

# การตอบสนองของแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ต่อเงื่อนไขขอบเขตเปิดที่แตกต่างกัน ในบริเวณอ่าวไทยตอนเหนือ

## The Responses of a Hydrodynamic Model to Different Open Boundary Conditions in the Northern Gulf of Thailand

ศิริพร ทองอุดม<sup>1</sup> ธวัชชัย นาอุดม<sup>2</sup> และ อนุกูล บุรณประทีปรัตน์<sup>1\*</sup>

Siraporn Tong-u-dom<sup>1</sup>, Tawatchai Na-u-dom<sup>2</sup> and Anukul Buranapratheprat<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

<sup>1</sup>Department of Aquatic Science, Faculty of Science, Burapha University

<sup>2</sup>Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources

Research, Chinese Academy of Sciences, China

Received : 24 May 2017

Accepted : 29 August 2017

Published online : 22 September 2017

### บทคัดย่อ

แบบจำลองอุทกพลศาสตร์ Princeton Ocean Model ได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาการไหลเวียนกระแสน้ำในบริเวณอ่าวไทยตอนเหนือภายใต้เงื่อนไขขอบเขตเปิด 2 แบบ คือ แบบระดับน้ำ (Tidal forcing condition; Case B1) และแบบกระแสน้ำ (Current forcing condition; Case B2) โดยคำนึงถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการไหลเวียนกระแสน้ำ ได้แก่ ลม น้ำขึ้นน้ำลง น้ำท่า ความเค็มและอุณหภูมิของน้ำทะเล รวมไปถึงความลึกพื้นที่ท้องทะเลเข้ามาไว้ในการคำนวณ ค่าความเร็วกระแสน้ำเฉลี่ยตามความลึกรายเดือน (Monthly depth averaged current) ของ Case B1 และ Case B2 ถูกนำมาวิเคราะห์หาความแตกต่างระหว่างเงื่อนไขดังกล่าว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขขอบเขตเปิด Case B1 ทำให้กระแสน้ำบริเวณใกล้กับขอบเขตเปิดมีความแรงมากกว่า 100 เซนติเมตร/วินาทีและไม่มีเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ในขณะที่บริเวณที่ไกลออกไป เช่น บริเวณอ่าวไทยตอนบน กระแสน้ำมีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 10 เซนติเมตร/วินาทีและมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ส่วนเงื่อนไข Case B2 พบว่ากระแสน้ำมีความเร็วที่น้อยกว่ากรณี Case B1 ที่บริเวณใกล้กับขอบเขตเปิด และมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ผลจากการเปรียบเทียบยังแสดงให้เห็นว่ากระแสน้ำแทบไม่มีความแตกต่างกันในพื้นที่อ่าวไทยตอนบน ซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ห่างจากขอบเขตเปิดออกไปทางด้านเหนือ และผลจากการเปรียบเทียบค่าระดับน้ำจากแบบจำลองกับค่าจากการตรวจวัดแสดงให้เห็นว่าผลการคำนวณจากแบบจำลองโดยใช้เงื่อนไขขอบเขตเปิด Case B2 มีค่าใกล้เคียงกับค่าจากการตรวจวัดมากกว่า Case B1 จึงสามารถสรุปได้ว่าการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเปิดของแบบจำลองโดยใช้กระแสน้ำสามารถใช้ในการจำลองการไหลเวียนกระแสน้ำในบริเวณอ่าวไทยตอนเหนือได้สมจริงกว่าแบบระดับน้ำ

**คำสำคัญ :** การไหลเวียนกระแสน้ำ เงื่อนไขขอบเขตเปิด แบบจำลองเชิงตัวเลข แบบจำลอง POM อ่าวไทย

\*Corresponding author. E-mail : anukul@buu.ac.th

## Abstract

The Princeton Ocean Model (POM) was applied to simulate water circulation in the Northern Gulf of Thailand (NGoT) under different open boundary conditions including the elevation forcing condition (Case B1) and the current forcing condition (Case B2). Monthly mean wind, tide, river discharge, water temperature and salinity and bottom topography were used as major forcing in the experiments. Monthly depth averaged currents between two cases were compared to investigate the simulation performances. Case B1 resulted in strong current greater than 100 cm/s that did not seasonally change near the open boundary. However circulation weaker than 10 cm/s was generated in the area farther from the open boundary, such as the upper Gulf of Thailand, where wind played an important role to water circulation. Case B2 generated weaker current, compared with Case B1 near the open boundary, and wind seemed to control the residual circulation. The results also revealed no significant difference between the current patterns of both cases in the upper Gulf of Thailand located farther in the north of the open boundary. The model calibrations with measured tidal data showed better results of Case B2 than those of Case B1 in simulating water circulations in this area.

**Keywords:** water circulation, open boundary condition, numerical model, POM, Gulf of Thailand

## บทนำ

การศึกษาการไหลเวียนกระแสน้ำด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical model) โดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือประมวลผลที่ผ่านมาได้มีการศึกษาอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการศึกษาที่สะดวก และไม่สิ้นเปลืองงบประมาณมากนัก เมื่อเทียบกับการตรวจวัดในพื้นที่จริง นอกจากนี้การใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขยังสามารถทำการศึกษได้ในบริเวณกว้าง ตัวอย่างของการศึกษาการไหลเวียนกระแสน้ำในบริเวณอ่าวไทยโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข เช่น Yanagi & Takao (1998) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของการไหลเวียนกระแสน้ำแบบ 3 มิติในบริเวณอ่าวไทย Buranapratheprat, Yanagi & Sawangwong (2002) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของการไหลเวียนกระแสน้ำและการแพร่กระจายของความเค็มในบริเวณอ่าวไทยตอนบนโดยใช้แบบจำลอง 2 มิติ และ Buranapratheprat *et al.* (2009) ได้ทำการศึกษาการไหลเวียนกระแสน้ำบริเวณอ่าวไทยตอนบนโดยใช้แบบจำลอง 3 มิติ เป็นต้น แต่เนื่องจากการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตเปิดในแบบจำลองมีความแตกต่างกันออกไปในแต่ละการศึกษา จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบเพื่อหาเงื่อนไขขอบเขตเปิดที่มีความเหมาะสม ซึ่งให้ผลการคำนวณที่มีความถูกต้องมากที่สุดสำหรับการนำไปใช้ศึกษาการไหลเวียนกระแสน้ำโดยใช้แบบจำลองในพื้นที่นี้

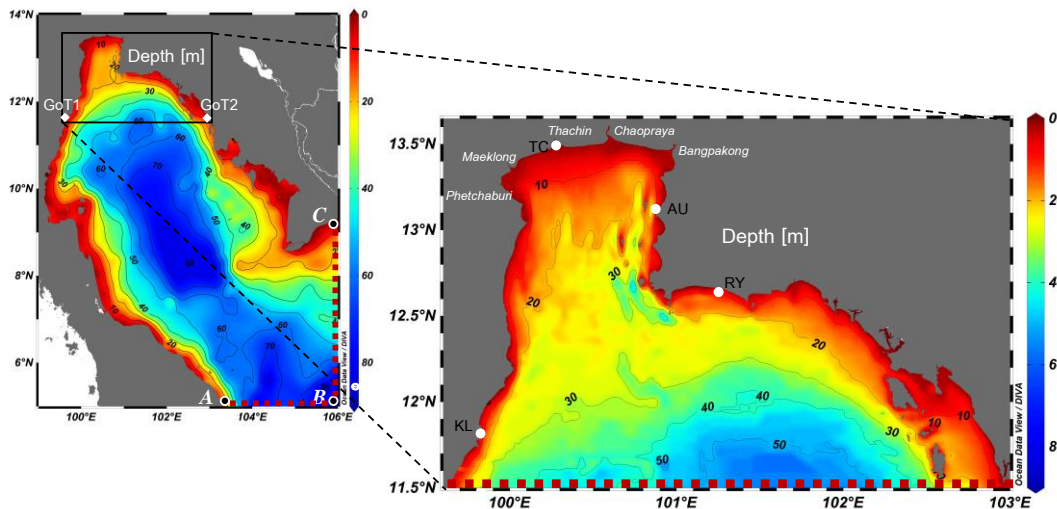
แบบจำลองอุทกพลศาสตร์ Princeton Ocean Model (POM) ถูกพัฒนาขึ้นโดย Blumberg & Mellor (1978) บนพื้นฐานของสมการควบคุมคือสมการการเคลื่อนที่ (Equations of motion) และสมการการอนุรักษ์มวล (Continuity equation) ในระบบพิกัดซิกมา (Sigma coordinate system) นอกจากนี้ POM ยังมี Turbulence closure sub-model เพื่อคำนวณการผสมผสานของมวลน้ำในแนวตั้ง (Mellor, 1998) ทำให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณการไหลเวียนกระแสน้ำบริเวณชายฝั่งที่ได้รับอิทธิพลทั้งจากลมและน้ำขึ้นน้ำลงได้ดี ซึ่งการนำเข้าแรงจากน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal forcing) บริเวณขอบเขตเปิดของ

