

รายงานฉบับสมบูรณ์

การประเมินศักยภาพของพลังงานคลื่นในทะเลบริเวณพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย

โดยประยุกต์ระบบภูมิสารสนเทศ

An Assessment of Sea Wave Potential in Southern Thailand using Geo-Informatics

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ แวศักดิ์¹

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทัศน์ วีสกุล²

อาจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ¹

อาจารย์ จำรูญ ศรีชัยชนะ³

นายฉลอง แก้วประเสริฐ³

นายบุญเลิศ อาชีวะระงับโรค⁴

¹ ศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

² สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

³ ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์

⁴ กรมอุตุนิยมวิทยา

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง “การประเมินศักยภาพของพลังงานคลื่นในทะเลบริเวณพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทยโดยประยุกต์ระบบภูมิสารสนเทศ” สำเร็จลุล่วงไปได้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและสนับสนุนจากหลายฝ่ายดังต่อไปนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ อธิการบดีมหาวิทยาลัยทักษิณและคณะกรรมการบริหารกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยทักษิณ ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยของโครงการฯ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.วัฒนา กันบัว ผู้อำนวยการศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล กรมอุตุนิยมวิทยา สำหรับความอนุเคราะห์ข้อมูลของโครงการฯ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานลม-แสงอาทิตย์ ศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ ที่อำนวยความสะดวกและเอื้อเพื่อสถานที่เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ในการศึกษาวิจัยของโครงการฯ และขอขอบคุณกรมอุตุนิยมวิทยา ที่เอื้อเพื่อข้อมูลที่เป็นประโยชน์

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยวิจัยตลอดจนผู้เกี่ยวข้องในโครงการฯ ทุกท่าน ที่ให้การช่วยเหลือจนสามารถดำเนินโครงการฯ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ แวศักดิ์
หัวหน้าโครงการฯ

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพของพลังงานคลื่นในทะเลตามแนวชายฝั่งทะเลอ่าวไทยในบริเวณภาคใต้ของประเทศไทย โดยเป็นการประเมินศักยภาพของคลื่นในทะเลอ่าวไทยเพื่อศึกษาบริเวณที่มีศักยภาพของคลื่นสูงพอสำหรับการผลิตไฟฟ้าโดยอาศัยตัวแปลงคลื่น (Wave Converter) โดยอาศัยแบบจำลอง WAM กับฐานข้อมูลภูมิอากาศนำเข้า NCEP/NCAR ปี พ.ศ. 2554-2555

ผลจากแบบจำลอง WAM โดยอาศัยข้อมูลภูมิอากาศนำเข้า NCEP/NCAR ปี พ.ศ. 2554 และ ปี พ.ศ. 2555 แสดงให้เห็นว่าบริเวณอ่าวไทยตอนล่างมีความสูงของคลื่นนัยสำคัญ (Significant Wave Height) กำลังคลื่น (Wave Power) และพลังงานของคลื่น (Wave Energy) สูงกว่าบริเวณอื่นๆ ของอ่าวไทยโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณจังหวัดนราธิวาสซึ่งมีความสูงของคลื่นนัยสำคัญสูงสุดเท่ากับ 1.076 เมตร มีกำลังคลื่นเฉลี่ยรายปีสูงสุดเท่ากับ 4,359 วัตต์ต่อเมตร และมีค่าพลังงานของคลื่นสูงสุดเท่ากับ 1,676 จูลต่อตารางเมตร ดังนั้นจากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่าพื้นที่ที่มีความเป็นไปได้ในการพัฒนาการใช้ประโยชน์จากพลังงานคลื่นในทะเลอ่าวไทยคือ บริเวณจังหวัดนราธิวาส

Abstract

This research project aims to assess the potential of wave energy in the sea along the coast in the Gulf of Southern Thailand in order to study the potential of the wave for electricity generation using wave converter. The study was done based on WAM modeling together with NCEP/NCAR climate database in 2011-2012.

Results from WAM modeling and NCEP/NCAR climate database in 2011 and 2012 show that wave in the lower part of the Gulf of Thailand has the significant wave height, wave power as well as wave energy higher than that of other regions particularly in Narathiwat Province. The yearly average significant wave height is 1.076 m, with an average annual wave power of 4,359 W/m and the energy of the wave is 1,676 J/m². The study found that the possible area to take advantage of wave energy development in the Gulf of Thailand is Narathiwat province.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎี	6
2.1 คลื่น (Wave)	6
2.1.1 การเกิดคลื่น (Wave Generation)	6
2.1.2 สาเหตุของการเกิดคลื่น	6
2.1.3 ส่วนประกอบของคลื่น	7
2.1.4 ขนาดของคลื่น	8
2.1.5 ชนิดของคลื่น	9
2.1.6 การจำแนกคลื่นในมหาสมุทรใช้เกณฑ์ในการแบ่งได้เป็น 3 แบบ	9
2.1.7 ลักษณะของคลื่น ชนิดและการเกิดของคลื่นเนื่องมาจากลม	10
2.1.8 ชนิดและการเกิดของคลื่นเนื่องมาจากลม	13
2.1.9 การแตกของคลื่น (Wave Breaking)	15
2.1.10 การเปลี่ยนทิศทางของคลื่น	18
2.1.11 การเปลี่ยนแปลงเมื่อคลื่นเข้าหาฝั่ง	19
2.2 พลังงานจากคลื่น (Wave Energy)	19
2.2.1 พารามิเตอร์ของคลื่น	20
2.2.2 การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของพลังงานคลื่น	22
2.2.3 กำลังคลื่น (Wave Power)	25
2.2.4 สมการเอ็มไพริคัลของพลังงานคลื่น	26
2.3 การตรวจคลื่นและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น	26
2.4 แบบจำลองคลื่นทะเล	27
2.4.1 แบบจำลอง WAM (WAM Model)	29
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศ	30
2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างประเทศ	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	36
3.1 พื้นที่ศึกษา	36
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	37
บทที่ 4 ผลการศึกษาวิจัย	39
4.1 ผลการศึกษาวิจัย	39
4.2 การใช้ประโยชน์พื้นที่ทางทะเล	106
4.3 สรุปผลการวิจัย	133
บทที่ 5 สรุปและเสนอแนะ	134
5.1 สรุป	134
5.2 ข้อเสนอแนะ	134
บรรณานุกรม	135

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 การแบ่งคลื่นตามคาบเวลาของคลื่น	9
2.2 ความเร็วของคลื่นน้ำลึกและคลื่นน้ำตื้น	12
2.3 การจำแนกสถานะของทะเล	20
4.1 สรุปศักยภาพพลังงานของคลื่นในทะเลอ่าวไทย ปี พ.ศ. 2554	70
4.2 สรุปศักยภาพพลังงานของคลื่นในทะเลอ่าวไทย ปี พ.ศ. 2555	71
4.3 ชั้นข้อมูล GIS ของพื้นที่ทางทะเลของโครงการ	106

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 เครื่องผลิตไฟฟ้าจากพลังงานคลื่น Limpet	2
1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยอาศัยพลังกระแสน้ำขึ้น-น้ำลง	3
1.3 สถานีวัดระดับน้ำทะเลสูงสุด-ต่ำสุดของกรมอุทกศาสตร์	5
2.1 องค์ประกอบของคลื่น	7
2.2 คลื่นน้ำลึก (Deep Water Wave)	10
2.3 คลื่นน้ำตื้น (shallow water wave)	11
2.4 การส่งผ่านของคลื่น (transitional waves)	11
2.5 คลื่นที่เห็นบนผิวน้ำเกิดจากการซ้อนทับกันขององค์ประกอบคลื่นหลายขนาด เคลื่อนที่ในทิศทางต่างๆ กัน	13
2.6 กระบวนการเกิด Wind Wave เมื่อพลังงานจากลมผ่านเข้าสู่ผิวน้ำในมหาสมุทรโดยเริ่มจาก Capillary Wave และเมื่อมีการสะสมพลังงานมากขึ้นขนาดของคลื่นก็จะเปลี่ยนไปเป็น Gravity Wave	14
2.7 บริเวณที่เกิด Wind Wave (Sea) และคลื่นที่เคลื่อนออกจาก Sea (Swell)	14
2.8 คลื่นจะแตกตัวเมื่ออัตราส่วนระหว่างความสูงและความยาวคลื่นน้อยกว่าหนึ่งต่อเจ็ด	15
2.9 การถ่ายทอดพลังงานของคลื่นเมื่อเข้าสู่ฝั่งก่อให้เกิดพื้นที่ Surf Zone	16
2.10 การแตกของคลื่นแบบ Plunging breaker	16
2.11 การแตกของคลื่นแบบ Spilling Breaker	17
2.12 การแตกของคลื่นแบบ Surging Breaker	18
2.13 คลื่นในมหาสมุทร	21
2.14 คลื่นมหาสมุทร	21
2.15 ระยะเวลาความกว้างของคลื่นน้ำ	22
2.16 คลื่นความก้าวหน้าสองมิติที่ศูนย์เวลา	24
2.17 แบบจำลองของคลื่นทะเล	28
3.1 แผนที่พื้นที่ศึกษาของโครงการ	37
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	38
4.1 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีเพชรบุรี พ.ศ. 2554-2555	40
4.2 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีเพชรบุรี พ.ศ. 2554	40
4.3 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีเพชรบุรี พ.ศ. 2555	41
4.4 กำลังคลื่น ณ สถานีเพชรบุรี พ.ศ. 2554-2555	41
4.5 กำลังคลื่น ณ สถานีเพชรบุรี พ.ศ. 2554	42
4.6 กำลังคลื่น ณ สถานีเพชรบุรี พ.ศ. 2555	42
4.7 พลังงานคลื่น ณ สถานีเพชรบุรี พ.ศ. 2554-2555	43
4.8 พลังงานคลื่น ณ สถานีเพชรบุรี พ.ศ. 2554	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 พลังงานคลื่น ณ สถานีเพชรบุรี พ.ศ. 2555	44
4.10 ความสูงน้ำสำคัญของคลื่น ณ สถานีประจวบคีรีขันธ์ พ.ศ. 2554-2555	45
4.11 ความสูงน้ำสำคัญของคลื่น ณ สถานีประจวบคีรีขันธ์ พ.ศ. 2554	45
4.12 ความสูงน้ำสำคัญของคลื่น ณ สถานีประจวบคีรีขันธ์ พ.ศ. 2555	46
4.13 กำลังคลื่น ณ สถานีประจวบคีรีขันธ์ พ.ศ. 2554	46
4.14 กำลังคลื่น ณ สถานีประจวบคีรีขันธ์ พ.ศ. 2555	47
4.15 พลังงานคลื่น ณ สถานีประจวบคีรีขันธ์ พ.ศ. 2554	47
4.16 พลังงานคลื่น ณ สถานีประจวบคีรีขันธ์ พ.ศ. 2555	48
4.17 ความสูงน้ำสำคัญของคลื่น ณ สถานีชุมพร พ.ศ. 2554-2555	49
4.18 ความสูงน้ำสำคัญของคลื่น ณ สถานีชุมพร พ.ศ. 2554	49
4.19 ความสูงน้ำสำคัญของคลื่น ณ สถานีชุมพร พ.ศ. 2555	50
4.20 กำลังคลื่น ณ สถานีชุมพร พ.ศ. 2554-2555	50
4.21 กำลังคลื่น ณ สถานีชุมพร พ.ศ. 2554	51
4.22 กำลังคลื่น ณ สถานีชุมพร พ.ศ. 2555	51
4.23 พลังงานคลื่น ณ สถานีชุมพร พ.ศ. 2554-2555	52
4.24 พลังงานคลื่น ณ สถานีชุมพร พ.ศ. 2554	52
4.25 พลังงานคลื่น ณ สถานีชุมพร พ.ศ. 2555	53
4.26 ความสูงน้ำสำคัญของคลื่น ณ สถานีสุราษฎร์ธานี พ.ศ. 2554-2555	54
4.27 ความสูงน้ำสำคัญของคลื่น ณ สถานีสุราษฎร์ธานี พ.ศ. 2554	54
4.28 ความสูงน้ำสำคัญของคลื่น ณ สถานีสุราษฎร์ธานี พ.ศ. 2555	55
4.29 กำลังคลื่น ณ สถานีสุราษฎร์ธานี พ.ศ. 2554	55
4.30 กำลังคลื่น ณ สถานีสุราษฎร์ธานี พ.ศ. 2555	56
4.31 พลังงานคลื่น ณ สถานีสุราษฎร์ธานี พ.ศ. 2554	56
4.32 พลังงานคลื่น ณ สถานีสุราษฎร์ธานี พ.ศ. 2555	57
4.33 ความสูงน้ำสำคัญของคลื่น ณ สถานีนครศรีธรรมราช พ.ศ. 2554-2555	58
4.34 ความสูงน้ำสำคัญของคลื่น ณ สถานีนครศรีธรรมราช พ.ศ. 2554	58
4.35 ความสูงน้ำสำคัญของคลื่น ณ สถานีนครศรีธรรมราช พ.ศ. 2555	59
4.36 กำลังคลื่น ณ สถานีนครศรีธรรมราช พ.ศ. 2554	59
4.37 กำลังคลื่น ณ สถานีนครศรีธรรมราช พ.ศ. 2555	60
4.38 พลังงานคลื่น ณ สถานีนครศรีธรรมราช พ.ศ. 2554	60
4.39 พลังงานคลื่น ณ สถานีนครศรีธรรมราช พ.ศ. 2555	61
4.40 ความสูงน้ำสำคัญของคลื่น ณ สถานีสงขลา พ.ศ. 2554-2555	62
4.41 ความสูงน้ำสำคัญของคลื่น ณ สถานีสงขลา พ.ศ. 2554	62
4.42 ความสูงน้ำสำคัญของคลื่น ณ สถานีสงขลา พ.ศ. 2555	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.43 กำลังคลื่น ณ สถานีสงขลา พ.ศ. 2554	63
4.44 กำลังคลื่น ณ สถานีสงขลา พ.ศ. 2555	64
4.45 พลังงานคลื่น ณ สถานีสงขลา พ.ศ. 2554	64
4.46 พลังงานคลื่น ณ สถานีสงขลา พ.ศ. 2555	65
4.47 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีนราธิวาส พ.ศ. 2554-2555	66
4.48 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีนราธิวาส พ.ศ. 2554	66
4.49 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีนราธิวาส พ.ศ. 2555	67
4.50 กำลังคลื่น ณ สถานีนราธิวาส พ.ศ. 2554-2555	67
4.51 กำลังคลื่น ณ สถานีนราธิวาส พ.ศ. 2554	68
4.52 กำลังคลื่น ณ สถานีนราธิวาส พ.ศ. 2555	68
4.53 พลังงานคลื่น ณ สถานีนราธิวาส พ.ศ. 2554-2555	69
4.54 พลังงานคลื่น ณ สถานีนราธิวาส พ.ศ. 2554	69
4.55 พลังงานคลื่น ณ สถานีนราธิวาส พ.ศ. 2555	70
4.56 แผนที่ 3D ของความสูงของคลื่นนัยสำคัญในทะเลอ่าวไทย	72
4.57 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน ณ เวลา 00.00 ของวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2555	73
4.58 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน ณ เวลา 03.00 ของวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2555	74
4.59 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน ณ เวลา 06.00 ของวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2555	75
4.60 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน ณ เวลา 09.00 ของวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2555	76
4.61 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน ณ เวลา 12.00 ของวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2555	77
4.62 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน ณ เวลา 15.00 ของวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2555	78
4.63 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน ณ เวลา 18.00 ของวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2555	79
4.64 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน ณ เวลา 21.00 ของวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2555	80
4.65 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน ณ เวลา 00.00 ของวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2555	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.82 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน ณ เวลา 03.00 ของวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2555	98
4.83 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน ณ เวลา 06.00 ของวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2555	99
4.84 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน ณ เวลา 09.00 ของวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2555	100
4.85 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน ณ เวลา 12.00 ของวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2555	101
4.86 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน ณ เวลา 15.00 ของวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2555	102
4.87 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน ณ เวลา 18.00 ของวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2555	103
4.88 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน ณ เวลา 21.00 ของวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2555	104
4.89 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน ณ เวลา 00.00 ของวันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2555	105
4.90 พื้นที่ศึกษาของโครงการ	106
4.91 พื้นที่ใกล้ชายฝั่งทะเลระยะห่างจากแนวชายฝั่งทะเล 20 km และห่างมากกว่า 20 km	108
4.92 แผนที่แสดงพื้นที่ประมงชายฝั่งระยะ 3 km	109
4.93 แผนที่แสดงพื้นที่ประมงชายฝั่งระยะ 5 km	110
4.94 แผนที่แสดงเส้นทางเดินเรือโดยสาร	111
4.95 แผนที่แสดงตำแหน่งท่าเทียบเรือ	112
4.96 แผนที่แสดงแนวปะการัง	113
4.97 แผนที่แสดงพื้นที่ความมั่นคงและพื้นที่ฝึกทางทหาร	114
4.98 แผนที่แสดงตำแหน่งสนามบินและเขตกันชนการขึ้นลงของอากาศยาน	115
4.99 แผนที่แสดงตำแหน่งแนวสันทราย	116
4.100 แผนที่แสดงแหล่งท่องเที่ยว	117
4.101 แผนที่แสดงเขตอุทยานแห่งชาติ	118
4.102 แผนที่แสดงพื้นที่แหล่งหญ้าทะเล	119
4.103 แผนที่แสดงพื้นที่แหล่งสำรวจปิโตรเลียม	120
4.104 แผนที่แสดงแนวเคเบิลใต้น้ำ การสื่อสารแห่งประเทศไทย	121
4.105 แผนที่แสดงแนวสายไฟแรงสูง และสายไฟแรงสูงใต้น้ำ	122
4.106 แผนที่แสดงสถานีตรวจอากาศและเรดาร์	123

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.107	แผนที่แสดงตำแหน่งสถานีไฟฟ้าของ กฟภ. และ กฟผ.	124
4.108	แผนที่แสดงแนวถนนสายหลักสายรอง	125
4.109	แผนที่แสดงระดับน้ำขึ้น-ลง สูงสุด-ต่ำสุด	126
4.110	แผนที่แสดงระดับความลึกของน้ำทะเล	127
4.111	แผนที่แสดงแนวทางเดินพายุรายเดือน	128
4.112	แผนที่แสดงระบบสายส่ง 115 kV ของ กฟภ. และ กฟผ.	129
4.113	แผนที่แสดงพื้นที่หวงห้ามนอกชายฝั่งทะเล	130
4.114	แผนที่พื้นที่ที่สามารถใช้ประโยชน์พลังงานคลื่น	131
4.115	แผนที่แสดงระดับความลึกของน้ำทะเล	132

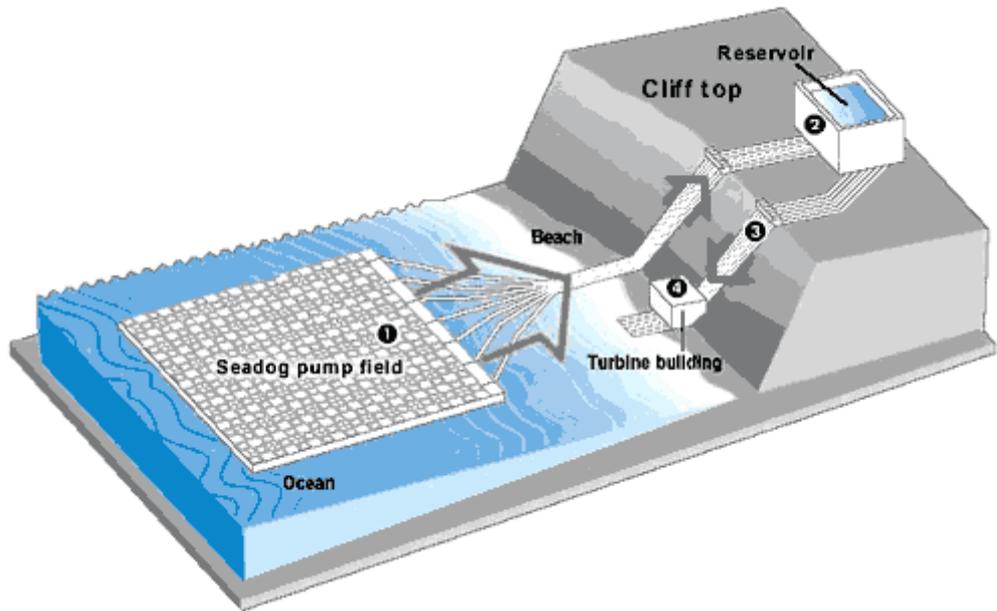
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

พื้นที่ผิวโลกที่เราอาศัยอยู่นี้เป็นพื้นน้ำถึง 3 ใน 4 ส่วน มนุษย์ส่วนใหญ่อาศัยอยู่ใกล้ทะเลและนำเอาทรัพยากรทางทะเลมาใช้ประโยชน์ ซึ่งกระแสน้ำได้ให้พลังงานมานานแสนนานแล้ว แต่มนุษย์ก็รู้จักเพียงการนำเอาพลังงานนี้มาใช้ประโยชน์หลายๆ อย่างในลักษณะง่ายๆ เท่านั้น กระทั่งถึงช่วงปลายคริสต์ศตวรรษที่ 19 ต่อกับต้นคริสต์ศตวรรษที่ 20 มนุษย์จึงได้พัฒนาโรงไฟฟ้าพลังน้ำขึ้นมาใช้โรงไฟฟ้างกล่าวสามารถเปลี่ยนพลังงานของน้ำตกให้เป็นกระแสไฟฟ้าได้โดยอาศัยกังหันน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า น้ำธรรมดานั้นไม่อาจจะผลิตพลังงานได้ นอกเสียจากว่ามันมีการไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำ นี่ก็คือเหตุผลที่ว่าทำไมโรงไฟฟ้าพลังน้ำส่วนมากจึงตั้งอยู่ใกล้ลำน้ำตกและเขื่อนกั้นที่กั้นขึ้นตามธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้นมา ในปัจจุบันน้ำตกสำคัญของโลกหลายแห่งก็ได้ใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำอีกแหล่งหนึ่งของโลก คือ มหาสมุทรอันกว้างใหญ่ไพศาลในรอบ 24 ชั่วโมงของแต่ละวันจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำของมหาสมุทรหรือน้ำขึ้น-ลงเป็นประจำ นอกจากนี้ยังมีพลังงานจากคลื่นและพลังงานจากอุณหภูมิของน้ำทะเลซึ่งประโยชน์จากสภาวะเหล่านี้สามารถนำมาเพื่อผลิตไฟฟ้าได้ (มณฑล, 2010)

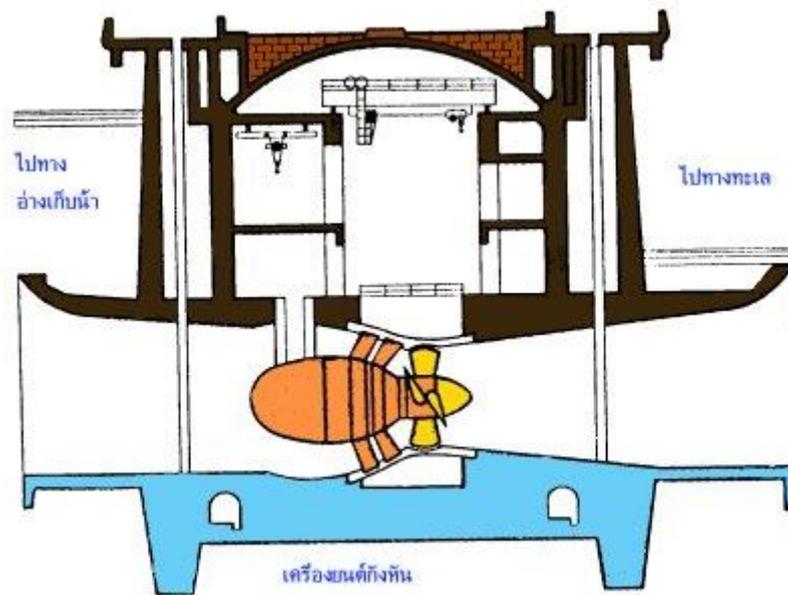
เป็นเวลากว่า 50 ปีมาแล้ว ที่บรรดาวิศวกรได้พยายามประดิษฐ์คิดค้นการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานคลื่นในมหาสมุทร ในช่วงทศวรรษปี ค.ศ. 1950 บริษัทหนึ่งในสหราชอาณาจักรได้วางแผนที่จะใช้ประโยชน์จากพลังงานคลื่นที่ชายฝั่งมิลริทิวส์ แต่แนวคิดดังกล่าวยังเป็นเพียงแผนงานเท่านั้น ปัจจุบันแผนงานนี้ได้กลายเป็นความจริงแล้วเนื่องจากมนุษย์สามารถคิดค้นนำพลังงานคลื่นในมหาสมุทรมาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์ได้อย่างจริงจังที่ชายฝั่งอิสเลย์ที่เป็นชายฝั่งทะเลในประเทศสกอตแลนด์ โดยได้ติดตั้งเครื่องผลิตไฟฟ้าจากพลังงานคลื่นเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์เป็นแห่งแรกและเมื่อเดือนพฤศจิกายน ค.ศ. 2000 แหล่งผลิตไฟฟ้าแห่งนี้ได้เริ่มป้อนพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบสายส่งของสหราชอาณาจักรเป็นครั้งแรก นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาระบบ Limpet ซึ่งเป็นระบบแปลงพลังงานคลื่นที่ติดตั้งบนแผ่นดิน ระบบนี้เป็นระบบที่บริษัทเวฟเจน (Wavegen) ซึ่งเป็นบริษัทที่ดำเนินการเกี่ยวกับการพัฒนาพลังงานทดแทนร่วมกับมหาวิทยาลัยควีนส์ยูนิเวอร์ซิตีเบลฟาสต์ ไนไอร์แลนด์เหนือโดยมีสหภาพยุโรปให้การสนับสนุนในด้านการเงิน Limpet เป็นเครื่องแปลงพลังงานคลื่นให้เป็นพลังงานไฟฟ้าขนาดกำลังผลิต 0.5 เมกะวัตต์ หรือ 500 กิโลวัตต์ สามารถผลิตพลังงานเข้าสู่ระบบเพียงพอสำหรับการใช้ในบ้านเรือนจำนวน 400 ครัวเรือน Limpet ใช้ประโยชน์จากพลังงานคลื่นในมหาสมุทรแอตแลนติกที่ชายฝั่งอิสเลย์ โดยใช้ร่วมกับอุปกรณ์อีกสองอย่าง คือ เครื่องจับคลื่นและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเทอร์โบไนน์ในการทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานคลื่นให้เป็นพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 1.1 เครื่องผลิตไฟฟ้าจากพลังงานคลื่น Limpet
ที่มา: <http://www.are101.org/forum/index.php?topic=68.0>

การประยุกต์พลังงานจากคลื่น (Wave Energy) ด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่อาจจะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดก็ได้ เนื่องจากสามารถดักจับพลังงานจากคลื่นได้จากทุกที่บนโลก เครื่องมือนี้ถูกออกแบบให้เป็นแนวท่อต่อกันยาว 450 ฟุต ซึ่งแต่ละท่อจะถูกเชื่อมโดยข้อต่อขนาดใหญ่ แล้วนำไปลอยไว้กลางมหาสมุทร เครื่องอัดระบบไฮดรอลิกภายในข้อต่อจะต้านทุกๆ การเคลื่อนไหวของคลื่น การเคลื่อนไหวแบบนี้จะสูบน้ำมันที่มีความดันสูงผ่านมอเตอร์ไฮดรอลิก ซึ่งจะผลิตพลังงานให้กับเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า สายส่งกระแสไฟฟ้ายังทำหน้าที่ยึดให้ทุ่นเหล่านี้ติดไว้กับพื้นมหาสมุทรอีกด้วย โดยที่บริษัท Ocean Power Delivery อยู่ในประเทศสกอตแลนด์ที่ประสบความสำเร็จในการติดตั้งโรงไฟฟ้าพลังคลื่นที่ผลิตไฟฟ้าได้ถึง 2.5 เมกกะวัตต์ ณ ชายฝั่งประเทศโปรตุเกส ฟาร์มดักพลังงานคลื่นซึ่งใช้พื้นที่เพียงครึ่งตารางไมล์นี้ สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ถึง 30 เมกกะวัตต์ หรือสามารถให้พลังงานกับครอบครัวชาวอังกฤษได้ถึงสองหมื่นครัวเรือนหากมีฟาร์มดักพลังงานคลื่นเช่นนี้ 472 ตารางไมล์ จะสามารถให้พลังงานเพียงพอสำหรับ 24.5 ล้านครัวเรือนทั่วประเทศอังกฤษ

ในปี ค.ศ. 1967 ประเทศฝรั่งเศสได้ผลิตไฟฟ้าพลังน้ำ โดยประสบความสำเร็จในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยอาศัยพลังกระแสน้ำขึ้น-น้ำลงโดยมีอ่างเก็บน้ำ เครื่องกังหัน และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าติดตั้งอยู่กับเขื่อนขนาดยักษ์เมื่อน้ำขึ้น น้ำจากมหาสมุทรก็จะไหลเข้าไปในอ่างเก็บน้ำจนเต็ม เมื่อกระแสน้ำขึ้นถึงขีดสูงสุดประตูระบายน้ำจะถูกปิดเพื่อกักน้ำเอาไว้และจะไม่มีการระบายน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำจนกว่าจะหมดสถานะน้ำขึ้นเสียก่อน เมื่อระดับน้ำในมหาสมุทรลดลง ประตูระบายน้ำของอ่างเก็บน้ำจะถูกเปิด น้ำจะไหลจากพื้นที่สูงลงไปสู่ที่ต่ำ ทำให้เกิดพลังน้ำเหมือนกับพลังน้ำจากน้ำตกต่างระดับหลายชั้น กระแสน้ำที่ไหลออกไปจะไปหมุนเครื่องกังหันไปเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งก็จะผลิตกระแสไฟฟ้าออกมา



รูปที่ 1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยอาศัยพลังกระแสน้ำขึ้น-น้ำลง

ที่มา: http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet3/supinya/sea_energy/sea-energy.htm

ในประเทศไทยเองยังไม่มี การนำเอาพลังงานจากคลื่นมาใช้ อย่างจริงจัง แต่ในต่างประเทศมีการศึกษาและใช้พลังงานจากคลื่นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1967 โดยประเทศที่ริเริ่มนำพลังงานจากคลื่นมาใช้ ได้แก่ ประเทศญี่ปุ่นและประเทศอังกฤษ ในการนำพลังงานจากคลื่นมาใช้มีอยู่ 2 ประเภทได้แก่ แบบอยู่กับที่ (Fixed) และแบบลอย (Floating)

แต่ประเทศไทยเมื่อสำรวจพลังงานคลื่นและมักจะเป็นการเก็บเกี่ยวเอาพลังงานที่ลมถ่ายทอดให้กับผิวน้ำในมหาสมุทรเกิดเป็นคลื่นวิ่งเข้าสู่ชายฝั่งและเกาะแก่งต่างๆ เครื่องผลิตไฟฟ้าพลังงานคลื่นจะถูกออกแบบให้ลอยตัวอยู่บนผิวน้ำบริเวณหน้าอ่าวด้านที่หันเข้าหาคลื่น การใช้คลื่นเพื่อผลิตไฟฟ้านั้นถ้าจะให้ได้ผลจะต้องอยู่ในโซนที่มียอดคลื่นเฉลี่ยอยู่ที่ 8 เมตร ซึ่งบริเวณนั้นต้องมีแรงลมด้วย แต่จากการวัดความสูงของยอดคลื่นสูงสุดในประเทศไทยที่จังหวัดระนองพบว่า ยอดคลื่นสูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 4 เมตรเท่านั้น แต่ปรากฏการณ์น้ำขึ้น-น้ำลงได้อย่างเต็มที่เมื่อถึงเวลานั้นเราอาจสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เพียงพอ กับความต้องการที่เพิ่มขึ้นอย่างไม่หยุดยั้งของโลกเราได้ภายใต้เทคโนโลยีในปัจจุบัน พิสัยน้ำขึ้น-น้ำลงที่มีศักยภาพในการผลิตกระแสควรจะมากกว่า 5 เมตร ถึงจะคุ้มค่ากับการลงทุน โดยประเทศไทยมีศักยภาพทางด้านนี้ต่ำซึ่งมีพิสัยน้ำขึ้น-น้ำลงสูงสุดที่ปากน้ำระนองเพียง 2.5 เมตรเท่านั้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2546)

ซึ่งก็แน่นอนว่าด้วยเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานคลื่นในปัจจุบันนั้นยังคงไม่สามารถใช้ในประเทศไทยได้ แต่ในอนาคตหากมีการศึกษาเพื่อประดิษฐ์คิดค้นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานคลื่นให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเพื่อสามารถใช้ได้กับศักยภาพของพลังงานคลื่นปานกลางจนถึงต่ำได้ ก็จะสามารถนำมาประยุกต์กับบริบทของประเทศไทยได้อีกต่อไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการสำรวจและตรวจสอบหาพื้นที่ที่ความเหมาะสมและศักยภาพสูงพอในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานคลื่นในทะเลทั้งทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามันเพื่อทราบถึงศักยภาพของคลื่นในทะเลทั้งในเชิงพื้นที่และเชิงเวลา โดย

จำเป็นต้องทราบเกี่ยวกับปริมาณความสูงของคลื่น ความยาวคลื่นและช่วงเวลาที่เกิดคลื่นรวมทั้งความต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามปัจจุบันมีการวัดระดับน้ำทะเลสูงต่ำโดยกรมอุทกศาสตร์ซึ่งมีสถานีวัดแสดงดังรูปที่ 1.3

นอกจากการวัดระดับน้ำทะเลโดยตรงแล้วยังมีการประเมินศักยภาพของคลื่นในทะเล โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) และอาศัภูมิสารสนเทศ (Geo-Informatics) ซึ่งจะทำให้มีความน่าเชื่อถือของข้อมูลสูงรวมทั้งลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีวัดทั่วประเทศ โดยสามารถตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการเปรียบเทียบกับข้อมูลการวัดจริง ณ สถานีนั้นๆ ซึ่งการวิจัยและพัฒนาาระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานคลื่นจำเป็นต้องทราบศักยภาพของคลื่นในทะเลก่อนดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นประเมินศักยภาพของพลังงานคลื่นในทะเลอ่าวไทยโดยใช้ข้อมูลหลายๆ ส่วนประกอบกัน ไม่ว่าจะเป็นข้อมูลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และข้อมูลจากสถานีอุทกศาสตร์เพื่อให้สามารถครอบคลุมพื้นที่ตามแนวชายฝั่งทะเลทางภาคใต้ของประเทศไทย โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1. เพื่อประเมินศักยภาพของพลังงานคลื่นในทะเลตามแนวชายฝั่งทะเลอ่าวไทยในบริเวณภาคใต้ของประเทศไทย
- 1.2.2. เพื่อวิเคราะห์พื้นที่ที่มีศักยภาพของพลังงานคลื่นในทะเลสูงสำหรับการผลิตไฟฟ้า
- 1.2.3. เพื่อวิเคราะห์พื้นที่ที่มีความเหมาะสมในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานคลื่นในทะเลขนาดเล็กตามแนวชายฝั่งทะเลอ่าวไทยทางภาคใต้ของประเทศไทย

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1. ผลการศึกษาวิจัยสามารถตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับชาติและระดับนานาชาติได้
- 1.3.2. ผลการศึกษาวิจัยสามารถนำเสนอในที่ประชุมวิชาการระดับชาติและระดับนานาชาติได้
- 1.3.3. ผลการศึกษาสามารถนำไปเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการวางแผนการพัฒนา ระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) และกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) และหน่วยงานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป



รูปที่ 1.3 สถานีวัดระดับน้ำทะเลสูงสุด-ต่ำสุดของกรมอุทกศาสตร์
 ที่มา: <http://www.navy.mi.th/hydro/services2011.htm>

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 คลื่น (Wave)

2.1.1 การเกิดคลื่น (Wave Generation)

คลื่น คือ การเคลื่อนที่ของพลังงานผ่านตัวกลางโดยที่ตัวกลางมีการขจัดเป็นศูนย์ คลื่นเกิดขึ้นบริเวณรอยบรรจบของตัวกลาง 2 ชนิด คือ ผิวทะเลกับบรรยากาศ บางครั้งเกิดคลื่นในตัวกลางชนิดเดียวแต่ความหนาแน่นต่างกัน คลื่นบนผิวทะเลเป็นแบบ Gravity Wave คือ ใช้แรงดึงดูดของโลกเป็นตัวการทำให้คลื่นสงบ คลื่นบนผิวทะเลอีกชนิดเป็นคลื่นพริ้วเล็กๆ เรียกว่า Capillary Wave คลื่นนี้จะใช้แรงตึงผิวของน้ำทำให้ผิวน้ำสงบเมื่อปราศจากลมพัด คลื่นผิวน้ำจัดเป็นคลื่นตามขวางโดยคลื่นและพลังงานคลื่นเคลื่อนที่ในแนวราบในขณะที่ผิวน้ำขยับขึ้นลงในแนวตั้ง คลื่นในทะเลส่วนใหญ่เป็น Progressive Wave คือ มีสันคลื่นและท้องคลื่นเคลื่อนที่ผ่านจุดอ้างอิงใดๆ จุดหนึ่งในทะเลสลับกันไปอย่างต่อเนื่อง เมื่อใดที่คลื่นวิ่งกระทบขอบฝั่งจะเกิดการสะท้อนกลับ คลื่นที่วิ่งเข้ามาจะผสมกับคลื่นที่สะท้อนออกไปเกิดเป็น Standing Wave คือ มีบางจุดของผิวน้ำที่ระดับน้ำกระเพื่อมขึ้นสูงแล้วต่ำสลับกันไป (ปฏิบัพ หรือ Antinode) และบางจุดที่ระดับทรงอยู่กับที่ตลอดเวลา (บัพหรือ Node)

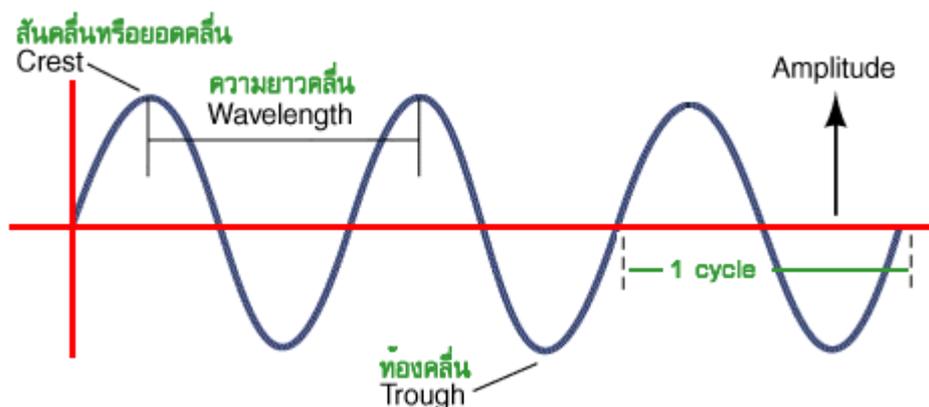
2.1.2 สาเหตุของการเกิดคลื่น

- 1) ลม
- 2) แผ่นดินไหว ภูเขาไฟระเบิด แผ่นดินใต้น้ำถล่ม
- 3) แรงดึงดูดจากดวงอาทิตย์และดวงจันทร์
- 4) การเปลี่ยนแปลงความกดดันอากาศ
- 5) ข้อแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างมวลน้ำชั้นบนและล่าง
- 6) เมื่อกระแสน้ำไหลผ่านพื้นที่ท้องทะเลซึ่งไม่เรียบ

คลื่นที่ปรากฏให้เราเห็นเป็นประจำทุกวัน เป็นคลื่นที่เกิดจากลมเป็นส่วนใหญ่ (Wind Waves) ส่วนคลื่นที่เกิดจากสาเหตุอื่น มักจะมองไม่เห็นเพราะเกิดขึ้นในระหว่างชั้นของน้ำ (Internal Waves) หรือเป็นคลื่นที่มียอดคลื่นเตี้ยมาก และมีคาบของคลื่นยาวนานมาก (Tides, Tsunami) น้ำขึ้นน้ำลงเป็นคลื่นชนิดหนึ่ง มีความยาวคลื่นมากที่สุดประมาณ 20,000 กิโลเมตร (ประมาณครึ่งหนึ่งของเส้นรอบวงโลก) และมีคาบของคลื่นนานมากประมาณ 12 วัน 25 นาที (ประมาณครึ่งหนึ่งของเวลาที่ดวงจันทร์โคจรรอบโลก) เนื่องจากเกิดจากแรงดึงดูดของดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ ซึ่งมีต่อเนื่องกันตลอดเวลา คลื่นน้ำขึ้น-น้ำลงจึงไม่อิสระในการเคลื่อนที่ ต้องคล้อยตามแรงดึงดูดหรือคล้อยตามระบบการหมุนของโลก ดวงอาทิตย์ และดวงจันทร์ เรียกว่า คลื่นในควบคุม (Forced Waves) ส่วนคลื่นที่เกิดจากแรงระเบิด แผ่นดินไหว แผ่นดินใต้น้ำถล่ม และภูเขาไฟระเบิด เป็นคลื่นอิสระ (Free Wave) หมายความว่า ครั้งหนึ่งเมื่อมีแรงมากระทำให้เกิดแล้วคลื่นจะเคลื่อนที่ไปได้ตลอด ไม่ต้องมีแรงมากระทำหรือคอยผลักดันอีก คลื่นพวกนี้มีความเร็วสูงมากและยอดคลื่นเตี้ยมาก เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น แรงดึงดูดของโลกจึงไม่ค่อยมีอำนาจในการฉุดลากหรือทำลาย ส่วนแรงจุดที่เกิดจากแรงตึงผิวก็มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความเร็วคลื่น คลื่นเหล่านี้เป็นคลื่นขนาดใหญ่ (คาบของคลื่นมากกว่า 5 นาที) โดยธรรมชาติถือว่าเป็นการถ่ายทอด (Propagate) ทั้งพลังงานและมวลน้ำ

จึงมีแรงเสมือนเข้ามาเกี่ยวข้อง ส่วนคลื่นที่เกิดจากลมอาจเป็นทั้งคลื่นอิสระและคลื่นในควบคุม (ปราโมทย์ และคณะ, 2547)

2.1.3 ส่วนประกอบของคลื่น



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของคลื่น

ที่มา : <http://www.marine.tmd.go.th/thai/oceanwave-thai.html>

- 1) ยอดคลื่น คือ ส่วนที่สูงที่สุดของคลื่น (Crest)
- 2) ทอ้งคลื่น คือ ส่วนที่ต่ำที่สุดของคลื่น (Trough)
- 3) ความสูงของคลื่น (Wave Height; H) ผลต่างระหว่างยอดคลื่นกับทอ้งคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร (m)
- 4) ความยาวคลื่น (Wave Length; λ) หมายถึง ความยาวของคลื่น 1 คลื่น เป็นระยะทางที่วัดระหว่างจุดสองจุดที่สั้นที่สุดบนคลื่นที่เฟสตรงกัน มีหน่วยเป็นเมตร (m)
- 5) คาบคลื่น (Wave Period; T) คือ เวลาที่ยอดคลื่น 2 ลูกจะเคลื่อนที่ผ่านจุดใดจุดหนึ่งที่อยู่ที่หน่วยเป็นวินาที (s)
- 6) ความถี่ของคลื่น (Wave Frequency; f) คือ จำนวนลูกคลื่นที่ผ่านจุดสังเกตภายในหนึ่งหน่วยเวลา มีค่าเป็นส่วนผกผันกับคาบเวลา มีหน่วยเป็น วินาที⁻¹ (s^{-1}) หรือ เฮิรท์ (Hz)

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

- 7) อัตราเร็วของคลื่น (Wave Speed; v) หมายถึง ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ได้ในหนึ่งหน่วยเวลา และเนื่องจากขณะคลื่นเคลื่อนที่ไปด้วยอัตราเร็วค่าหนึ่ง เฟสของคลื่นก็เคลื่อนที่ไปด้วยอัตราเร็วเท่ากัน ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกว่า อัตราเร็วเฟส (Phase Speed) ของคลื่น มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s) สามารถคำนวณได้จาก

$$v = f\lambda \quad (2.2)$$

- 8) แอมพลิจูด (Amplitude; A) คือ ความสูงระหว่างระดับน้ำนิ่งถึงยอดคลื่น (Crest) หรือท้องคลื่น (Trough) เป็นการขจัดสูงสุด มีหน่วยเป็นเมตร (m)

$$H = 2a \quad (2.3)$$

- 9) อนุภาคน้ำ (Particle) จะเคลื่อนที่หมุนเป็นวงกลมตามผิวหน้าของคลื่น ด้วยความเร็ว

$$v = \frac{2\pi a}{T} = \frac{\pi H}{T} \quad (2.4)$$

- 10) ความชันของคลื่น (Steepness) เป็นอัตราส่วนระหว่างความสูงของคลื่นกับความยาวคลื่น

$$\text{steepness} = \frac{H}{L} \quad (2.5)$$

2.1.4 ขนาดของคลื่น

คลื่นที่ปรากฏในธรรมชาติมีรูปร่างและขนาดแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับมหาสมุทร เขตทางภูมิศาสตร์และฤดูกาล โดยหลักเกณฑ์เบื้องต้นขนาดของคลื่นขึ้นอยู่กับ

- 1) ความเร็วลม (Wind Speed; W)
- 2) ระยะทางที่ลมพัดผ่าน (Fetch; F)
- 3) ช่วงเวลาที่ลมพัดต่อเนื่องกันในทิศทางคงที่ (Duration; D)

ถ้าใช้คาบของคลื่น (T) และความสูงของคลื่น (H) เป็นเครื่องวัดขนาดของคลื่น สามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ ได้ดังนี้

$$T, H = (W, F, D)$$

ช่วงการเปลี่ยนแปลงฤดูกาล อากาศเหนือแผ่นดินและแผ่นน้ำมีลักษณะแตกต่างกัน มักทำให้เกิดลมหรือพายุที่มีความเร็วสูงทำให้ทะเลมีคลื่นขนาดใหญ่กว่าในเวลาปกติ คลื่นในทะเลเปิด (Open Sea) ซึ่งมีระยะทางที่ลมพัดผ่านยาว (Fetch) ย่อมมีขนาดใหญ่กว่าคลื่นในทะเลปิด (Lakes, Bays และ Marginal Sea) นักสมุทรศาสตร์ได้พยายามคิดค้นสมการความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของคลื่นกับปัจจัยของลม พบว่า

$$H_{\max} = \frac{0.26}{g} W^2 \quad (2.6)$$

$$H_{\max} = \frac{1}{3} \sqrt{F} \quad (2.7)$$

เมื่อ

- H คือ ความสูงคลื่น มีหน่วยเป็น เมตร (m)
 W คือ ความเร็วลม มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที (m/s)
 F คือ ระยะทางที่ลมพัดผ่าน มีหน่วยเป็น กิโลเมตร (km)

2.1.5 ชนิดของคลื่น

1) Ripple, Wind Wave และ Swell เกิดจากลมตรงรอยต่อระหว่างบรรยากาศกับผิวน้ำ เป็นคลื่นคาบสั้นคือมีคาบเป็นวินาที Ripple จะเป็นคลื่นพริ้วขนาดเล็กๆ บนผิวน้ำเกิดจากลมในพื้นที่ Wind Wave คือคลื่นจากลมโดยทั่วไปมีคาบและความสูงคลื่นมากกว่า Ripple ส่วน Swell คือคลื่นเนื่องจากลมที่เคลื่อนตัวมาจากทะเลไกล จะมีคาบและความสูงคงที่ ในช่วงที่ชายฝั่งสงบลมเราจะเห็นคลื่น Swell ที่เข้ากระทบชายฝั่งได้อย่างชัดเจนขึ้น

2) คลื่นใต้น้ำ (Internal Wave) คือคลื่นระหว่างชั้นน้ำ เกิดจากน้ำมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน เช่น ชั้นน้ำจืดลอยอยู่เหนือชั้นน้ำทะเลทำให้ความเร็วกระแสน้ำไม่เท่ากัน หรือมีสิ่งรบกวนระหว่างชั้นรอยต่อของน้ำ เช่น เรือแล่น เป็นต้น

3) สึนามิ (Tsunami) เกิดจากแผ่นดินไหวหรือแผ่นดินถล่มใต้น้ำ ทำให้น้ำเกิดการกระเพื่อมอย่างรุนแรง คลื่นสึนามิเป็นคลื่นคาบยาวที่เคลื่อนที่จากปากมหาสมุทรหนึ่งไปยังปากตรงข้ามได้อย่างรวดเร็ว

4) ผิวน้ำหรือระหว่างชั้นน้ำ (Gyrosopic-Gravity Wave) คลื่นมีคาบยาวเป็นชั่วโมงและได้รับอิทธิพลจากแรงโคริโอลิสเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น แรงเฉือนจากลม การเปลี่ยนความกดอากาศ เป็นต้น

5) Rossby หรือ Planetary Wave เป็นคลื่นคาบยาวเป็นวันและคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่สังเกตจากความเร็วและทิศทางกระแสน้ำเปลี่ยนแปลง เกิดจากแรงเฉือนจากลมเปลี่ยนแปลง หรือความไม่เสถียรของคอลัมน์น้ำแบบ Baroclinic (ความหนาแน่นน้ำเปลี่ยนตามความลึก) หรือ Barotropic (ความหนาแน่นน้ำคงที่) เป็นต้น

6) น้ำขึ้นน้ำลง (Tide) เป็นคลื่นผิวน้ำชนิดหนึ่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของดวงจันทร์และดวงอาทิตย์

ตารางที่ 2.1 การแบ่งคลื่นตามคาบเวลาของคลื่น

คาบเวลา	ความยาวคลื่น	ชนิดของคลื่น
0 - 0.2 วินาที	เซนติเมตร	Ripple (คลื่นพริ้ว)
0.2 - 9 วินาที	ถึง 130 เมตร	Wind Wave (คลื่นลม)
9 - 15 วินาที	หลายร้อยเมตร	Swell (คลื่นลม)
15 - 30 วินาที	หลายหลายร้อยเมตร	Long Swell หรือ Forerunner
0.5 นาที - ชั่วโมง	พันกิโลเมตร	Long Period Wave รวมทั้ง Tsunami (สึนามิ)
12.4, 24.84 ชั่วโมง	หลายพันกิโลเมตร	Tide (น้ำขึ้นน้ำลง)

2.1.6 การจำแนกคลื่นในมหาสมุทรใช้เกณฑ์ในการแบ่งได้เป็น 3 แบบ

1) Disturbing Force หมายถึง พลังงานหรือแรงที่ทำให้คลื่นก่อตัวขึ้น ได้แก่ แรงลมหรือพายุ แรงสั่นสะเทือนจากปรากฏการณ์ทางธรณีวิทยาใต้พื้นท้องมหาสมุทรหรือ แรงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแรงดึงดูดระหว่างโลก ดวงจันทร์ และดวงอาทิตย์ ร่วมกับผลจากการหมุนของโลก

2) Restoring Force หมายถึง แรงที่พยายามทำให้ผิวน้ำกลับคืนสู่สภาวะปกติ ถ้าแรงนี้มีค่าสูงจะทำให้ผิวน้ำน้ำทะเลเรียบได้เร็ว Restoring Force สำหรับคลื่นที่มีความยาวคลื่นน้อยมากๆ คือ น้อยกว่า 1.73 เซนติเมตร (Capillary Wave) คือ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำ (Cohesion) แรงตึงผิว (Capillary Wave) คือ คลื่นชนิดแรกที่ก่อตัวขึ้นหลังจากได้รับแรงลมที่พัดผ่านผิวน้ำของขบวนการเกิดคลื่นที่เกิดจากลม (Wind Wave) ส่วนคลื่นใดๆ ที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 1.73 เซนติเมตร (Restoring Force) คือ แรงโน้มถ่วงของโลก จะเรียกคลื่นนี้ว่า Gravity Wave และเนื่องจากการเคลื่อนที่เป็นวงของคลื่นโดยทั่วไปเกือบจะไม่มีแรงเสียดทานจึงทำให้ Gravity Wave สามารถเคลื่อนที่ได้ไกลๆ บนผิวน้ำในมหาสมุทร

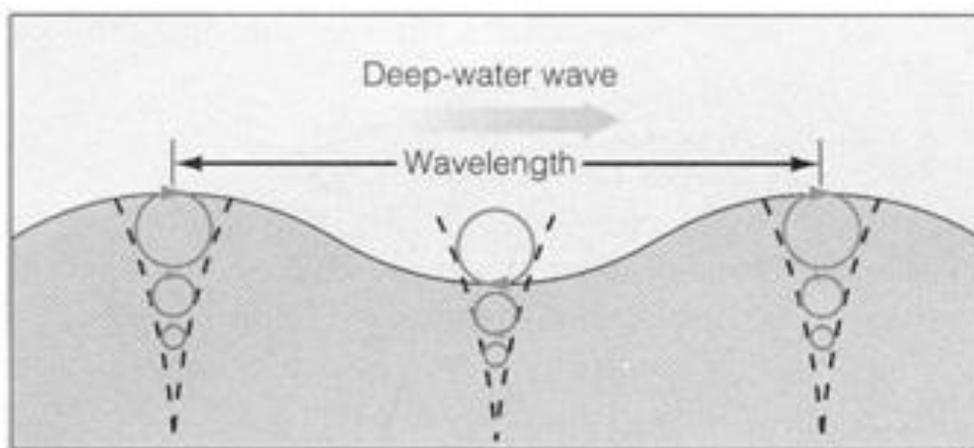
3) Wave Length ความยาวคลื่นเป็นวิธีในการวัดขนาดของคลื่นได้

2.1.7 ลักษณะของคลื่น

ลักษณะของคลื่นโดยทั่วๆ ไปบริเวณผิวน้ำในมหาสมุทรจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความลึก โดยความยาวคลื่นจะเป็นตัวกำหนดขนาดดวงของการเคลื่อนตัวของโมเลกุลของน้ำภายในคลื่น ส่วนความลึกจะเป็นตัวกำหนดรูปร่างของคลื่น โดยลักษณะของคลื่นจะมี 3 แบบ ดังนี้

คลื่นน้ำลึก (Deep Water Waves)

คลื่นแบบนี้วงของคลื่นจะมีรูปร่างเป็นวงกลมเมื่อคลื่นเดินทางในบริเวณที่มีความลึกมากกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น โดยชั้นน้ำด้านล่างต่ำลงไปจากระดับนี้ จะไม่ได้รับผลใดๆ จากการเดินทางของคลื่นจากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าวงกลมที่เกิดจากการหมุนของโมเลกุลของน้ำจะค่อยๆ เล็กลงตามระดับความลึก ตัวอย่างเช่น คลื่นที่เกิดจากลม (Wind Wave) ที่มีความยาวคลื่น 20 เมตร จะเป็นคลื่นน้ำลึกเมื่อมันเดินทางผ่านบริเวณที่มีความลึกมากกว่า 10 เมตร

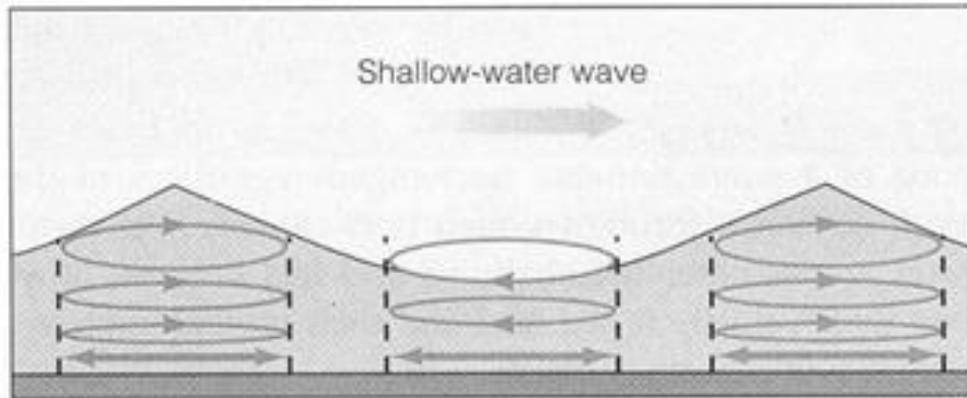


รูปที่ 2.2 คลื่นน้ำลึก (Deep Water Wave)

(Garrison, T. S., 2007)

คลื่นน้ำตื้น (Shallow Water Waves)

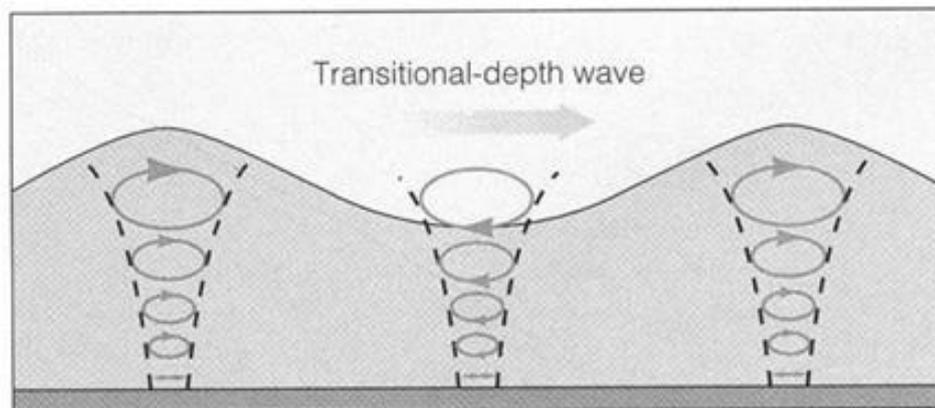
เมื่อคลื่นที่เกิดจากลม (Wind Wave) เดินทางมาที่ตื้น เช่น ใกล้ชายฝั่งที่ความลึกน้อยกว่า 1 ใน 20 ของความยาวคลื่น วงของคลื่นจะค่อยๆ แบนลงเรื่อยๆ แต่จะมีขนาดเท่าเดิมจนกระทั่งเมื่อถึงพื้นทะเลน้ำจะไม่หมุนเป็นวงแต่จะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาเท่านั้น คลื่นที่มีความยาวคลื่น 20 เมตร จะเป็นคลื่นน้ำตื้นเมื่อคลื่นเดินทางมาถึงบริเวณที่มีความลึกน้อยกว่า 1 เมตร (รูปที่ 2.3)



รูปที่ 2.3 คลื่นน้ำตื้น (shallow water wave)
(Garrison, T. S., 2007)

การส่งผ่านของคลื่น (Transitional Waves)

เมื่อคลื่นเดินทางมาถึงบริเวณที่มีความลึกกว่า 1 ใน 20 ของความยาวคลื่น แต่น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ลักษณะวงและขนาดของคลื่นจะเล็กลงเรื่อยๆ คลื่นที่มีความยาวคลื่น 20 เมตร จะเป็นการส่งผ่านของคลื่น (Transitional Waves) เมื่อเดินทางมาถึงความลึกระหว่าง 10 เมตร ถึง 1 เมตร



รูปที่ 2.4 การส่งผ่านของคลื่น (transitional waves)
(Garrison, T. S., 2007)

คลื่นน้ำลึก (Deep-Water Waves) คือ สภาพน้ำที่มีความลึกเพียงพอคือ ลึกกว่า $L/2$ และไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆ คลื่นเหล่านี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่อนข้างมาก สามารถประมาณความเร็วของคลื่นใน 2 ลักษณะ คือ คลื่นน้ำลึกหรือคลื่นสั้น และคลื่นน้ำตื้นหรือคลื่นยาวตาม (ตารางที่ 2.2)

จะเห็นว่าความเร็วของคลื่นจะขึ้นอยู่กับตัวพารามิเตอร์เพียงตัวเดียว คือ L ในกรณีที่เป็นคลื่นน้ำลึก (คลื่นสั้น) หรือ d ในกรณีที่เป็นคลื่นน้ำตื้น (คลื่นยาว) ความเร็วของคลื่นที่จัดอยู่ระหว่างคลื่นน้ำลึกและคลื่นน้ำตื้นจะต้องคำนวณโดยใช้สมการ

$$v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)} \quad (2.8)$$

เมื่อ $\tanh(x) = \frac{(e^x - e^{-x})}{(e^x + e^{-x})}$ ถ้า x มีค่าน้อย $\tanh(x)$ จะมีค่าใกล้เคียงกับ x และถ้า x มีค่ามากกว่า π $\tanh(x)$ มีค่าใกล้

ตารางที่ 2.2 ความเร็วของคลื่นน้ำลึกและคลื่นน้ำตื้น

	คลื่นน้ำลึกหรือคลื่นสั้น	คลื่นน้ำตื้นหรือคลื่นยาว
อัตราส่วน d/L	$> 1/2$	$< 1/20$
ความเร็วคลื่นจากสมการ	$\sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$	\sqrt{gd}

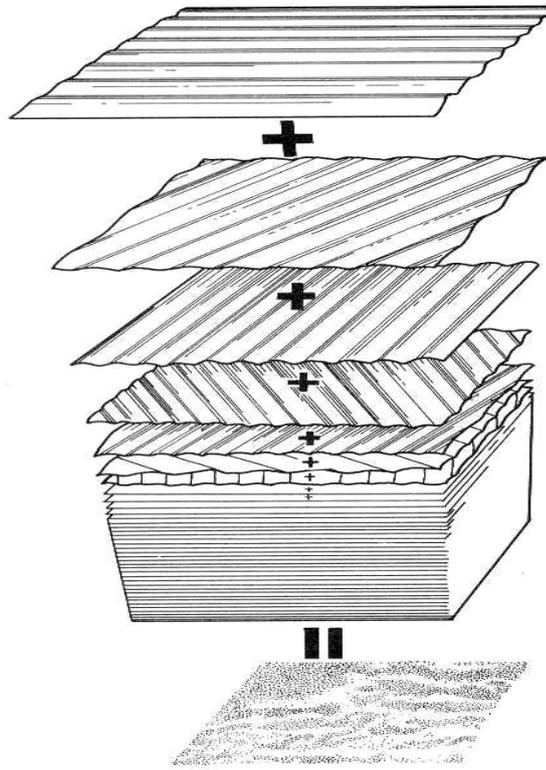
สำหรับน้ำลึก เมื่อแทนที่ V ด้วย λ/T จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง λ และ T ดังนี้

$$\lambda = \frac{g}{2\pi} T^2 \quad (2.9)$$

คลื่นเมื่อก่อตัวขึ้นครั้งแรกจะเป็นคลื่นน้ำลึก กระบวนการในการเกิดคลื่นนั้นมียุ่หลายทฤษฎี และยังไม่รู้กันอย่างชัดเจน แต่เกี่ยวข้องกับการแกว่งตัวอย่างปั่นป่วนของลมเมื่อปะทะกับคลื่นผิวน้ำ และส่งผ่านพลังงานจากบรรยากาศสู่มหาสมุทร จากการศึกษาโดยการสังเกตพบว่า

- 1) ถ้าลมที่มีความเร็วสม่ำเสมอ
- 2) พัดผ่านผิวน้ำอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาหนึ่ง
- 3) ตามระยะทางของผิวน้ำ (Fetch) ที่พอเพียงจะทำให้เกิดรูปแบบของคลื่นลักษณะหนึ่งซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วลม

คลื่นในทะเลมีความซับซ้อนเนื่องจากเกิดจากการผสมผสานของคลื่นจากลมที่พัดด้วยความเร็วและทิศทางต่างๆ กัน (รูปที่ 2.5) จึงไม่สามารถวิเคราะห์คลื่นด้วยตาเปล่าได้ ต้องใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์เรียกว่า Harmonic หรือ Spectral Analysis ซึ่งคิดค้นโดย J. B. Fourier (1768-1830) Fourier Analysis แยกข้อมูลที่ต่อเนื่องออกเป็นผลรวมขององค์ประกอบของ Sine Wave ย่อยๆ ที่มีความถี่และแอมพลิจูดต่างๆ กัน



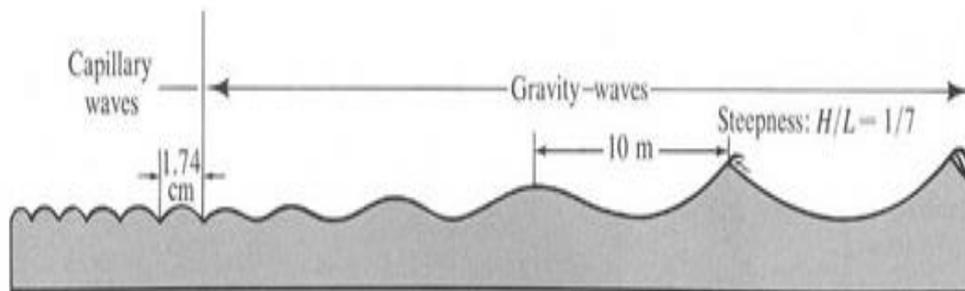
รูปที่ 2.5 คลื่นที่เห็นบนผิวน้ำเกิดจากการซ้อนทับกันขององค์ประกอบคลื่นหลายขนาด เคลื่อนที่ในทิศทางต่างๆ กัน (Harvey, J.G., 1975)

