

การศึกษาการเคลื่อนตัวของตะกอนบริเวณปากร่องน้ำบ้านกรูด  
โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Study of sediment transport on the bankrud channel  
By mathematical model

สุนทร เฉินประยูร<sup>1</sup> จิระวัฒน์ กณะสุต<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
จ.กรุงเทพมหานคร 10900

<sup>1,2</sup> Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering,  
Kesetsart University, Bangkok 10900

E-mail address: sapagetty@hotmail.com<sup>1</sup> fengjwg@ku.ac.th<sup>2</sup>

## บทคัดย่อ

ร่องน้ำบ้านกรูดตั้งอยู่ในตำบลธงชัย อำเภอบางสะพาน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ลักษณะร่องน้ำเป็นโค้งหักซ้าย โดยด้านในร่องน้ำเป็นที่สำหรับขนถ่ายสินค้าประมงและใช้หลบคลื่นลม ร่องน้ำบ้านกรูดมีคลองกรูดเป็นคลองที่น้ำไหลลงมายังปากร่องน้ำ มีขนาดความกว้างคลอง 30 เมตร ส่วนความกว้างร่องน้ำเดินเรือประมาณ 10 เมตร ปัจจุบันร่องน้ำบ้านกรูดประสบปัญหาตื้นเขินทุกปี เนื่องจากในฤดูน้ำหลากน้ำในคลองกรูดมีอัตราการระบายน้ำมาก ทำให้สามารถระบายน้ำและผลักดันน้ำทะเลและระบายตะกอนออกสู่ทะเลได้ แต่ในฤดูน้ำแล้งปริมาณน้ำในคลองกรูดมีอัตราการระบายน้ำน้อยทำให้ตะกอนทรายในลำน้ำไม่สามารถระบายออกสู่ทะเลได้ อีกทั้งคลื่นได้พัดพาตะกอนทรายตามแนวชายฝั่งมาทับถมที่บริเวณปากร่องน้ำบ้านกรูด ทำให้เรือประมงที่เข้าออกในร่องน้ำ ไม่สามารถเดินเรือได้อย่างสะดวกและปลอดภัย ทางท้องถิ่นได้มีมาตรการแก้ไขโดยการขุดลอกร่องน้ำมาโดยตลอด แต่ไม่สามารถแก้ไขได้อย่างยั่งยืน ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของตะกอนทรายบริเวณชายฝั่งบ้านกรูด โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MIKE 21 มาช่วยในการวิเคราะห์ถึงสภาพการเคลื่อนที่ของตะกอนและนำผลการศึกษาไปใช้ในการพัฒนาปรับปรุงการระบายน้ำในคลองและหามาตรการป้องกันการเกิดตะกอนทับถมบริเวณปากร่องน้ำ

คำสำคัญ: บ้านกรูด, การเคลื่อนที่ของตะกอน, กระแสน้ำ

## Abstract

Bankrud channel is located in Thongchai Sub-district, Bangsaphan District, Prachuap Khirikhan Province. The appearance of the channel is sharp left curve. The channel is used for shipping fishery goods and avoiding wind waves. Krud canal, 30 meters width in total, is approximately 10 meters width for navigation and flows into Bankrud channel at the estuary of the channel. Currently, Bankrud channel encounters shallow water level every year due to in flooding season, Krud canal has

a high rate of drainage so the water and the sediment can be pushed and drained into the sea, but in dry season, it has a low rate of drainage so the sediment cannot be transported into the sea effectively. Further, the wave of the sea also transport the silt from the shore to pile up at the estuary of the channel. Because of piled up sediment, the ships cannot be sailed conveniently and safely. People and organizations in the area have been trying to solve this problem by dredging the channel, but the problem has not been solved sustainably. The purpose of this study is to study the sediment transportation on Bankrud shore by using MIKE 21 mathematical model to analyze the condition of sediment transportation and apply the analyzed result with water drainage development and improvement, also, find out the preventive measure for the sediment transportation on the channel estuary.

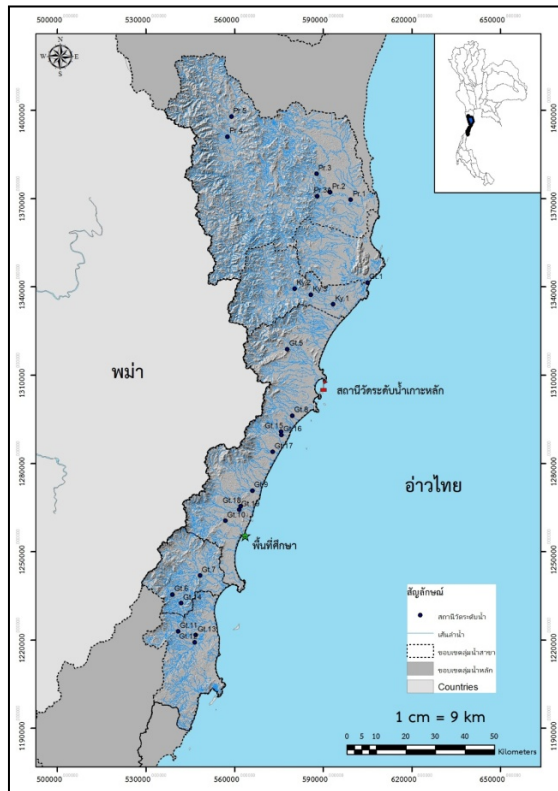
Keywords: Bankrud, Sediment Transport, Current

## 1. บทนำ

ร่องน้ำบ้านกรูด มีที่ตั้งอยู่ในตำบลธงชัย อำเภอบางสะพาน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ร่องน้ำมีความกว้างคลอง 30 เมตร ส่วนความกว้างร่องน้ำเดินเรือประมาณ 10 เมตร บริเวณปากร่องน้ำบ้านกรูดทางทิศเหนือติดกับเขาธงชัย ทิศใต้ติดกับหาดบ้านกรูด ที่มีความยาวหาดประมาณ 10 กิโลเมตร ลักษณะร่องน้ำบ้านกรูดจะมีลักษณะโค้งหักซ้ายเพื่อดำเนินสามารถใช้หลบคลื่นลมและขนถ่ายสินค้าประมงได้สะดวก โดยในร่องน้ำบ้านกรูดมีเรือประมงประมาณ 200 ลำ มาใช้ประโยชน์ท่าเรือที่ตั้งอยู่ในร่องน้ำบ้านกรูดเพื่อขนถ่ายสินค้าประมงและหลบคลื่นลมในร่องน้ำเป็นจำนวนมากในช่วงที่มีคลื่นลมแรง ในปัจจุบันร่องน้ำประสบสภาพปัญหาตื้นเขิน เนื่องจากในฤดูมรสุม คลื่นลมพัดพาตะกอนทรายมาทับถมที่บริเวณปากร่องน้ำ ทำให้เกิดสันดอนส่งผลให้เรือประมงที่อาศัยอยู่ในร่องน้ำ ไม่สามารถเดินเรือเข้าออก ได้อย่างสะดวกและปลอดภัย ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจของชุมชนในพื้นที่ ประชาชนขาดรายได้และต้องหางานเลี้ยงชีพอื่นต่างถิ่นที่ไกลออกไป