แบบจำลอง POM สามารถทำได้ทั้งการนำเข้าค่าระดับน้ำโดยตรงและการแปลงค่าระดับน้ำให้เป็นค่ากระแสน้ำก่อนการนำเข้า โดยขอบเขตเปิดที่ดีควรทำให้การไหลเข้าและไหลออกของกระแสน้ำเป็นอิสระ ไม่มีการสะท้อนกลับของกระแสน้ำที่อยู่ภายในแบบจำลอง และทำให้แบบจำลองมีความเสถียรในการคำนวณ การศึกษาในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลเวียนกระแสน้ำของแบบจำลองเชิงตัวเลขตามเงื่อนไขของขอบเขตเปิดที่แตกต่างกันทั้ง 2 แบบ ในแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ POM และหาเงื่อนไขของขอบเขตเปิดที่มีความเหมาะสมในการคำนวณการไหลเวียนกระแสน้ำบริเวณอ่าวไทยตอนเหนือ

**วิธีดำเนินการวิจัย**

**การจัดเตรียมแบบจำลอง**

แบบจำลองการไหลเวียนกระแสน้ำบริเวณอ่าวไทยตอนเหนือครอบคลุมขอบเขตพิกัดระหว่างละติจูด 11.5 ถึง 13.5 องศาเหนือ และลองจิจูด 99.6 ถึง 103 องศาตะวันออก ขนาดของช่องคำนวณเท่ากับ 0.5 x 0.5 ลิปดา (ประมาณ 926 ตารางเมตร) และช่องคำนวณตามความลึกเท่ากับ 10 ชั้น ระบุตำแหน่งของแม่น้ำสายหลักที่ไหลลงสู่ทะเล และกำหนดให้บริเวณชายฝั่งเป็นด้านปิด (Closed boundary) ได้แก่ ด้านตะวันตก ด้านเหนือ และด้านตะวันออก และสุดท้ายกำหนดให้ด้านใต้ของแบบจำลองเป็นด้านเปิด เพื่อนำเข้าค่าระดับน้ำขึ้นน้ำลงในแบบจำลอง (ภาพที่ 1 ขวา) กำหนดให้ขอบเขตเริ่มต้นของการจำลองการไหลเวียนกระแสน้ำอยู่ในสภาวะนิ่ง (Steady state) หรือการกำหนดให้กระแสและการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำภายในแบบจำลองมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนบริเวณขอบเขตเปิดกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำตามขั้นเวลา (Time step) ของการคำนวณแบบ 2 มิติ (External time step) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5 วินาที ทำการจำลองการไหลเวียนกระแสน้ำเป็นเวลา 50 วัน โดย 20 วันแรกจะไม่มีกระแสการไหล เนื่องจากเป็นช่วงที่แบบจำลองกำลังปรับค่าให้อยู่ในสภาวะเสถียรจากการรบกวนของค่าเฉลี่ยกระแสน้ำภายในพื้นที่การคำนวณทั้งหมด จากนั้นทำการเฉลี่ยค่ากระแส 30 วันที่เหลือให้เป็นการไหลเวียนกระแสน้ำเฉลี่ยรายเดือน ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะใช้ค่าความเร็วกระแสน้ำเฉลี่ยตามความลึก (Depth averaged current)



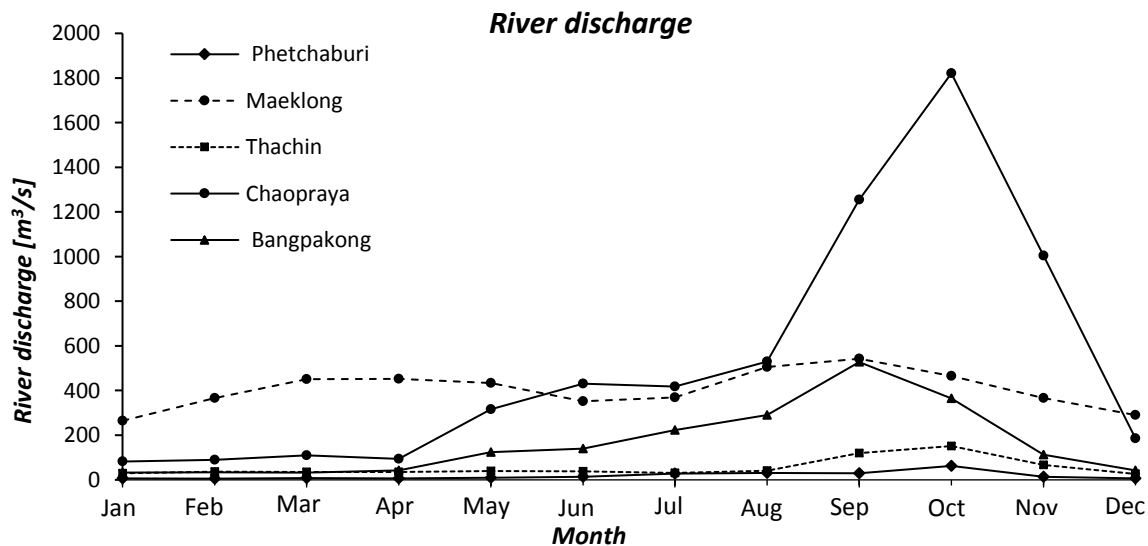
**ภาพที่ 1** ขอบเขตพื้นที่ของแบบจำลองอ่าวไทย (ซ้าย) และแบบจำลองอ่าวไทยตอนเหนือ (ขวา) เส้นประสีน้ำตาลแสดงถึงขอบเขตเปิดของแบบจำลอง ส่วนเส้นคอนทัวร์แสดงถึงความลึกน้ำมีหน่วยเป็นเมตร

### ข้อมูลนำเข้า

การศึกษาการไหลเวียนกระแสน้ำโดยใช้แบบจำลองอุทกพลศาสตร์ POM ในครั้งนี้ได้คำนึงถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการไหลเวียนกระแสน้ำ ได้แก่ ความลึกพื้นท้องทะเล ความเค็มและอุณหภูมิของน้ำทะเล ลม และน้ำขึ้นน้ำลง โดยข้อมูลความลึกพื้นท้องทะเลได้จากค่าการหยั่งน้ำ (Ship-line sounding) จากแผนที่เดินเรือที่เผยแพร่โดยกองสร้างแผนที่ กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ (Nautical Charts Thailand) ข้อมูลความเค็มและอุณหภูมิของน้ำทะเลเฉลี่ยรายเดือน (พ.ศ. 2498 - 2555) ความละเอียด 0.25 องศา จาก National Oceanographic Data Center, NODC; World Ocean Atlas2013 ([https://odv.awi.de/en/data/ocean/world\\_ocean\\_atlas\\_2013](https://odv.awi.de/en/data/ocean/world_ocean_atlas_2013)) และข้อมูลลมเฉลี่ยรายเดือนระยะยาวความละเอียด 0.25 องศา จาก QuickSCAT (<http://www.ssmi.com>) ซึ่งถูกนำมาทำการประมาณค่า (Interpolation) ให้มีจุดพิกัดตรงกับพิกัดของช่องคำนวณในแบบจำลองด้วยวิธีการ Gaussian ดังสมการที่ 1 เมื่อ  $\zeta$  คือค่าของพารามิเตอร์ในจุดที่ต้องการประมาณค่า  $\zeta_0$  คือค่าพารามิเตอร์ในจุดที่ทราบค่า  $d_i$  คือระยะจากจุดที่ต้องการทราบค่ากับจุดที่ทราบค่า และ  $r$  คือรัศมีของการประมาณค่า

$$\zeta = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i \zeta_{oi})}{\sum_{i=1}^n y_i}, \quad y_i = e^{-d_i^2/r^2} \quad (1)$$