2.1.8 ชนิดและการเกิดของคลื่นเนื่องมาจากลม

ลมเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดคลื่นขึ้นในน้ำระดับผิวน้ำ น้ำทะเลซึ่งมีความหนืด (Viscosity) เมื่อถูกลมพัดผ่านน้ำผิวน้ำจะยืดออกตามแรงลมแล้วจะหดตัวกลับเพื่อรักษาสมดุลด้วยแรงตึงผิว (Surface Tension) ทำให้น้ำผิวน้ำโค้งขึ้นและโค้งลง (Undulate) เกิดคลื่นขนาดเล็กขึ้นในที่สุด (Ripples or Wavelets) คลื่นขนาดเล็กๆ เหล่านี้จะปรากฏให้เห็นเมื่อมีลมพัดเท่านั้น ถ้าลมหยุดพัด คลื่นเหล่านี้จะสลายตัวเกือบทันที เมื่อมีลมพัดต่อเนื่องกันเป็นเวลานานพอสมควรคลื่นเหล่านี้จะค่อยๆ ขยายโตขึ้นเพราะผิวน้ำที่ขรุขระเนื่องจากมีคลื่นขนาดเล็กๆ ทำให้เกิดพื้นที่ผิวในส่วนที่จะรับลมเพิ่มขึ้น คลื่นที่ขยายโตขึ้นมีชื่อใหม่ว่า Wind Wave (Sea)

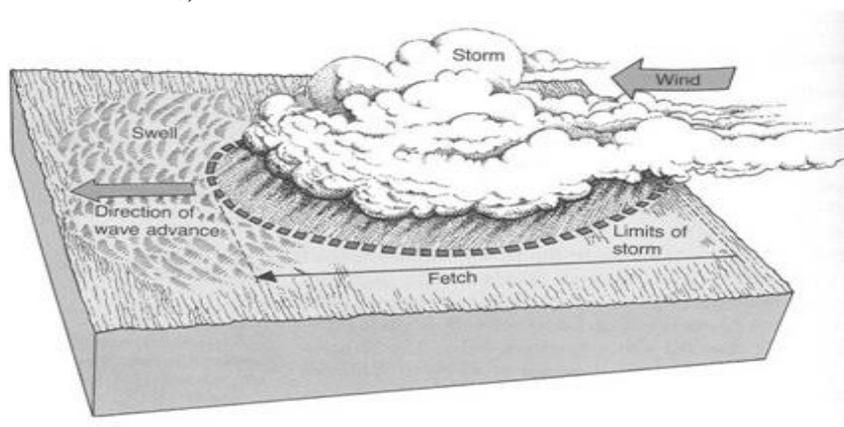
ในมหาสมุทรเปิดส่วนใหญ่จะมีความสูงน้อยกว่า 3 เมตร และมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 60-150 เมตร Wind Waves จะเริ่มต้นจาก Capillary Wave ซึ่งจะมียอดคลื่นเป็นรูปโค้งและท้องคลื่นเป็นรูปตัว V Capillary Wave นี้จะเกิดจากแรงเสียดทานเนื่องมาจากลมที่กระทำกับผิวน้ำ โดยแรงตึงผิวบริเวณผิวน้ำจะทำหน้าที่ต้านแรงลมเพื่อให้ผิวน้ำเรียบเหมือนเดิมและทำให้เกิดคลื่น เมื่อ Capillary Wave ทวีจำนวนมากขึ้นจะทำให้ผิวน้ำทะเลไม่เรียบ ซึ่งจะทำให้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างลมและบริเวณผิวน้ำมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จึงทำให้มีการถ่ายทอดพลังงานเข้าสู่ผิวน้ำมากขึ้นตามไปด้วย ทำให้คลื่นที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยจะมีความยาวคลื่นมากกว่า 1.74 เซนติเมตร จัดเป็น Gravity Wave ซึ่งจะมีลักษณะ เป็น Sine Curve (รูปที่ 2.6) Gravity Wave ที่เกิดขึ้นใหม่ๆ

โดยทั่วไปจะมีความยาวคลื่นมากกว่าความสูง 15-35 เท่า และเมื่อมีพลังงานส่งผ่านมากทำให้อัตราการเพิ่มความสูงเร็วกว่าการเพิ่มความยาวคลื่นยอดคลื่นจะมีลักษณะแหลมขณะที่ท้องคลื่นจะโค้ง



รูปที่ 2.6 กระบวนการเกิด Wind Wave เมื่อพลังงานจากลมผ่านเข้าสู่ผิวน้ำในมหาสมุทร โดยเริ่มจาก Capillary Wave และเมื่อมีการสะสมพลังงานมากขึ้นขนาดของคลื่นก็จะเปลี่ยนไปเป็น Gravity Wave (Garrison, 2007)

พลังงานจากลมจะทำให้ความสูง ความยาวคลื่น และความเร็วในการเคลื่อนตัวของคลื่นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเมื่อความเร็วในการเคลื่อนตัวของคลื่นเท่ากับความเร็วลม คลื่นจะมีขนาดใหญ่ที่สุด บริเวณที่ลมทำให้เกิด Wind Wave (Sea) ซึ่งคลื่นที่เริ่มเกิดขึ้นนี้จะมีขนาดเล็กและเคลื่อนที่ไปในทุกทิศทางและมีคาบและความยาวคลื่นต่างๆ กันไป สำหรับปัจจัย ที่จะมีผลต่อการเพิ่มของพลังงานที่คลื่นจะได้รับ คือ (1) ความเร็วลม (Wind Speed) (2) ช่วงเวลา (Duration) จะต้องนานพอสมควร และ (3) Fetch ซึ่งหมายถึงระยะทางที่ลมพัดจะต้องยาวพอ (รูปที่ 2.7) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางลม (Wind Direction), Fetch และ Sea



รูปที่ 2.7 บริเวณที่เกิด Wind Wave (Sea) และ คลื่นที่เคลื่อนออกจาก Sea (Swell) (Garrison, 2007)

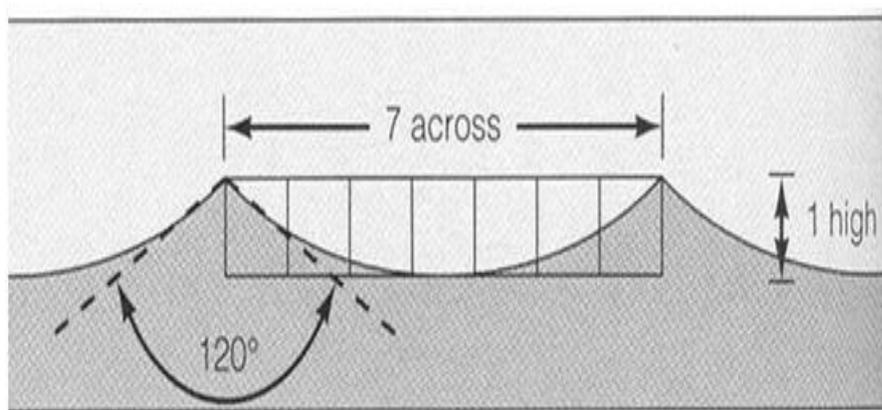
ความสูงของคลื่นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานที่ผิวน้ำได้รับจากแรงลม ความสูงของคลื่นบริเวณ sea โดยเฉลี่ยจะน้อยกว่า 3 เมตร แต่บางครั้งอาจสูงถึง 10 เมตร และคลื่นที่เกิดจากแรงลมที่มีความสูงมากที่สุดเท่าที่พบคือ 34 เมตร โดยบันทึกไว้ในปี ค.ศ. 1935 บริเวณมหาสมุทร

แปซิฟิกตอนเหนือ เมื่อยอดของคลื่นมีความสูงมากขึ้นโดยมีความชัน (Steepness) ซึ่งหาได้จาก สัดส่วนระหว่างความสูงของคลื่นและความยาวคลื่นมากกว่า 1/7 จะเกิดการแตกของคลื่นใน มหาสมุทร เรียกว่า Whitecap การจำแนกกระตบความเร็วของลมที่ก่อให้เกิดคลื่นที่มีความสูงในระดับ ต่างๆ กันไปจะใช้ค่ามาตรฐานที่เรียกว่า Beauford Wind Scale

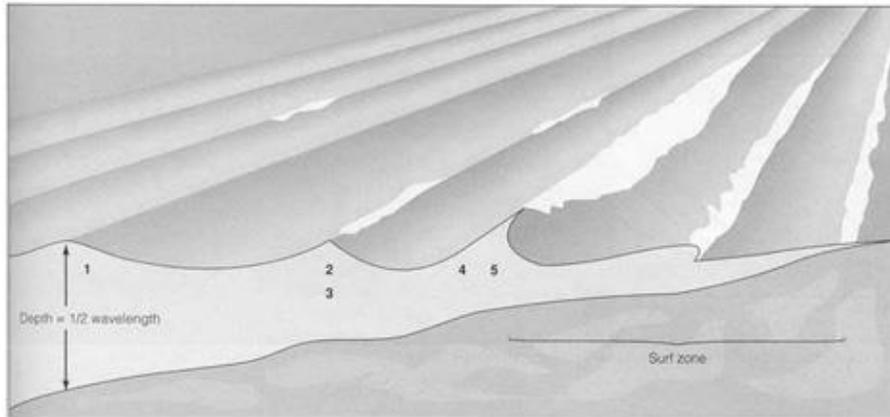
Wind Wave (Sea) มีหลายขนาดและมีความเร็วต่างกันจะค่อยๆ ปรากฏทรวดทรงให้เห็นชัด ขึ้น กล่าวคือที่มีความเร็วมักจะวิ่งล้ำหน้าพวกที่เคลื่อนที่ช้ากว่า นับว่าเป็นการแยกคลื่นหลายชนิด ซึ่งเกิดพร้อมกันออกจากกันตามธรรมชาติ คลื่นที่แยกออกจากกันแล้วจะมียอดคลื่น (Crest) และท้อง คลื่น (Trough) ต่ำขึ้นกว่าเดิม เรียกคลื่นในตอนนี้ว่า คลื่นใต้น้ำ (Swell) หมายถึง คลื่นที่เกิดขึ้นนอก เขตลมพัดยอดคลื่นเตี้ยมนกลมกว่าเดิมเล็กน้อย โดยธรรมชาติของคลื่นที่ค่อยๆ โตขึ้นในขณะที่มีลม พัดจะได้รับพลังงานจากลมเพิ่มขึ้น คลื่นจึงค่อยๆ มีความเร็วเพิ่มขึ้นในตอนแรกคลื่นเคลื่อนที่ช้ากว่า ลมต่อมาจะเท่ากับลมและในที่สุดจะเร็วกว่าลม ด้วยเหตุนี้คลื่นจึงเคลื่อนที่ออกนอกเขตที่มีลมพัด ใน ธรรมชาติจึงเห็นคลื่นเคลื่อนที่นำหน้าลมหรือเคลื่อนที่เข้าหาฝั่งได้อย่างอิสระ โดยไม่มีลมพัดเลย จึง อาจเรียกคลื่นใต้น้ำ (Swell) ว่าเป็น Free Waves ในบริเวณที่มีคลื่นใต้น้ำ (Swell) ผิวน้ำทะเลจะลด ความสับสนและขรุขระมาก เริ่มมองเห็นคลื่นเคลื่อนที่อย่างเป็นระบบ คลื่นหลายขนาดและด้วย ความเร็วต่างๆ กันจะเคลื่อนที่ตามหลังกันเป็นขบวน (Wave Train) หรือเป็นกลุ่มมีลักษณะเฉพาะ (System) คลื่นที่นำหน้าอาจรวมตัวเมื่อเข้าเขตที่มีความตื้น เช่น เกาะใต้น้ำ สันทรายใต้น้ำ ฯลฯ ในขณะที่คลื่นอายุน้อยจากแถวหลังจะวิ่งติดตามคลื่นที่หายไป โดยลักษณะนี้เราจะเห็นคลื่น ตลอดเวลา

2.1.9 การแตกของคลื่น (Wave Breaking)

คลื่นจะแตกได้เมื่อยอดคลื่นแหลมเกินไปคือมุมของยอดแหลมน้อยกว่า 120 องศา และ ความชันของยอด (อัตราส่วนระหว่างความสูงและความยาวคลื่น) น้อยกว่า 1/7 (รูปที่ 2.8) ที่ความ ชันดังกล่าวยอดคลื่นจะเคลื่อนที่เร็วกว่าฐานทำให้เสียความสมดุล จึงทำให้เกิดการแตกตัวและเมื่อพัด เข้าสู่ฝั่ง จะเกิดการถ่ายทอดพลังงานจากคลื่นเข้าสู่ฝั่ง ซึ่งจะเรียกบริเวณนี้ว่า Surf Zone (รูปที่ 2.9) ซึ่งจะมีการถ่ายทอดพลังงานเกิดขึ้นอย่างมากมาย ลักษณะการแตกของคลื่นมี 3 แบบด้วยกันคือ



รูปที่ 2.8 คลื่นจะแตกตัวเมื่ออัตราส่วนระหว่างความสูงและความยาวคลื่นน้อยกว่าหนึ่งต่อเจ็ด (Garrison, 2007)



รูปที่ 2.9 การถ่ายทอดพลังงานของคลื่นเมื่อเข้าสู่ฝั่งก่อให้เกิดพื้นที่ Surf Zone (Garrison, 2007)

1) Plunging Breaker เป็นคลื่นที่มีการปล่อยพลังงานอย่างรวดเร็วและรุนแรง เดินทางด้วยความเร็วสูง คลื่นจะม้วนตัวไปข้างหน้าและแตกออกอย่างรวดเร็ว เกิดบริเวณที่คลื่นเดินทางเข้าฝั่งที่มีความลาดชันมากน้ำจะคลุมอากาศไว้ทำให้มีการใช้พลังงานอย่างรวดเร็ว และมีเสียงดังเกิดขึ้น (รูปที่ 2.10)



รูปที่ 2.10 การแตกของคลื่นแบบ Plunging breaker (Garrison, 1996)

2) Spilling Breaker คลื่นจะแตกโดยยอดคลื่นโค้งไปข้างหน้า ปลายยอดแตกเป็นฟองขาว ทางด้านหน้า และคลื่นจะเว้าทั้งสองข้างเรียกว่า Cycloid คลื่นแบบนี้จะมีความชันมากกว่า 0.01 โดยเฉพาะเมื่อมีลมพัดเข้าสู่ฝั่งในชายหาดที่มีความลาดเอียงน้อย (รูปที่ 2.11)



รูปที่ 2.11 การแตกของคลื่นแบบ Spilling Breaker
(Garrison, 1996)

3) Surging Breaker เกิดกับชายฝั่งที่มีลักษณะแหว่ง (มีบางบริเวณที่น้ำซัดไม่ถึง) และมีความชันที่มีการเปลี่ยนแปลงความชันจากบริเวณที่มีความชันสูงมายังความชันน้อย คลื่นจะถอยหลังกลับและกระแทกกับคลื่นลูกหลังที่ไล่มา (รูปที่ 2.12)

นอกจากนี้เรายังพบคลื่นบริเวณชายฝั่งอีกประเภทหนึ่งเรียกว่า กระแสน้ำชายฝั่ง (Longshore Current) และกระแสน้ำออกจากฝั่ง (Rip Current) โดยคลื่นที่เคลื่อนที่ถึงชายหาดหลังจากถ่ายทอดพลังงานให้แก่ชายหาดแล้วน้ำบางส่วนจะเคลื่อนไปยังชายหาดและถ้าคลื่นเหล่านั้นเกิดการซ้อนกันจะเกิดเป็นกระแสน้ำเลียบชายฝั่ง บางครั้งกระแสน้ำเลียบชายฝั่งอาจไหลสวนทางมาพบกันจะเกิดเป็นกระแสน้ำเคลื่อนที่ออกจากฝั่งเป็นระยะทางไกลๆ ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อผู้ที่ว่ายน้ำเล่นตามชายฝั่งและถ้าเกิดในระดับที่ลึกลงไป (Under Flow) จะยิ่งเป็นอันตรายมากขึ้น ถ้ารู้ตัวกำลังอยู่ในกระแสน้ำที่ออกจากฝั่งดังกล่าวให้รีบว่ายน้ำขนานกับฝั่งด้านใดด้านหนึ่งให้เร็วที่สุดก็จะหลุดพ้นจากกระแสน้ำดังกล่าวได้



รูปที่ 2.12 การแตกของคลื่นแบบ Surging Breaker
(Garrison, 1996)

2.1.10 การเปลี่ยนทิศทางของคลื่น

1) การสะท้อน (Wave Reflection) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปปะทะสิ่งกีดขวางที่สามารถสะท้อนคลื่น ผลจากการปะทะทำให้อนุภาคของน้ำไม่สามารถเคลื่อนที่เป็นวงได้จึงเคลื่อนที่ไปทางด้านข้างของวัตถุที่ปะทะ โดยอนุภาคของน้ำจะเคลื่อนที่ขึ้นสูงเมื่อเคลื่อนที่เข้ามาที่วัตถุปะทะ และเคลื่อนที่ลงต่ำเมื่อเคลื่อนที่ออกมาจากวัตถุที่ปะทะ ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเห็นได้ชัดเจนตามบริเวณ ท่าเรือ อ่าวหรือสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่ที่มีลักษณะเป็นแผ่นกว้าง

2) การหักเห (Wave Refraction) เป็นการโค้งงอของคลื่นซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความลึกของน้ำ ทำให้ดูเหมือนว่าคลื่นเคลื่อนที่เข้าหาฝั่งในลักษณะที่ขนานกับฝั่งเสมอ การหักเหของคลื่นใต้น้ำ อธิบายได้โดยใช้กฎของ Snell เช่นเดียวกับที่ใช้ในการหักเหของแสง คลื่นในมหาสมุทรสามารถเขียนเส้นที่เรียกว่า Orthogonal Line ในทุกแห่งตั้งฉากกับยอดคลื่นเพื่อบอกทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น มุมที่เกิดขึ้นระหว่าง Orthogonal Line และเส้นที่ลากตั้งฉากกับเส้นแสดงความลึกเท่า (Depth Contour) โดยค่านี้จะมีความสัมพันธ์กับความแรงของคลื่นที่มีความลึกต่างๆ กัน

3) การแยกโค้งของคลื่น (Diffraction) เป็นปรากฏการณ์ของคลื่นซึ่งเป็นไปตาม Huygen's law ซึ่ง กล่าวว่าแต่ละจุดบนยอดคลื่นทำตัวเหมือนจุดกำเนิดจุดหนึ่งสำหรับยอดคลื่นใหม่อื่นๆ ได้โดยจะทำให้เกิดการโค้งงอแยกออกไปเมื่อพบกับสิ่งกีดขวางและจะต่างไปจากการสะท้อนของคลื่น โดยการแยกโค้งของคลื่นนี้จะแผ่ออกไปด้านข้างและก่อให้เกิดคลื่นใหม่ที่แตกต่างไปจากคลื่นที่มากระทบวัตถุกีดขวางโดยการแยกโค้งของคลื่น จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการสร้างกำแพงกันคลื่น เพราะจะทำให้ความสูงของคลื่นลดลงเนื่องจากคลื่นจะมีการแผ่กระจายออกไปด้านข้างทำให้หลังกำแพงกันคลื่นเป็นบริเวณที่สงบ (มณฑล, 2010)

2.1.11 การเปลี่ยนแปลงเมื่อคลื่นเข้าหาฝั่ง

ก่อนที่คลื่นในกลุ่มคลื่นใต้น้ำ (Swell) กลายเป็นคลื่นที่เรียกว่า Surf ได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ทิศทางและอื่นๆ มากมาย จุดที่การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเริ่มที่ความลึกของน้ำประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น คลื่น (คลื่นใต้น้ำ) ที่เคลื่อนที่เข้าหาฝั่งตั้งแต่จุดนี้จนถึงจุดที่คลื่นแตก (Surf) เรียกว่า คลื่นน้ำตื้น (Shallow-Water Waves) ฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างๆ เป็นการเปลี่ยนแปลงของคลื่นน้ำลึกไปเป็นคลื่นน้ำตื้น คลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้

- 1) ความเร็วคลื่นลดลง
- 2) ความยาวคลื่นลดลง
- 3) ความสูงคลื่นเพิ่มขึ้น
- 4) คาบของคลื่นยังคงเดิม
- 5) คลื่นสะท้อนกลับ (Reflection)
- 6) คลื่นเลี้ยวเบน (Diffraction)
- 7) คลื่นเบน (Refraction)

2.2 พลังงานจากคลื่น (Wave Energy)

พลังงานคลื่นที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จำนวนมหาศาล เพียงแต่มีขนาดช่วงกว้างของคลื่นเล็กและไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับความถี่ที่พัดผ่าน ฉะนั้นในการจะนำพลังงานคลื่นมาใช้จึงต้องอาศัยพื้นที่กว้างใหญ่มาก นั่นหมายถึง จำนวนเงินที่นำมาลงทุนต้องมากมายมหาศาลเช่นกัน คลื่น (Wave) เป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งค่าพลังงานของคลื่นจะขึ้นอยู่กับความเร็วของคลื่นและขนาดความสูงของคลื่น โดยการประมาณจากทฤษฎีสามารถกล่าวได้ว่าคลื่นที่เกิดขึ้นในบริเวณชายฝั่งยาว 100 กิโลเมตร สามารถใช้ผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 2,000 เมกะวัตต์ โดยเป็นการประเมินค่าพลังงานที่จะได้จากคลื่นเฉพาะแถบชายฝั่ง ส่วนนอกชายฝั่งออกไปการใช้พลังงานคลื่นเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าทำได้ค่อนข้างยากเพราะถึงแม้ในเขตทะเลลึกจะมีพลังงานคลื่นมหาศาล แต่การนำเอาพลังงานคลื่นในบริเวณดังกล่าวมาใช้ประโยชน์จะต้องมีการสร้างสถานีเพื่อผลิตไฟฟ้ากลางทะเลลึก ซึ่งเป็นงานที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนมากและต้องใช้ทุนอย่างมหาศาล

นอกจาก Beaufort scale มีการจัดสถานะของทะเลของ World Meteorological Organization – No. 306 (1971) ซึ่งกรมอุตุนิยมวิทยาใช้พยากรณ์คลื่นในทะเล ดังตารางที่ 2.3

การเคลื่อนที่ของมหาสมุทรสามารถอธิบายได้ในรูปแบบของคลื่น (Wave) ซึ่งจะมีความสูงเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างจากฝั่งมากขึ้น การเคลื่อนที่ของคลื่นในทะเลสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้ากระแสไฟฟ้า (Electricity) หรือกำลังทางกล (Mechanical Work) ได้

การเคลื่อนที่ของคลื่นเกิดขึ้นเนื่องจากการกระทำของแรงเสียดทาน (Friction) เนื่องจากลมมหาสมุทรเป็นแหล่งรวมพลังงานขนาดใหญ่ที่สามารถส่งผ่านพลังงานจากลมเหนือพื้นที่ผิวจำนวนมากและเก็บพลังงานในรูปแบบของคลื่นนั่นเอง

ตารางที่ 2.3 การจำแนกสถานะของทะเล

เลขรหัส	ลักษณะของทะเล	อักษรย่อ	ความสูงของคลื่น (m)
0	ทะเลสงบ (เรียบเหมือนกระจก-glassy) Calm	-	0
1	ทะเลสงบ (คลื่นน้อยๆ - ripples) Calm	ง, พ	0.0-0.1
2	ทะเลเรียบ (เป็นระลอกน้อยๆ -wavelets)	ร	0.1-0.5
3	ทะเลมีคลื่นเล็กน้อย	คณ	0.5-1.25
4	ทะเลมีคลื่นปานกลาง	คป	1.25-2.5
5	ทะเลมีคลื่นจัด	คจ	2.5-4.0
6	ทะเลมีคลื่นจัดมาก	จม	4.0-6.0
7	ทะเลมีคลื่นใหญ่	คญ	6.0-9.0
8	ทะเลมีคลื่นใหญ่มาก	คญม	9.0-14.0
9	ทะเลมีคลื่นใหญ่และจัดมาก (ทะเลบ้า)	-	>14

ที่มา: Beaufort scale, 1971

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพลังงานคลื่น (Wave Energy) ประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลักๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับควอนตัมของพลังงานคลื่น ได้แก่

1) อัตราเร็วลม (Wind Sped) ซึ่งถ้าหากอัตราเร็วลมสูงก็จะทำให้พลังงานคลื่นสูงตามไปด้วย แอมพลิจูดของคลื่นจะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วลม โดยในช่วงมีลมกรรโชก (Gust) หรือช่วงมีลมพายุในทะเลจะทำให้เกิดคลื่นขนาดใหญ่

2) ค่าระยะที่ได้รับแรงกระทำจากลมยังผล (Effective Fetch Value) ซึ่งเป็นระยะในทะเลที่ลมสามารถพัดผ่านก่อนที่จะถึงจุดอ้างอิง โดยถ้าหากระยะทางมากขึ้นพลังงานคลื่นก็จะเพิ่มขึ้นตาม โดยระยะทางดังกล่าวอาจจะเปลี่ยนแปลงจาก 5 km จนถึง 45 km

3) ความลึกของน้ำทะเล (Depth of Sea Water) น้ำทะเลที่ลึกมากกว่าจะทำให้คลื่นมีอัตราเร็วที่สูงกว่า โดยพลังค์พลังงานขนาดใหญ่มักจะอยู่ในมหาสมุทรลึก

2.2.1 พารามิเตอร์ของคลื่น

พฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่ขึ้นลงและไปข้างหน้าของน้ำในทะเลหรือมหาสมุทรจะเรียกว่าคลื่น แสดงดังรูปที่ 2.13

พารามิเตอร์ของคลื่นที่สำคัญประกอบด้วย

- ความสูงของคลื่น (Wave Height) H ซึ่งเป็นระยะทางจากท้องคลื่น (Trough) ถึงสันคลื่น (Crest) ซึ่งไม่ใช่ระยะความสูงของยอดคลื่นถึงระดับผิวน้ำทะเล โดยความสูงของคลื่นจะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วลม (Wind Speed) และระยะที่ได้รับแรงกระทำจากลม
- แอมพลิจูด (Amplitude) ของคลื่น a เท่ากับ $H/2$
- ความยาวคลื่น (Wavelength) λ
- คาบคลื่น (Wave Period) T ซึ่งโดยปกติจะมีค่าอยู่ในช่วง 4-12 วินาที

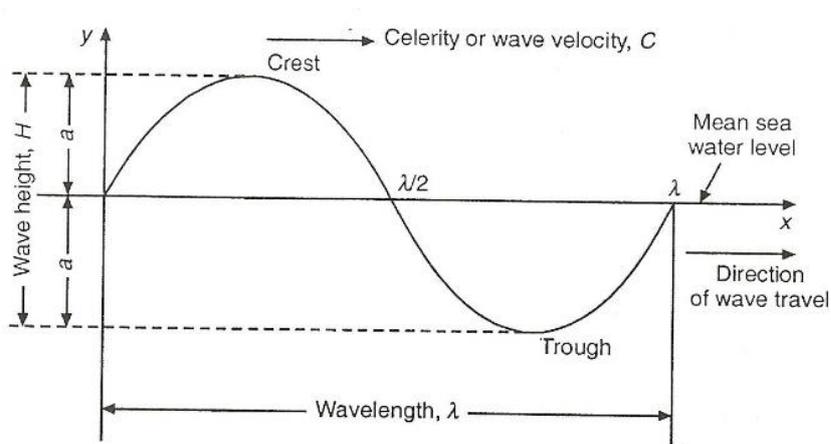
- ความถี่ (Frequency) f ซึ่งแสดงโดยจำนวนของคลื่นในหนึ่งวินาที ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น λ และคาบ T แสดงโดยอาศัยสมการที่ 2.10

$$\lambda = 1.56T^2 \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.13 คลื่นในมหาสมุทร
(ที่มา: <http://www.vcharkarn.com/varticle/41602>)

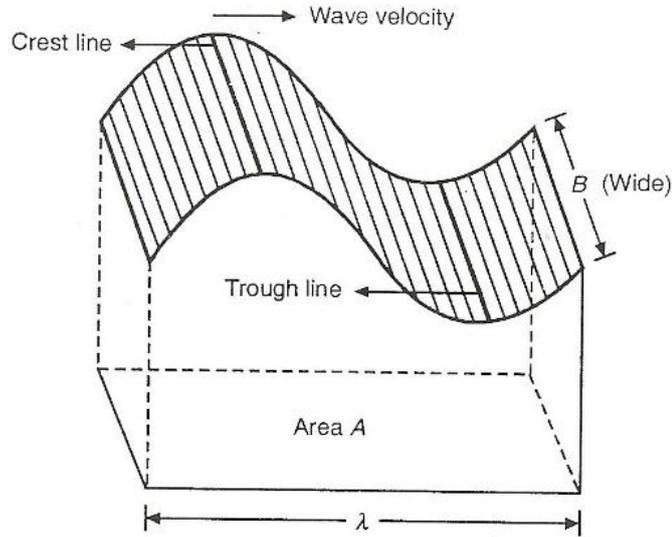
การเคลื่อนที่ของคลื่นในมหาสมุทรเป็นการเคลื่อนที่ของแผ่นพลังงานที่มีพื้นที่เว้าโค้งแน่นอน B และมีความยาวคลื่นมาตรฐาน λ แสดงดังรูปที่ 2.14 ปริมาณทั้งหมดของพลังงานคลื่น E จะเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ A



รูปที่ 2.14 คลื่นมหาสมุทร
ที่มา : D.P. Kothari et al., 2009

2.2.2 การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของพลังงานคลื่น

คลื่นที่กำลังเดินทางสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 ถึงแม้ว่ารูปร่างคลื่นในทะเลจะมีความไม่แน่นอนสูง แต่มักจะพิกทักให้มีรูปร่างแบบคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Harmonic Wave) เพื่อสามารถทำให้วิเคราะห์ทางด้านคณิตศาสตร์ได้



รูปที่ 2.15 ระยะความกว้างของคลื่นน้ำ
ที่มา : D.P. Kothari et al., 2009

เมื่อให้ P เป็นจุดบนพื้นผิวคลื่นที่มีความหนา dx ไปตามแนวแกน x คลื่นที่มีรูปร่างแบบไซน์จะสามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ 2.2

$$y = a \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi\theta}{T}\right) \quad (2.11)$$

เมื่อ θ คือ เวลา (s)

สำหรับคลื่นใดๆ $\frac{2\pi}{\lambda}$ และ $\frac{2\pi}{T}$ เป็นค่าคงที่

โดยให้ $\frac{2\pi}{\lambda} = M$ และ $\frac{2\pi}{T} = N$ (Phase Rate)

ดังนั้น

$$y = a \sin(Mx - N\theta) \quad (2.12)$$

$$(Mx - Nt) = 2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{\theta}{T}\right) = \text{Phase Angle}$$

2.2.2.1 พลังงานจากคลื่น

คลื่นสูงมักจะเกิดในพื้นที่มหาสมุทรลึก เมื่อขบวนคลื่นเดินทางถึงฝั่งและคาบของคลื่นยังคงเท่าเดิมแต่ความยาวคลื่นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป และเมื่อคลื่นเดินทางมาถึงบริเวณพื้นที่ที่มีระดับน้ำตื้น (Shallow Water; Breaker Zone) การลดลงของความลึกของน้ำทะเลจะทำให้แรงเสียดทานบริเวณท้องทะเลเพิ่มสูงขึ้น ทำให้พลังงานคลื่นมีค่าลดลงเนื่องจากแรงเสียดทานดังกล่าวนั่นเอง

พลังงานคลื่นถูกนิยามให้เป็นอัตราพลังงานที่สามารถถ่ายเทข้ามระยะทาง 1 เมตร ณ มุมที่เหมาะสมของทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น

พลังงานคลื่นในมหาสมุทรแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์

$$P = 0.96H^2T \text{ (kW/m)} \quad (2.13)$$

พลังงานคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับสถานที่และเวลาโดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ และสำหรับบริเวณใดๆ แล้วพลังงานคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงในรอบวัน รอบเดือนและรอบปี โดยคลื่นในมหาสมุทรมีรูปร่างไม่เป็นรูปคลื่นไซน์แต่จะมีรูปร่างแบบสุ่มตามธรรมชาติ

คุณลักษณะของคลื่นประกอบด้วย

- ความสูงของคลื่นนัยยะสำคัญ (Height of a Significant Wave) H
- คาบของคลื่นนัยยะสำคัญ (Period of the Significant Wave) T
- ความหนาแน่นพลังงาน (Energy Density) E / A
- ความหนาแน่นกำลัง (Power Density) (พลังงานต่อหนึ่งหน่วยเวลา) P / A
- กำลังที่มีอยู่ในหนึ่งหน่วยความกว้าง (Power Available per Unit Width) P / W

2.2.2.2 พลังงานศักย์ (Potential Energy)

พลังงานศักย์ในคลื่นทะเลเกิดขึ้นเนื่องจากการยกขึ้นที่สูงกว่าระดับน้ำทะเลเฉลี่ย การคำนวณพลังงานศักย์ในระดับน้ำทะเลที่ลอยตัวสูงขึ้นจำเป็นต้องคำนวณหางานที่กระทำในการยกตัวของน้ำไปยังความสูงดังกล่าว นั่นคือ

$$\begin{aligned} \text{Work Done} &= \text{Force} \times \text{Distance} \\ &= mgh \text{ (J)} \end{aligned}$$

เมื่อ m คือ มวลของน้ำ $dx = ydx \times B \times \rho$ โดยที่ B คือ ความกว้างของคลื่น

$$h = y / 2$$

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg / m^3)

$$\text{Work Done} = ydx \times B \times \rho \times (y / 2) \times g$$

$$\text{พลังงานศักย์} = \frac{1}{2} g \rho y^2 B dx \quad (2.14)$$

แทนค่าของ y จากสมการที่ 2.14 และปริพันธ์จาก θ ถึง λ สำหรับพื้นที่คลื่น $\lambda \times B$

$$\text{Potential Energy (PE)} = \frac{1}{2} g \rho B \int_0^\lambda a^2 \sin^2(Mx - Nt) dx \text{ สมมติให้ } t \text{ มีค่าเท่ากับศูนย์}$$

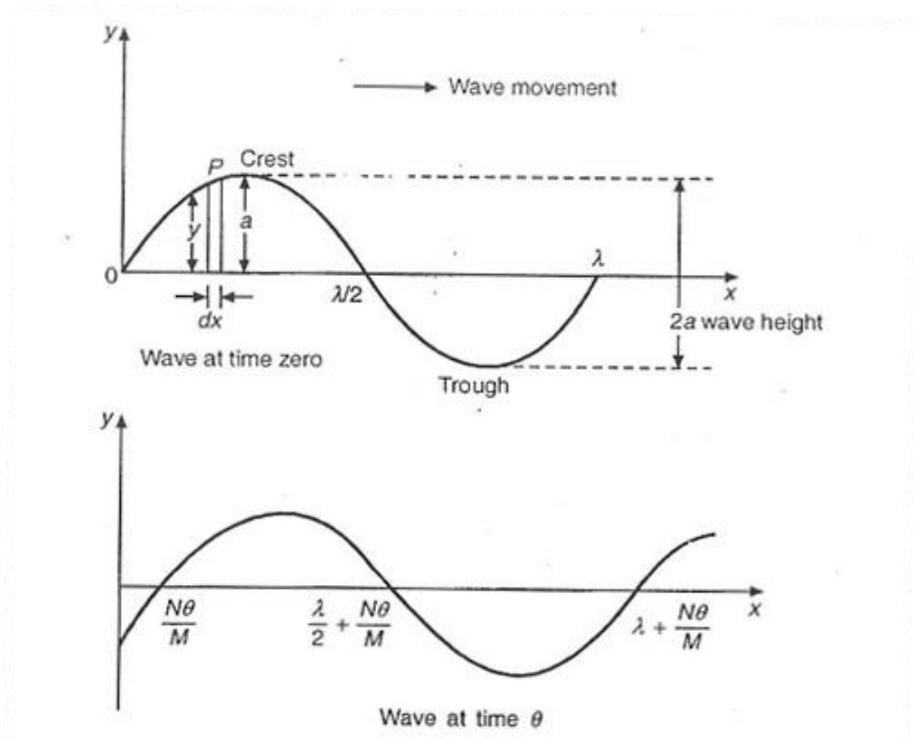
$$\begin{aligned} \text{Potential Energy (PE)} &= \frac{g \rho B a^2}{2} \left(\frac{1}{2} x - \frac{1}{4M} \sin 2Mx \right)_0^\lambda \\ &= \frac{1}{4} g \rho B a^2 \lambda \end{aligned} \quad (2.15)$$

พื้นที่คลื่น $A = B\lambda$

ความหนาแน่นพลังงานศักย์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ $= \frac{\text{PE}}{A}$

ดังนั้น

$$\frac{\text{PE}}{A} = \frac{1}{4} g \rho a^2 \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.16 คลื่นความก้าวหน้าสองมิติที่ศูนย์เวลา
ที่มา: D.P. Kothari et al., 2009

2.2.2.3 พลังงานจลน์ (Kinetic Energy)

การพัดของลมบนพื้นผิวของมหาสมุทรทำให้เกิดคลื่นของน้ำที่กำลังเคลื่อนที่ไปบนมหาสมุทร ทำให้มหาสมุทรมีพลังงานจลน์ และเมื่อแอมพลิจูดของคลื่นมีขนาดเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นแล้วจะทำให้พลังงานศักย์มีค่าเท่ากับพลังงานจลน์

พลังงานจลน์ของคลื่นก็จะมีรูปร่างหน้าตาของสมการเหมือนกับสมการที่ 2.17

$$KE = \frac{1}{4} g \rho B a^2 \lambda \quad (2.17)$$

ความหนาแน่นของพลังงานจลน์แสดงดังสมการ 2.18

$$\frac{KE}{A} = \frac{1}{4} g \rho a^2 \quad (2.18)$$

2.2.2.4 พลังงานรวม (Total Energy)

พลังงานรวมของคลื่นในมหาสมุทรจะมีความยาวคลื่น คาบและความโค้งงอซึ่งเป็นผลรวมของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์นั่นเอง

$$E = PE + KE \text{ (J)} \quad (2.19)$$

$$E = \frac{1}{4} g \rho B a^2 \lambda + \frac{1}{4} g \rho B a^2 \lambda$$

$$E = \frac{1}{2} g \rho B a^2 \lambda$$

ความหนาแน่นพลังงานเป็นพลังงานของคลื่นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ $A = \lambda B$

ดังนั้น ความหนาแน่นพลังงาน

$$\frac{E}{A} = \frac{1}{2} g \rho a^2 \quad (2.20)$$

2.2.3 กำลังคลื่น (Wave Power)

กำลังแสดงอยู่ในรูปของพลังงานต่อหนึ่งหน่วยเวลา ดังนั้น

$$\text{Power} = \frac{\text{Energy Supplied}}{\text{Time Taken}} \text{ (J/s)}$$

$$\text{Power} = \text{Energy} \times \text{Frequency (W)}$$

$$\text{Power} = \frac{1}{2} g \rho B a^2 \lambda f \text{ (W)}$$

$$\text{Power Density} = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} g \rho a^2 f \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.21)$$

2.2.4 สมการเอ็มไพริคัลของพลังงานคลื่น

พลังงานคลื่นเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่ง ถ้าหากมีลมพัดเหนือพื้นผิวทะเลด้วยอัตราเร็วสูง จะทำให้คลื่นมีความสูงสูงขึ้นและเป็นผลให้มีพลังงานคลื่นสูงเช่นเดียวกัน

2.2.4.1 Scripps Formula

สมการ Scripps เป็นสมการที่ถูกรับรองโดย Scripps Institution of Oceanography ใน La Jolla California โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของคลื่น (Wave Height) กับอัตราเร็วลม (Wind Speed) ดังสมการที่ 2.22

$$H = 0.085U^2 \quad (2.22)$$

เมื่อ H คือ ความสูงของคลื่น (m)
 U คือ อัตราเร็วลม (Wind Speed) ($knot$)

2.2.4.2 Zuider Zee Formula

สมการ Zuider Zee เป็นการรวมตัวแปรจำนวน 5 ตัวเข้าด้วยกัน ได้แก่ อัตราเร็วลม ระยะที่ได้รับแรงกระทำจากลม (Fetch) การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำ ความลึกของน้ำ และ มุมระหว่างทิศทางของลมและระยะที่ได้รับแรงกระทำจากลมแสดงดังสมการ 2.23

$$H = \frac{KV^2 F \cos a}{D} \quad (2.23)$$

เมื่อ H คือ ระดับน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น (m)
 K คือ 6.08×10^{-3}
 F คือ ระยะที่ได้รับแรงกระทำจากลม
 V คือ อัตราเร็วลม
 D คือ ความลึกเฉลี่ยของน้ำทะเล
 a คือ มุมระหว่างทิศทางลมและระยะที่ได้รับแรงกระทำจากลม

2.3 การตรวจคลื่นและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

การตรวจวัดคลื่นคือการวัดการกระเพื่อมของระดับน้ำทุกๆ วินาทีหรือถี่กว่านั้นเพื่อคำนวณหาคาบเวลา (ความถี่) และความสูงคลื่นนัยสำคัญ ความสูงคลื่นสูงสุด เครื่องมือวัดคลื่นวิวัฒนาการตามกาลเวลา การตรวจวัดมีได้หลายวิธี เช่น

1. วัดโดยสร้างหุ่นลอยไปทิ้งไว้ในทะเลที่ระยะ 200-1,000 เมตร จากฝั่งติดตามการเคลื่อนขึ้นลงของหุ่นลอยโดยโยกคันโยกซึ่งจะเชื่อมต่อกับปากกาที่จะลากเส้นระดับน้ำไปบนกระดาษกราฟบันทึกคลื่นที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสม่ำเสมอ โดยปกติจะตรวจวัดทุกต้นชั่วโมงเป็นเวลา 10 นาที เครื่องวัดระดับน้ำแบบนี้เรียกว่า Stadia

2. เครื่องมือวัดอยู่เหนือระดับน้ำ จะส่งสัญญาณเสียงไปยังผิวน้ำแล้วสะท้อนกลับมา เครื่องจะวัดระยะห่างระหว่างหัววัดกับระดับน้ำเบื้องล่าง ข้อมูลจะถูกบันทึกอยู่ในที่เก็บข้อมูลของคอมพิวเตอร์ เช่น ดิสเก็ต จานแม่เหล็กแข็ง เครื่องมืออีกแบบมีสายลวดหย่อนลงไปถึงน้ำทะเล ตรวจวัดความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามความยาวของลวดซึ่งจะต้องแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นความสูงคลื่นอีกทีหนึ่ง

3. เครื่องวัดความกดของน้ำ ซึ่งต้องติดตั้งคงที่ไว้ที่ท้องน้ำหรือผูกติดไว้กับเสาหรือโครงสร้างใต้น้ำ ความกดของน้ำจะสัมพันธ์กับคลื่นที่เคลื่อนตัวอยู่เหนือหน้า วิธีนี้จะใช้ได้เฉพาะเขตน้ำตื้นเพราะในเขตน้ำลึกนั้นไม่สามารถสังเกตเห็นได้

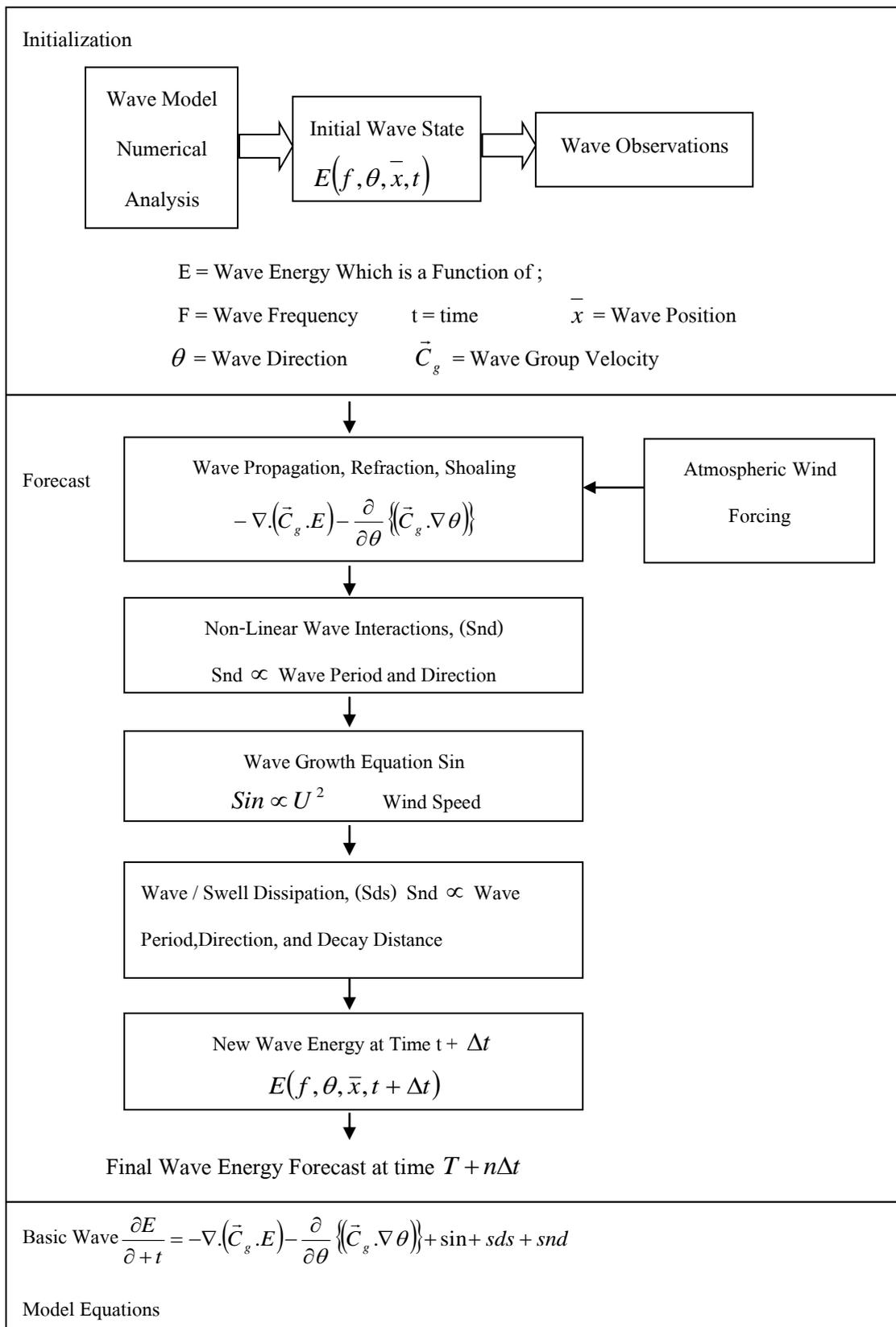
เครื่องมือที่กล่าวมาข้างต้นนี้ติดตั้งอยู่กับที่เพียงแห่งเดียว จึงให้ข้อมูลเฉพาะคาบเวลา และความสูงคลื่นเท่านั้น การจะหาความยาวคลื่นหรือทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่นต้องติดตั้งเครื่องมือไว้มากกว่า 1 จุด นอกจากนี้การตรวจวัดระยะไกลด้วยดาวเทียมโดยใช้ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) ต่างๆ กัน (Radar Altimetry, Synthetic Aperture Radar; SAR) สามารถให้ข้อมูลเพิ่มเติม เช่น ความหนาแน่นของพลังงานคลื่น ความยาวคลื่น เป็นต้น

การตรวจวัดคลื่นทะเล หรือมหาสมุทรซึ่งเป็นแหล่งพลังงานคลื่นที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จำนวนมาก เพียงแต่มีขนาดความกว้างของคลื่นเล็กและไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับแรงลมที่พัดผ่าน ฉะนั้นในการจะนำพลังงานคลื่นมาใช้จึงต้องอาศัยพื้นที่กว้างใหญ่มาก นั่นหมายถึง จำนวนเงินที่จะนำมาลงทุนต้องมากมายมหาศาลเช่นกัน ในประเทศไทยเองยังไม่มี การนำเอาพลังงานจากคลื่นมาใช้ แต่ในต่างประเทศมีการศึกษาและใช้พลังงานจากคลื่นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1967 โดยประเทศที่ริเริ่มนำพลังงานจากคลื่นมาใช้ ได้แก่ ประเทศญี่ปุ่นและประเทศอังกฤษ ในการนำพลังงานจากคลื่นมาใช้มีอยู่ 2 ประเภท ได้แก่ แบบอยู่กับที่ (Fixed) และแบบลอย (Floating)

2.4 แบบจำลองคลื่นทะเล

องค์ประกอบของแบบจำลองคลื่น (ดังรูปที่ 2.17) จะต้องประกอบด้วย

- 1) สถานภาพเริ่มต้น (Initial Conditions)
- 2) ลม (Wind)
- 3) ข้อมูลนำเข้าและการสลายตัวของคลื่น (Input and Dissipation)
- 4) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นกับคลื่น (Nonlinear Interactions)
- 5) กลุ่มการเคลื่อนที่ของคลื่น (Propagation)
- 6) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นใต้น้ำกับคลื่นลมและทิศทางของคลื่นที่ไม่แน่นอน
- 7) ความลึก (Depth)
- 8) ผลกระทบของขอบเขตแนวชายฝั่งและเกาะ (Effect of Boundaries, Coastline and Islands)



รูปที่ 2.17 แบบจำลองของคลื่นทะเล

2.4.1 แบบจำลอง WAM (WAM Model)

แบบจำลองการพยากรณ์คลื่นในทะเลมีการพัฒนามาเป็นลำดับ ปัจจุบันนี้เป็นรุ่นที่ 3 (Third Generation Wave Model) ซึ่งได้รับการพัฒนามากว่า 10 ปี ดดยกลุ่มนักวิทยาศาสตร์นานาชาติ (SWAMP, 1985) แบบจำลองรุ่นที่สามนี้มีการคำนวณที่ง่ายกว่า โดยทำการคำนวณสเปกตรัมจากสมการพื้นฐานของการถ่ายเทสเปกตรัม (Spectral Transport) โดย Komen et al. (1994) ได้อธิบายผลการคำนวณจากแบบจำลอง WAM ออกเป็น 4 ลักษณะ ดังนี้

(1) ผลของคลื่นซึ่งก่อกำเนิดอยู่ภายใต้อิทธิพลของลม ได้แก่ คลื่นนัยสำคัญ (Significant Wave Height) ทิศทางคลื่นเฉลี่ย (Mean Wave Direction) ความถี่เฉลี่ย (Mean Frequency) ความเร็วแรงเสียดทานในชั้นขอบเขตบรรยากาศ (Friction Velocity) ทิศทางคลื่น (Wave Direction) ความถี่สูงสุด (Peak Frequency) ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag Coefficient) และความเค้นเหนียวนำปกติสำหรับคลื่น (Normalized Wave-Induced Stress)

(2) ผลของคลื่นที่เกิดจากลมและเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดโดยไม่อยู่ภายใต้อิทธิพลของลม (Swell) ได้แก่ ความสูงคลื่น (Wave Height) ทิศทางของ Swell (Swell Direction) ทิศทางเฉลี่ยระหว่างลมกับคลื่น (Mean Wind-Wave Direction) และความถี่เฉลี่ยของ Swell (Mean Swell Frequency)

(3) สเปกตรัมของคลื่นซึ่งก่อกำเนิดอยู่ภายใต้อิทธิพลของลม ที่ตำแหน่งกริดที่เลือก

(4) สเปกตรัมของคลื่นที่เกิดจากลมและเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดโดยไม่อยู่ภายใต้อิทธิพลของลม (Swell) ที่ตำแหน่งกริดที่เลือก

แบบจำลอง WAM ได้รับการนำไปใช้งานจริงในหลายๆ หน่วยงานของหลายประเทศ ได้แก่ European Center for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) ประเทศอังกฤษ Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center (FNMOC) ประเทศสหรัฐอเมริกา Atmospheric Environment Service (AES) ประเทศแคนาดา Max-Planck Institute for Meteorology ประเทศเยอรมัน Koninklijk Nederlands Meteorologisch Institute ประเทศเนเธอร์แลนด์ เป็นต้น ในการศึกษาคลื่นรอบชายฝั่งทะเลของญี่ปุ่น Kawaguchi and Hashimoto (2003) ใช้แบบจำลอง WAM ในการคำนวณข้อมูลคลื่นย้อนกลับ (Wave Hind Casting) และใช้ข้อมูลลมจาก ECMWF ในการคำนวณเป็นเวลา 8 ปี แล้วนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการตรวจวัดคลื่นจาก NOWPHAS ในประเทศญี่ปุ่น ผลที่ได้จากการศึกษาคือการแสดงผลข้อมูลคลื่นในรูปแบบของ Wave Rose ตารางและแผนภูมิต่างๆ ซึ่งแสดงคุณลักษณะของคลื่นทางสถิติในมหาสมุทร จากการคำนวณโดยแบบจำลอง WAM ในตำแหน่งต่างๆ รอบประเทศญี่ปุ่น โดยแบ่งตามรายฤดู ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

สำหรับประเทศไทยเริ่มมีการนำแบบจำลอง WAM มาใช้ในการศึกษาวิจัย โดยธวัช และคณะ (2542) ได้ศึกษาแบบจำลองการพยากรณ์คลื่น WAM และมีการปรับปรุงพารามิเตอร์ของแบบจำลองเพื่อนำมาใช้ในการพยากรณ์คลื่นในทะเลฝั่งอ่าวไทยและอันดามัน โดยใช้ข้อมูลพยากรณ์ลมที่ได้จาก Master Environmental Library ของ US. Department of Defense ต่อมาวิริยะ (2547) ได้ศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลข SWAN ที่มีความสามารถในการคำนวณคลื่นในพื้นที่ใกล้ฝั่งเพื่อใช้สำหรับ

อ่าวไทย โดยการนำผลการคำนวณในพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ของแบบจำลองการพยากรณ์คลื่น WAM (Wave Model) มาเป็นพลังงานของบริเวณพื้นที่ขอบเปิดของแบบจำลอง SWAN (Simulating Wave Nearshore)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศ

ธนพรธ (2010) ได้ศึกษาการคำนวณเชิงขนาน (Parallel computing) ของแบบจำลองคลื่นสำหรับทะเลอ่าวไทย โดยใช้สมการสเปกตรัลแอดซันบาลานซ์ อธิบายคลื่นแบบยอดสั้น ซึ่งเกิดบริเวณน้ำตื้น เช่น พื้นที่ชายฝั่ง และแหล่งน้ำบนดิน สมการประกอบด้วยมิติบนระนาบสองมิติ ทิศทางลม และความถี่คลื่น โดยได้นำสกีมแบบแผนปริภูมิศูนย์กลางเวลาย้อนกลับ สกีมอับวินอันดับหนึ่ง สกีมอับวินอันดับที่สอง และสกีมดอเนอเซลที่ดัดแปลง มาใช้แก้สมการสเปกตรัมแอดซันบาลานซ์ ซึ่งโครงสร้างของเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของระบบสมการเชิงเส้นมีขนาดใหญ่ จึงนำวิธีแฟรกชันนอลสเตป มาใช้ซึ่งสอดคล้องกับทุกๆ สกีมที่มีความแม่นยำในอันดับเดียวกัน ระเบียบวิธีการคำนวณแบบขนาน เป็นการลดเวลาการคำนวณของปัญหาที่มีขนาดใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบการคำนวณการใช้สกีมอับวินอันดับที่หนึ่งและสกีมอันดับที่สอง โดเมนที่ใช้คืออ่าวไทยที่มีพิกัดอยู่ระหว่างละติจูดที่ 6-12 °N และลองจิจูดที่ 90-105°E โดยใช้กริดตามแนวนอน ขนาด 37x97 และระดับซิกมาตามแนวตั้งขนาด 10

วัฒนา กันบัว (2008) ได้ศึกษาแบบจำลองการพยากรณ์คลื่นลมทะเล (Ocean Wave Forecast Model) โดยแบบจำลองดังกล่าวมีความละเอียดของข้อมูลที่ระดับความแม่นยำในการพยากรณ์คลื่นที่ความละเอียดสูง (25 x 25 กม.) คลื่นเป็นพลังงานรูปหนึ่งซึ่งมีแหล่งกำเนิดหรือตัวกระทำให้เกิดคลื่นหลายรูปแบบแต่ตัวกระทำที่พบเห็นได้ชัดเจน ได้แก่ ลมคลื่นลมมีผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินของมนุษย์ดังนั้นจึงมีการศึกษาคลื่นลมในทะเลและมหาสมุทรในเชิงคณิตศาสตร์โดยสร้างเป็นแบบจำลองพยากรณ์คลื่นลมขึ้นแบบจำลองการพยากรณ์คลื่นในทะเลมีการพัฒนามาเป็นลำดับปัจจุบันนี้เป็นรุ่นที่ 3 (Third Generation Wave Model) ซึ่งได้รับการพัฒนามากว่า 10 ปี โดยกลุ่มของนักวิทยาศาสตร์นานาชาติ (SWAMP, 1984) แบบจำลองนี้ได้รับการทดสอบกับพื้นที่ส่วนต่างๆ ของโลกที่มีสภาพคลื่นต่างๆ กันและรวบรวมไว้ในเอกสารชื่อ Dynamics and Modeling of Ocean Waves ปัจจุบันแบบจำลองนี้ได้ถูกแจกจ่ายและใช้งานโดยนักวิจัยทั่วโลกและถูกนำไปใช้ในระดับปฏิบัติการโดยสถาบันอุตุนิยมวิทยาแห่งชาติหลายแห่ง

อุษา ฮัมฟรี (2008) ได้มีการวิเคราะห์ Trough Flow ในอินโดนีเซียเป็นสองการทำงานของแบบจำลองมหาสมุทร OCCAM ระดับ 1/4 ของโลกซึ่งเป็นการใช้ลมภูมิภาคสายเดือน และเป็นหนึ่งในการใช้ ECMWF วิเคราะห์ลมหกชั่วโมงสำหรับช่วง 1993-1998 trough flow รูปแบบระยะยาวสอดคล้องกับข้อสังเกตและค่าที่คาดการณ์โดย Godfrey's Island Rule มีทักษะในการทำนายสัญญาณรายปีในแต่ละปี ซึ่งบางอย่างยากที่จะทำนายซึ่งรูปแบบที่เปลี่ยนแปลงในระยะของการไหลทั้งหมดโดยเฉพาะอย่างยิ่งในปีที่ El Nino สเปกตรัมของการขนส่งในทางเดินของแต่ละที่แสดงความแตกต่างที่สำคัญระหว่างการเชื่อมต่อภูมิภาคของมหาสมุทรแปซิฟิกและเชื่อมต่อกับมหาสมุทรอินเดีย เกี่ยวกับการตรวจสอบพบการเปลี่ยนแปลงในทางเดินทางตอนเหนือมีความสัมพันธ์อย่างยิ่งกับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของกระแสในทะเล Celebes และนอก Halmahera ซึ่งโปรไฟล์ตามแนวตั้งของการขนส่งอยู่ในข้อตกลงที่เหมาะสมกับการสังเกตการณ์ แต่รูปแบบการขนส่ง Overestimates

พื้นผิวที่อยู่ใกล้ผ่านช่องแคบ Lombok และความหนาแน่นจากมหาสมุทรแปซิฟิกผ่านช่องแคบ Lifamatola ลงไปในทะเล Banda ในทั้งสองกรณีแสดงความหยาบของทางเดิน โดยรูปแบบจะปรากฏขึ้นในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ แสดงให้เห็นรูปแบบตามที่คาดไว้ว่าการขนส่งที่ใหญ่ที่สุดคือผ่านทางช่องแคบ Makassar แต่นี้มีค่าน้อยกว่าที่คาดไว้และแทนที่จะมีการไหลที่สำคัญทางทะเล Halmahera กรณีในเกาะ Godfrey เป็นที่ถูกต้องและ trough flow ถูกบังคับโดยการไหลไปทางทิศเหนือระหว่างออสเตรเลียและอเมริกาใต้แล้วเส้นทางทะเล Halmahers ควรจะมีความสำคัญที่เป็นเส้นทางทางทิศใต้มากที่สุดทั่วเกาะนิวกินีไปในมหาสมุทรอินเดียและไม่มีเหตุผลชัดเจนว่าทำไมการไหลควรจะไปทางทิศเหนือต่อไปเพื่อผ่านช่องแคบ Makassar ผลลัพธ์แบบจำลองจึงทำให้เกิดคำถามของเหตุผลที่ในความเป็นจริง Makassar Strait เส้นทางที่ดูเหมือนจะครอง trough flow

อุษา ฮัมฟรี (2011) และคณะได้ศึกษาแบบจำลองมหาสมุทรสามมิติ (POM) นำมาใช้ในการศึกษาระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลและมหาสมุทรในรูปแบบการไหลเวียนบังคับ โดยเขตข้อมูลลมพายุไต้ฝุ่นในอ่าวไทย (GoT) การจำลองที่เกี่ยวข้องกรณีของพายุไต้ฝุ่นใน Linda ที่เกิดขึ้นในช่วง 1-4 พฤศจิกายน 1997 พายุไต้ฝุ่นใน Linda รูปแบบเป็นที่ขึ้นกับเวลา สมการพื้นฐานพิกัดของคาร์ทีเซียนในพิกัดแนวนอนและซิกมาในตามแนวตั้งในตาราง 37×97 ตั้งฉากจุดกริด Curvilinear ในแนวนอน ที่มีระยะห่างจากตัวแปร 2 กิโลเมตร อยู่ใกล้กับ GOT ไป 55 กิโลเมตร ด้านตะวันออกที่ระดับซิกมา 10 อยู่ในแนวตั้ง การเปิดเงื่อนไขขอบเขตจะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขการแผ่รังสีและการยกระดับพื้นผิวทะเลมี การเก็บข้อมูลผ่านดาวเทียมสมุทรศาสตร์ (AVISO) โดยใช้การคำนวณความเครียดลมจากภูมิอากาศลมเฉลี่ยรายเดือน ความร้อนที่พื้นผิวและค่าความเค็มเฉลี่ยรายเดือน รูปแบบการคาดการณ์ระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลขึ้นถึง 68.5 เซนติเมตร ที่บริเวณชะอำตั้งอยู่ในทิศเหนือของที่เส้นไต้ฝุ่นที่ชายฝั่ง ผลการค้นหจากระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลแสดงให้เห็นว่ามีพื้นที่ส่วนบนอ่าวโดยเฉพาะในฝั่งตะวันตกและผลกระทบของพายุที่มีขนาดที่ต่ำกว่าอ่าวในระหว่างช่วงเวลาทั้งหมดของการศึกษานี้คลื่นในอ่าวถูกชักนำโดยลมตะวันตกเฉียงเหนือพัด

2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างประเทศ

Andrew M. Moore และคณะ (2004) ได้ศึกษาระบบที่ครอบคลุมการคาดการณ์และการวิเคราะห์มหาสมุทร ซึ่งขึ้นอยู่กับการค่าแทนเจนต์เชิงเส้นและการ Adjoint ของแบบจำลองมหาสมุทร ท้องถิ่น จะอธิบายถึงค่าแทนเจนต์ ส่วนประกอบเชิงเส้น และ Adjoint ของ ROMS จากเครื่องมือซึ่งมีให้กับผู้ใช้ ROMS โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะพิจารณา Eigenmodes เวลาจำกัด และ Adjoint จำกัด Eigenmodes เวลาจาก Propagator ค่าแทนเจนต์เชิงเส้น เวกเตอร์เป็นเอกพจน์ของการแพร่กระจายและการบังคับของเอกพจน์เวกเตอร์ที่เหมาะสมและสุม Pseudospectra ของเมตริกซ์เชิงเส้น Resolvent ค่าแทนเจนต์ ตัวอย่างของชนิดของการคำนวณแต่ละถูกนำเสนอเป็นครั้งสองครั้งที่การพัฒนา Gyre มหาสมุทรการไหลเวียนในมหาสมุทรรูปสี่เหลี่ยมมุมน้ำ

Andrew M. Moore และคณะ (2011) ได้ศึกษาประสิทธิภาพและการประยุกต์ใช้ระบบการสร้างแบบจำลองมหาสมุทรท้องถิ่น (ROMS) 4 มิติ Variational (4D-Var) ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ 134° W ถึง 116° W และ 31° N ถึง 48° N ได้วิเคราะห์สภาพแวดล้อมไหลเวียนของ Mesoscale ในแคลิฟอร์เนีย ไว้สามวิธี คือ วิธีที่ 1 แนวทางข้อจำกัดแข็งแกร่งที่เพิ่มขึ้น วิธีที่ 2 ระบบการวิเคราะห์พื้นที่กายภาพเชิงสถิติ และวิธีที่ 3 การกำหนดวิธีการทางอ้อม Representer การพิจารณาการไหลเวียนเดียวกัน ซึ่งพบว่าอัตราของการลู่เข้าของการกำหนดแบบ Dual จะดีกว่าการกำหนดแบบ

