

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของคันทางเสริมแรงด้วยจีโอเทกซ์ไทล์บนชั้นดินเหนียวอ่อนปากพนัง ที่ปรับปรุงโดยขานทางบนเสาเข็ม

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF GEOTEXTILE-REINFORCED EMBANKMENT ON PAK PANANG SOFT CLAY STABILIZED BY BERM ON PILES

วีระศักดิ์ ชำนิธุระการ^{1*}, ภาณุ พร้อมพุทธานุกร²

Weerasak Shamniturakan^{1*}, Panu Promputthangkoon²

¹ นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹ Graduate Student, Master of Engineering Program Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Lecturer, Master of Engineering Program Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ Corresponding author; E-mail Address: weerasak.sh@gmail.com

วันที่รับบทความ: 7 มีนาคม 2569; วันที่ทบทวนบทความ: 2 เมษายน 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 4 เมษายน 2569;

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 29 เมษายน 2569

บทคัดย่อ: การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของคันทางเสริมแรงด้วยจีโอเทกซ์ไทล์บนชั้นดินเหนียวอ่อนปากพนังที่ปรับปรุงโดยขานทางบนเสาเข็มนี้มีเป้าหมายเพื่อป้องกันและแก้ไขความเสียหายของถนนในอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทางเสริมแรงด้วยจีโอเทกซ์ไทล์บนชั้นดินเหนียวอ่อนปากพนังที่ปรับปรุงด้วยขานทางบนเสาเข็ม เพื่อป้องกันและแก้ไขความเสียหายของถนนในอำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D ในการจำลองพฤติกรรมของคันทางที่มีความกว้าง 9 เมตร และระดับความสูง 1, 2 และ 3 เมตร บนชั้นดินที่ประกอบด้วยชั้นดินผิว ดินเหนียวอ่อน และดินเหนียวแข็ง การศึกษาได้เปรียบเทียบรูปแบบการเสริมแรง 5 กรณี ได้แก่ คันทางที่ไม่มีการเสริมแรง การเสริมแรงด้วยจีโอเทกซ์ไทล์ การเสริมแรงด้วยขานทาง การเสริมแรงด้วยเสาเข็ม และการเสริมแรงด้วยขานทางร่วมกับเสาเข็ม ผลการวิเคราะห์พบว่าความสูงของคันทางมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบ กล่าวคือเมื่อคันทางมีความสูงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าปัจจัยความปลอดภัยลดลง ในขณะที่การเคลื่อนตัวและค่าความคั่นในชั้นดินเหนียวอ่อนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น การเสริมแรงด้วยเสาเข็มมีประสิทธิภาพในการถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินแข็งด้านล่างซึ่งช่วยลดการทรุดตัวได้ดี ขณะที่การเสริมแรงด้วยขานทางช่วยเพิ่มแรงต้านทานด้านข้าง รูปแบบการเสริมแรงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนปากพนังคือการใช้ขานทางร่วมกับเสาเข็ม เนื่องจากให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัยและสามารถควบคุมการเคลื่อนตัวของคันทางได้ดีที่สุดในทุกระดับความสูง

คำสำคัญ: ดินเหนียวอ่อน, ไฟไนต์เอลิเมนต์, เสถียรภาพ, การเสริมแรงคันทาง

Abstract: This study investigates the stability of geotextile-reinforced embankments constructed on Pak Panang soft clay and improved with berms on piles, aiming to prevent and mitigate road damage in Pak Panang District, Nakhon Si Thammarat Province, Thailand. The analysis was conducted using the finite element method implemented in PLAXIS 2D to simulate the behavior of embankments with a width of 9 m and heights of 1, 2, and 3 m. The subsoil profile consisted of topsoil, soft clay, and stiff clay layers. Five reinforcement scenarios were examined, including unreinforced embankments, geotextile reinforcement, berm reinforcement, pile reinforcement, and a combination of berm and pile reinforcement. The results indicate that embankment height significantly influences system stability. As the embankment height increases, the factor of safety decreases, while displacement and stress within the soft clay layer tend to increase. Pile reinforcement effectively transfers loads to the underlying stiff clay layer, thereby reducing settlement, whereas berm reinforcement enhances lateral resistance. Among the considered alternatives, the combined berm and pile system provides the most effective improvement, yielding the highest factor of safety and the best control of embankment deformation across all height conditions.

Keywords: Soft clay, Finite element method, Stability, Embankment reinforcement

1. บทนำ

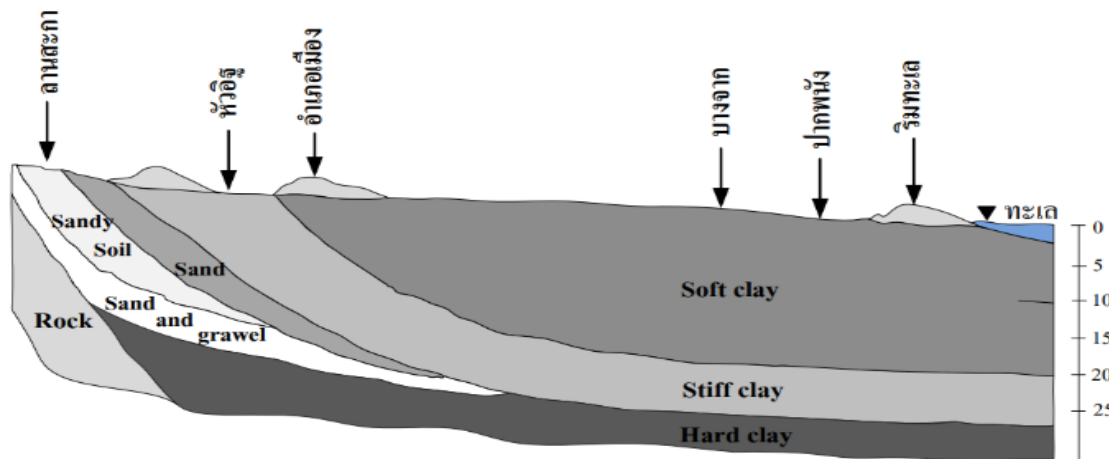
การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านระบบคมนาคม โดยเฉพาะ โครงสร้างถนนและคันทาง มีบทบาทสำคัญต่อการขับเคลื่อน เศรษฐกิจ การเชื่อมโยงพื้นที่ และการยกระดับคุณภาพชีวิต ของประชาชน อย่างไรก็ตาม การก่อสร้างคันทางในพื้นที่ที่มี ชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ยังคงเป็นปัญหาสำคัญในการ ก่อสร้าง เนื่องจากดินเหนียวอ่อนมีค่ากำลังรับแรงเฉือนต่ำ ค่า การซึมผ่านต่ำ และมีแนวโน้มเกิดการทรุดตัวจากกระบวนการ อัดตัวคายน้ำในระยะยาว ซึ่งอาจนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพ การเคลื่อนตัวเกินเกณฑ์ และการวิบัติของโครงสร้างถนนได้ [1], [2], [3] จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าการก่อสร้างคันทาง บนชั้นดินเหนียวอ่อนมักประสบปัญหาการเคลื่อนตัวของลาดคัน ทาง (Slope failure) การทรุดตัว ไม่สม่ำเสมอ และการแตกร้าว ของ ผิวทาง โดยเฉพาะในกรณี ที่คันทางมีความสูงมากหรือ ก่อสร้างภายใต้ข้อจำกัดด้านเวลา ซึ่งไม่เอื้อต่อการรอให้ดินเกิด การอัดตัวอย่างสมบูรณ์ [4], [5], [6] ปัญหาดังกล่าวส่งผล โดยตรงต่อความปลอดภัยของผู้ใช้ทางและค่าใช้จ่ายในการ บำรุงรักษาในระยะยาว

พื้นที่อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช เป็นตัวอย่าง พื้นที่ชายฝั่งที่มีสภาพธรณีวิทยาซับซ้อน เกิดจากการสะสมตัว ของตะกอนจากแม่น้ำและทะเล ส่งผลให้ชั้นดินประกอบด้วย ดินกรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว โดยเฉพาะชั้นดิน

เหนียวอ่อนที่มีความหนาประมาณ 15 –20 เมตร ซึ่งจัดอยู่ใน กลุ่มดินเหนียวอ่อนที่มีพลาสติกสูง (High Plasticity clay: CH) ลักษณะดังกล่าวทำให้โครงสร้างถนนและคันทางในพื้นที่มี ความเสี่ยงต่อการทรุดตัวและการวิบัติด้านเสถียรภาพ ดังที่มี รายงานความเสียหายของโครงสร้างทางเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องใน อดีต [7], [8], [9] แนวทางการปรับปรุงเสถียรภาพของคันทาง บนชั้นดินเหนียวอ่อนมีการศึกษาและประยุกต์ใช้วิธี เช่น การ เสริมแรงด้วยวัสดุสังเคราะห์ (Geosynthetics) การก่อสร้างคัน ทาง (Berm) การใช้เสาเข็ม (Pile) รวมถึงการใช้วิธีการเสริมแรง แบบผสมผสาน เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน ลดการเคลื่อนตัว และควบคุมกลไกการวิบัติของคันทาง [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19] อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของ แต่ละวิธีขึ้นอยู่กับสภาพดิน ความสูงของคันทาง กลไกการถ่าย แรง และข้อจำกัดด้านการก่อสร้างในพื้นที่จริง ปัจจุบันการ วิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง ในการศึกษา พฤติกรรมของดินและโครงสร้างร่วมกัน เนื่องจากสามารถ จำลองลำดับขั้นตอนการก่อสร้าง การกระจายความเค้น และ การเคลื่อนตัวได้อย่างใกล้เคียงสภาพจริง [20], [21], [22] โปรแกรม PLAXIS 2D เป็นหนึ่งในเครื่องมือที่ถูกนำมาใช้ในการ ประเมินเสถียรภาพคันทางบนชั้นดินอ่อนอย่างแพร่หลาย

