิ่น
C_b	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานท้องน้ำ
C_D	Wind drag coefficient
C_t	ความเร็วกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลง
C_w	ความเร็วของกระแสน้ำเนื่องจากคลื่นลม
c	ความเร็วคลื่น
C_{ph}	เฟสความเร็ว
C_x	ความเร็วคลื่นในแนวแกน -x
C_y	ความเร็วคลื่นในแนวแกน -y
C_σ	ความเร็วคลื่นในแนวแกน - σ
C_θ	ความเร็วคลื่นในแนวแกน - θ
C_μ'	ค่าคงที่ของ Kolmogorov-Prandtl's eddy viscosity formulation
D	การแพร่กระจาย (turbulent diffusion)
D_H	ค่าการแพร่ในแนวระนาบ
D_V	ค่าการแพร่ในแนวตั้ง
d	ความลึกน้ำ
E_{tot}	พลังงานคลื่นทั้งหมด
$E(\sigma, \theta)$	energy density spectrum
F_i	ปัจจัยของ nodal amplitude
F_x	Reynold's stresses ในแนวแกน -x
F_y	Reynold's stresses ในแนวแกน -y
f	Coriolis parameter
G_i	improved kappa number (local phase lag)
g	แรงโน้มถ่วงโลก

k	จำนวนคลื่น (wave number)
k	turbulent kinetic energy
k_w	สัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่เนื่องจากลม
\bar{k}	ค่าเฉลี่ยจำนวนคลื่น
L	ความยาวของการผสมผสาน
M_x	source/sink ของโมเมนตัมในแนวแกน -x
M_y	source/sink ของโมเมนตัมในแนวแกน -y
$N(\sigma, \theta)$	action density spectrum
P	ความดัน
P_x	ความดันในแนวแกน -x
P_y	ความดันในแนวแกน -y
S, S_{tot}	เทอม Source/Sink
S_{ds}	กระบวนการสลายตัวของพลังงานคลื่น
S_{in}	พลังงานที่ถูกถ่ายทอดจากลม
S_{nt}	กระบวนการปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นกับคลื่นแบบไม่เชิงเส้น
t	ช่วงเวลา
U	depth-averaged velocity ในแนวแกน -x
U_h	แรงขับเคลื่อนทางพลศาสตร์
U_w	ความเร็วลม
u	ความเร็วของไหลในแนวแกน -x
u_s	Stokes' drift ในแนวแกน -x
U_*	friction velocity due to currents or due to current and waves
U_{10}	ลมที่ความสูง 10 เมตรจากระดับน้ำทะเล
V	depth-averaged velocity ในแนวแกน -y
v	ความเร็วของไหลในแนวแกน -y
v_s	Stokes' drift ในแนวแกน -y
Δt	ช่วงเวลา
Δx	ระยะห่างของกริดในแนวแกน -x

Δy	ระยะห่างของกริดในแนวแกน -y
β	พารามิเตอร์เปรียบเทียบทิศทาง
v_H	ความหนืดในแนวระนาบ
v_V	ความหนืดในแนวตั้ง
$(V_0+u)_i$	astronomical argument
θ	ทิศทางของคลื่น
θ_c	ทิศทางของกระแสน้ำสุทธิ
θ_t	ทิศทางของกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลง
θ_w	ทิศทางของกระแสน้ำเนื่องจากคลื่นลม
ρ_a	ความหนาแน่นของอากาศ
ρ	ความหนาแน่นของน้ำ
σ	ความถี่ของคลื่น
σ	ระบบพิกัดในแนวระดับ
$\bar{\sigma}$	ค่าเฉลี่ยความถี่ของคลื่น
σ_{PM}^*	ความถี่สูงสุดของ fully developed sea state
σ_C	Prandtl-Schmidt number
τ_{bx}	ความเค้นเฉือนที่พื้นท้องน้ำในแนวแกน -x
τ_{by}	ความเค้นเฉือนที่พื้นท้องน้ำในแนวแกน -y
τ_{sx}	ความเค้นเฉือนที่ผิวหน้าน้ำในแนวแกน -x
τ_{sy}	ความเค้นเฉือนที่ผิวหน้าน้ำในแนวแกน -y
ω	ความเร็วในแนวตั้ง
ω_i	ความเร็วเชิงมุม
ζ	ระดับผิวน้ำ
Γ	steepness dependent coefficient

ภาคผนวก ข

การกระจายขนาดและทิศทางของลม

จากการกระจายขนาดและทิศทางของลมในพื้นที่ศึกษา จังหวัดระยอง โดยใช้ข้อมูลลม ERA-Interim ที่ตำแหน่งละติจูดที่ 12.5° N ลองจิจูดที่ 101.25° E ตั้งแต่ปี พ.ศ.2540 – พ.ศ.2559 มาใช้ในการวิเคราะห์การแจกแจงความถี่ของความเร็วลมซึ่งแบ่งความเร็วลมตั้งแต่ 0 – 10 เมตร/วินาที ออกเป็น 6 ช่วงความเร็ว และแบ่งทิศทางออกเป็น 16 ทิศทาง โดยการแจกแจงความถี่ของความเร็วลมรายปีแสดงในตาราง ข-1 ส่วนการแจกแจงความถี่ของความเร็วลมรายเดือนแสดงไว้ในตาราง ข-2 ถึง ข-13

ตาราง ข-1 การแจกแจงความถี่ของความเร็วลมที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ

Direction (°)	ความเร็วลม (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	> 10	
N	0.72	1.03	0.39	0.05	0.01	0	2.19
NNE	0.74	2.08	2.66	1.70	0.39	0.02	7.59
NE	0.79	2.51	3.65	2.39	0.84	0.15	10.34
ENE	0.80	1.55	0.86	0.21	0.03	0	3.45
E	0.67	0.83	0.18	0.01	0	0	1.70
ESE	0.72	0.72	0.10	0.01	0.01	0	1.56
SE	0.75	1.07	0.19	0.01	0	0	2.03
SSE	0.96	2.56	1.14	0.05	0.01	0	4.72
S	1.10	6.01	5.58	0.22	0.01	0	12.91
SSW	1.26	6.42	4.46	0.30	0.01	0.01	12.46
SW	1.09	4.32	4.46	1.55	0.23	0.02	11.67
WSW	0.92	2.99	6.54	5.09	0.89	0.06	16.50
W	0.68	1.64	3.15	2.35	0.37	0.02	8.22
WNW	0.58	0.84	0.60	0.18	0.03	0	2.24
NW	0.50	0.49	0.16	0.03	0	0	1.18
NNW	0.59	0.52	0.13	0	0	0	1.24
Total	12.87	35.59	34.25	14.17	2.82	0.30	100

ตาราง ข-2 การแจกแจงความถี่ของความเร็วลมที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนมกราคม

Direction (°)	ความเร็วลม (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	> 10	
N	1.46	1.83	0.40	0	0	0	3.69
NNE	1.46	3.63	4.94	1.97	0.49	0	12.50
NE	1.89	5.48	9.44	5.05	1.51	0.21	23.58
ENE	1.99	2.82	1.68	0.25	0.02	0	6.77
E	1.27	1.08	0.19	0.02	0	0	2.57
ESE	1.23	0.68	0	0	0	0	1.91
SE	1.61	1.27	0.06	0	0	0	2.95
SSE	1.70	2.76	0.38	0	0	0	4.84
S	2.57	7.47	2.12	0	0	0	12.16
SSW	2.82	9.61	1.49	0.02	0	0	13.94
SW	2.36	4.18	0.30	0	0	0	6.83
WSW	1.63	0.85	0.02	0	0	0	2.50
W	1.38	0.34	0	0	0	0	1.72
WNW	0.96	0.30	0	0	0	0	1.25
NW	0.76	0.28	0.04	0	0	0	1.08
NNW	1.17	0.47	0.06	0	0	0	1.70
Total	26.27	43.04	21.14	7.32	2.02	0.21	100

ตาราง ข-3 การแจกแจงความถี่ของความเร็วลมที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนกุมภาพันธ์