วิธีที่ 1 ลักษณะของประสิทธิภาพการทำงาน 4D-Var ที่เกี่ยวข้องกับการใช้ของ Loops รอบนอกหลาย preconditioning และข้อจำกัดที่อ่อนแอจะยัง Explored เป็นระบบการประเมินผลจากผลกระทบของส่วนประกอบต่างๆ ของเวกเตอร์ที่ควบคุม 4D-Var จะแก้ไขสำหรับความไม่แน่นอนในเงื่อนไขเริ่มต้นของรูปแบบการออกแรงผลกระทบ ความสามารถของแบบจำลองที่เหมาะสมกับข้อสังเกตได้วิเคราะห์ 4D-Var และตรวจสอบรวมถึงการประมาณการข้อผิดพลาดภายหลังเนื้อหาข้อมูลของ array ข้อสังเกตและสอดคล้องการตรวจสอบเกี่ยวกับข้อผิดพลาดสมมติฐาน พบว่ากว่าร้อยละ 90 จากข้อสังเกตรูปแบบข้อมูลที่เข้าซ้อนเป็นร้อยละของข้อมูลที่ได้จากดาวเทียม

Andrew M. Moore และคณะ (2011) ได้ศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลขของมหาสมุทรท้องถิ่น (ROMS) 4 มิติข้อมูล Variational ของระบบ เป็นหนึ่ง Community มหาสมุทรการไหลเวียนแบบจำลองที่มี 4 มิติ การดูดซึมข้อมูลแปรผัน (4D-Var) ความสามารถได้ถูกพัฒนา ROMS 4D-Var เป็นเอกลักษณ์ของ 4D-Var ได้รับการสนับสนุนจากสูตรที่ 1 ของข้อจำกัดที่แข็งแกร่งเพิ่มขึ้น 4D-Var (I4D-Var) สูตรที่ 2 อยู่บนพื้นฐานพื้นที่ทางกายภาพทางสถิติ ระบบการวิเคราะห์ (4D-PSAS) จะกำหนดตัวแปรแบบ Dual-Based Representer จาก 4D-Var (R4D-Var) ในแต่ละกรณีของ ROMS ถูกนำมาใช้ร่วมกับการสังเกตที่มีการระบุงการไหลเวียนน้ำในมหาสมุทร ซึ่งจะกำหนดสมมติฐานเกี่ยวกับข้อผิดพลาด priori อยู่ในเงื่อนไขเริ่มต้น ของขอบเขตพื้นผิวบังคับให้ข้อผิดพลาดในแบบจำลองกรณีของ 4D-PSAS และ R4D-Var การกำหนด I4D-Var สำหรับประมาณการไหลเวียนที่ดีที่สุดจะดำเนินการในพื้นที่ทั้งหมดของเวกเตอร์ควบคุม ในขณะที่สูตรที่สองของ 4D-PSAS และ R4D-Var จะใช้เฉพาะพื้นที่ย่อยของเส้นตรง การทำงานของเวกเตอร์สถานะรูปแบบถูกวัดโดยการสังเกต (นั่นคือพื้นที่สอง) ในการใช้งานสมุทรศาสตร์ ซึ่งตัวเลขของการสังเกตการณ์มักจะน้อยกว่าขนาดของเวกเตอร์ควบคุมแบบจำลอง จึงมีข้อได้เปรียบที่ชัดเจนในการข้อจำกัดของพื้นที่ที่อยู่การสังเกตในกรณีของ 4D-PSAS และ R4D-Var สมมติฐานข้อจำกัดที่แข็งแกร่งสามารถนำไปสู่การกำหนดข้อจำกัดที่อ่อนแอ

Andrew M. Moore และคณะ (2011) ได้ศึกษาข้อสังเกตในระหว่างการดูดกลืนข้อมูลมีการสำรวจด้วยแบบจำลองมหาสมุทรท้องถิ่น (ROMS) 4 มิติ Variational (4D-Var) ของระบบการดูดกลืนข้อมูล นำไปใช้ตามลำดับการการไหลเวียนของมหาสมุทรในแคลิฟอร์เนีย แสดง Adjoint จากเมตริกซ์ที่ได้รับ 4D-Var ถูกนำมาใช้หาจำนวนผลกระทบต่อารสังเกตของแต่ละแบบและแพลตฟอร์มการสังเกตในแง่มุมที่แตกต่างของการไหลเวียน 4D-Var การประมาณในช่วงการวิเคราะห์เกี่ยวกับการส่ง Alongshore ระหว่างชายฝั่งที่เกี่ยวข้องกับกับมหาสมุทรในแคลิฟอร์เนีย Wind induced ท่วมทันชายฝั่งทะเลตามแนวชายฝั่งทางภาคกลางของแคลิฟอร์เนีย ส่วนใหญ่ข้อสังเกตที่มีอยู่ในระหว่างรอบการวิเคราะห์ใดๆ ที่กำหนดมาจากแพลตฟอร์มผ่านดาวเทียมในรูปแบบของ SST และ SSH และโดยเฉลี่ยจากข้อมูลที่มีผลต่อการควบคุม ได้เพิ่มการวิเคราะห์และทักษะการคาดการณ์ในชายฝั่งทะเลส่วนน้ำใต้ดินจากข้อสังเกตที่ลอยตัว Argo CTDs XBTs ทางทะเลที่ติด ที่มีผลกระทบมากในการวิเคราะห์และการคาดการณ์ตามชายฝั่งทะเล

B.S. Powell และคณะ (2008) ได้มีการศึกษาการสร้างแบบจำลองมหาสมุทร โดยนำเสนอการพัฒนาและการเตรียมสถานะที่ทันสมัย 4D Variational (4DVAR) ระบบการการดูดซึมข้อมูลในระบบการสร้างแบบจำลองมหาสมุทรท้องถิ่น ด้วยโปรแกรมประยุกต์ภายในภูมิภาคทะเลทวีปอเมริกา (IAS) โปรแกรมนี้เริ่มต้นด้วยรูปแบบหยาบจะแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของการ 4DVAR วิธีการ

สำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนของมหาสมุทร และทำหน้าที่เตรียมความพร้อมสำหรับการปรับใช้งานระบบการการดูดซึมตามเวลาจริงบนเรือ Royal Caribbean Cruise Lines เรือของ Explorer การปรับความสูงของน้ำทะเลและการสังเกตอุณหภูมิจะผ่านดาวเทียมพื้นผิวที่มีแหล่งกำเนิดข้อมูลได้จากเรือในรอบ 14 วันกว่า 2 ปีนับจากมกราคม 2005 ถึงมีนาคม 2007 ซึ่งจะช่วยลดความไม่เหมาะสมแบบจำลองมากกว่า 75% โดยใช้มาตรการของพลศาสตร์

B.S. Powell และคณะ (2009) ได้มีการศึกษาความเหมาะสมต้นแบบที่ใกล้เคียงกับการดูดซึมตามเวลาจริง (Real-Time) และการทำนาย Systemfor ภายในมหาสมุทรทวีปอเมริกา ซึ่งทำงานตาม Autonomously บนเรือ จากการใช้ (ROMS) ทำนายสภาพทะเลขึ้นอยู่กับแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ประกอบด้วยความไม่แน่นอนอยู่ในแบบจำลองทางฟิสิกส์ เงื่อนไขเริ่มต้น และสถานะแบบจำลอง ซึ่งการดูดซึมมีมิติที่แตกต่างกัน การพยากรณ์และเทคนิคที่ใช้สำหรับของความไม่แน่นอนของทุกๆ 3 วัน และข้อมูลทาง From The ก่อนเวลา 7 วัน Periodwere รวบรวมเพื่อสร้างการประมาณการของการไหลเวียน จากการคาดการณ์ 2 สัปดาห์ที่ผ่านมาของสภาพในมหาสมุทร ซึ่งระบบที่มีอิสระเครื่องแบบสแตนด์อโลน บนเรือจะขึ้นอยู่กับตัวเลขการพยากรณ์อากาศ แม้ว่าจะมีถูกลดลงเมื่อเทียบกับข้อมูลแบบสังเกตที่ใกล้เคียงเวลาจริง (Real-Time) ในการดูดซึมการพยากรณ์พื้นผิวที่มีทักษะของการแก้ปัญหาหลอมรวม มากกว่าการแก้ปัญหาที่ไม่ใช่หลอมรวมเนื่องจากวิธีการแปรผันข้อจำกัดการดูดซึมที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบจำลองการดูดซึมของเขตข้อมูลพื้นผิวช่วยลดความไม่แน่นอนแบบไดนามิกที่อยู่ในเขตข้อมูลใต้พื้นผิว

Dunnett, D., และ Wallace, J. S. (2009) ศึกษาสมรรถนะของเครื่องเปลี่ยนพลังงานคลื่น 3 ชนิดแตกต่างกันทำการประเมินในแต่ละพื้นที่ภายในประเทศแคนาดาโดยใช้ข้อมูลจากศูนย์บริการข้อมูลสิ่งแวดล้อมทางทะเลของประเทศแคนาดาโดยทำการศึกษาระบบมหาสมุทรแอตแลนติก 2 ตำแหน่งและมหาสมุทรแปซิฟิก 3 ตำแหน่งพบว่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ามากกว่าร้อยละ 20 นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานคลื่นขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้งและอุปกรณ์ของของเครื่องด้วย

Emanuele Di Lorenzo และคณะ (2007) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาโปรแกรมและข้อมูลเบื้องต้นของระบบการสร้างแบบจำลองผกผันของมหาสมุทรท้องถิ่น (ROMS) ทั้งสี่มิติ Variational (4DVAR) ระบบการดูดซึมข้อมูลสำหรับความละเอียดสูงของกลุ่มน้ำและชายฝั่งมหาสมุทร ซึ่ง ROMS ผกผันทำให้การใช้ถูกรบกวนด้วยค่าแทนเจนต์เชิงเส้น (TL) Representer สัมผัสเชิงเส้น (RP) และโมเดล (AD) Adjoint ที่จะใช้ทางอ้อม Representer ตามระบบการสร้างแบบจำลองทั่วไปผกผันการสร้างแบบจำลองกรอบเป็น Modular TL, RP และแบบจำลอง AD จะถูกใช้เป็นแบบ Stand-Alone รุน้อยภายในมหาสมุทรผกผันการสร้างแบบจำลองระบบ (IOM) ช่วยการดูดซึมขั้นตอนวิธีแบบวนซ้ำไป นำมาแก้ปัญหการดูดซึมแบบไม่เชิงเส้น การดูดซึมจะดำเนินการภายใต้สมมติฐานแบบจำลองที่สมบูรณ์แบบ (ข้อจำกัดที่แข็งแกร่ง) หรือในพลศาสตร์แบบจำลอง (ข้อจำกัดที่อ่อนแอ) กรณีข้อจำกัดที่อ่อนแอรูปแบบ TL และ RP จะปรับเปลี่ยนให้มีข้อเพิ่มเติมเกี่ยวกับการการบังคับทางด้านขวามือของสมการแบบจำลอง ข้อกำหนดที่จำเป็นในข้อผิดพลาดทางพลศาสตร์ของแบบจำลอง ROMS มีการทดสอบในแบบ 3 มิติที่เหมือนจริง Baroclinic ของระบบสภาพภูมิประเทศที่ซับซ้อนด้านล่างลักษณะความแปรปรวนที่แข็งแกร่ง Mesoscale Eddy จะดูดซึมข้อมูลในมหาสมุทรบน (0-450 เมตร) ที่อุณหภูมิและกระแสน้ำในช่วงเวลา 10 วัน มาวิเคราะห์โดยใช้ความละเอียดและอาร์เรย์แบบ

สุ่มตัวอย่าง Aliased Spatially ในระหว่างระยะเวลาการการดูดซึมเขตข้อมูลการไหลผ่านการเปลี่ยนแปลงสถานะเริ่มต้น ช่วยให้การแก้ปัญหาผกผันกับดึงข้อมูลที่ใช้งานแบบไดนามิก จากการสังเกตการสังเคราะห์และปรับปรุงเส้นทางการเคลื่อนที่ของสถานะแบบจำลอง ทั้งสองการทดลองข้อจำกัดที่แข็งและอ่อน การดูดซึมแสดงให้การคาดการณ์มากขึ้น ภูมิภาคใน ช่วง 10-20 วัน หลังจากที่เกิด

Evan Mason และคณะ (2010) ได้ศึกษาวิธีการซ้อนกันในตารางแบบปิดในแบบจำลองมหาสมุทรท้องถิ่น (ROMS) โดยใช้แบบ One-way Offline ของพื้นฐานสมการในแบบจำลองเชิงตัวเลขของมหาสมุทรท้องถิ่น (ROMS) เป็นการตรวจสอบขอบเขตที่มีความสนใจ โดยสร้างแบบจำลองที่ปรับเปลี่ยนเงื่อนไขขอบเขตแบบเปิดที่ช่วยลดการสะท้อนของคลื่น และมีการเพิ่มประสิทธิภาพความถี่ที่สูงสำหรับการปรับปรุงขอบเขต วิธีคำนวณข้อมูลขอบเขตต้อง เป็นดูจากลักษณะภูมิประเทศที่สอดคล้องกับตารางภายนอก สำหรับบริเวณที่พื้นแคบการเปลี่ยนแปลงจะถูกนำไปใช้กับความเร็ว Baroclinic และ Barotropic เมื่อการเปิดขอบเขตของภายในเพื่อให้แน่ใจว่าปริมาณการอนุรักษ์พร้อมกับการแก้ไขละเอียดจากข้อมูลภายนอกต่างๆ เช่น กระแสน้ำชายฝั่ง และการสะท้อนของคลื่นในขอบเขตเงื่อนไขขอบเขตแบบเปิด Barotropic ช่วยลดการสะท้อนของคลื่นที่รอยต่อแบบเปิด โดยใช้ One-way-ROMS to ROMS เทคนิคการซ้อนกันแบบออฟไลน์ จะถูกใช้ในกระบวนการสร้างส่วนประกอบหลักจากขอบเขต

Hughes, M. G. และ Andrew, D. H. (2010) ได้ประเมินแหล่งพลังงานคลื่นในประเทศออสเตรเลียบริเวณชายฝั่ง 0-300 m กำลังและพลังงานคลื่นได้รับอิทธิพลจากคาบของคลื่นระดับความสูงของคลื่นทะเลเฉลี่ยและทิศทางของคลื่นโดยอาศัยแบบจำลอง AuaWAM สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลในช่วง 1 มี.ค. 1997 – 29 ก.พ. 2008 การกระจายเชิงพื้นที่ของกำลังและพลังงานคลื่นได้ใช้กริดขนาด 1° ซึ่งปกคลุมพื้นที่ลองจิจูด $110-156^\circ$ และละติจูด $7-46^\circ$ พลังงานคลื่นทั้งหมดในประเทศออสเตรเลียเฉลี่ยได้เท่ากับ 3.47 PJ กำลังคลื่นมีค่ามากในทางภาคใต้ของออสเตรเลียซึ่งมีศักยภาพมากพอสำหรับผลิตไฟฟ้าจากพลังงานคลื่นในทางภาคเหนือของออสเตรเลียกำลังคลื่นเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า 10 kW/m เป็นผลมาจากกำลังของคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลนั่นเอง

Iglesias, G. and Carballo, R. (2009) ได้อาศัยข้อมูลจาก SIMAR-44 ซึ่งครอบคลุมในรอบ 44 ปีร่วมกับข้อมูลหุ่นตรวจวัดคลื่นเพื่อประเมินแหล่งพลังงานคลื่นตามแนวชายฝั่งทะเลที่อันตรายของประเทศสเปนจากแหลมพินิสเตอร์เรถึงเกาะซีชาร์กาพบว่ากำลังคลื่นรายปีในพื้นที่ตามแนวชายฝั่งทะเลมีค่าเท่ากับ 50 kW-m และพลังงานคลื่นรายปีมีค่าเท่ากับ 400 MW/m ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานที่ใหญ่มากและสมบูรณ์แบบทั้งด้านทิศทางของคลื่นความสูงของคลื่นและคาบของคลื่นระดับความลึกทะเลของชายฝั่งนั้นแสดงถึงศักยภาพของคลื่นบริเวณนั้นๆ พลังงานคลื่นเป็นพลังงานที่น่าสนใจโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูหนาวและช่วงลมมรสุม

Iglesias, G. และคณะ (2009) ได้นำเสนอกำลังคลื่นซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่น่าสนใจไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม Galicia เป็นส่วนหนึ่งของมหาสมุทรแอตแลนติกอยู่ทางด้านตะวันตกเฉียงเหนือของคาบสมุทรไอบีเรียนศักยภาพการทำงานของการผลิตพลังงานซึ่งทำการประเมินจากข้อมูลราย 3 ชั่วโมง ของเครื่องผลิตไฟฟ้าจากพลังงานคลื่นมหาสมุทรโดยครอบคลุมข้อมูลในช่วงปี ค.ศ. 1996-2005 ผลการประเมินได้มีการพิจารณาตำแหน่งที่ตั้งท่าเรือเส้นทางเดินเรือการทำประมงและสถานที่ทำเกษตรชายฝั่งทำการเลือกพื้นที่ที่สามารถใช้ประโยชน์จากพลังงานคลื่น

ได้คลื่นนอกชายฝั่งสามารถคำนวณได้จากคลื่นใกล้ชายฝั่งเพื่อเลือกพื้นที่ตั้งฟาร์มไฟฟ้าพลังงานคลื่นมี 2 บริเวณที่ให้ค่าศักยภาพพลังงานสูงเหมาะแก่การตั้งฟาร์มไฟฟ้าพลังงานคลื่น

Schuler, D.L. and et al., 2004 ได้ทำการศึกษาโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม JPL และดาวเทียม AIRSAR บริเวณพื้นที่ชายฝั่งของแคลิฟอร์เนียโดยใช้ในช่วงคลื่น L-Band และ P-Band เพื่อศึกษาความลาดเอียงของคลื่นและขนาดของคลื่นด้วยเทคนิค Polarimetric จากข้อมูลภาพระบบเรดาร์ซึ่งเครื่องมือในการตรวจลักษณะทางด้านกายภาพของคลื่นออกเป็นแต่ละลูกคลื่นลักษณะการฟุ้งกระจายของคลื่น (Backscatter) หรือค่า Sigma-0 เพื่อพัฒนาโมเดลในการประมาณค่าความลาดเทของคลื่นและขนาดของคลื่นการวัดทำโดยใช้ Modulation Transfer Function (MTF) ซึ่งมีค่าความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางด้านกายภาพของคลื่น

Y. Kanarska และคณะ (2007) ได้มีการศึกษาขั้นตอนวิธีสำหรับการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ใช่ Hydrostatic ในระบบแบบจำลองมหาสมุทรท้องถิ่น (ROMS) จะขึ้นอยู่กับกลายตัวทางเทคนิคสำหรับความดัน Hydrostatic และไม่มี Hydrostatic ขั้นตอนวิธีมีของรูปแบบความดัน แก้ไขด้วยการแยกระยะเวลาที่ละเอียดสำหรับรูปแบบตามแนวตั้งและ Barotropic กับพื้นผิวอิสระ ซึ่งต้องใช้ในการแก้สมการปัวซองสำหรับความดันที่ไม่ใช่ Hydrostatic ที่มีเมตริกซ์ที่ไม่สมมาตร จะมีประสิทธิภาพของขั้นที่แตกต่างกันและ Preconditioners ถูกนำมาทดสอบ ตามขั้นตอนวิธีหลายตัวอย่างที่มีผล Non-Hydrostatic ซึ่งรวมถึงแรงโน้มถ่วงคลื่นอยู่ภายนอก การสร้างของคลื่นทั้งภายในและการเปลี่ยนแปลงความไม่แน่นอนตามแรงเฉือนแบบแบ่งชั้น และไม่เชิงเส้นภายในการสร้างแบบจำลองจากน้ำขึ้นน้ำลง มากกว่าแนวการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกันในโครงสร้างพื้นฐานด้านการประมวลผลก่อนและหลังการประมวลผลอยู่ในรหัสที่มีอยู่ Hydrostatic ROMS

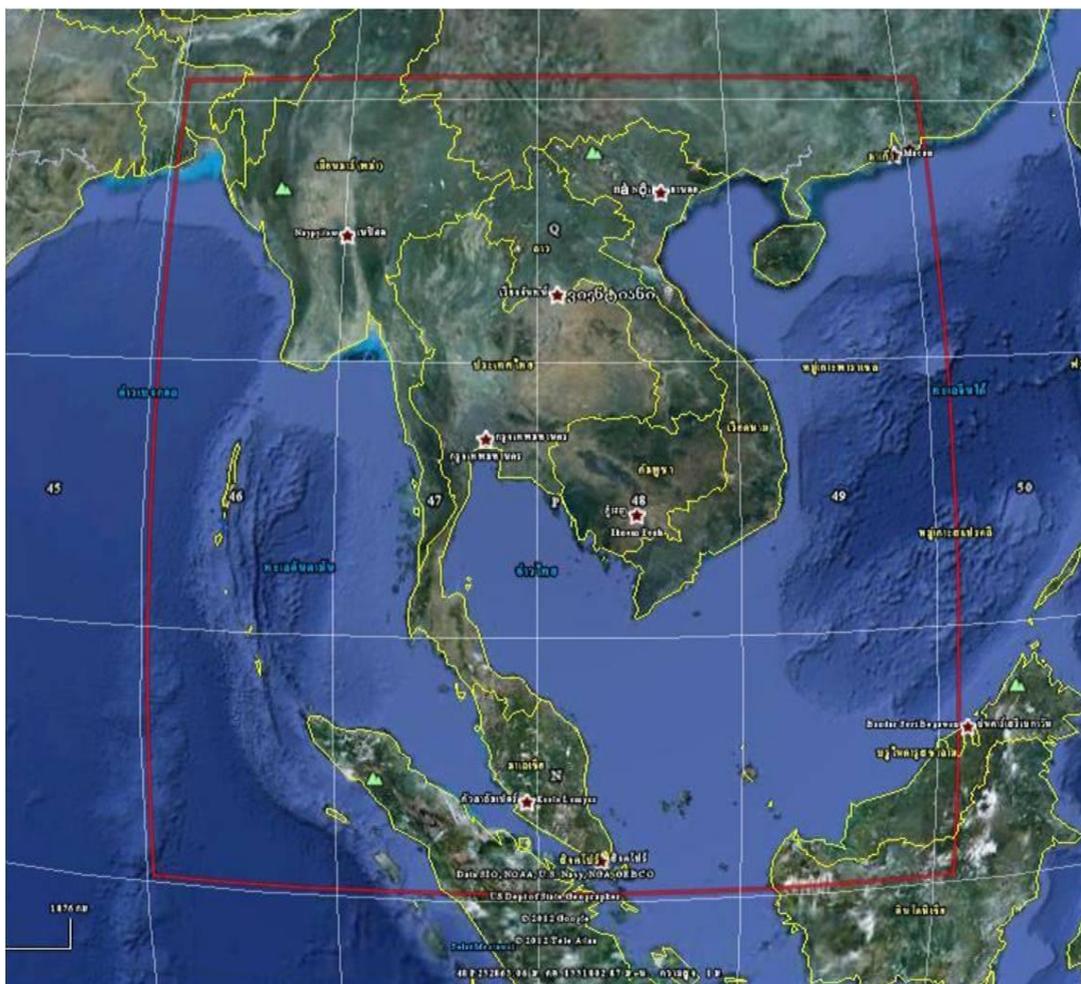
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 พื้นที่ศึกษา

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการประเมินศักยภาพของพลังงานคลื่นในทะเลบริเวณพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่เส้นศูนย์สูตรถึงเส้นแวงที่ 25 องศาเหนือและเส้นรุ้งที่ 90 องศาตะวันออกถึง 115 องศาตะวันออก (ภาพที่ 3.1) ในรูปแบบจุดพิกัดแบบหยาบ (0.5×0.5 องศาละติจูด) และพื้นที่ตั้งแต่เส้นแวงที่ 5 ถึง 15 องศาเหนือและเส้นรุ้งที่ 95 องศาตะวันออกถึง 105 องศาตะวันออก ในรูปแบบจุดพิกัดแบบละเอียด (0.25×0.25 องศาละติจูด) ข้อมูลความลึกได้มาจาก US National Geophysical Data Center (NGDC) ซึ่งให้ข้อมูลระดับของภูมิประเทศทุกๆ 5 ลิปดา (10×10 กิโลเมตร) ความลึกนี้ถูกปรับให้สอดคล้องกับระบบกริดในแบบจำลองคือที่ทุกๆ 0.25 องศาหรือประมาณ 25×25 กิโลเมตร ในการทดสอบนี้ข้อมูลลมที่ทุกๆ 1 องศา ราย 6 ชั่วโมง ที่ความสูง 10 เมตร ซึ่งได้มาจาก US Navy Operation Global Atmospheric Prediction System (NOGAPS) จะถูกป้อนให้แก่แบบจำลองและถูกปรับให้สอดคล้องกับพิกัดกริดที่กำหนดไว้ในแบบจำลองการพยากรณ์คลื่นลม

ที่ตั้งและอาณาเขตติดต่อ

ทะเลอ่าวไทยเป็นอ่าวที่อยู่ทะเลจีนใต้ (มหาสมุทรแปซิฟิก) ล้อมรอบด้วยประเทศไทย มาเลเซีย กัมพูชา และเวียดนาม จุดเหนือสุดของอ่าวไทยตรงปากแม่น้ำเจ้าพระยา โดยอ่าวไทยมีพื้นที่ $300,858.76$ ตารางกิโลเมตร เขตแดนของอ่าวไทยกำหนดด้วยเส้นที่ลากจากแหลมกาเมา (แหลมญวน) ทางตอนใต้ของเวียดนามไปยังเมืองโกตาบารูในชายฝั่งมาเลเซีย ซึ่งอยู่ห่างกัน 381 กิโลเมตร ชายฝั่งทะเลอ่าวไทยทอดยาว $1,840$ กิโลเมตร มีความลึกเฉลี่ย 45 เมตร จุดที่ลึกที่สุดลึกเพียง 80 เมตร จึงทำให้การแลกเปลี่ยนระหว่างน้ำจืดกับน้ำเค็มเป็นไปอย่างเชื่องช้า น้ำจืดจำนวนมากที่ไหลมาจากแม่น้ำต่างๆ ทำให้น้ำทะเลในอ่าวไทยมีระดับความเค็มต่ำ (ร้อยละ $3.05-3.25$) และมีตะกอนสูง บริเวณที่ลึกกว่า 50 เมตร มีความเค็มสูงกว่านี้ (ร้อยละ 3.4) ซึ่งเกิดจากน้ำทะเลที่ไหลเข้ามาจากทะเลจีนใต้ แม่น้ำสายหลักที่น้ำในแม่น้ำไหลลงสู่อ่าวไทย คือ แม่น้ำเจ้าพระยา (รวมแม่น้ำท่าจีน ที่แยกสาขาออกมา) แม่น้ำแม่กลองที่ไหลลงสู่อ่าวแม่กลอง จังหวัดสมุทรสงครามและแม่น้ำตาปีที่ไหลลงสู่อ่าวบ้านดอน จังหวัดสุราษฎร์ธานี

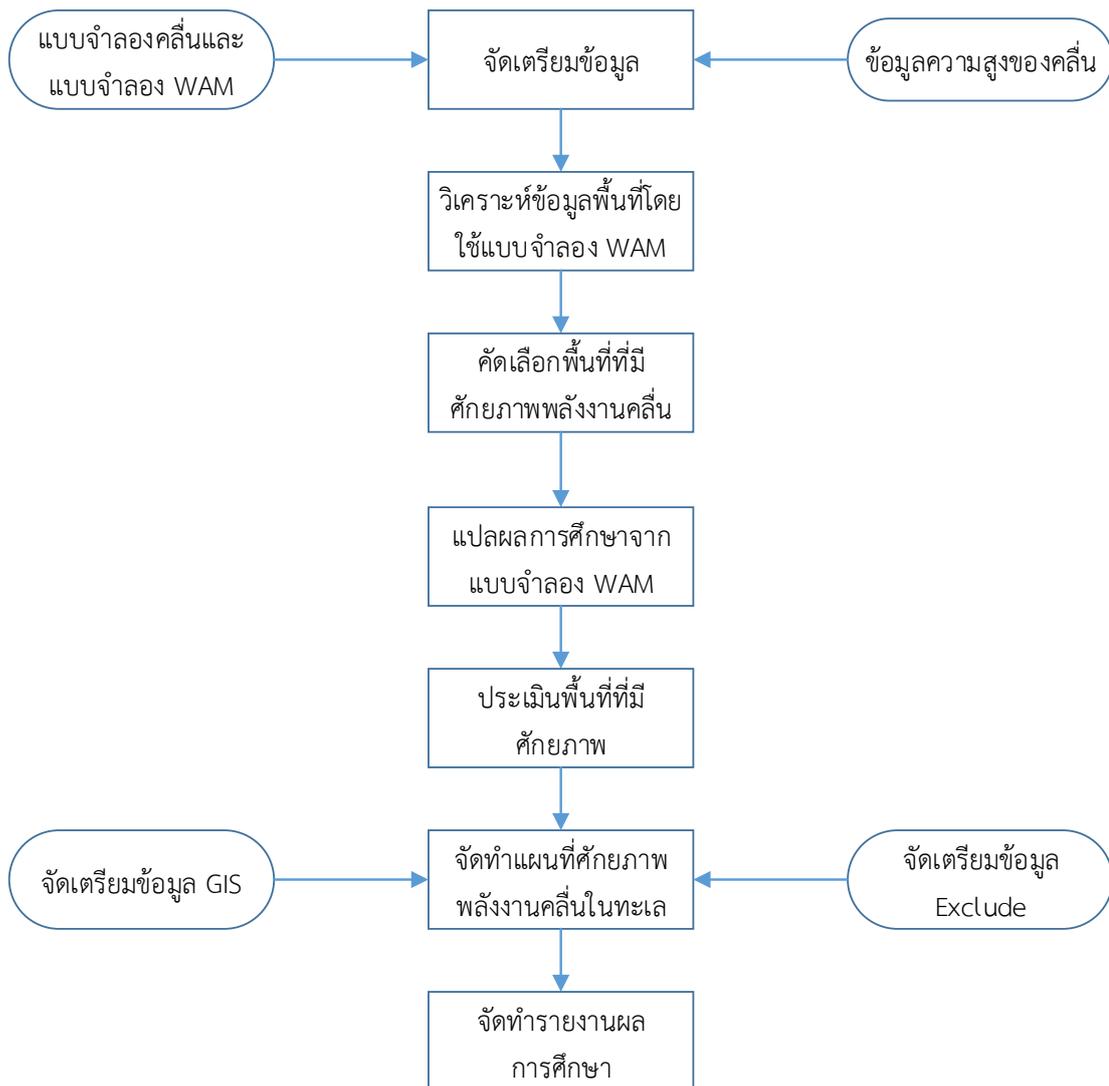


ภาพที่ 3.1 แผนที่พื้นที่ศึกษาของโครงการ

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 3.2.1 จัดเตรียมแบบจำลองคลื่นทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
- 3.2.2 จัดเตรียมแบบจำลอง WAM
- 3.2.3 จัดเตรียมฐานข้อมูลอินพุตระดับความสูงของคลื่นจากฐานข้อมูลทุ่นลอยและอื่นๆ
- 3.2.4 วิเคราะห์เชิงรายละเอียดของพื้นที่ที่คาดว่ามีความเสี่ยงสูงโดยใช้แบบจำลอง WAM ร่วมกับข้อมูลการสำรวจภายในประเทศไทย โดยเลือกพื้นที่ที่ทะเลทั้งอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
- 3.2.5 คัดเลือกพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงของพลังงานคลื่นในทะเลสูง
- 3.2.6 วิเคราะห์และแปลผลจากแบบจำลอง WAM
- 3.2.7 ประเมินพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงและมีความเหมาะสมโดยใช้การตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision Making)
- 3.2.8 จัดเรียงลำดับความสำคัญของพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงของพลังงานคลื่นในทะเลสูงและสามารถใช้ประโยชน์พื้นที่ได้

- 3.2.9 จัดเตรียมข้อมูล GIS ที่เกี่ยวข้องกับทะเลในพื้นที่ศึกษา
- 3.2.10 Exclude พื้นที่ที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้
- 3.2.11 จัดทำแผนที่ศักยภาพของพลังงานคลื่นในทะเล
- 3.2.12 จัดทำแผนที่ศักยภาพเชิงเทคนิคของพลังงานคลื่นในทะเล
- 3.2.13 จัดทำแผนที่ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
- 3.2.14 จัดทำรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4

ผลการศึกษาวิจัย

4.1 ผลการศึกษาวิจัย

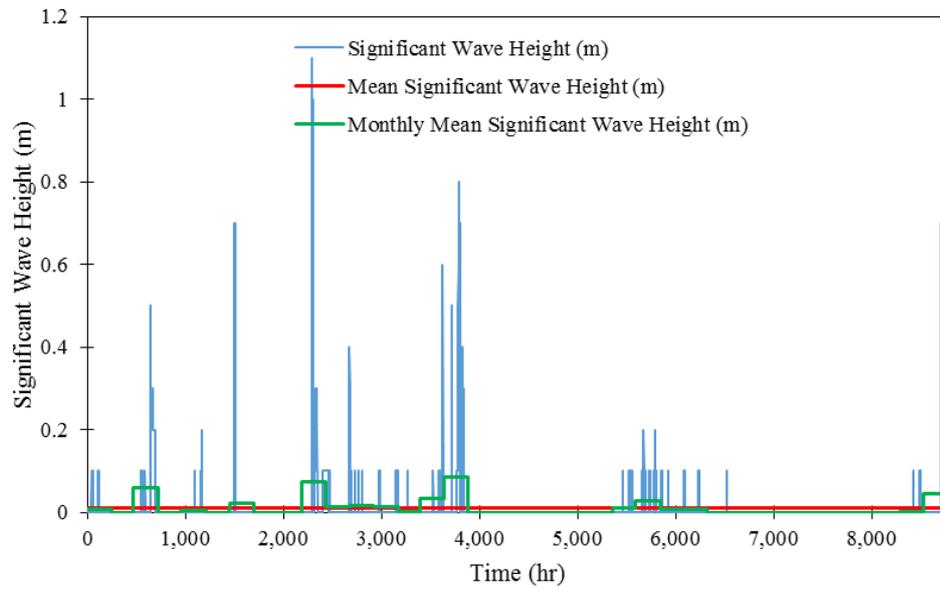
ผลการศึกษาวิจัยของโครงการนี้อาศัยการจำลองความสูงของคลื่นซึ่งเป็นขนาด (Magnitude) ของคลื่นในทะเลอ่าวไทยโดยใช้แบบจำลองการพยากรณ์คลื่นลมเชิงตัวเลขคือแบบจำลอง WAM ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีการใช้ในการศึกษากลิ่นลมในทะเล โดยที่ผ่านมาข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง WAM นั้น จะใช้เพื่อสนับสนุนกิจกรรมการเดินเรือเป็นหลัก อย่างไรก็ตามแบบจำลอง WAM สามารถให้ผลได้ทั้งการคำนวณคลื่นย้อนกลับและการพยากรณ์คลื่นล่วงหน้า และหากข้อมูลเหล่านั้นถูกนำไปปรับปรุงให้อยู่ในรูปแบบที่ต้องการก็จะมีประโยชน์เพิ่มมากขึ้นในการสนับสนุนงานด้านอื่นๆ ได้ ปัจจุบันศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล กรมอุตุนิยมวิทยา และกองอุตุนิยมวิทยากรมอุทกศาสตร์กองทัพเรือยังคงใช้งานแบบจำลอง WAM สำหรับการดำเนินกิจกรรมต่างๆ ทางทะเล

โดยผลการศึกษาแสดงอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ 3 พารามิเตอร์ด้วยกัน ได้แก่ ความสูงของคลื่นนัยสำคัญ (Significant Height) มีหน่วยเป็นเมตร พลังงานคลื่น (Wave Energy) มีหน่วยเป็นจูลต่อตารางเมตร และกำลังคลื่น (Wave Power) มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อเมตร ของทั้ง 7 สถานี ได้แก่ สถานีเพชรบุรี สถานีประจวบคีรีขันธ์ สถานีชุมพร สถานีสุราษฎร์ธานี สถานีนครศรีธรรมราช สถานีสงขลาและสถานีนราธิวาส

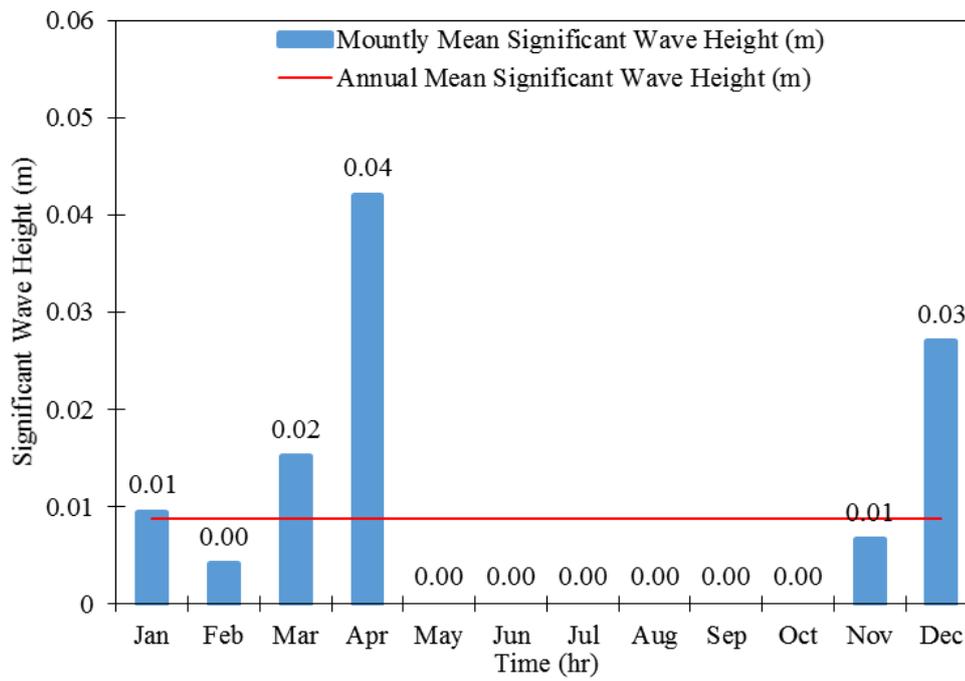
โดยผลการจำลองความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีเพชรบุรี ปี พ.ศ. 2554-2555 แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของข้อมูลอนุกรมเวลา (Time Series) รายชั่วโมง จะเห็นได้ว่าความสูงนัยสำคัญของคลื่นบริเวณจังหวัดเพชรบุรีมีค่าสูงสุดไม่เกิน 1.2 เมตร เมื่อพิจารณาความสูงนัยสำคัญของคลื่นเฉลี่ยรายเดือนและเฉลี่ยรายปี พ.ศ. 2554 และ พ.ศ. 2555 ดังรูปที่ 4.2-4.3 ตามลำดับ จะพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองมีข้อมูลในช่วงเดือนมกราคม-เมษายน และพฤศจิกายนถึงเดือนธันวาคม

โดยมีค่ากำลังของคลื่นไม่เกิน 1,000 วัตต์ต่อเมตร แสดงดังรูปที่ 4.4 และเมื่อพิจารณากำลังคลื่นปี พ.ศ. 2554 และปี พ.ศ. 2555 บริเวณจังหวัดเพชรบุรี พบว่ากำลังคลื่นเฉลี่ยรายเดือน ปี พ.ศ. 2554 มีค่าอยู่ในช่วง 0.76-46.21 วัตต์ต่อเมตร และมีค่าเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 6.03 วัตต์ต่อเมตร และสำหรับปี พ.ศ. 2555 มีค่าอยู่ในช่วง 0.05-20.94 วัตต์ต่อเมตร และมีค่าเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 6.4 วัตต์ต่อเมตร แสดงดังรูปที่ 4.5-4.6 ตามลำดับ

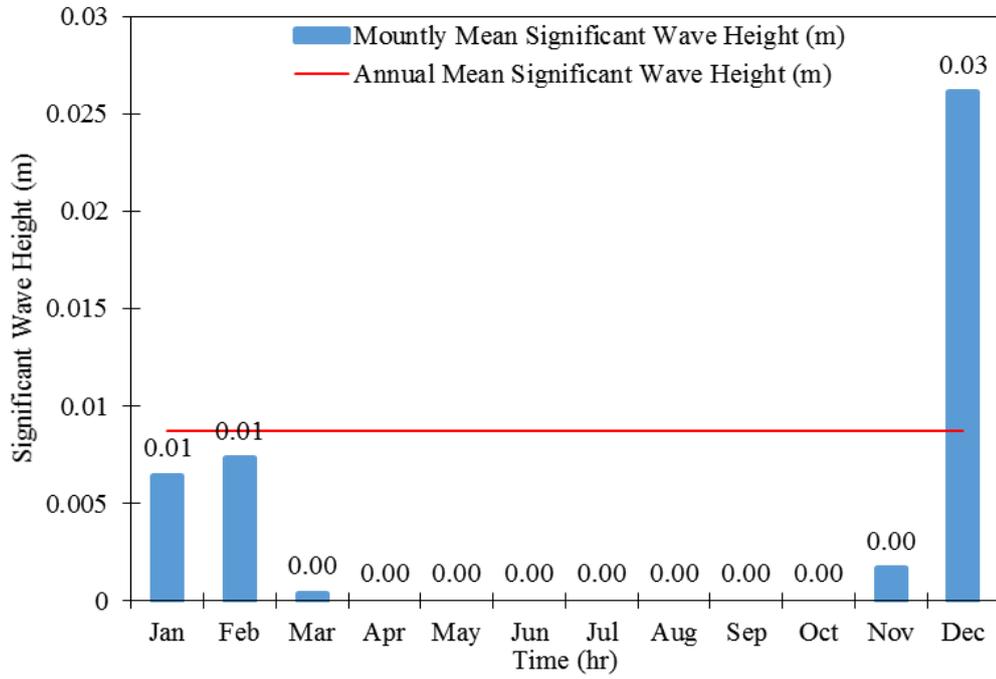
สำหรับพลังงานของคลื่นบริเวณจังหวัดเพชรบุรีมีค่าไม่เกิน 1,000 จูลต่อตารางเมตร แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยค่าพลังงานคลื่นในทะเลบริเวณจังหวัดเพชรบุรี ปี พ.ศ. 2554 มีค่าอยู่ในช่วง 0.53-26.73 จูลต่อตารางเมตร และมีค่าเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 4.1 จูลต่อตารางเมตร และสำหรับปี พ.ศ. 2555 พลังงานคลื่นมีค่าอยู่ในช่วง 0.05-15.46 จูลต่อตารางเมตร และมีค่าเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 3.98 จูลต่อตารางเมตร แสดงดังรูปที่ 4.8-4.9 ตามลำดับ



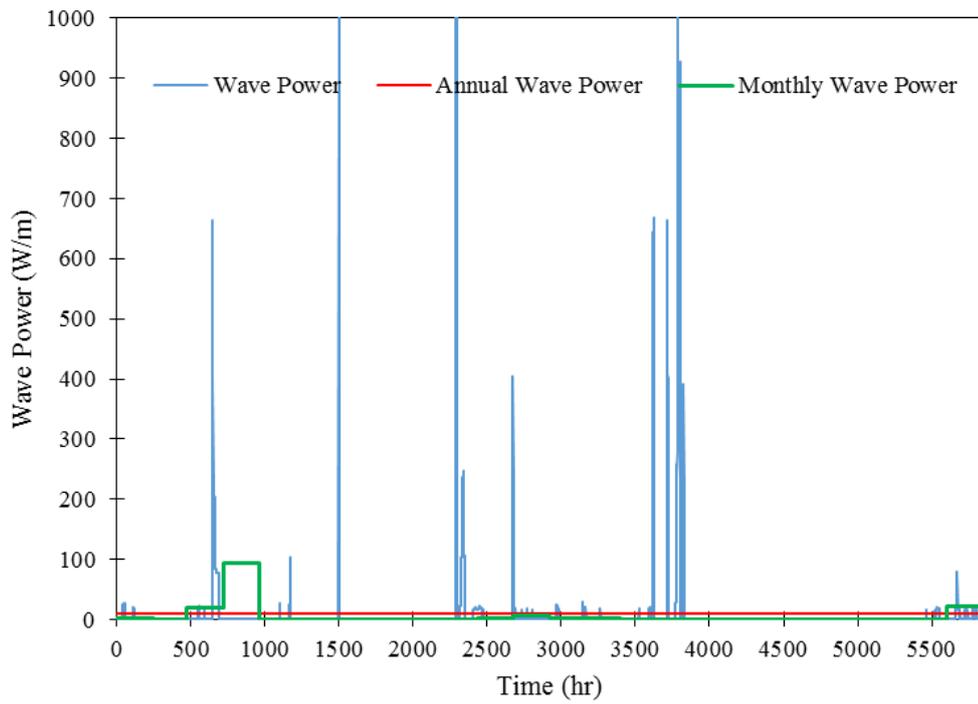
รูปที่ 4.1 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีเพชรบุรี พ.ศ. 2554-2555



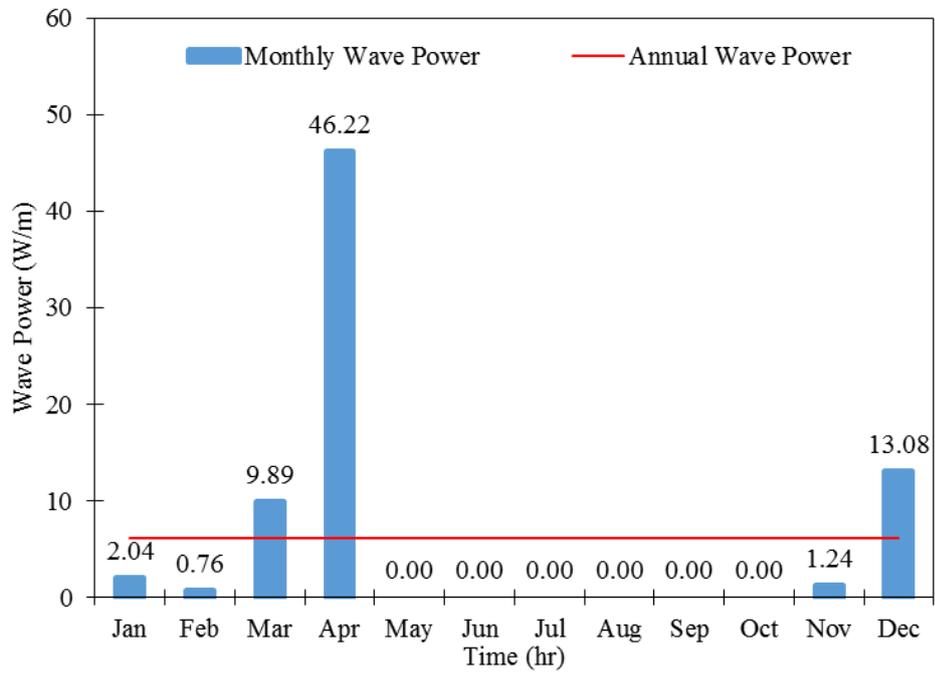
รูปที่ 4.2 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีเพชรบุรี พ.ศ. 2554



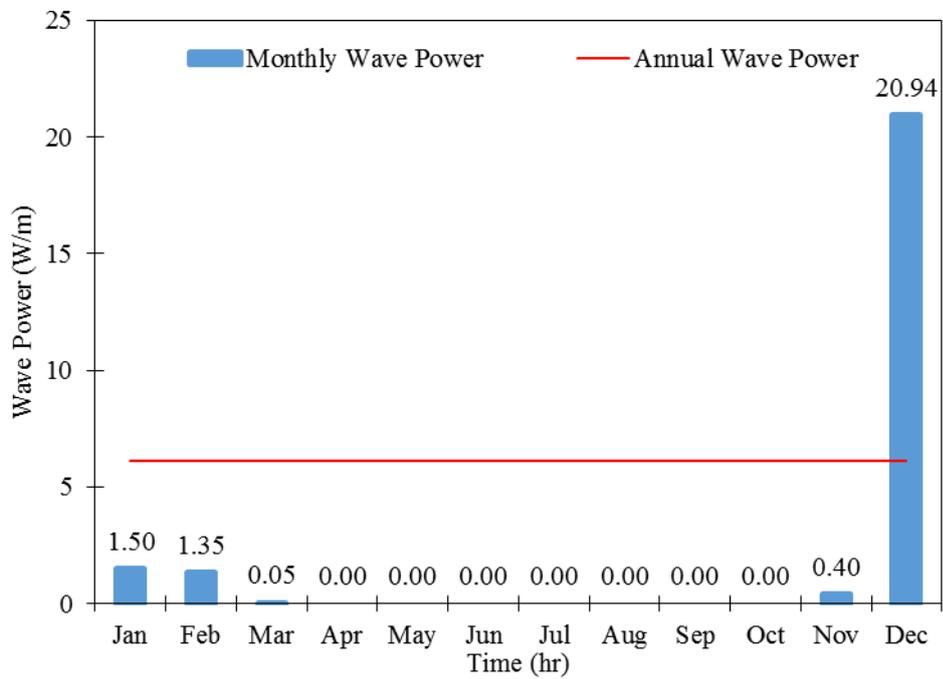
รูปที่ 4.3 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีเพชรบุรี พ.ศ. 2555



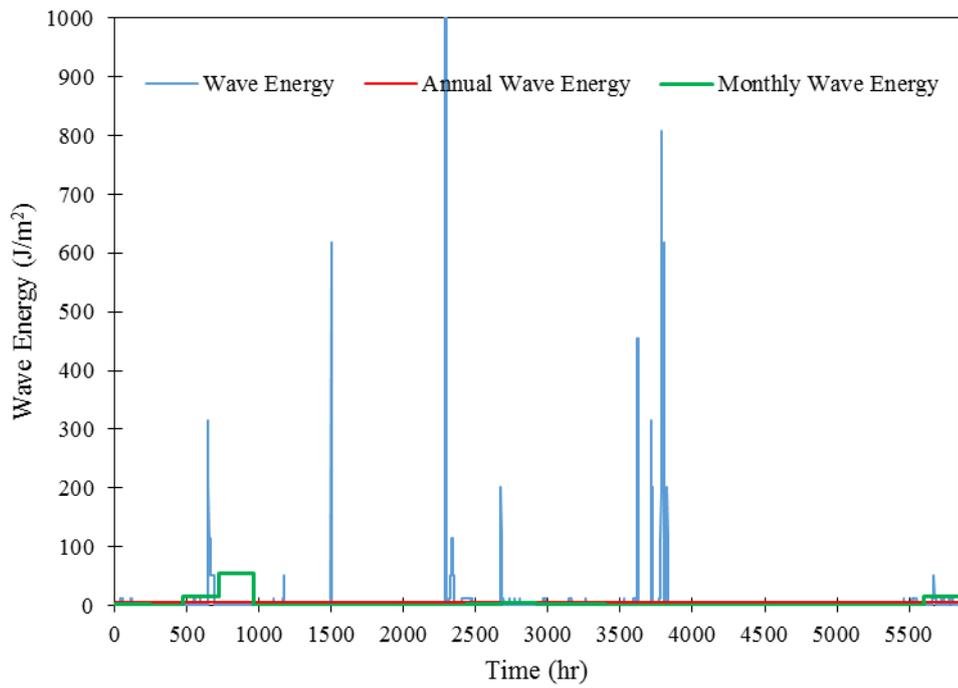
รูปที่ 4.4 กำลังคลื่น ณ สถานีเพชรบุรี พ.ศ. 2554-2555



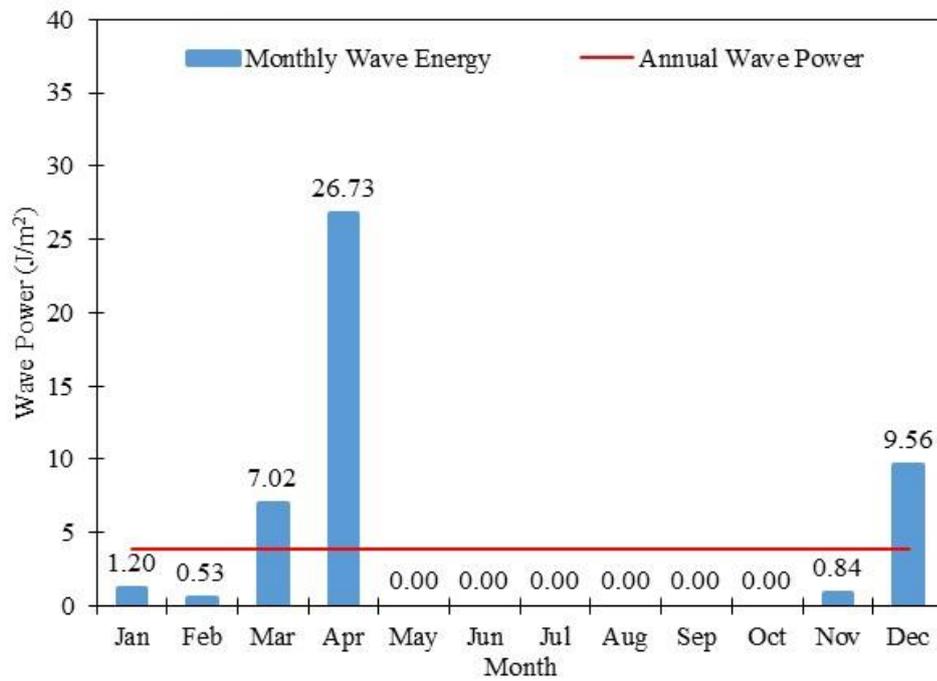
รูปที่ 4.5 กำลังคลื่น ณ สถานีเพชรบุรี พ.ศ. 2554



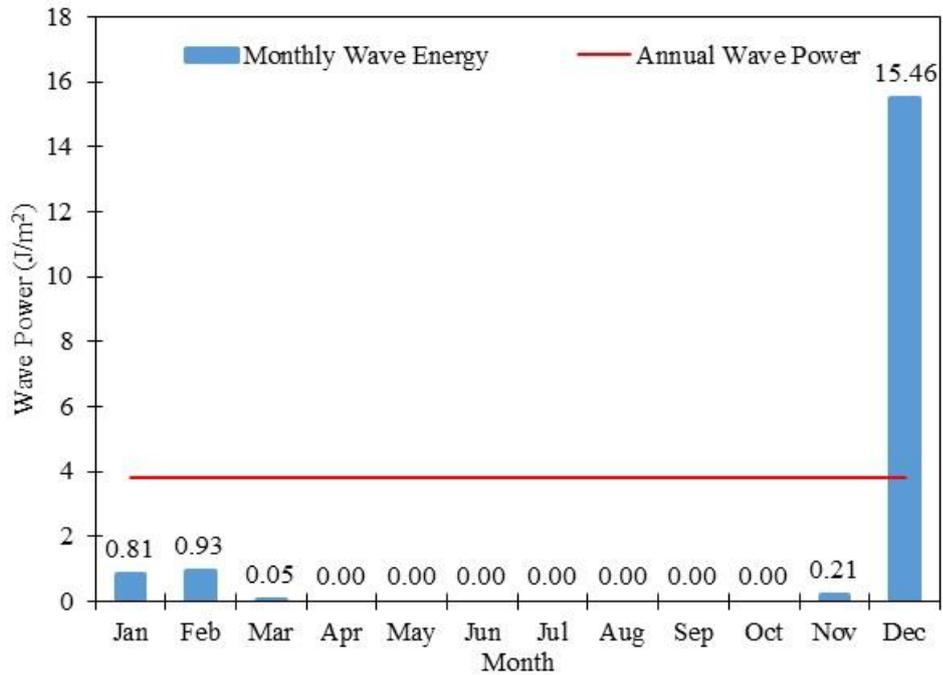
รูปที่ 4.6 กำลังคลื่น ณ สถานีเพชรบุรี พ.ศ. 2555



รูปที่ 4.7 พลังงานคลื่น ณ สถานีเพชรบุรี พ.ศ. 2554-2555



รูปที่ 4.8 พลังงานคลื่น ณ สถานีเพชรบุรี พ.ศ. 2554

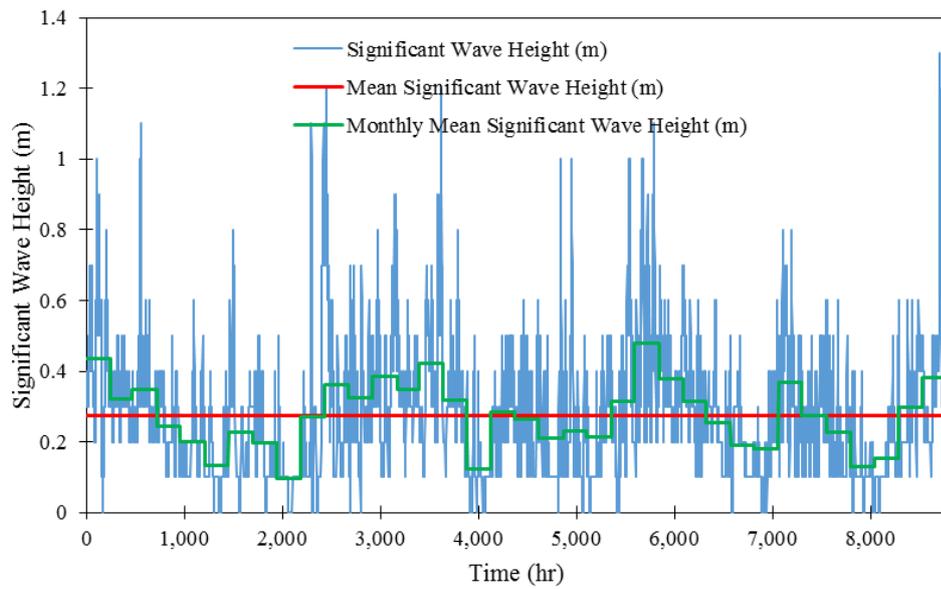


รูปที่ 4.9 พลังงานคลื่น ณ สถานีเพชรบุรี พ.ศ. 2555

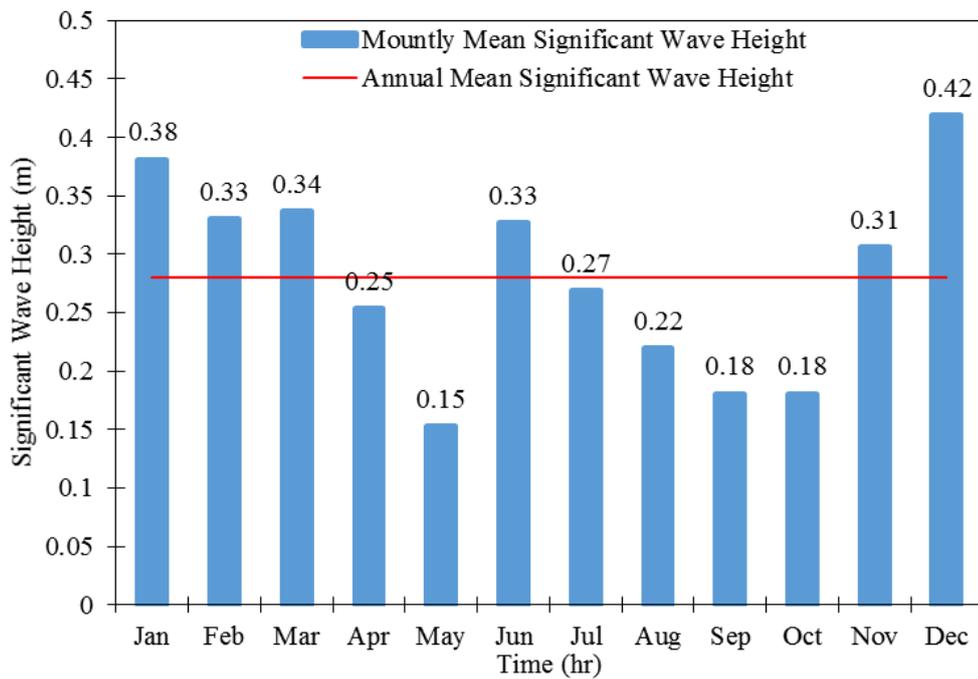
จากรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นข้อมูลอนุกรมเวลาจะเห็นว่าความสูงนัยสำคัญของคลื่นบริเวณจังหวัดประจวบคีรีขันธ์มีค่าสูงสุด 1.3 เมตร ในช่วงเดือนธันวาคม และมีค่าสูง 1.2 เมตร ในเดือนมีนาคม และ 1.2 เมตร ในช่วงเดือนพฤษภาคม โดยมีค่าความสูงนัยสำคัญเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 0.28 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.11 โดยรูปที่ 4.11-4.12 แสดงความสูงนัยสำคัญเฉลี่ยรายเดือนของสถานีประจวบคีรีขันธ์ เมื่อพิจารณาความสูงนัยสำคัญรายปี พ.ศ. 2554 และ พ.ศ. 2555 พบว่าพฤติกรรมของคลื่นในทะเลบริเวณจังหวัดประจวบคีรีขันธ์จะมีค่าความสูงนัยสำคัญสูงในช่วงปลายปีและต้นปี โดยมีระยะเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน และเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนธันวาคม ซึ่งในช่วงดังกล่าวเป็นช่วงที่ทะเลอ่าวไทยได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือนั่นเอง โดยพฤติกรรมของความสูงนัยสำคัญทั้ง 2 ปี มีลักษณะเหมือนกัน อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าในช่วงเดือนมิถุนายนจะเป็นอีกช่วงเดือนหนึ่งที่คลื่นในทะเลมีค่าความสูงนัยสำคัญเด่นขึ้นมาอีกด้วย

สำหรับกำลังคลื่นบริเวณจังหวัดประจวบคีรีขันธ์มีค่าเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 230 วัตต์ต่อเมตร แสดงดังรูปที่ 4.13-4.14 และมีค่าพลังงานคลื่นเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 140 จูลต่อตารางเมตร นอกจากนี้เมื่อพิจารณากำลังคลื่นปี พ.ศ. 2554 และปี พ.ศ. 2555 บริเวณจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ พบว่ากำลังคลื่นเฉลี่ยรายเดือนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 230 วัตต์ต่อเมตร และ 225 วัตต์ต่อเมตร ตามลำดับ

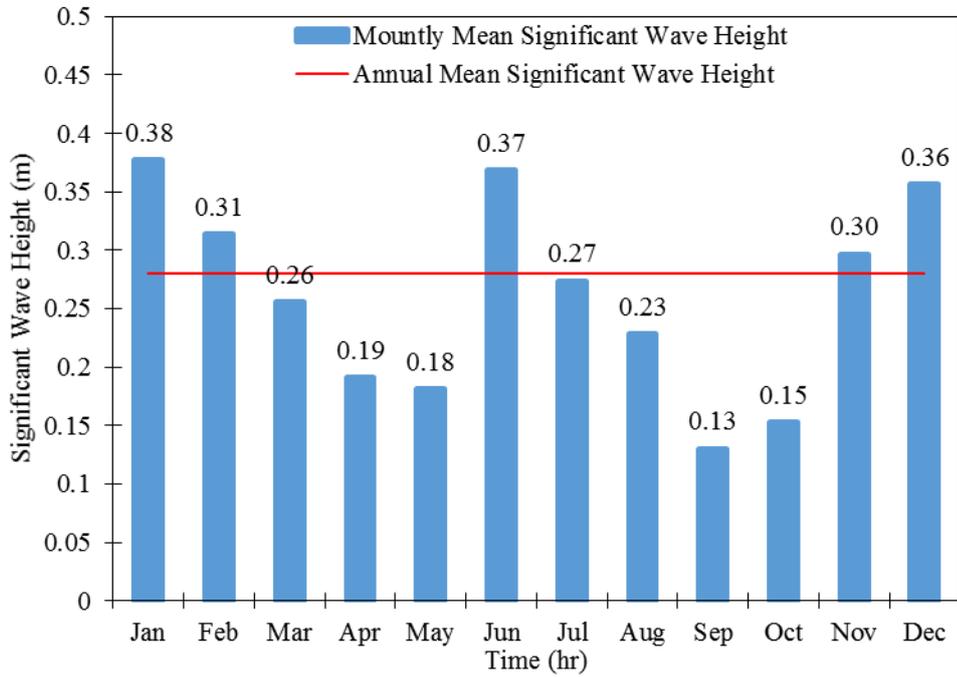
โดยค่าพลังงานคลื่นในทะเลบริเวณจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ปี พ.ศ. 2554 มีค่าเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 145 จูลต่อตารางเมตร แสดงดังรูปที่ 4.15-4.16 ตามลำดับ