ร่องน้ำบ้านกรูดมีปัญหาร่องน้ำตื้นเขินเกือบทุกปี ทางท้องถิ่นได้ดำเนินการแก้ปัญหาตื้นเขินโดยการขุดลอกปากร่องน้ำมาโดยตลอด แต่ไม่สามารถแก้ไขได้อย่างยั่งยืน จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาการเคลื่อนตัวของตะกอนบริเวณปากร่องน้ำบ้านกรูดเพื่อนำผลการศึกษาไปพัฒนาปรับปรุงปากร่องน้ำบ้านกรูดต่อไป

การศึกษาในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองสภาพทางอุทกพลศาสตร์และการเคลื่อนที่ของตะกอนบริเวณปากร่องน้ำบ้านกรูด เพื่อวิเคราะห์หาอัตราการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำ โดยกำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษาเป็นบริเวณปากร่องน้ำบ้านกรูด ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษาบริเวณปากร่องน้ำบ้านกรูด

## 2. ทฤษฎี และขั้นตอนการดำเนินงาน

### 2.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์

ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE21 ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Danish Hydraulic Institute (DHI) ซึ่งเป็นแบบจำลอง 2 มิติ เหมาะสำหรับการวิเคราะห์สภาพทางชลศาสตร์ที่เกิดขึ้นในทะเลสาบ ปากแม่น้ำ อ่าว พื้นที่ชายฝั่งทะเลและทะเลเปิด สามารถใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ กระแสน้ำ คลื่นและ ตะกอนได้ สำหรับทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการจัดทำแบบจำลอง MIKE21 แสดงได้ดังนี้

#### 2.1.1 แบบจำลองทางอุทกพลศาสตร์ (MIKE21-HD, Hydrodynamic Module)

##### 1) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การจำลองการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ ความเร็วกระแสน้ำ และการไหลที่ตอบสนองต่อการควบคุมพฤติกรรมไหลในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ทะเลสาบ ปากแม่น้ำ อ่าวและพื้นที่ชายฝั่งทะเล สามารถจำลองสภาพการไหลของน้ำแบบ 2 ทิศทาง (Two Dimensional Hydrodynamic Model) มีสมการควบคุมการไหลคือ Navie-Stokes Equation โดยมีสมมติฐานกล่าวคือ การไหลไม่มีการยุบอัดตัว (Incompressible Fluid) การแปรผันในแนวตั้งมีน้อย และไม่มีการแบ่งชั้นของน้ำ สมการที่ใช้

แก้ปัญหา คือ สมการความต่อเนื่องและสมการโมเมนตัม ทั้งแกน x และ y โดยใช้วิธี Implicit Finite Difference Scheme แสดงได้ดังสมการที่ (1) (2) และ (3) ตามลำดับ  
สมการความต่อเนื่อง :

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (1)$$

สมการโมเมนตัม ทิศทาง X :

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} \\ - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y} \right] - \Omega q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial(p_a)}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

สมการโมเมนตัม ทิศทาง y :

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial x} \right] - \Omega q - fVV_y \\ + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial(p_a)}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

โดยที่

- $h(x, y, t)$  = ความลึกน้ำ (เมตร)
- $d(x, y, t)$  = ความลึกน้ำที่แปรผันตามเวลา (เมตร)
- $\zeta(x, y, t)$  = ระดับผิวน้ำเหนือระดับอ้างอิง (เมตร)
- $p(x, y, t)$  = ความหนาแน่นของการไหลในทิศทางแกน x (ลบ.ม./วินาที/เมตร)
- $q(x, y, t)$  = ความหนาแน่นของการไหลในทิศทางแกน y (ลบ.ม./วินาที/เมตร)
- $C(x, y)$  = ความต้านทานของ Chezy (เมตร<sup>1/2</sup>/วินาที)
- $g$  = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตร/วินาที<sup>2</sup>)
- $f(V)$  = ความฝืดเนื่องมาจากลม

$V, V_x, V_y(x, y, t)$  = ความเร็วลมและความเร็วใน

ทิศทางแกน  $x, y$  (เมตร/วินาที)

$\Omega(x, y)$  = สัมประสิทธิ์คอริออลิส (วินาที<sup>-1</sup>)

$p_a(x, y, t)$  = ความดันอากาศ (กิโลกรัม/เมตร/วินาที<sup>2</sup>)

$\rho_w$  = ความหนาแน่นของน้ำ  
(กิโลกรัม/ลบ.ม.)

$x, y$  = ระยะพิกัด (เมตร)

$y$  = เวลา (วินาที)

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$  = แรงเฉือนประสิทธิผลในทิศทาง  
แกน  $x$  และ  $y$  (นิวตัน.เมตร)

2) การสร้างข้อมูลสภาพภูมิประเทศของพื้นที่ท้องน้ำ (Bathymetry) สำหรับนำเข้าแบบจำลองแบบจำลอง MIKE21 ได้มีการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในการสร้าง Bathymetry โดยได้เลือกใช้แบบตาข่ายปรับเปลี่ยนได้ (Flexible mesh) ซึ่งสามารถใช้ในแบบจำลองการไหลให้ครอบคลุมพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่และมีซับซ้อน โดยความละเอียดของตาข่ายขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่และบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์ห้อย่างละเอียด ซึ่งขนาดของตาข่ายสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามต้องการ

### 2.1.2 แบบจำลองคลื่นชนิดสเปคตรัม

การจำลองการเคลื่อนที่ของคลื่น จะใช้ข้อมูลความเร็วลมในแกน  $x$  และ  $y$  มาวิเคราะห์ลักษณะของคลื่น การเคลื่อนที่ของคลื่นและใช้เป็นข้อมูลนำเข้าในโมดูลการเคลื่อนที่ของตะกอนทราย ทฤษฎีที่ใช้ในแบบจำลองคลื่นชนิดสเปคตรัม แสดงได้ดังสมการที่ (4)

สมการการกระจายตัว :

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kd)} \quad (4)$$

โดยที่

$\sigma$  = ความถี่เชิงมุมของคลื่นหรือ  $\omega$  (เรเดียน)

$g$  = แรงโน้มถ่วงของโลก (เมตร<sup>2</sup>/วินาที)

$h$  = ความสูงของคลื่น (เมตร)

$k$  = ค่าพารามิเตอร์ของคลื่น

$d$  = ความลึกของน้ำ (เมตร)

### 2.1.3 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของตะกอนทราย (MIKE21-HD/ST, Sand Transport Module)

การเคลื่อนที่ของตะกอนทรายที่ทำให้เกิดการกัดเซาะและทับถม จะกำหนดอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนจากการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำเพียงอย่างเดียว หรือรวมทฤษฎีที่ใช้ในแบบจำลองการเคลื่อนที่ของตะกอนทราย มีดังนี้

1) ทฤษฎีความเร็วของการตกตะกอนของ Van-Rijn (1989)

ความเร็วของการตกตะกอนมีเงื่อนไขของสมการตามขนาดของตะกอนทรายดังนี้

$$W_s = \frac{(s-1)gd_{50}}{18\nu} \quad \text{for } d_{50} < 0.1\text{mm} \quad (5)$$

$$W_s = \frac{\nu}{d_{50}} \left( \sqrt{100 + \frac{(s-1)gd_{50}^3}{\nu^2}} - 10 \right) \quad \text{for } 0.1 \leq d_{50} \leq 1\text{mm} \quad (6)$$

$$W_s = 1.1\sqrt{(s-1)gd_{50}} \quad \text{for } d_{50} > 1\text{mm} \quad (7)$$

โดยที่

- $d_{50}$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดดิน (มิลลิเมตร)
- $s$  = ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของตะกอน (กิโลกรัม/เมตร<sup>3</sup>)
- $g$  = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตร/วินาที<sup>2</sup>)
- $\nu$  = ความหนืดของน้ำ, เท่ากับ  $1 \times 10^{-6}$  (เมตร<sup>2</sup>/วินาที)