Direction (°)	ความเร็วลม (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	> 10	
N	0.68	0.81	0.14	0	0	0	1.63
NNE	0.47	1.40	1.68	0.61	0	0	4.14
NE	0.70	1.89	2.75	1.93	0.61	0.09	7.96
ENE	0.86	1.37	1.07	0.19	0.05	0	3.54
E	0.61	0.65	0.09	0	0	0	1.35
ESE	0.70	0.68	0.05	0	0	0	1.42
SE	1.07	1.42	0.21	0	0	0	2.70
SSE	1.05	4.89	2.56	0.05	0	0	8.54
S	1.65	16.92	14.85	0.28	0	0	33.71
SSW	1.93	14.50	6.31	0.05	0	0	22.79
SW	1.51	4.98	0.47	0	0	0	6.96
WSW	1.07	0.88	0.07	0	0	0	2.03
W	0.54	0.23	0.02	0	0	0	0.79
WNW	0.58	0.16	0.02	0	0	0	0.77
NW	0.54	0.16	0	0	0	0	0.70
NNW	0.68	0.30	0	0	0	0	0.98
Total	14.62	51.26	30.28	3.10	0.65	0.09	100

ตาราง ข-4 การแจกแจงความถี่ของความเร็วลมที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนมีนาคม

Direction (°)	ความเร็วลม (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	> 10	
N	0.38	0.28	0.17	0.02	0	0	0.85
NNE	0.51	0.85	0.42	0.30	0.06	0.02	2.16
NE	0.55	1.10	0.91	0.49	0.30	0.08	3.44
ENE	0.64	0.98	0.53	0.08	0.02	0	2.25
E	0.72	1.23	0.19	0.02	0	0	2.16
ESE	0.64	1	0.21	0	0	0	1.85
SE	0.53	2.02	0.38	0.02	0	0	2.95
SSE	1.02	5.22	3.74	0.11	0	0	10.08
S	1.06	14.22	24.07	1.06	0	0	40.41
SSW	1.21	12.10	11.12	0.11	0	0	24.53
SW	1.04	3.33	1.08	0.02	0	0	5.48
WSW	0.62	0.89	0.13	0	0	0	1.63
W	0.42	0.38	0.02	0	0	0	0.83
WNW	0.30	0.13	0	0	0	0	0.42
NW	0.21	0.17	0	0	0	0	0.38
NNW	0.36	0.17	0.04	0	0	0	0.57
Total	10.21	44.06	43.02	2.23	0.38	0.11	100

ตาราง ข-5 การแจกแจงความถี่ของความเร็วลมที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนเมษายน

Direction (°)	ความเร็วลม (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	> 10	
N	0.26	0.35	0.09	0	0	0	0.70
NNE	0.33	0.57	0.11	0	0	0	1.01
NE	0.57	0.86	0.35	0.11	0	0	1.89
ENE	0.64	1.05	0.37	0	0	0	2.06
E	0.86	1.21	0.13	0	0	0	2.19
ESE	0.94	1.40	0.18	0	0	0	2.52
SE	1.16	2.50	0.37	0.02	0	0	4.06
SSE	1.60	7.21	4.21	0.13	0	0	13.16
S	1.64	15.11	16.62	0.88	0	0	34.25
SSW	1.34	11.67	11.23	0.44	0	0	24.67
SW	0.81	3.77	2.43	0.18	0	0	7.19
WSW	0.79	1.34	0.86	0.11	0	0	3.09
W	0.50	0.48	0.39	0.24	0.02	0	1.64
WNW	0.29	0.20	0.20	0.11	0	0	0.79
NW	0.26	0.15	0.02	0	0	0	0.44
NNW	0.15	0.15	0	0.02	0	0	0.33
Total	12.15	48.03	37.57	2.24	0.02	0	100

ตาราง ข-6 การแจกแจงความถี่ของความเร็วลมที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนพฤษภาคม

Direction (°)	ความเร็วลม (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	> 10	
N	0.11	0.15	0.02	0	0	0	0.28
NNE	0.17	0.25	0.06	0	0	0	0.49
NE	0.11	0.23	0.08	0	0	0	0.42
ENE	0.13	0.42	0	0	0	0	0.55
E	0.21	0.30	0.17	0	0	0	0.68
ESE	0.47	0.64	0.08	0.02	0.02	0	1.23
SE	0.55	1.72	0.62	0	0.04	0	2.93
SSE	0.83	4.54	2.06	0.11	0	0.02	7.56
S	0.87	7.36	5.90	0.28	0.02	0	14.43
SSW	1.10	9.13	9.36	1.17	0.06	0.06	20.88
SW	0.87	6.94	11.14	3.90	0.76	0.02	23.64
WSW	0.62	4.94	9.04	4.14	0.36	0	19.10
W	0.36	1.85	2.38	1.61	0.08	0	6.28
WNW	0.25	0.59	0.21	0.02	0	0	1.08
NW	0.17	0.08	0.02	0	0	0	0.28
NNW	0.11	0.04	0.02	0	0	0	0.17
Total	6.92	39.20	41.17	11.25	1.36	0.11	100

ตาราง ข-7 การแจกแจงความถี่ของความเร็วลมที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนมิถุนายน

Direction (°)	ความเร็วลม (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	> 10	
N	0.07	0	0	0	0	0	0.07
NNE	0.04	0.02	0	0	0	0	0.07
NE	0.07	0.02	0.02	0	0	0	0.11
ENE	0.07	0	0	0	0	0	0.07
E	0.07	0.07	0	0	0	0	0.13
ESE	0.22	0.07	0	0	0	0	0.29
SE	0.15	0.13	0	0	0	0	0.29
SSE	0.29	0.39	0.07	0.02	0	0	0.77
S	0.20	2.02	1.23	0.07	0	0	3.51
SSW	0.31	3.95	5.26	0.68	0	0	10.20
SW	0.39	6.80	12.79	5.02	0.77	0.09	25.86
WSW	0.37	5.44	18.20	15.50	2.96	0.13	42.61
W	0.18	2.63	6.14	4.76	0.83	0	14.54
WNW	0.11	0.68	0.39	0.07	0	0	1.25
NW	0.07	0.09	0.02	0	0	0	0.18
NNW	0.07	0.02	0	0	0	0	0.09
Total	2.65	22.32	44.12	26.12	4.56	0.22	100

ตาราง ข-8 การแจกแจงความถี่ของความเร็วลมที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนกรกฎาคม

Direction (°)	ความเร็วลม (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	> 10	
N	0.06	0.02	0	0	0	0	0.08
NNE	0.02	0.02	0	0	0	0	0.04
NE	0.04	0	0	0	0	0	0.04
ENE	0.04	0	0	0	0	0	0.04
E	0.02	0	0	0	0	0	0.02
ESE	0.08	0.04	0	0	0	0	0.13
SE	0.13	0.21	0.02	0	0	0	0.36
SSE	0.17	0.53	0.15	0	0	0	0.85
S	0.25	1.53	0.87	0.02	0	0	2.67
SSW	0.38	3.69	3.57	0.85	0.02	0	8.51
SW	0.42	5.60	10.78	4.69	0.49	0.06	22.05
WSW	0.59	5.50	17.06	17.17	3.20	0.30	43.82
W	0.28	2.72	7.72	6.96	1.19	0.04	18.91
WNW	0.21	0.72	0.85	0.32	0.04	0	2.14
NW	0.06	0.04	0.08	0.02	0	0	0.21
NNW	0.02	0.06	0.02	0	0	0	0.11
Total	2.80	20.69	41.13	30.03	4.94	0.40	100

ตาราง ข-9 การแจกแจงความถี่ของความเร็วลมที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนสิงหาคม