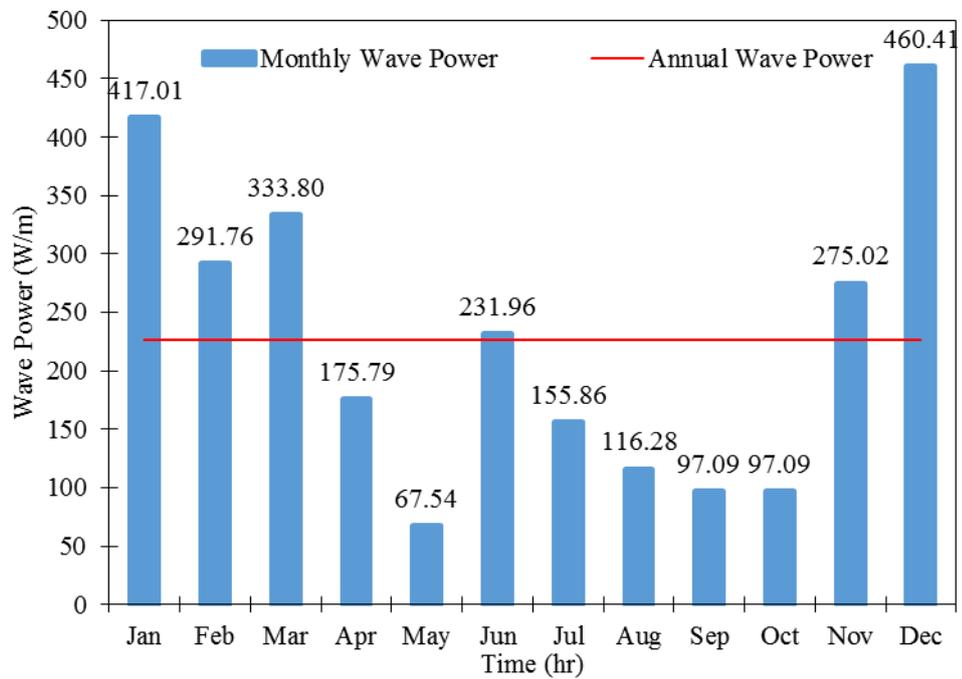
รูปที่ 4.10 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีประจวบคีรีขันธ์ พ.ศ. 2554-2555



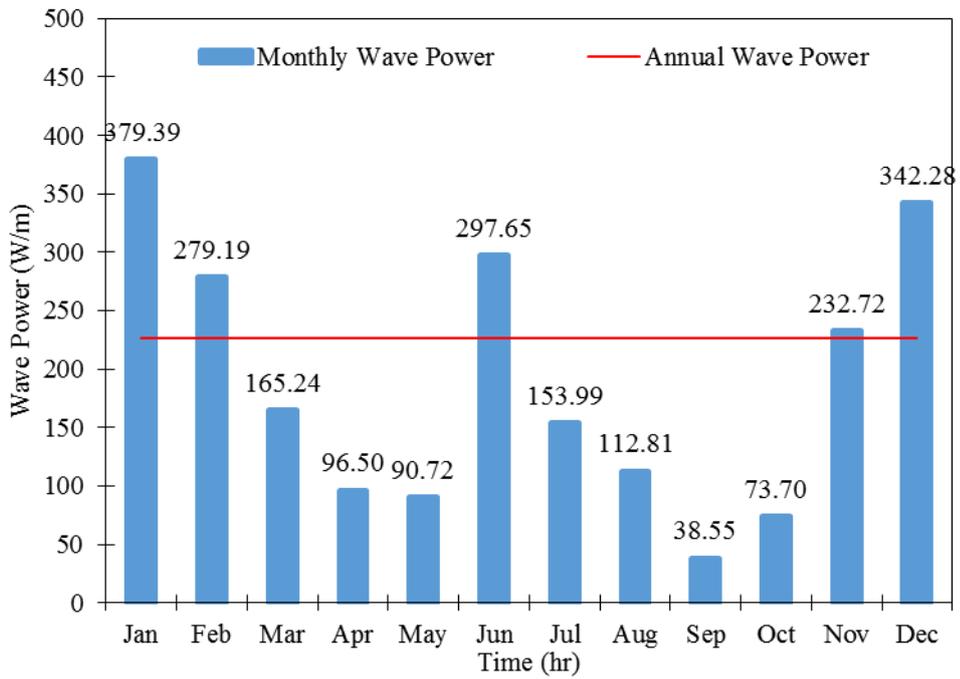
รูปที่ 4.11 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีประจวบคีรีขันธ์ พ.ศ. 2554



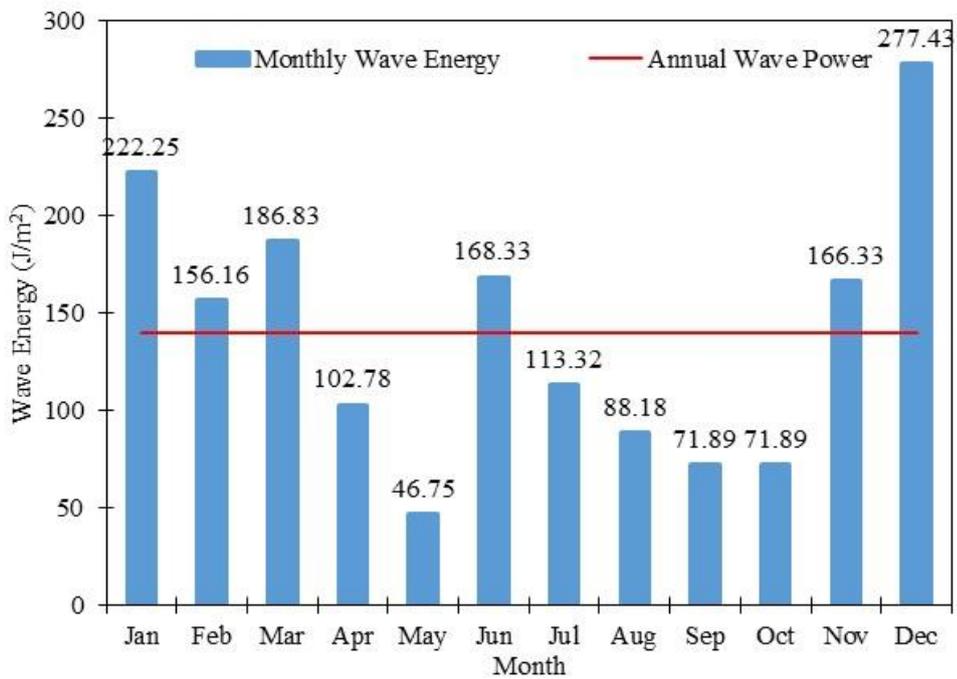
รูปที่ 4.12 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีประจวบคีรีขันธ์ พ.ศ. 2555



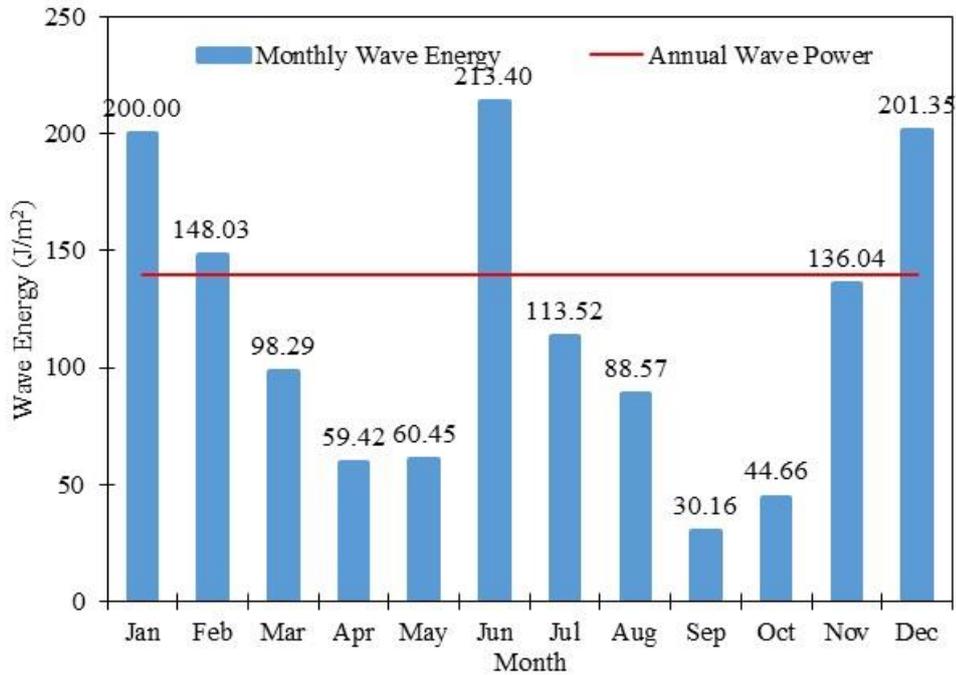
รูปที่ 4.13 กำลังคลื่น ณ สถานีประจวบคีรีขันธ์ พ.ศ. 2554



รูปที่ 4.14 กำลังคลื่น ณ สถานีประจวบคีรีขันธ์ พ.ศ. 2555



รูปที่ 4.15 พลังงานคลื่น ณ สถานีประจวบคีรีขันธ์ พ.ศ. 2554



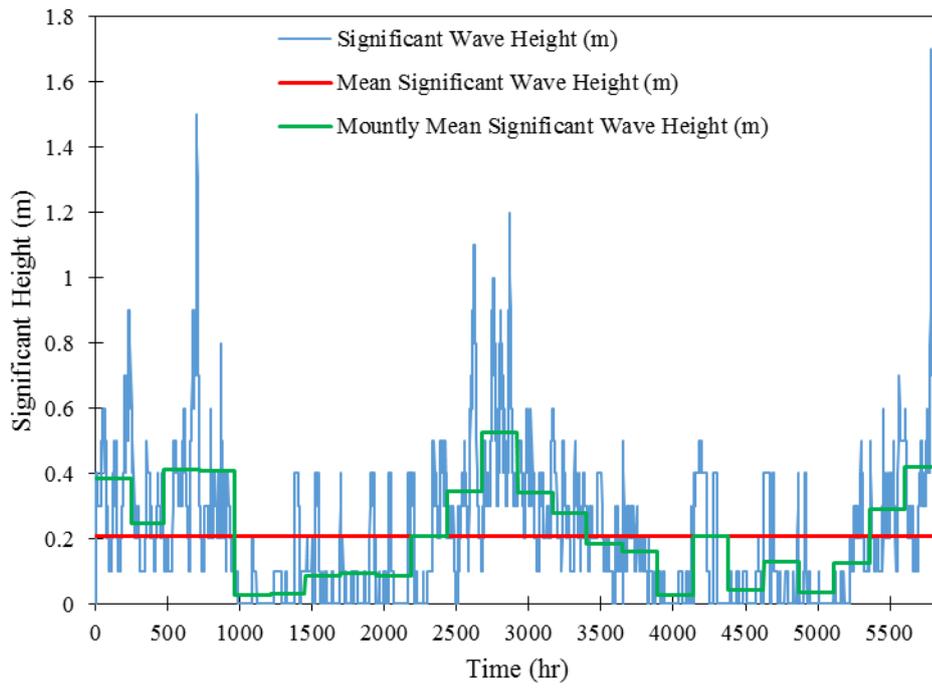
รูปที่ 4.16 พลังงานคลื่น ณ สถานีประจวบคีรีขันธ์ พ.ศ. 2555

ผลการจำลองความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีชุมพร ปี พ.ศ. 2554-2555 แสดงดังรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าความสูงนัยสำคัญของคลื่นบริเวณจังหวัดชุมพรมีค่าสูงสุด 1.7 เมตร ในช่วงเดือนธันวาคม และมีค่าสูง 1.5 เมตร ในเดือนมกราคม และ 1.2 เมตร ในช่วงเดือนมิถุนายน โดยมีค่าความสูงนัยสำคัญเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 0.2 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.18-4.19 เมื่อพิจารณาความสูงนัยสำคัญรายปี พ.ศ. 2554 และ พ.ศ. 2555 พบว่าพฤติกรรมของคลื่นในทะเลบริเวณจังหวัดชุมพรจะมีค่าความสูงนัยสำคัญสูงในช่วงปลายปีและต้นปี โดยมีระยะเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน และเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนธันวาคม ซึ่งในช่วงดังกล่าวเป็นช่วงที่ทะเลอ่าวไทยได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือนั่นเอง โดยพฤติกรรมของความสูงนัยสำคัญทั้ง 2 ปี มีลักษณะเหมือนกัน

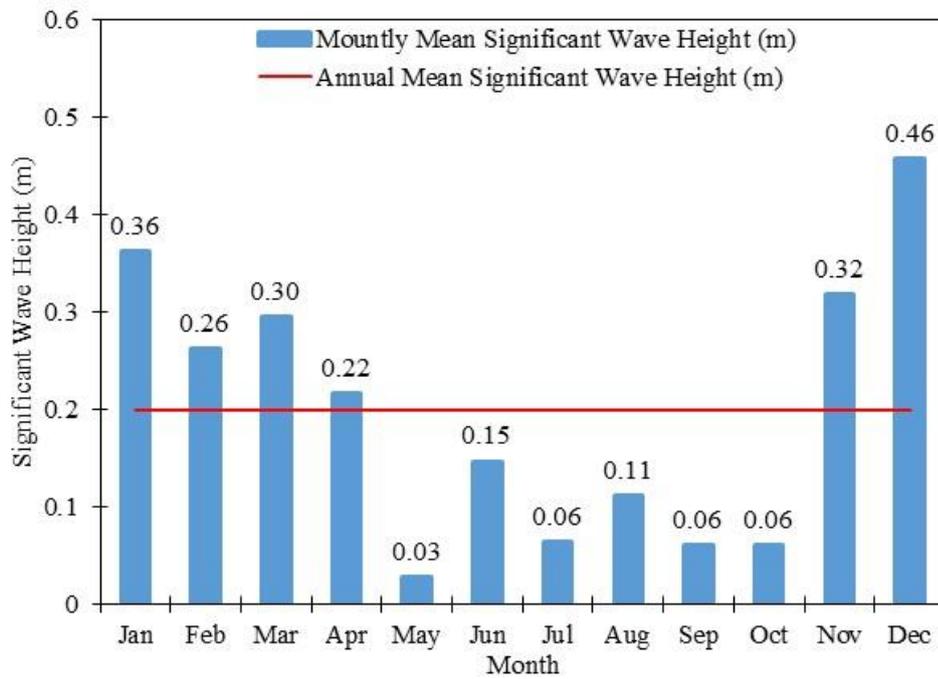
สำหรับกำลังคลื่นบริเวณจังหวัดชุมพรมีค่าเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 200 วัตต์ต่อเมตร แสดงดังรูปที่ 4.20 และมีค่ากำลังคลื่นเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 180 วัตต์ต่อเมตร ในปี พ.ศ. 2554 และมีค่ากำลังคลื่นเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 175 วัตต์ต่อเมตร ในปี พ.ศ. 2555 แสดงดังรูปที่ 4.21-4.22 ตามลำดับ

นอกจากนี้เมื่อพิจารณากำลังคลื่นปี พ.ศ. 2554 และปี พ.ศ. 2555 บริเวณจังหวัดชุมพร พบว่ากำลังคลื่นเฉลี่ยรายเดือน ปี พ.ศ. 2554 มีค่าอยู่ในช่วง 6.78-591.86 วัตต์ต่อเมตร และสำหรับปี พ.ศ. 2555 มีค่าอยู่ในช่วง 5.51-410.55 วัตต์ต่อเมตร

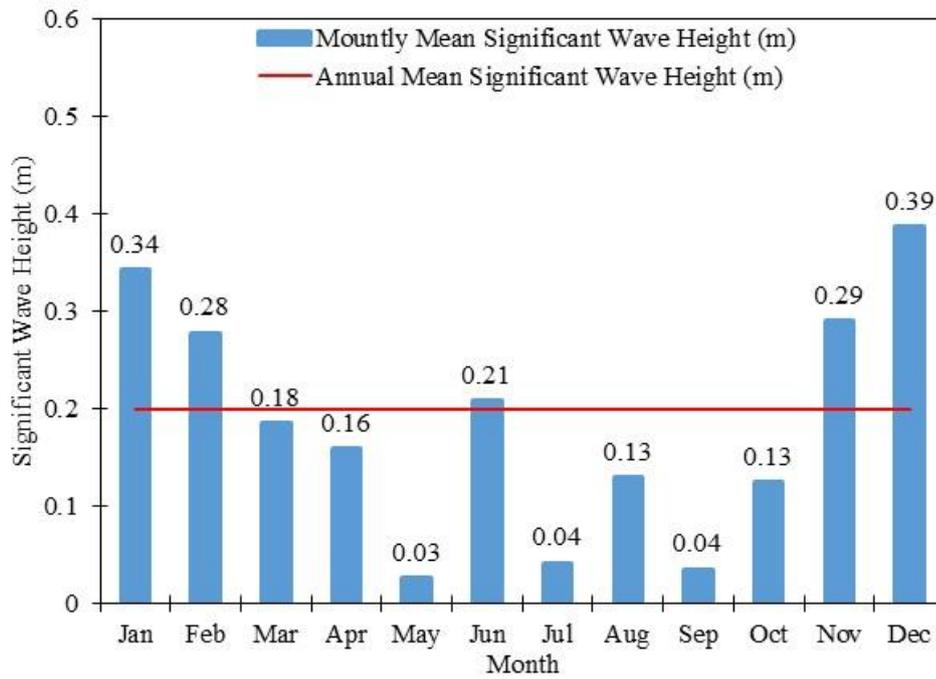
โดยค่าพลังงานคลื่นในทะเลบริเวณจังหวัดชุมพร ปี พ.ศ. 2554 มีค่าอยู่ในช่วง 4.79-329.58 จูลต่อตารางเมตร และมีค่าเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 105 จูลต่อตารางเมตร และสำหรับปี พ.ศ. 2555 พลังงานคลื่นมีค่าอยู่ในช่วง 3.87-242.02 จูลต่อตารางเมตร และมีค่าเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับจูลต่อตารางเมตร 105 จูลต่อตารางเมตร แสดงดังรูปที่ 4.23-4.25 ตามลำดับ



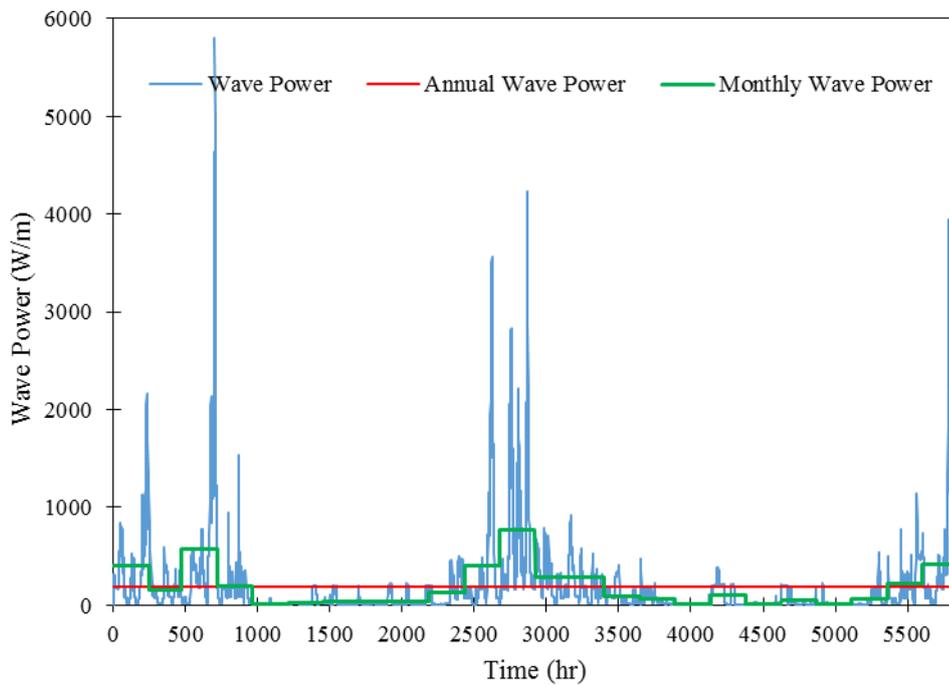
รูปที่ 4.17 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีชุมพร พ.ศ. 2554-2555



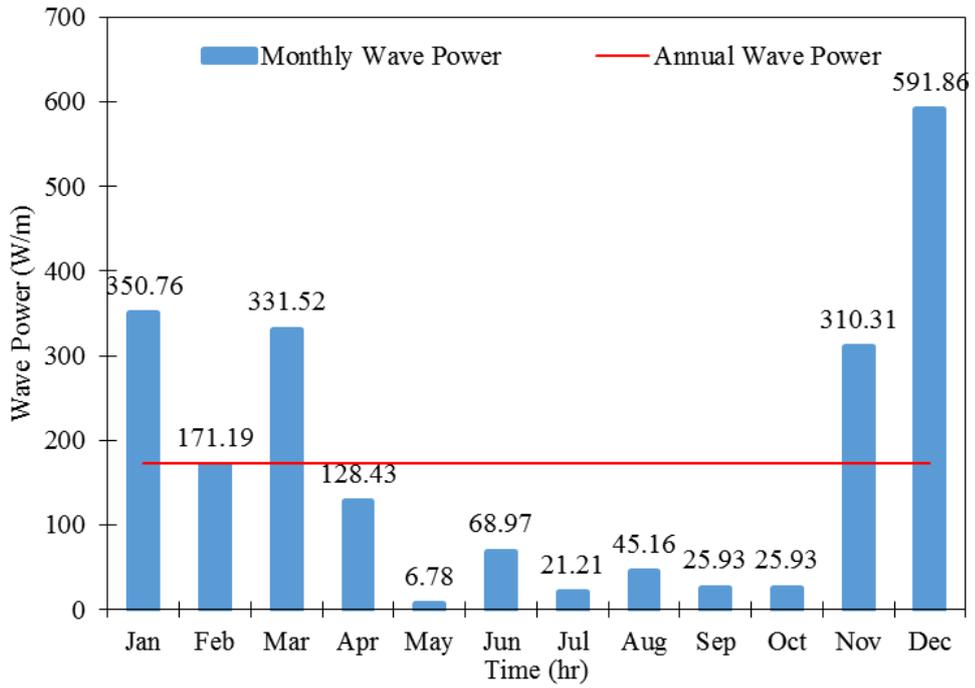
รูปที่ 4.18 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีชุมพร พ.ศ. 2554



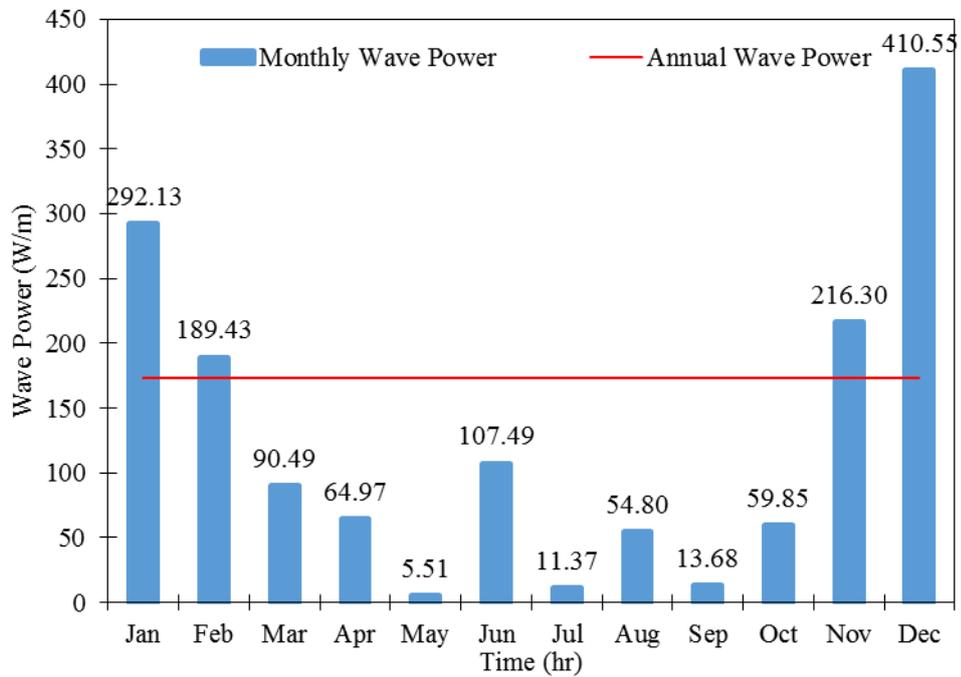
รูปที่ 4.19 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีชุมพร พ.ศ. 2555



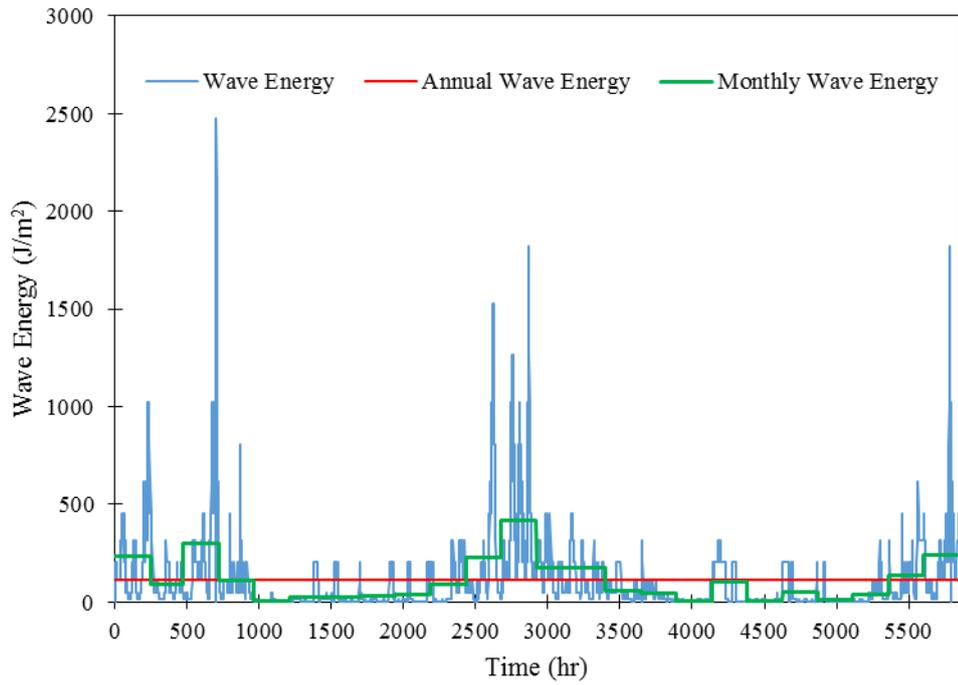
รูปที่ 4.20 กำลังคลื่น ณ สถานีชุมพร พ.ศ. 2554-2555



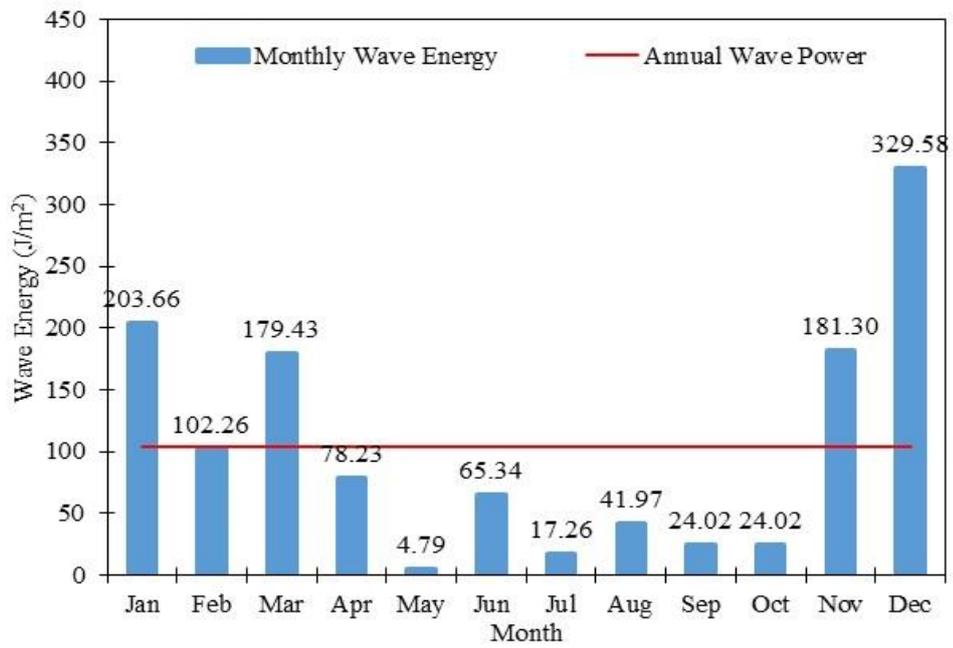
รูปที่ 4.21 กำลังคลื่น ณ สถานีชุมพร พ.ศ. 2554



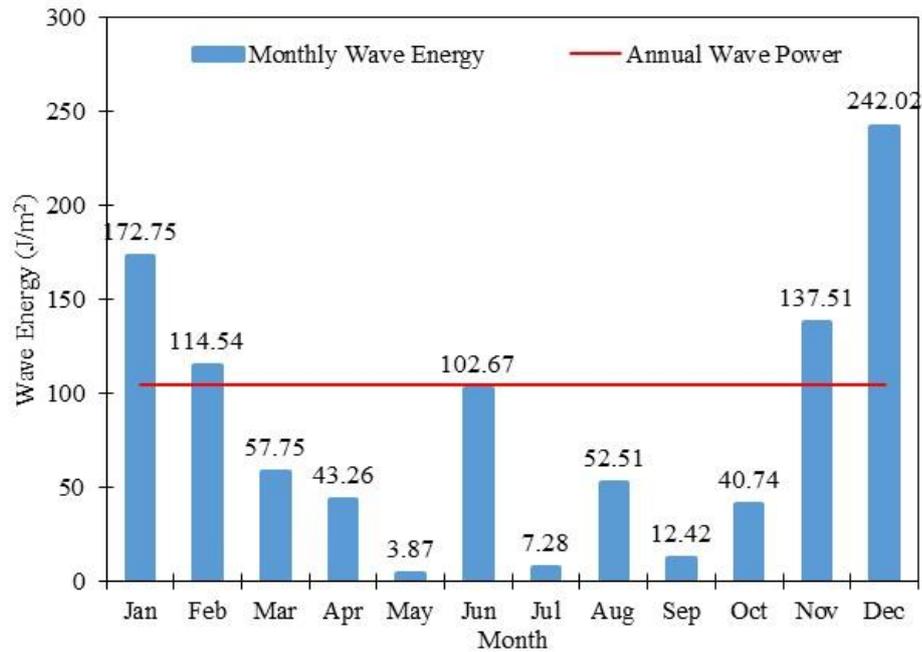
รูปที่ 4.22 กำลังคลื่น ณ สถานีชุมพร พ.ศ. 2555



รูปที่ 4.23 พลังงานคลื่น ณ สถานีชุมพร พ.ศ. 2554-2555



รูปที่ 4.24 พลังงานคลื่น ณ สถานีชุมพร พ.ศ. 2554

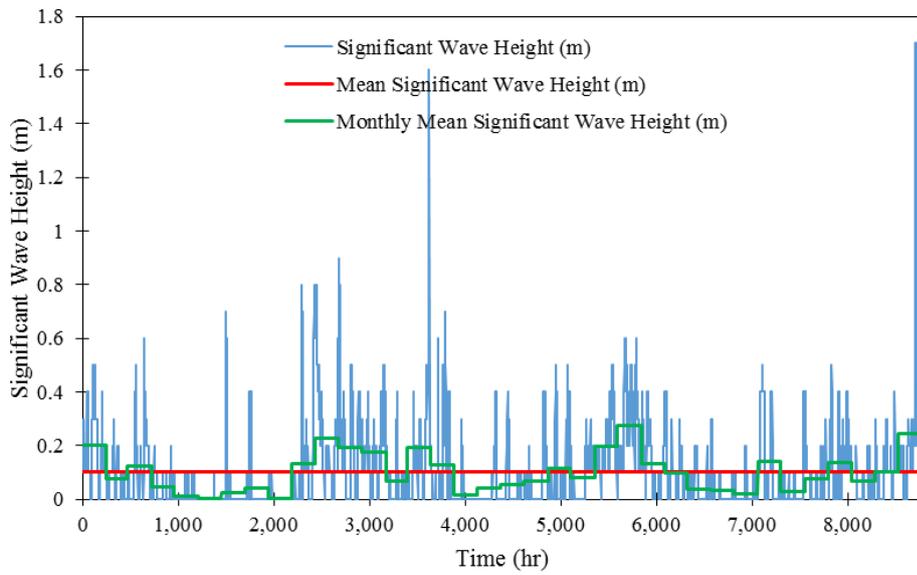


รูปที่ 4.25 พลังงานคลื่น ณ สถานีชุมพร พ.ศ. 2555

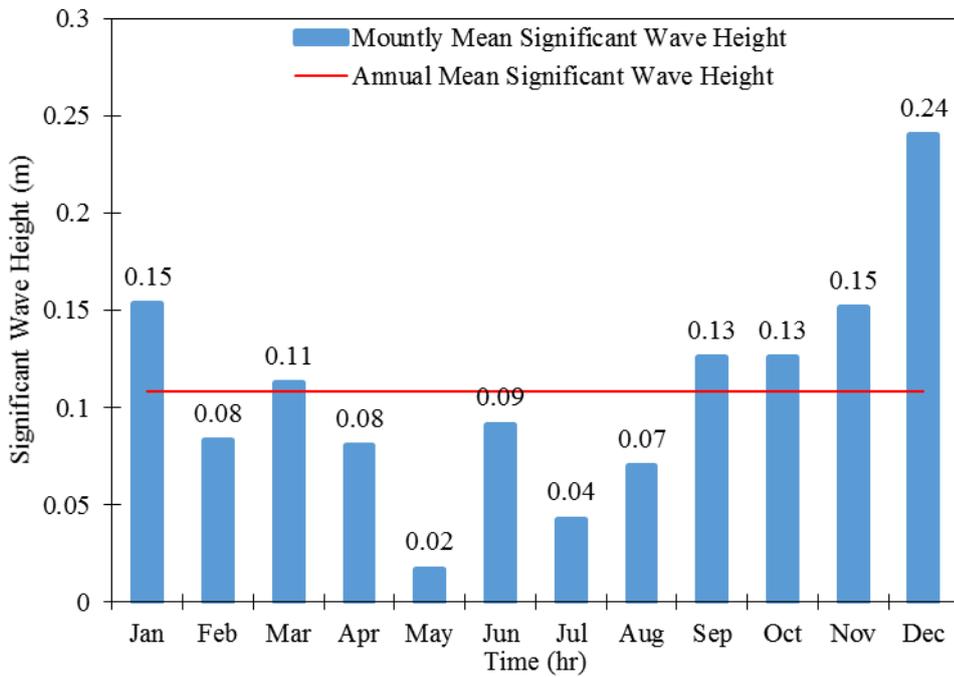
จากรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าความสูงนัยสำคัญของคลื่นบริเวณจังหวัดสุราษฎร์ธานีมีค่าสูงสุด 1.7 เมตร ในช่วงเดือนธันวาคม และมีค่าสูง 1.6 เมตร ในช่วงเดือนมิถุนายน โดยมีค่าความสูงนัยสำคัญเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 0.11 เมตร เมื่อพิจารณาความสูงนัยสำคัญรายปี พ.ศ. 2554 และ พ.ศ. 2555 ดังรูปที่ 4.27-4.28 ตามลำดับ พบว่าพฤติกรรมของคลื่นในทะเลบริเวณจังหวัดสุราษฎร์ธานีจะมีค่าความสูงนัยสำคัญสูงในช่วงปลายปี กลางปีและต้นปี ในเดือนมกราคม กุมภาพันธ์ เดือนมิถุนายน เดือนกันยายนและเดือนธันวาคม โดยพฤติกรรมของความสูงนัยสำคัญทั้ง 2 ปี มีลักษณะไม่เหมือนกัน สำหรับกำลังคลื่นบริเวณจังหวัดสุราษฎร์ธานีมีค่าเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 60 วัตต์ต่อเมตร สำหรับปี พ.ศ. 2554-2555 แสดงดังรูปที่ 4.29-4.30 ตามลำดับ และมีค่าพลังงานคลื่นเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 40 จูลต่อตารางเมตร แสดงดังรูปที่ 4.31-4.32 ตามลำดับ

นอกจากนี้เมื่อพิจารณากำลังคลื่นปี พ.ศ. 2554 และปี พ.ศ. 2555 บริเวณจังหวัดสุราษฎร์ธานี พบว่ากำลังคลื่นเฉลี่ยรายเดือน ปี พ.ศ. 2554 มีค่าอยู่ในช่วง 2.91-185.21 วัตต์ต่อเมตร และมีค่าเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 60 วัตต์ต่อเมตร และสำหรับปี พ.ศ. 2555 มีค่าอยู่ในช่วง 2.85-180.30 วัตต์ต่อเมตร และมีค่าเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 60 วัตต์ต่อเมตร แสดงดังรูปที่ 4.29-4.30 ตามลำดับ

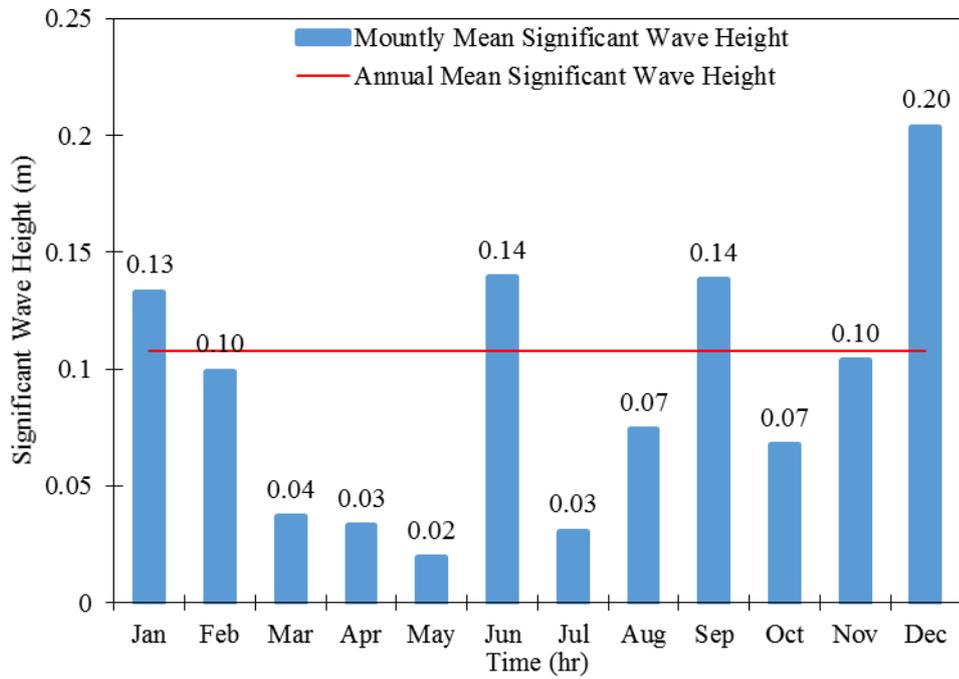
โดยค่าพลังงานคลื่นในทะเลบริเวณจังหวัดสุราษฎร์ธานี ปี พ.ศ. 2554 มีค่าอยู่ในช่วง 2.83-113.65 จูลต่อตารางเมตร และมีค่าเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 40 จูลต่อตารางเมตร และสำหรับปี พ.ศ. 2555 พลังงานคลื่นมีค่าอยู่ในช่วง 2.75-104.97 จูลต่อตารางเมตร และมีค่าเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 40 จูลต่อตารางเมตร แสดงดังรูปที่ 4.31-4.32 ตามลำดับ



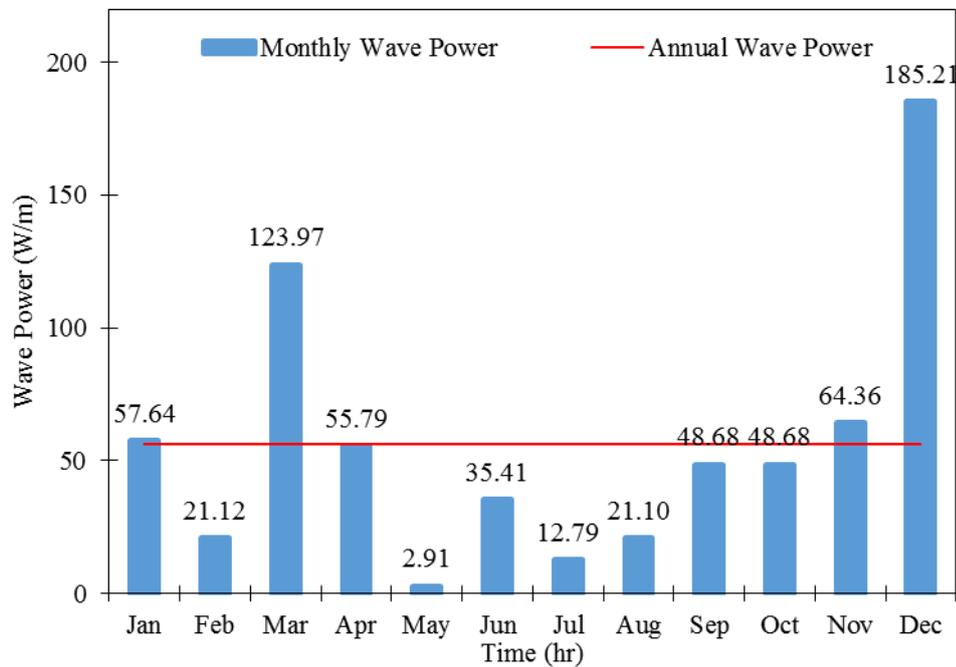
รูปที่ 4.26 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีสุราษฎร์ธานี พ.ศ. 2554-2555



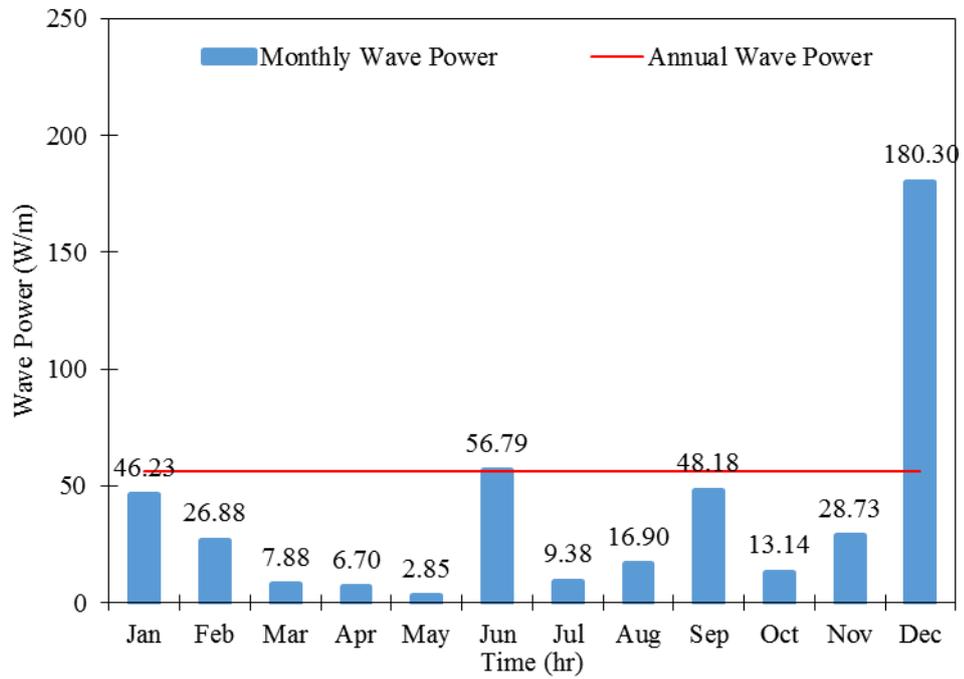
รูปที่ 4.27 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีสุราษฎร์ธานี พ.ศ. 2554



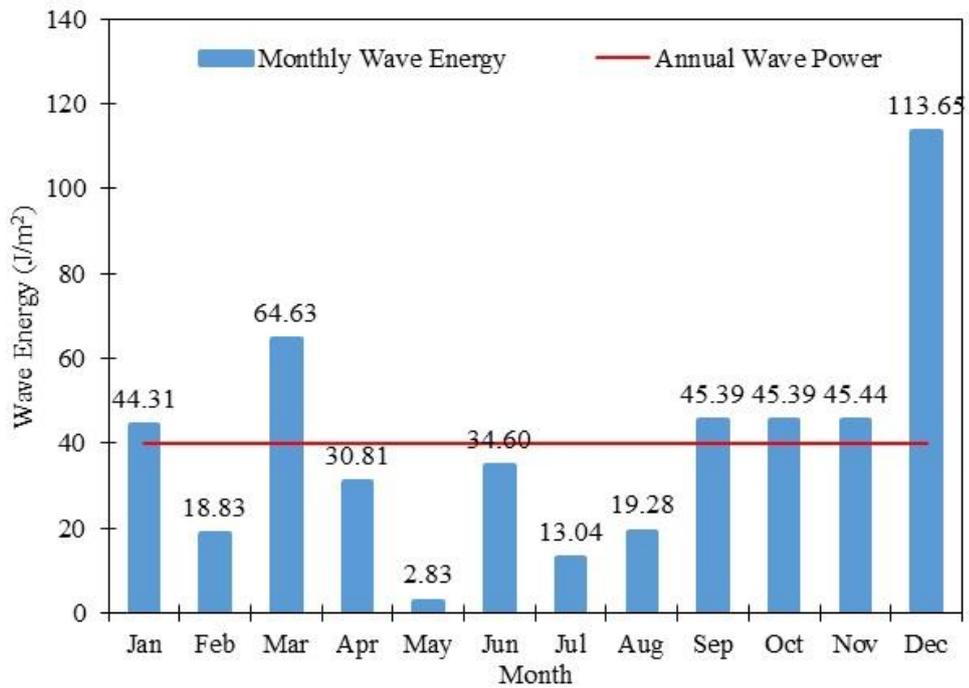
รูปที่ 4.28 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีสุราษฎร์ธานี พ.ศ. 2555



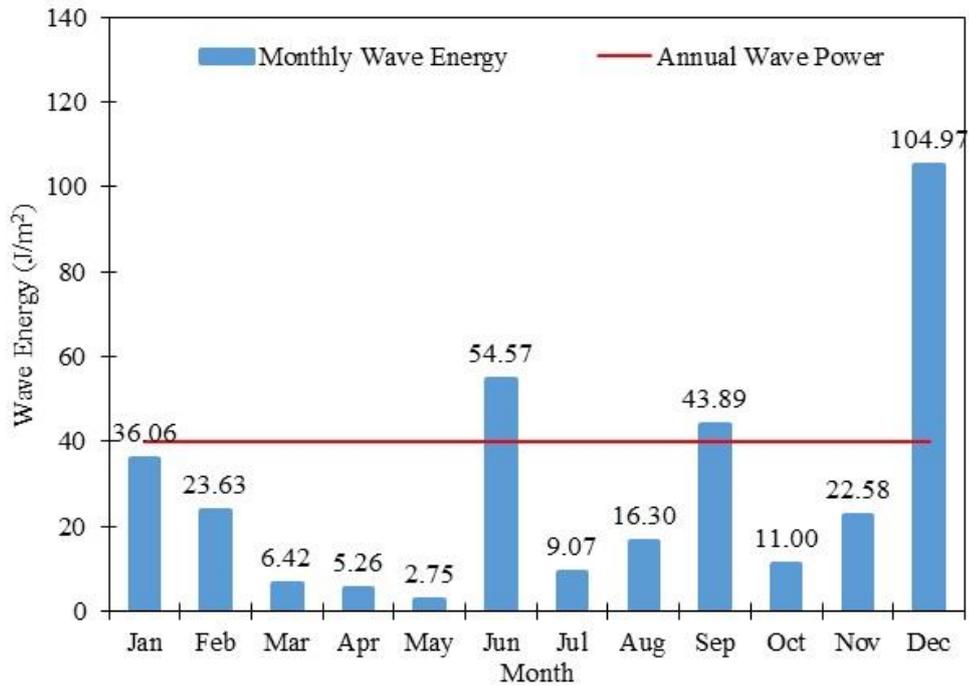
รูปที่ 4.29 กำลังคลื่น ณ สถานีสุราษฎร์ธานี พ.ศ. 2554



รูปที่ 4.30 กำลังคลื่น ณ สถานีสุราษฎร์ธานี พ.ศ. 2555



รูปที่ 4.31 พลังงานคลื่น ณ สถานีสุราษฎร์ธานี พ.ศ. 2554



รูปที่ 4.32 พลังงานคลื่น ณ สถานีสุราษฎร์ธานี พ.ศ. 2555

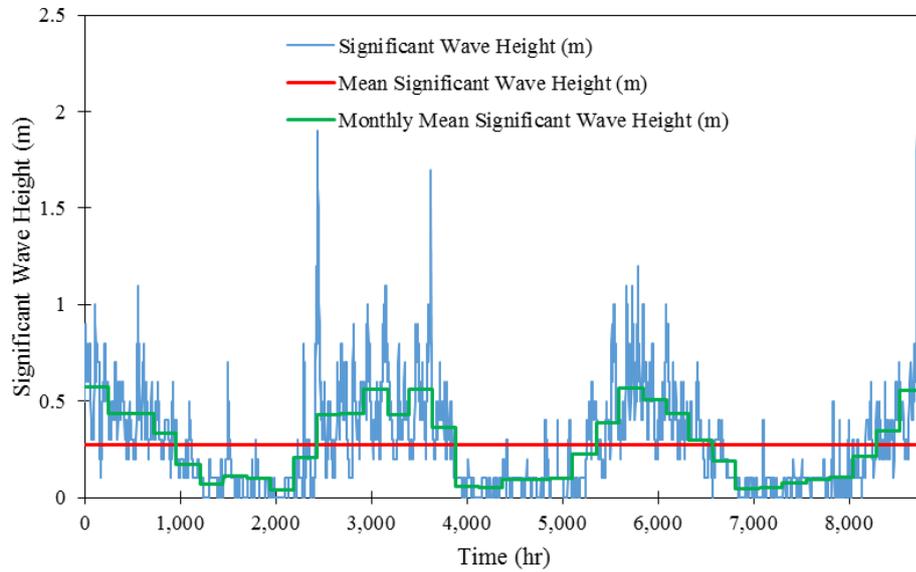
ข้อมูลอนุกรมเวลาของคลื่นนัยสำคัญแสดงดังรูปที่ 4.33 จะเห็นได้ว่าความสูงนัยสำคัญของคลื่นบริเวณจังหวัดนครศรีธรรมราชมีค่าสูงสุด 2.0 เมตร ในช่วงเดือนธันวาคม และมีค่าสูง 1.8 เมตรในเดือนมีนาคม และ 1.7 เมตร ในช่วงเดือนพฤษภาคม โดยมีค่าความสูงนัยสำคัญเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 0.27 เมตร สำหรับข้อมูลคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ยรายเดือนปี พ.ศ. 2554 แสดงดังรูปที่ 4.34 โดยช่วงเดือนที่มีคลื่นนัยสำคัญสูงจะเป็นเดือนมกราคม กุมภาพันธ์ มีนาคม เมษายน พฤษภาคมและเดือนธันวาคม และมีพฤติกรรมเดียวกันกับปี พ.ศ. 2555 โดยแสดงดังรูปที่ 4.35 เมื่อพิจารณาความสูงนัยสำคัญรายปี พ.ศ. 2554 และ พ.ศ. 2555 จะพบว่าพฤติกรรมของคลื่นในทะเลบริเวณจังหวัดนครศรีธรรมราชจะมีค่าความสูงนัยสำคัญสูงในช่วงปลายปีและต้นปี โดยมีระยะเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน และเดือนพฤษภาคมถึงเดือนธันวาคม ซึ่งในช่วงดังกล่าวเป็นช่วงที่ทะเลอ่าวไทยได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือตนเอง โดยพฤติกรรมของความสูงนัยสำคัญทั้ง 2 ปี มีลักษณะเหมือนกัน

สำหรับกำลังคลื่นบริเวณจังหวัดนครศรีธรรมราชมีค่าเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 300 วัตต์ต่อเมตร ในปี พ.ศ. 2554 และมีกำลังคลื่นเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 310 วัตต์ต่อเมตร ในปี พ.ศ. 2555 แสดงดังรูปที่ 4.36-4.37 ตามลำดับ

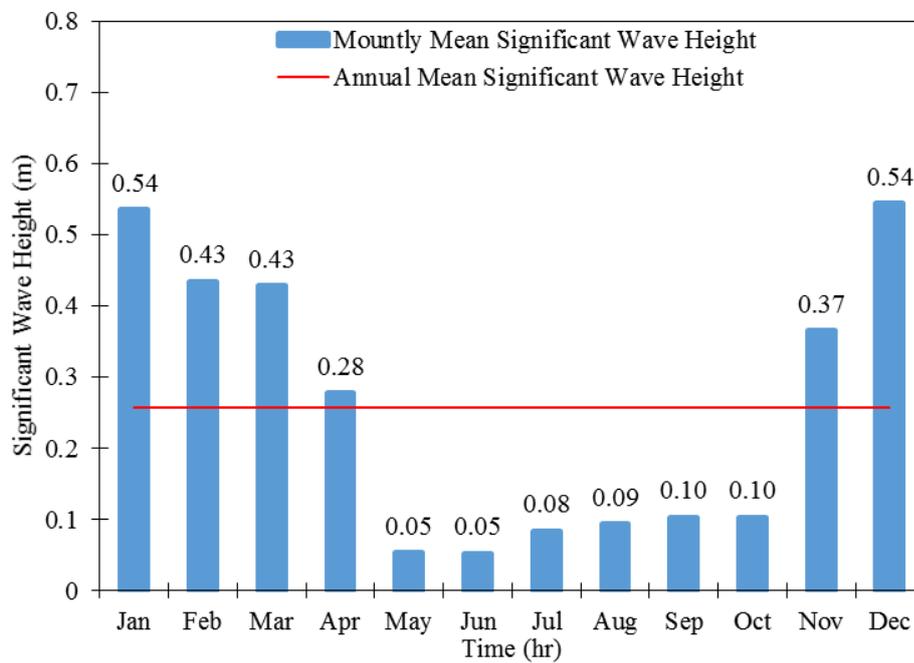
นอกจากนี้เมื่อพิจารณากำลังคลื่นปี พ.ศ. 2554 และปี พ.ศ. 2555 บริเวณจังหวัดนครศรีธรรมราชพบว่ากำลังคลื่นเฉลี่ยรายเดือน ปี พ.ศ. 2554 มีค่าอยู่ในช่วง 11.13-897.24 วัตต์ต่อเมตร และสำหรับปี พ.ศ. 2555 มีค่าอยู่ในช่วง 8.63-808.18 วัตต์ต่อเมตร

โดยค่าพลังงานคลื่นในทะเลบริเวณจังหวัดนครศรีธรรมราช ปี พ.ศ. 2554 มีค่าอยู่ในช่วง 7.94-434.99 จูลต่อตารางเมตร และมีค่าเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 180 จูลต่อตารางเมตร และสำหรับปี

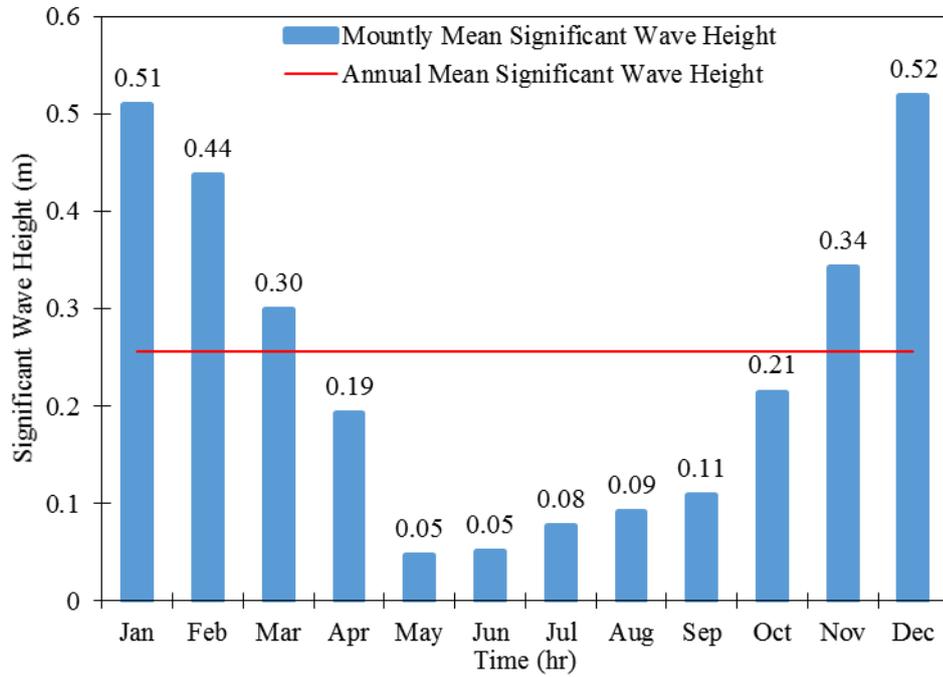
พ.ศ. 2555 พลังงานคลื่นมีค่าอยู่ในช่วง 5.86-404.85 จูลต่อตารางเมตร และมีค่าเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับจูลต่อตารางเมตร 155 จูลต่อตารางเมตร แสดงดังรูปที่ 4.38-4.39 ตามลำดับ



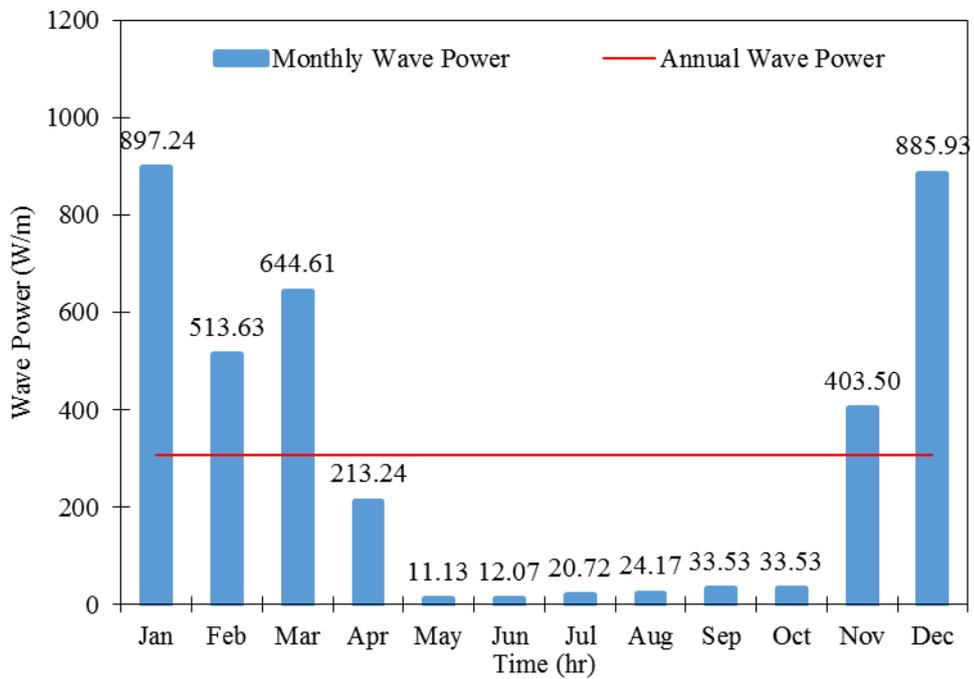
รูปที่ 4.33 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีนครศรีธรรมราช พ.ศ. 2554-2555



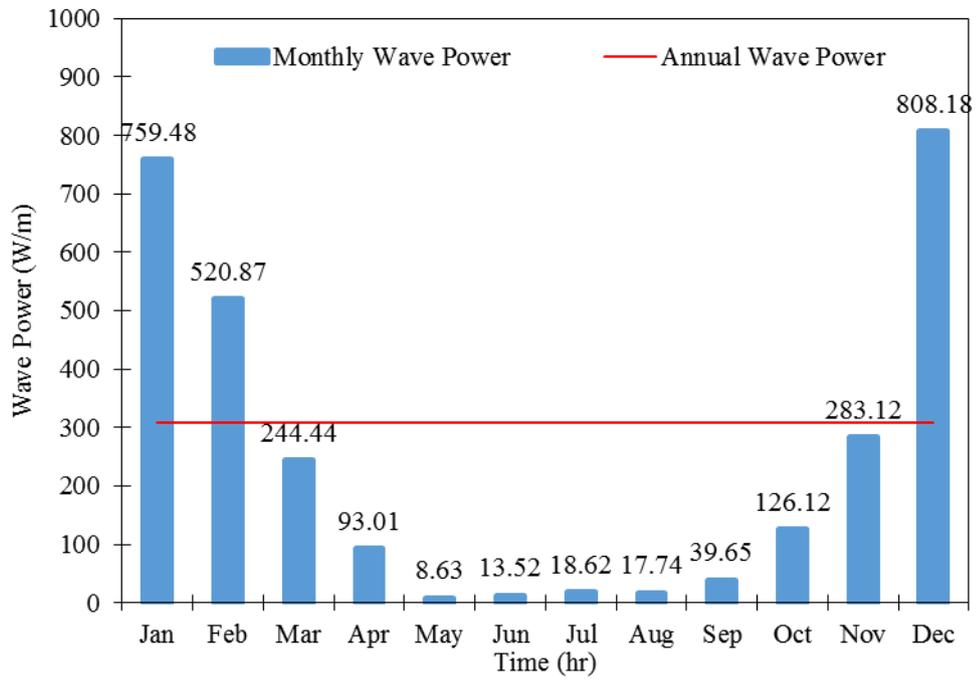
รูปที่ 4.34 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีนครศรีธรรมราช พ.ศ. 2554



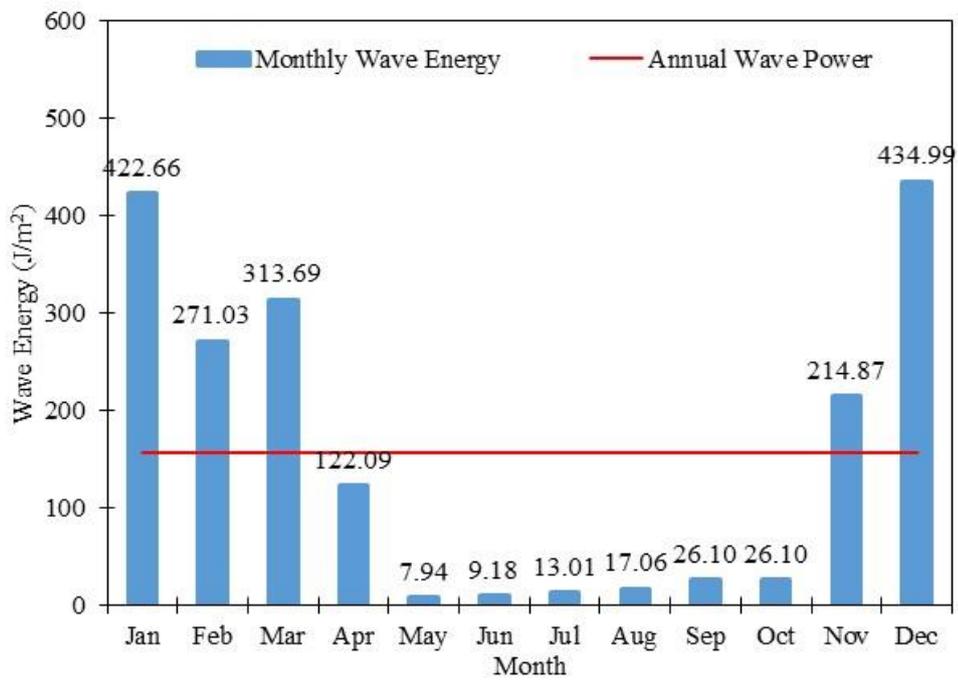
รูปที่ 4.35 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีนครศรีธรรมราช พ.ศ. 2555