## 2) การเคลื่อนที่ของตะกอนของ Van Rijn (1984)

Van Rijn ได้เสนอสมการการเคลื่อนที่ของตะกอนออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

### 2.1) การเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ( $S_{bl}$ )

$$S_{bl} = 0.053 \frac{T^{2.1}}{D_*^{0.3}} \sqrt{(s-1)g \cdot d_{50}^3} \quad (8)$$

โดยที่

$T$  = ตัวแปรไร้มิติ,

$$T = \left( \frac{u'_f}{u_{f,c}} \right) \quad (9)$$

$u'_f$  = ประสิทธิภาพของความเร็วเฉือน,

$$u'_f = V \frac{\sqrt{g}}{C'} \quad (10)$$

$C'$  = ค่าความขรุขระท้องน้ำของ Chezy,

$$C' = 18 \log \left( \frac{4h}{d_{90}} \right) \quad (11)$$

$u_{f,c}$  = ความเร็วเนื่องจากแรงเฉือนวิกฤติ,

$$u_{f,c} = \sqrt{\theta_C(s-1)gd_{50}} \quad (12)$$

- $h$  = ความลึกน้ำ (เมตร)  
 $\theta_C$  = ค่าความเค้นเฉือนวิกฤติที่ท้องน้ำ ( $\theta_C$ ) เป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.06  
 $D_*$  = ตัวแปรไร้มิติของการเคลื่อนที่ของตะกอน

$$D_* = d_{50} \left( \frac{(s-1)g}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad (13)$$

## 2.2) การเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย ( $S_{sl}$ )

$$S_{sl} = f \cdot c_a \cdot V \cdot h \quad (14)$$

โดยที่

- $f$  = แฟคเตอร์ปรับแก้ของการเคลื่อนที่ของตะกอน  
 $c_a$  = ความเข้มข้นของชั้นตะกอนท้องน้ำ (กิโลกรัม/ลบ.ม.)  
 $V$  = ความเร็วการไหล (เมตร/วินาที)

## 2.2) เกณฑ์การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

ในการเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองฯ จะใช้ดัชนีทางสถิติมาเป็นตัวแทนในการเปรียบเทียบและตัดสินใจ ประกอบด้วย

ค่าความแม่นยำจะใช้วิธี Root mean square error (RMSE) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (15)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - y)^2}{n}} \quad (15)$$

ค่าความสอดคล้องกันจะใช้วิธีทาง Goodness-of-fit โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กำลังสอง (Coefficient of determination,  $R^2$ ) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (16)

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2 \quad (16)$$

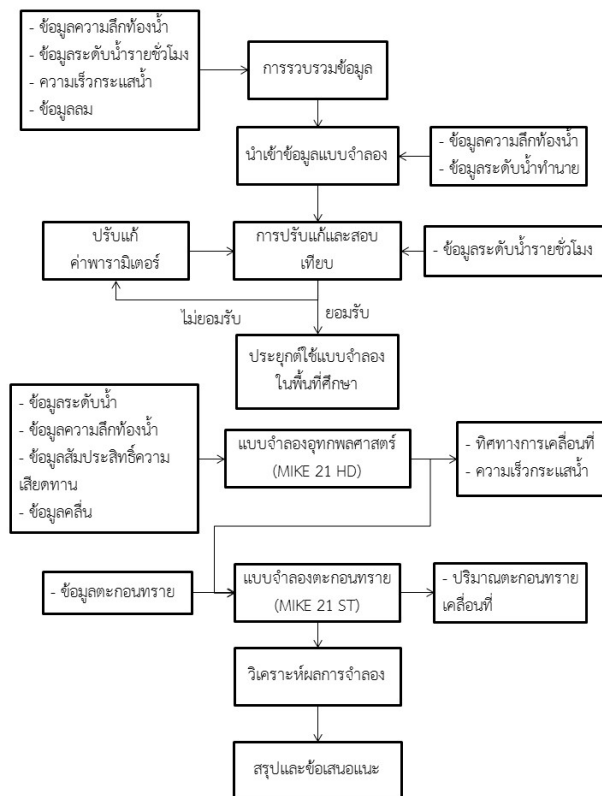
เมื่อ

- $x$  = ระดับน้ำที่ได้จากการตรวจวัด
- $y$  = ระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง
- $\bar{x}$  = ค่าเฉลี่ยระดับน้ำที่ได้จากการตรวจวัด
- $\bar{y}$  = ค่าเฉลี่ยระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลอง
- $i$  = ลำดับของข้อมูล
- $n$  = จำนวนข้อมูล

ค่าที่ยอมรับได้ของค่าดัชนีทางสถิติ RMSE ต้องมีค่าน้อยที่สุด (เข้าใกล้ 0) และค่าสัมประสิทธิ์ Coefficient of determination ( $R^2$ ) ต้องเข้าใกล้ 1 และควรมากกว่า 0.6 (วรารุช, 2553)

### 2.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในการศึกษาสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังแสดงใน รูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการศึกษา



โดยในแต่ละขั้นตอนการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

1) การรวบรวมข้อมูล ในการจัดทำแบบจำลองการเคลื่อนที่ของตะกอนด้วยแบบจำลอง MIKE 21 จะทำการรวบรวมข้อมูลต่างๆดังนี้

1.1) ข้อมูลความลึกท้องน้ำ ได้จากการสำรวจที่บริเวณปากร่องน้ำบ้านกรูดโดยเครื่องมือวัด และความลึกท้องน้ำบริเวณอ่าวไทยจากกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ

1.2) ข้อมูลระดับน้ำรายชั่วโมง ของสถานีวัดระดับน้ำเกาะหลัก ที่ได้ทำการบันทึกไว้โดยกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ซึ่งจะใช้ข้อมูลการตรวจวัดในปีพ.ศ. 2557 และ 2558

1.3) ข้อมูลขนาดของตะกอนทรายได้จากการเก็บตัวอย่างทรายบริเวณปากร่องน้ำบ้านกรูด และชายหาด จำนวน 9 ตัวอย่าง และนำมาวิเคราะห์หาขนาดของเม็ดทรายโดยใช้วิธี Sieve Analysis

1.4) ข้อมูลความเร็วกระแสน้ำ ทำการตรวจวัดบริเวณปากร่องน้ำ โดยทำการตรวจวัดเป็นระยะเวลา 15 วัน ตั้งแต่วันที่ 28 ม.ค. 57 ถึง 13 ก.พ. 57 ที่ตำแหน่ง 562870N และ 1255190E

1.5) ข้อมูลความเร็วลม ใช้ข้อมูลที่วิเคราะห์โดย NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) ซึ่งเป็นองค์กรที่วิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับมหาสมุทรและภูมิอากาศ แทนข้อมูลความเร็วลมจากกรมอุตุนิยมวิทยาเนื่องจากเป็นข้อมูลที่ตรวจวัดบนฝั่ง

2) การจัดทำแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ MIKE 21HD

2.1) การสร้าง Bathymetry ได้ทำการสร้างแบบ Flexible mesh โดยนำเข้าข้อมูลขอบเขตพื้นที่และความลึกท้องน้ำที่ได้จากการสำรวจ และทำการ Interpolation ข้อมูลกับตาข่ายที่สร้างขึ้น