ข้อมูลน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว (พ.ศ. 2543 - 2552) จากแม่น้ำที่ไหลลงสู่อ่าวไทยตอนบน ได้แก่ แม่น้ำเพชรบุรี แม่น้ำแม่กลอง แม่น้ำท่าจีน แม่น้ำเจ้าพระยา และแม่น้ำบางปะกง จากข้อมูลปริมาณน้ำท่าโดยกรมชลประทาน (ภาพที่ 2) ถูกกำหนดให้เป็นเงื่อนไขขอบเขตที่บริเวณปากแม่น้ำแต่ละสาย (ภาพที่ 1 ขวา) ในการคำนวณของแบบจำลอง ส่วนข้อมูลระดับน้ำขึ้นน้ำลงได้จากการจำลองการไหลเวียนกระแสน้ำโดยแบบจำลองอ่าวไทย ซึ่งจะเก็บค่าระดับน้ำขึ้นน้ำลงบริเวณที่ตรงกับขอบเขตเปิดของแบบจำลองอ่าวไทยตอนเหนือ 2 จุดคือ GoT1 และ GoT2 (ภาพที่ 1 ซ้าย) จากนั้นนำข้อมูลระดับน้ำขึ้นน้ำลงมาทำการประมาณค่าแบบเชิงเส้น (Linear interpolation) ให้มีพิกัดตรงกับช่องคำนวณของขอบเขตเปิดในแบบจำลองอ่าวไทยตอนเหนือ (ภาพที่ 1 ขวา)



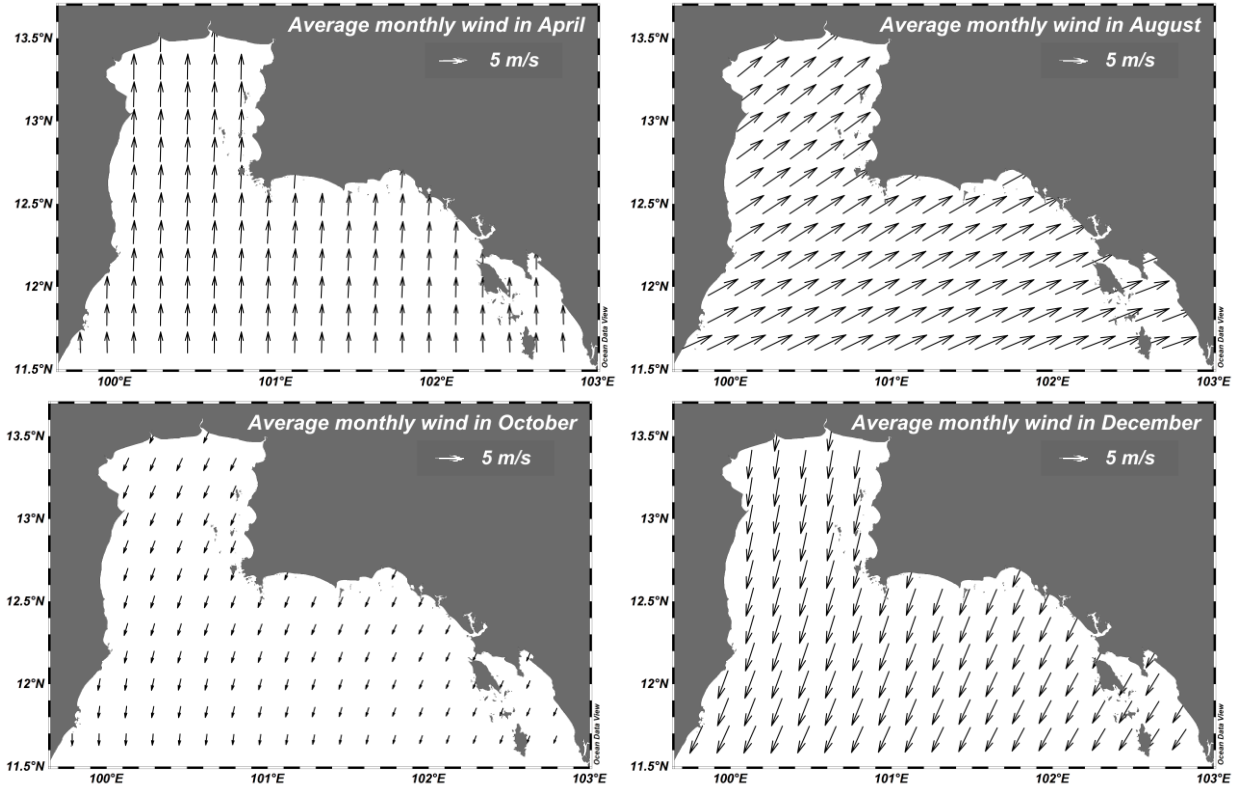
ภาพที่ 2 ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนระยะยาวจากแม่น้ำสายหลักที่ไหลลงสู่อ่าวไทยตอนบน (ที่มา: กรมชลประทาน)

แบบจำลองอ่าวไทยครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่ละติจูด 5 ถึง 14 องศาเหนือ และลองจิจูด 99 ถึง 106 องศาตะวันออก ความละเอียดเชิงพื้นที่เท่ากับ 5 ลิปดา และความละเอียดตามความลึก (Sigma layer) เท่ากับ 10 ชั้น โดยข้อมูลนำเข้าที่ใช้ในการคำนวณเป็นข้อมูลชุดเดียวกันกับแบบจำลองอ่าวไทยตอนเหนือ ยกเว้นค่าระดับน้ำขึ้นน้ำลงบริเวณขอบเขตเปิดได้จากการวิเคราะห์แบบฮาร์โมนิก (Harmonic analysis) โดยใช้ค่าองค์ประกอบของน้ำขึ้นน้ำลง 9 ตัว (ตารางที่ 1) ที่ได้จากแบบจำลองน้ำขึ้นน้ำลง TPX08-ATLAS ([http://volkov.oce.orst.edu/tides/tpxo8\\_atlas.html](http://volkov.oce.orst.edu/tides/tpxo8_atlas.html)) บริเวณขอบเขตเปิด 3 จุดคือ A – C (ภาพที่ 1 ซ้าย) ทำการจำลองการไหลเวียนกระแสน้ำโดยใช้แบบจำลอง POM เช่นเดียวกัน โดยกำหนดค่ากระแสน้ำและระดับน้ำเริ่มต้นภายในแบบจำลองให้มีค่าเป็นศูนย์ กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับน้ำบริเวณขอบเขตเปิดตามช่วงเวลาของการคำนวณแบบ 2 มิติ (10 วินาที) จากนั้นทำการจำลองการไหลเวียนกระแสน้ำเป็นเวลา 70 วัน โดย 20 วันแรกเป็นช่วงปรับตัวเพื่อให้เข้าสู่สภาวะเสถียรของแบบจำลอง จากนั้นจึงทำการเก็บค่าการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำขึ้นน้ำลงในทุกครึ่งชั่วโมง หลังจากนั้นวันที่ 20 เป็นต้นไป

**ตารางที่ 1** ค่าองค์ประกอบหลักน้ำขึ้นน้ำลงที่ใช้ในการคำนวณระดับน้ำบริเวณขอบเขตเปิดของแบบจำลองอ่าวไทย

Harmonic	103.5396 °E, 4.4497 °N (A)		106.0594 °E, 4.4497 °N (B)		106.0594 °E, 9.2094 °N (C)	
Constituents	Amplitude(cm)	Phase(deg.)	Amplitude(cm)	Phase(deg.)	Amplitude(cm)	Phase(deg.)
$K_1$	53.20	245.22	48.04	239.06	64.95	230.06
$O_1$	30.68	207.57	30.82	203.32	43.78	189.33
$M_2$	32.47	8.68	9.20	358.75	97.44	230.79
$S_2$	12.94	44.69	2.36	36.38	37.42	271.84
$P_1$	15.49	246.41	14.92	239.83	19.38	230.23
$Q_1$	6.13	185.62	6.32	190.95	8.64	174.69
$N_2$	6.55	347.66	1.97	336.04	17.45	212.60
$K_2$	3.78	52.52	0.81	60.26	11.05	275.19
$M_4$	0.67	333.43	0.40	180.14	0.72	123.69

ข้อมูลลมเฉลี่ยรายเดือน (ภาพที่ 3) ถูกนำมาใช้เป็นตัวแทนของฤดูกาลต่าง ๆ ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ เดือนเมษายน (April) เป็นตัวแทนของช่วงเปลี่ยนฤดูครั้งที่ 1 โดยลมมีทิศพัดมาจากทางใต้ด้วยความเร็วเฉลี่ยประมาณ 10 เมตร/วินาที เดือนสิงหาคม (August) เป็นตัวแทนของช่วงฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งลมพัดมาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ด้วยความเร็วเฉลี่ยมากกว่า 10 เมตร/วินาที ส่วนเดือนตุลาคม (October) ลมพัดมาจากทางทิศเหนือด้วยความเร็วเฉลี่ยน้อยกว่า 5 เมตร/วินาที ใช้เป็นตัวแทนของช่วงเปลี่ยนฤดูครั้งที่ 2 และสุดท้ายเดือนธันวาคม (December) ลมพัดมาจากทางทิศเหนือและทิศตะวันออกเฉียงเหนือด้วยความเร็วเฉลี่ยประมาณ 10 เมตร/วินาที ซึ่งเป็นตัวแทนของช่วงฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ