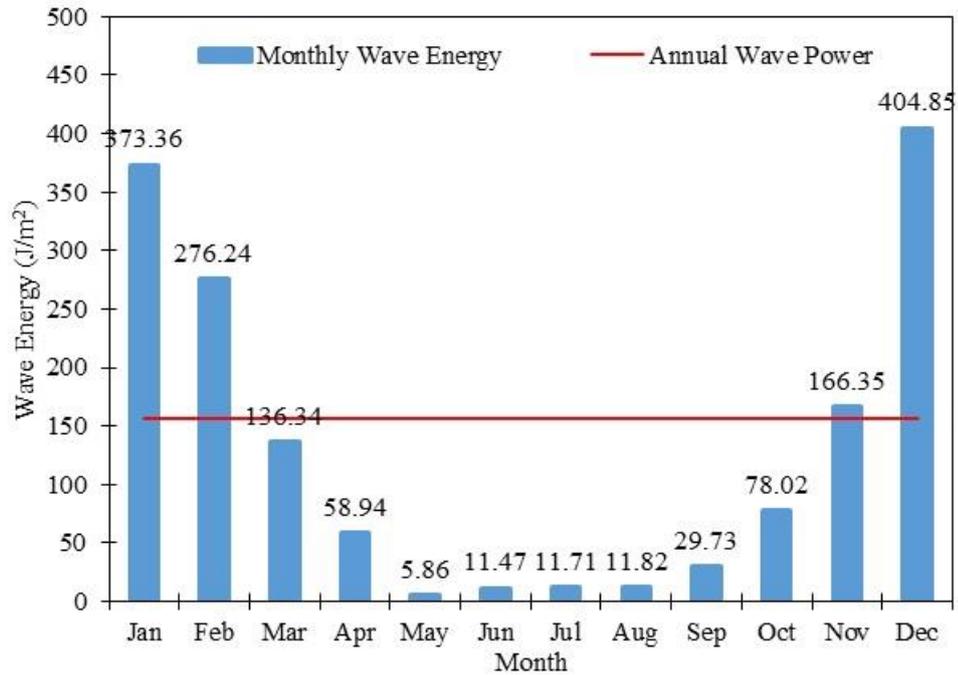
รูปที่ 4.36 กำลังคลื่น ณ สถานีนครศรีธรรมราช พ.ศ. 2554



รูปที่ 4.37 กำลังคลื่น ณ สถานีนครศรีธรรมราช พ.ศ. 2555



รูปที่ 4.38 พลังงานคลื่น ณ สถานีนครศรีธรรมราช พ.ศ. 2554

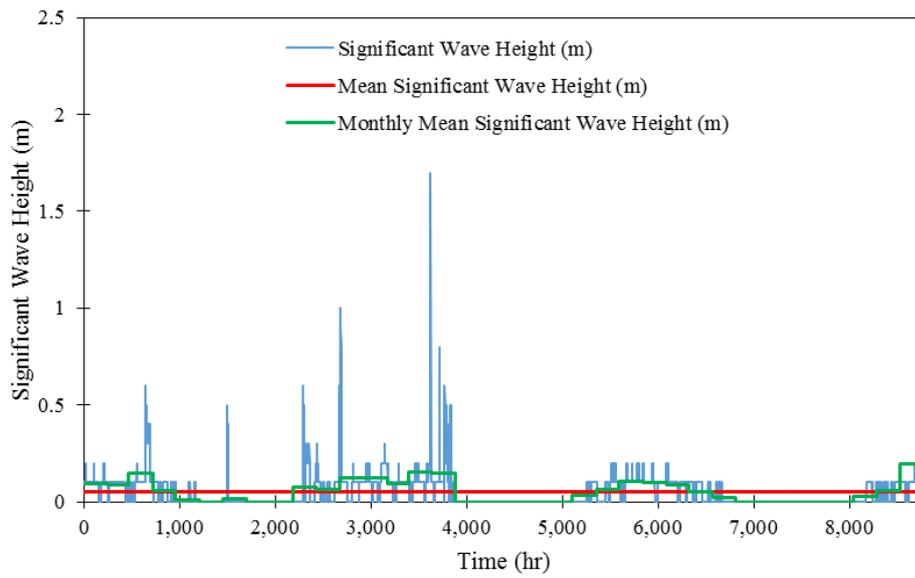


รูปที่ 4.39 พลังงานคลื่น ณ สถานีนครศรีธรรมราช พ.ศ. 2555

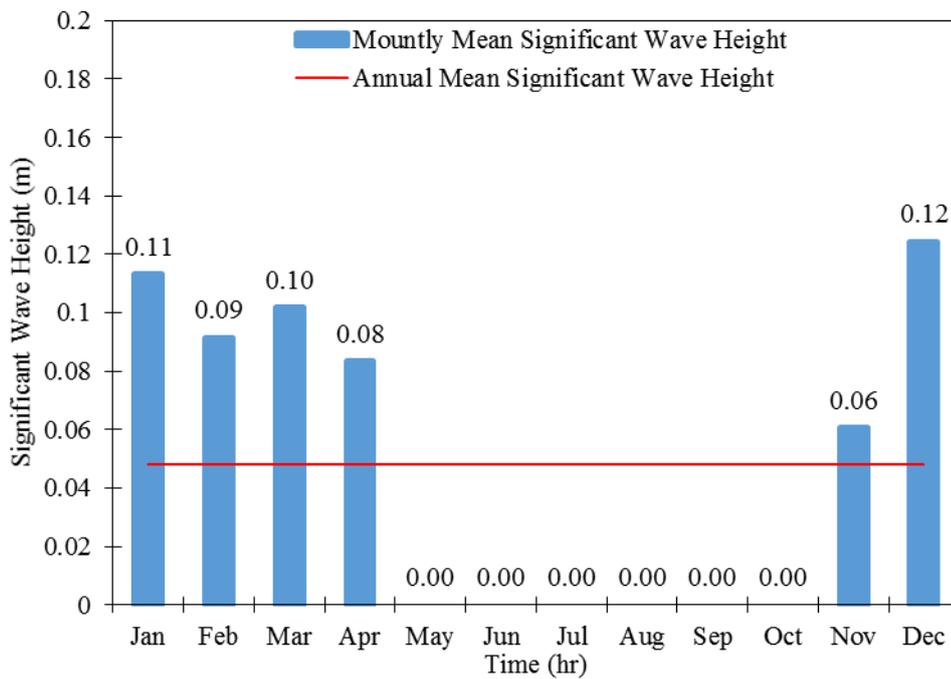
จากรูปที่ 4.40 จะเห็นได้ว่าความสูงนัยสำคัญของคลื่นบริเวณจังหวัดสงขลามีค่าสูงสุด 2.0 เมตร ในช่วงเดือนธันวาคม และมีค่าสูง 1.75 เมตร ในเดือนพฤษภาคม โดยมีค่าความสูงนัยสำคัญเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 0.20 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.40 เมื่อพิจารณาความสูงคลื่นนัยสำคัญเฉลี่ยรายเดือน พบว่ามีค่าเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 0.05 เมตร สำหรับปี พ.ศ. 2554 โดยคลื่นมีความสูงนัยสำคัญสูงในเดือน มกราคม กุมภาพันธ์ มีนาคม เมษายน พฤษภาคม และธันวาคม แสดงดังรูปที่ 4.41 เมื่อพิจารณาความสูงนัยสำคัญรายปี พ.ศ. 2554 และ พ.ศ. 2555 พบว่าพฤติกรรมของคลื่นในทะเลบริเวณจังหวัดสงขลาจะมีค่าความสูงนัยสำคัญสูงในช่วงปลายปีและต้นปี โดยมีระยะเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือน มกราคมถึงเดือนเมษายน และเดือนพฤษภาคมถึงเดือนธันวาคม ซึ่งในช่วงดังกล่าวเป็นช่วงที่ทะเลอ่าวไทยได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือนั่นเอง โดยพฤติกรรมของความสูงนัยสำคัญทั้ง 2 ปี มีลักษณะเหมือนกัน

สำหรับกำลังคลื่นบริเวณจังหวัดสงขลามีค่าเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 38 วัตต์ต่อเมตร สำหรับปี พ.ศ. 2554 และเท่ากับ 40 วัตต์ต่อเมตร สำหรับปี พ.ศ. 2555 แสดงดังรูปที่ 4.43-4.44 ตามลำดับ เมื่อพิจารณากำลังคลื่นปี พ.ศ. 2554 และปี พ.ศ. 2555 บริเวณจังหวัดสงขลาพบว่า กำลังคลื่นเฉลี่ยรายเดือน ปี พ.ศ. 2554 มีค่าอยู่ในช่วง 17.86-141.11 วัตต์ต่อเมตร และสำหรับปี พ.ศ. 2555 มีค่าอยู่ในช่วง 4.00-246.91 วัตต์ต่อเมตร

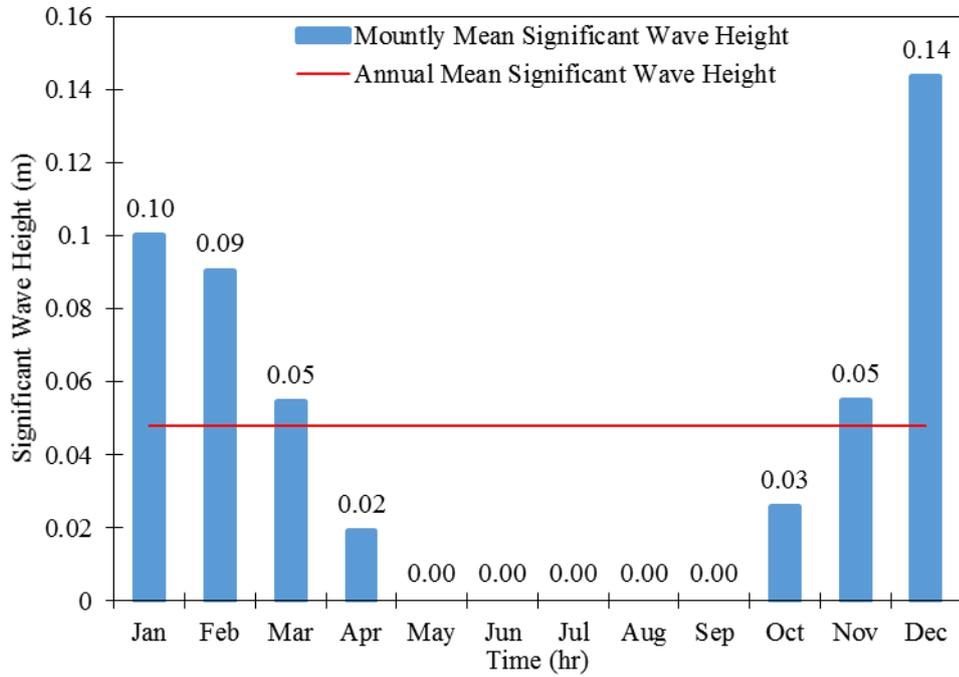
โดยค่าพลังงานคลื่นในทะเลบริเวณจังหวัดสงขลา ปี พ.ศ. 2554 มีค่าอยู่ในช่วง 9.03-59.74 จูลต่อตารางเมตร และมีค่าเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 18 จูลต่อตารางเมตร และสำหรับปี พ.ศ. 2555 พลังงานคลื่นมีค่าอยู่ในช่วง 2.42-104.19 จูลต่อตารางเมตร และมีค่าเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ จูลต่อตารางเมตร 18 จูลต่อตารางเมตร แสดงดังรูปที่ 4.45-4.46 ตามลำดับ



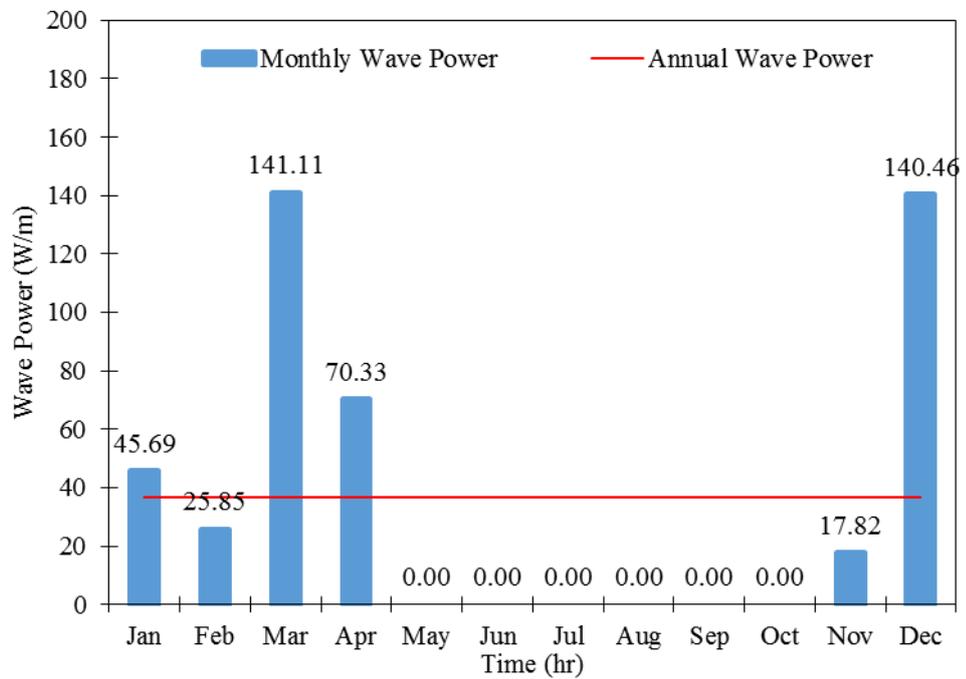
รูปที่ 4.40 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีสงขลา พ.ศ. 2554-2555



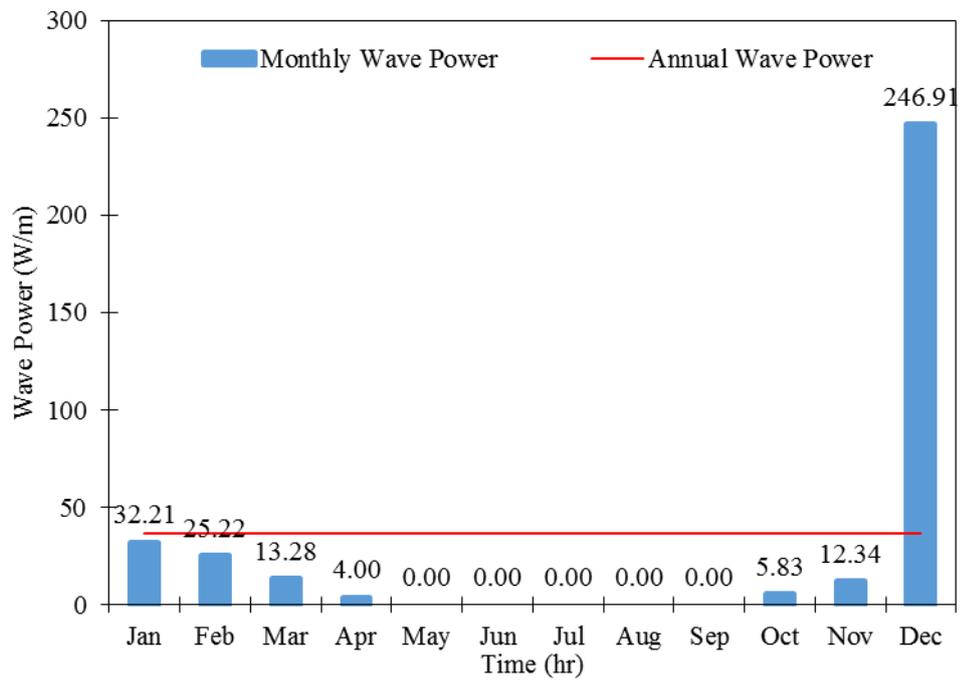
รูปที่ 4.41 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีสงขลา พ.ศ. 2554



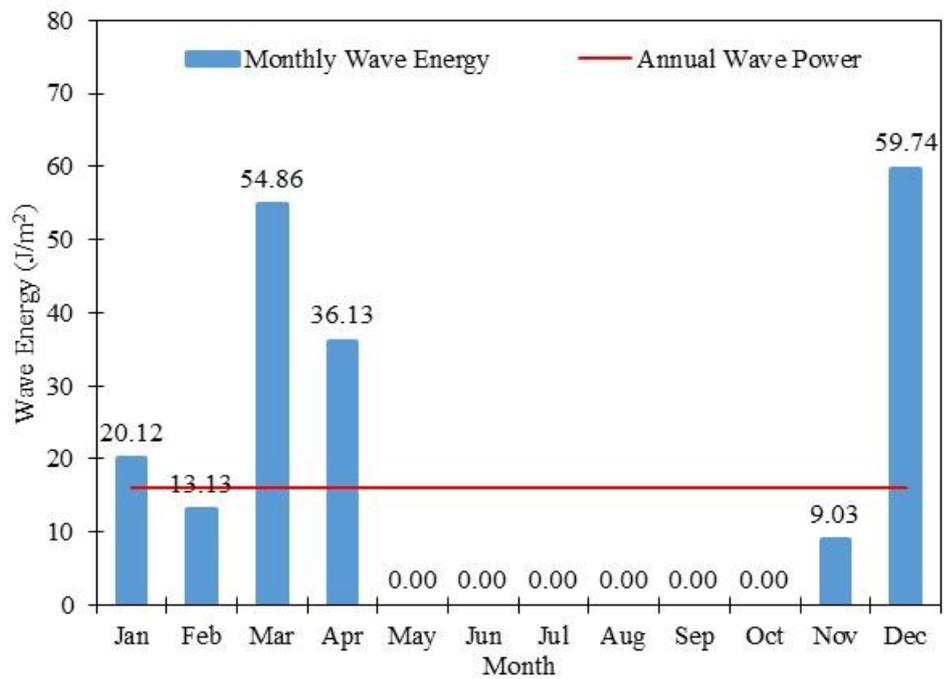
รูปที่ 4.42 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีสงขลา พ.ศ. 2555



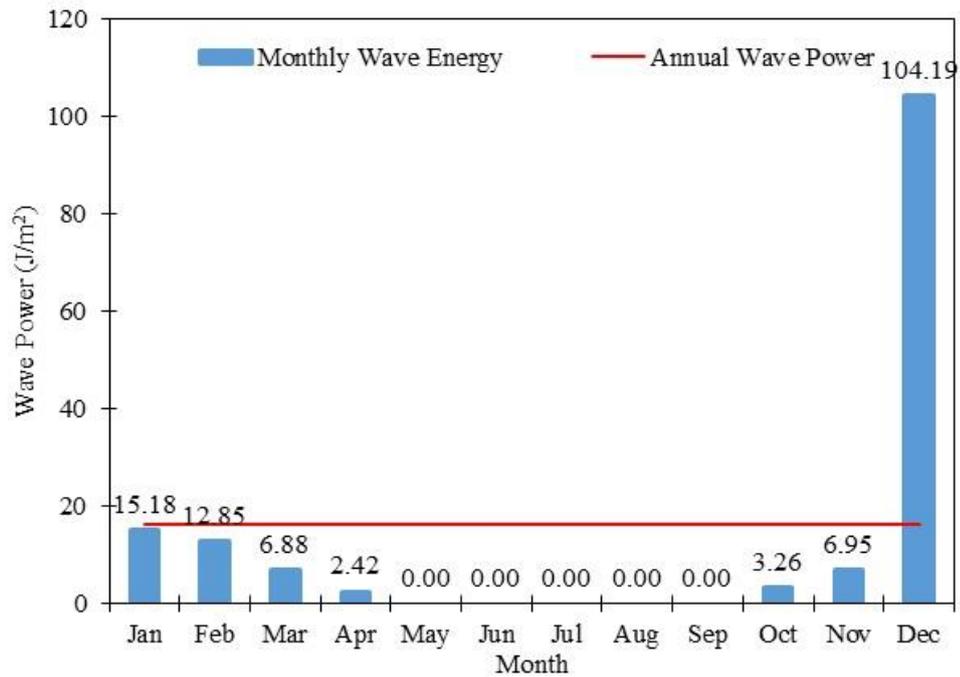
รูปที่ 4.43 กำลังคลื่น ณ สถานีสงขลา พ.ศ. 2554



รูปที่ 4.44 กำลังคลื่น ณ สถานีสงขลา พ.ศ. 2555



รูปที่ 4.45 พลังงานคลื่น ณ สถานีสงขลา พ.ศ. 2554

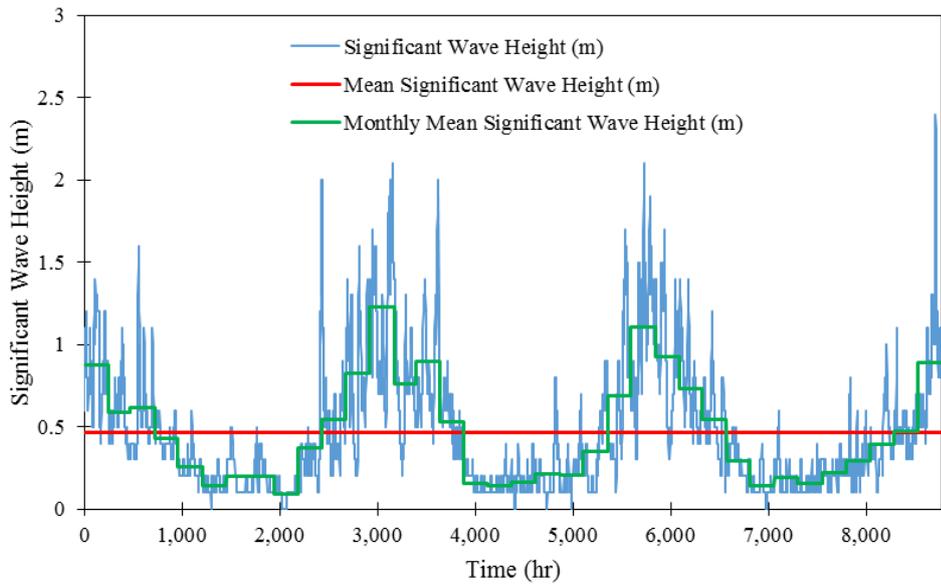


รูปที่ 4.46 พลังงานคลื่น ณ สถานีสงขลา พ.ศ. 2555

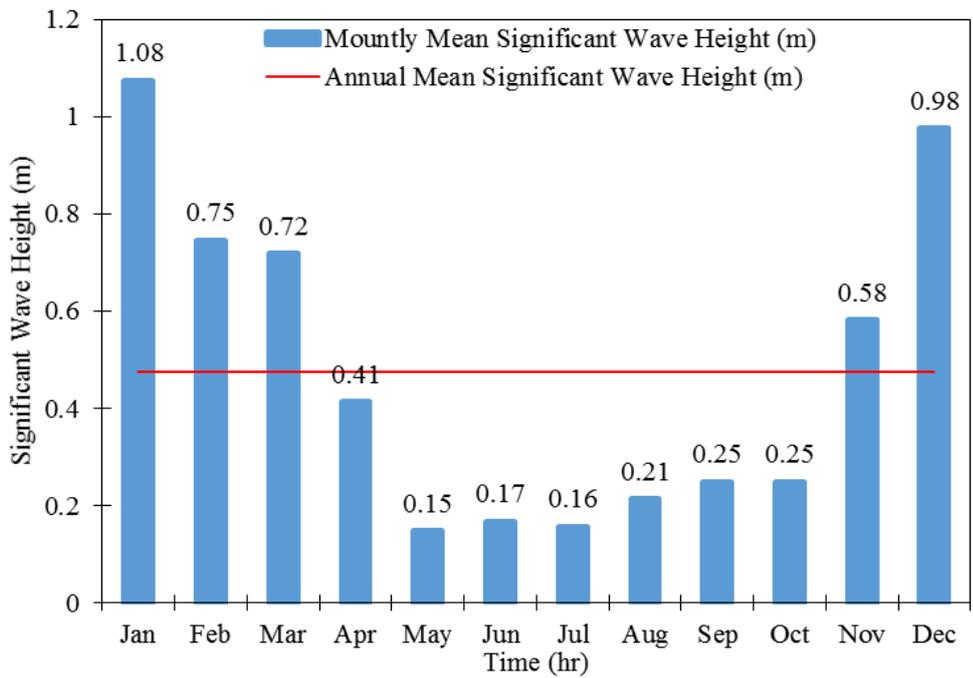
จากรูปที่ 4.47 จะเห็นได้ว่าความสูงนัยสำคัญของคลื่นบริเวณจังหวัดนราธิวาสมีค่าสูงสุด 2.3 เมตร ในช่วงเดือนธันวาคม และมีค่าสูง 2.0 เมตร ในเดือนพฤษภาคม และเดือนกันยายน โดยมีค่าความสูงนัยสำคัญเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 0.45 เมตร เมื่อพิจารณาความสูงนัยสำคัญรายปี พ.ศ. 2554 และ พ.ศ. 2555 ดังรูปที่ 4.48-4.49 ตามลำดับ จะพบว่าพฤติกรรมของคลื่นในทะเลบริเวณจังหวัดนราธิวาสจะมีค่าความสูงนัยสำคัญสูงในช่วงปลายปีและต้นปี โดยมีระยะเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน และเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนธันวาคม ซึ่งในช่วงดังกล่าวเป็นช่วงที่ทะเลอ่าวไทยได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือขึ้นเอง โดยพฤติกรรมของความสูงนัยสำคัญทั้ง 2 ปี มีลักษณะเหมือนกัน

สำหรับกำลังคลื่นบริเวณจังหวัดนราธิวาสเนื่องจากข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองเริ่มจากเดือนมิถุนายนเป็นต้นไป แสดงดังรูปที่ 4.50 เมื่อพิจารณากำลังคลื่นปี พ.ศ. 2554 และปี พ.ศ. 2555 บริเวณจังหวัดนราธิวาสพบว่า กำลังคลื่นเฉลี่ยรายเดือน ปี พ.ศ. 2554 มีค่าอยู่ในช่วง 56.93-4,359.18 วัตต์ต่อเมตร และมีค่าเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 1,200 วัตต์ต่อเมตร และสำหรับปี พ.ศ. 2555 มีค่าอยู่ในช่วง 53.24-3,062.23 วัตต์ต่อเมตร และมีค่าเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 1,250 วัตต์ต่อเมตร

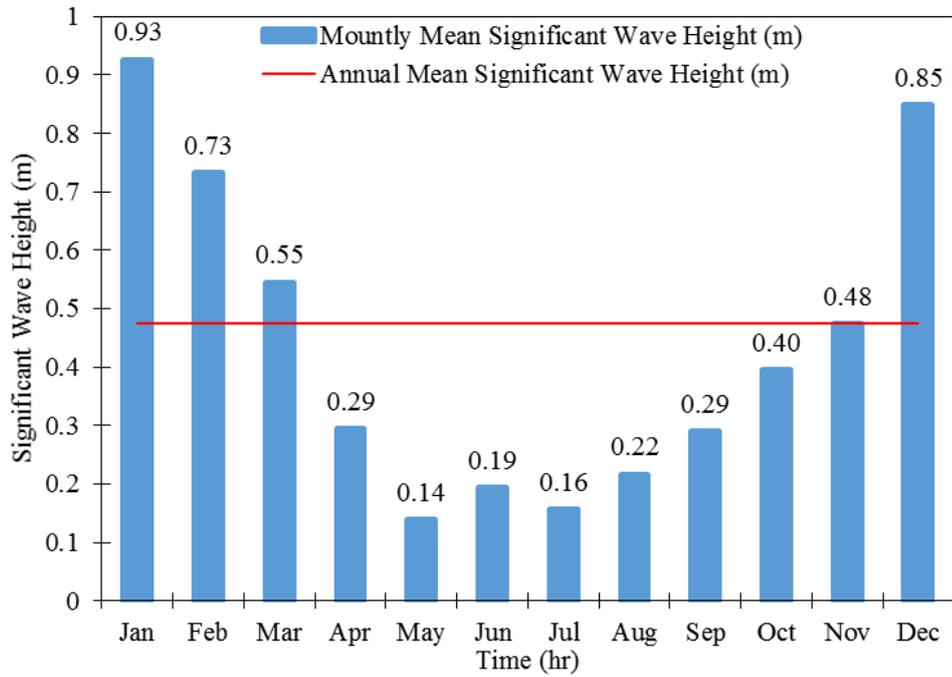
โดยค่าพลังงานคลื่นในทะเลบริเวณจังหวัดนราธิวาส ปี พ.ศ. 2554 มีค่าอยู่ในช่วง 34.33-1,676 จูลต่อตารางเมตร และมีค่าเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 500 จูลต่อตารางเมตร และสำหรับปี พ.ศ. 2555 พลังงานคลื่นมีค่าอยู่ในช่วง 33.10-1,243.43 จูลต่อตารางเมตร และมีค่าเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 500 จูลต่อตารางเมตร แสดงดังรูปที่ 4.53-4.55 ตามลำดับ



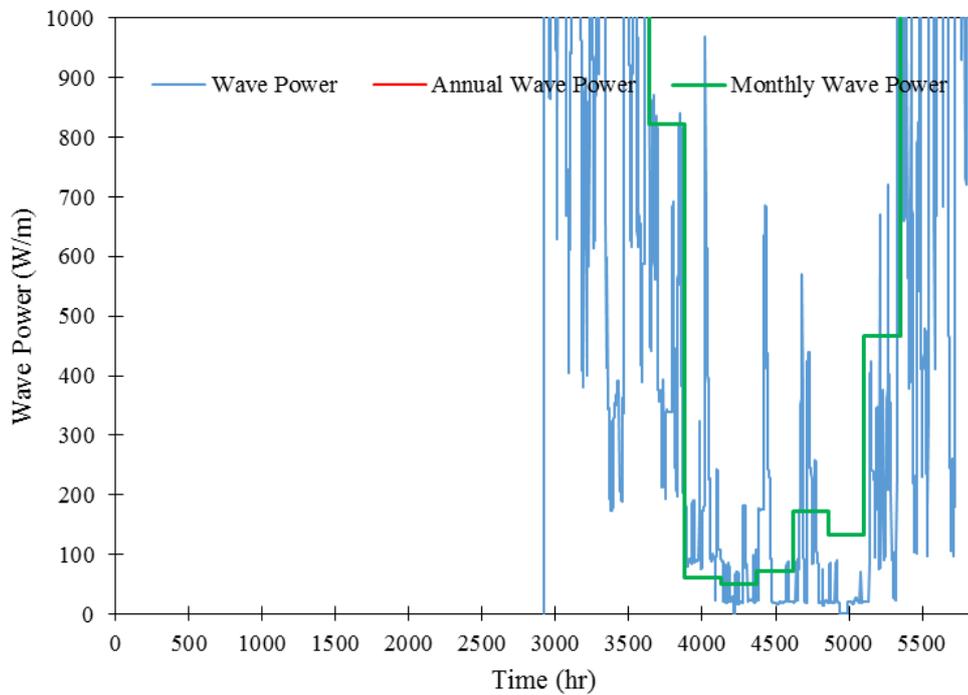
รูปที่ 4.47 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีพระราชวิาส พ.ศ. 2554-2555



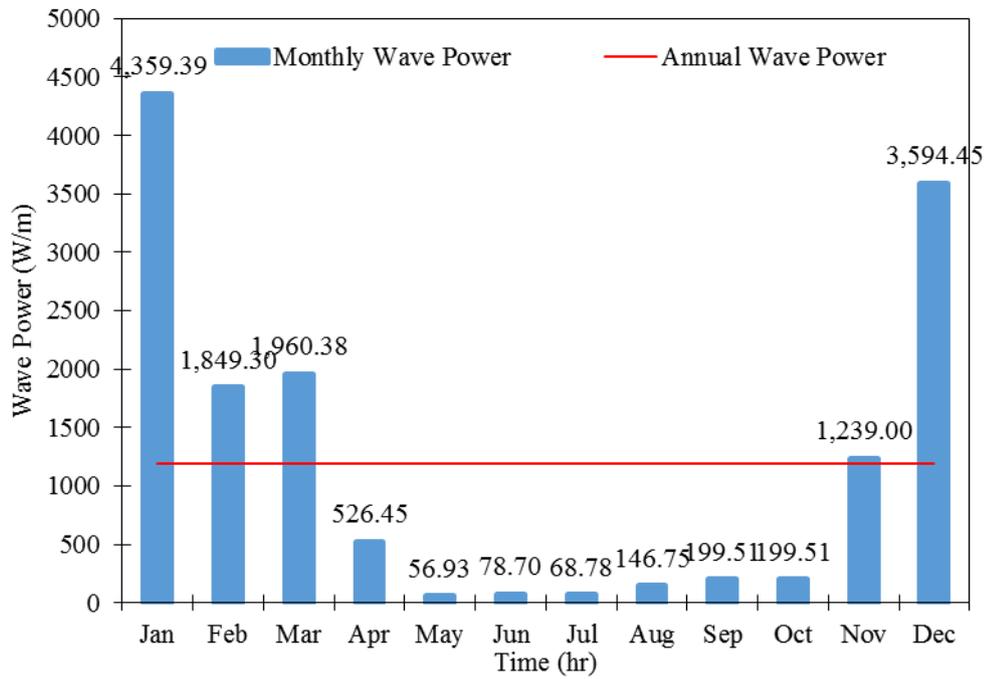
รูปที่ 4.48 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีพระราชวิาส พ.ศ. 2554



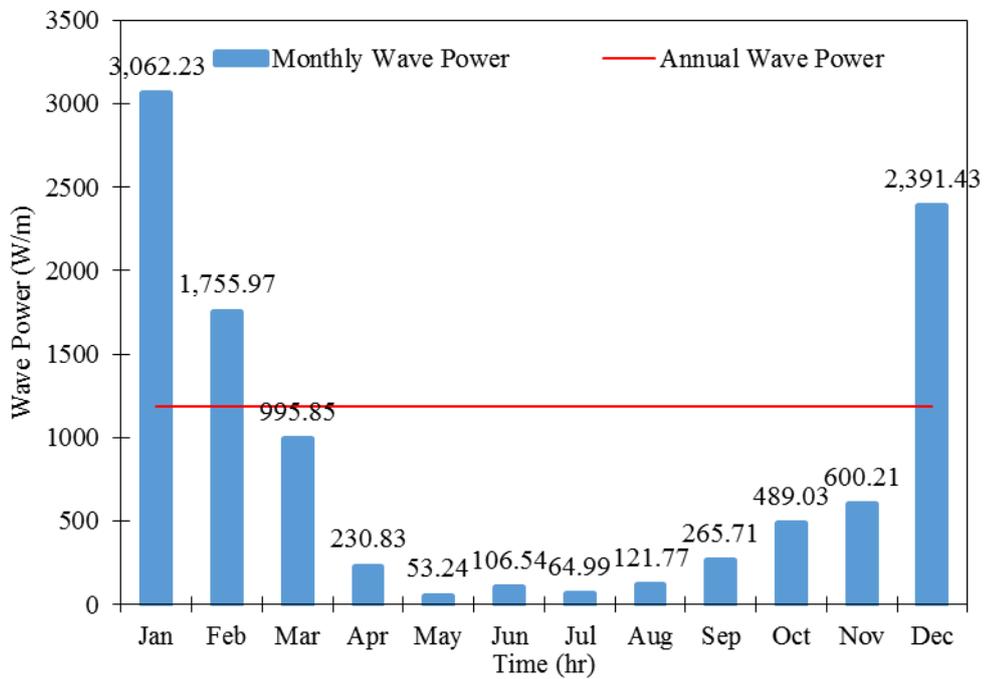
รูปที่ 4.49 ความสูงนัยสำคัญของคลื่น ณ สถานีพระราชวิาส พ.ศ. 2555



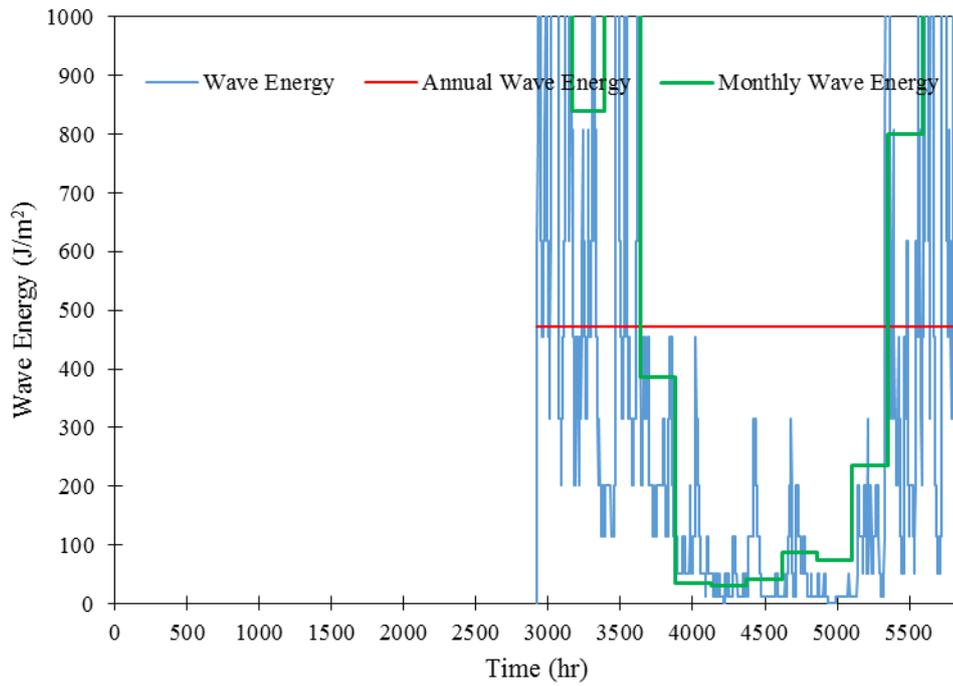
รูปที่ 4.50 กำลังคลื่น ณ สถานีพระราชวิาส พ.ศ. 2554-2555



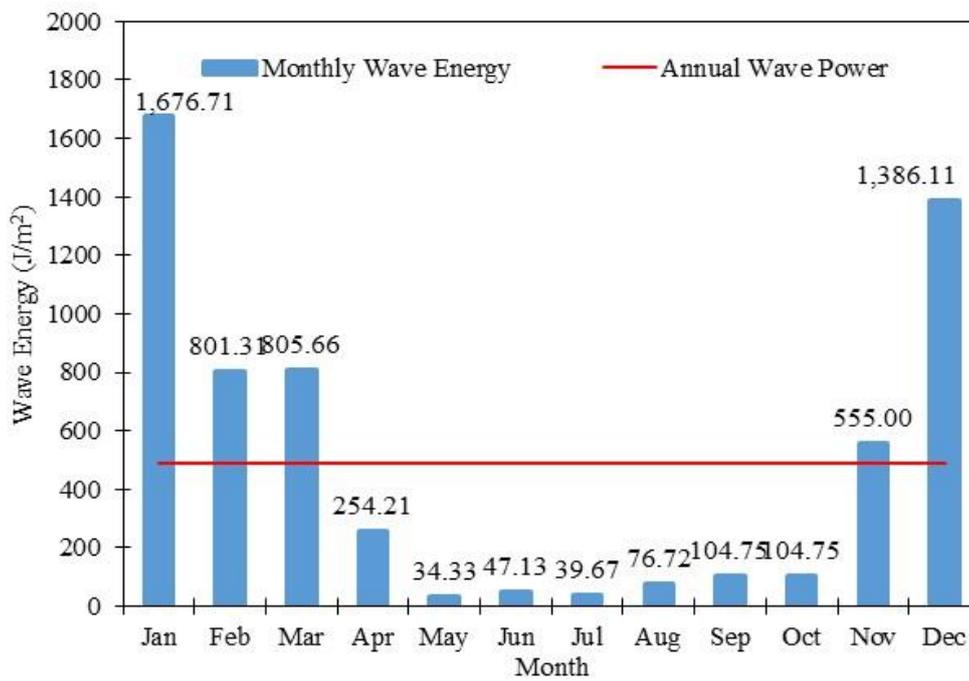
รูปที่ 4.51 กำลังคลื่น ณ สถานีราธิวาส พ.ศ. 2554



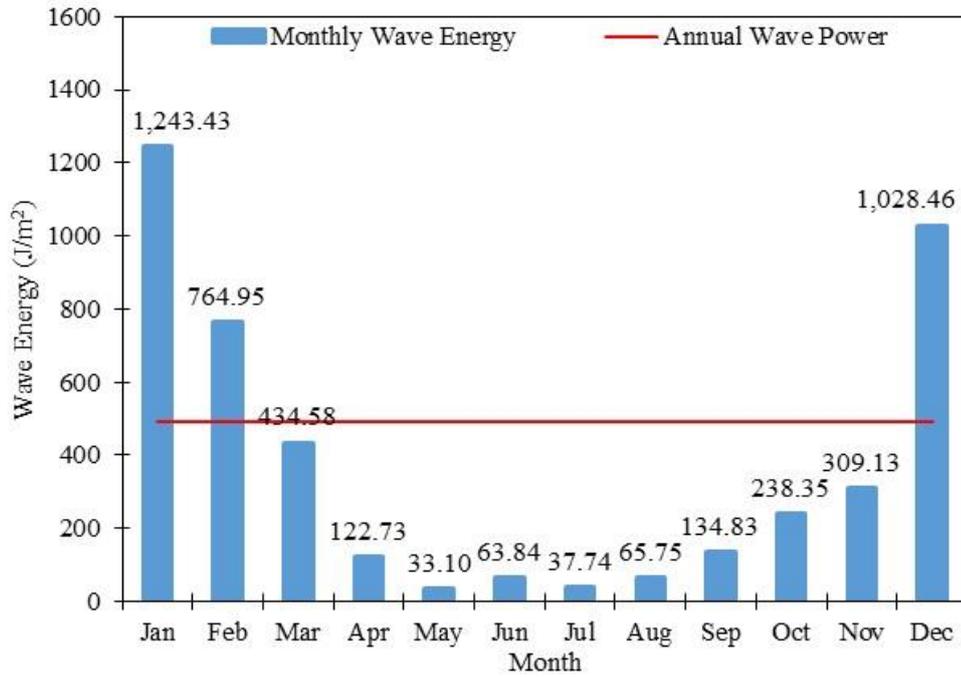
รูปที่ 4.52 กำลังคลื่น ณ สถานีราธิวาส พ.ศ. 2555



รูปที่ 4.53 พลังงานคลื่น ณ สถานีนาธาวิวาส พ.ศ. 2554-2555



รูปที่ 4.54 พลังงานคลื่น ณ สถานีนาธาวิวาส พ.ศ. 2554



รูปที่ 4.55 พลังงานคลื่น ณ สถานีนาธาวิวาส พ.ศ. 2555

สรุปศักยภาพของพลังงานคลื่นในทะเลอ่าวไทยโดยแสดงในรูปของความสูงนัยสำคัญของคลื่น พลังงานของคลื่นและกำลังของคลื่น ณ สถานีต่างๆ รอบทะเลอ่าวไทย จำนวน 7 สถานี ด้วยกันได้แก่ สถานีเพชรบุรี สถานีประจวบคีรีขันธ์ สถานีชุมพร สถานีสุราษฎร์ธานี สถานีนครศรีธรรมราช สถานีสงขลา และสถานีนาธาวิวาส ซึ่งอ้างอิงจากข้อมูลปี พ.ศ. 2554-2555 แสดงดังตารางที่ 4.1-4.2

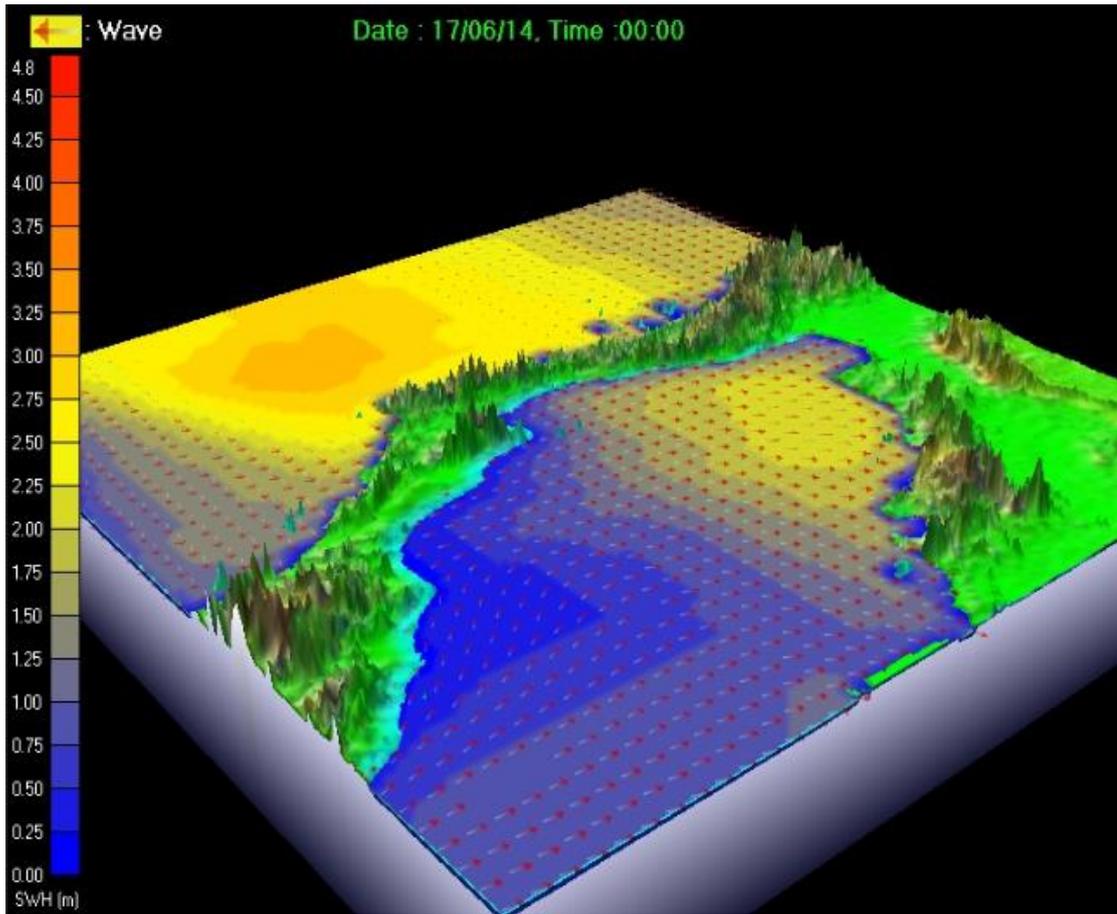
ตารางที่ 4.1 สรุปศักยภาพพลังงานของคลื่นในทะเลอ่าวไทย ปี พ.ศ. 2554

สถานี	ความสูงนัยสำคัญของคลื่น (m)		พลังงานของคลื่น (J/m ²)		กำลังของคลื่น (W/m)	
	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด
เพชรบุรี	0.042	0.005	26.734	0.526	46.218	0.762
ประจวบคีรีขันธ์	0.419	0.153	277.429	46.753	460.412	67.536
ชุมพร	0.457	0.027	329.578	4.787	591.862	6.784
สุราษฎร์ธานี	0.240	0.017	133.468	2.827	185.208	2.912
นครศรีธรรมราช	0.544	0.053	434.986	7.945	897.239	11.127
สงขลา	0.125	0.061	59.742	9.025	141.114	17.861
นาธาวิวาส	1.076	0.148	1,676.108	34.326	4,359.185	56.932

ตารางที่ 4.2 สรุปศักยภาพพลังงานของคลื่นในทะเลอ่าวไทย ปี พ.ศ. 2555

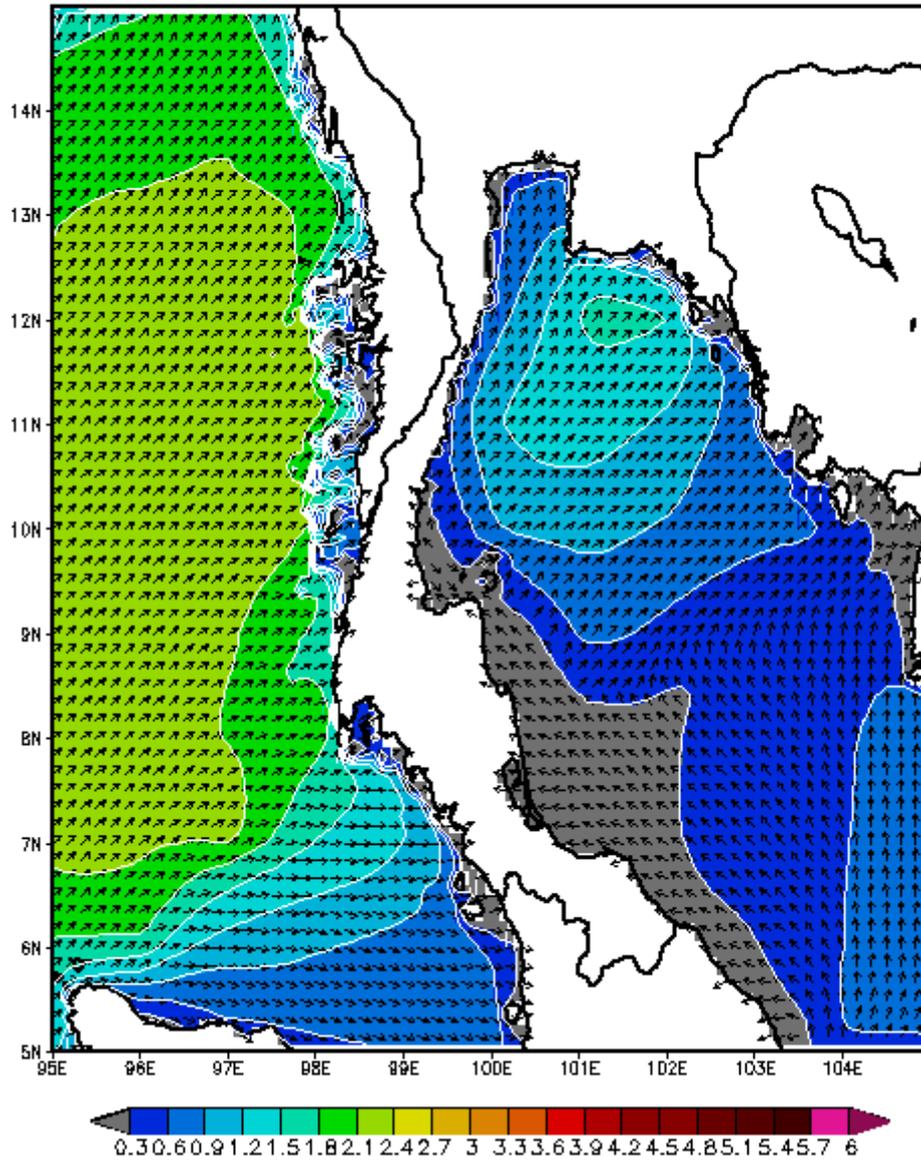
สถานี	ความสูงนัยสำคัญของคลื่น (m)		พลังงานของคลื่น (J/m ²)		กำลังของคลื่น (W/m)	
	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด
เพชรบุรี	0.026	0.004	15.460	0.051	20.943	0.052
ประจวบคีรีขันธ์	0.378	0.130	213.401	30.155	379.393	38.555
ชุมพร	0.387	0.027	242.021	3.871	410.553	5.508
สุราษฎร์ธานี	0.204	0.019	104.974	2.750	180.297	2.849
นครศรีธรรมราช	0.519	0.046	404.853	5.857	808.178	8.626
สงขลา	0.144	0.019	104.187	2.421	246.913	4.001
นราธิวาส	0.927	0.139	1,243.430	33.104	3,062.234	53.240

นอกจากนี้ กรมอุตุนิยมวิทยา โดยศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล ได้ดำเนินการรันแบบจำลอง WAM ซึ่งรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถเข้าเยี่ยมชมเว็บไซต์ของศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเลได้ทาง www.marine.tmd.go.th/thai โดยแสดงผลราย 3 ชั่วโมง 00 UTC 03 UTC 06 UTC 09 UTC 12 UTC 15 UTC 18 UTC 21 UTC ซึ่งมีตัวอย่างของภาพ 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 4.56 และได้นำเสนอข้อมูลในลักษณะเป็นเชิงพื้นที่ซึ่งมีตัวอย่างในแต่ละเดือนของศักยภาพของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามันของวันที่ 11-14 เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2555 แสดงดังรูปที่ 4.57-4.89



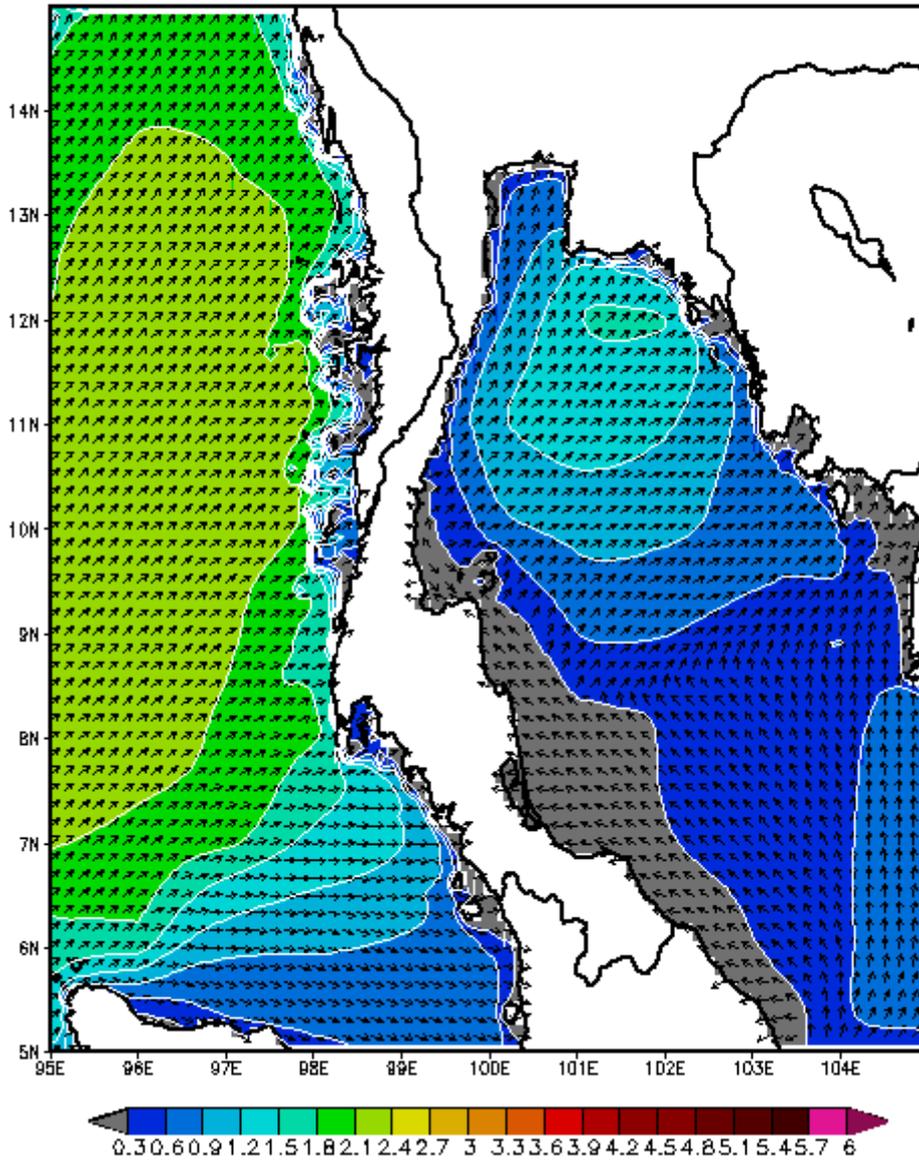
รูปที่ 4.56 แผนที่ 3D ของความสูงของคลื่นนัยสำคัญในทะเลอ่าวไทย
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
00Z11JUN2012



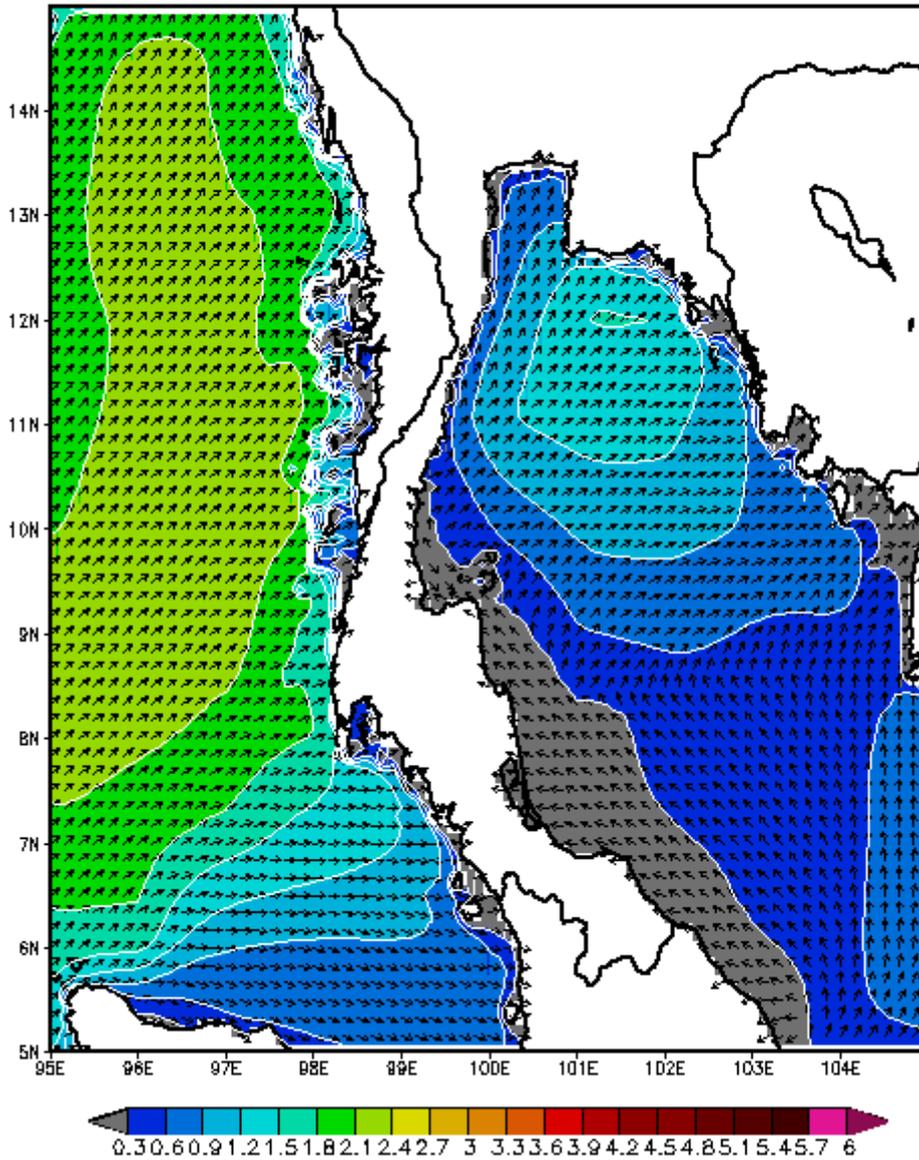
รูปที่ 4.57 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 00.00 ของวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
03Z11JUN2012



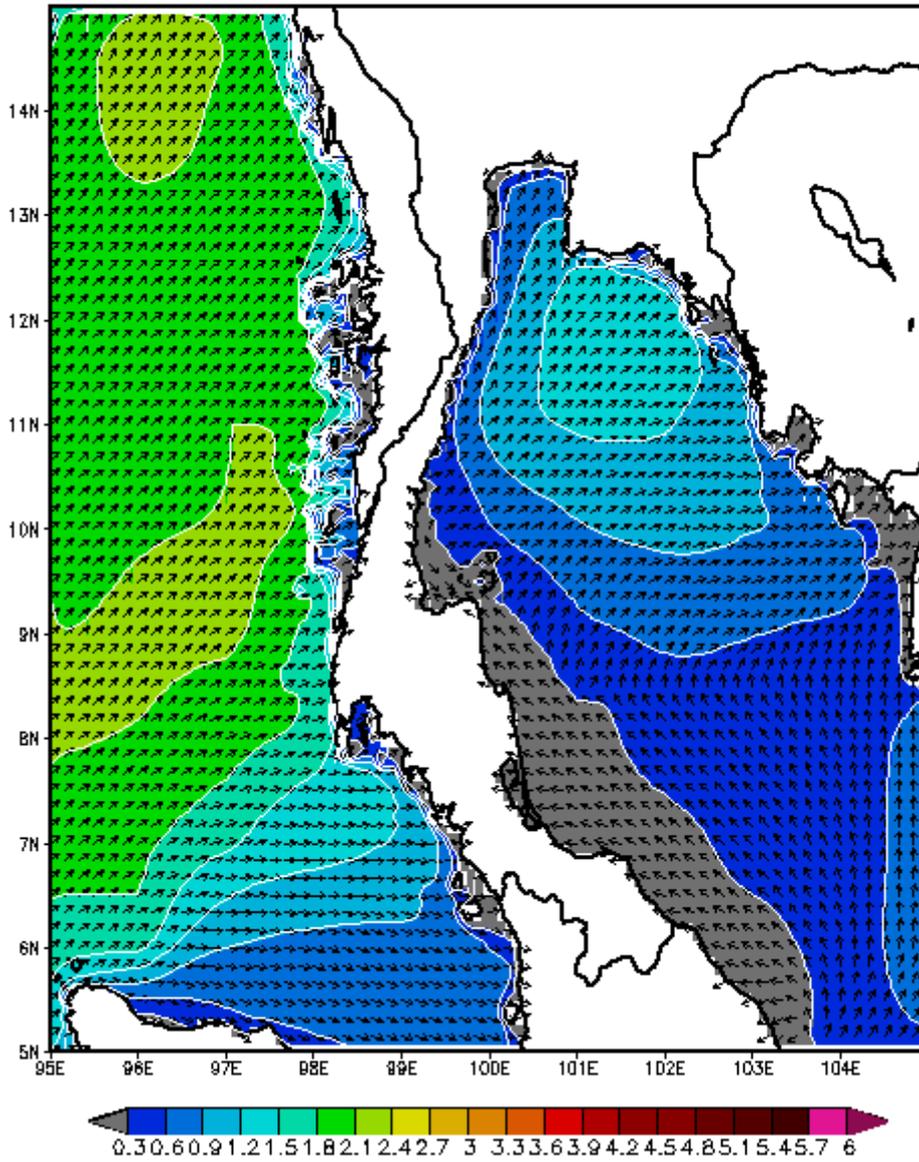
รูปที่ 4.58 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 03.00 ของวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
06Z11JUN2012



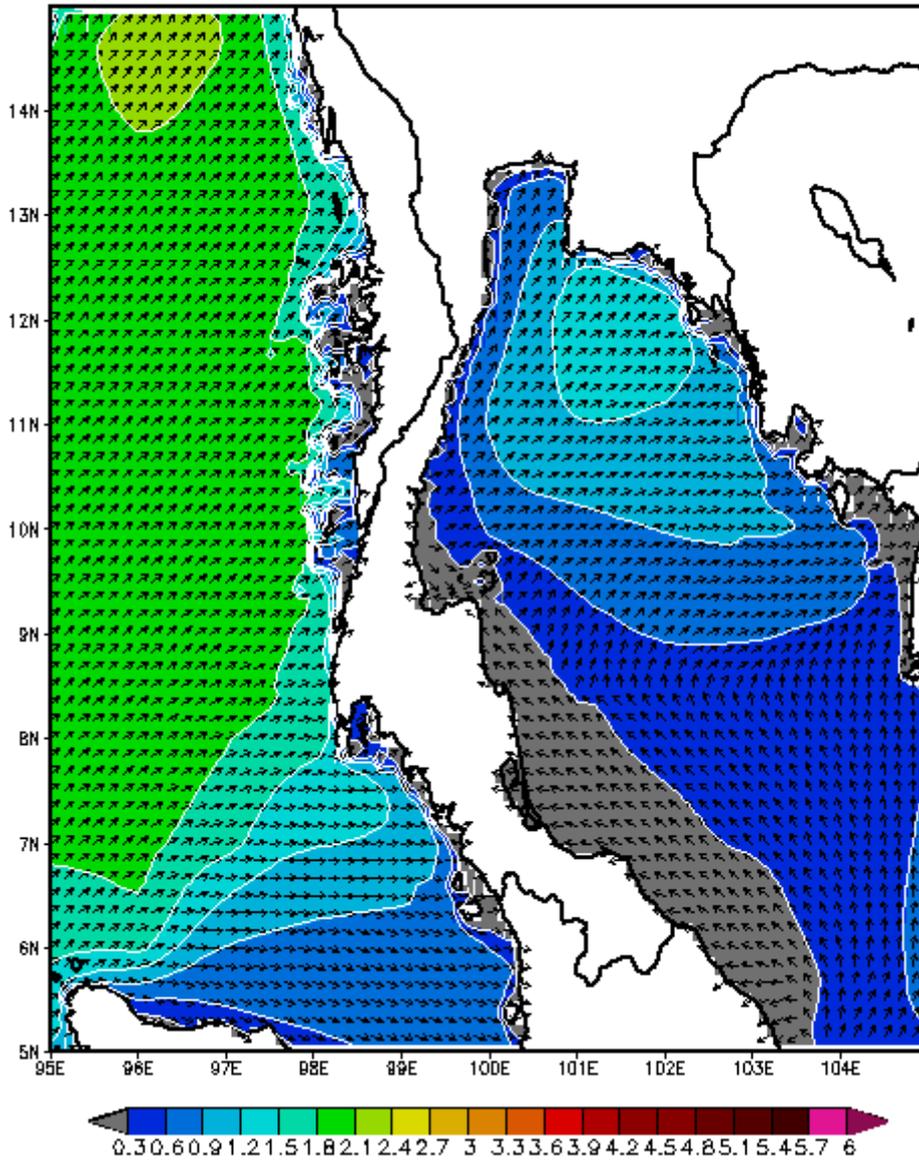
รูปที่ 4.59 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 06.00 ของวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
09Z11JUN2012