Direction (°)	ความเร็วลม (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	> 10	
N	0.04	0.04	0	0	0	0	0.08
NNE	0.02	0.02	0	0	0	0	0.04
NE	0.02	0.06	0	0	0	0	0.08
ENE	0.06	0.02	0	0	0	0	0.08
E	0.04	0.02	0	0	0	0	0.06
ESE	0.04	0.02	0	0	0	0	0.06
SE	0.06	0.13	0	0	0	0	0.19
SSE	0.15	0.62	0.15	0	0	0	0.91
S	0.28	1.51	0.66	0	0	0	2.44
SSW	0.42	2.89	2.16	0.17	0.02	0	5.67
SW	0.42	4.54	7.09	3.10	0.42	0.04	15.62
WSW	0.53	5.24	18.04	16.79	3.25	0.23	44.08
W	0.23	3.14	10.23	10.48	1.83	0.19	26.10
WNW	0.25	1.15	1.46	0.68	0.08	0	3.63
NW	0.17	0.19	0.25	0	0	0	0.62
NNW	0.17	0.13	0.02	0	0	0	0.32
Total	2.93	19.72	40.07	31.22	5.60	0.47	100

ตาราง ข-10 การแจกแจงความถี่ของความเร็วลมที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนกันยายน

Direction (°)	ความเร็วลม (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	> 10	
N	0.57	0.53	0.11	0	0	0	1.21
NNE	0.48	0.48	0.04	0	0	0	1.01
NE	0.44	0.35	0	0	0	0	0.79
ENE	0.39	0.26	0.02	0	0	0	0.68
E	0.64	0.26	0	0	0	0	0.90
ESE	0.68	0.37	0	0	0	0	1.05
SE	0.72	0.70	0.02	0	0	0	1.45
SSE	1.27	1.12	0.07	0	0	0	2.46
S	1.01	2.59	0.72	0	0.02	0	4.34
SSW	1.54	4.93	2.06	0.07	0.04	0.04	8.68
SW	1.38	7.11	5.72	1.23	0.26	0.04	15.75
WSW	1.43	7.43	12.28	6.14	0.70	0.07	28.05
W	1.23	5.46	9.30	3.53	0.35	0	19.87
WNW	0.99	3.64	3.20	0.92	0.22	0.04	9.01
NW	0.57	1.67	0.72	0.15	0	0	3.11
NNW	0.72	0.75	0.18	0	0	0	1.64
Total	14.06	37.65	34.45	12.04	1.60	0.20	100

ตาราง ข-11 การแจกแจงความถี่ของความเร็วลมที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนตุลาคม

Direction (°)	ความเร็วลม (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	> 10	
N	1.91	2.99	1.12	0.19	0.02	0	6.24
NNE	2.31	5.62	3.80	1.21	0.23	0.02	13.20
NE	1.97	5.41	4.44	1.95	0.55	0.08	14.41
ENE	2.19	3.99	1.72	0.19	0.02	0	8.11
E	1.51	2.25	0.70	0	0	0.02	4.48
ESE	1.85	1.99	0.30	0.04	0.04	0	4.22
SE	1.23	1.34	0.40	0.02	0	0	2.99
SSE	1.83	1.83	0.32	0.13	0.06	0	4.16
S	1.85	1.85	0.34	0.06	0.02	0	4.12
SSW	1.59	2.57	0.83	0.02	0	0	5.01
SW	1.70	2.76	1.38	0.36	0	0.02	6.22
WSW	1.55	2.50	2.36	0.83	0.15	0.02	7.41
W	1.61	2.12	1.32	0.38	0.11	0	5.54
WNW	1.40	2.06	0.79	0.08	0.04	0	4.37
NW	1.53	2.44	0.62	0.21	0	0	4.80
NNW	1.68	2.23	0.81	0.02	0	0	4.73
Total	27.70	43.95	21.22	5.71	1.25	0.17	100

ตาราง ข-12 การแจกแจงความถี่ของความเร็วลมที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนพฤศจิกายน

Direction (°)	ความเร็วลม (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	> 10	
N	1.38	2.65	1.07	0.15	0.09	0.02	5.37
NNE	1.64	6.10	8.75	7.26	1.38	0.07	25.20
NE	1.78	7.76	12.19	9.01	3.07	0.37	34.19
ENE	1.71	4.32	2.70	0.92	0.09	0.02	9.76
E	1.29	1.89	0.61	0.04	0.04	0.02	3.90
ESE	1.21	1.38	0.35	0.09	0.02	0	3.05
SE	0.86	1.07	0.11	0.07	0	0.02	2.13
SSE	0.99	1.36	0.07	0.02	0	0	2.43
S	1.01	1.47	0.04	0	0	0	2.52
SSW	1.21	1.25	0.07	0.02	0	0	2.54
SW	1.05	0.90	0.07	0.02	0	0	2.04
WSW	0.90	0.42	0.02	0	0	0	1.34
W	0.66	0.20	0.07	0	0	0	0.92
WNW	0.83	0.33	0.09	0	0	0	1.25
NW	0.83	0.42	0.07	0	0	0	1.32
NNW	0.79	0.96	0.29	0	0	0	2.04
Total	18.14	32.48	26.56	17.61	4.69	0.53	100

ตาราง ข-13 การแจกแจงความถี่ของความเร็วลมที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนธันวาคม

Direction (°)	ความเร็วลม (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	> 10	
N	1.63	2.67	1.46	0.23	0.02	0	6.03
NNE	1.36	5.94	11.99	9.02	2.42	0.11	30.84
NE	1.36	6.85	13.50	10.10	4.03	0.96	36.80
ENE	0.89	3.33	2.27	0.85	0.11	0	7.45
E	0.85	0.98	0.11	0	0	0	1.93
ESE	0.55	0.36	0.04	0	0	0	0.96
SE	0.96	0.40	0.04	0	0	0	1.40
SSE	0.68	0.47	0.04	0	0	0	1.19
S	0.79	0.91	0.23	0	0	0	1.93
SSW	1.36	1.36	0.21	0	0	0	2.93
SW	1.10	1.04	0.02	0	0	0	2.16
WSW	0.98	0.36	0	0	0	0	1.34
W	0.81	0.13	0	0	0	0	0.93
WNW	0.76	0.15	0	0	0	0	0.91
NW	0.83	0.19	0.04	0	0	0	1.06
NNW	1.17	0.89	0.08	0	0	0	2.14
Total	16.07	26.04	30.05	20.20	6.58	1.06	100

ภาคผนวก ค

กระจายขนาดและทิศทางของความสูงคลื่นนัยสำคัญ

จากการกระจายขนาดและทิศทางของความสูงคลื่นนัยสำคัญในพื้นที่ศึกษา จังหวัดระยอง ซึ่งได้จากแบบจำลอง SWAN ในปี พ.ศ.2554 – พ.ศ.2558 ที่ตำแหน่งละติจูดที่ 12.5° N ลองจิจูดที่ 101.25° E มาใช้ในการวิเคราะห์การแจกแจงความถี่ของความสูงคลื่นนัยสำคัญซึ่งแบ่งความสูงคลื่นนัยสำคัญตั้งแต่ 0 – 2 m ออกเป็น 6 ช่วงความสูงคลื่นนัยสำคัญ และแบ่งทิศทางออกเป็น 16 ทิศทาง โดยการแจกแจงความถี่ของความสูงคลื่นนัยสำคัญรายปีแสดงในตาราง ค-1 ส่วนการแจกแจงความถี่ของความสูงคลื่นนัยสำคัญรายเดือนแสดงไว้ในตาราง ค-2 ถึง ค-13

ตาราง ค-1 การแจกแจงความถี่ของความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ

Direction (°)	ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (เมตร)						TOTAL
	0 – 0.4	0.4 – 0.8	0.8 – 1.2	1.2 – 1.6	1.6 – 2	> 2	
N	0.41	0.03	0	0	0	0	0.45
NNE	1.28	0.60	0.01	0	0	0	1.89
NE	2.60	2.76	0.25	0.01	0	0	5.62
ENE	2.78	1.81	0.15	0.01	0	0	4.74
E	2.23	0.63	0.02	0	0	0	2.89
ESE	2.35	0.45	0	0	0	0	2.80
SE	4.10	0.42	0.02	0.01	0	0	4.55
SSE	13.48	2.11	0.01	0	0	0	15.60
S	16.75	1.19	0.01	0.01	0	0	17.96
SSW	9.75	3.85	0.48	0.07	0	0.01	14.17
SW	7.82	12.95	3.79	0.36	0.03	0	24.95
WSW	1.27	1.43	0.43	0.03	0	0	3.17
W	0.36	0.16	0.03	0.01	0	0	0.55
WNW	0.20	0.03	0	0	0	0	0.23
NW	0.20	0	0	0	0	0	0.20
NNW	0.22	0	0	0	0	0	0.22
Total	65.81	28.42	5.21	0.51	0.04	0.01	100