ภาพที่ 3 ข้อมูลลมเฉลี่ยรายเดือนระยะยาวที่เป็นตัวแทนของช่วงฤดูกาลต่าง ๆ (ข้อมูลลมจาก QuickSCAT)

**เงื่อนไขขอบเขตเปิด**

เงื่อนไขขอบเขตเปิดของแบบจำลองที่นำ้เข้าระดับน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal elevation) ในการศึกษาครั้งนี้ถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบระดับน้ำ (Tidal Forcing condition; Case B1) ซึ่งจะอัปเดตค่าการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำขึ้นน้ำลงเข้าไปในการคำนวณโดยตรง และแบบที่ 2 คือแบบกระแสน้ำ (Current forcing condition; Case B2) โดยค่าการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำขึ้นน้ำลงจะถูกเปลี่ยนให้เป็นค่าความเร็วกระแสน้ำก่อนนำ้เข้าในการคำนวณ ดังสมการที่ 2

$$H\bar{U}_B = H\bar{U}_{B-1} \pm c_e\eta, \quad c_e = \sqrt{gH} \tag{2}$$

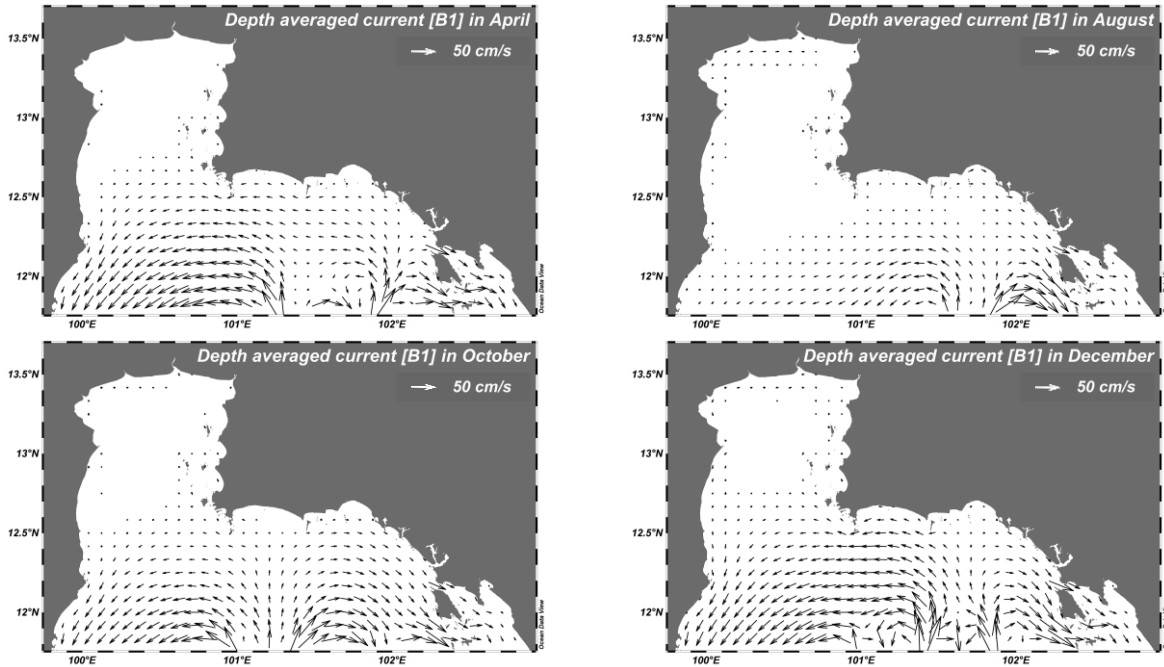
เมื่อ  $\eta$  คือค่าระดับน้ำขึ้นน้ำลง  $H$  คือความลึกน้ำ (เมตร)  $\bar{U}$  คือความเร็วกระแสน้ำเฉลี่ยตามความลึก (เมตร/วินาที)  $g$  คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตร/วินาที<sup>2</sup>)  $B$  คือช่องกริดที่เป็นขอบเขตเปิด และ  $B - 1$  คือช่องกริดที่อยู่ถัดเข้าไปในแบบจำลอง  $c_e$  คือความเร็วของคลื่นน้ำตื้น (เมตร/วินาที)

## ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

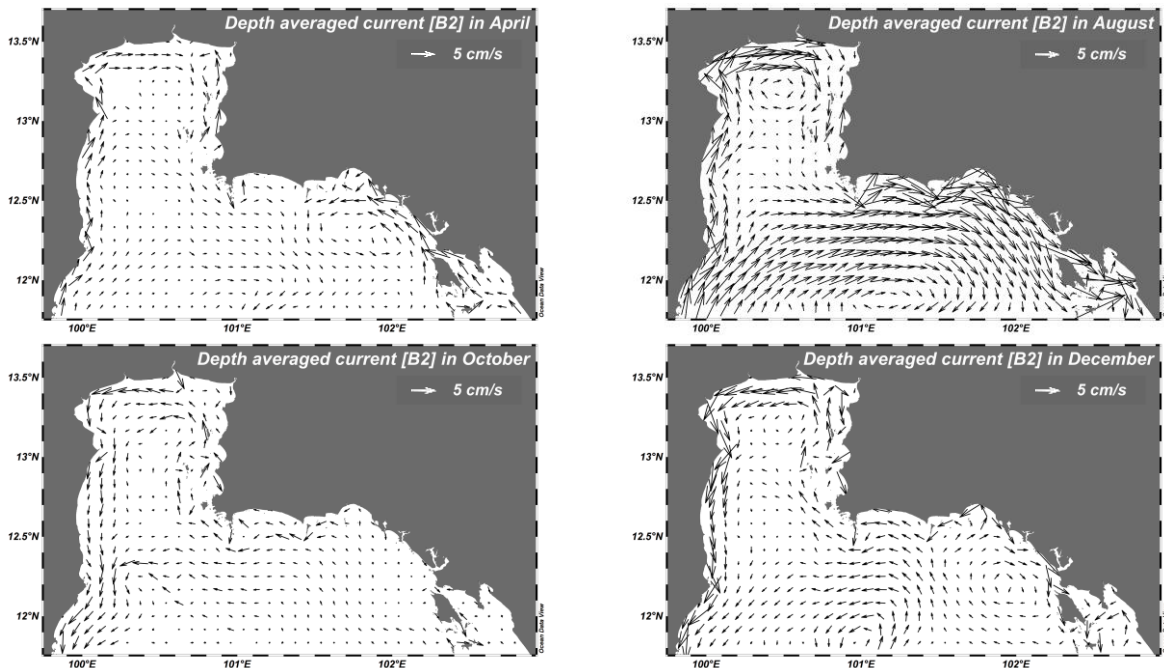
ผลจากแบบจำลอง Case B1 และ Case B2 แสดงการกระจายตัวของเวกเตอร์ความเร็วกระแสน้ำเฉลี่ยตามความลึกรายเดือนในภาพที่ 4 และ 5 ค่าดังกล่าวแสดงถึงลักษณะการไหลเวียนเฉลี่ยของมวลน้ำที่บริเวณพื้นที่ศึกษาในช่วงเวลาต่าง ๆ ได้แก่ ช่วงเปลี่ยนฤดูครั้งที่ 1 (เมษายน) ช่วงฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (สิงหาคม) ช่วงเปลี่ยนฤดูครั้งที่ 2 (ตุลาคม) และช่วงฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (ธันวาคม) พบว่าการไหลเวียนกระแสน้ำของเงื่อนไขขอบเขตเปิด Case B1 ไหลขึ้นมาทางทิศเหนือด้านตะวันออกของขอบเขตเปิดด้วยความแรงมากกว่า 100 เซนติเมตร/วินาที จากนั้นไหลวกไปด้านข้างและไหลลงได้ออกไปทางขอบเขตเปิดด้วยความแรงเช่นเดียวกัน กระแสน้ำด้านในไหลแยกออกเป็น 2 ฝั่งตามแนวที่กระแสน้ำไหลขึ้นมาและไหลลงได้ออกจากขอบเขตเปิดในลักษณะที่คล้ายกันในทุกฤดูกาล (ภาพที่ 4) สำหรับเงื่อนไขขอบเขตเปิด Case B2 พบว่ากระแสน้ำบริเวณขอบเขตเปิดส่วนใหญ่มีลักษณะเบา แต่มีทิศทางสอดคล้องกับทิศทางของกระแสน้ำภายในแบบจำลอง ซึ่งมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล (ภาพที่ 5)