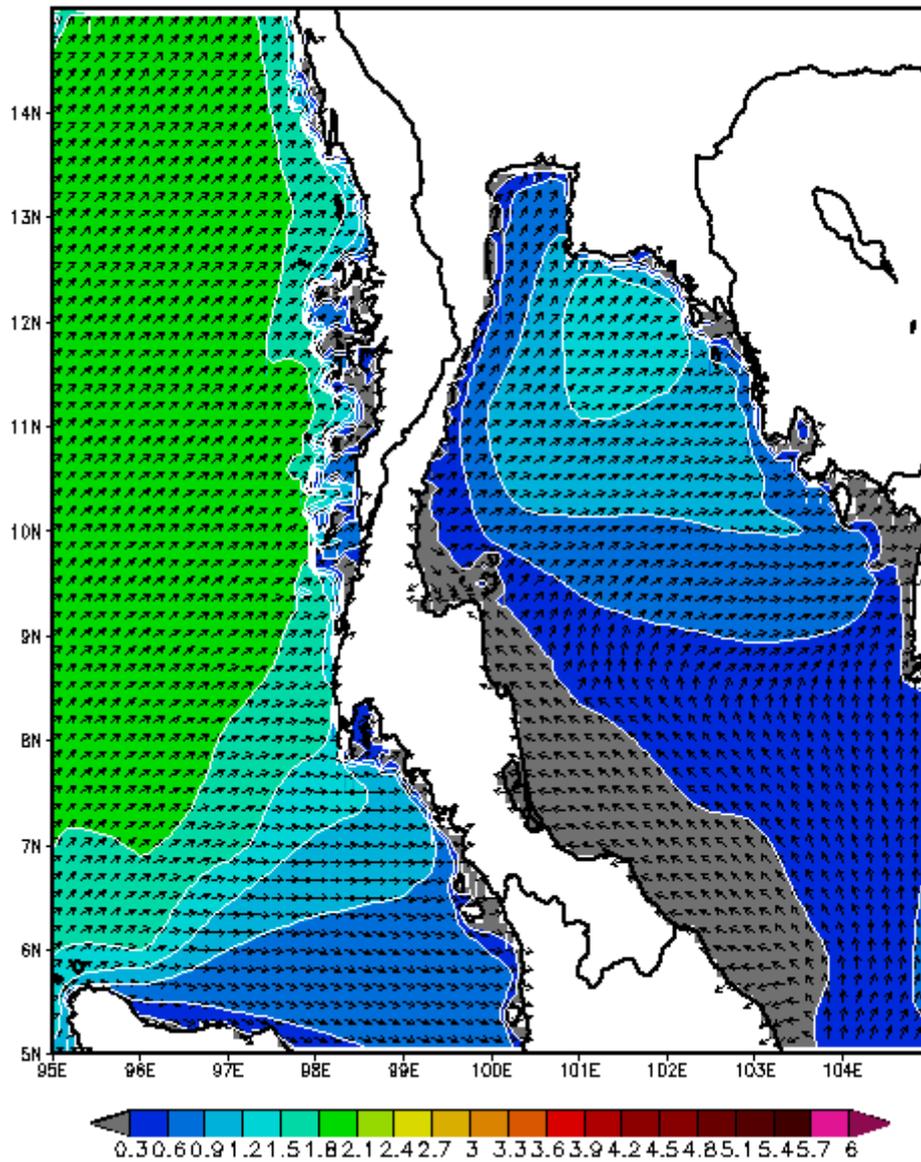
รูปที่ 4.60 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 09.00 ของวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
12Z11JUN2012



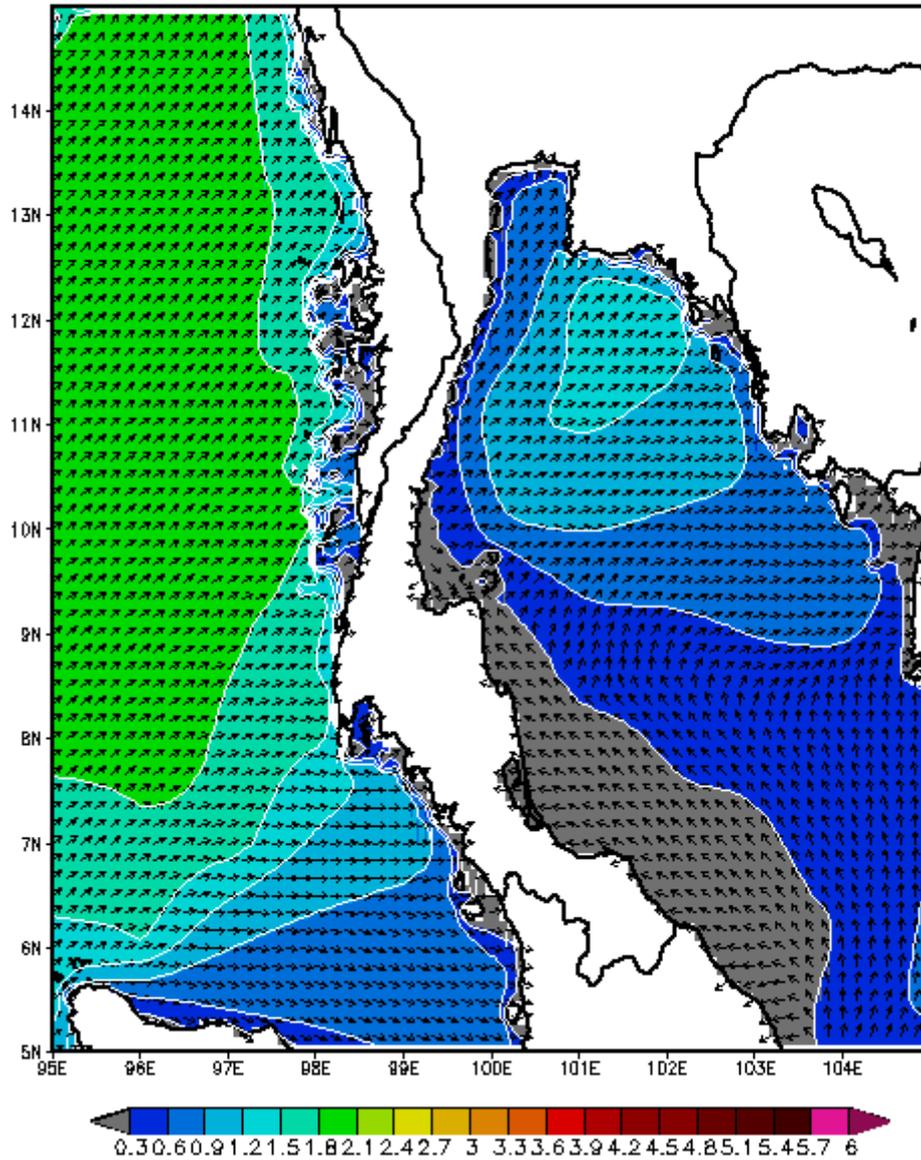
รูปที่ 4.61 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 12.00 ของวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
15Z11JUN2012



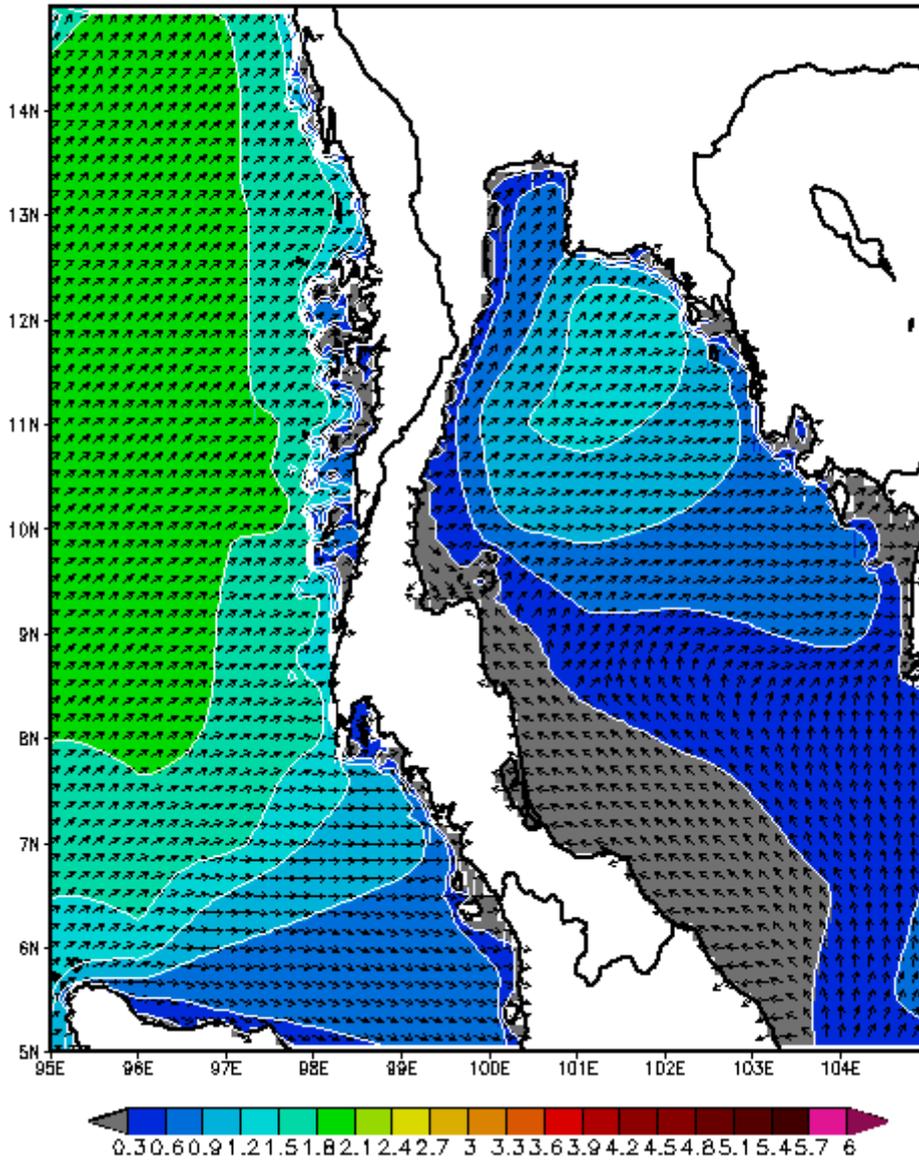
รูปที่ 4.62 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 15.00 ของวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
18Z11JUN2012



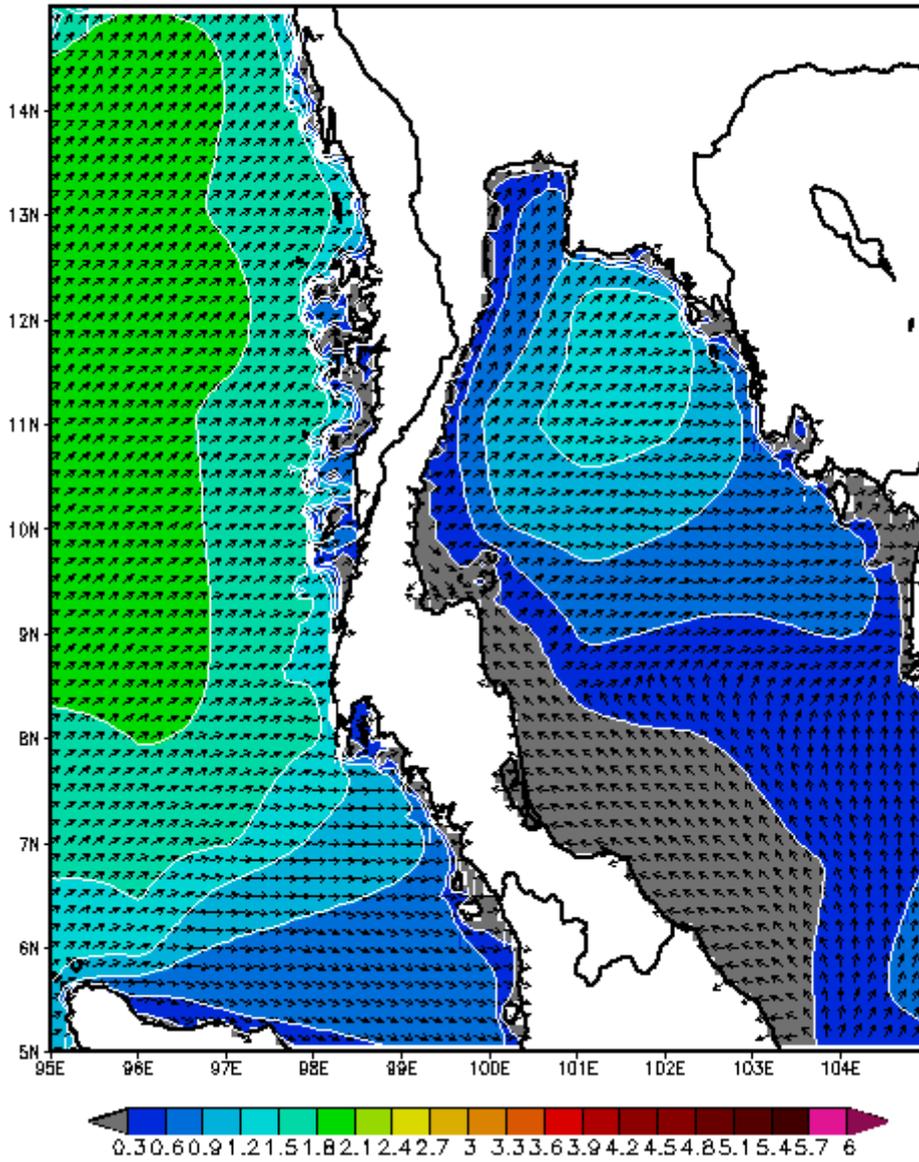
รูปที่ 4.63 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 18.00 ของวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
21Z11JUN2012



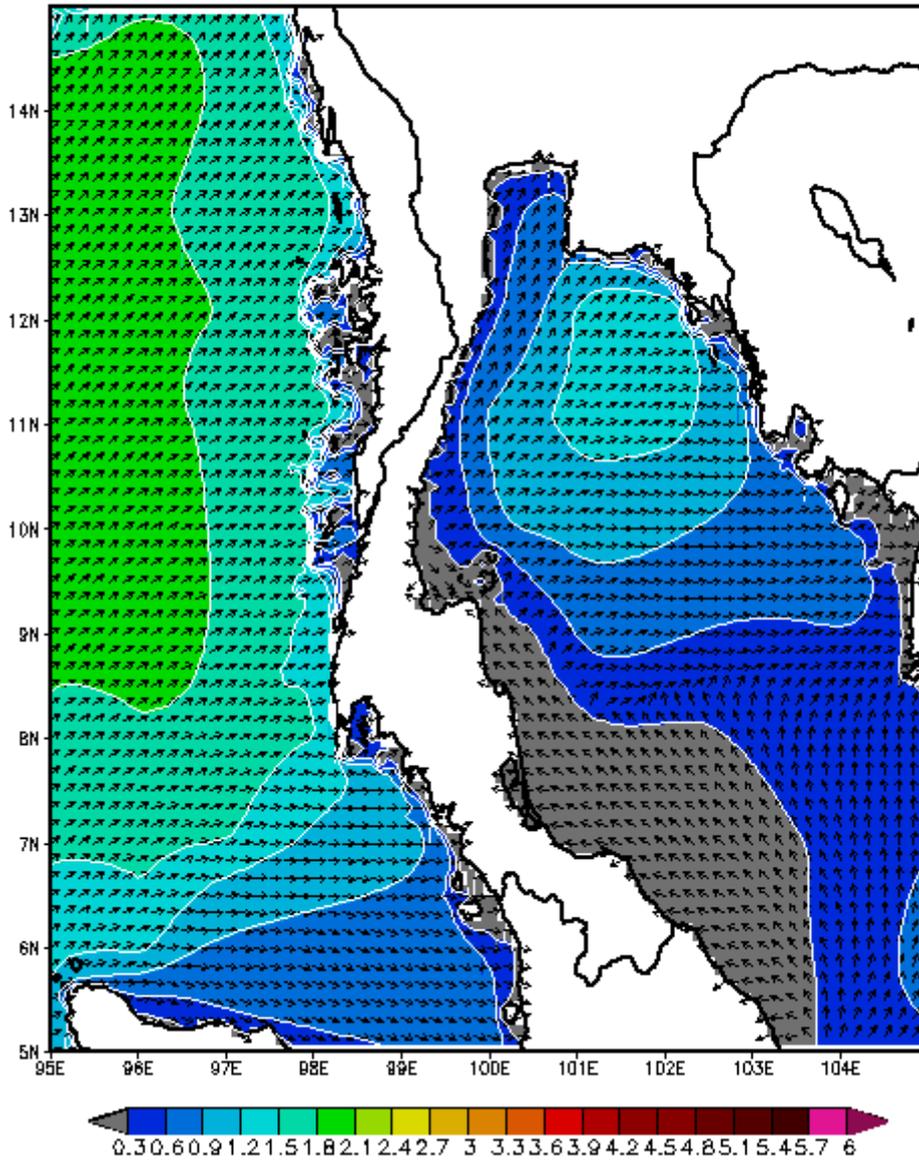
รูปที่ 4.64 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 21.00 ของวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
00Z12JUN2012



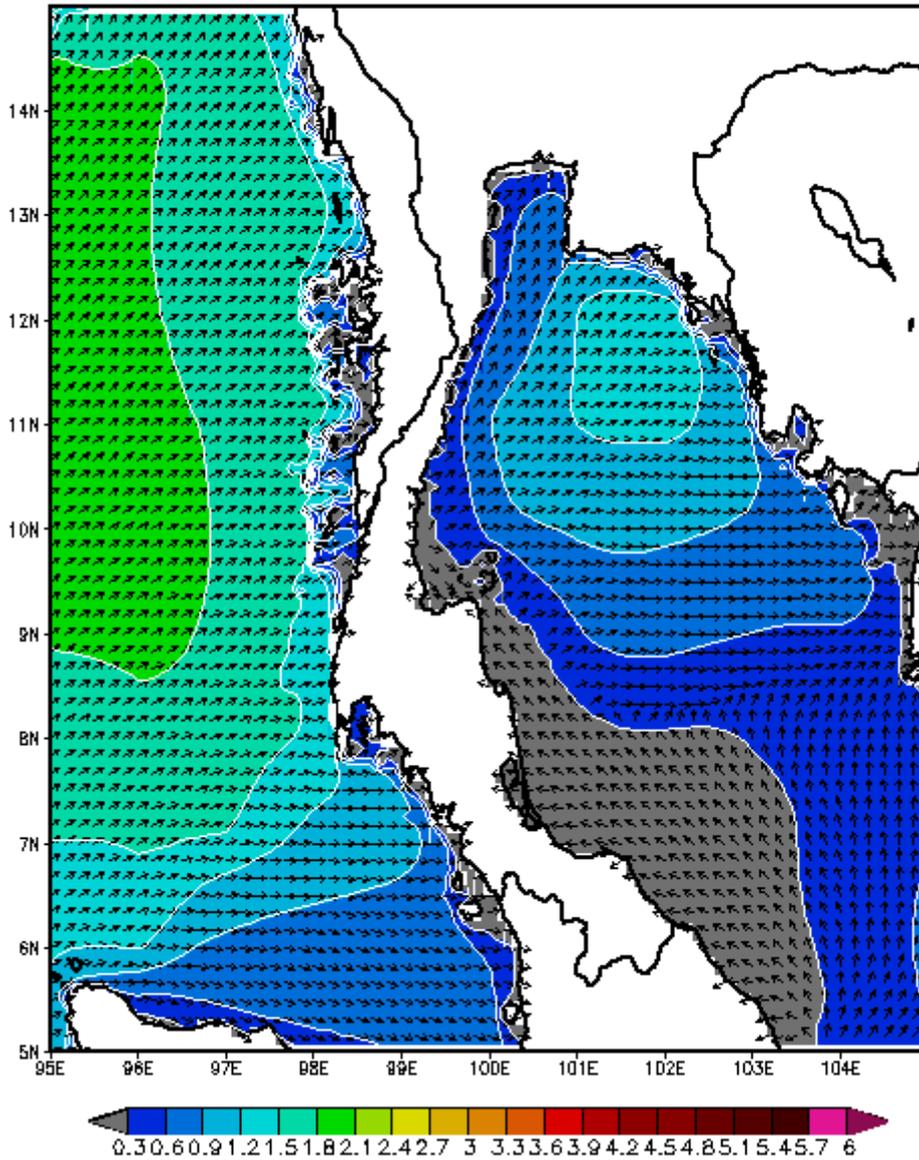
รูปที่ 4.65 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 00.00 ของวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
03Z12JUN2012



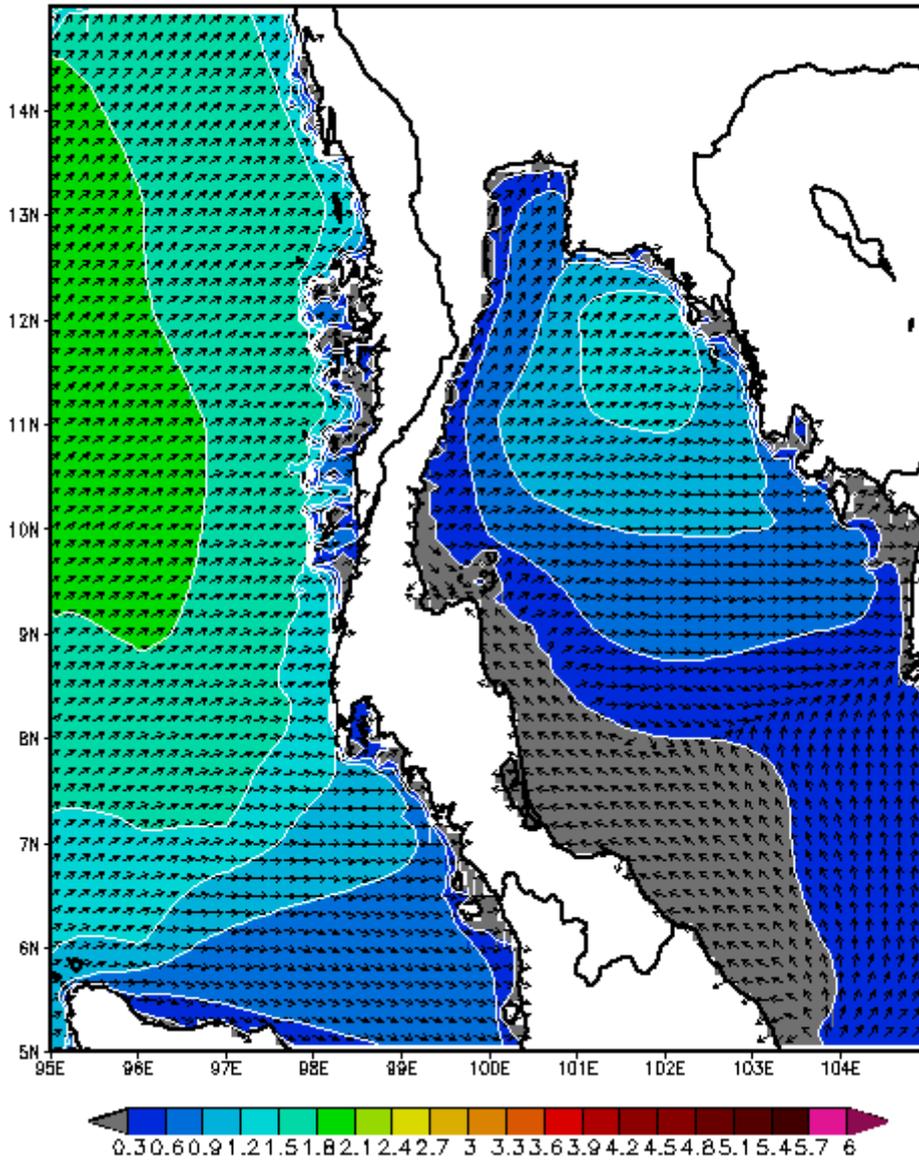
รูปที่ 4.66 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 03.00 ของวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
06Z12JUN2012



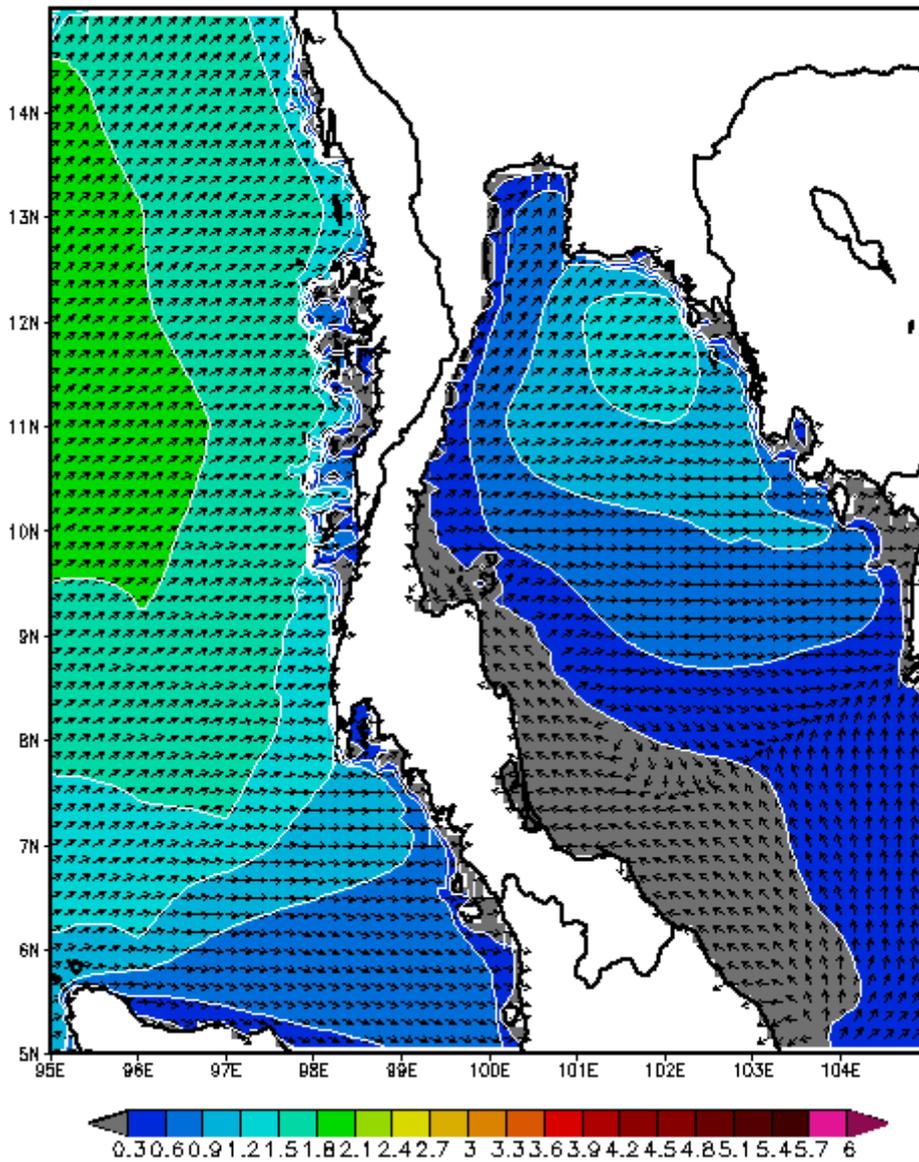
รูปที่ 4.67 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 06.00 ของวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
09Z12JUN2012



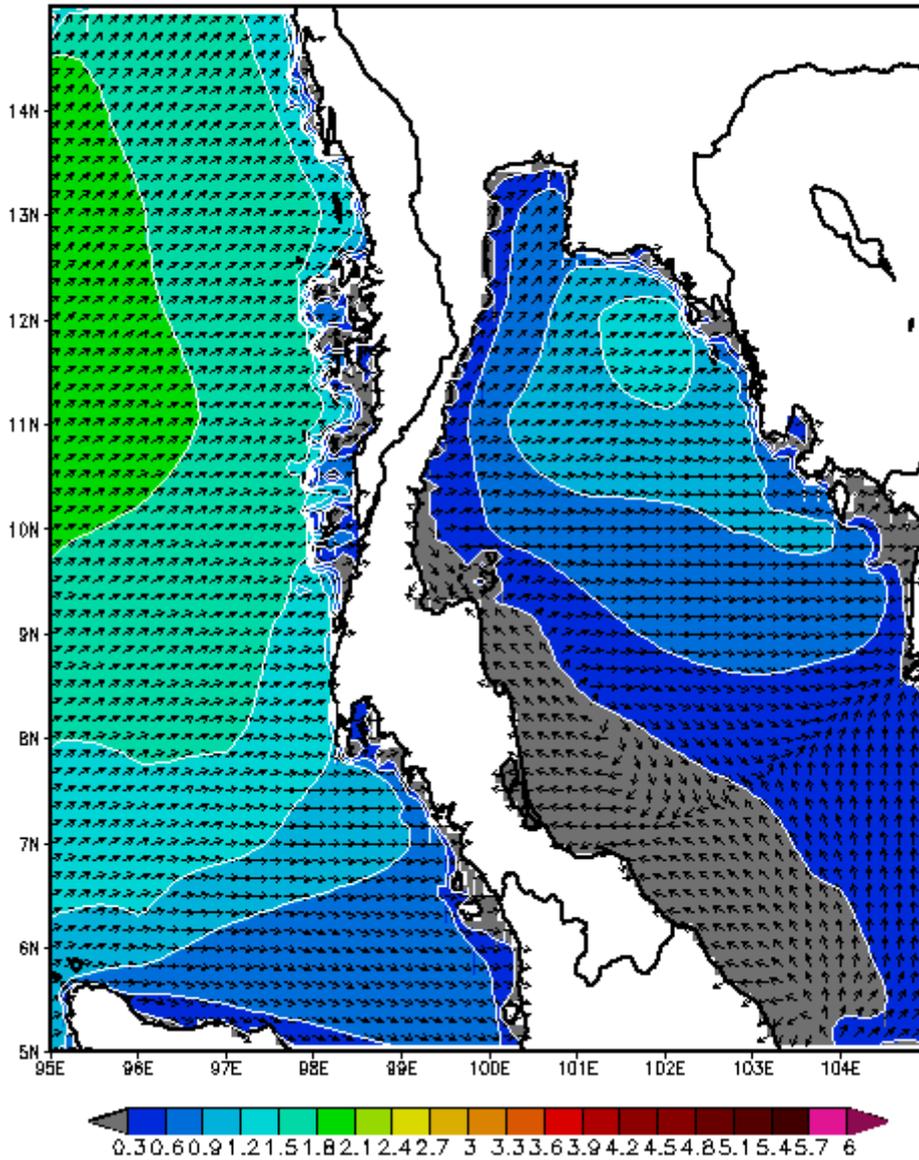
รูปที่ 4.68 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 09.00 ของวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
12Z12JUN2012



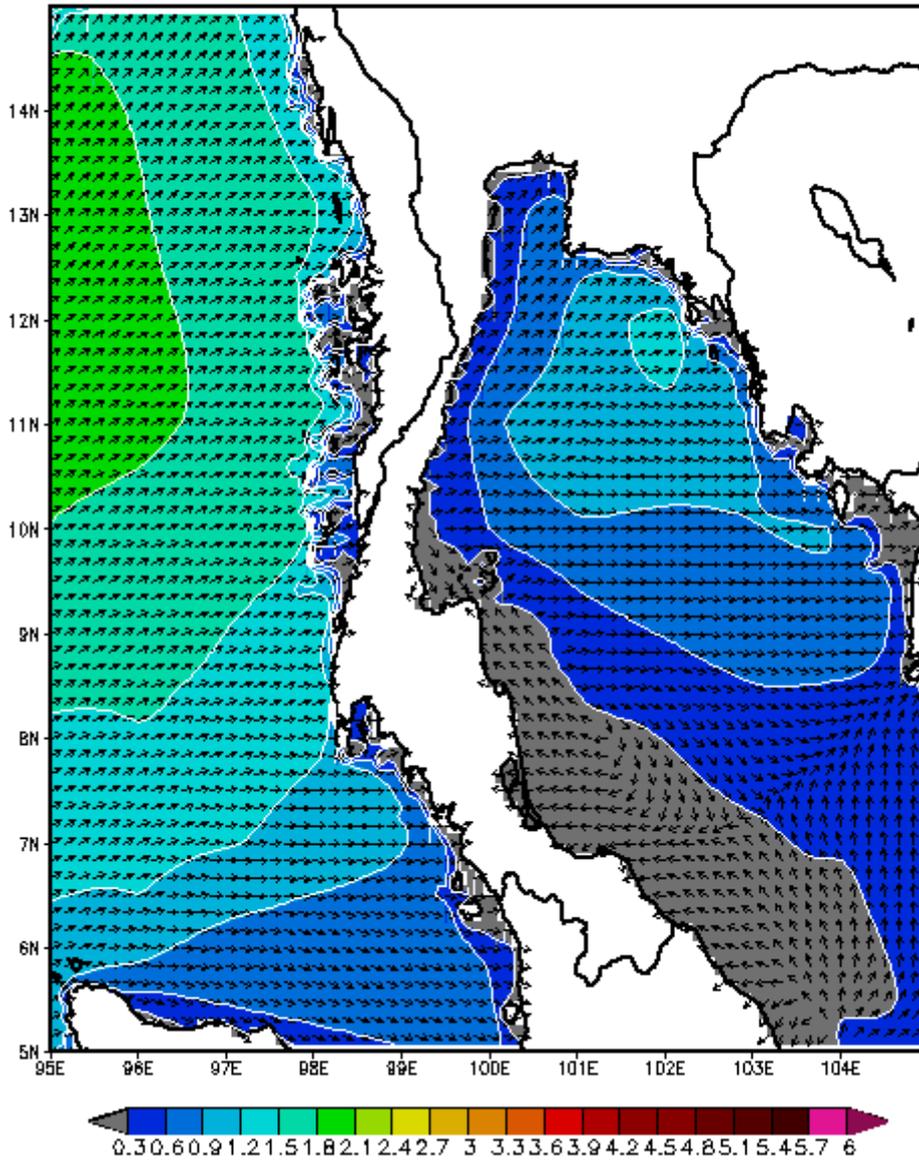
รูปที่ 4.69 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 12.00 ของวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
15Z12JUN2012



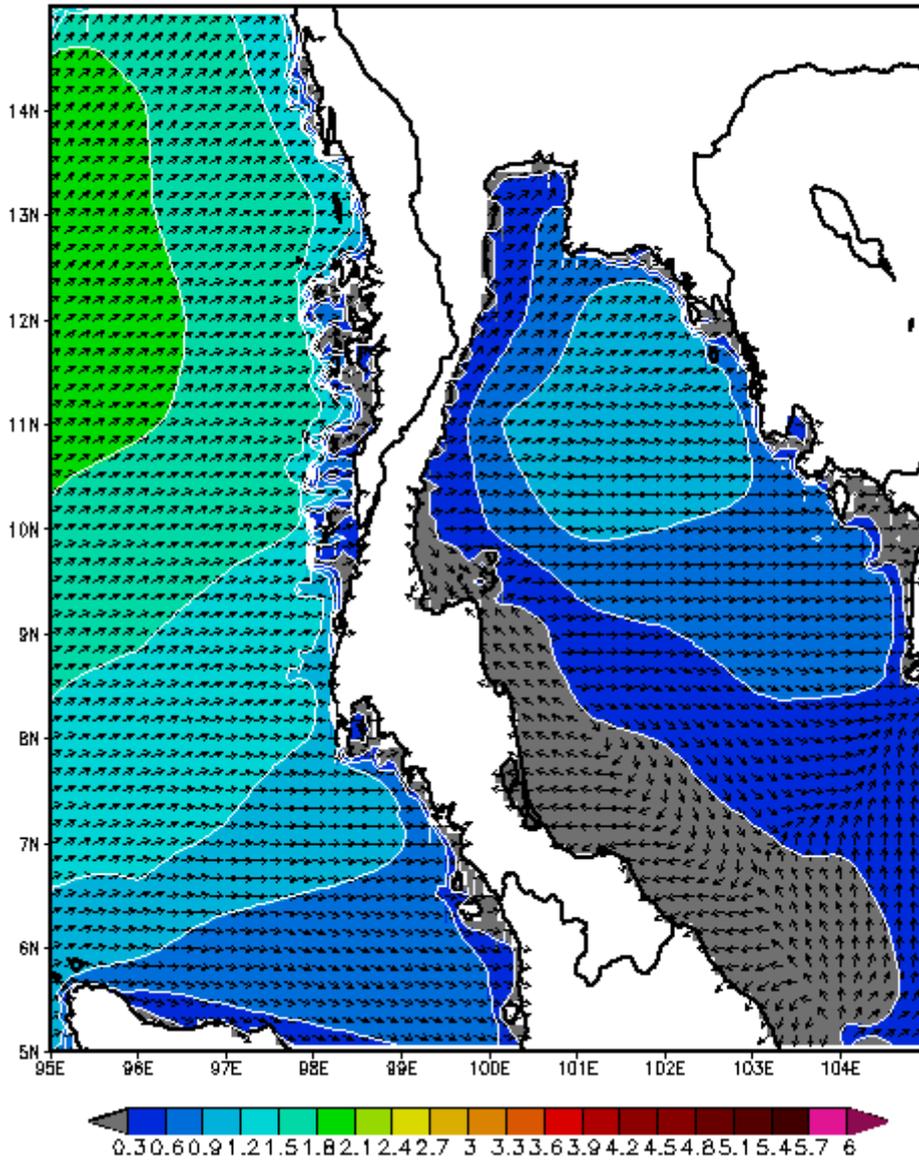
รูปที่ 4.70 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 15.00 ของวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
18Z12JUN2012



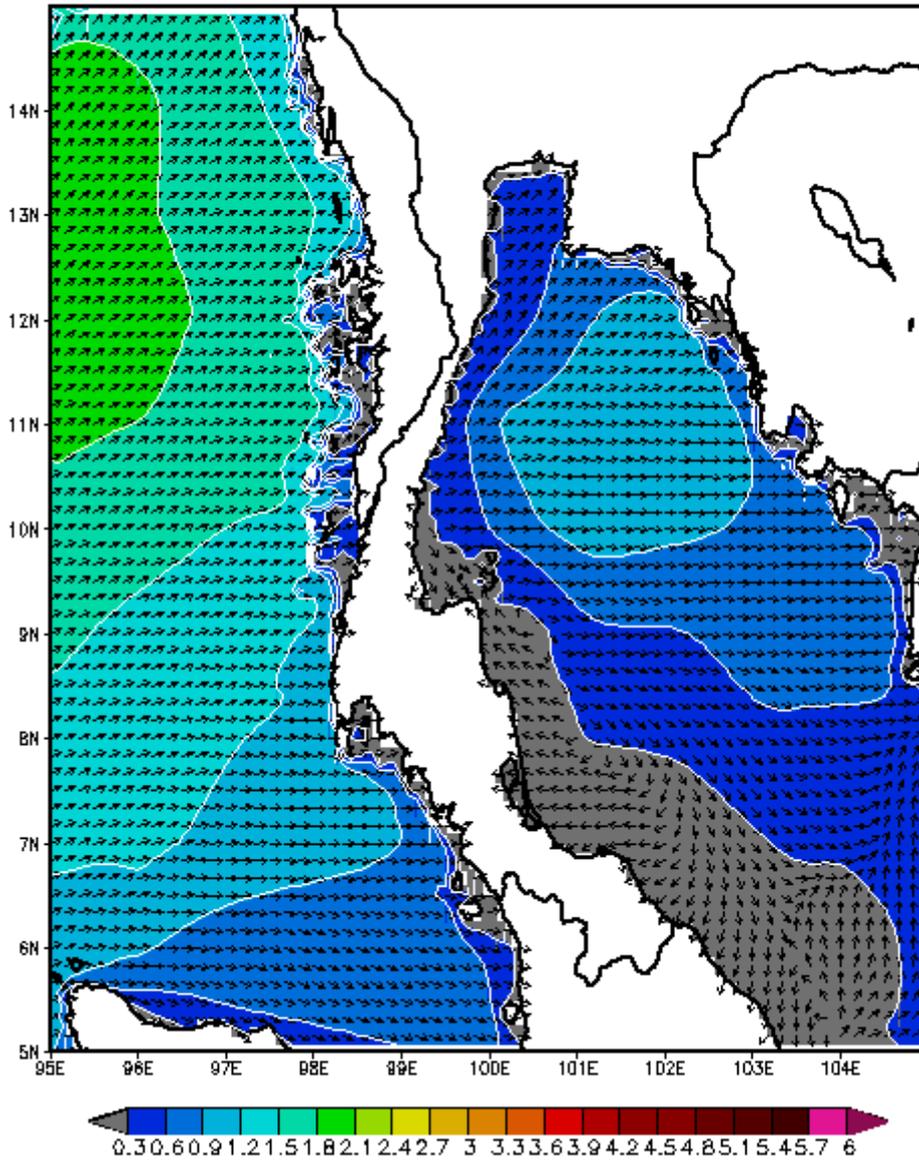
รูปที่ 4.71 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 18.00 ของวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
21Z12JUN2012



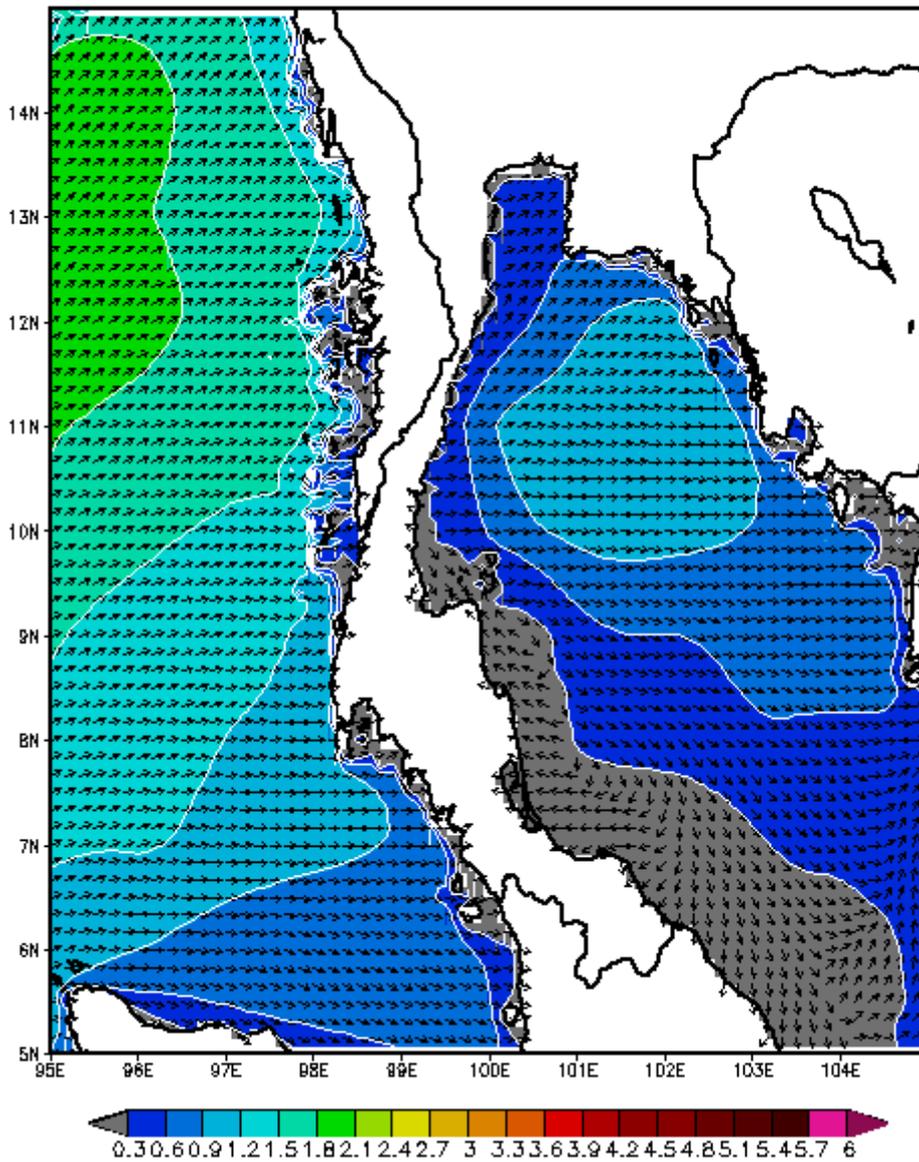
รูปที่ 4.72 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 21.00 ของวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
00Z13JUN2012



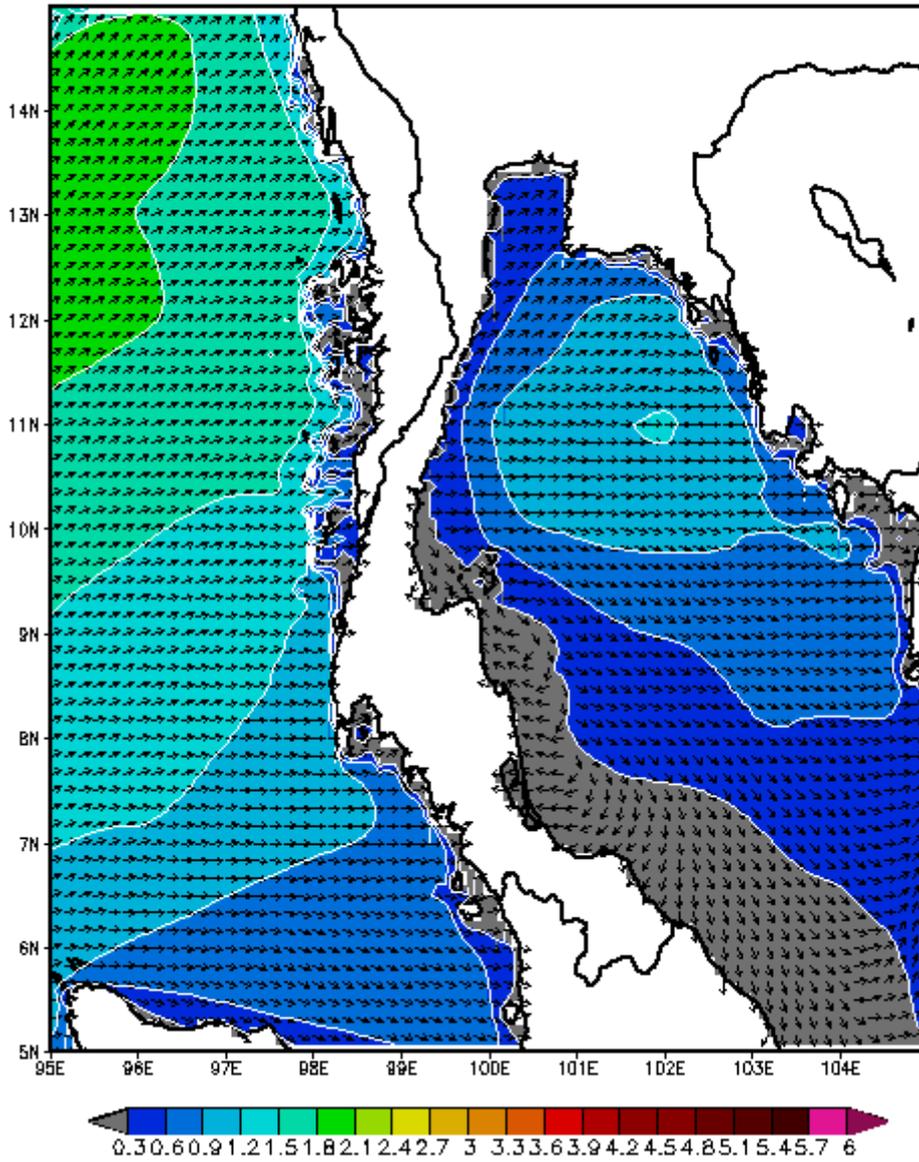
รูปที่ 4.73 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 00.00 ของวันที่ 13 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
03Z13JUN2012



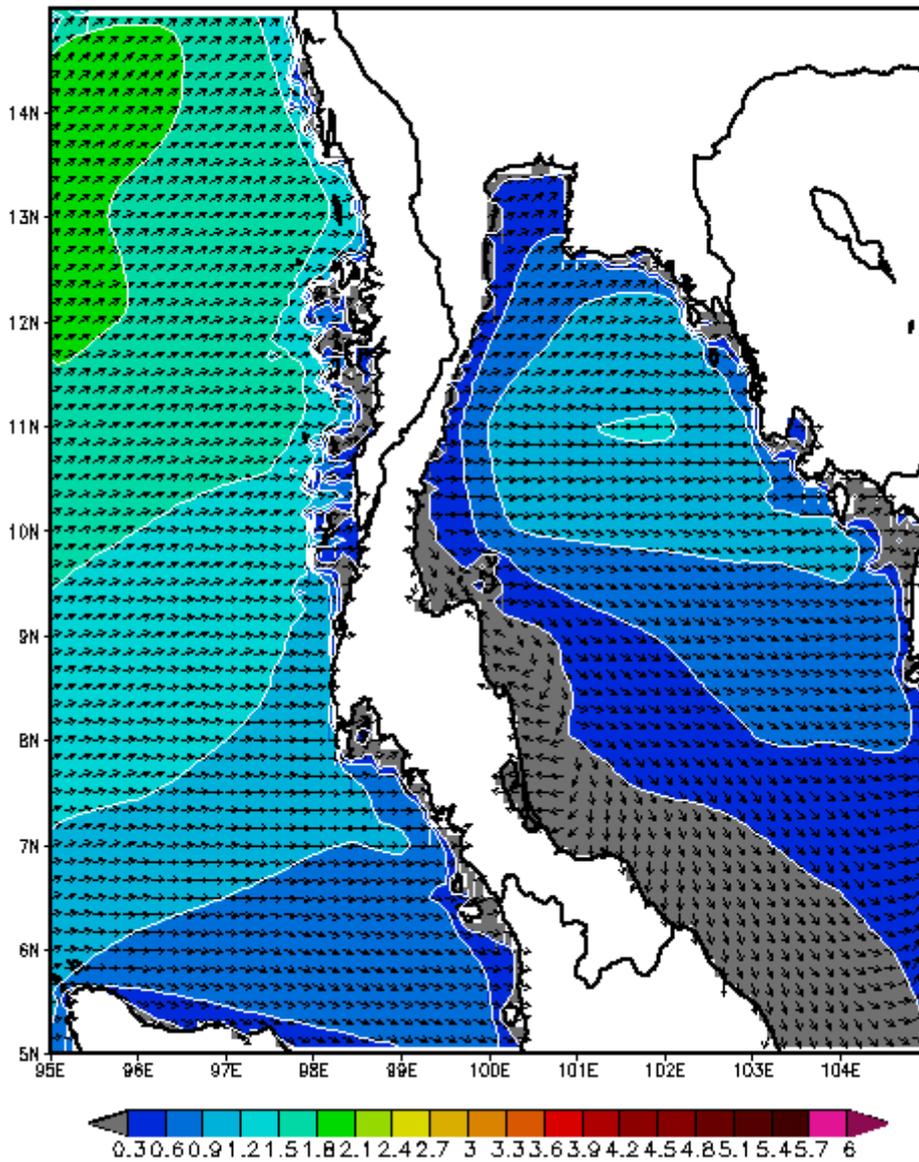
รูปที่ 4.74 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 03.00 ของวันที่ 13 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
06Z13JUN2012



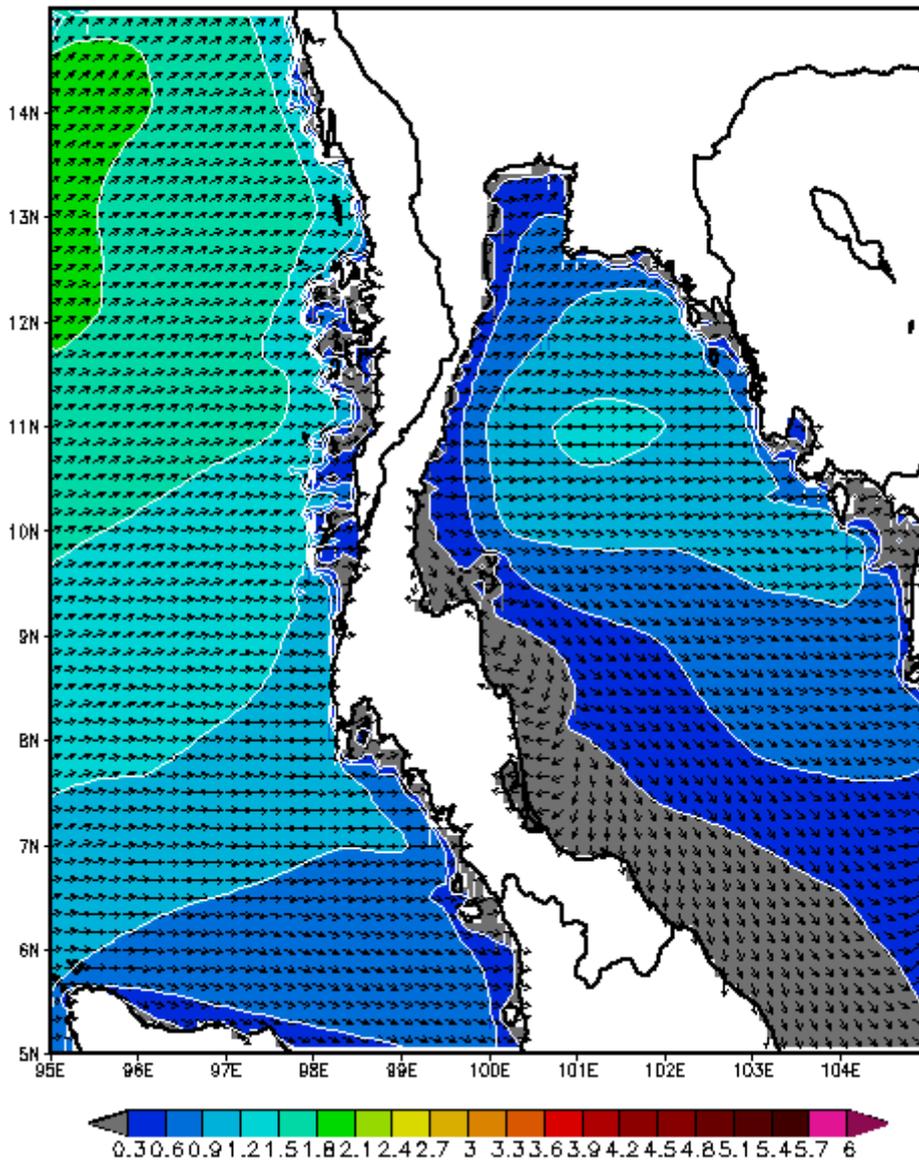
รูปที่ 4.75 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 06.00 ของวันที่ 13 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
09Z13JUN2012



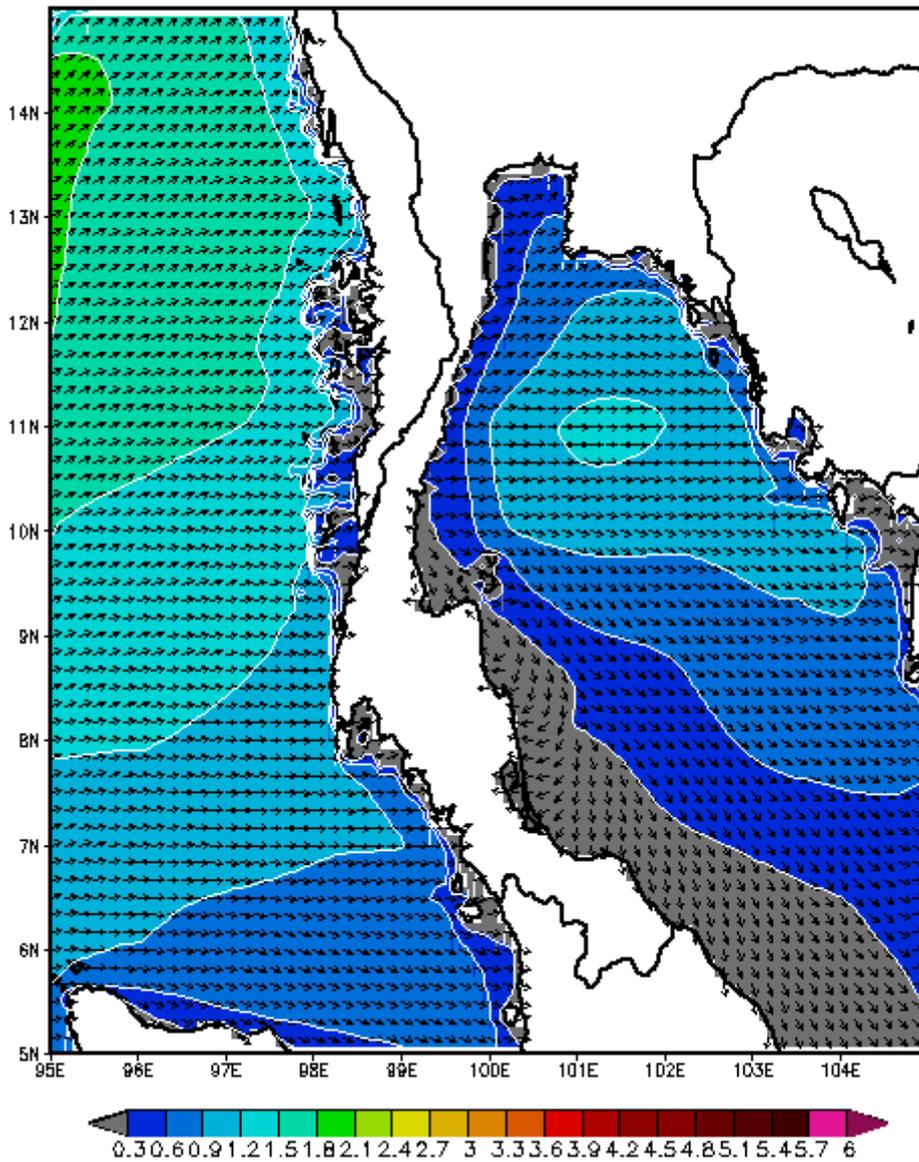
รูปที่ 4.76 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 09.00 ของวันที่ 13 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

**WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
12Z13JUN2012**



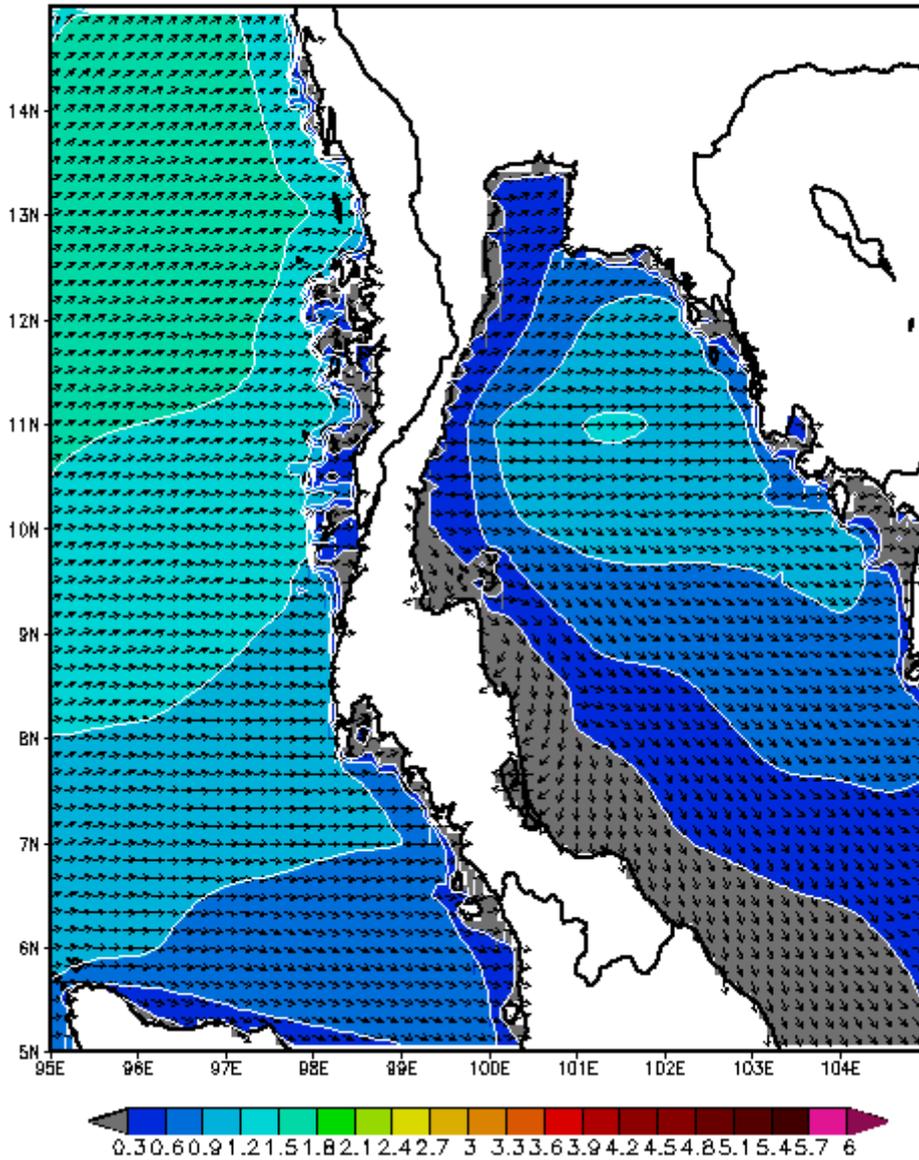
รูปที่ 4.77 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 12.00 ของวันที่ 13 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
15Z13JUN2012



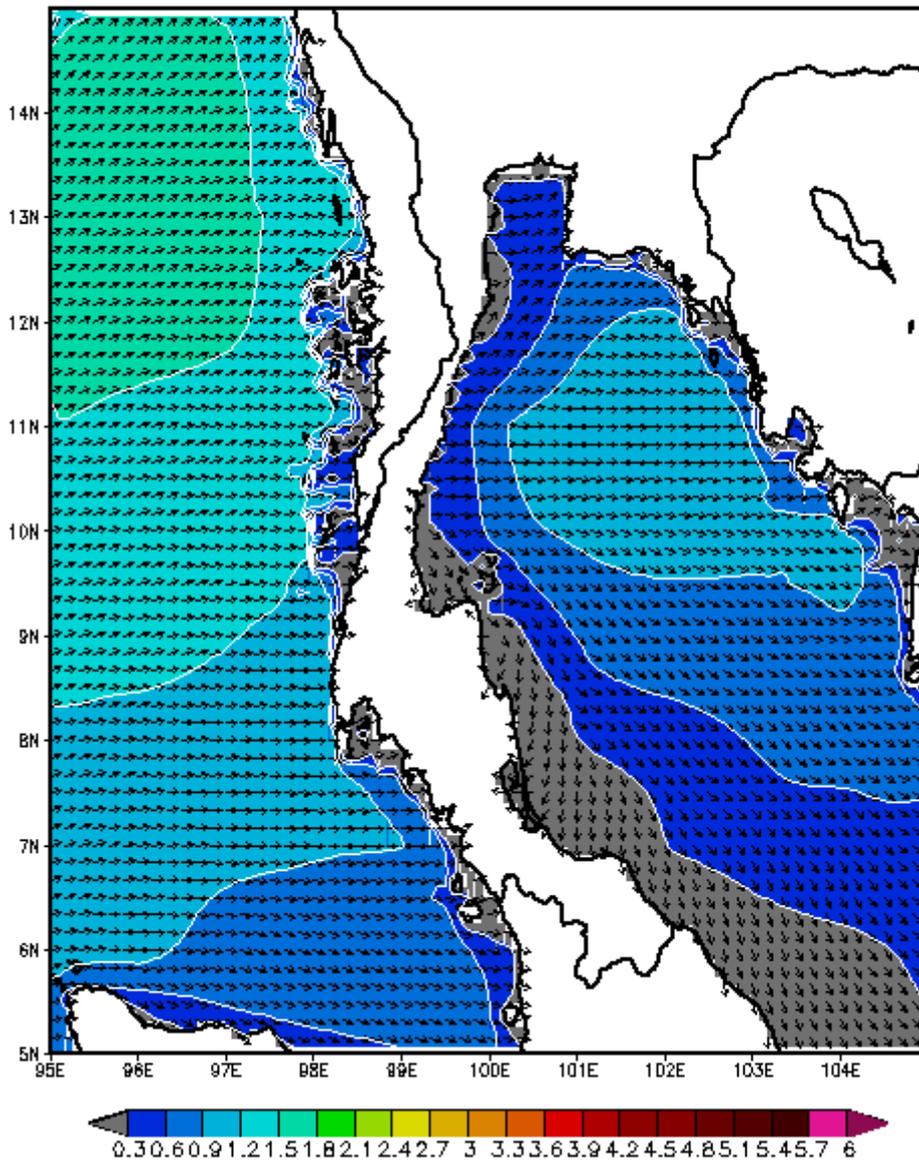
รูปที่ 4.78 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 15.00 ของวันที่ 13 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
18Z13JUN2012