2.2) สร้างข้อมูลระดับน้ำทำนายโดยใช้เครื่องมือในโปรแกรม MIKE21 ซึ่งในการสร้างข้อมูลระดับน้ำทำนายเพื่อเป็นข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 ม.ค. 2557 ถึง 31 ธ.ค. 2558

2.3) การจัดทำแบบจำลองทางอุทกพลศาสตร์การกำหนดขอบเขตเงื่อนไข และการปรับเทียบแบบจำลอง MIKE 21HD โดยกำหนดขอบเขตของแบบจำลองโดยแบ่งออกเป็น 2 ขอบเขต คือ แบบตาข่ายหยาบ (บริเวณอ่าวไทย) และแบบตาข่ายละเอียด (บริเวณปากร่องน้ำบ้านกรูด) ขอบเขตของแบบจำลองฯ แสดงดังรูปที่ 3 โดยกำหนดเงื่อนไขของแบบจำลองฯ สำหรับแบบตาข่ายหยาบจะใช้ข้อมูลระดับน้ำทำนายที่บริเวณปากอ่าวไทย และแบบตาข่ายละเอียดจะใช้ข้อมูลระดับน้ำที่ได้จากการวิเคราะห์ระดับน้ำด้วยแบบจำลองฯ แบบตาข่ายหยาบ

การปรับเทียบแบบจำลองฯ จะทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของท้องน้ำ (Manning' M) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของท้องน้ำจะเปลี่ยนแปลงตามความลึก โดยปรับเทียบกับค่าระดับน้ำที่สถานีวัดน้ำเกาะหลักสำหรับการวิเคราะห์แบบตาข่ายหยาบ โดยใช้ข้อมูลตรวจวัดในเดือนเมษายน 2557 และเดือนเมษายน 2558 เนื่องจากเป็นช่วงมรสุมเปลี่ยนแปลง จึงไม่ค่อยมีผลกระทบจากปริมาณน้ำในแม่น้ำและอิทธิพลจากการยกตัวของน้ำในทะเล ซึ่งในการปรับเทียบแบบจำลองจะใช้ค่าดัชนีทางสถิติในการปรับเทียบเพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองฯ ได้แก่ ค่า  $R^2$  และ RMSE และนำค่าระดับน้ำที่ได้จากการวิเคราะห์จากแบบจำลองแบบตาข่ายหยาบมาเป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองแบบตาข่ายละเอียด

3) การจัดทำแบบจำลองคลื่นชนิดสเปคตรัม (MIKE21 SW)

เนื่องจากคลื่นเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการวิเคราะห์ในแบบจำลองทางอุทกพลศาสตร์ ซึ่งในการวิเคราะห์หาลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่น จะใช้ข้อมูลลมที่ได้จากการวิเคราะห์ของ NOAA โดยมีขอบเขตในการวิเคราะห์คือแบบตาข่ายหยาบและแบบตาข่ายละเอียด โดยกำหนดเงื่อนไขของ

แบบจำลองฯ แบบตาข่ายหยาบจะใช้ข้อมูลนำเข้าจะประกอบด้วยความเร็วลมในทิศทางแกน X และ Y ที่ได้จากการวิเคราะห์จาก NOAA และนำผลการคำนวณที่ได้จากการวิเคราะห์จากแบบจำลองฯ แบบตาข่ายหยาบ มาเป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองคลื่น แบบตาข่ายละเอียดเช่นเดียวกับแบบจำลองทางอุทกพลศาสตร์ และในการเปรียบเทียบแบบจำลองคลื่นจะทำการปรับค่าแพคเตอร์ความเสียดทาน เพื่อให้ค่าความสูงคลื่น คาบเวลาคลื่นและทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นที่คำนวณได้กับค่าตรวจวัดมีความใกล้เคียงกันมากที่สุด และใช้ค่าดัชนีทางสถิติ ได้แก่ค่า  $R^2$  และ RMSE มาตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

#### 4) การจัดทำแบบจำลองการเคลื่อนที่ของตะกอนทรายด้วยแบบจำลอง MIKE21 ST

การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของตะกอนทรายจะใช้ข้อมูลเพื่อเป็นข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง ได้แก่ ข้อมูลขนาดตะกอนทรายเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) ค่าหน่วยน้ำหนักของตะกอนทรายเฉลี่ย ( $\rho_s$ ) และค่าความพรุนของตะกอนเฉลี่ย (porosity) จากข้อมูลข้างต้นสามารถนำไปคำนวณหาความเร็วของการตกตะกอน ( $w_s$ ) และกำหนดค่าตัวแปรอื่นๆ

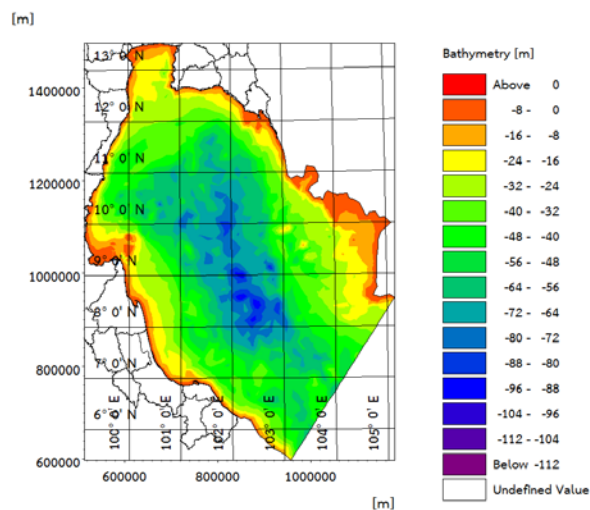
ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของตะกอนทรายจะต้องใช้ความเร็วของกระแสน้ำ ทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำในแบบจำลอง MIKE21 HD มาวิเคราะห์ร่วมกับแบบจำลองการเคลื่อนที่ของตะกอนทราย ซึ่งในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของตะกอนทรายจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีปีที่มื่ออัตราการไหลในคลองมากที่สุด และกรณีน้ำทะเลหนุนสูงสุด เพื่อดูลักษณะของการเคลื่อนที่ของตะกอนทรายบริเวณปากร่องน้ำ ในช่วงฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ มรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และฤดูมรสุมเปลี่ยนแปลง

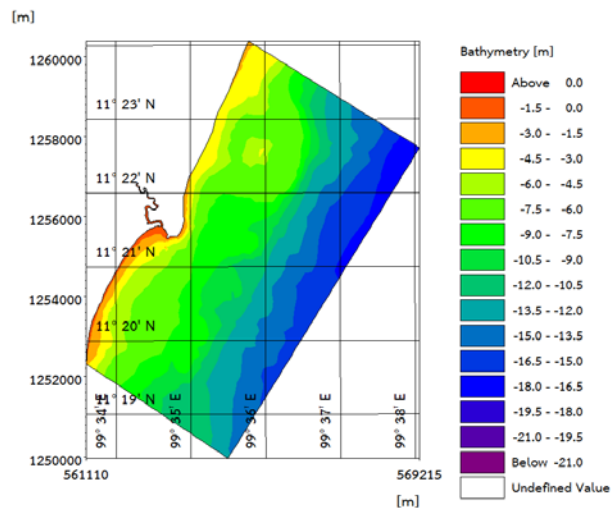
### 3. ผลและวิจารณ์

#### 3.1) ผลการจัดทำแบบจำลอง MIKE 21 HD

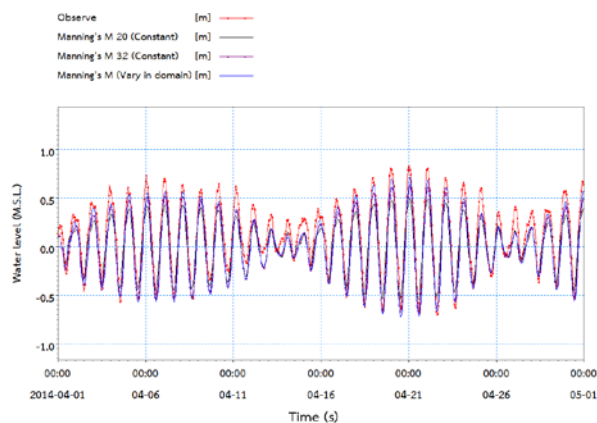
ผลการจัดทำแบบจำลอง MIKE 21 HD แบ่งออกได้ดังนี้