เนื่องจากลมเป็นอิทธิพลหลักในการขับเคลื่อนการไหลเวียนกระแสน้ำในบริเวณอ่าวไทยและอ่าวไทยตอนบน (Yanagi & Takao, 1998; Buranapratheprat, 2008) ในส่วนของเงื่อนไขขอบเขตเปิด Case B2 พบว่าช่วงเปลี่ยนฤดูครั้งที่ 1 กระแสน้ำไหลขึ้นมาทางทิศเหนือจากขอบเขตเปิดด้านตะวันออกและไหลไปทางตะวันตกเฉียงเหนือออกออกไปบริเวณตอนกลางอ่าว บางส่วนไหลขึ้นมาทางด้านตะวันตกของขอบเขตเปิดและไหลเลียบชายฝั่งขึ้นไปทางทิศเหนือเข้าสู่อ่าวไทยตอนบน กระแสน้ำเฉลี่ยตามความลึกในช่วงนี้มีความเร็วต่ำ (10 เซนติเมตร/วินาที) ในช่วงฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ กระแสน้ำไหลขึ้นมาทางทิศเหนือจากขอบเขตเปิดด้านตะวันตกและไหลเฉียงไปทางตะวันออก บางส่วนไหลเลียบชายฝั่งไปทางทิศเหนือเข้าสู่อ่าวไทยตอนบน ความเร็วกระแสในช่วงนี้มีความแรงมากกว่าช่วงฤดูกาลอื่น ๆ (20 เซนติเมตร/วินาที) ในช่วงเปลี่ยนฤดูครั้งที่ 2 พบว่ากระแสน้ำไหลขึ้นไปทางทิศเหนือจากขอบเขตเปิดด้านตะวันออกจากนั้นไหลเฉียงไปทางตะวันตก และไหลต่อเนื่องไปทางทิศเหนือเข้าสู่อ่าวไทยตอนบนจากชายฝั่งด้านตะวันออกด้วยความเร็วต่ำเช่นเดียวกับช่วงเปลี่ยนฤดูครั้งที่ 1 แต่บริเวณใกล้กับชายฝั่งตอนในและชายฝั่งตะวันตกมีความแรงมากกว่าเดือนเมษายนถึงแม้ว่าลมจะเบากว่า เนื่องจากช่วงเดือนตุลาคมได้รับอิทธิพลจากน้ำท่าที่ไหลลงสู่อ่าวไทยตอนบนในปริมาณที่สูงกว่าเดือนเมษายน ส่วนในช่วงฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ กระแสน้ำไหลขึ้นมาทางทิศเหนือของขอบเขตเปิดบริเวณกลางอ่าวและไหลแยกไปทางตะวันตกและตะวันออก จากนั้นไหลเลียบชายฝั่งออกไปด้านข้างและไหลลงไปได้ กระแสน้ำเฉลี่ยตามความลึกในช่วงนี้มีความเร็วประมาณ 15 เซนติเมตร/วินาที

กระแสเฉลี่ยตามความลึกบริเวณอ่าวไทยตอนบนของเงื่อนไขขอบเขตเปิดแบบระดับน้ำและแบบกระแสมีความเร็วที่แตกต่างกันในบางพื้นที่ ได้แก่ บริเวณใกล้กับชายฝั่งตอนบนและบริเวณกลางอ่าวกระแสน้ำของเงื่อนไขขอบเขตเปิด Case B2 มีความเร็วมากกว่า Case B1 ส่วนบริเวณชายฝั่งด้านตะวันออกทางตอนใต้ใกล้กับแนวเกาะล้านและเกาะครามใหญ่กระแสน้ำของเงื่อนไขขอบเขตเปิด Case B1 มีความเร็วมากกว่า Case B2 แต่กระแสน้ำของขอบเขตเปิดทั้ง 2 แบบมีรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลที่คล้ายคลึงกัน คือ ในช่วงเปลี่ยนฤดูครั้งที่ 1 กระแสน้ำไหลแบบตามเข็มนาฬิกาทั่วทั้งอ่าวคล้ายกับช่วงฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้แต่มีความแรงน้อยกว่า ซึ่งตรงข้ามกับช่วงเปลี่ยนฤดูครั้งที่ 2 และช่วงฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่กระแสน้ำไหลแบบทวนเข็มนาฬิกาทั่วทั้งอ่าว โดยในช่วงฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือมีความแรงมากกว่าช่วงเปลี่ยนฤดูทั้ง 2 ครั้ง แต่มีความแรงน้อยกว่าช่วงฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (ภาพที่ 6)

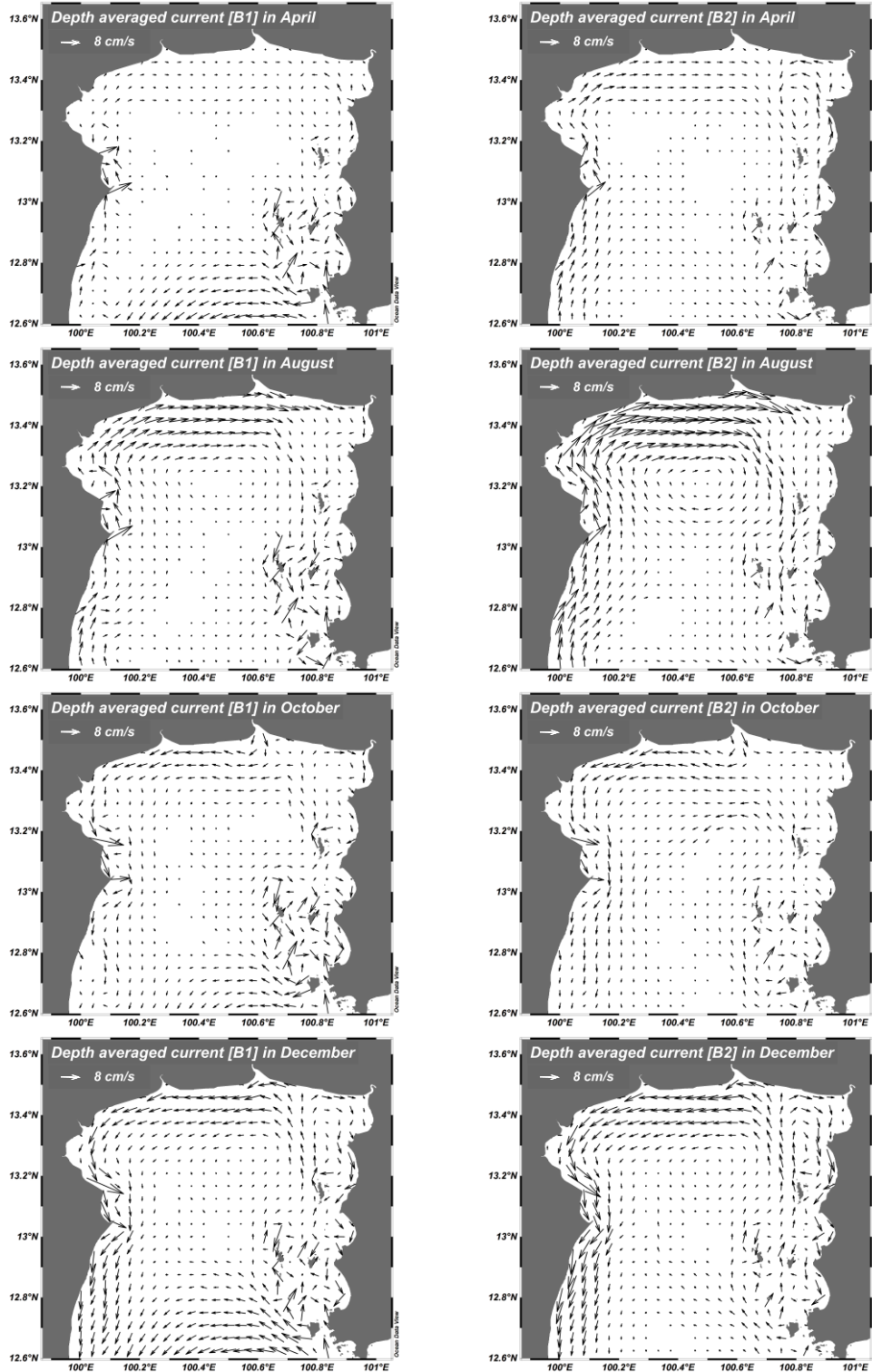


**ภาพที่ 4** การไหลเวียนกระแสน้ำเฉลี่ยตามความลึกรายเดือน ตามเงื่อนไขขอบเขตเปิดแบบระดับน้ำ (Case B1) ที่เป็นตัวแทนในช่วงฤดูกาลต่าง ๆ (ลูกศรแสดงถึงทิศทางและความเร็วของกระแสน้ำ)



