

## การใช้วัสดุ Expanded Polystyrene Geofom (EPS) เพื่อลดการทรุดตัวของคันทางและคอสะพานในประเทศไทย

### Expanded Polystyrene Geofom (EPS) Application for Settlement Reduction of Embankment and Bridge Approach Structure in Thailand

กฤษณะ เพ็ญสมบูรณ์<sup>1</sup> พลเทพ เลิศรวนนิช<sup>1</sup> สุกนตรี พูลชัย<sup>1</sup> และหฤทส์ถ์ พ้อบาล<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง

\*Corresponding author; E-mail address: harutus.doh@gmail.com

#### บทคัดย่อ

ทางหลวงที่สร้างในบริเวณดินอ่อนกรุงเทพฯ (Bangkok clay) พบว่า มีการยุบอัดตัวสูงเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุก ในงานก่อสร้างทางหลวงมีสิ่งก่อสร้าง 2 ชนิดประกอบด้วย โครงสร้างชั้นทาง และโครงสร้างสะพาน ซึ่งส่วนมาก จะพบปัญหาการทรุดตัวที่แตกต่างกัน (Differential Settlement) ทำให้ ความสะดวกสบายในการขับขี่ของผู้ใช้ทางลดลง การใช้โครงสร้างเสาเข็ม ผ่อนความยาว (Bearing Unit) เป็นหนึ่งในวิธีปรับลดการทรุดตัวที่แตกต่างกัน ระหว่างโครงสร้างทั้งสองชนิดนี้ แต่ก็ไม่สามารถแก้ปัญหาได้อย่างถาวร เนื่องจากปัญหาคันทางที่ก่อสร้างบริเวณดินเหนียวอ่อนจะมีการทรุดตัวอย่าง ต่อเนื่อง และมักถูกเสริมผิวด้วยการใช้ Asphalt Overlay อย่างต่อเนื่อง แต่ก็เป็น การเพิ่มน้ำหนักให้กับโครงสร้างทำให้อัตราการทรุดตัวยิ่งมากขึ้น ทำให้ต้องสูญเสียงบประมาณในการซ่อมบำรุงแต่ละปีเป็นจำนวนมาก การใช้วัสดุ Expanded Polystyrene Geofom (EPS) เป็นทางเลือกหนึ่งในการลดการทรุดตัวบริเวณคอสะพาน บทความนี้ได้นำเสนอกรณีศึกษาในการ ใช้วัสดุ EPS ในการลดอัตราการทรุดตัวบริเวณคอสะพานได้อย่างมี นัยสำคัญ การวิเคราะห์ความเชื่อมั่น (Reliability) ของการใช้วัสดุ EPS ใน สถานการณ์ต่างๆ การวิเคราะห์มีความคุ้มค่าในการลงทุน การลดมลพิษ จากการเผาผลาญพลังงานจากการขนส่งและการใช้เครื่องจักรงานทางใน การบดอัดวัสดุคันทางเปรียบเทียบกับวัสดุ EPS รวมถึงการลดโอกาสในการ เกิดความเสียหายต่อทางหลวงที่ต้องขนวัสดุงานทางผ่านและการลด ระยะเวลาในการก่อสร้างได้อีกด้วย

คำสำคัญ: วัสดุมวลเบา, การทรุดตัวที่แตกต่างกัน, เสาเข็มผ่อนความยาว, Bearing Unit, Expanded Polystyrene Geofom (EPS)

#### Abstract

Highways constructed on the Bangkok clay area are subjected to excessive settlement due to loads. There are two types of structures generally used in highway construction including pavement and bridge structures. Differential settlement often occurs between these two types of structures resulting in reduction of driving comfort. Highway agencies

usually use so called bearing unit to adjust this differential settlement. However, it cannot cope with this problem as embankment construction on soft clay will continuously settlement. Asphalt levelling at the approach structure is usually the solution to keep smoothness to the pavement surface but it is adding weight to the structure therefore increasing the rate of differential settlement. Highway agencies need more budget on maintenance for driving quality. This paper presents a case study on the use of Expanded Polystyrene Geofom (EPS) as an alternative solution to reduce differential settlement at bridge approach. The analysis includes reliability study of using EPS in various situations. The analysis shows that the use of EPS is worth the investment as well as reduction of energy consumption and pollution generated from transportation and road machinery in the compaction of traditional embankment material compared to EPS. The use of EPS promotes reduction in the damage to highways that need to transport embankment materials through highway networks as well as shorten of construction period.