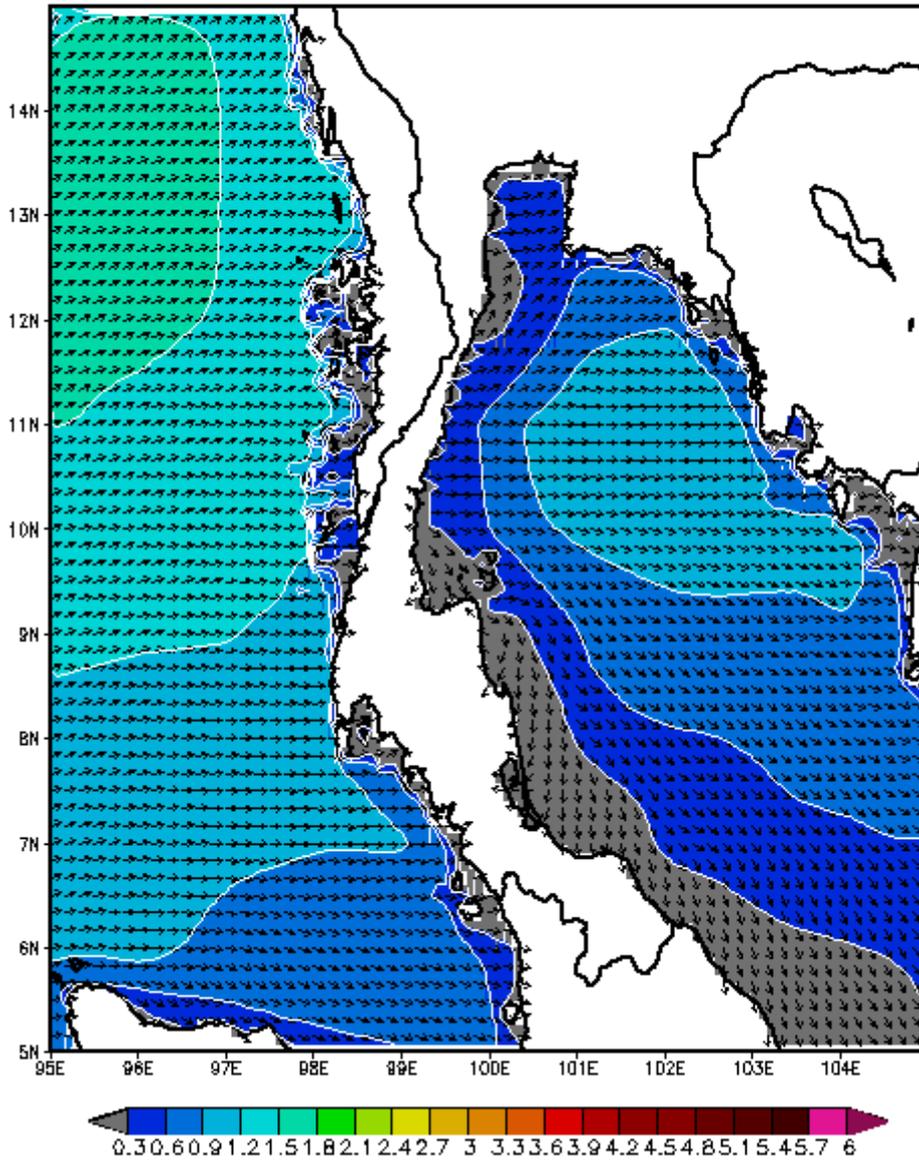
รูปที่ 4.79 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 18.00 ของวันที่ 13 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
21Z13JUN2012



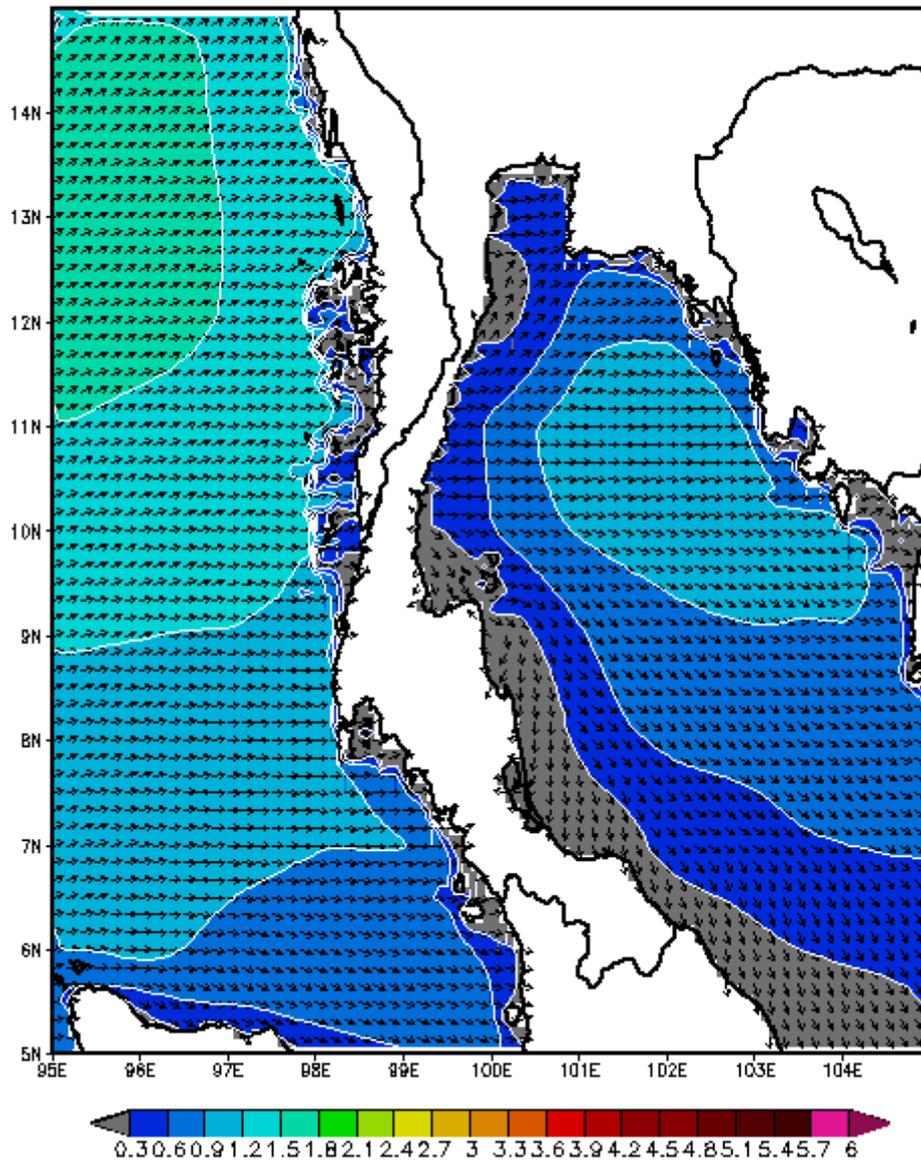
รูปที่ 4.80 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 21.00 ของวันที่ 13 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
00Z14JUN2012



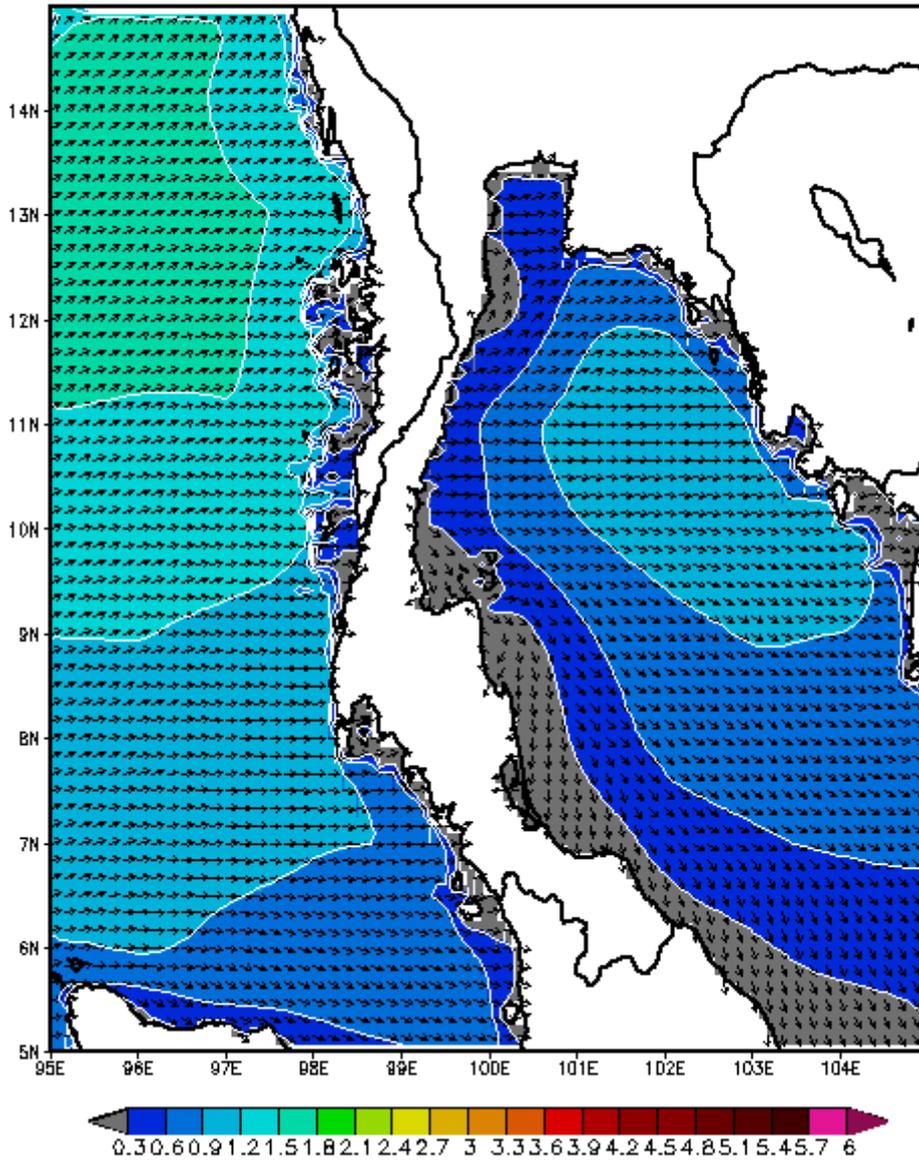
รูปที่ 4.81 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 00.00 ของวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
03Z14JUN2012



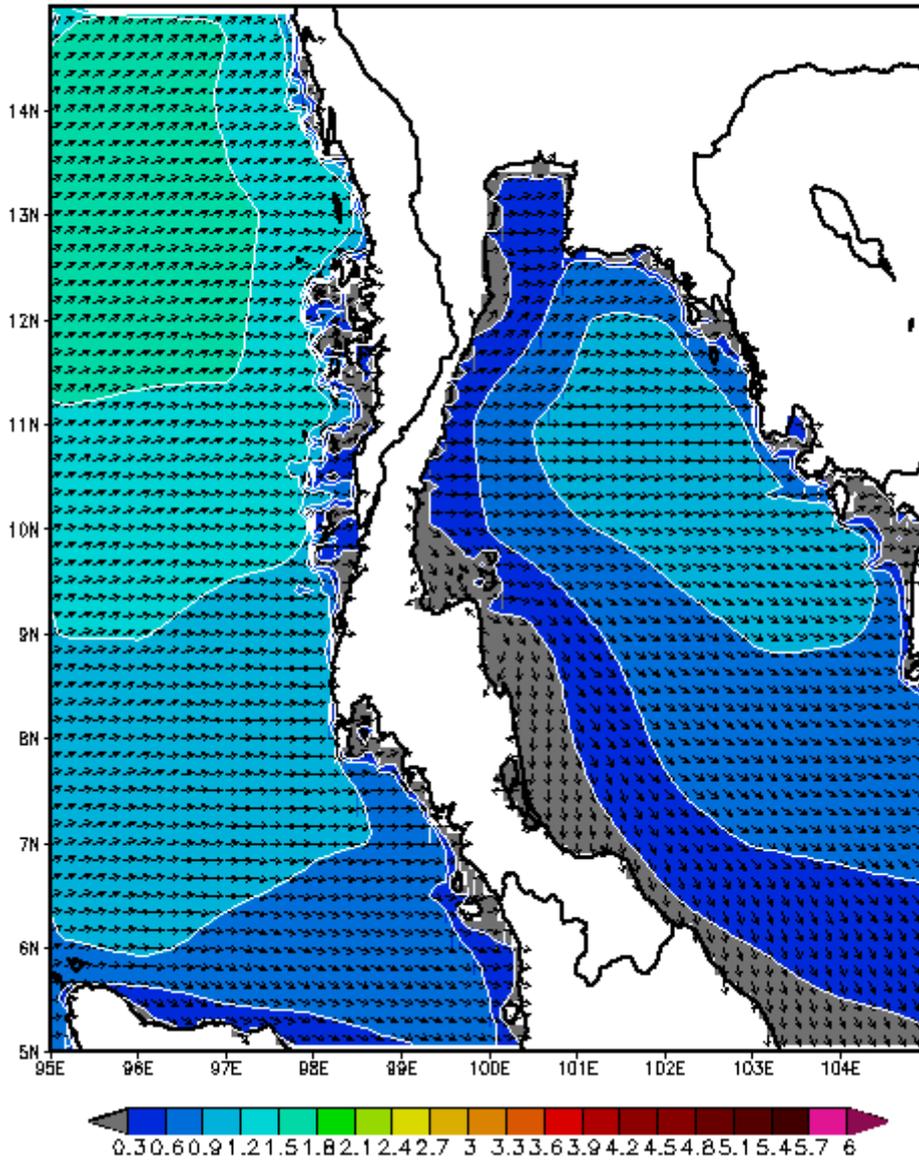
รูปที่ 4.82 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 03.00 ของวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
06Z14JUN2012



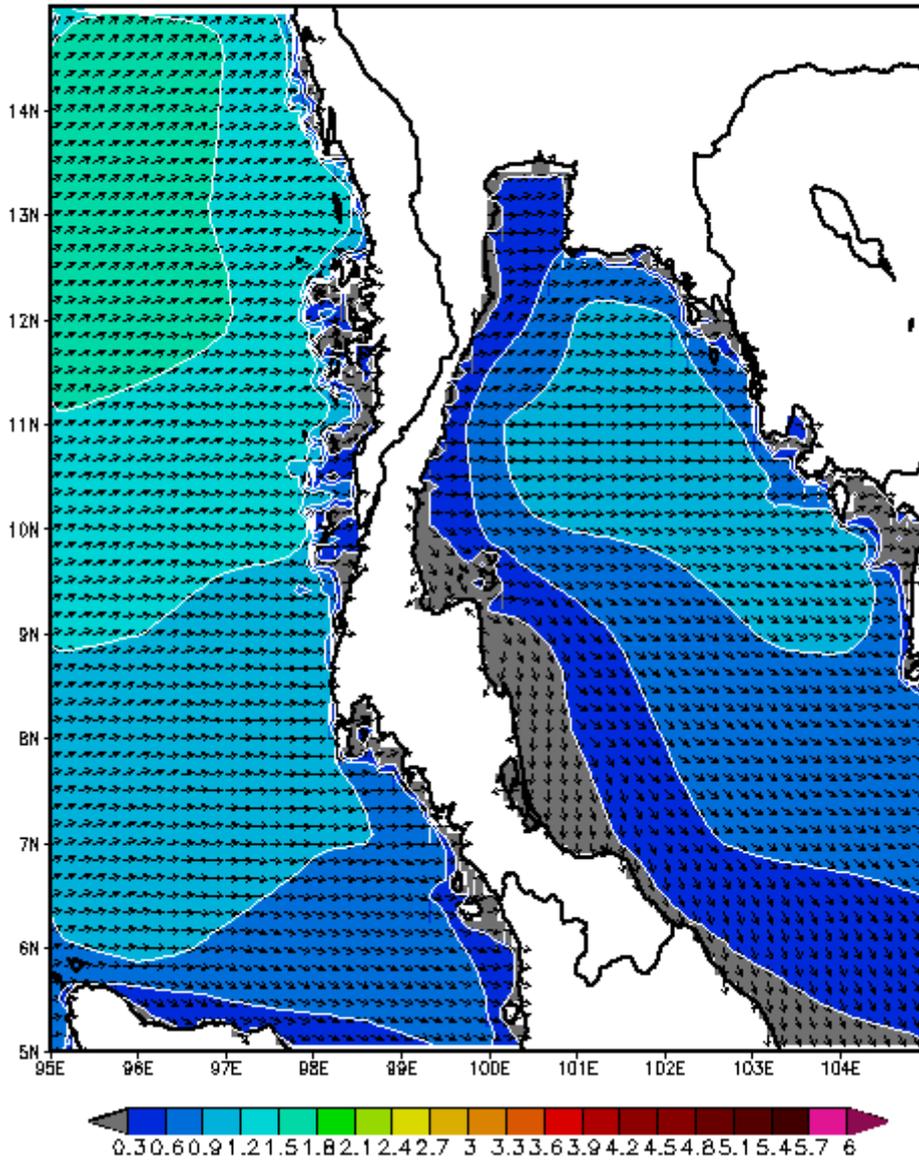
รูปที่ 4.83 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 06.00 ของวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
09Z14JUN2012



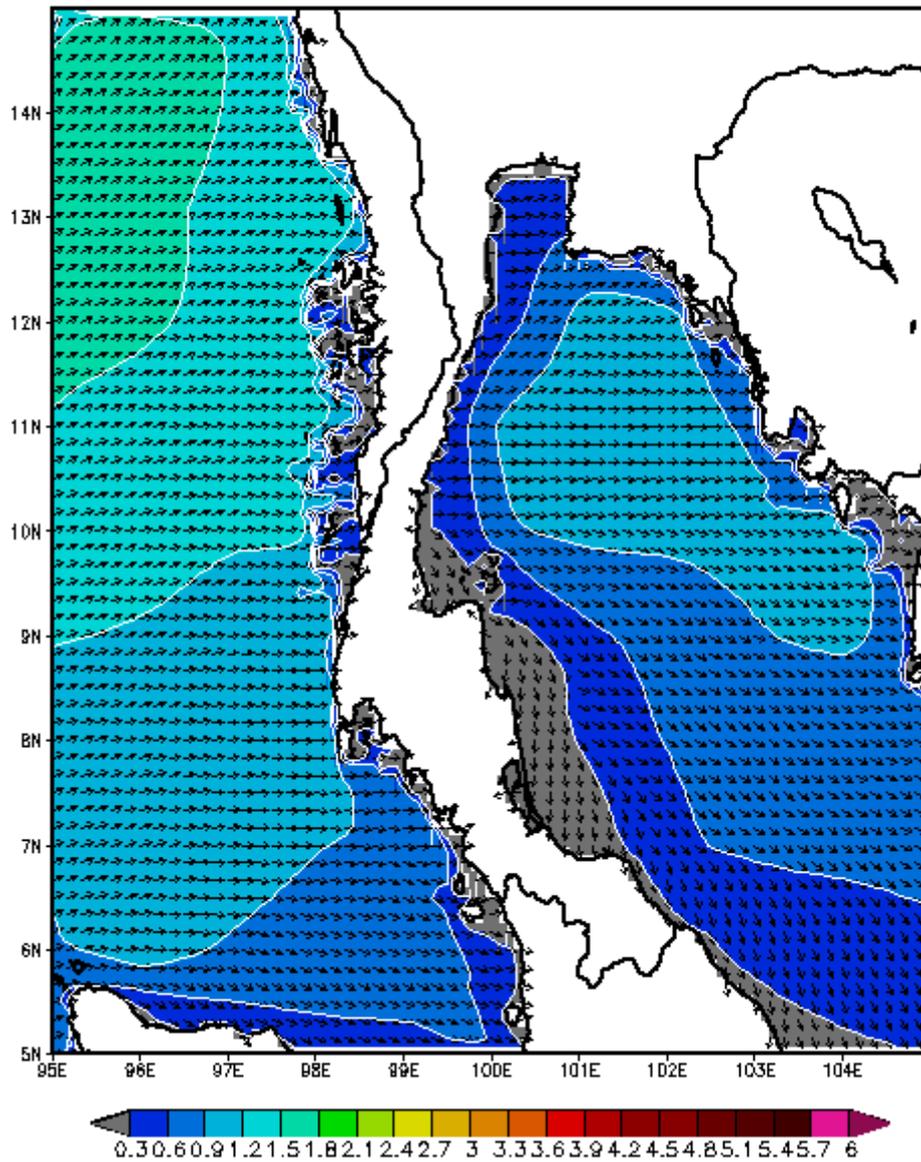
รูปที่ 4.84 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 09.00 ของวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
12Z14JUN2012



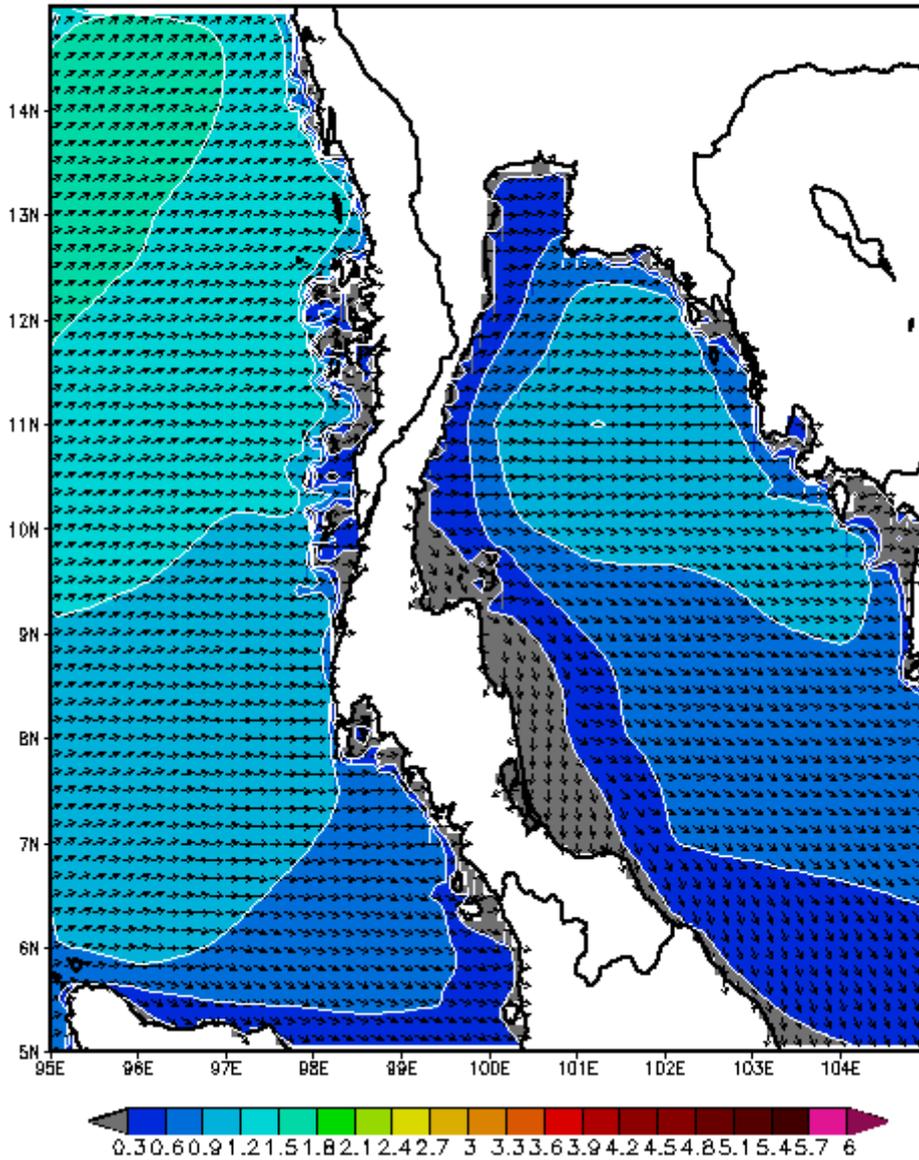
รูปที่ 4.85 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 12.00 ของวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
15Z14JUN2012



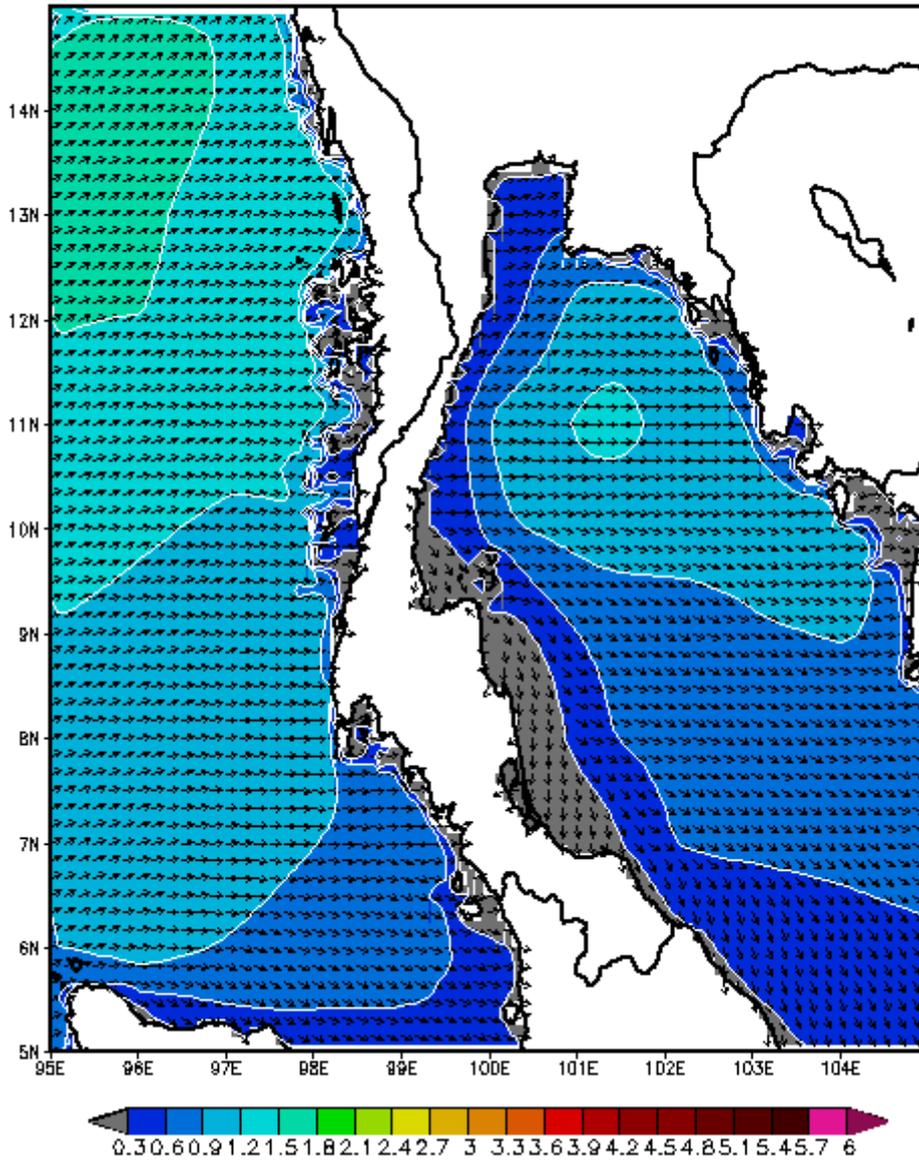
รูปที่ 4.86 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 15.00 ของวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
18Z14JUN2012



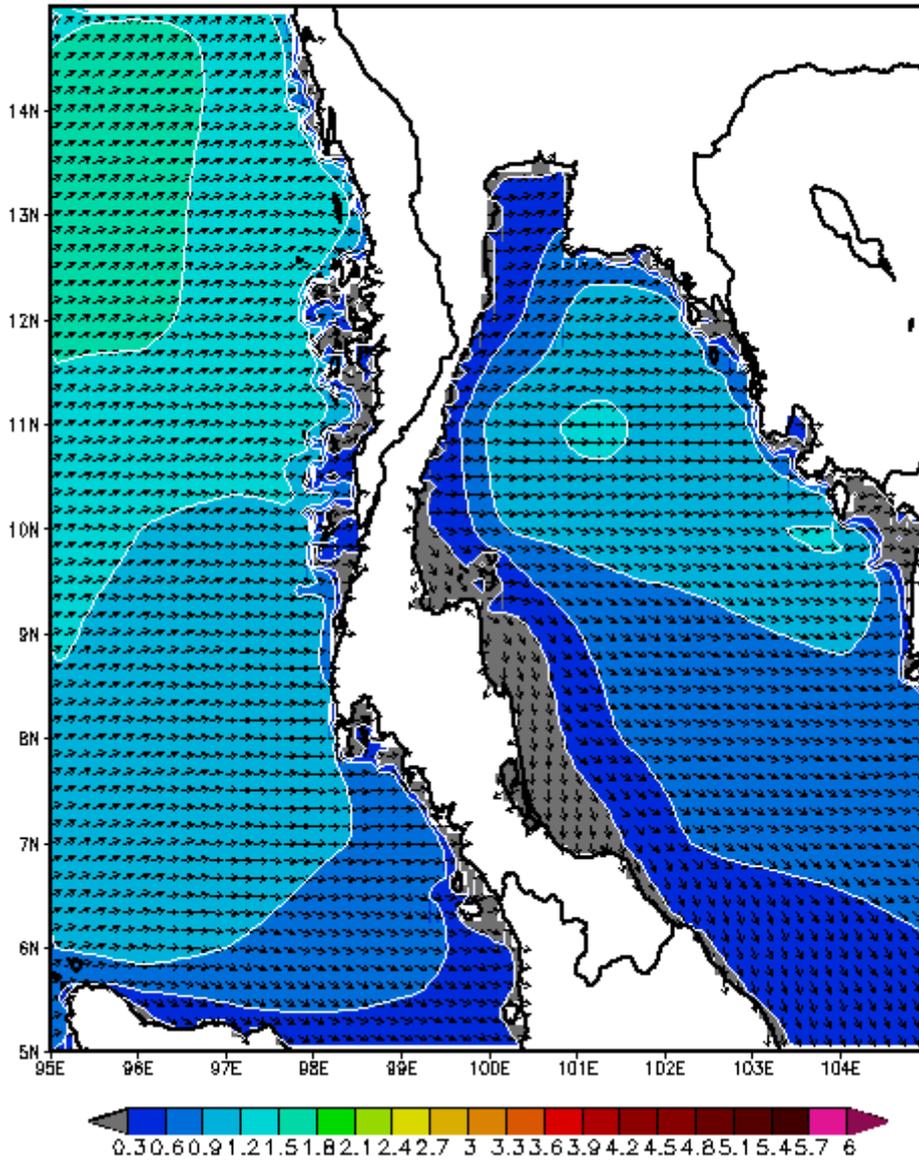
รูปที่ 4.87 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 18.00 ของวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
21Z14JUN2012



รูปที่ 4.88 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 21.00 ของวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

WAM Wave Heights unit Meter
and Directions
00Z15JUN2012



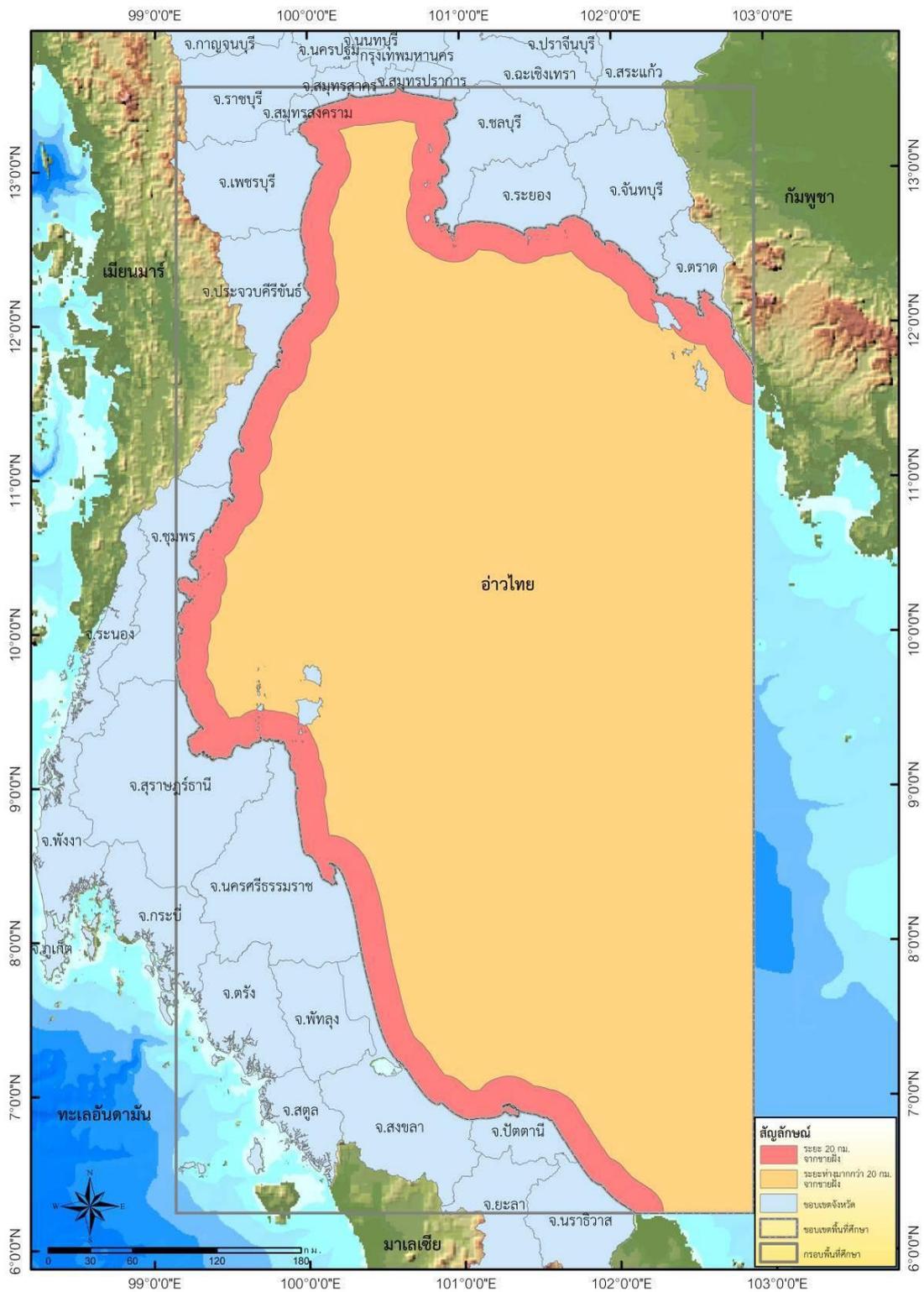
รูปที่ 4.89 แบบจำลองความสูงและทิศทางของคลื่นในทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน
ณ เวลา 00.00 ของวันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2555
ที่มา : ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทางทะเล (www.marine.tme.go.th/thai)

4.2 การใช้ประโยชน์พื้นที่ทางทะเล

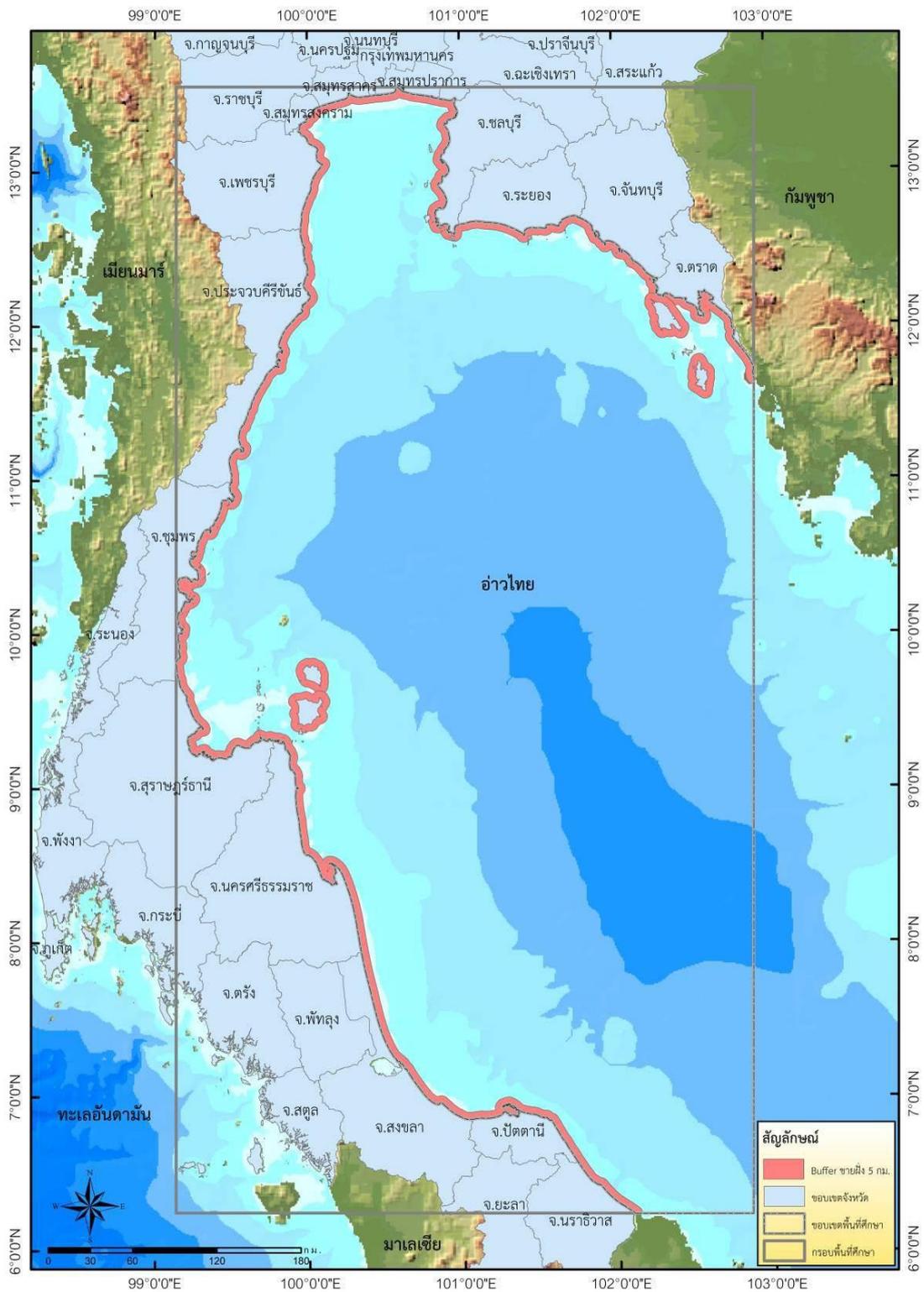
โครงการวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์พื้นที่ที่มีความเป็นไปได้ (Possible Area) ในการพัฒนาโครงการ โดยทำการคัดกรองพื้นที่ต่างๆ ที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้หรือมีผู้มีส่วนได้ส่วนเสียรายอื่นใช้ประโยชน์พื้นที่ทางทะเลออกไปเพื่อลดผลกระทบกับผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทางทะเล ซึ่งได้อาศัยชั้นข้อมูลจำนวน 25 ชั้นข้อมูลแสดงดังรายละเอียดดังตารางที่ 4.3 โดยรูปที่ 4.90-4.112 แสดงแผนที่ทางทะเลของชั้นข้อมูล 22 ชั้นข้อมูลดังกล่าวผลการวิเคราะห์เชิงพื้นที่แสดงให้เห็นพื้นที่หวงห้ามแสดงดังรูปที่ 4.113 และพื้นที่ที่สามารถใช้ประโยชน์จากคลื่นในทะเลแสดงดังรูปที่ 4.114 โดยแสดงระดับความลึกของน้ำทะเลในพื้นที่ศึกษาดังรูปที่ 4.115

ตารางที่ 4.3 ชั้นข้อมูล GIS ของพื้นที่ทางทะเลของโครงการ

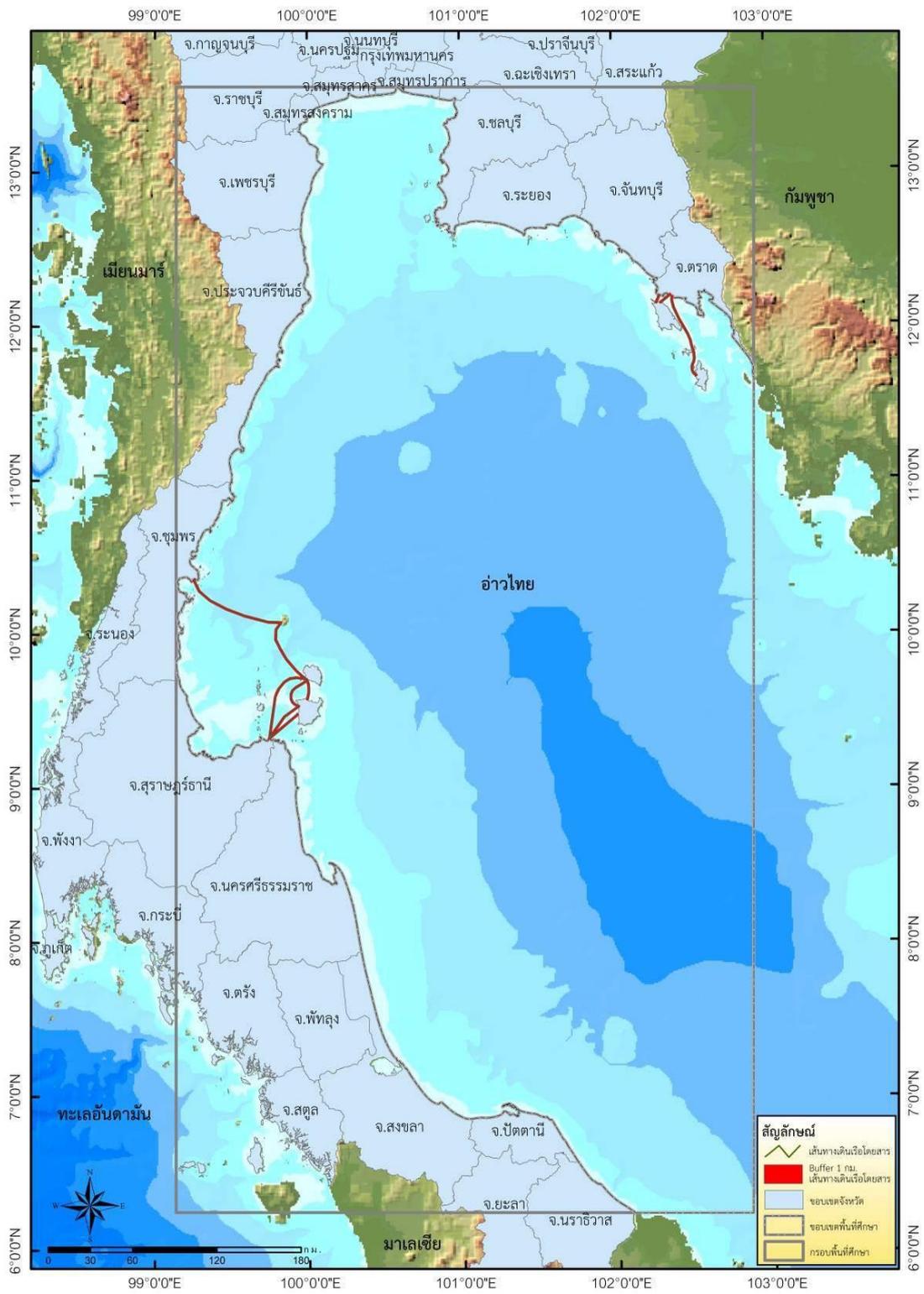
ข้อมูล ที่	ชื่อชั้นข้อมูล	แหล่งข้อมูล
1	แผนที่ฐาน (พื้นที่การศึกษา) มาตราส่วน 1:50,000	กรมแผนที่ทหาร กองบัญชาการกองทัพไทย
2	Bathymetry (ระดับความลึกของน้ำทะเล)	ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทะเลและกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ
3	ธรณีวิทยาทางทะเล มาตราส่วน 1: 250,000	กรมทรัพยากรธรณี
4	น้ำขึ้น น้ำลง สูงสุด ต่ำสุด	กรมอุทกศาสตร์
5	ความสูงของคลื่น	กรมอุทกศาสตร์
6	แนวทางเดินพายุ ย้อนหลัง 50 ปี (ค.ศ. 2010 - 1960)	กรมอุตุนิยมวิทยา
7	หินโสโครก ร่องน้ำเดินเรือ เรือจม และเลนดินโคลน	พาณิชย์นาวี
8	ประมงชายฝั่ง	กรมประมง
9	ท่าเรือพาณิชย์ ท่าเรือประมง	พาณิชย์นาวี กรมประมง
10	แนวปะการัง	กรมอุทยานทางทะเล
11	พื้นที่ฝึกทางทหาร	กองทัพเรือ
12	สนามบินและเส้นทางการบิน	กรมการขนส่งทางอากาศ วิทยุการบิน
13	ชายหาดแหล่งท่องเที่ยว	การท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย
14	พื้นที่อนุรักษ์ทางทะเล/ป่าชายเลน/พื้นที่ชุ่มน้ำ	กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง
15	พื้นที่สำรวจและสัมปทานก๊าซธรรมชาติและตำแหน่งแท่นขุดเจาะ	บริษัท ปตท. สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)
16	แนวเคเบิลใต้น้ำ การสื่อสารแห่งประเทศไทย	การสื่อสารแห่งประเทศไทย
17	แนวเคเบิลใต้น้ำระดับแรงดัน 115 k V	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
18	แนวสายส่งไฟฟ้าระดับแรงดัน 115 k V	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
19	สถานีตรวจอากาศและเรดาร์	กรมอุตุนิยมวิทยา
20	ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การไฟฟ้าฝ่ายผลิต
21	ถนน 4 เลน และถนน 2 เลน	กรมทางหลวง
22	ทางน้ำ ระบบชลประทาน, ประตูน้ำ, ระบายน้ำที่ออกสู่ชายฝั่ง	กรมชลประทาน โครงการลุ่มน้ำปากพนัง
23	หญ้าทะเล	กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง
24	ระดับน้ำทะเลสูงสุด-ต่ำสุด	กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ
25	แนวทางเดินพายุรายเดือน	กรมอุตุนิยมวิทยา



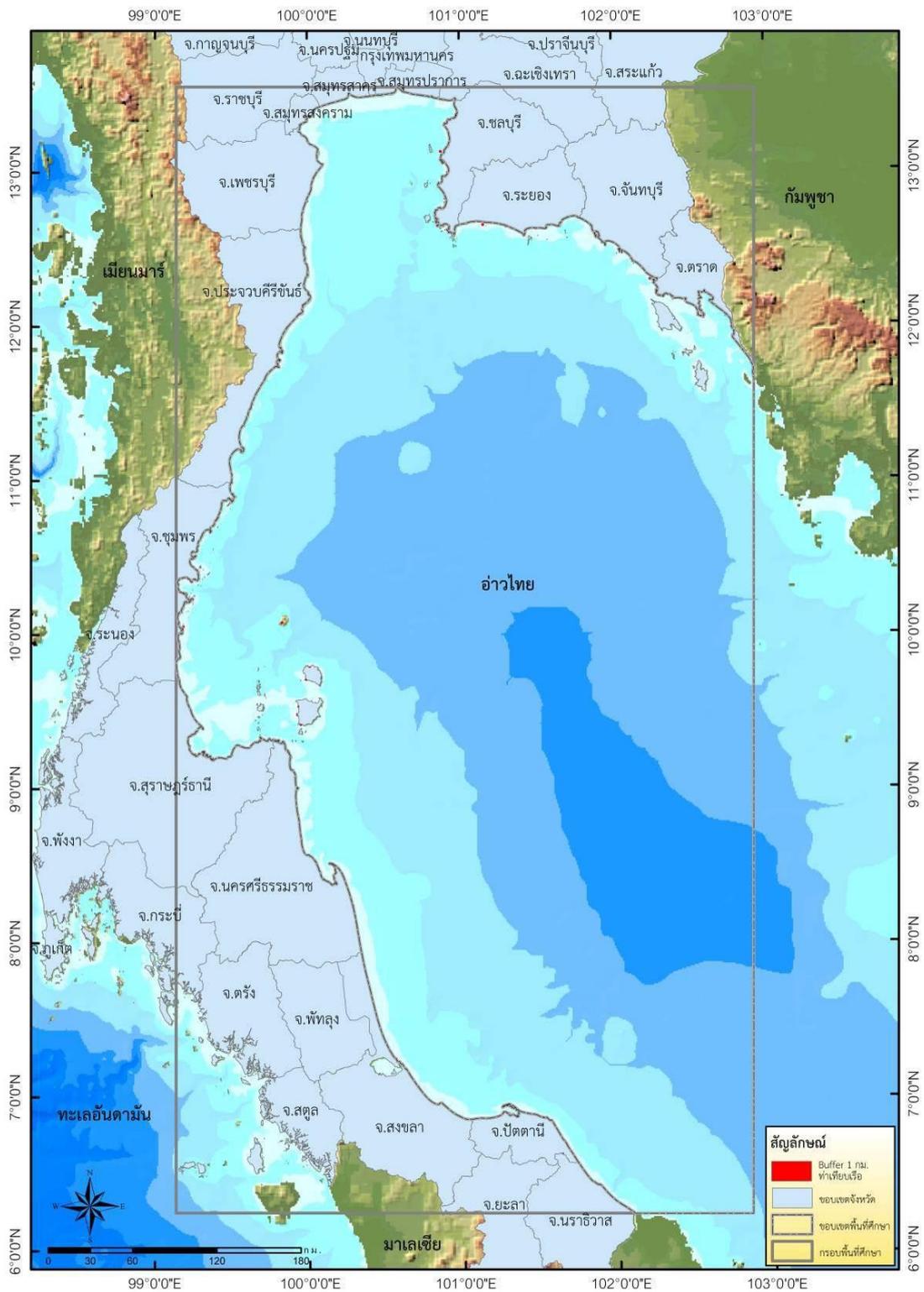
รูปที่ 4.91 พื้นที่ใกล้ชายฝั่งทะเลระยะห่างจากแนวชายฝั่งทะเล 20 km และห่างมากกว่า 20 km



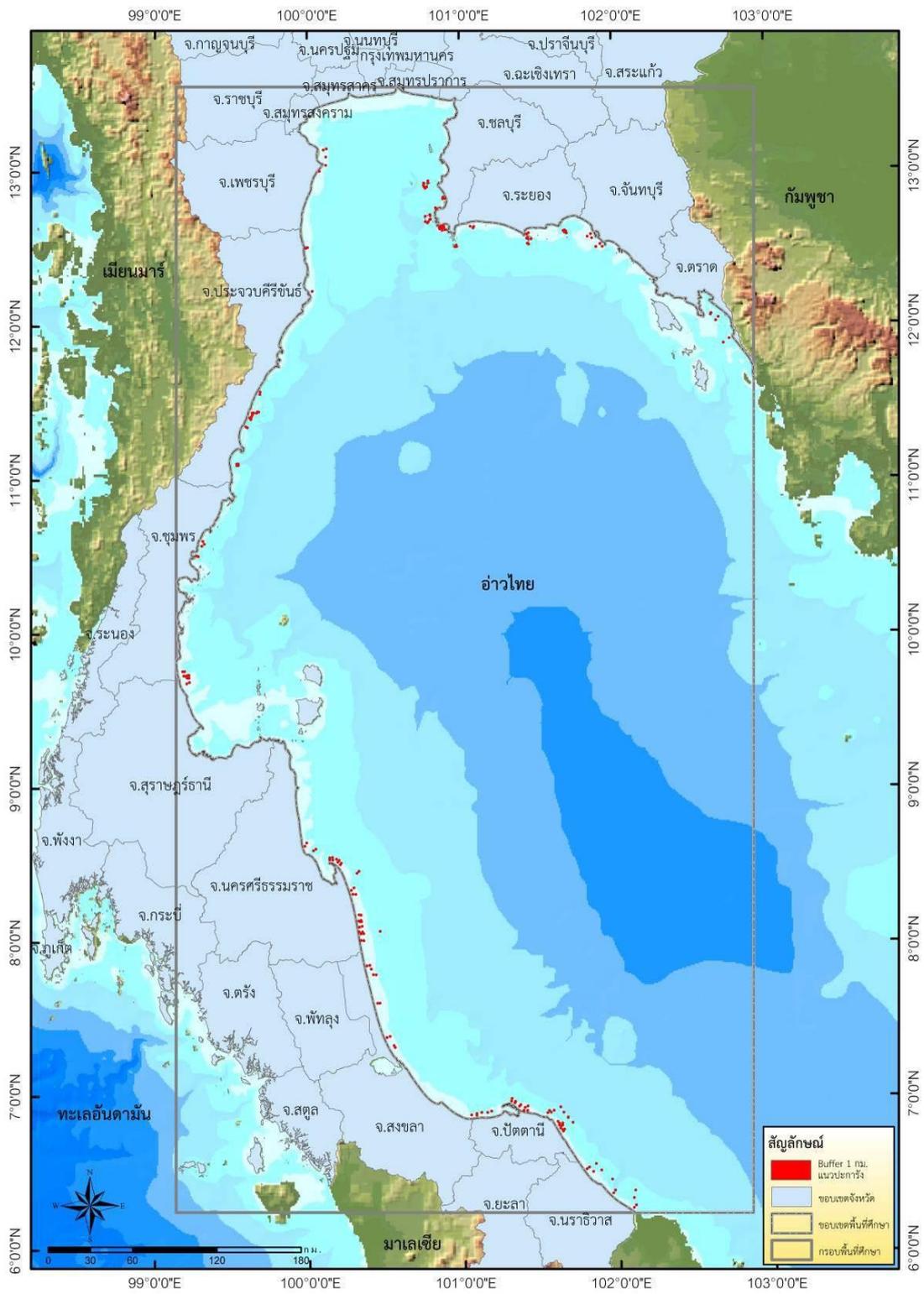
รูปที่ 4.93 แผนที่แสดงพื้นที่ประมงชายฝั่งระยะ 5 กม



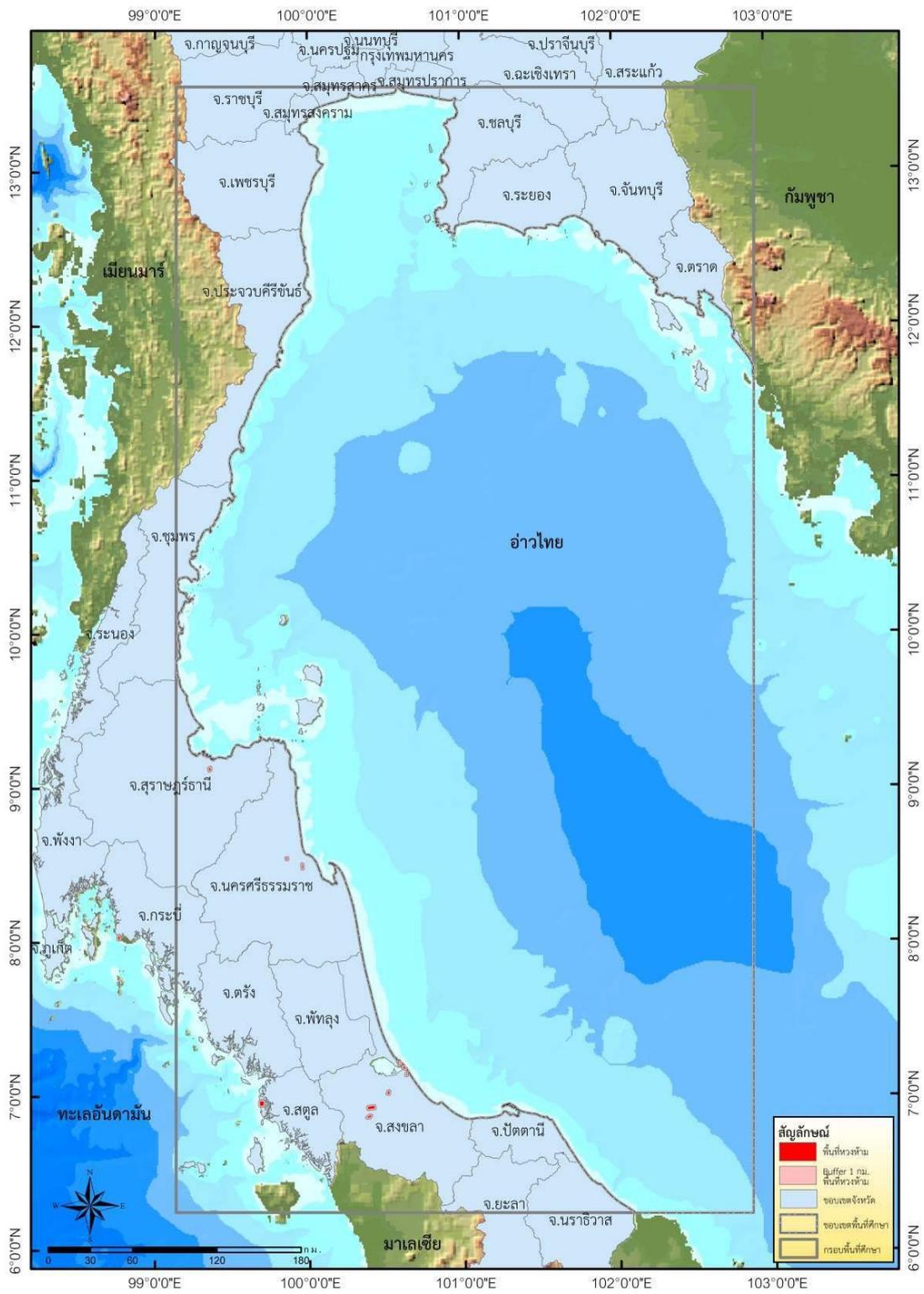
รูปที่ 4.94 แผนที่แสดงเส้นทางเดินเรือโดยสาร



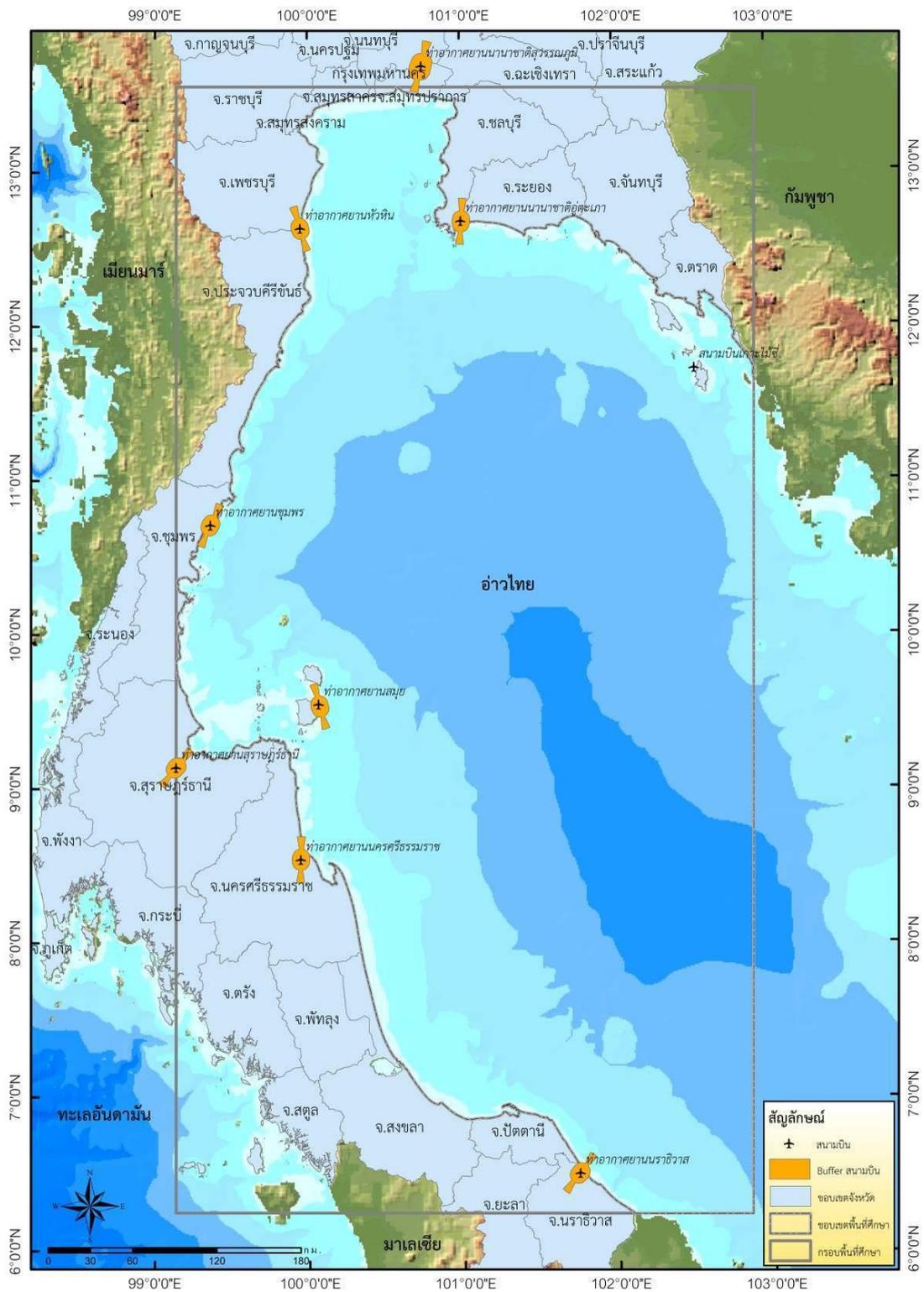
รูปที่ 4.95 แผนที่แสดงตำแหน่งท่าเทียบเรือ