ตาราง ค-2 การแจกแจงความถี่ของความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนมกราคม

Direction (°)	ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (เมตร)						TOTAL
	0 - 0.4	0.4 - 0.8	0.8 - 1.2	1.2 - 1.6	1.6 - 2	> 2	
N	0.14	0	0	0	0	0	0.14
NNE	0.81	0.35	0	0	0	0	1.16
NE	3.10	5.37	0.27	0	0	0	8.74
ENE	5.99	5.95	0.18	0.07	0	0	12.20
E	4.74	2.02	0.06	0	0	0	6.82
ESE	4.62	1.71	0	0	0	0	6.33
SE	7.38	1.40	0	0	0	0	8.78
SSE	31.33	6.52	0	0	0	0	37.85
S	14.68	0.62	0	0	0	0	15.30
SSW	2.40	0.02	0	0	0	0	2.42
SW	0.01	0	0	0	0	0	0.01
WSW	0.01	0	0	0	0	0	0.01
W	0.08	0	0	0	0	0	0.08
WNW	0.03	0	0	0	0	0	0.03
NW	0.06	0	0	0	0	0	0.06
NNW	0.09	0	0	0	0	0	0.09
Total	75.45	23.97	0.51	0.07	0	0	100

ตาราง ค-3 การแจกแจงความถี่ของความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือน
กุมภาพันธ์

Direction (°)	ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (เมตร)						TOTAL
	0 - 0.4	0.4 - 0.8	0.8 - 1.2	1.2 - 1.6	1.6 - 2	> 2	
N	0.05	0	0	0	0	0	0.05
NNE	0.44	0.07	0	0	0	0	0.50
NE	1.07	0.96	0.20	0.08	0	0	2.31
ENE	1.89	2.09	0.14	0	0	0	4.12
E	1.81	1.01	0.04	0	0	0	2.87
ESE	2.04	0.61	0	0	0	0	2.65
SE	3.50	0.66	0	0	0	0	4.16
SSE	33.81	6.14	0	0	0	0	39.95
S	37.25	3.30	0	0	0	0	40.55
SSW	2.51	0	0	0	0	0	2.51
SW	0.09	0	0	0	0	0	0.09
WSW	0.04	0	0	0	0	0	0.04
W	0.06	0	0	0	0	0	0.06
WNW	0.02	0	0	0	0	0	0.02
NW	0.02	0	0	0	0	0	0.02
NNW	0.10	0	0	0	0	0	0.10
Total	84.70	14.84	0.38	0.08	0	0	100

ตาราง ค-4 การแจกแจงความถี่ของความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือน
มีนาคม

Direction (°)	ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (เมตร)						TOTAL
	0 - 0.4	0.4 - 0.8	0.8 - 1.2	1.2 - 1.6	1.6 - 2	> 2	
N	0	0	0	0	0	0	0
NNE	0.12	0.26	0	0	0	0	0.38
NE	0.14	0.41	0.17	0	0	0	0.72
ENE	0.34	0.55	0.38	0	0	0	1.27
E	0.73	0.50	0.09	0	0	0	1.32
ESE	1.04	0.36	0	0	0	0	1.40
SE	2.77	0.81	0	0	0	0	3.58
SSE	23.53	8.15	0	0	0	0	31.68
S	46.73	5.45	0	0	0	0	52.18
SSW	6.78	0.32	0	0	0	0	7.10
SW	0.35	0.03	0	0	0	0	0.38
WSW	0.01	0	0	0	0	0	0.01
W	0	0	0	0	0	0	0
WNW	0	0	0	0	0	0	0
NW	0	0	0	0	0	0	0
NNW	0	0	0	0	0	0	0
Total	82.54	16.82	0.64	0	0	0	100

ตาราง ค-5 การแจกแจงความถี่ของความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือน
เมษายน

Direction (°)	ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (เมตร)						TOTAL
	0 - 0.4	0.4 - 0.8	0.8 - 1.2	1.2 - 1.6	1.6 - 2	> 2	
N	0.14	0	0	0	0	0	0.14
NNE	0.81	0.35	0	0	0	0	1.16
NE	3.10	5.37	0.27	0	0	0	8.74
ENE	5.99	5.95	0.18	0.07	0	0	12.20
E	4.74	2.02	0.06	0	0	0	6.82
ESE	4.62	1.71	0	0	0	0	6.33
SE	7.38	1.40	0	0	0	0	8.78
SSE	31.33	6.52	0	0	0	0	37.85
S	14.68	0.62	0	0	0	0	15.30
SSW	2.40	0.02	0	0	0	0	2.42
SW	0.01	0	0	0	0	0	0.01
WSW	0.01	0	0	0	0	0	0.01
W	0.08	0	0	0	0	0	0.08
WNW	0.03	0	0	0	0	0	0.03
NW	0.06	0	0	0	0	0	0.06
NNW	0.09	0	0	0	0	0	0.09
Total	75.45	23.97	0.51	0.07	0	0	100

ตาราง ค-6 การแจกแจงความถี่ของความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือน พฤษภาคม

Direction (°)	ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (เมตร)						TOTAL
	0 - 0.4	0.4 - 0.8	0.8 - 1.2	1.2 - 1.6	1.6 - 2	> 2	
N	0.07	0	0	0	0	0	0.07
NNE	0.06	0	0	0	0	0	0.06
NE	0.19	0	0	0	0	0	0.19
ENE	0.27	0	0	0	0	0	0.27
E	0.10	0	0	0	0	0	0.10
ESE	0.09	0	0	0	0	0	0.09
SE	0.73	0.07	0	0	0	0	0.79
SSE	9.60	1.13	0.01	0	0	0	10.74
S	15.03	0.92	0.07	0	0	0	16.02
SSW	20.37	8.92	1.57	0.01	0	0	30.87
SW	16.13	17.66	3.97	0.03	0	0	37.80
WSW	1.20	0.98	0.48	0.05	0	0	2.72
W	0.20	0.05	0	0	0	0	0.26
WNW	0.01	0	0	0	0	0	0.01
NW	0.01	0	0	0	0	0	0.01
NNW	0.01	0	0	0	0	0	0.01
Total	64.07	29.74	6.10	0.10	0	0	100

ตาราง ค-7 การแจกแจงความถี่ของความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือน มิถุนายน

Direction (°)	ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (เมตร)						TOTAL
	0 - 0.4	0.4 - 0.8	0.8 - 1.2	1.2 - 1.6	1.6 - 2	> 2	
N	0	0	0	0	0	0	0
NNE	0	0	0	0	0	0	0
NE	0	0	0	0	0	0	0
ENE	0.01	0	0	0	0	0	0.01
E	0	0	0	0	0	0	0
ESE	0.01	0	0	0	0	0	0.01
SE	0.01	0	0	0	0	0	0.01
SSE	0.22	0	0	0	0	0	0.22
S	2.82	0.19	0	0	0	0	3.01
SSW	16.45	10.11	1.90	0.31	0	0	28.76
SW	20.01	34.39	9.60	0.59	0.07	0	64.66
WSW	1.13	1.54	0.50	0	0	0	3.17
W	0.14	0	0	0	0	0	0.14
WNW	0.01	0	0	0	0	0	0.01
NW	0	0	0	0	0	0	0
NNW	0.01	0	0	0	0	0	0.01
Total	40.81	46.23	11.99	0.90	0.07	0	100

ตาราง ค-8 การแจกแจงความถี่ของความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนกรกฎาคม

Direction (°)	ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (เมตร)						TOTAL
	0 - 0.4	0.4 - 0.8	0.8 - 1.2	1.2 - 1.6	1.6 - 2	> 2	
N	0	0	0	0	0	0	0
NNE	0	0	0	0	0	0	0
NE	0	0	0	0	0	0	0
ENE	0	0	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	0	0
ESE	0	0	0	0	0	0	0
SE	0	0	0	0	0	0	0
SSE	1.18	0	0	0	0	0	1.18
S	4.76	0.32	0	0	0	0	5.09
SSW	11.47	10.62	0.85	0.12	0	0	23.06
SW	12.23	37.29	12.98	1.55	0.09	0	64.15
WSW	1.03	3.52	1.36	0.12	0.03	0	6.06
W	0.26	0.11	0	0	0	0	0.36
WNW	0.09	0	0	0	0	0	0.09
NW	0	0	0	0	0	0	0
NNW	0	0	0	0	0	0	0
Total	31.03	51.86	15.19	1.79	0.12	0	100

ตาราง ค-9 การแจกแจงความถี่ของความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนสิงหาคม

Direction (°)	ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (เมตร)						TOTAL
	0 - 0.4	0.4 - 0.8	0.8 - 1.2	1.2 - 1.6	1.6 - 2	> 2	
N	0	0	0	0	0	0	0
NNE	0	0	0	0	0	0	0
NE	0	0	0	0	0	0	0
ENE	0.04	0	0	0	0	0	0.04
E	0.04	0	0	0	0	0	0.04
ESE	0.11	0	0	0	0	0	0.11
SE	0.13	0	0	0	0	0	0.13
SSE	0.48	0.21	0	0	0	0	0.69
S	4.45	0.61	0	0	0	0	5.06
SSW	12.76	7.20	0.66	0.05	0.01	0	20.67
SW	11.96	35.78	13.17	1.40	0.16	0.05	62.52
WSW	2.28	5.23	1.92	0.16	0	0	9.59
W	0.76	0.38	0	0	0	0	1.14
WNW	0	0	0	0	0	0	0
NW	0	0	0	0	0	0	0
NNW	0	0	0	0	0	0	0
Total	33.02	49.40	15.75	1.61	0.17	0.05	100

ตาราง ค-10 การแจกแจงความถี่ของความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนกันยายน

Direction (°)	ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (เมตร)						TOTAL
	0 - 0.4	0.4 - 0.8	0.8 - 1.2	1.2 - 1.6	1.6 - 2	> 2	
N	0.31	0	0	0	0	0	0.31
NNE	0.17	0	0	0	0	0	0.17
NE	0.08	0	0	0	0	0	0.08
ENE	0.15	0	0	0	0	0	0.15
E	0.16	0	0	0	0	0	0.16
ESE	0.13	0	0	0	0	0	0.13
SE	1.50	0	0	0	0	0	1.50
SSE	2.93	0.03	0	0	0	0	2.96
S	10.58	0.38	0	0	0	0	10.96
SSW	18.01	5.76	0.56	0.35	0.04	0.08	24.81
SW	18.80	22.97	3.97	0.53	0	0	46.26
WSW	4.38	4.65	0.59	0.04	0	0	9.66
W	0.58	1.22	0.35	0.08	0	0	2.23
WNW	0.17	0.24	0	0	0	0	0.42
NW	0.12	0	0	0	0	0	0.12
NNW	0.10	0	0	0	0	0	0.10
Total	58.17	35.25	5.46	1	0.04	0.08	100

ตาราง ค-11 การแจกแจงความถี่ของความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนตุลาคม

Direction (°)	ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (เมตร)						TOTAL
	0 - 0.4	0.4 - 0.8	0.8 - 1.2	1.2 - 1.6	1.6 - 2	> 2	
N	1.17	0	0	0	0	0	1.17
NNE	2.62	0.11	0	0	0	0	2.74
NE	5.56	1.38	0.15	0	0	0	7.10
ENE	5.97	0.78	0.01	0	0	0	6.77
E	5.63	0.15	0.02	0	0	0	5.80
ESE	7.01	0.27	0.04	0.01	0	0	7.33
SE	11.22	0.46	0.09	0.01	0	0	11.78
SSE	11.30	0.59	0.06	0.03	0	0	11.98
S	8.25	0.46	0.07	0.09	0	0	8.87
SSW	10.36	1.34	0.15	0	0	0	11.85
SW	9.55	3.62	0.51	0.13	0	0	13.81
WSW	4.24	0.11	0.05	0	0	0	4.40
W	1.89	0.03	0.01	0	0	0	1.92
WNW	1.67	0.11	0	0	0	0	1.79
NW	1.44	0.03	0	0	0	0	1.47
NNW	1.22	0	0	0	0	0	1.22
Total	89.10	9.46	1.16	0.28	0	0	100

ตาราง ค-12 การแจกแจงความถี่ของความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนพฤศจิกายน

Direction (°)	ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (เมตร)						TOTAL
	0 - 0.4	0.4 - 0.8	0.8 - 1.2	1.2 - 1.6	1.6 - 2	> 2	
N	1.51	0.33	0.03	0	0	0	1.88
NNE	6.02	3.20	0.07	0	0	0	9.29
NE	11.17	9.84	0.42	0.01	0	0	21.45
ENE	10.45	5.58	0.50	0.01	0	0	16.54
E	7.56	1.20	0.03	0.01	0	0	8.80
ESE	6.78	0.62	0.01	0.01	0.02	0	7.44
SE	9.10	0.73	0.12	0.08	0.03	0	10.07
SSE	15.21	0.97	0.04	0	0	0	16.22
S	4.68	0.02	0	0	0	0	4.70
SSW	1.17	0	0	0	0	0	1.17
SW	0.71	0	0	0	0	0	0.71
WSW	0.17	0	0	0	0	0	0.17
W	0.27	0	0	0	0	0	0.27
WNW	0.20	0	0	0	0	0	0.20
NW	0.39	0	0	0	0	0	0.39
NNW	0.69	0	0	0	0	0	0.69
Total	76.08	22.50	1.23	0.13	0.06	0	100

ตาราง ค-13 การแจกแจงความถี่ของความสูงคลื่นนัยสำคัญที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนธันวาคม

Direction (°)	ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (เมตร)						TOTAL
	0 - 0.4	0.4 - 0.8	0.8 - 1.2	1.2 - 1.6	1.6 - 2	> 2	
N	1.65	0.07	0	0	0	0	1.72
NNE	4.91	3.17	0.05	0	0	0	8.13
NE	9.76	15.38	1.75	0.01	0	0	26.91
ENE	8.32	7.37	0.62	0	0	0	16.31
E	5.86	2.92	0.01	0	0	0	8.79
ESE	5.82	1.94	0	0	0	0	7.76
SE	9.91	0.93	0	0	0	0	10.84
SSE	13.10	0.56	0	0	0	0	13.66
S	4.33	0	0	0	0	0	4.33
SSW	0.46	0	0	0	0	0	0.46
SW	0.06	0	0	0	0	0	0.06
WSW	0.15	0	0	0	0	0	0.15
W	0.01	0	0	0	0	0	0.01
WNW	0.19	0	0	0	0	0	0.19
NW	0.28	0	0	0	0	0	0.28
NNW	0.42	0	0	0	0	0	0.42
Total	65.22	32.33	2.44	0.01	0	0	100