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์พฤติกรรมและเสถียรภาพของคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนในพื้นที่อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปแบบการเสริมแรงที่แตกต่างกัน ได้แก่ คันทางที่ไม่มีการเสริมแรง การเสริมแรงด้วยจีโอเทกซ์ไทล์การเสริมช่องทาง การใช้เสาเข็ม

และการเสริมแรงด้วยช่องทางร่วมกับเสาเข็ม ผลการศึกษาที่ได้จะช่วยเติมเต็มองค์ความรู้ด้านการออกแบบคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อน และสามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกวิธีการเสริมเสถียรภาพที่เหมาะสมกับสภาพพื้นที่จริง ลดความเสี่ยงต่อการวิบัติของโครงสร้างถนน และสนับสนุนการออกแบบทางวิศวกรรมอย่างมีประสิทธิภาพ และยั่งยืน



ภาพที่ 1 ชั้นดินบริเวณชายฝั่งตะวันออก จ.นครศรีธรรมราช
ที่มา: อภิชัย จุฑาศิริวงศ์ (2546)



ภาพที่ 2 ความเสียหายของโครงสร้างทางในพื้นที่อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช

ที่มา: ถ่ายภาพโดยผู้วิจัย (2569)

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อป้องกันและแก้ไขความเสียหายเสียหายของถนน อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งมีวัตถุประสงค์ 4 ข้อ ประกอบด้วย

2.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนปากพนัง

2.2 ศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนรูปแบบต่าง ๆ

2.3 ศึกษารูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนปากพนัง

2.4 วิเคราะห์เสถียรภาพของคันทางโดยประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D

3. ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ ได้กำหนด ขอบเขตงานวิจัย เป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย

3.1 รวบรวมข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring Log) ในพื้นที่อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราชผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินในพื้นที่อำเภอ

ปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช จากสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครศรีธรรมราชและกรมทางหลวงชนบท เพื่อนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน ทั้งในส่วนของดินฐานรากและวัสดุคันทาง ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้นำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการจำลองและวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทางในรูปแบบต่าง ๆ ต่อไป

3.2 ออกแบบและวิเคราะห์พฤติกรรมโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของคันทางก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน
ปากพนัง ผู้วิจัยได้ออกแบบและวิเคราะห์พฤติกรรมของคันทางก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม PLAXIS program ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางธรณีเทคนิคด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) และกำหนดให้มีการปรับปรุงเสถียรภาพของคันทาง โดยวิธีการคือ (1) เสริมแรงด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) (2) เสริมแรงด้วยขานทาง (Berm) (3) เสริมแรงด้วยเสาเข็ม (Pile) และ (4) เสริมแรงด้วยขานทางร่วมกับเสาเข็ม (Berm + Pile)

3.3 เสนอรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนปากพนัง ในการศึกษา ผู้วิจัยได้วิเคราะห์พฤติกรรมและเสถียรภาพของคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนในพื้นที่อำเภopakพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการเสริมกำลังหลายรูปแบบ เพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเพิ่มเสถียรภาพของคันทางผลที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้วิธีการที่เหมาะสมกับสภาพพื้นที่จริง ช่วยลดความเสี่ยงจากการพังทลาย และส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

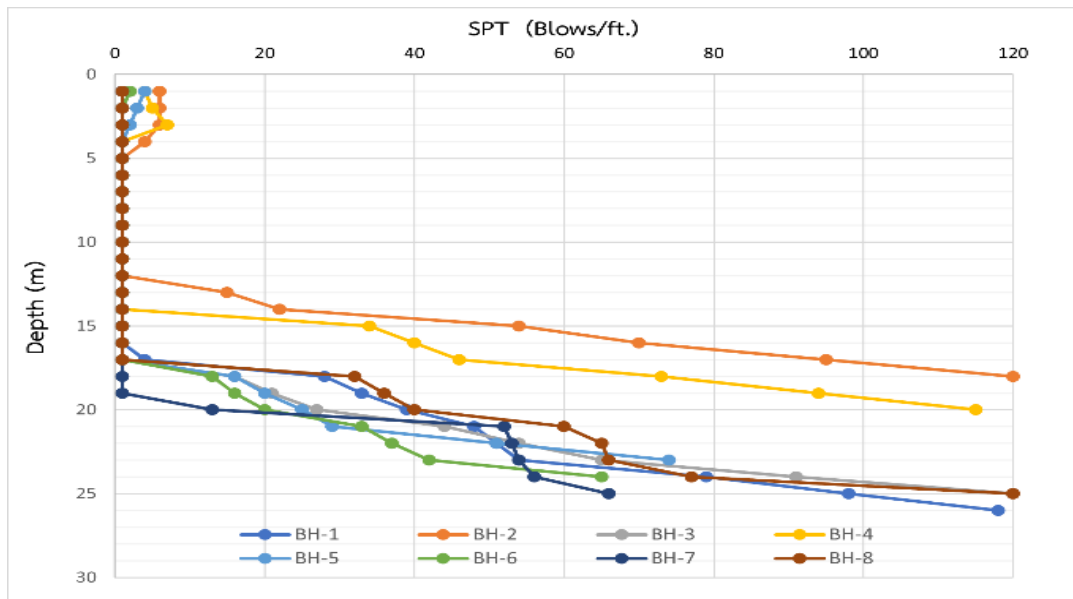
4. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้วิเคราะห์พฤติกรรมและเสถียรภาพของคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D ซึ่งสามารถจำลองพฤติกรรมของดินและโครงสร้างร่วมกันภายใต้สภาพภาระและขอบเขตที่ซับซ้อน

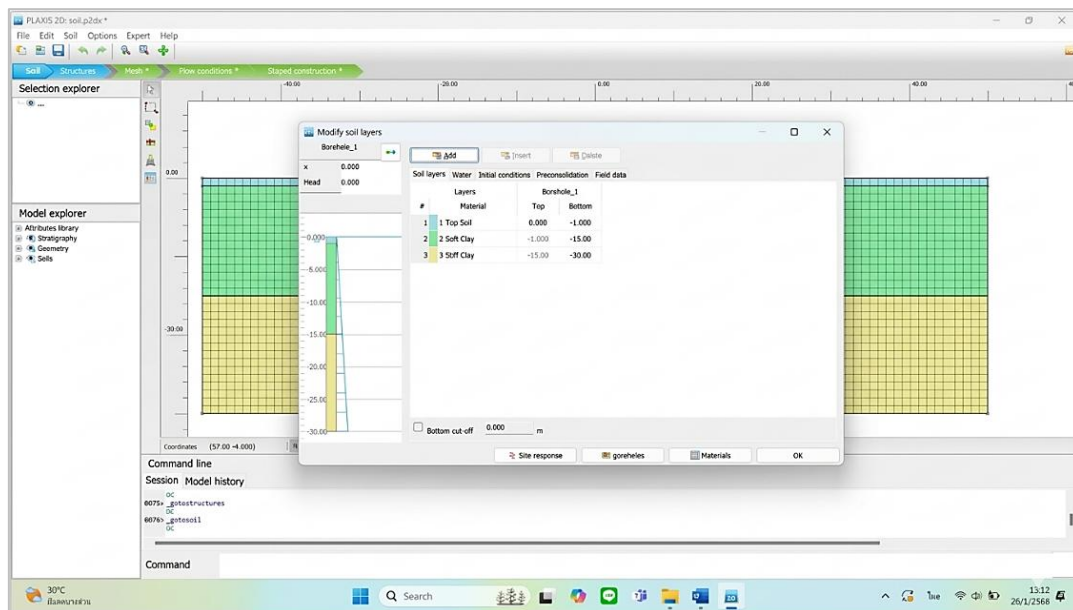
ได้อย่างมีประสิทธิภาพการจัดทำแบบจำลองอาศัยข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดิน จากการเจาะสำรวจดินในพื้นที่อำเภopakพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช เพื่อนำมากำหนดลักษณะชั้นดินและพารามิเตอร์ทางวิศวกรรมให้สอดคล้องกับสภาพพื้นที่จริง การวิเคราะห์ดำเนินการโดยกำหนดขั้นตอนการก่อสร้างตามลำดับจริง เพื่อประเมินการกระจายความเค้น การเปลี่ยนรูป และเสถียรภาพของคันทางภายใต้รูปแบบการเสริมแรงที่แตกต่างกัน

ทั้งนี้ ได้มีการกำหนดสมมติฐาน ขอบเขต และข้อจำกัดของแบบจำลองไว้อย่างชัดเจน เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำมาใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแนวทางการเสริมแรงคันทางได้อย่างเหมาะสม รายละเอียดแสดงในหัวข้อย่อยต่อไปนี้

4.1 พื้นที่ศึกษาและลักษณะชั้นดิน ข้อมูลการเจาะสำรวจดินถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการกำหนดลักษณะชั้นดินและคุณสมบัติทางวิศวกรรมสำหรับการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทางในพื้นที่ศึกษา ข้อมูลดังกล่าวได้จากสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครศรีธรรมราช [23] และข้อมูลการเจาะสำรวจในพื้นที่อำเภopakพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช จากกรมทางหลวงชนบท ผลการเจาะสำรวจพบว่า ชั้นดินบริเวณผิวดินจนถึงระดับความลึกประมาณ 15.00 เมตร เป็นดินเหนียวอ่อน ซึ่งมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมไม่เหมาะสมต่อการรับน้ำหนัก และเป็นชั้นดินหลักที่ควบคุมพฤติกรรมทรุดตัวและเสถียรภาพของคันทาง ถัดลงไปในช่วงความลึกประมาณ 15.00 – 25.00 เมตร เป็นชั้นดินเหนียวแข็ง ซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นดินรองรับที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักสูงกว่าลักษณะชั้นดินดังกล่าวถูกนำไปใช้ในการกำหนดโครงสร้างชั้นดินต้นแบบ (Soil stratigraphy) สำหรับการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแบ่งชั้นดินตามความลึกและคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่สอดคล้องกับข้อมูลภาคสนาม เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความใกล้เคียงกับสภาพจริงของพื้นที่ศึกษา