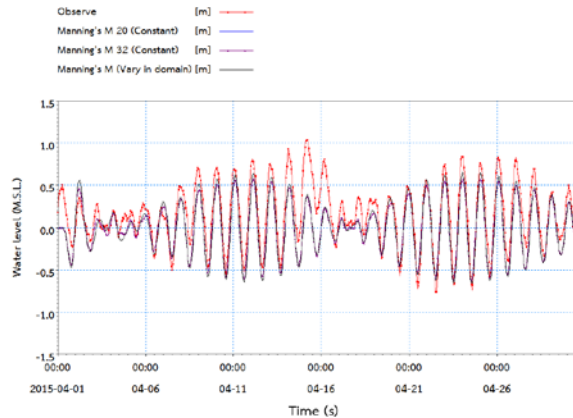
ผลการสร้างแผนที่ความลึกท้องน้ำของพื้นที่ศึกษา (Bathymetry) แบบตาข่ายหยาบและแบบตาข่ายละเอียดด้วยแบบจำลอง MIKE 21 HD ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



**รูปที่ 3** แผนที่ความลึกน้ำแบบตาข่ายหยาบ

**รูปที่ 4** แผนที่ความลึกน้ำแบบตาข่ายละเอียด

ผลการเปรียบเทียบของแบบจำลอง MIKE21 HD แบบตาข่ายหยาบ พบว่า ค่า Manning's M ที่ทำให้ผลการคำนวณมีความใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดที่สถานีวัดระดับน้ำเกาะหลักมากที่สุด เท่ากับ 40 หรือมีค่า Manning's n ซึ่งเป็นส่วนกลับเท่ากับ 0.025 ผลการเปรียบเทียบในเดือน เมษายน 2557 มีค่าดัชนีทางสถิติ  $R^2$  เท่ากับ 0.94 และค่า RMSE เท่ากับ 0.10 เมตร และผลการสอบเทียบแบบจำลองในเดือนเมษายน 2558 มีค่าดัชนีทางสถิติ  $R^2$  เท่ากับ 0.81 และค่า RMSE เท่ากับ 0.11 เมตร โดยผลการเปรียบเทียบค่าระดับน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับค่าระดับน้ำที่ตรวจวัดที่สถานีวัดระดับน้ำเกาะหลัก ในเดือนเมษายน 2557 และเดือนเมษายน 2558 แสดงดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

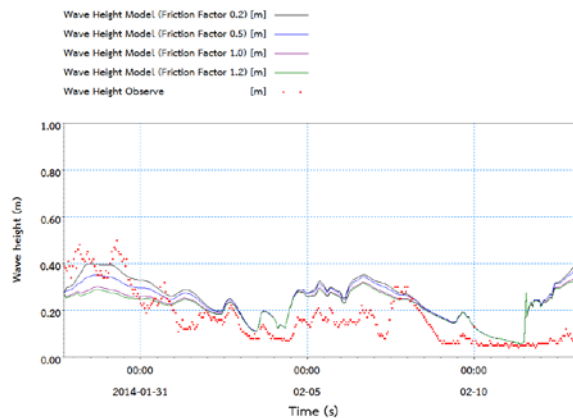

**รูปที่ 5** ผลการเปรียบเทียบค่าระดับน้ำที่คำนวณได้กับค่าระดับน้ำที่ตรวจวัดที่สถานีวัดระดับน้ำเกาะหลัก (เม.ย. 57)



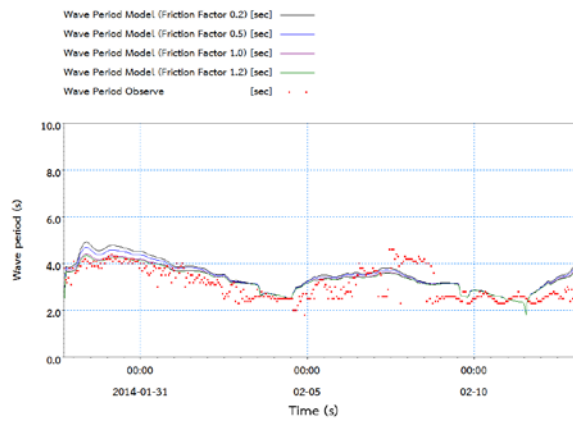
รูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบค่าระดับน้ำที่คำนวณได้กับค่าระดับน้ำที่ตรวจวัดที่สถานีวัดระดับน้ำเกาะหลัก (เม.ย. 58)

### 3.2) ผลการจัดทำแบบจำลอง MIKE21 SW

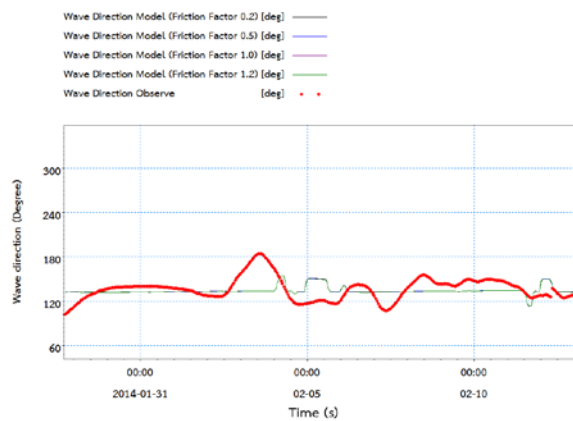
ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองการเคลื่อนที่ของคลื่น พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Factor) มีค่าเท่ากับ 1.2 จะทำให้ผลการคำนวณความสูงคลื่นและคาบเวลาของคลื่นที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดมากที่สุด ส่วนทิศทางการเคลื่อนที่ที่คำนวณได้ไม่มีผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ ผลการเปรียบเทียบความสูงคลื่น คาบเวลาของคลื่นและทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแสดงดังรูปที่ 7 ถึง รูปที่ 9