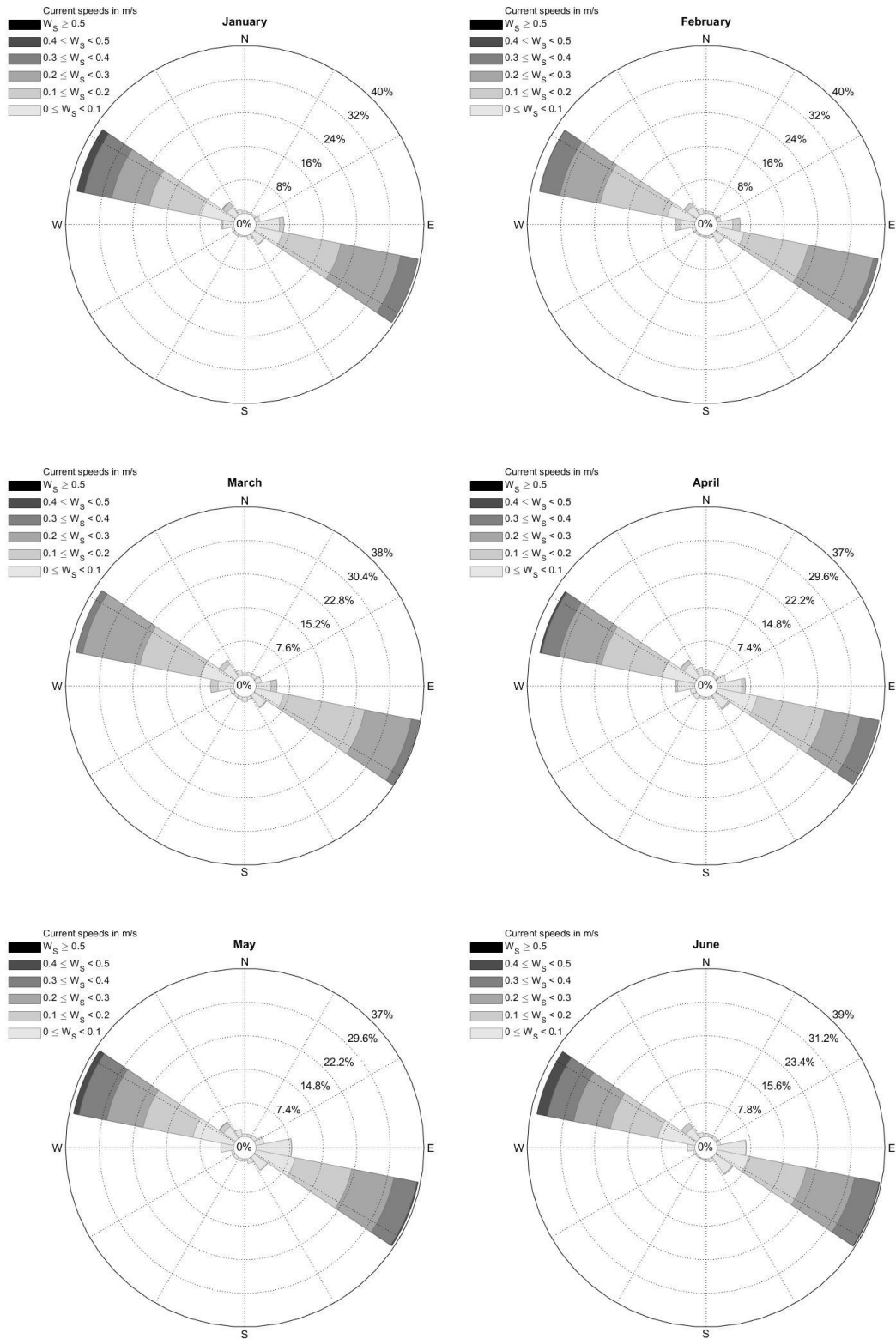
ภาคผนวก ง

การกระจายขนาดและทิศทางของความเร็วกระแสน้ำ

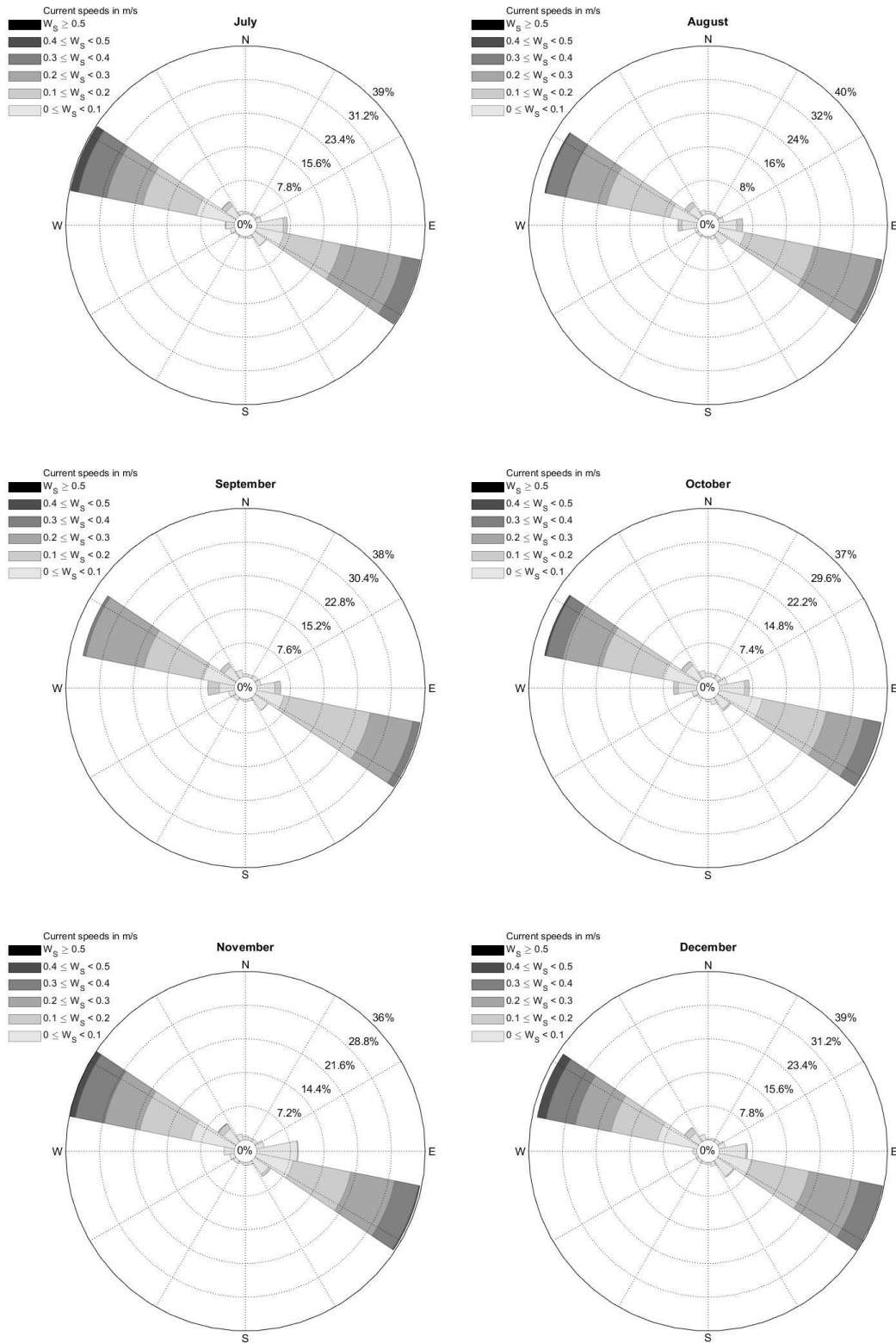
จากการกระจายขนาดและทิศทางของความเร็วกระแสน้ำในพื้นที่ศึกษา จังหวัดระยอง ซึ่งได้จากแบบจำลอง Delft3D ในปี พ.ศ.2554 – พ.ศ.2556 ที่ตำแหน่งละติจูดที่ 12.5° N ลองจิจูดที่ 101.25° E มาใช้ในการวิเคราะห์การแจกแจงความถี่ของความเร็วกระแสน้ำซึ่งแบ่งความเร็วกระแสน้ำตั้งแต่ 0 – 0.5 เมตร/วินาที ออกเป็น 6 ช่วงความเร็วกระแสน้ำ และแบ่งทิศทางออกเป็น 16 ทิศทาง โดยผังข้อมูลกระแสน้ำแสดงไว้ในรูปที่ ง-1 สำหรับการแจกแจงความถี่ของความเร็วกระแสน้ำทั้งหมดแสดงในตาราง ง-1 ส่วนการแจกแจงความถี่ของความเร็วกระแสน้ำรายเดือนแสดงไว้ในตาราง ง-2 ถึง ง-13



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ ง-1 ผังข้อมูลกระแสน้ำรายเดือนบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง



รูปที่ ง-1 (ต่อ) ผังข้อมูลกระแสน้ำรายเดือนบริเวณชายฝั่งทะเลระยอง

ตาราง ง-1 การแจกแจงความถี่ของความเร็วกระแสน้ำที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ

Direction (°)	ความเร็วกระแสน้ำ (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.4 - 0.5	> 0.5	
N	0.66	0	0	0	0	0	0.66
NNE	0.60	0	0	0	0	0	0.60
NE	0.68	0	0	0	0	0	0.68
ENE	1.38	0	0	0	0	0	1.38
E	5.63	0.86	0	0	0	0	6.49
ESE	7.43	15.07	11.56	3.68	0.06	0	37.81
SE	3.43	0.20	0	0	0	0	3.63
SSE	0.80	0	0	0	0	0	0.80
S	0.53	0	0	0	0	0	0.53
SSW	0.36	0	0	0	0	0	0.36
SW	0.58	0	0	0	0	0	0.58
WSW	0.84	0	0	0	0	0	0.84
W	2.83	0.71	0	0	0	0	3.54
WNW	8.14	12.97	9.61	4.87	0.95	0	36.55
NW	3.03	1.16	0.05	0	0	0	4.23
NNW	1.33	0	0	0	0	0	1.33
Total	38.24	30.98	21.22	8.55	1.02	0	100

ตาราง ง-2 การแจกแจงความถี่ของความเร็วกระแสน้ำที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนมกราคม

Direction (°)	ความเร็วกระแสน้ำ (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.4 - 0.5	> 0.5	
N	0.56	0	0	0	0	0	0.56
NNE	0.39	0	0	0	0	0	0.39
NE	0.44	0	0	0	0	0	0.44
ENE	1.00	0	0	0	0	0	1.00
E	5.61	1.06	0	0	0	0	6.67
ESE	6.44	14.17	14.50	4.28	0	0	39.39
SE	2.94	0.11	0	0	0	0	3.06
SSE	1.00	0	0	0	0	0	1.00
S	0.22	0	0	0	0	0	0.22
SSW	0.39	0	0	0	0	0	0.39
SW	0.56	0	0	0	0	0	0.56
WSW	0.50	0	0	0	0	0	0.50
W	2.56	0.33	0	0	0	0	2.89
WNW	8.39	12.11	9.11	6.72	1.72	0	38.06
NW	2.39	1.33	0.11	0	0	0	3.83
NNW	1.06	0	0	0	0	0	1.06
Total	34.44	29.11	23.72	11.00	1.72	0	100

ตาราง ง-3 การแจกแจงความถี่ของความเร็วกระแสน้ำที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือน
กุมภาพันธ์

Direction (°)	ความเร็วกระแสน้ำ (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.4 - 0.5	> 0.5	
N	0.54	0	0	0	0	0	0.54
NNE	0.59	0	0	0	0	0	0.59
NE	0.39	0	0	0	0	0	0.39
ENE	0.98	0	0	0	0	0	0.98
E	3.73	1.76	0	0	0	0	5.49
ESE	6.57	15.64	15.78	1.18	0	0	39.17
SE	2.60	0.05	0	0	0	0	2.65
SSE	0.64	0	0	0	0	0	0.64
S	0.44	0	0	0	0	0	0.44
SSW	0.34	0	0	0	0	0	0.34
SW	0.49	0	0	0	0	0	0.49
WSW	0.74	0	0	0	0	0	0.74
W	3.38	1.32	0	0	0	0	4.71
WNW	6.76	16.32	9.80	4.90	0.05	0	37.84
NW	2.70	0.98	0	0	0	0	3.68
NNW	1.32	0	0	0	0	0	1.32
Total	32.21	36.08	25.59	6.08	0.05	0	100

ตาราง ง-4 การแจกแจงความถี่ของความเร็วกระแสน้ำที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนมีนาคม

Direction (°)	ความเร็วกระแสน้ำ (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.4 - 0.5	> 0.5	
N	0.45	0	0	0	0	0	0.45
NNE	0.67	0	0	0	0	0	0.67
NE	0.81	0	0	0	0	0	0.81
ENE	1.34	0	0	0	0	0	1.34
E	3.41	1.34	0	0	0	0	4.75
ESE	6.45	18.68	10.75	1.84	0	0	37.72
SE	3.27	0.18	0	0	0	0	3.45
SSE	0.58	0	0	0	0	0	0.58
S	1.03	0	0	0	0	0	1.03
SSW	0.54	0	0	0	0	0	0.54
SW	0.58	0	0	0	0	0	0.58
WSW	0.85	0	0	0	0	0	0.85
W	3.54	1.66	0	0	0	0	5.20
WNW	7.66	13.98	13.22	1.48	0	0	36.34
NW	3.36	1.08	0	0	0	0	4.44
NNW	1.25	0	0	0	0	0	1.25
Total	35.80	36.92	23.97	3.32	0	0	100

ตาราง ง-5 การแจกแจงความถี่ของความเร็วกระแสน้ำที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือน
เมษายน

Direction (°)	ความเร็วกระแสน้ำ (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.4 - 0.5	> 0.5	
N	1.16	0	0	0	0	0	1.16
NNE	0.83	0	0	0	0	0	0.83
NE	0.69	0	0	0	0	0	0.69
ENE	2.04	0	0	0	0	0	2.04
E	5.46	0.79	0	0	0	0	6.25
ESE	9.03	15.19	8.10	4.12	0	0	36.44
SE	3.43	0.37	0	0	0	0	3.80
SSE	0.42	0	0	0	0	0	0.42
S	0.56	0	0	0	0	0	0.56
SSW	0.37	0	0	0	0	0	0.37
SW	1.02	0	0	0	0	0	1.02
WSW	1.11	0	0	0	0	0	1.11
W	3.84	0.46	0	0	0	0	4.31
WNW	7.45	13.56	9.54	3.98	0.37	0	34.91
NW	3.43	0.88	0.05	0	0	0	4.35
NNW	1.76	0	0	0	0	0	1.76
Total	42.59	31.25	17.69	8.10	0.37	0	100

ตาราง ง-6 การแจกแจงความถี่ของความเร็วกระแสน้ำที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือน
พฤษภาคม

Direction (°)	ความเร็วกระแสน้ำ (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.4 - 0.5	> 0.5	
N	0.58	0	0	0	0	0	0.58
NNE	0.63	0	0	0	0	0	0.63
NE	0.76	0	0	0	0	0	0.76
ENE	1.88	0	0	0	0	0	1.88
E	7.80	0.09	0	0	0	0	7.89
ESE	8.78	12.72	9.50	5.15	0.27	0	36.42
SE	3.49	0.09	0	0	0	0	3.58
SSE	1.12	0	0	0	0	0	1.12
S	0.49	0	0	0	0	0	0.49
SSW	0.63	0	0	0	0	0	0.63
SW	0.63	0	0	0	0	0	0.63
WSW	0.54	0	0	0	0	0	0.54
W	2.78	0	0	0	0	0	2.78
WNW	9.18	11.16	8.20	6.23	1.21	0	35.98
NW	3.18	1.12	0.09	0	0	0	4.39
NNW	1.70	0	0	0	0	0	1.70
Total	44.18	25.18	17.79	11.38	1.48	0	100

ตาราง ง-7 การแจกแจงความถี่ของความเร็วกระแสน้ำที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือน มิถุนายน

Direction (°)	ความเร็วกระแสน้ำ (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.4 - 0.5	> 0.5	
N	0.69	0	0	0	0	0	0.69
NNE	0.60	0	0	0	0	0	0.60
NE	0.65	0	0	0	0	0	0.65
ENE	0.88	0	0	0	0	0	0.88
E	6.67	0.09	0	0	0	0	6.76
ESE	7.45	13.75	11.39	5.83	0.14	0	38.56
SE	4.72	0.23	0	0	0	0	4.95
SSE	0.83	0	0	0	0	0	0.83
S	0.51	0	0	0	0	0	0.51
SSW	0.19	0	0	0	0	0	0.19
SW	0.32	0	0	0	0	0	0.32
WSW	0.46	0	0	0	0	0	0.46
W	1.71	0	0	0	0	0	1.71
WNW	8.80	11.30	8.70	6.30	2.41	0	37.50
NW	3.01	1.34	0	0	0	0	4.35
NNW	1.02	0	0	0	0	0	1.02
Total	38.52	26.71	20.09	12.13	2.55	0	100