ภาพที่ 3 ผลการเจาะสำรวจดินจากสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดนครศรีธรรมราช
ที่มา: วิเคราะห์และสร้างโดยผู้วิจัย (2569)



ภาพที่ 4 การกำหนดลักษณะชั้นดินในการวิเคราะห์
ที่มา: วิเคราะห์และสร้างโดยผู้วิจัย (2569)

4.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญดังต่อไปนี้

4.2.1 การกำหนดรูปแบบเรขาคณิตของแบบจำลอง โดยกำหนดรูปแบบและขนาดของคันทาง รวมถึงพื้นที่ดิน

โดยรอบให้มีความเหมาะสมและเพียงพอ เพื่อจำกัดผลกระทบจากขอบเขตของแบบจำลองต่อผลการวิเคราะห์

4.2.2 การกำหนดชั้นดินและคุณสมบัติทางวิศวกรรม โดยกำหนดชั้นดินตามข้อมูลการเจาะสำรวจดินในพื้นที่อำเภอปากพนัง โดยระบุชนิดของดิน ความลึกของแต่ละชั้น และคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่สำคัญ เช่น หน่วยน้ำหนัก

ค่ากำลังรับแรงเฉือน มอดูลัสยืดหยุ่น และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ทั้งนี้แบบจำลองพฤติกรรมดินเลือกใช้แบบจำลอง Mohr–Coulomb

4.2.3 การกำหนดระดับน้ำใต้ดิน โดยกำหนดตำแหน่งระดับน้ำใต้ดินในแบบจำลองตามข้อมูลพื้นที่จริง เพื่อพิจารณาผลกระทบของแรงดันน้ำในรูพรุนต่อเสถียรภาพของคันทาง

4.2.4 การกำหนดองค์ประกอบโครงสร้างเสริมแรง โดยจำลององค์ประกอบโครงสร้างเสริมแรง ได้แก่ แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) ขานทาง (Berm) และเสาเข็ม (Pile) โดยกำหนดคุณสมบัติของวัสดุและตำแหน่งติดตั้งให้สอดคล้องกับเงื่อนไขของแต่ละกรณีศึกษา

4.2.5 การสร้างตาข่ายองค์ประกอบจำกัด (Mesh) ให้มีความละเอียดเหมาะสม โดยเพิ่มความละเอียดในบริเวณที่คาดว่าจะเกิดการเปลี่ยนรูปหรือความเค้นสูง เพื่อเพิ่มความแม่นยำของผลการวิเคราะห์

4.2.6 การวิเคราะห์และการประเมินผล โดยจำลองลำดับขั้นตอนการก่อสร้างของคันทางและทำการคำนวณเพื่อประเมินค่าการเปลี่ยนรูป การกระจายความเค้น และค่าปัจจัยความปลอดภัย โดยใช้วิธีลดค่ากำลังรับแรงเฉือน (ϕ -c reduction method)

4.3 ข้อสมมติฐานและข้อจำกัดของแบบจำลอง การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้อาศัยข้อสมมติฐานบางประการ ได้แก่ การสมมติให้คุณสมบัติของดินในแต่ละชั้นมีความสม่ำเสมอ และการใช้แบบจำลองพฤติกรรมดินแบบ Mohr–Coulomb ซึ่งอาจไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมที่ขึ้นกับเวลา เช่น การคืบตัวและการทรุดตัวในระยะยาวได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ การวิเคราะห์มุ่งเน้นเสถียรภาพในระยะสั้นภายใต้สภาพการก่อสร้าง โดยไม่ได้พิจารณาผลกระทบจากการอัดตัวคายน้ำในระยะยาว

ตารางที่ 1 แสดงตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์

Parameter	Name	Topsoil	Soft Clay	Stiff Clay	Unit
Material Model	Model	M-C	M-C	M-C	-
Type of Behavior	Type	Undrained	Undrained	Undrained	-
Dry Soil Unit Weight	γ_{dry}	16	14	17	kN/m ³
Wet Soil Unit Weight	γ_{wet}	18	16	19	kN/m ³

อย่างไรก็ตาม วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ยังคงมีความเหมาะสมในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปแบบการเสริมแรงคันทางที่แตกต่างกัน และสามารถสะท้อนแนวโน้มพฤติกรรมเชิงกลของคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนได้อย่างชัดเจน

4.4 รายละเอียดค่าพารามิเตอร์ของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลอง ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวัสดุให้สอดคล้องกับพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ งานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ของดินจากข้อมูลการทดสอบภาคสนาม การทดสอบในห้องปฏิบัติการ และเอกสารอ้างอิง ที่เกี่ยวข้องกับดินในพื้นที่อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช แบบจำลองดินประกอบด้วยดิน 3 ประเภท ได้แก่ ชั้นดินผิว (Topsoil) ชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) และชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) โดยใช้แบบจำลองวัสดุ Mohr – coulomb และกำหนดพฤติกรรมดินภายใต้สภาวะไม่ระบายน้ำ (Undrained condition) พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วยค่าหน่วยน้ำหนักดิน มอดูลัสยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซอง ค่าความเหนียว มุมเสียดทานภายใน และค่าการซึมผ่านในแนวนอนและแนวตั้ง ซึ่งมีความแตกต่างกันตามลักษณะและความแข็งแรงของแต่ละชั้นดิน การเลือกใช้พฤติกรรมดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Condition) สอดคล้องกับสภาพการก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อน ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในระยะเวลาสั้นเมื่อเทียบกับอัตราการระบายน้ำของดิน ส่งผลให้แรงดันน้ำในดินส่วนเกินไม่สามารถระบายออกได้ทัน การกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจึงสามารถสะท้อนพฤติกรรมของดินในช่วงการก่อสร้างได้อย่างเหมาะสม และถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์เสถียรภาพและพฤติกรรมเคลื่อนตัวของคันทาง แสดงในตารางที่ 1

Parameter	Name	Topsoil	Soft Clay	Stiff Clay	Unit
Young's Modulus	E	7000	1800	27000	kN/m ²
Poisson's Ratio	ν	0.25	0.3	0.3	-
Cohesion	c	35	12	90	kN/m ²
Friction Angle	ϕ	0	0	0	°
Dilatancy Angle	ψ	0	0	0	°
Horizontal Permeability	Kx	0.0008	0.0008	0.0008	m/day
Vertical Permeability	Ky	0.0008	0.0008	0.0008	m/day

ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

จากตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งประกอบด้วยดิน 3 ประเภท ได้แก่ ชั้นดินผิว (Topsoil) ชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) และชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay) โดยแบบจำลองพฤติกรรมดินที่ใช้คือ Mohr – Coulomb ภายใต้สภาวะไม่ระบายน้ำ (Undrained Condition) พารามิเตอร์ที่กำหนดประกอบด้วยค่าหน่วยน้ำหนักดินแห้งและดินเปียก มอดุลัสยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซอง ค่าความเหนียวมุมเสียดทานภายใน และค่าการซึมผ่านในแนวนอนและแนวตั้ง ซึ่งมีความแตกต่างกันตามลักษณะและความแข็งแรงของแต่ละชั้นดิน พารามิเตอร์ดังกล่าวถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทาง

การเลือกใช้พฤติกรรมดินแบบไม่ระบายน้ำ เนื่องจากการก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนเป็นกระบวนการระยะสั้นเมื่อเทียบกับอัตราการระบายน้ำของดินที่มีค่าการซึมผ่านต่ำ ทำให้แรงดันน้ำในดินส่วนเกินไม่สามารถระบายออกได้อย่างสมบูรณ์ การวิเคราะห์ภายใต้สภาวะดังกล่าวจึงสามารถสะท้อนพฤติกรรมของดินและสภาพการทำงานของคันทางในช่วงการก่อสร้างได้อย่างเหมาะสม

5. ผลการวิจัย

ผลการเจาะสำรวจดินถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดลักษณะของชั้นดินต้นแบบสำหรับการจำลองและวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทางในรูปแบบต่าง ๆ โดยกำหนดลักษณะชั้นดินดังนี้ คือ ชั้น Topsoil ที่ระดับความลึก 0.00 – 1.00 เมตร ชั้น Soft Clay ที่ระดับความลึก 1.00 – 15.00 เมตร

และชั้น Stiff Clay ที่ระดับความลึก 15.00 – 30.00 เมตร ซึ่งการจำลองแต่ละกรณีจะใช้พารามิเตอร์คุณสมบัติดินและสภาพโหลดที่เหมือนกันทุกประการ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการประเมินค่าปัจจัยความปลอดภัย (Factor of Safety: F.S.) ได้อย่างถูกต้อง ตามรายละเอียดแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงการออกแบบและวิเคราะห์พฤติกรรมของคันทางที่มีการปรับปรุงเสถียรภาพโดยวิธีการต่าง ๆ