รูปที่ 7 ผลการเปรียบเทียบความสูงคลื่น



**รูปที่ 8** ผลการเปรียบเทียบคาบเวลาของคลื่น

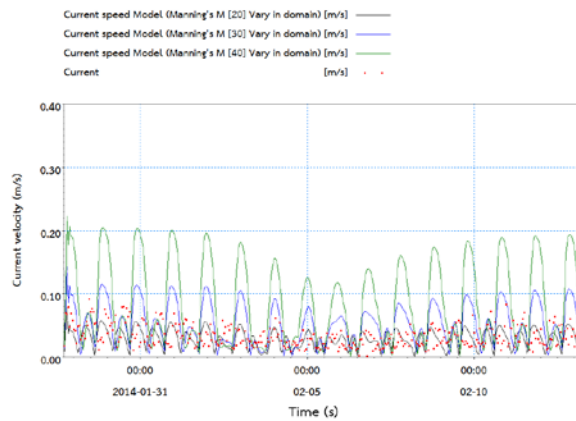


**รูปที่ 9** ผลการเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น

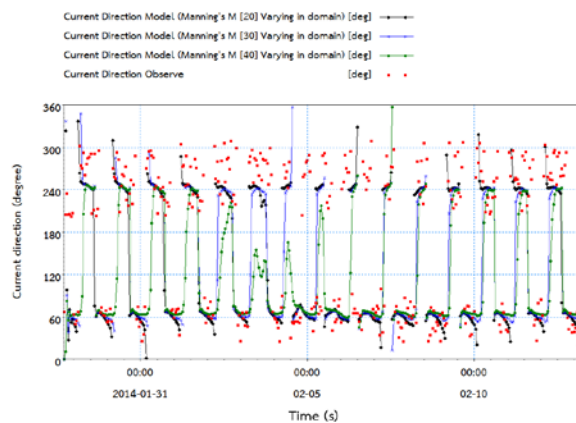
### 3.3) การศึกษาการไหลเวียนของกระแสน้ำโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MIKE 21 HD

ผลการเปรียบเทียบการไหลเวียนของกระแสน้ำพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ Manning's  $M$  เท่ากับ 20 จะทำให้ผลการคำนวณความเร็วกระแสน้ำที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดมากที่สุด ซึ่งค่าความอ่อนไหวของสัมประสิทธิ์ความขรุขระ Manning's  $M$  เมื่อมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความเร็วกระแสน้ำมีความเร็วกระแสน้ำที่คำนวณได้มีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันหากค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระมีค่าน้อยจะทำให้ความเร็วของกระแสน้ำที่คำนวณได้มีค่าน้อย ผลการเปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำและทิศทางการเคลื่อนที่ แสดงดังรูปที่ 10 และ 11

จากการเปรียบเทียบการไหลเวียนของกระแสน้ำโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MIKE 21 HD ค่าความเร็วของกระแสน้ำสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.10 เมตร/วินาที ทิศทางการไหลของกระแสน้ำในช่วงน้ำขึ้นอยู่ระหว่าง 50-70 องศา ส่วนทิศทางการไหลของกระแสน้ำในช่วงน้ำลงอยู่ระหว่าง 230-250 องศา



รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบความเร็วกระแสน้ำที่คำนวณได้กับค่าที่ตรวจวัด



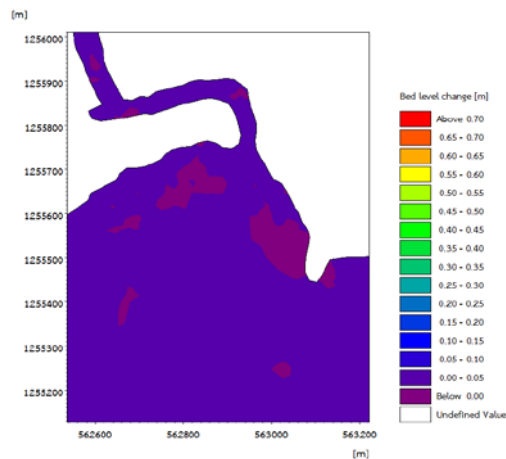
รูปที่ 11 ผลการเปรียบเทียบทิศทางของกระแสน้ำที่คำนวณได้กับค่าที่ตรวจวัด

### 3.4) ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE21 HD ร่วมกับ MIKE21 ST

จากการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของตะกอนด้วยแบบจำลองทางอุทกพลศาสตร์ MIKE 21 HD ร่วมกับแบบจำลองตะกอน ST โดยจะแบ่งช่วงการวิเคราะห์ออกเป็น 4 ช่วงได้แก่ ฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งเกิดขึ้นในช่วงเดือนธันวาคมถึงมีนาคม ฤดูมรสุมเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในช่วงเดือนเมษายนถึงพฤษภาคม ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้เกิดในช่วงเดือนมิถุนายนและกันยายน และฤดูมรสุมเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในช่วงเดือนตุลาคมถึงพฤศจิกายน ดังนี้

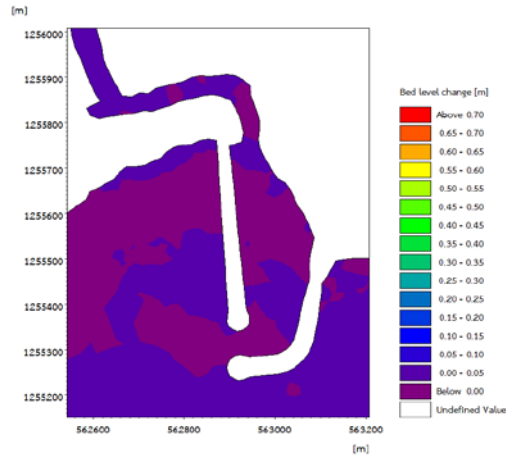
ช่วงฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือในกรณีสภาพปัจจุบันความเร็วกระแสน้ำที่บริเวณปากร่องน้ำมีค่าเท่ากับ 0.03 เมตร/วินาที และเมื่อมีโครงสร้างบริเวณปากร่องน้ำความเร็วของกระแสน้ำเปลี่ยนแปลงมีค่าเท่ากับ 0.06 เมตร/วินาที และการเปลี่ยนแปลงความลึกท้องน้ำในกรณีสภาพปัจจุบันที่บริเวณปากร่องน้ำมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะตื้นถมโดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ +0.03 เมตร ส่วนกรณีที่มีโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงความลึกท้องน้ำบริเวณปากร่องน้ำเท่ากับ +0.02 เมตร และเมื่อผ่านฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือไปเข้าสู่ฤดูมรสุมเปลี่ยนแปลง ความเร็วกระแสน้ำกรณีสภาพปัจจุบันมีค่าเท่ากับ 0.03 เมตร/วินาที และในกรณีที่โครงสร้างความเร็ว

กระแสน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยมีความเร็วมีเท่ากับ 0.05 เมตร/วินาที และการเปลี่ยนแปลงความลึกท้องน้ำในกรณีสภาพปัจจุบันที่บริเวณปากร่องน้ำมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะทับถม โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ +0.03 เมตร ส่วนกรณีที่มีโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงความลึกท้องน้ำบริเวณปากร่องน้ำในลักษณะทับถม มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ +0.02 เมตร และเมื่อเข้าสู่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ความเร็วกระแสน้ำกรณีสภาพปัจจุบันมีค่าเท่ากับ 0.12 เมตร/วินาที และในกรณีที่มีโครงสร้างความเร็วกระแสน้ำมีความเร็วเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.27 เมตร/วินาที และการเปลี่ยนแปลงความลึกท้องน้ำในกรณีสภาพปัจจุบันที่บริเวณปากร่องน้ำมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะทับถมโดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ +0.56 เมตร ส่วนกรณีที่มีโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงความลึกท้องน้ำบริเวณปากร่องน้ำในลักษณะทับถมเท่ากับ +0.25 เมตร และเมื่อผ่านฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ไปเข้าสู่ฤดูมรสุมเปลี่ยนแปลง ความเร็วกระแสน้ำกรณีสภาพปัจจุบันมีค่าเท่ากับ 0.19 เมตร/วินาที และในกรณีที่มีโครงสร้างความเร็วกระแสน้ำมีความเร็วเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.63 เมตร/วินาที และการเปลี่ยนแปลงความลึกท้องน้ำในกรณีสภาพปัจจุบันที่บริเวณปากร่องน้ำมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะทับถม โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ +0.65 เมตร ส่วนกรณีที่มีโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงความลึกท้องน้ำบริเวณปากร่องน้ำในลักษณะทับถม มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ +0.32 เมตร ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของตะกอนแสดงดังรูปที่ 12 ถึง 15