ตาราง ง-8 การแจกแจงความถี่ของความเร็วกระแสน้ำที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือน
กรกฎาคม

Direction (°)	ความเร็วกระแสน้ำ (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.4 - 0.5	> 0.5	
N	0.54	0	0	0	0	0	0.54
NNE	0.40	0	0	0	0	0	0.40
NE	0.58	0	0	0	0	0	0.58
ENE	1.16	0	0	0	0	0	1.16
E	6.18	0.90	0	0	0	0	7.08
ESE	6.50	13.40	14.52	4.26	0	0	38.66
SE	3.09	0.09	0	0	0	0	3.18
SSE	0.58	0	0	0	0	0	0.58
S	0.40	0	0	0	0	0	0.40
SSW	0.40	0	0	0	0	0	0.40
SW	0.27	0	0	0	0	0	0.27
WSW	1.08	0	0	0	0	0	1.08
W	1.93	0.18	0	0	0	0	2.11
WNW	8.96	12.63	8.56	6.68	1.84	0	38.66
NW	2.78	1.16	0.09	0	0	0	4.03
NNW	0.85	0	0	0	0	0	0.85
Total	35.71	28.36	23.16	10.93	1.84	0	100

ตาราง ง-9 การแจกแจงความถี่ของความเร็วกระแสน้ำที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนสิงหาคม

Direction (°)	ความเร็วกระแสน้ำ (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.4 - 0.5	> 0.5	
N	0.72	0	0	0	0	0	0.72
NNE	0.54	0	0	0	0	0	0.54
NE	0.45	0	0	0	0	0	0.45
ENE	1.12	0	0	0	0	0	1.12
E	4.12	1.48	0	0	0	0	5.60
ESE	6.23	16.76	15.14	1.34	0	0	39.47
SE	2.82	0	0	0	0	0	2.82
SSE	0.81	0	0	0	0	0	0.81
S	0.45	0	0	0	0	0	0.45
SSW	0.31	0	0	0	0	0	0.31
SW	0.54	0	0	0	0	0	0.54
WSW	0.67	0	0	0	0	0	0.67
W	3.58	0.94	0	0	0	0	4.53
WNW	6.63	15.32	9.77	4.93	0.27	0	36.92
NW	2.82	1.16	0	0	0	0	3.99
NNW	1.08	0	0	0	0	0	1.08
Total	32.89	35.66	24.91	6.27	0.27	0	100

ตาราง ง-10 การแจกแจงความถี่ของความเร็วกระแสน้ำที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือน
กันยายน

Direction (°)	ความเร็วกระแสน้ำ (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.4 - 0.5	> 0.5	
N	0.65	0	0	0	0	0	0.65
NNE	0.60	0	0	0	0	0	0.60
NE	0.83	0	0	0	0	0	0.83
ENE	1.02	0	0	0	0	0	1.02
E	4.07	1.34	0	0	0	0	5.42
ESE	6.30	19.86	9.81	1.62	0	0	37.59
SE	3.52	0.09	0	0	0	0	3.61
SSE	0.51	0	0	0	0	0	0.51
S	0.51	0	0	0	0	0	0.51
SSW	0.28	0	0	0	0	0	0.28
SW	0.83	0	0	0	0	0	0.83
WSW	1.39	0	0	0	0	0	1.39
W	3.38	2.59	0	0	0	0	5.97
WNW	7.18	13.61	13.38	0.65	0	0	34.81
NW	3.24	1.06	0	0	0	0	4.31
NNW	1.67	0	0	0	0	0	1.67
Total	35.97	38.56	23.19	2.27	0	0	100

ตาราง ง-11 การแจกแจงความถี่ของความเร็วกระแสน้ำที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนตุลาคม

Direction (°)	ความเร็วกระแสน้ำ (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.4 - 0.5	> 0.5	
N	0.90	0	0	0	0	0	0.90
NNE	0.81	0	0	0	0	0	0.81
NE	1.03	0	0	0	0	0	1.03
ENE	1.84	0	0	0	0	0	1.84
E	5.56	1.03	0	0	0	0	6.59
ESE	9.68	14.38	8.38	3.85	0.04	0	36.34
SE	3.14	0.40	0	0	0	0	3.54
SSE	1.34	0	0	0	0	0	1.34
S	0.54	0	0	0	0	0	0.54
SSW	0.09	0	0	0	0	0	0.09
SW	0.40	0	0	0	0	0	0.40
WSW	1.16	0	0	0	0	0	1.16
W	4.12	1.03	0	0	0	0	5.15
WNW	7.75	13.58	8.83	3.67	0.36	0	34.18
NW	3.54	1.03	0.04	0	0	0	4.61
NNW	1.48	0	0	0	0	0	1.48
Total	43.37	31.45	17.25	7.53	0.40	0	100

ตาราง ง-12 การแจกแจงความถี่ของความเร็วกระแสน้ำที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือนพฤศจิกายน

Direction (°)	ความเร็วกระแสน้ำ (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.4 - 0.5	> 0.5	
N	0.83	0	0	0	0	0	0.83
NNE	0.60	0	0	0	0	0	0.60
NE	0.69	0	0	0	0	0	0.69
ENE	1.67	0	0	0	0	0	1.67
E	8.70	0.19	0	0	0	0	8.89
ESE	7.96	12.55	9.58	5.23	0.23	0	35.56
SE	3.56	0.56	0	0	0	0	4.12
SSE	0.69	0	0	0	0	0	0.69
S	0.65	0	0	0	0	0	0.65
SSW	0.32	0	0	0	0	0	0.32
SW	0.74	0	0	0	0	0	0.74
WSW	1.02	0	0	0	0	0	1.02
W	2.18	0	0	0	0	0	2.18
WNW	9.49	11.11	7.73	6.34	1.25	0	35.93
NW	3.29	1.30	0.14	0	0	0	4.72
NNW	1.39	0	0	0	0	0	1.39
Total	43.80	25.69	17.45	11.57	1.48	0	100

ตาราง ง-13 การแจกแจงความถี่ของความเร็วกระแสน้ำที่ชายฝั่งระยอง ตามทิศทางต่างๆ ในเดือน
ธันวาคม

Direction (°)	ความเร็วกระแสน้ำ (เมตร/วินาที)						TOTAL
	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.4 - 0.5	> 0.5	
N	0.27	0	0	0	0	0	0.27
NNE	0.45	0	0	0	0	0	0.45
NE	0.72	0	0	0	0	0	0.72
ENE	1.52	0	0	0	0	0	1.52
E	6.18	0.36	0	0	0	0	6.54
ESE	7.57	13.71	11.96	5.38	0.04	0	38.66
SE	4.48	0.22	0	0	0	0	4.70
SSE	1.03	0	0	0	0	0	1.03
S	0.45	0	0	0	0	0	0.45
SSW	0.45	0	0	0	0	0	0.45
SW	0.63	0	0	0	0	0	0.63
WSW	0.49	0	0	0	0	0	0.49
W	0.94	0	0	0	0	0	0.94
WNW	9.36	10.98	8.47	6.90	2.06	0	37.77
NW	2.46	1.48	0.04	0	0	0	3.99
NNW	1.39	0	0	0	0	0	1.39
Total	38.40	26.75	20.47	12.28	2.11	0	100

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายพงษ์สิทธิ์ ผลสมบุญ
วัน เดือน ปี เกิด	20 มกราคม 2535
สถานที่เกิด	จังหวัดชลบุรี
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) เกียรตินิยมอันดับ 2 ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	189/620 แขวงเสนานิคม เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
ผลงานตีพิมพ์	1. Tidal Current of the Oil Spill High Risk Zone in the Gulf of Thailand 2. Effect of Monsoon Wind to Current in East Coast of the Gulf of Thailand
รางวัลที่ได้รับ	-