**ภาพที่ 5** การไหลเวียนกระแสน้ำเฉลี่ยตามความลึกรายเดือน ตามเงื่อนไขขอบเขตเปิดแบบกระแสน้ำ (Case B2) ที่เป็นตัวแทนในช่วงฤดูกาลต่าง ๆ (ลูกศรแสดงถึงทิศทางและความเร็วของกระแสน้ำ)

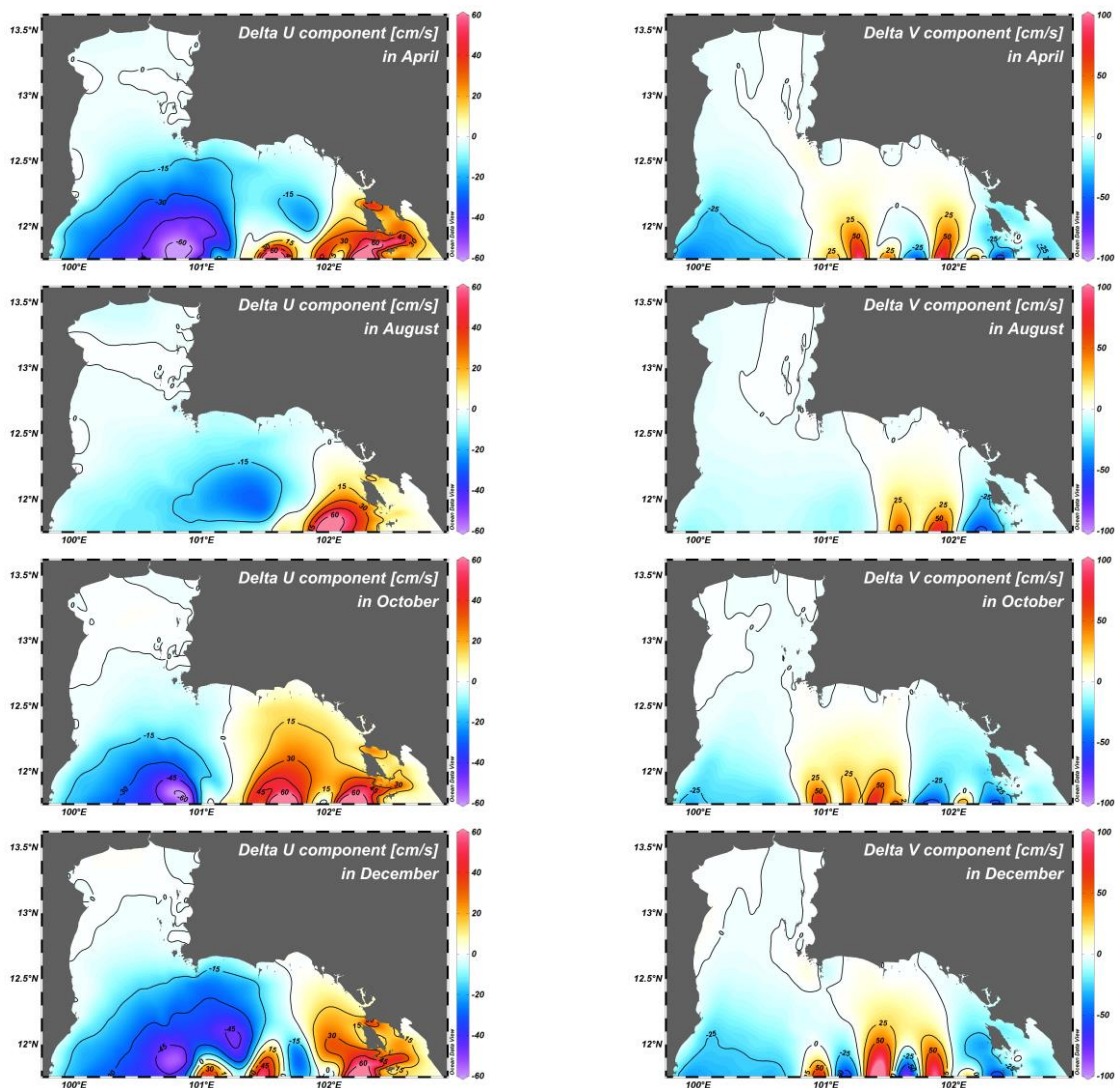




**ภาพที่ 6** การไหลเวียนกระแสน้ำเฉลี่ยตามความลึกกระจายเดือนบริเวณอ่าวไทยตอนบนที่เป็นตัวแทนในช่วงฤดูกาลต่าง ๆ ตามเงื่อนไขขอบเขตเปิดแบบระดับน้ำ (ซ้าย) และแบบกระแสน้ำ (ขวา) (ลูกศรแสดงถึงทิศทางและความเร็วของกระแสน้ำ)

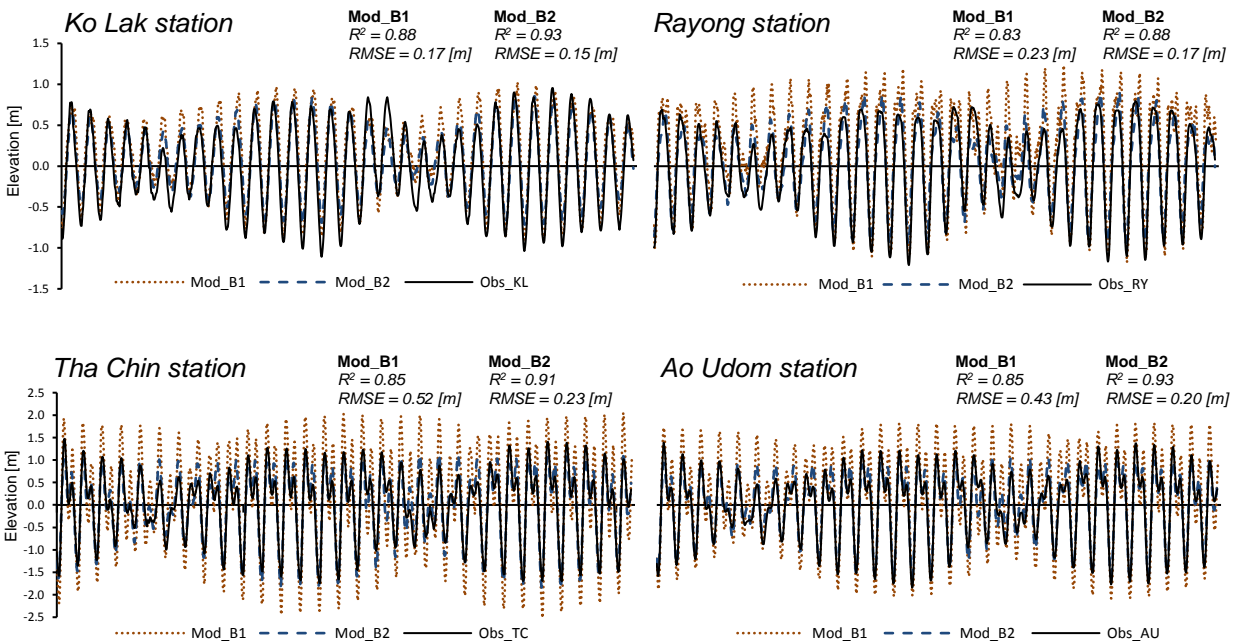
จากการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่ากระแสน้ำเฉลี่ยตามความลึกระหว่างเงื่อนไขขอบเขตเปิดแบบระดับน้ำและแบบกระแสน้ำ ตามสมการที่ 3 เมื่อ  $U$  คือการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำในแนวแกน  $x$  และ  $V$  คือการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำในแนวแกน  $y$  ตามลำดับ พบว่ากระแสน้ำบริเวณอ่าวไทยตอนบนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ทั้งในแนวตะวันออก-ตะวันตก ( $U$  component) และในแนวเหนือ-ใต้ ( $V$  component) แสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขขอบเขตเปิดทั้ง 2 แบบแทบไม่มีความแตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากกระแสน้ำขึ้นน้ำลงที่นำเข้ามาโดยตรงไม่ส่งอิทธิพลต่อกระแสน้ำที่อยู่ด้านไกลออกไปจากขอบเขตเปิด ในขณะที่กระแสน้ำบริเวณใกล้กับขอบเขตเปิดมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในทิศทางตรงกันข้ามทั้งในแนวตะวันออก-ตะวันตก และแนวเหนือ-ใต้ (ภาพที่ 7)

$$\Delta \vec{U} = \vec{U}_{B1} - \vec{U}_{B2} \quad \text{และ} \quad \Delta \vec{V} = \vec{V}_{B1} - \vec{V}_{B2} \quad (3)$$