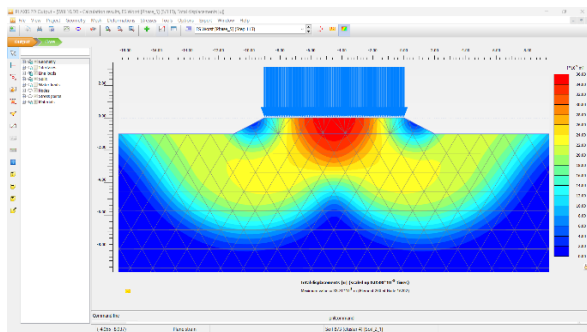
ชื่อ กรณีศึกษา / รหัส	การออกแบบและวิเคราะห์ พฤติกรรม โดยใช้วิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์	กรณีศึกษาในแต่ละ รูปแบบ
NR-9-1	การวิเคราะห์เสถียรภาพ คันทาง โดยที่ไม่มีการ เสริมแรง	คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 1 เมตร
NR-9-2	เสริมแรง	คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 2 เมตร
NR-9-3		คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 3 เมตร
GT-9-1	การวิเคราะห์เสถียรภาพ คันทางด้วยวิธีการ เสริมแรงด้วยแผ่นใย สังเคราะห์ Geotextile	คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 1 เมตร เสริมแรงด้วย Geotextile 150 kN/m
GT-9-2		คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 2 เมตร เสริมแรงด้วย Geotextile

ชื่อ กรณีศึกษา / รหัส	การออกแบบและวิเคราะห์ พฤติกรรม โดยใช้วิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์	กรณีศึกษาในแต่ละ รูปแบบ
GT-9-3		150 kN/m คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 3 เมตร เสริมแรงด้วย Geotextile 150 kN/m
BM-9-1	การวิเคราะห์เสถียรภาพ คันทาง ด้วยวิธีการเสริมแรง ด้วยขานทาง Berm	คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 1 เมตร เสริมด้วยขานทาง กว้าง 4 เมตร สูง 0.5 เมตร
BM-9-2		คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 2 เมตร เสริมด้วยขานทาง กว้าง 4 เมตร สูง 1.0 เมตร
BM-9-3		คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 3 เมตร เสริมด้วยขานทาง กว้าง 4 เมตร สูง 1.5 เมตร
PL-9-1	การวิเคราะห์เสถียรภาพ คันทาง ด้วยวิธีการเสริมแรง ด้วยเสาเข็ม Pile	คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 1 เมตร เสริมด้วยเสาเข็ม ขนาด 0.22 x 0.22 x 16.0 เมตร
PL-9-2		คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 2 เมตร เสริมด้วยเสาเข็ม ขนาด 0.22 x 0.22 x 16.0 เมตร
PL-9-3		คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 3 เมตร เสริมด้วยเสาเข็ม ขนาด 0.22 x 0.22 x 16.0 เมตร

ชื่อ กรณีศึกษา / รหัส	การออกแบบและวิเคราะห์ พฤติกรรม โดยใช้วิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์	กรณีศึกษาในแต่ละ รูปแบบ
GPL-9-1	การวิเคราะห์เสถียรภาพ คันทาง ด้วยวิธีการเสริมแรง ด้วยขานทางและเสาเข็ม Berm + Pile	คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 1 เมตร เสริมด้วยขานทาง กว้าง 4 เมตร สูง 0.5 เมตร และเสาเข็ม ขนาด 0.22 x 0.22 x 16.0 เมตร
GPL-9-2		คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 2 เมตร เสริมด้วยขานทาง กว้าง 4 เมตร สูง 1.0 เมตร และเสาเข็ม ขนาด 0.22 x 0.22 x 16.0 เมตร
GPL-9-3		คันทางกว้าง 9 เมตร สูง 3 เมตร เสริมด้วยขานทาง กว้าง 4 เมตร สูง 1.5 เมตร และเสาเข็ม ขนาด 0.22 x 0.22 x 16.0 เมตร

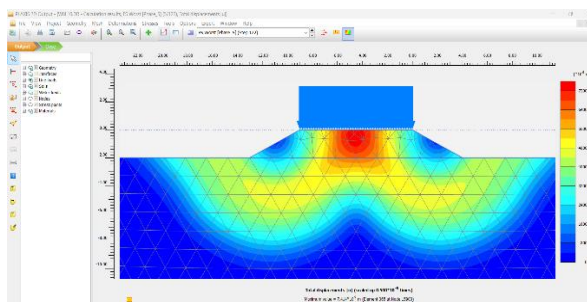
การวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทางได้ดำเนินการภายใต้เงื่อนไขการศึกษาเชิงเปรียบเทียบ จำนวน 3 กรณี เพื่อประเมินผลกระทบของความสูงคันทางต่อเสถียรภาพโครงสร้าง โดยกำหนดให้ความกว้างคันทางคงที่ที่ 9.00 เมตร และปรับเปลี่ยนความสูงคันทางเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 1.00 เมตร, 2.00 เมตร และ 3.00 เมตร รายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพคันทางที่ไม่มีการเสริมแรง การดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทางในกรณีที่ไม่มีเสริมกำลัง ได้ดำเนินการโดยการจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อประเมินค่าปัจจัยความปลอดภัยของคันทางภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ จำนวน 3 กรณี ดังแสดงในภาพที่ 5 ถึง ภาพที่ 7



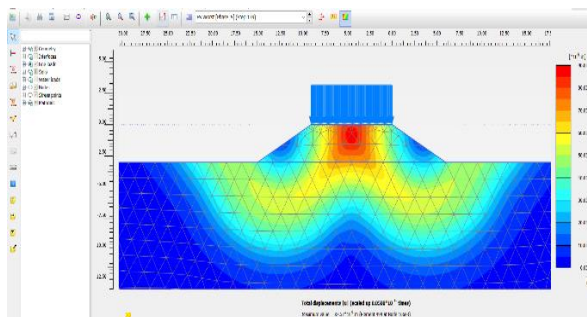
ภาพที่ 5 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี NR-9-1
ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

จากผลการวิเคราะห์กรณี NR-9-1 ค้นทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 1.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 2.312



ภาพที่ 6 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี NR-9-2
ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

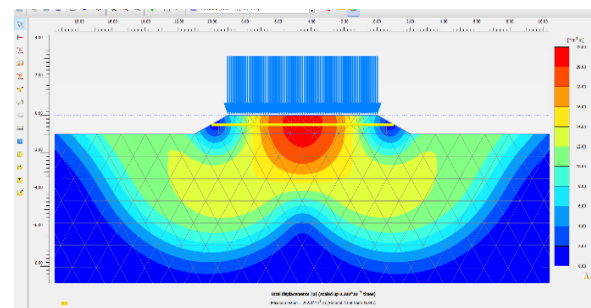
จากผลการวิเคราะห์กรณี NR-9-2 ค้นทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 2.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 1.476



ภาพที่ 7 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี NR-9-3

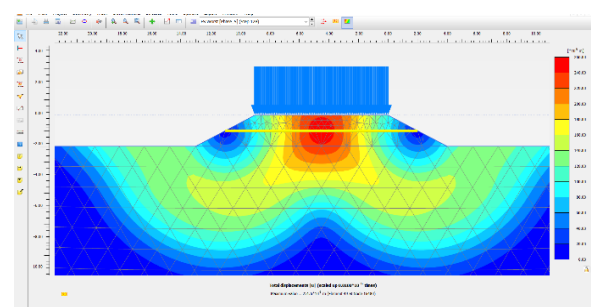
จากผลการวิเคราะห์กรณี NR-9-3 ค้นทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 3.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 1.110

5.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพค้นทางที่เสริมแรงด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile 150 kN/m) การดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพค้นทางที่เสริมแรงด้วย Geotextile 150 kN/m ได้ดำเนินการโดยการจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อประเมินค่าปัจจัยความปลอดภัยของค้นทางภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ จำนวน 3 กรณี ดังแสดงในภาพที่ 8 ถึงภาพที่ 10



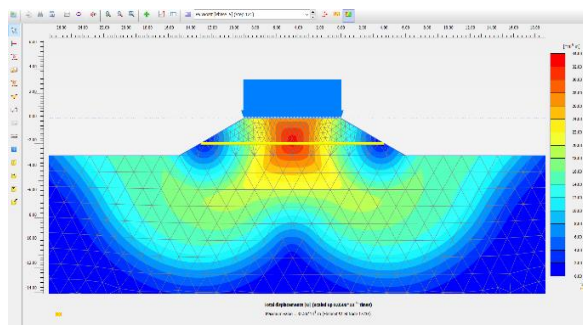
ภาพที่ 8 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี GT-9-1

จากผลการวิเคราะห์กรณี GT-9-1 ค้นทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 1.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 2.345



ภาพที่ 9 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี GT-9-2

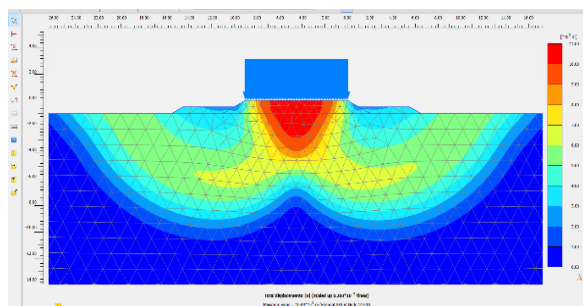
จากผลการวิเคราะห์กรณี GT-9-2 ค้นทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 2.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 1.490



ภาพที่ 10 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี GT-9-3

จากผลการวิเคราะห์กรณี GT-9-3 ค้นทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 3.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 1.159

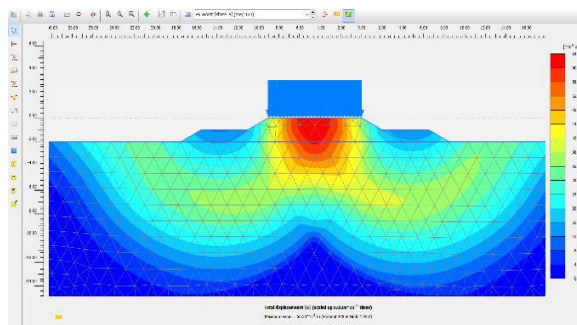
5.3 วิเคราะห์เสถียรภาพคันทางที่เสริมแรงด้วยขานทาง (Berm) การดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพคันทางที่เสริมแรงด้วยขานทาง ได้ดำเนินการโดยการจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อประเมินค่าปัจจัยความปลอดภัยของคันทางภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ จำนวน 3 กรณี ดังแสดงในภาพที่ 11 ถึงภาพที่ 13