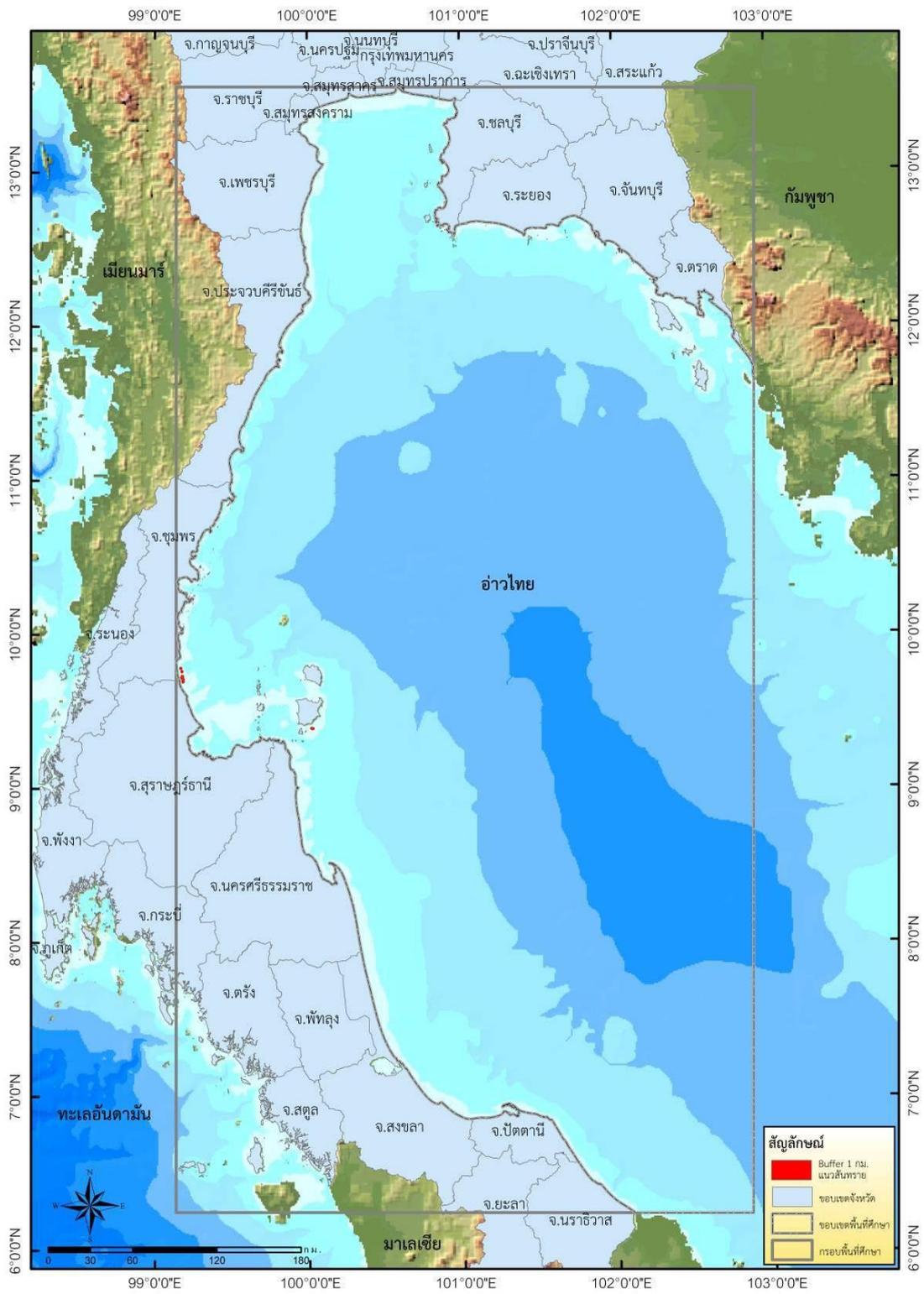
รูปที่ 4.96 แผนที่แสดงแนวปะการัง



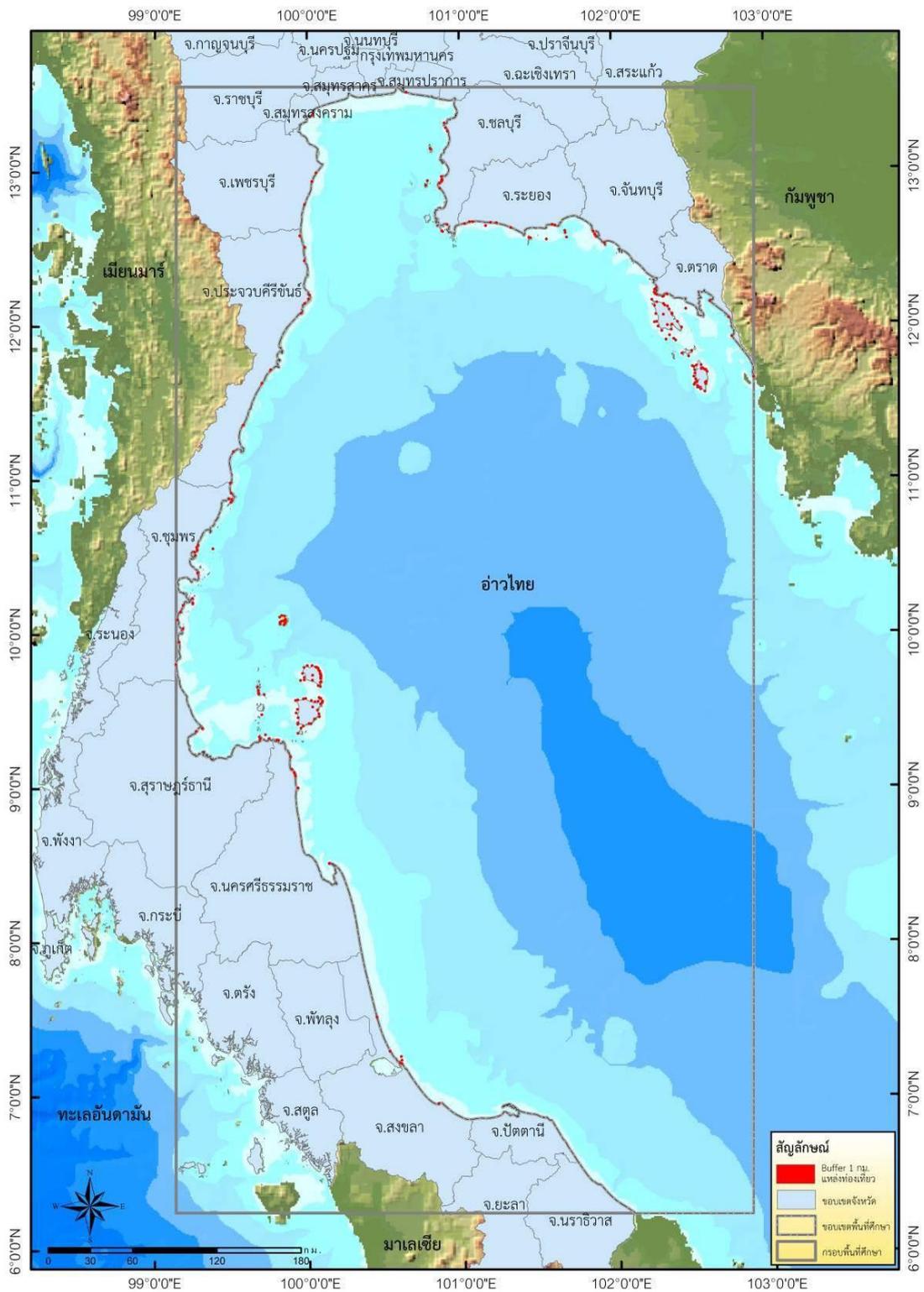
รูปที่ 4.97 แผนที่แสดงพื้นที่ความมั่นคงและพื้นที่ฝึกทางทหาร



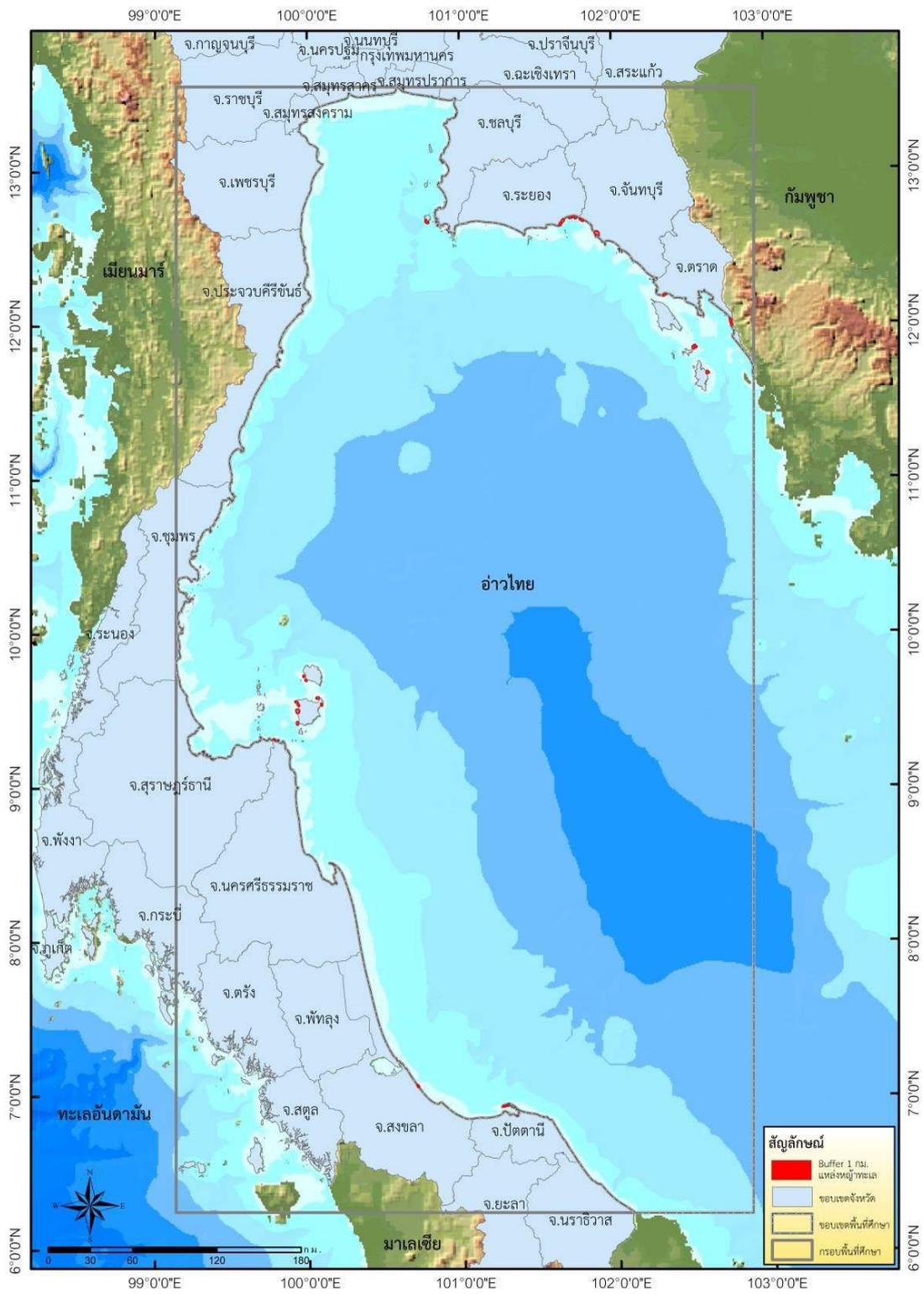
รูปที่ 4.98 แผนที่แสดงตำแหน่งสนามบินและเขตกันชนการขึ้นลงของอากาศยาน



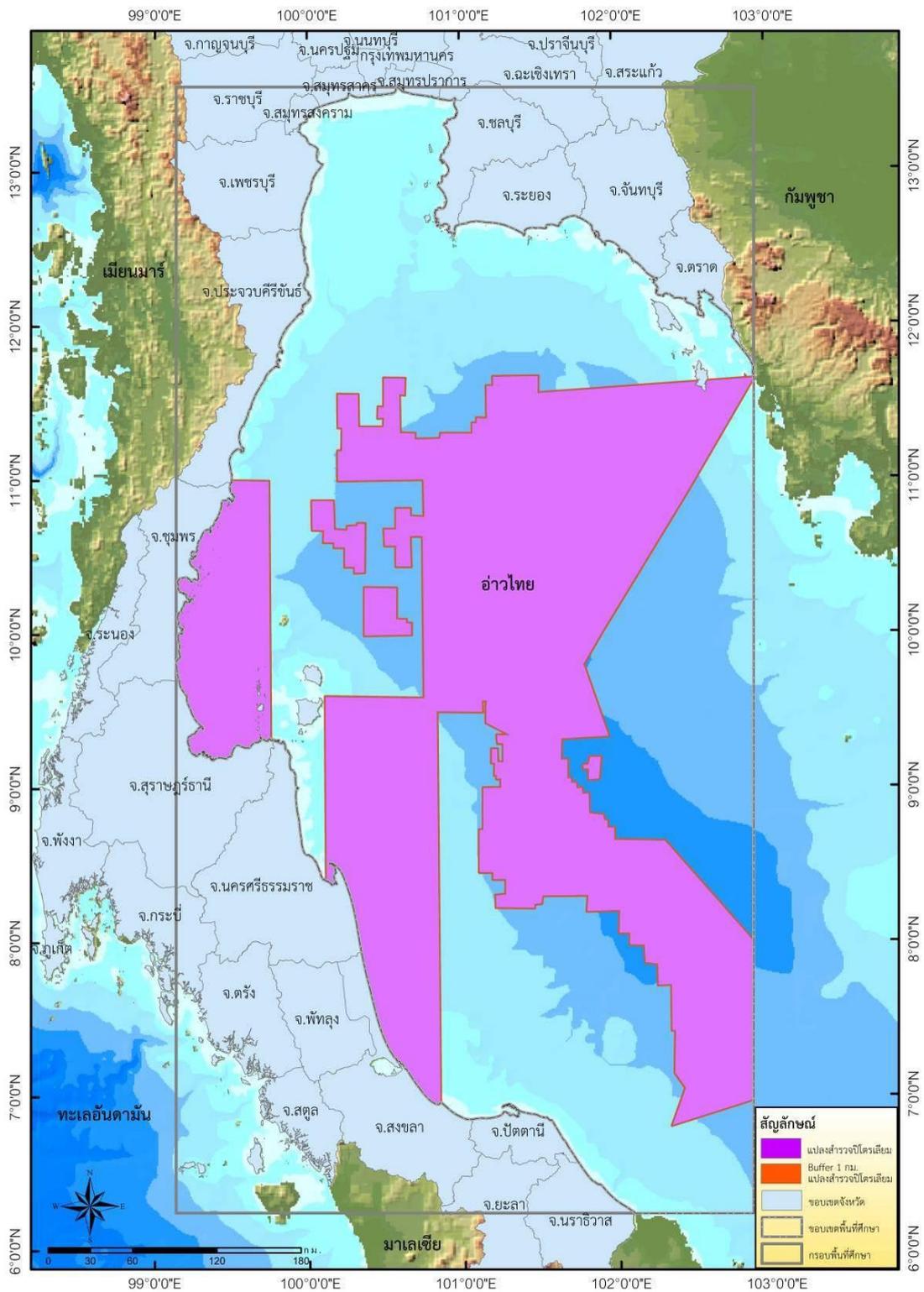
รูปที่ 4.99 แผนที่แสดงตำแหน่งแนวส่งทราย



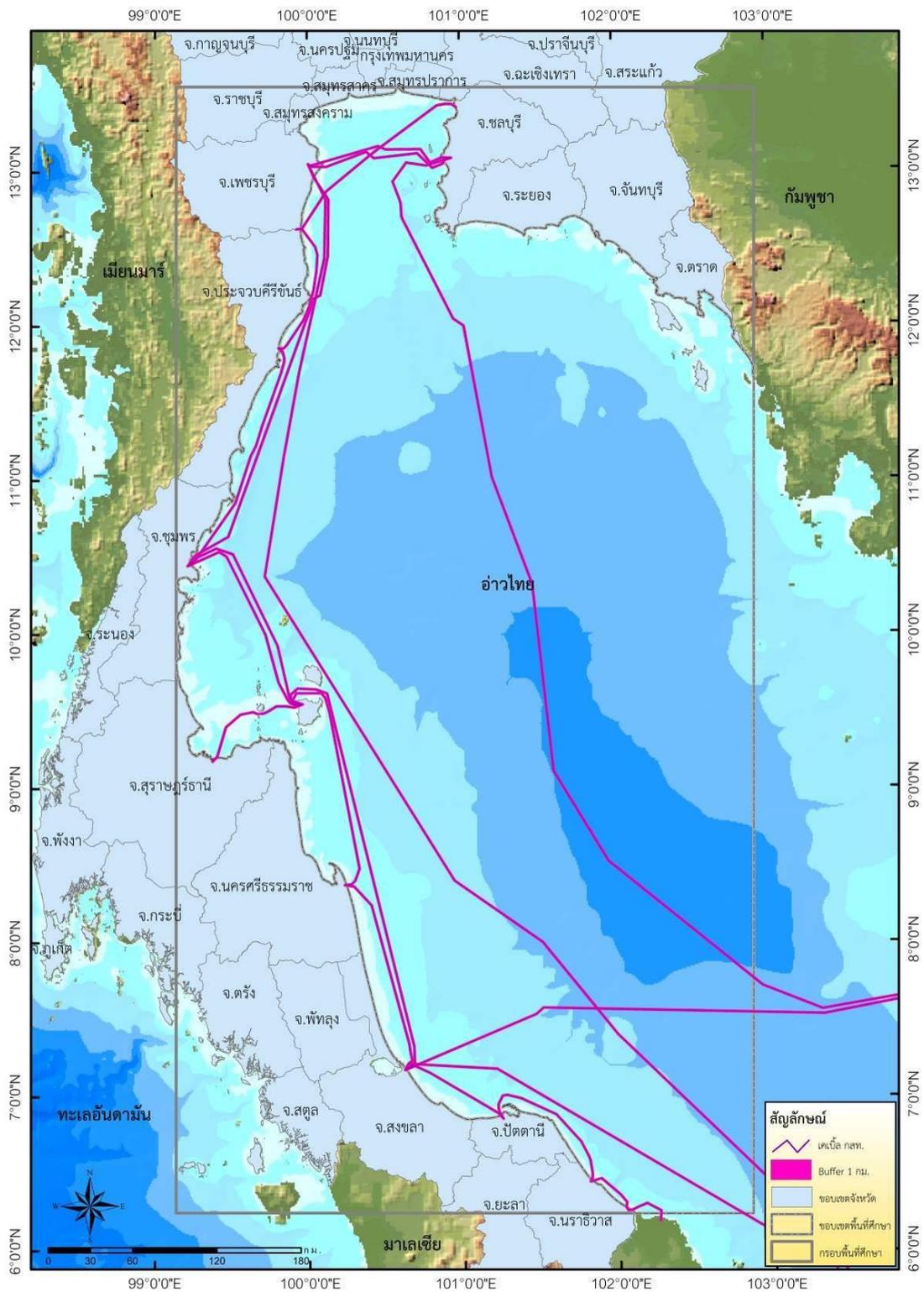
รูปที่ 4.100 แผนที่แสดงแหล่งท่องเที่ยว



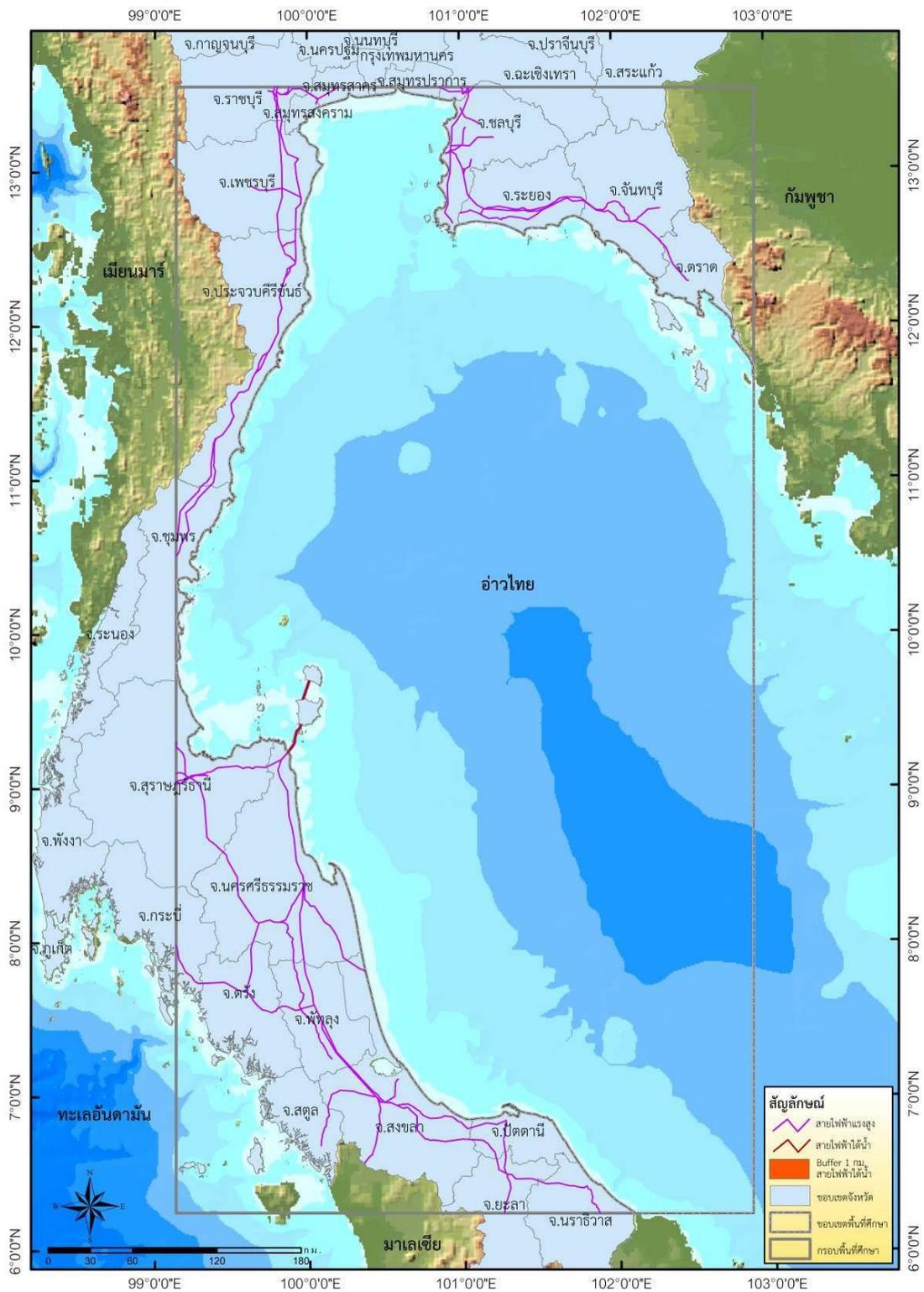
รูปที่ 4.102 แผนที่แสดงพื้นที่แหล่งห้วยทะเล



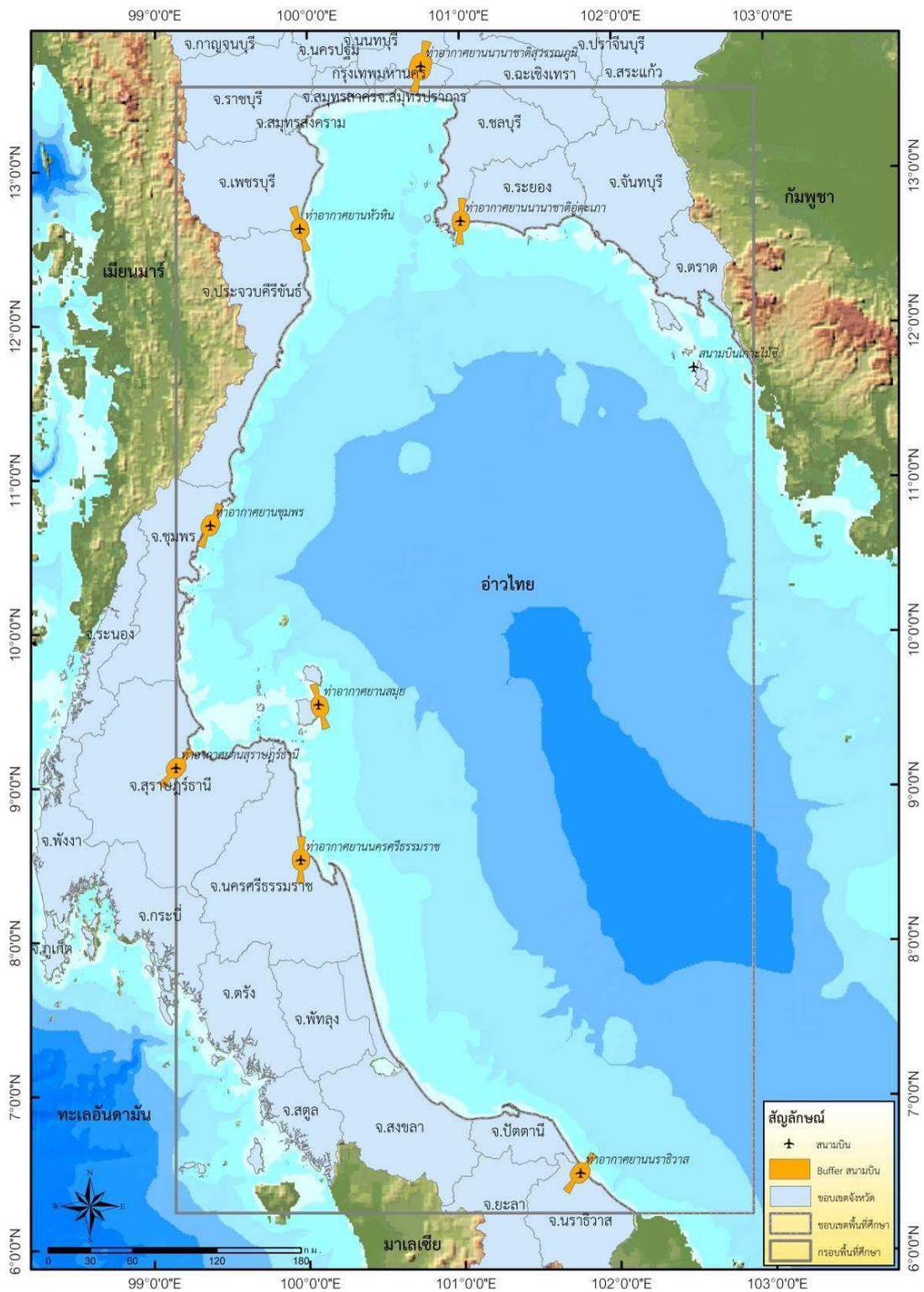
รูปที่ 4.103 แผนที่แสดงพื้นที่แหล่งสำรวจจิโดรมีลัม



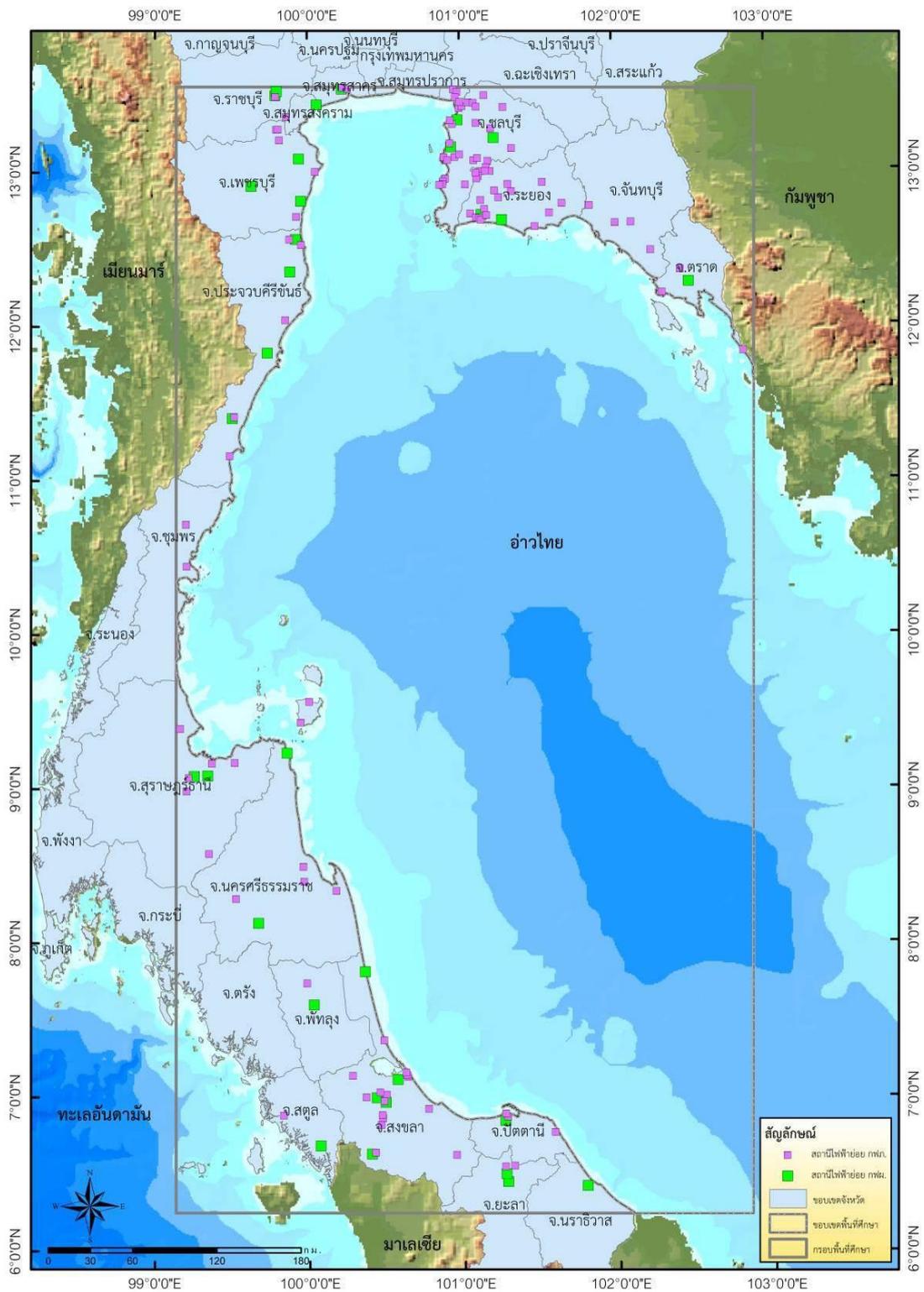
รูปที่ 4.104 แผนที่แสดงแนวเคเบิลใต้น้ำ การสื่อสารแห่งประเทศไทย



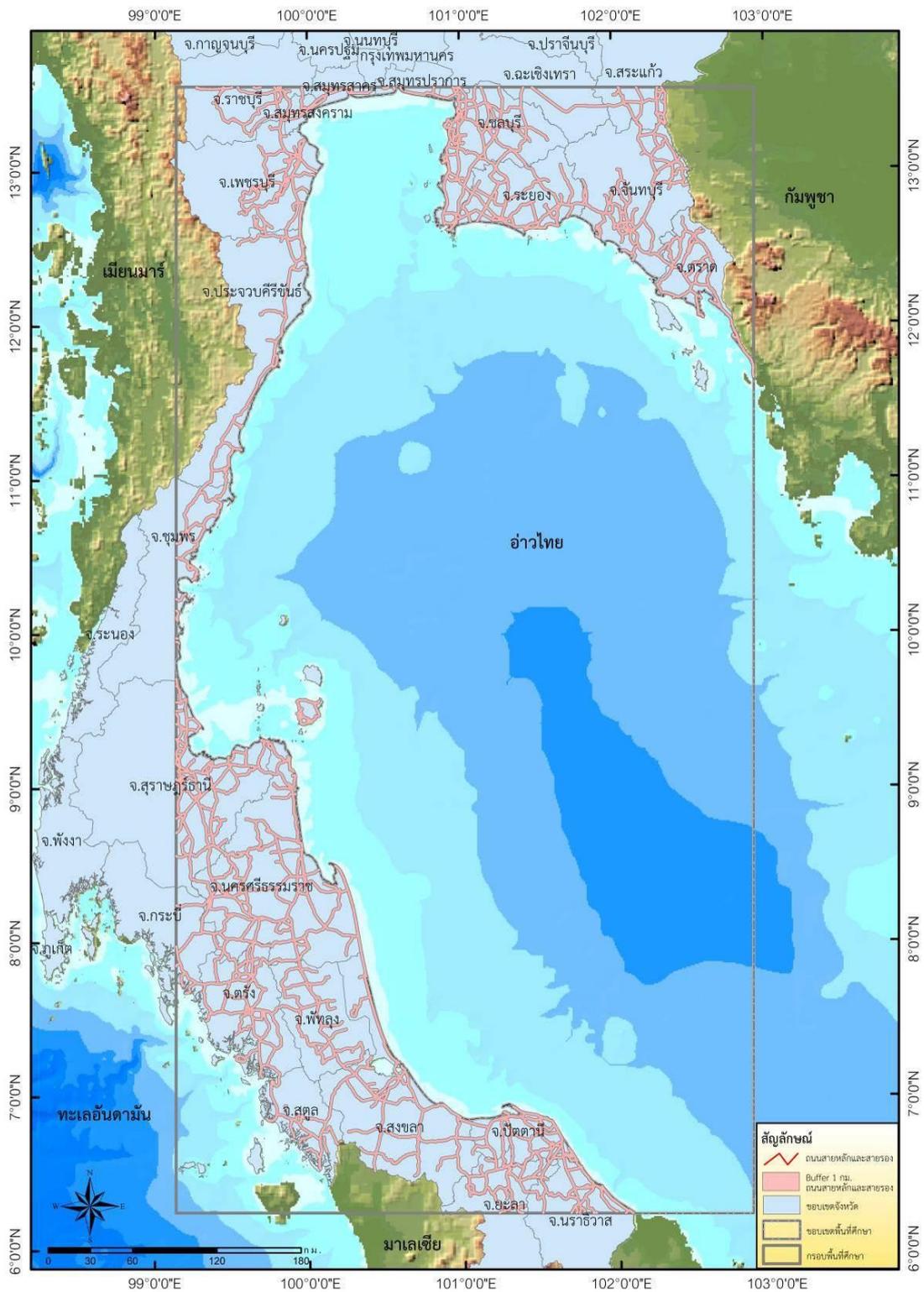
รูปที่ 4.105 แผนที่แสดงแนวสายไฟฟ้าแรงสูง และสายไฟฟ้าแรงสูงได้นำ



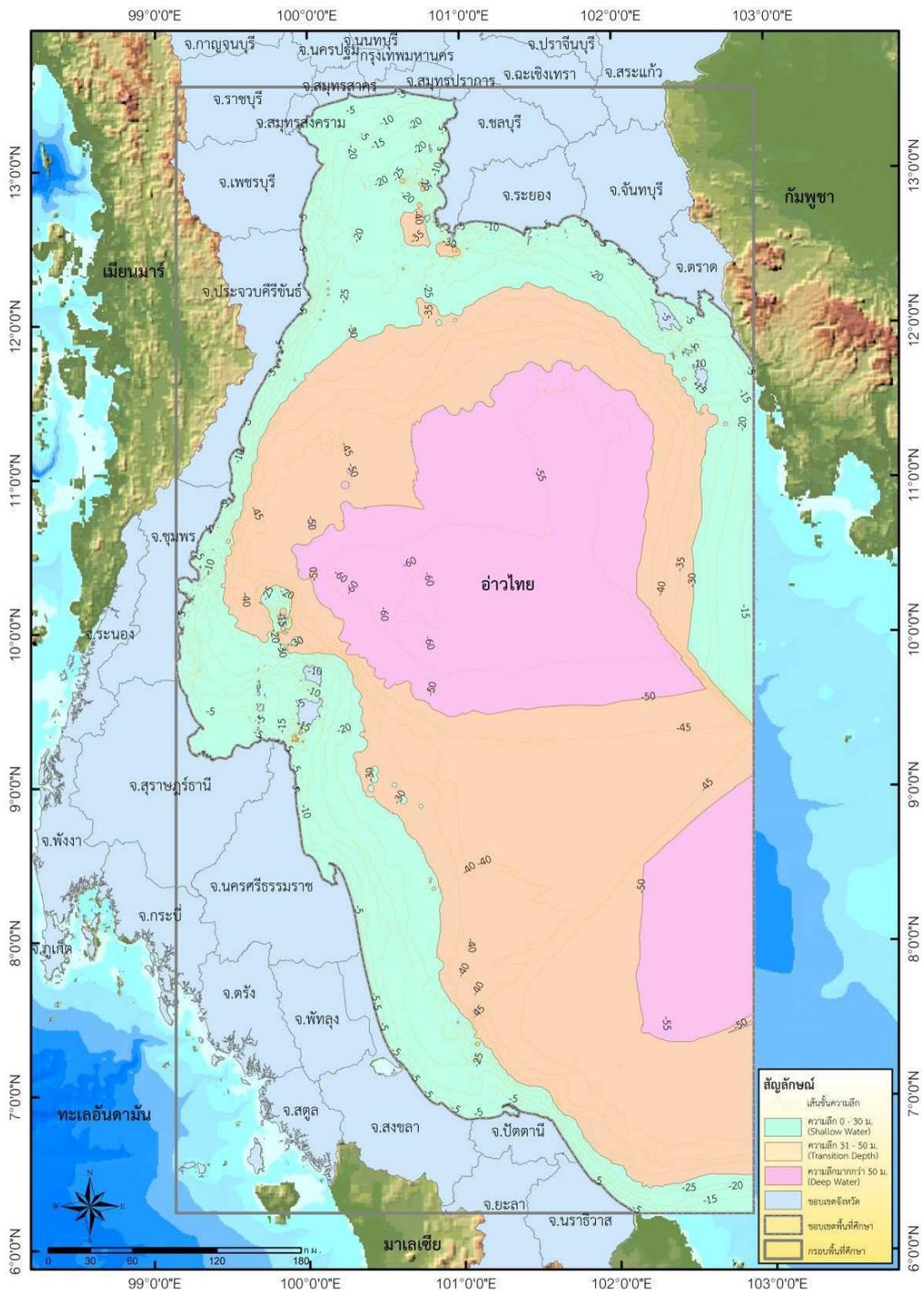
รูปที่ 4.106 แผนที่แสดงสถานีตรวจอากาศและเรดาร์



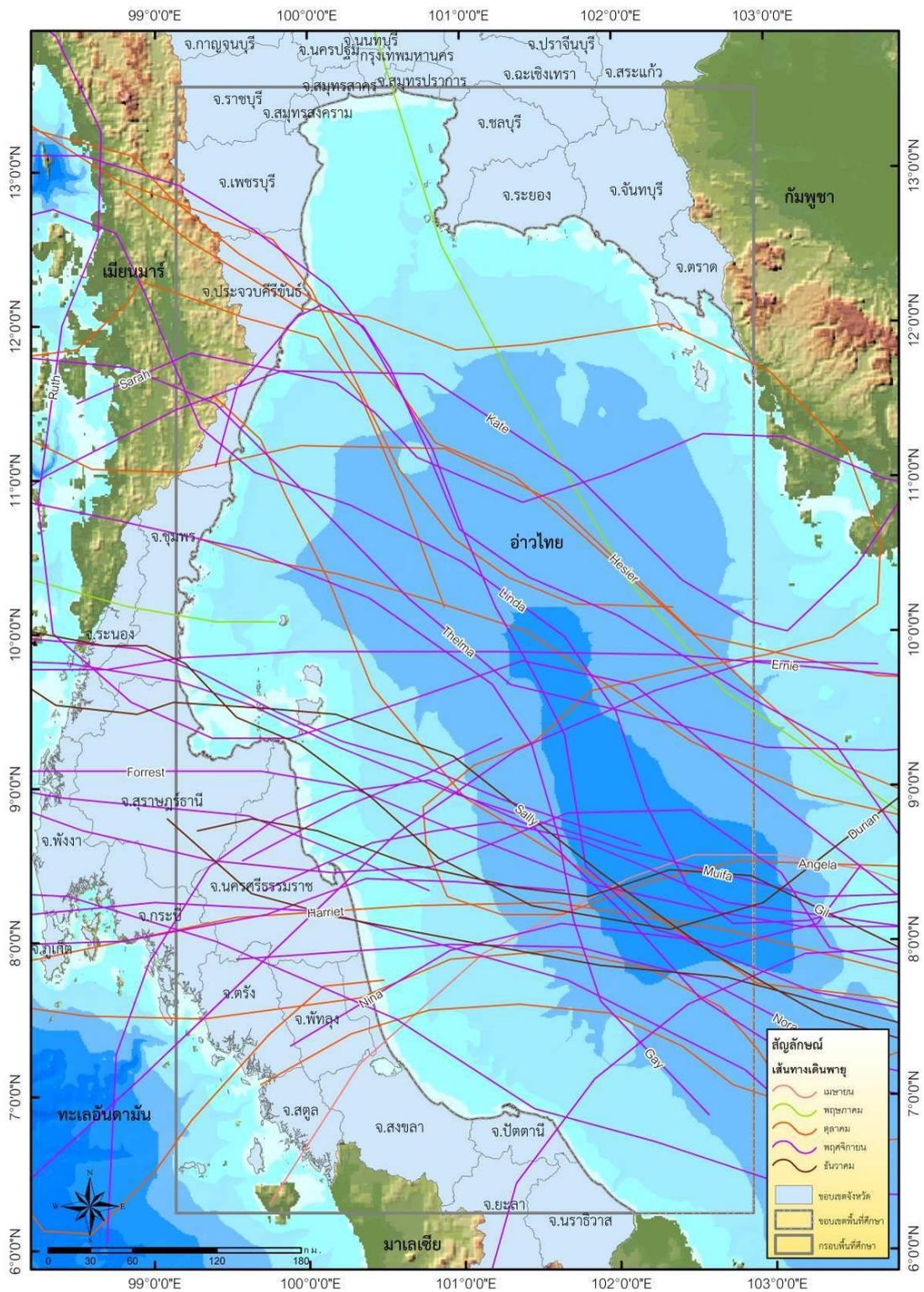
รูปที่ 4.107 แผนที่แสดงตำแหน่งสถานีไฟฟ้าของ กฟผ. และ กฟภ.



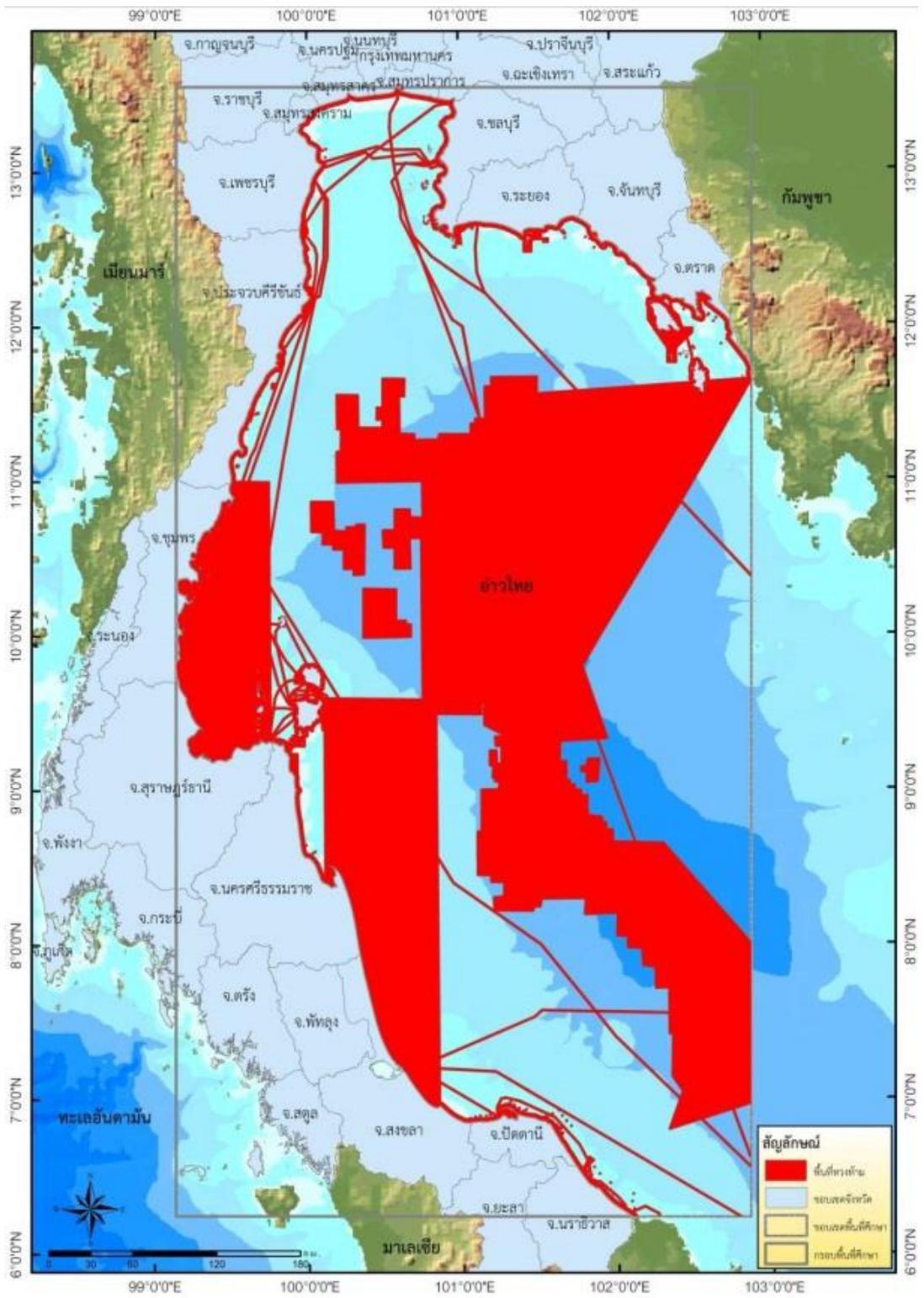
รูปที่ 4.108 แผนที่แสดงแนวถนนสายหลักสายรอง



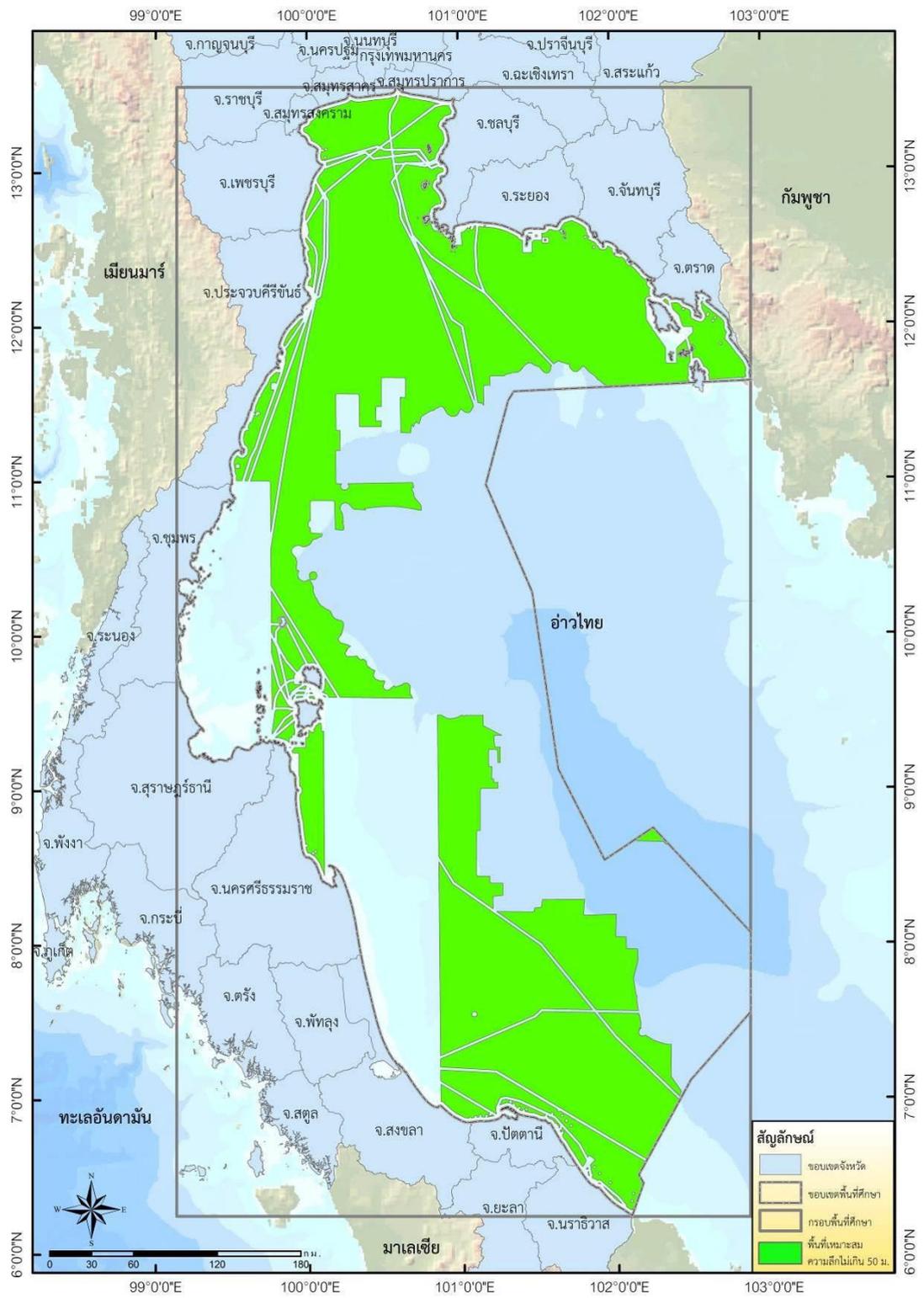
รูปที่ 4.110 แผนที่แสดงระดับความลึกของน้ำทะเล



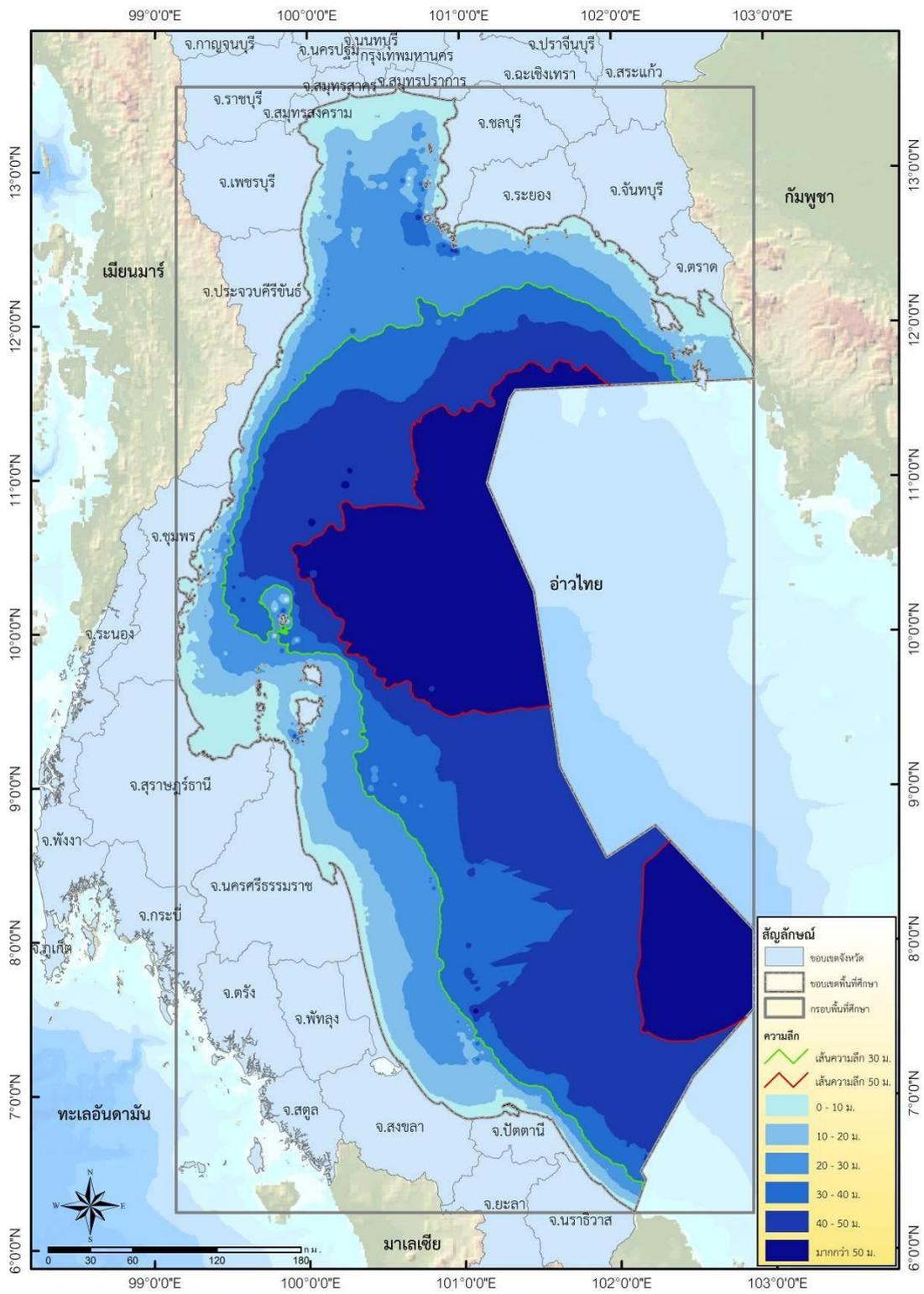
รูปที่ 4.111 แผนที่แสดงแนวทางเดินพายุรายเดือน



รูปที่ 4.113 แผนที่แสดงพื้นที่หวงห้ามนอกชายฝั่งทะเล



รูปที่ 4.114 แผนที่พื้นที่ที่สามารถใช้ประโยชน์พลังงานคลื่น



รูปที่ 4.115 แผนที่แสดงระดับความลึกของน้ำทะเล

4.3 สรุปผลการวิจัย

ศักยภาพของพลังงานคลื่นในทะเลอ่าวไทย ณ สถานีต่างๆ รอบทะเลอ่าวไทย จำนวน 7 สถานี ได้แก่ สถานีเพชรบุรี สถานีประจวบคีรีขันธ์ สถานีชุมพร สถานีสุราษฎร์ธานี สถานี นครศรีธรรมราช สถานีสงขลา และสถานีนราธิวาส ซึ่งแสดงความสูงนัยสำคัญของคลื่น พลังงานของคลื่นและกำลังของคลื่น ในปี พ.ศ. 2554-2555 โดยเมื่อจัดเรียงศักยภาพของคลื่นในทะเลบริเวณต่างๆ ของอ่าวไทยจากมากไปหาน้อยพบว่าบริเวณที่มีศักยภาพของพลังงานคลื่นในทะเลสูงได้แก่ บริเวณจังหวัดนราธิวาส จังหวัดนครศรีธรรมราช จังหวัดชุมพร จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จังหวัด สุราษฎร์ธานี จังหวัดสงขลาและจังหวัดเพชรบุรี ตามลำดับ โดยพื้นที่ที่มีศักยภาพพลังงานคลื่นในทะเลอ่าวไทยสูงที่สุดในปี พ.ศ. 2554-2555 คือบริเวณจังหวัดนราธิวาส

ผลจากแบบจำลอง WAM โดยอาศัยข้อมูลภูมิอากาศนำเข้าปี พ.ศ. 2554 และ ปี พ.ศ. 2555 แสดงให้เห็นว่าบริเวณอ่าวไทยตอนล่างมีความสูงของคลื่นนัยสำคัญ (Significant Wave Height) กำลังคลื่น (Wave Power) และพลังงานของคลื่น (Wave Energy) สูงกว่าบริเวณอื่นๆ ของอ่าวไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณจังหวัดจังหวัดนราธิวาสซึ่งมีความสูงของคลื่นนัยสำคัญสูงสุดเท่ากับ 1.076 เมตร มีกำลังคลื่นเฉลี่ยรายปีสูงสุดเท่ากับ 4,359 วัตต์ต่อเมตร และมีค่าพลังงานของคลื่นสูงสุดเท่ากับ 1,676 จูลต่อตารางเมตร

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการประเมินศักยภาพของคลื่นในทะเลอ่าวไทย เพื่อศึกษาบริเวณที่มีศักยภาพของคลื่นสูงพอสำหรับการผลิตไฟฟ้าโดยอาศัยตัวแปลงคลื่น (Wave Converter) โดยอาศัยแบบจำลองการพยากรณ์คลื่นลมเชิงตัวเลขที่เรียกว่าแบบจำลอง WAM กับฐานข้อมูลภูมิอากาศนำเข้าปี พ.ศ. 2554-2555 ข้อมูลพลังงานคลื่นในทะเลอ่าวไทย ณ สถานีต่างๆ รอบทะเลอ่าวไทย จำนวน 7 สถานี ได้แก่ สถานีเพชรบุรี สถานีประจวบคีรีขันธ์ สถานีชุมพร สถานีสุราษฎร์ธานี สถานีนครศรีธรรมราช สถานีสงขลา และสถานีนราธิวาส ซึ่งผลการศึกษาแสดงความสูงนัยสำคัญของคลื่นพลังงานของคลื่นและกำลังของคลื่น ในปี พ.ศ. 2554-2555 โดยเมื่อจัดเรียงศักยภาพของคลื่นในทะเลบริเวณต่างๆ ของอ่าวไทยจากมากไปหาน้อยพบว่าบริเวณที่มีศักยภาพของพลังงานคลื่นในทะเลสูง ได้แก่ บริเวณจังหวัดนราธิวาส จังหวัดนครศรีธรรมราช จังหวัดชุมพร จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี จังหวัดสงขลาและจังหวัดเพชรบุรี ตามลำดับ

ผลจากแบบจำลอง WAM โดยอาศัยข้อมูลภูมิอากาศนำเข้าปี พ.ศ. 2554 และ ปี พ.ศ. 2555 แสดงให้เห็นว่าบริเวณอ่าวไทยตอนล่างมีความสูงของคลื่นนัยสำคัญ (Significant Wave Height) กำลังคลื่น (Wave Power) และพลังงานของคลื่น (Wave Energy) สูงกว่าบริเวณอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณจังหวัดนราธิวาสซึ่งมีความสูงของคลื่นนัยสำคัญสูงสุดเท่ากับ 1.076 เมตร มีกำลังคลื่นเฉลี่ยรายปีสูงสุดเท่ากับ 4,359 วัตต์ต่อเมตร และมีค่าพลังงานของคลื่นสูงสุดเท่ากับ 1,676 จูลต่อตารางเมตร

ดังนั้นพื้นที่ที่มีความเป็นไปได้ในการพัฒนาการใช้ประโยชน์จากพลังงานคลื่นในทะเลอ่าวไทย คือ บริเวณจังหวัดนราธิวาส โดยแสดงค่าศักยภาพพลังงานของคลื่นดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ศักยภาพพลังงานของคลื่นในทะเลอ่าวไทยบริเวณจังหวัดนราธิวาส ปี พ.ศ. 2554-2555

สถานี	ความสูงนัยสำคัญของคลื่น (m)		พลังงานของคลื่น (J/m ²)		กำลังของคลื่น (W/m)	
	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด
2554	1.076	0.148	1,676.108	34.326	4,359.185	56.932
2555	0.927	0.139	1,243.430	33.104	3,062.234	53.240

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรวิเคราะห์ความสูงของคลื่นนัยสำคัญรอบ 3-5 ปี

5.2.2 ควรรันแบบจำลองสมุทรศาสตร์อื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบผลจากแบบจำลอง WAM

บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน. 2553. *เทคโนโลยีการใช้พลังงานจากคลื่นทะเล*. สืบค้นจาก : <http://www.dede.go.th/dede/index.php?id=227> เมื่อ 11 ธันวาคม 2553.
- คลื่นในมหาสมุทร. 2555. สืบค้นจาก <http://www.vcharkarn.com/varticle/41602> เมื่อ 2 มีนาคม 2556.
- ธวัช วิรัตน์พงศ์, สอง เอกมहाชัย, สมบูรณ์ พรพิเนตพงศ์, กัตัญญู ศรีตั้งนันทน์, ประสิทธิ์ จันทร, บงกช สโมสร, วิริยะ เหลืองอราม, สมบูรณ์ เล็กผลิผล, เกรียงไกร ก่อวัฒนา, ธวัช แทนทำนุ, เกียรติชาย ชัชวาลวงศ์, สัมพันธ์ ไทยเครือวัลย์, ประวิทย์ แจ่มปัญญา, ทวีวัฒน์ นิลเพชรรัตน์, ภูเวียง ประคัมรินทร์, บุญธรรม ตั้งล้ำเลิศ, P. Wittamann, M. Xue, สุกันยาณียะวิญญาญ และวัฒนา กันบัว. 2542. *รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการสร้างโมเดลและการพยากรณ์คลื่นในทะเล*. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- มณฑล แก่นมณี. 2010. *การแตกของคลื่น (wave breaking)*. คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- วัฒนา กันบัว. 2552. *แบบจำลองการพยากรณ์คลื่น*. กรมอุตุนิยมวิทยา. ฝ่ายอุตุนิยมวิทยาทางทะเล. กรุงเทพฯ
- วิริยะ เหลืองอราม. 2547. *การจำลองเชิงตัวเลขของคลื่นใกล้ฝั่งในอ่าวไทย*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- องค์ประกอบของคลื่น. สืบค้นจาก <http://www.marine.tmd.go.th/thai/oceanwave-thai.html> เมื่อ 5 มกราคม 2554.
- Dunnett, D., and Wallace, J. S. (2009). *Electricity Generation from Wave Power in Canada*. Renewable Energy, Vol. 33, pp. 179-195.
- Di Lorenzo, E. and Moore, A. M. and Arango, H. G. and Cornuelle, B. D. and Miller, A. J. and Powell, B. and Chua, B. S. and Bennett, A. F., 2007. *Weak and Strong Constraint Data Assimilation in the Inverse Regional Ocean Modeling System (ROMS): Development and Application for a Baroclinic Coastal Upwelling System*. Ocean Modelling, Vol. 16, pp. 160-187.
- Evan M., Jeroen M., Alexander F. S., Francois C., James C. Mc., and Pablo S., 2010. *Procedures for Offline Grid Nesting in Regional Ocean Models*. Ocean Modelling, Vol. 35, pp. 1-15.
- Garrison, T. S., 2007. *Oceanography: An Invitation to Marine Science*. Brooks/Cole Publishing Co., Pacific Grove, CA, USA.
- G. Iglesias, R. Carballo. 2009. *Wave Energy Potential Along the Death Coast (Spain)*. Energy, Vol. 34, pp. 1960-1975.
- Gunther, H., Hasselmann, S., and Janssen, P. A.E.M., 1992. *Wamodell Cycle 4 (Revised Version)*, Technical Report No.4, Hamburg, Germany.

- Iglesias G, López M, Carballo R, Castro A, Fraguera JA & Frigaard P. 2009. *Wave Energy Potential in Galicia (NW Spain)*. Renewable Energy. Vol. 34, pp. 2323-2333.
- Harvey, J.G., 1975. *Atmosphere and ocean*. Our Fluid Environment. pp. 143.
- Humphries, U. W. and Webb, D.J., 2008. *On the Indonesian Throughflow in the OCCAM Degree Ocean Model*. Ocean Science, Vol. 4, No. 3, pp. 183-198.
- Kanarska, Y., A. Shchepetkin, and J. C. McWilliams. (2007). *Algorithm for non-Hydrostatic Dynamics in the Regional Oceanic Modeling System*. Ocean Modell. Vol. 18, pp. 143-174.
- Kawaguchi, K. and Hashimoto, N. 2003. Characteristics of Ocean Waves Around Pan Based on WAM Wave Hindcasting Data. Proceedings of the Thirteen International Offshore and Polar Engineering Conference Honolulu, Hawaii, USA.
- Lee, J. S., Jansen, R., Schuler, D., Ainsworth, T., Marmorino, G., & Chubb, S. (1998). *Polarimetric Analysis and Modeling of Multifrequency SAR Signatures from Gulf Stream Fronts*. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 23, 322– 332.
- Michael G. Hughes and Andrew D. Heap. 2010. *National-Scale Wave Energy Resource Assessment for Australia*. Renewable Energy, Vol. 35, pp. 1783–1791.
- Moore, A.M., H.G. Arango, A.J. Miller, B.D. Cornuelle, E. Di Lorenzo and D.J. Neilson, 2004. *A Comprehensive Ocean Prediction and Analysis System Based on the Tangent Linear and Adjoint Components of a Regional Ocean Model*, Ocean Modelling, Vol. 7, pp. 227-258.
- Moore, A.M., H.G. Arango, G. Broquet, B.S. Powell, A.T. Weaver, and J. Zavala-Garay, 2011. *The Regional Ocean Modeling System (ROMS) 4-dimensional variational data assimilations systems, Part I - System overview and formulation*. Progress in Oceanography, Vol. 91, pp. 34–49.
- Moore, A.M., H.G. Arango, G. Broquet, C. Edward, M. Veneziani, B. Powell, D. Foley, J.D. Doyle, D. Costa, and P. Robinson. 2011. *The Regional Ocean Modeling System (ROMS) 4-dimensional Variational Data Assimilations Systems, Part II – Performance and Application to the California Current System*. Progress in Oceanography, Vol. 91, pp. 50-73.
- Moore, A.M., H.G. Arango, G. Broquet, C. Edward, M. Veneziani, B. Powell, D. Foley, J.D. Doyle, D. Costa, and P. Robinson. 2011. *The Regional Ocean Modeling System (ROMS) 4-dimensional Variational Data Assimilations Systems, Part III - Observation Impact and Observation Sensitivity in the California Current*. Progress in Oceanography, Vol. 91, pp. 74-94.

- Powell, B. S., H. G. Arango, A. M. Moore, E. Di Lorenzo, R. F. Milliff, and D. Foley. 2008. *4DVAR Data Assimilation in the Intra-Americas Sea with the Regional Ocean Modeling System (ROMS)*. *Ocean Modell*, Vol. 25, pp. 173–188.
- Powell, B. S., A. M. Moore, H. G. Arango, R. F. Milliff, and R. R. Leben. 2009. *Real-time Assimilation and Prediction in the Intra-Americas Sea with the Regional Ocean Modeling System (ROMS)*. *Dyn. Atmos. Oceans*, Vol. 48, pp. 46–68.
- Pottier, E. 1998. *Unsupervised Classification Scheme and Topography Derivation of POLSAR Ddata on the H/A/a Polarimetric Decomposition Theorem*. Proc. of the 4th International Workshop on Radar Polarimetry, pp. 535–548.
- Schuler, D. L., Jansen, R. W., Lee, J. S., & Kasilingam, D. 2003. *Polarisation Orientation Angle Measurements of Ocean Internal Waves and Current Fronts using Polarimetric SAR*. IEE Proc. On Radar, Sonar and Navigation. pp. 123–131.
- SWAMP group: J.H. Allender, T.P. Barnett, L. Bertotti, J. Bruinsma, V.J. Cardone, L. Cavaleri, J. Ephraums, B. Golding, A. Greenwood, J. Guddal, H. Gunther, K.Hasselmann, S. Hasselmann, P. Joseph, S. Kawai, G.G. Komen, L. Lawson, H. Linne, R.B. Long, M. Lybanon, E. Maeland, W. Rosenthal, Y. Toba, T. Uji and W.J.P. de Voogt, 1985. *Sea wave modeling project (SWAMP). An intercomparison study of wind wave predictions models, part 1: Principal results and conclusions: Ocean Wave Modeling*. Plenum, New York.