ภาพที่ 7 ความแตกต่างของกระแสน้ำของเงื่อนไขขอบเขตเปิดในแนวตะวันออก-ตะวันตก (ซ้าย) และแนวเหนือ-ใต้ (ขวา) ที่เป็นตัวแทนในช่วงฤดูกาลต่าง ๆ

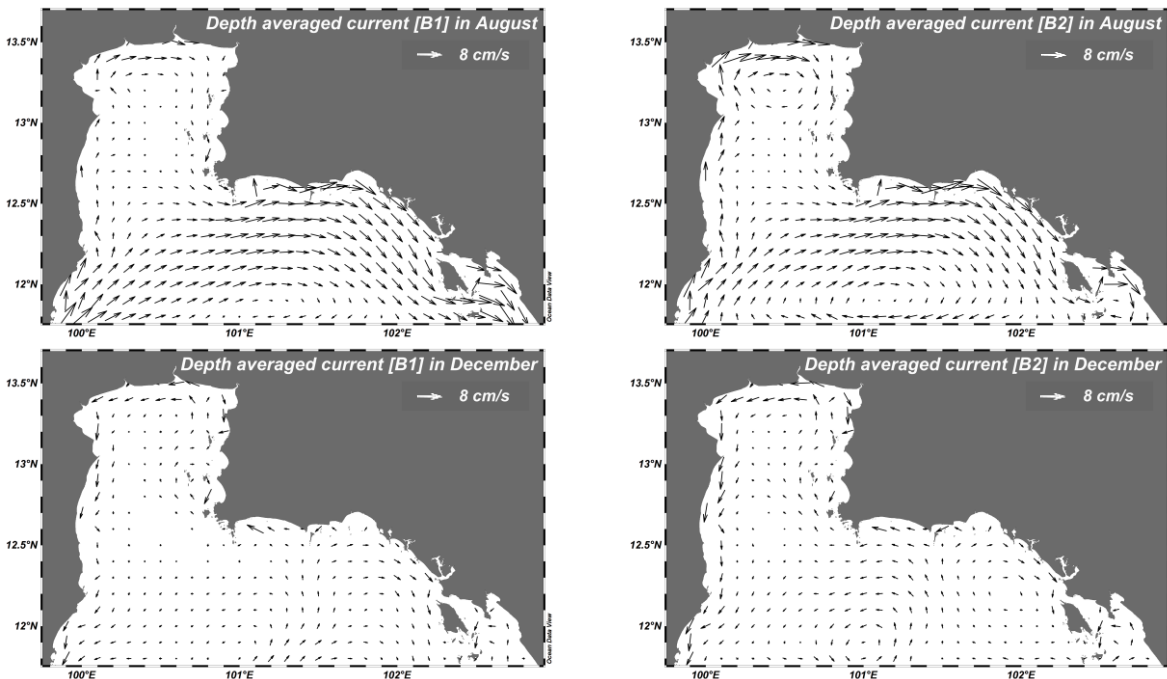
จากการเปรียบเทียบค่าระดับน้ำขึ้นน้ำลงจากแบบจำลองอ่าวไทยตอนเหนือของเงื่อนไขขอบเขตเปิดแบบระดับน้ำ และแบบกระแสน้ำกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงในพื้นที่ศึกษา 4 สถานี ได้แก่ สถานีเกาะหลัก (KL) สถานีท่าจีน (TC) สถานีอ่าวอุดม (AU) และสถานีระยอง (RY) ดังภาพที่ 1 พบว่าค่าระดับน้ำจากเงื่อนไขขอบเขตเปิด Case B2 มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดมากกว่า Case B1 ทั้ง 4 สถานี (ภาพที่ 8) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของเงื่อนไขขอบเขตเปิด Case B1 และ Case B2 เท่ากับ 0.88 และ 0.93 ที่สถานีเกาะหลัก 0.83 และ 0.88 ที่สถานีระยอง 0.85 และ 0.91 ที่สถานีท่าจีน และ 0.85 และ 0.93 ที่สถานีอ่าวอุดม ตามลำดับ และพบว่าค่า RMSE ของเงื่อนไขขอบเขตเปิด Case B2 มีค่าต่ำกว่า Case B1 ทุกสถานีเช่นเดียวกัน โดย Case B1 และ Case B2 ของสถานีเกาะหลักมีค่าเท่ากับ 0.17 และ 0.15 เมตร สถานีระยองเท่ากับ 0.43 และ 0.20 เมตร สถานีท่าจีนเท่ากับ 0.52 และ 0.23 เมตร และสถานีอ่าวอุฒมมีค่าเท่ากับ 0.43 และ 0.20 เมตร ตามลำดับ (ภาพที่ 8) แสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขขอบเขตเปิด Case B2 สามารถนำมาใช้ในการอธิบายแบบจำลองการไหลเวียนกระแสน้ำในบริเวณอ่าวไทยตอนเหนือได้ดีกว่าเงื่อนไขขอบเขตเปิด Case B1



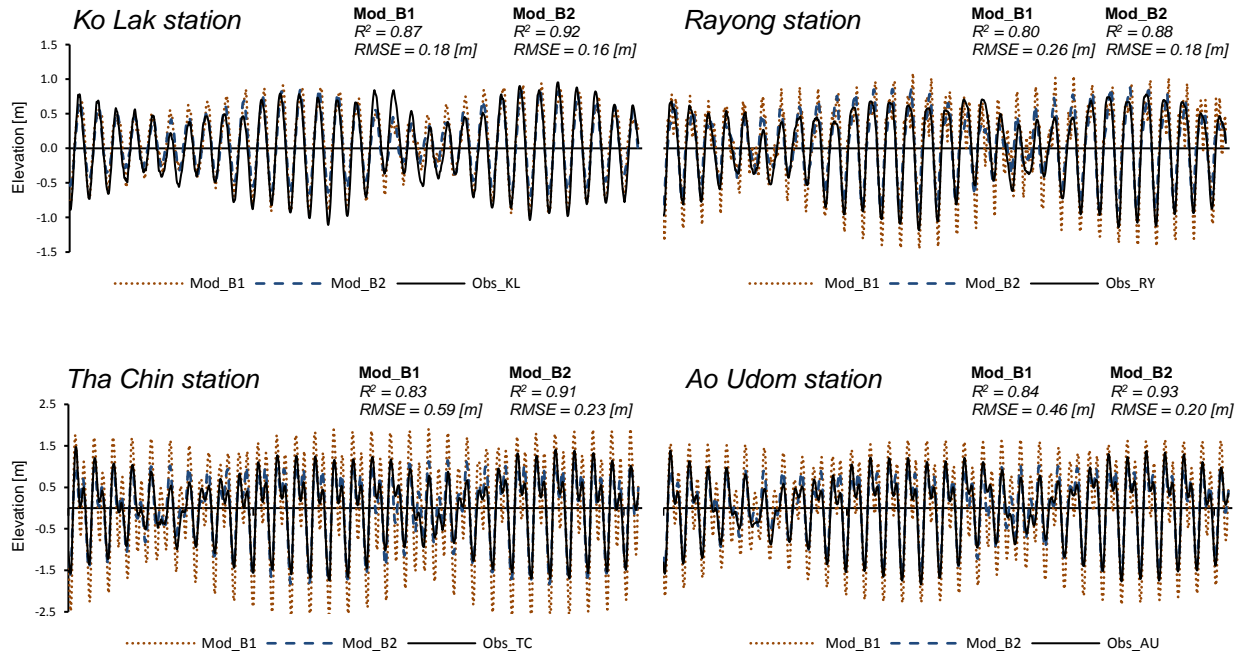
**ภาพที่ 9** การเปรียบเทียบค่าระดับน้ำขึ้นน้ำลงจากแบบจำลองอ่าวไทยตอนเหนือของขอบเขตเปิดแบบระดับน้ำ (Mod\_B1; จุดไข่ปลา) ขอบเขตเปิดแบบกระแสน้ำ (Mod\_B2; เส้นประ) และค่าระดับน้ำตรวจวัด (Obs; เส้นทึบ) จากกรมอุทกศาสตร์ (สถานี Ko Lak) และกรมเจ้าท่า (สถานี Rayong, Tha Chin และ Ao Udom)