ภาพที่ 11 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี BM-9-1

ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

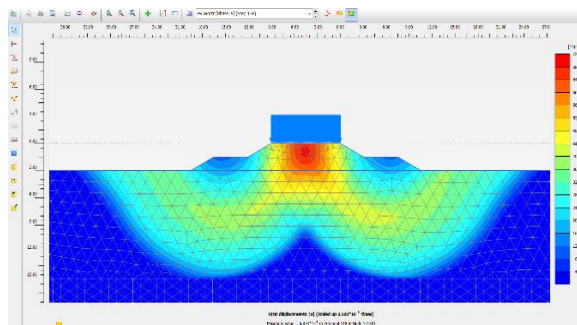
จากผลการวิเคราะห์กรณี BM-9-1 ค้นทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 1.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 2.582



ภาพที่ 12 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี BM-9-2

ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

จากผลการวิเคราะห์กรณี BM-9-2 ค้นทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 2.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 1.637

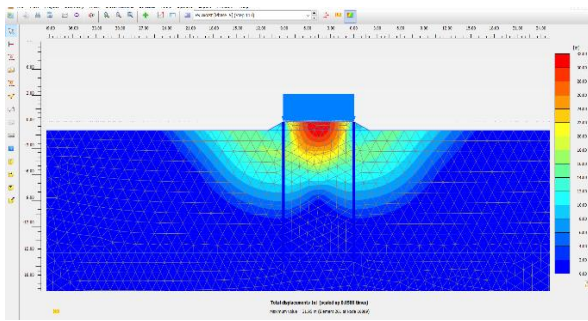


ภาพที่ 13 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี BM-9-3

ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

จากผลการวิเคราะห์กรณี BM-9-3 ค้นทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 3.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 1.210

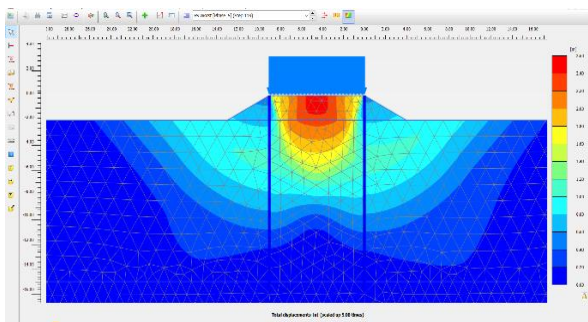
5.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพคันทางที่เสริมแรงด้วยเสาเข็ม (Pile) การดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพคันทางที่เสริมแรงด้วยเสาเข็ม ได้ดำเนินการโดยการจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อประเมินค่าปัจจัยความปลอดภัยของคันทางภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ จำนวน 3 กรณี ดังแสดงในภาพที่ 14 ถึงภาพที่ 16



ภาพที่ 14 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี PL-9-1

ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

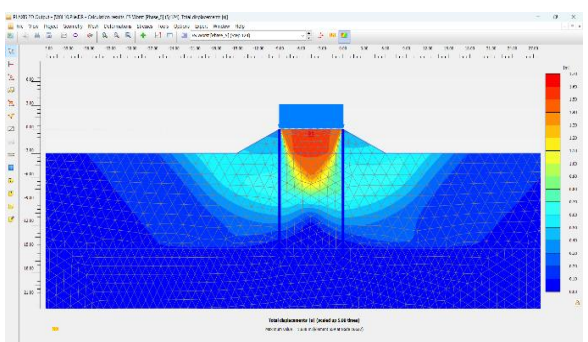
จากผลการวิเคราะห์กรณี PL-9-1 คันทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 1.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 2.593



ภาพที่ 15 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี PL-9-2

ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

จากผลการวิเคราะห์กรณี PL-9-2 คันทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 2.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 1.720

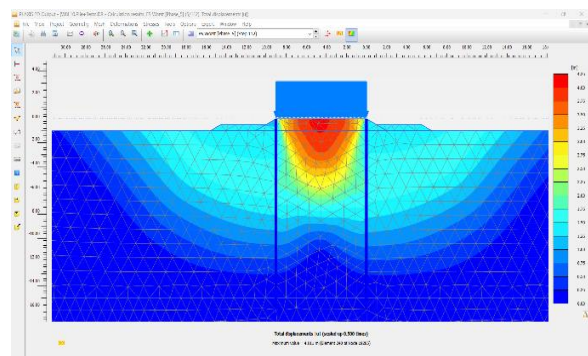


ภาพที่ 16 วิเคราะห์เสถียรภาพ กรณี PL-9-3

ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

จากผลการวิเคราะห์กรณี PL-9-3 คันทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 3.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 1.374

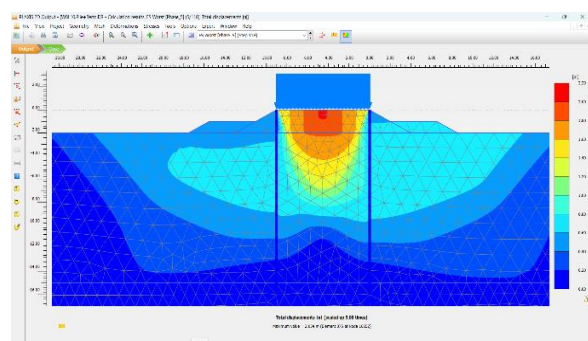
5.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพคันทางที่เสริมแรงด้วยขานทางและเสาเข็ม (Berm + Pile) การดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพคันทางที่เสริมแรงด้วยขานทางและเสาเข็ม ได้ดำเนินการโดยการจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อประเมินค่าปัจจัยความปลอดภัยของคันทางภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ จำนวน 3 กรณี ดังแสดงในภาพที่ 17 ถึงภาพที่ 19



ภาพที่ 17 วิเคราะห์เสถียรภาพ GPL-9-1

ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

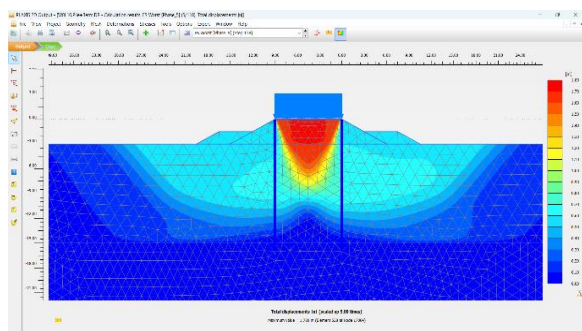
จากผลการวิเคราะห์กรณี GPL-9-1 คันทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 1.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 2.787



ภาพที่ 18 วิเคราะห์เสถียรภาพ GPL-9-2

ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

จากผลการวิเคราะห์กรณี GPL-9-2 คันทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 2.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 1.863



ภาพที่ 19 วิเคราะห์เสถียรภาพ GPL-9-3

ที่มา: ผู้วิจัยจัดทำขึ้น

จากผลการวิเคราะห์กรณี GPL-9-3 คันทาง กว้าง 9.00 เมตร สูง 3.00 เมตร พบว่า ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) มีค่าเท่ากับ 1.473

6. สรุปผลและอภิปรายผล

ผลการศึกษานี้เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพและพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของคันทางที่ก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อนในพื้นที่อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D การวิเคราะห์พิจารณาคันทางที่มีความสูง 3 ระดับ ได้แก่ 1.00 เมตร, 2.00 เมตร และ 3.00 เมตร ภายใต้รูปแบบการเสริมแรงที่แตกต่างกันจำนวน 5 กรณี เพื่อเปรียบเทียบผลด้านปัจจัยความปลอดภัย (Factor of Safety) การกระจายความเค้น (Stress Distribution) และพฤติกรรมการเคลื่อนตัว (Displacement)

6.1 กรณีคันทางที่ไม่มีการเสริมแรง ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า คันทางที่ไม่มีการเสริมแรงมีค่าปัจจัยความปลอดภัยต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกกรณีศึกษา โดยเมื่อความสูงของคันทางเพิ่มขึ้น ค่าปัจจัยความปลอดภัยมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนและเข้าใกล้ค่าขีดจำกัดด้านเสถียรภาพ การกระจายความเค้นในชั้นดินเหนียวอ่อน พบว่า

มีความเค้นในแนวตั้งสูงบริเวณใต้ฐานคันทางและบริเวณ Toe Slope ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวและการเสียรูปของคันทางในระดับสูง สะท้อนให้เห็นถึงความเสี่ยงต่อการวิบัติด้านเสถียรภาพของคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนเมื่อไม่มีมาตรการเสริมแรง

6.2 กรณีคันทางที่เสริมแรงด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile) การเสริมแรงด้วยจีโอเท็กซ์ไทล์ช่วยเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัยของคันทางในทุกระดับความสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการเสริมแรง โดยกรณีที่เสริมแรงด้วยจีโอเท็กซ์ไทล์ทำหน้าที่ช่วยกระจายแรงและเพิ่มกำลังรับแรงดึงบริเวณฐานคันทาง ส่งผลให้แนวโน้มการเคลื่อนตัวลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อความสูงของคันทางเพิ่มขึ้น ยังคงพบการลดลงของค่าปัจจัยความปลอดภัยและการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัวอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าการเสริมแรงด้วยจีโอเท็กซ์ไทล์เพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพจำกัดสำหรับคันทางที่มีความสูงมากบนชั้นดินเหนียวอ่อน