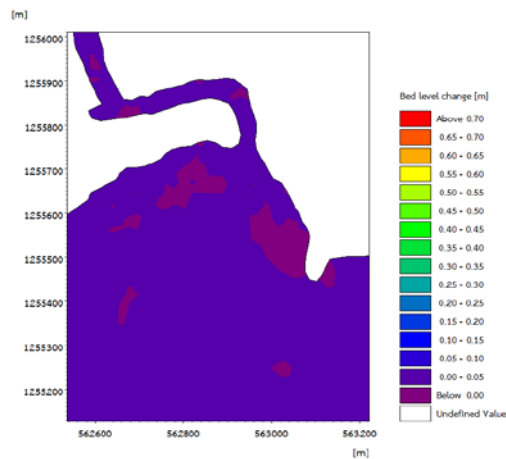


**รูปที่ 12** การเปลี่ยนแปลงความลึกท้องน้ำในช่วงฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (ธ.ค. – มี.ค.) กรณีสภาพปัจจุบัน

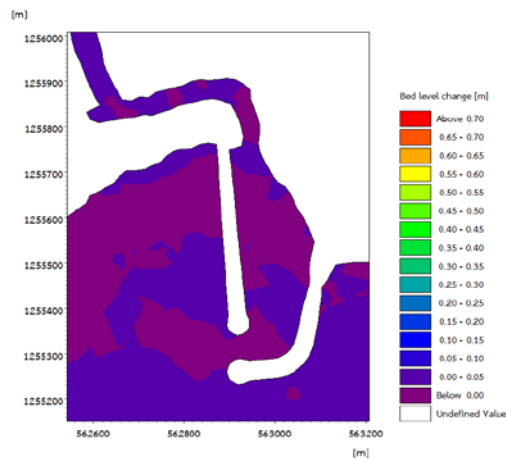




รูปที่ 13 การเปลี่ยนแปลงความลึกท้องน้ำในช่วงฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (ธ.ค. – มี.ค.) กรณีมีโครงสร้าง

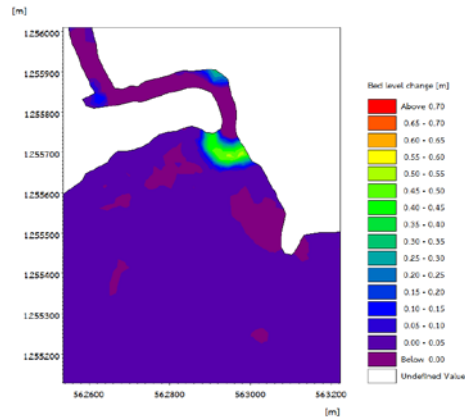


รูปที่ 14 การเปลี่ยนแปลงความลึกท้องน้ำในช่วงฤดูมรสุมเปลี่ยนแปลง (เม.ย. – พ.ค.) กรณีสภาพปัจจุบัน

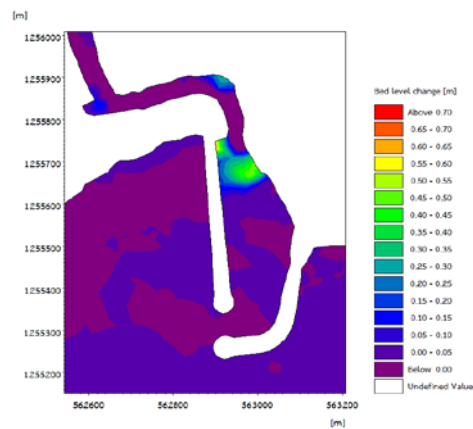


รูปที่ 15 การเปลี่ยนแปลงความลึกท้องน้ำในช่วงฤดูมรสุมเปลี่ยนแปลง (เม.ย. – พ.ค.) กรณีมีโครงสร้าง

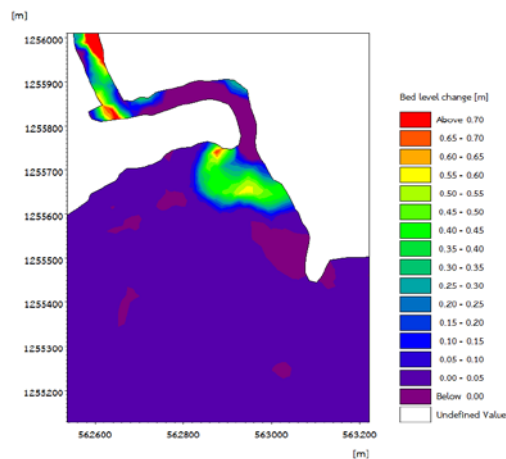




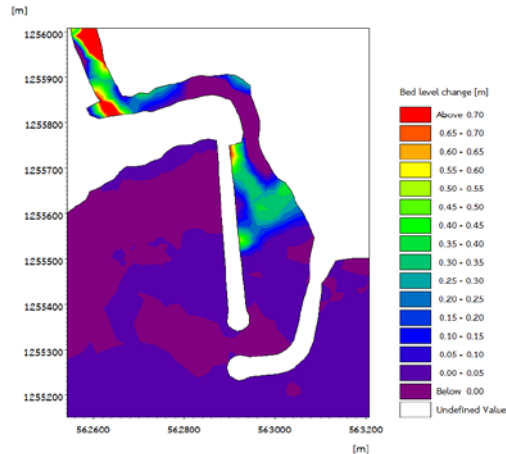
รูปที่ 16 การเปลี่ยนแปลงความลึกที่ท้องน้ำในช่วงฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (มิ.ย. – ก.ย.) กรณีสภาพปัจจุบัน



รูปที่ 17 การเปลี่ยนแปลงความลึกที่ท้องน้ำในช่วงฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (มิ.ย. – ก.ย.) กรณีมีโครงสร้าง



รูปที่ 18 การเปลี่ยนแปลงความลึกที่ท้องน้ำในช่วงฤดูมรสุมเปลี่ยนแปลง (ต.ค. – พ.ย.) กรณีสภาพปัจจุบัน



รูปที่ 19 การเปลี่ยนแปลงความลึกท้องน้ำในช่วงฤดูมรสุมเปลี่ยนแปลง (ต.ค. – พ.ย.) กรณีมีโครงสร้าง

#### 4. บทสรุป

การศึกษาคั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE21 HD/ST มาศึกษาสภาพทางอุทกพลศาสตร์และการเคลื่อนที่ของตะกอนบริเวณปากร่องน้ำบ้านกรูด โดยเริ่มจากการปรับเทียบแบบจำลอง MIKE21 HD พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานท้องน้ำ (Manning's M) มีผลทำให้ค่าระดับน้ำและความเร็วของกระแสน้ำเปลี่ยนแปลงตามความเสียดทาน ซึ่งค่าความเสียดทานที่ทำให้ค่าคำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดจริงมากที่สุดเท่ากับ 20 และได้การประยุกต์ใช้แบบจำลอง MIKE21 ST เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของตะกอนบริเวณปากร่องน้ำบ้านกรูด โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษา คือ 1) กรณีสภาพปัจจุบัน และ 2) กรณีมีโครงสร้าง ดังนี้