เงื่อนไขขอบเขตเปิด Case B1 เป็นการนำค่าระดับน้ำขึ้นน้ำลงเข้าในแบบจำลองโดยตรง แต่เนื่องจากการเกิดคลื่นน้ำต้น (Long wave) ขึ้นภายในแบบจำลองในการคำนวณค่ากระแสน้ำ และเมื่อเฟสของคลื่นจากระดับน้ำขึ้นน้ำลงที่เข้ามาทางบริเวณขอบเขตเปิดไม่ตรงกับเฟสของคลื่นที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลอง ทำให้ค่ากระแสน้ำบริเวณใกล้กับขอบเขตเปิดมีความแรงผิดปกติ และระดับน้ำขึ้นน้ำลงที่ได้จากแบบจำลองมีค่าพิสัยที่สูงกว่าค่าจากการตรวจวัด ส่วนเงื่อนไขขอบเขตเปิด Case B2 มีการแปลงค่าระดับน้ำขึ้นน้ำลงให้เป็นค่ากระแสน้ำก่อนนำเข้าในแบบจำลอง และการปรับค่าเฟสของคลื่นที่ไม่ตรงกันระหว่างคลื่นที่เกิดขึ้นภายในพื้นที่การคำนวณกับคลื่นน้ำขึ้นน้ำลงที่เข้ามาทางขอบเขตเปิด จึงทำให้แบบจำลองมีเสถียรภาพมากขึ้น ทำให้กระแสน้ำในบริเวณใกล้กับขอบเขตเปิดมีขนาดที่เบาลง

กระแสน้ำที่มีความแรงผิดปกติบริเวณใกล้กับขอบเขตเปิดของ Case B1 อาจเกิดจากช่องคำนวณที่มีขนาดเล็ก ( $0.5 \times 0.5$  ลิปดา) ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยทดลองเพิ่มขนาดของช่องคำนวณให้ใหญ่ขึ้นเป็น  $3 \times 3$  ลิปดา และทำการศึกษาซ้ำแบบเดิมใน 2 ฤดูกาลคือ ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ เพื่อพิจารณาการตอบสนองของขอบทะเลเปิดทั้ง 2 แบบต่อขนาดกริดที่เพิ่มขึ้น ผลจากการจำลองการไหลเวียนกระแสน้ำของแบบจำลองความละเอียดเชิงพื้นที่ต่ำ ดังภาพที่ 10 แสดงให้เห็นว่าขอบเขตเปิด Case B1 มีความเสถียรมากขึ้นสามารถจำลองการไหลเวียนกระแสน้ำได้ใกล้เคียงกับ Case B2 และไม่พบลักษณะของกระแสน้ำที่ผิดปกติใกล้กับขอบเขตเปิดเหมือนกับแบบจำลองความละเอียดเชิงพื้นที่สูง เมื่อพิจารณาที่การเปรียบเทียบค่าระดับน้ำพบว่า เงื่อนไขขอบเขตเปิด Case B2 ยังคงมีลักษณะใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดมากกว่า Case B1 ในทุกสถานีเช่นเดียวกับแบบจำลองความละเอียดเชิงพื้นที่สูง (ภาพที่ 11)



**ภาพที่ 10** การไหลเวียนกระแสน้ำเฉลี่ยตามความลึกรายเดือนบริเวณอ่าวไทยตอนเหนือของแบบจำลองความละเอียดเชิงพื้นที่ต่ำ ( $3 \times 3$  ลิปดา) ที่เป็นตัวแทนในช่วงฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (August) และฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (December) ตามเงื่อนไขขอบเขตเปิดแบบระดับน้ำ (ซ้าย) และเงื่อนไขขอบเขตเปิดแบบกระแสน้ำ (ขวา)



**ภาพที่ 11** การเปรียบเทียบค่าระดับน้ำขึ้นน้ำลงของแบบจำลองความละเอียดเชิงพื้นที่ต่ำ (3 x 3 ลิปตา) ของขอบเขตเปิดแบบระดับน้ำ (Mod\_B1; จุดไข่ปลา) ขอบเขตเปิดแบบกระแสน้ำ (Mod\_B2; เส้นประ) และค่าระดับน้ำตรวจวัด (Obs; เส้นทึบ) จากกรมอุทกศาสตร์ (สถานี Ko Lak) และกรมเจ้าท่า (สถานี Rayong, Tha Chin และ Ao Udom)

**สรุปผลการวิจัย**

จากการจำลองการไหลเวียนกระแสน้ำบริเวณอ่าวไทยตอนเหนือภายใต้เงื่อนไขขอบเขตเปิดที่แตกต่างกัน พบว่าความเร็วกระแสน้ำเฉลี่ยตามความลึกของเงื่อนไขขอบเขตเปิดแบบระดับน้ำและแบบกระแสน้ำมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในบริเวณใกล้กับขอบเขตเปิด โดยกระแสน้ำจากเงื่อนไขขอบเขตเปิดแบบระดับน้ำมีความแรงผิดปกติ ส่วนกระแสน้ำจากเงื่อนไขขอบเขตเปิดแบบกระแสน้ำมีลักษณะเบากว่า แต่กระแสน้ำทั้ง 2 เงื่อนไขไม่มีความแตกต่างในบริเวณอ่าวไทยตอนบน เมื่อพิจารณาที่ระดับน้ำขึ้นน้ำลง พบว่าเงื่อนไขขอบเขตเปิดแบบกระแสน้ำให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดมากกว่าเงื่อนไขขอบเขตเปิดแบบระดับน้ำ และจากการจำลองการไหลเวียนกระแสน้ำโดยแบบจำลองความละเอียดเชิงพื้นที่ต่ำ พบว่าเงื่อนไขขอบเขตเปิดแบบระดับน้ำมีความเสถียรมากขึ้นและสามารถจำลองการไหลเวียนกระแสน้ำได้ดีกว่าแบบจำลองความละเอียดเชิงพื้นที่สูง ในขณะที่เงื่อนไขขอบเขตเปิดแบบกระแสน้ำให้ผลการคำนวณที่ไม่แตกต่างจากแบบจำลองความละเอียดเชิงพื้นที่สูง จากการเปรียบเทียบค่าระดับน้ำพบว่าเงื่อนไขแบบกระแสน้ำยังคงมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดมากกว่าเงื่อนไขแบบระดับน้ำ แสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขขอบเขตเปิดแบบกระแสน้ำมีความเหมาะสมในการนำมาศึกษาการไหลเวียนกระแสน้ำในบริเวณอ่าวไทยตอนเหนือมากกว่าเงื่อนไขแบบระดับน้ำ

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกรมเจ้าท่าและกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ สำหรับการเอื้อเฟื้อข้อมูลตรวจวัดระดับน้ำขึ้นน้ำลง เพื่อใช้ในการสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง และภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกและห้องปฏิบัติการในการทำวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- Blumberg, A. F., & Mellor, G. L. (1978). A coastal ocean numerical model. In *Proceedings of an International Symposium: Mathematical modelling of estuarine physics*: (pp. 202-219). Berlin: Springer-Verlag.
- Buranapratheprat, A., Yanagi, T., & Sawangwong, P. (2002). Seasonal variations in circulation and salinity distributions in the Upper Gulf of Thailand: Modeling approach. *La mer*, 40, 147-155.
- Buranapratheprat, A. (2008). Circulation in the Upper Gulf of Thailand: A review. *Burapha Science Journal*, 13(1), 75-83. (in Thai)
- Buranapratheprat, A., Niemann, K. O., Yanagi, T., Matsumura S., & Sojisuporn P. (2009). Circulation in the Upper Gulf of Thailand investigated Using a Three-Dimensional Hydrodynamic Model. *Burapha Science Journal*, 14(1), 99-113. (in Thai)
- Mellor, G. L. (1998). *Users guide for a Three-dimensional, Primitive equation, Numerical ocean model*. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University, Princeton, N.J. 08544-0710
- Yanagi, T., & Takao, T. (1998). Seasonal variation of three-dimensional circulations in the Gulf of Thailand. *La mer*, 36, 43-55.