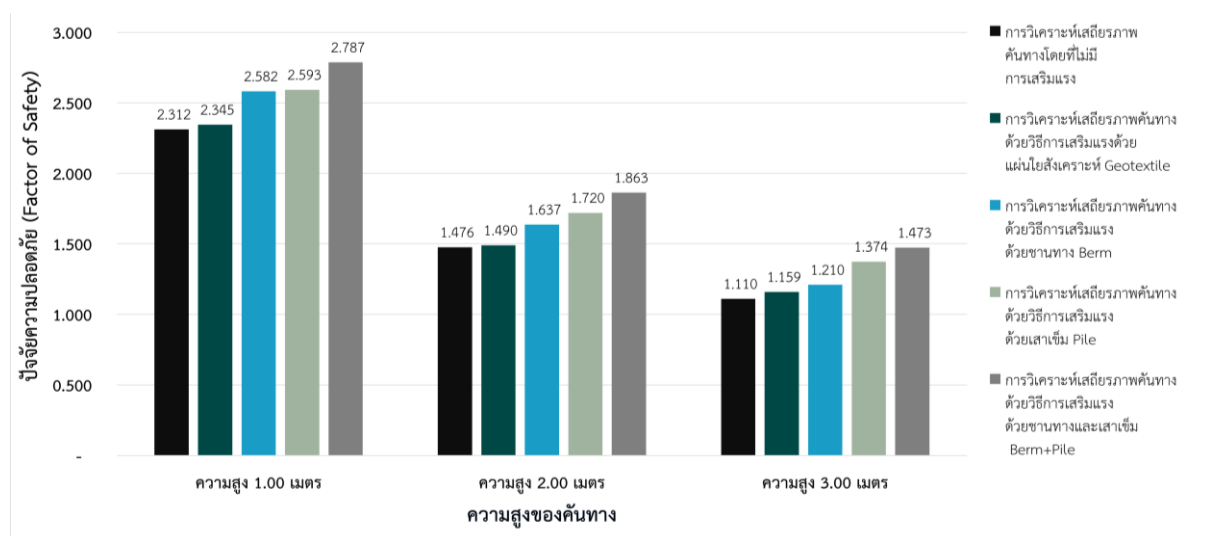
6.3 กรณีคันทางที่เสริมแรงด้วยขานทาง (Berm) ผลการวิเคราะห์พบว่า การเสริมแรงด้วยขานทางสามารถเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัยของคันทางได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการเสริมแรงและกรณีเสริมแรงด้วยจีโอเท็กซ์ไทล์ โดยเฉพาะในระดับความสูงของคันทางที่มากขึ้น ขานทางช่วยเพิ่มแรงต้านทานด้านข้างและลดความชันของแนววิบัติบริเวณ Toe Slope ส่งผลให้การกระจายความเค้นในชั้นดินเหนียวอ่อนมีความสม่ำเสมอมากขึ้น และการเคลื่อนตัวของคันทางลดลง อย่างไรก็ตาม การทรุดตัวในแนวตั้งยังคงเกิดขึ้นเนื่องจากการอัดตัวของดินเหนียวอ่อนภายใต้น้ำหนักคันทาง

6.4 กรณีคันทางที่เสริมแรงด้วยเสาเข็ม (Pile) การเสริมแรงด้วยเสาเข็มแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการเพิ่มเสถียรภาพของคันทางอย่างชัดเจน โดยค่าปัจจัยความปลอดภัยเพิ่มขึ้นในทุกระดับความสูงของคันทาง กลไกหลักเกิดจากการถ่ายน้ำหนักจากคันทางผ่านเสาเข็มลงสู่ชั้นดินแข็งด้านล่าง ส่งผลให้ค่าความเค้นและการเคลื่อนตัวในชั้นดินเหนียวอ่อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ การเคลื่อนตัวทั้งในแนวตั้งและแนวราบของคันทางลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับ

กับกรณีอื่น อย่างไรก็ตาม ยังพบการสะสมความเค้นบริเวณรอยต่อระหว่างเสาเข็มและดินโดยรอบ

6.5 กรณีคันทางที่เสริมแรงด้วยขานทางร่วมกับเสาเข็ม (Berm + Pile) ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า การเสริมแรงด้วยขานทางร่วมกับเสาเข็มให้ประสิทธิภาพสูงสุดในทุกกรณีศึกษา โดยมีค่าปัจจัยความปลอดภัยสูงที่สุดและมีการเคลื่อนตัวต่ำที่สุดในทุกระดับความสูงของคันทาง การผสมผสานดังกล่าวช่วยเสริมทั้งกลไกการถ่ายแรงในแนวตั้งผ่านเสาเข็มและแรงต้านทานด้านข้างจากขานทาง ส่งผลให้การกระจายความเค้นในชั้นดินมีความเหมาะสม ลดความเสี่ยงต่อการเกิดแนววิบัติ และควบคุมการเคลื่อนตัวของคันทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการศึกษานี้ยืนยันว่าการใช้ระบบเสริมแรงร่วมกันมีความเหมาะสมสำหรับการก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อน โดยเฉพาะในกรณีคันทางที่มีความสูงมาก

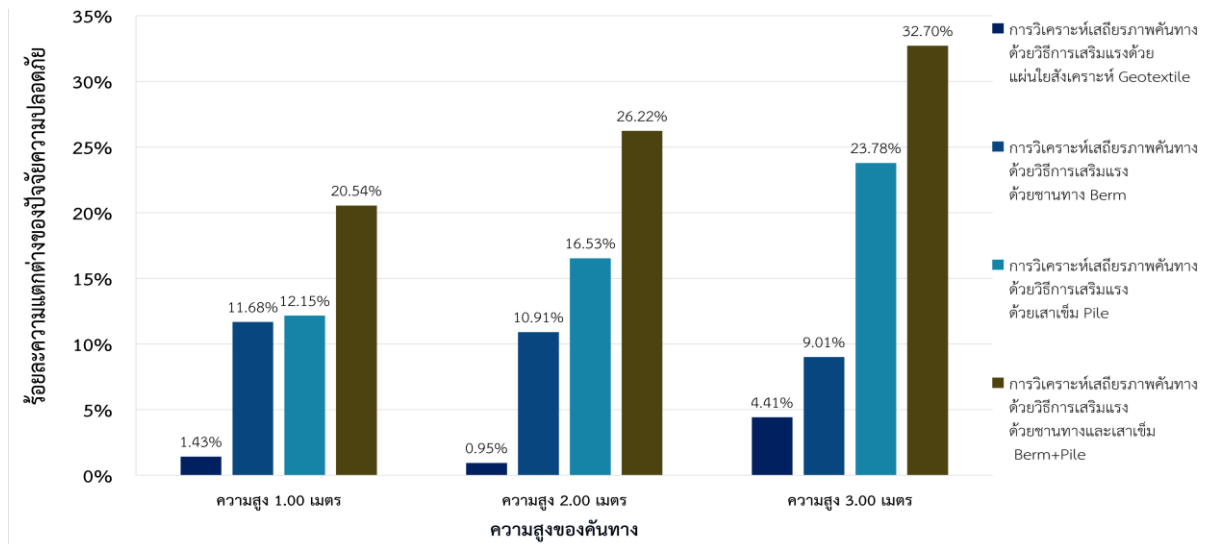
ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ค่าปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) ของคันทางภายใต้วิธีการเสริมแรงที่แตกต่างกัน พบว่ารูปแบบการเสริมแรงมีผลต่อเสถียรภาพของคันทางอย่างชัดเจน โดยกรณีคันทางที่ไม่มีการเสริมแรงให้ค่า F.S. ต่ำที่สุดในทุกระดับความสูงของคันทาง ขณะที่การเสริมแรงด้วยขานทางและเสาเข็มสามารถเพิ่มค่า F.S. ได้ในระดับที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ การเสริมแรงด้วยเสาเข็มให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการเสริมแรงด้วยขานทางเพียงอย่างเดียว เนื่องจากสามารถถ่ายน้ำหนักจากคันทางลงสู่ชั้นดินแข็งด้านล่างได้โดยตรง สำหรับกรณีการเสริมแรงแบบผสมผสานระหว่างขานทางและเสาเข็ม (Berm + Pile) พบว่าให้ค่า F.S. สูงที่สุดในทุกกรณีศึกษา และมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า F.S. เมื่อเทียบกับกรณีไม่เสริมแรงมากที่สุด สะท้อนให้เห็นถึงความเหมาะสมของการใช้ระบบเสริมแรงร่วมกันในการเพิ่มเสถียรภาพของคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อน ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 การเปรียบเทียบปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) ของคันทางภายใต้วิธีการเสริมแรงที่แตกต่างกัน

ผลการวิเคราะห์ปัจจัยความปลอดภัย (F.S.) แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพของการเสริมแรงแตกต่างกันตามระดับความสูงของคันทาง เพื่อให้การเปรียบเทียบชัดเจนยิ่งขึ้น ผู้วิจัย