กรณีสภาพปัจจุบัน ปริมาณตะกอนได้เคลื่อนตัวมาจากในคลองและไหลออกสู่ทะเล โดยตะกอนได้มาตกลงสู่พื้นท้องน้ำบริเวณปากร่องน้ำเนื่องจากความเร็วในของกระแสน้ำลดลงจากการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดลำน้ำมาเป็นทะเลเปิด และตะกอนได้ตกลงสู่ท้องน้ำ โดยในฤดูมรสุม ตะวันออกเฉียงเหนือมีความสูงเท่ากับ +0.03 เมตร ฤดูมรสุมเปลี่ยนแปลง (เม.ย. – พ.ค.) มีความสูงเท่ากับ +0.03 เมตร ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้มีความสูงเท่ากับ +0.56 เมตร และฤดูมรสุมเปลี่ยนแปลง (ต.ค. – พ.ย.) มีความสูงเท่ากับ +0.65 เมตร เมื่อเทียบกับความลึกท้องน้ำเดิมที่มีความลึก -1.20 ม.รทก. ทำให้ความลึกท้องน้ำบริเวณปากร่องน้ำลดลงเหลือ -0.55 ม.รทก.

กรณีที่มีโครงสร้าง ปริมาณตะกอนเมื่อเคลื่อนที่มาบริเวณปากร่องน้ำ และความเร็วกระแสน้ำยังสามารถพัดพาตะกอนให้เคลื่อนตัวออกมาได้อีกระยะหนึ่งก่อนที่ตะกอนจะตกลงสู่ท้องน้ำ ในฤดูมรสุม ตะวันออกเฉียงเหนือมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความลึกท้องน้ำในบริเวณ โครงสร้าง เท่ากับ +0.03 เมตร ฤดูมรสุมเปลี่ยนแปลง (เม.ย. – พ.ค.) มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ +0.02 เมตร ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ +0.25 เมตร และฤดูมรสุมเปลี่ยนแปลง (ต.ค. – พ.ย.) มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ +0.32 เมตร เมื่อเทียบกับความลึกท้องน้ำเดิมทำให้ความลึกท้องน้ำบริเวณปากร่องน้ำลดลงเหลือ -0.83 ม.รทก.

ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของตะกอน พบว่า ปริมาณตะกอนที่ไหลออกมาจากคลองกรุดในช่วงฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือมีค่าน้อย เนื่องจากเป็นช่วงเข้าสู่ฤดูแล้ง ทำให้มีปริมาณน้ำที่ไหลในคลองกรุดน้อย ส่วนในช่วงฤดูฝน ซึ่งตรงกับช่วงฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ปริมาณที่ไหลน้ำในคลองกรุดมีมาก ทำให้ความเร็วกระแสน้ำเพิ่มขึ้นและสามารถพัดพาตะกอนให้ไหลมาสู่ปากร่องน้ำได้ ตะกอนที่เคลื่อนที่มาจากบริเวณปากร่องน้ำและแผ่อกในลักษณะเป็นวงกว้างในกรณีสภาพปัจจุบัน ส่งผลกระทบต่อการเดินทางเรือเข้าออกคลองกรุดของเรือที่มีขนาดใหญ่หรือเรือกินน้ำลึกมากกว่า 0.50 เมตร เช่นเดียวกับกับกรณีที่มีโครงสร้างที่ส่งผลกระทบต่อการเดินทางเรือของเรือที่มีขนาดใหญ่หรือเรือกินน้ำลึกมากกว่า 0.80 เมตร ที่ต้องรอในช่วงน้ำขึ้นก่อนถึงจะเข้าออกคลองกรุดได้อย่างปลอดภัย อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของตะกอนนี้ ใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2557 มาวิเคราะห์ซึ่งเป็นปีน้ำปกติ และลักษณะโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถเปลี่ยนรูปแบบตามความเหมาะสมของผู้ออกแบบ

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนและให้คำปรึกษาตลอดการศึกษาวิจัย และขอขอบคุณหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กรมชลประทาน กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ และ คุณสุพจน์ จารุลักษณ์ ที่อนุเคราะห์ข้อมูลประกอบการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

### การอ้างอิงและเอกสารอ้างอิง

กรมอุตุนิยมวิทยา. 2557. ระบบการพยากรณ์อากาศและการเตือนภัย. แหล่งที่มา <http://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=67>, 6 เมษายน 2558

สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร. 2556. สภาพภูมิอากาศ. แหล่งที่มา <http://www.haii.or.th/wiki/index.php/สภาพภูมิอากาศลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา>, 6 เมษายน 2558

ส่วนอุทกวิทยา สำนักสำรวจและวิศวกรรม. ม.ป.ป. สถิติค่าระดับน้ำรายปี. กรมเจ้าท่า, กรุงเทพฯ. (อัดสำเนา)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553. Tidal Patterns. แหล่งที่มา [http://www.agri.kmitl.ac.th/elearning/courseware/aquatic/5\\_tidal\\_patterns.html](http://www.agri.kmitl.ac.th/elearning/courseware/aquatic/5_tidal_patterns.html), 10 เมษายน 2558.

กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. 2556. อุทกศาสตร์ชายฝั่ง. แหล่งที่มา <http://marinegiscenter.dmcg.go.th/km/coastal-hydrographics/#.VVAgd47tmkp>, 10 เมษายน 2558.

กรมเจ้าท่า. 2556. รายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม โครงการก่อสร้างเขื่อนป้องกันกีดขวางชายฝั่งบริเวณตำบลปากแตร อำเภอระโนน จังหวัดสงขลา.

- สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553. เขตชายฝั่งทะเล. แหล่งที่มา [http://www.agri.kmitl.ac.th/elearning/courseware/aquatic/2\\_\\_coastal\\_zone.html](http://www.agri.kmitl.ac.th/elearning/courseware/aquatic/2__coastal_zone.html), 10 เมษายน 2558.
- สำนักผังเมือง กรุงเทพมหานคร. 2550. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการป้องกันและแก้ไขปัญหามลพิษชายฝั่งทะเลบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร.
- วิษุวัตม์กั แต่สมบัติ. 2552. การจำลองแบบการไหลแบบ 2 มิติด้วยแบบจำลอง MIKE21 HDFM บริเวณพื้นที่ชายฝั่งท่าเรือเมืองดาวิน ประเทศออสเตรเลีย. ใน รายงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- เฉลิมพล เต็นไธสง. 2552. การจำลองการไหลของแบบจำลองทางกายภาพของระบบลุ่มน้ำด้วยแบบจำลอง MIKE21. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พรทิพย์ รุติโสภณวิช. 2540. การศึกษาโปรแกรม MIKE 21 และการใช้งานในการพยากรณ์ การกระจายตัวของดัชนีคุณภาพน้ำในทะเลสาบสงขลา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สุนัน ผาสุข. 2547. การประยุกต์แบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลเวียนของกระแสน้ำ และการแพร่กระจายความเค็มและตะกอนแขวนลอยในระบบทะเลสาบสงขลา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Agern Alle'. 2013. MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM Sand Transport Module (Scientific Documentation). DHI, Denmark.