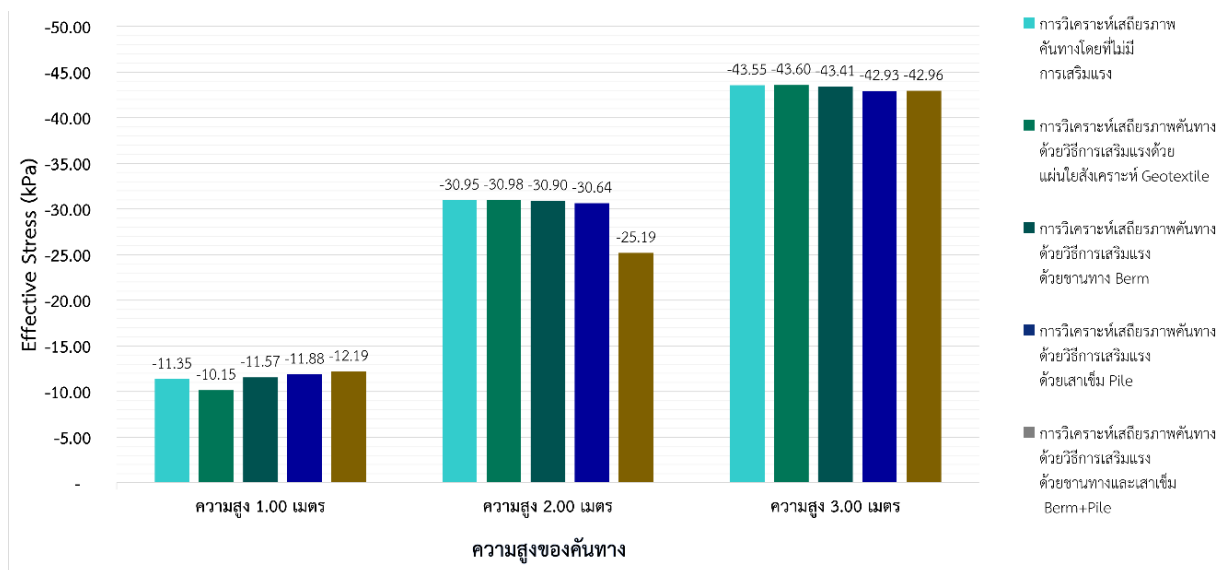
จึงนำเสนอร้อยละความแตกต่างของปัจจัยความปลอดภัย โดยอ้างอิงกรณีไม่เสริมแรงเป็นฐานดังแสดงภาพที่ 21



ภาพที่ 21 การเปรียบเทียบร้อยละความแตกต่างของปัจจัยความปลอดภัย เมื่อเทียบกับกรณีไม่เสริมแรง

ผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้นจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่าค่า Effective Vertical Stress มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความสูงของคันทางในทุกกรณีศึกษา เมื่อเปรียบเทียบวิธีการเสริมแรง พบว่าการเสริมแรงด้วยคันทางร่วมกับเสาเข็ม (Berm + Pile) ให้ค่าความเค้นต่ำกว่าวิธีอื่นอย่างชัดเจน สะท้อนถึงประสิทธิภาพ

ในการถ่ายและกระจายแรง รวมถึงการลดการสะสมความเค้นในบริเวณวิกฤตของคันทาง ในขณะที่กรณีไม่เสริมแรงและการเสริมแรงด้วยวิธีเดียวให้ค่าความเค้นสูงกว่า ซึ่งบ่งชี้ถึงความเสี่ยงต่อการเกิดการเคลื่อนตัวและการวิบัติที่มากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 22



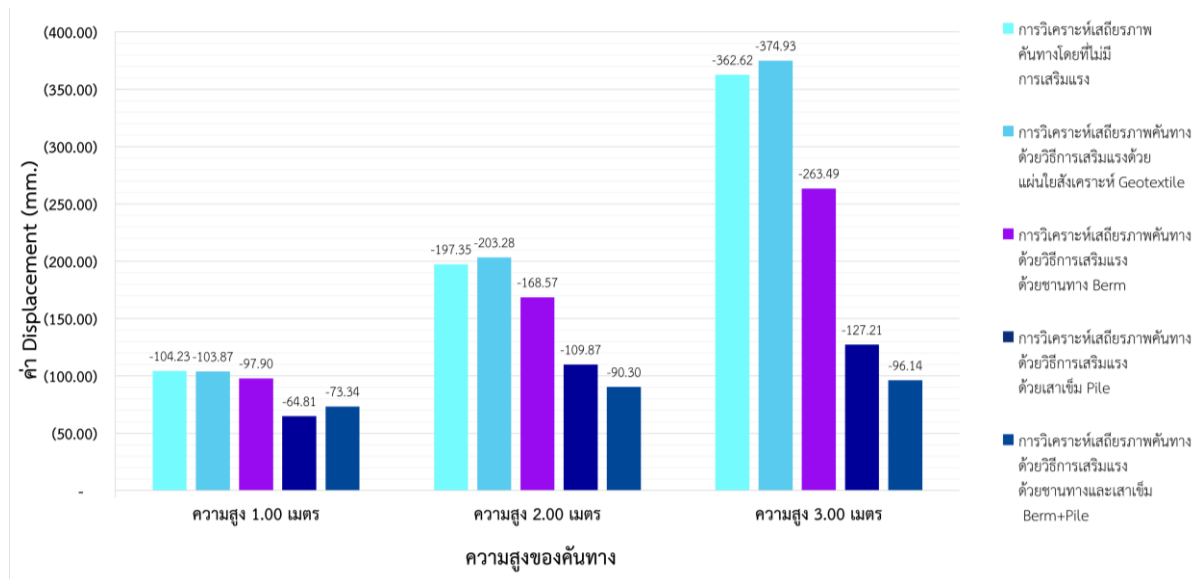
ภาพที่ 22 การเปรียบเทียบค่าความเค้น (Effective Stress) ของคันทางภายใต้วิธีการเสริมแรงที่แตกต่างกัน

ผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวของคันทางแสดงให้เห็นว่า เมื่อความสูงของคันทางเพิ่มขึ้น ค่าการเคลื่อนตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกกรณีศึกษา สะท้อนถึงอิทธิพลของ

น้ำหนักบรรทุกต่อพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อน โดยกรณีไม่เสริมแรงและการเสริมแรงด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งให้ค่าการเคลื่อนตัวสูงที่สุด ขณะที่การ

เสริมแรงด้วยขานทางสามารถลดการเคลื่อนตัวได้บางส่วน สำหรับกรณีการเสริมแรงด้วยเสาเข็มและการเสริมแรงร่วมระหว่างขานทางและเสาเข็มให้ค่าการเคลื่อนตัวต่ำที่สุดใน

ทุกระดับความสูง โดยเฉพาะกรณี Berm + Pile ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพสูงสุดในการควบคุมการเคลื่อนตัวและเพิ่มเสถียรภาพของคันทาง ดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัว Displacement (mm.) ของคันทางภายใต้วิธีการเสริมแรงที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่าความเค้น (Stress) และการเคลื่อนตัว (Displacement) ของคันทางที่ตำแหน่งเดียวกัน ภายใต้วิธีการเสริมแรงที่แตกต่างกัน

กรณีวิเคราะห์		ค่า F.S. Displacement Stress		
			(mm.)	(kPa)
การวิเคราะห์	NR-9-1	2.312	-104.23	-11.35
เสถียรภาพ	NR-9-2	1.476	-197.35	-30.95
คันทางโดยที่ไม่มีการเสริมแรง	NR-9-3	1.110	-362.62	-43.55
การวิเคราะห์	GT-9-1	2.345	-103.87	-10.15
เสถียรภาพคัน	GT-9-2	1.490	-203.28	-30.98
ทางด้วยวิธีการ	GT-9-3	1.159	-374.93	-43.60
เสริมแรงด้วย	GPL-9-2	1.863	-90.30	-25.19
แผ่นใย	GPL-9-3	1.473	-96.14	-42.96
สังเคราะห์ Geotextile				

กรณีวิเคราะห์		ค่า F.S. Displacement Stress		
			(mm.)	(kPa)
การวิเคราะห์	BM-9-1	2.582	-97.90	-11.57
เสถียรภาพคัน	BM-9-2	1.637	-168.57	-30.90
ทางด้วยวิธีการ	BM-9-3	1.210	-263.49	-43.41
เสริมแรงด้วยขานทาง Berm				
การวิเคราะห์	PL-9-1	2.593	-64.81	-11.88
เสถียรภาพ	PL-9-2	1.720	-109.87	-30.64
คันทางด้วยวิธีการเสริมแรงด้วยเสาเข็ม Pile	PL-9-3	1.374	-127.21	-42.93
การวิเคราะห์	GPL-9-1	2.787	-73.34	-12.19
เสถียรภาพคันทางด้วยวิธีการเสริมแรงด้วยขานทางและเสาเข็ม Berm + Pile				

7. บทสรุป

การก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนเป็นปัญหาทางวิศวกรรมที่สำคัญ เนื่องจากดินมีค่ากำลังรับแรงเฉือนต่ำ มีการทรุดตัวสูง และมีความเสี่ยงต่อการวิบัติด้านเสถียรภาพ โดยเฉพาะในพื้นที่ราบลุ่มชายฝั่ง เช่น อำเภopakพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาพฤติกรรมและเสถียรภาพของคันทางที่ก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน โดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D เพื่อประเมินอิทธิพลของความสูงคันทางและรูปแบบการเสริมกำลังที่แตกต่างกันต่อค่าปัจจัยความปลอดภัย การกระจายความเค้น และพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของคันทาง

จากการศึกษาพบว่าความสูงของคันทางมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบอย่างชัดเจน โดยเมื่อความสูงของคันทางเพิ่มขึ้น ค่าปัจจัยความปลอดภัยมีแนวโน้มลดลง ขณะที่ค่าความเค้นและการเคลื่อนตัวของภายในชั้นดินเหนียวอ่อนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สะท้อนให้เห็นถึงข้อจำกัดของการก่อสร้างคันทางบนดินอ่อนโดยไม่มีมาตรการเสริมกำลัง ซึ่งมีความเสี่ยงต่อการวิบัติด้านเสถียรภาพสูง การใช้มาตรการเสริมกำลังสามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพของคันทางได้ในระดับที่แตกต่างกัน โดยการเสริมกำลังด้วยเสาเข็มช่วยถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินแข็งด้านล่าง ส่งผลให้การทรุดตัวและความเค้นในชั้นดินอ่อนลดลงอย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่การเสริมกำลังด้วยขานทางมีบทบาทในการเพิ่มแรงต้านทานด้านข้างและลดแนวโน้มการวิบัติบริเวณเชิงลาดของคันทาง อย่างไรก็ตาม การเสริมกำลังแบบผสมผสานระหว่างขานทางและเสาเข็ม (Berm + Pile) ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการเพิ่มค่าปัจจัยความปลอดภัยและควบคุมการเคลื่อนตัวของคันทางในทุกระดับความสูง เนื่องจากสามารถผสานกลไกการถ่ายแรงในแนวตั้งและแรงต้านทานด้านข้างได้อย่างเหมาะสม

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการเลือกใช้มาตรการเสริมกำลังสำหรับคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนควรพิจารณาร่วมกันทั้งลักษณะชั้นดิน ความสูงของคันทาง และเงื่อนไขด้านความปลอดภัยในระยะยาว ซึ่งผลการวิจัยสามารถ

นำไปใช้เป็นแนวทางประกอบการออกแบบและการตัดสินใจเชิงวิศวกรรมสำหรับการก่อสร้างคันทางในพื้นที่ที่มีสภาพดินคล้ายคลึงกันได้อย่างเหมาะสม

7. ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อนในพื้นที่อำเภopakพนัง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ผ่านโปรแกรม PLAXIS 2D ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคตและเชิงนโยบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

7.1 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

7.1.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ดินในงานวิจัยนี้อ้างอิงจากข้อมูล SPT ซึ่งแสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความลึก แต่ในการจำลองได้กำหนดค่าเป็นค่าคงที่ในแต่ละชั้นดิน จึงอาจไม่สอดคล้องกับสภาพจริง ในการศึกษาครั้งต่อไปควรกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้แปรผันตามความลึกเพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องมากขึ้น

7.1.2 ควรดำเนินการเก็บข้อมูลจากการทดสอบภาคสนาม (Field Test) และการติดตามพฤติกรรมคันทางจริง (Monitoring) ภายหลังการก่อสร้าง เช่น การวัดการทรุดตัว และการตรวจสอบค่าปัจจัยความปลอดภัยจากการทดสอบภาคสนาม เพื่อนำมาปรับปรุงความแม่นยำของแบบจำลอง

7.1.3 ควรขยายขอบเขตการศึกษาครอบคลุมปัจจัยแวดล้อมอื่น เช่น การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดิน ผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนของการจราจร การกัดเซาะจากน้ำฝน และภาวะจากน้ำท่วม ซึ่งอาจมีผลต่อเสถียรภาพคันทางในระยะยาว

7.1.4 ควรทำการวิเคราะห์อายุการใช้งาน (Service Life) ของมาตรการเสริมกำลัง เพื่อกำหนดแนวทางบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่เหมาะสม

7.1.5 ควรพิจารณาการใช้วิธีเสริมกำลังแบบผสมผสาน (Hybrid Reinforcement) ร่วมกับวัสดุหรือเทคโนโลยีใหม่ เช่น Geogrid หรือ Prefabricated Vertical Drain (PVD) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายน้ำและลดระยะเวลาการทรุดตัว

7.1.6 ในการวิเคราะห์ผลการทรุดตัวและการกระจายหน่วยแรง ควรมีการอธิบายพฤติกรรมของดินในเชิงกลศาสตร์ดินให้ชัดเจนมากขึ้น เช่น ผลของการใช้ Berm ที่ช่วยเพิ่มแรงต้านด้านข้าง (Passive resistance) และลดการเคลื่อนตัวของดินอ่อน รวมถึงผลของการใช้วัสดุเสริมแรงชนิดแผ่น เช่น Geotextile หรือ Geogrid ซึ่งช่วยกระจายหน่วยแรงให้กว้างขึ้น ส่งผลให้ค่าการทรุดตัวลดลง การอธิบายในเชิงกลศาสตร์จะช่วยให้ผลการวิเคราะห์มีความสมเหตุสมผลมากยิ่งขึ้น

7.1.7 การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองสองมิติ (2D Analysis) ซึ่งเหมาะสมกับโครงสร้างคันทางที่มีหน้าตัดคงที่ อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งต่อไปอาจพิจารณาการวิเคราะห์แบบสามมิติ (3D Analysis) ในกรณีที่มีสภาพพื้นที่ที่มีความไม่ต่อเนื่อง หรือมีโครงสร้างประกอบอื่น เพื่อให้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับสภาพจริงมากยิ่งขึ้น

7.1.8 ในการศึกษาครั้งต่อไปควรมีการอ้างอิงข้อมูลจากกรณีศึกษาจากงานก่อสร้างในพื้นที่ดินอ่อน เช่น พื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งมีการใช้ Berm เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของคันทาง ทั้งนี้ ในกรณีที่มีการใช้เสาเข็มร่วมกับคันทางบนดินอ่อน ควรมีการติดตั้งเครื่องมือวัด (Instrumentation) เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวและการทรุดตัวของโครงสร้างจริง เนื่องจากเสาเข็มอาจเกิดการเคลื่อนตัวไปพร้อมกับดินอ่อนได้ หากไม่มีแรงต้านด้านข้างเพียงพอ ข้อมูลจากการตรวจวัดภาคสนามสามารถนำมาใช้สนับสนุนการเลือกใช้วิธีปรับปรุงดินที่เหมาะสมต่อไป

7.2 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

7.2.1 ควรกำหนดมาตรฐานการออกแบบและก่อสร้างคันทางบนชั้นดินเหนียวอ่อน โดยเฉพาะในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคใต้ ให้มีข้อกำหนดชัดเจนเกี่ยวกับวิธีการเสริมกำลังที่เหมาะสมกับสภาพดินและความสูงของคันทาง

7.2.2 ควรส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีการจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) ในกระบวนการออกแบบงานดินและฐานราก เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างถนน และลดความเสี่ยงจากการพังทลายของคันทาง

7.2.3 ควรกำหนดข้อกำหนดด้านการตรวจสอบและบำรุงรักษาโครงสร้างคันทางอย่างต่อเนื่อง พร้อมจัดทำคู่มือปฏิบัติ (Guideline) สำหรับวิศวกรผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงาน เพื่อให้การก่อสร้างและการบำรุงรักษามีมาตรฐานเดียวกัน

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณอาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับคำแนะนำและข้อเสนอแนะทางวิชาการอันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Terzaghi, K., Peck, R. B. and Mesri, G. 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3rd ed. New York, USA: John Wiley & Sons.
- [2] Bjerrum, L. 1973. "Problems of soil mechanics and construction on soft clays," In *Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, 3: pp. 111-159.
- [3] Mesri, G. and Olson, R. E. 1971. "Mechanisms controlling the undrained shear strength of clays," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(4): pp. 515-528.
- [4] Duncan, J. M. and Wright, S. G. 2005. *Soil Strength and Slope Stability*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- [5] Leroueil, S. and Hight, D. W. 2003. "Behaviour and properties of natural soils and soft rocks," In *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, 1: pp. 29-254.
- [6] Indraratna, B., Rujikiatkarnjorn, C. and Balasubramaniam, A. S. 2012. *Soft Ground Improvement*. Oxford, UK: Elsevier.

- [7] Phanwitsawakan, P. 2018. "Time-dependent undrained shear behavior of marine soft clay under thermal load: A case study of Pak Phanang clay," Master's thesis, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand. (in Thai)
- [8] Phromphutthangkun, P. and et al. 1999. "Slope stability analysis using stress state from finite element analysis," Research report. Songkhla, Thailand: Rajamangala University of Technology Srivijaya. (in Thai)
- [9] Ruenkraierk, T. and et al. 1999. "Increasing embankment stability by using reinforcement pile row," Research report. Bangkok, Thailand: Department of Highways. (in Thai)
- [10] Jantaroj, N. and et al. 2025. "Stability analysis of embankment on soft clay reinforced with soil-cement piles using finite element model: A case study of drainage canal construction project, Phra Nakhon Si Ayutthaya Province," In *Proceedings of the 30th National Convention on Civil Engineering*, 30: p. GTE-14. (in Thai)
- [11] Pinphet, A. 2013. "A study on the effect of embankment reinforcement with geotextile: A case study of rural road maintenance, line SH.4003," Master's thesis, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. (in Thai)
- [12] Rojanamekha, S. 1998. "The use of geotextile to reinforce bearing capacity in road construction on soft clay, Suphan Buri Province," Master's thesis, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand. (in Thai) [13] Bunyanun, Y. 2013. "Application of geosynthetics to increase road embankment stability in Phra Nakhon Si Ayutthaya Province," Master's thesis, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. (in Thai)
- [14] Sae-jew, A. 2009. "Geotechnical engineering characteristics of soft clay in Pak Phanang river basin area," Master's thesis, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand. (in Thai)
- [15] Chuthatsiriwong, A. 2003. *Coastal Geology of Southern Thailand*. Songkhla, Thailand: Prince of Songkla University. (in Thai)
- [16] Department of Highways. 2018. *Guidelines for Construction on Soft Clay Areas*. Bangkok, Thailand: Department of Highways.
- [17] Rowe, R. K. and Soderman, K. L. 1987. "Stabilization of very soft soils using geosynthetics," *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(5): pp. 497-513. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1987\)113:5\(497](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1987)113:5(497)
- [18] Broms, B. B. 1987. "Stabilization of soft clay with piles," In *Proceedings of the 10th Southeast Asian Geotechnical Conference*, Taipei, 1: pp. 73-85.
- [19] Indraratna, B. and Chu, J. 2005. "Ground improvement techniques for embankments on soft clay," *Ground Improvement*, 9(2): pp. 61-77. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1680/grim.2005.9.2.61>
- [20] Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S. and Swolfs, W. 2019. *PLAXIS 2D Reference Manual*. Delft, Netherlands: Bentley Systems.

- [21] Potts, D. M. and Zdravković, L. 1999. *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering*. London, UK: Thomas Telford.
- [22] Griffiths, D. V. and Lane, P. A. 1999. "Slope stability analysis by finite elements," *Géotechnique*, 49(3): pp. 387-403. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.3.387>
- [23] Nakhon Si Thammarat Provincial Office of Public Works and Town & Country Planning. 2026. "Soil Boring Test Report," Project report. Nakhon Si Thammarat, Thailand. (in Thai)