Keywords: Light weight material, Bearing Unit, Expanded Polystyrene Geofom (EPS), Embankment, Bridge Approach Structure

#### 1. คำนำ

ในงานก่อสร้างทางหลวงมักใช้สิ่งก่อสร้างหลักๆ 2 ชนิด คือ โครงสร้าง ชั้นทางและโครงสร้างสะพาน ซึ่งมักเกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกัน (Differential Settlement) ระหว่างโครงสร้างทั้ง 2 ชนิดนี้ โดยเฉพาะการก่อสร้างทาง หลวงบริเวณที่พบชั้นดินเหนียวอ่อนจะมีการทรุดตัวของโครงสร้างชั้นทาง มากเพราะไม่มีระบบโครงสร้างของเสาเข็มรองรับ เปรียบเทียบกับสะพานที่ โครงสร้างฐานรากวางบนเสาเข็มที่มีการทรุดตัวน้อยมาก กรมทางหลวงนิยม ใช้โครงสร้างเสาเข็มผ่อนความยาว (Bearing Unit) เพื่อปรับการทรุดตัวที่

แตกต่างระหว่างโครงสร้างทั้งสองชนิดนี้ เพื่อให้เกิดความราบเรียบเรียบ ในขณะที่การขับซึ่งแต่ก็ไม่สามารถแก้ปัญหาได้อย่างเด็ดขาด เนื่องจากปัญหาคันทางที่ก่อสร้างบริเวณดินเหนียวอ่อนมีการทรุดตัวอย่างต่อเนื่องซึ่งส่งผลให้เกิดความแตกต่างของระดับผิวทางของโครงสร้างทั้งสองชนิดนี้ ทำให้ความเสถียรของผิวในการขับที่ลดลงและอาจสูญเสียการทรงตัวในขณะที่ขับด้วยความเร็วสูง การซ่อมแซมปรับปรุงการทรุดตัวของผิวคอสสะพานเพื่อลดความแตกต่างของผิวทางสามารถทำได้โดยการใช้วัสดุแอสฟัลท์เพื่อให้เกิดความราบเรียบแต่อย่างไรก็ตามการปรับระดับด้วยวัสดุแอสฟัลท์เป็นการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุ คือ เป็นเพียงการรักษาให้ผิวทางมีความเรียบให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้แต่ก็เป็นการเพิ่มน้ำหนักผิวทางบริเวณคอสสะพานให้มากขึ้น ทำให้อัตรการทรุดตัวของผิวคอสสะพานเพิ่มมากยิ่งขึ้นและเมื่ออัตรการทรุดตัวมากขึ้นยิ่งจำเป็นต้องดำเนินการปรับระดับบ่อยครั้งขึ้น ทำให้หน่วยงานบำรุงรักษาทางหลวงต้องสูญเสียงบประมาณในการซ่อมบำรุงแต่ละปีเป็นจำนวนมาก

กรมทางหลวงได้เริ่มใช้ วัสดุ Expanded Polystyrene Geofom (EPS) ในการซ่อมคอสสะพานบนทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 ตั้งแต่ปี 2557 และได้นำข้อมูลการทรุดตัวในสนามมาเปรียบเทียบกับ การใช้ Asphalt Overlay บริเวณคอสสะพาน ผลการทดสอบพบว่า การใช้ วัสดุ EPS สามารถลดอัตรการทรุดตัวของคอสสะพานได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับวิธีการซ่อมคอสสะพานแบบปกติ เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์แล้วพบว่า การปรับปรุงเพื่อลดการทรุดตัวที่คอสสะพานโดยใช้วัสดุ EPS จะมีความคุ้มค่าเมื่อเทียบกับกับวิธีการซ่อมคอสสะพานแบบปกติ

## 2. การแก้ปัญหาการทรุดตัวของคันทางและคอสสะพาน

### 2.1 ปัญหาการทรุดตัวของคันทาง

บริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่าง มีลักษณะเป็นดินตะกอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำ ได้รับอิทธิพลมาจากแม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำท่าจีน และแม่น้ำบางปะกง ชั้นดินเหนียวอ่อนมีลักษณะเป็นดินตะกอนที่มีบริเวณกว้างและลึกมาก จะพบว่าชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Marine Clay) อยู่ใต้ระดับน้ำทะเลลงมาถึงระดับความลึกประมาณ 10.00 - 20.00 เมตร พฤติกรรมของชั้นดินเหนียวอ่อนโดยทั่วไปมีคุณสมบัติต่างๆ คือ (1) ค่า Undrained Shear Strength ต่ำ (2) มีคุณสมบัติการยุบตัวสูงเนื่องจากมีปริมาณน้ำหรือชื้นในมวลดินเหนียวที่ค่อนข้างสูงและ (3) มีสัมประสิทธิ์ความชื้นได้ของน้ำต่ำ [1-2]

การก่อสร้างทางในบริเวณดินเหนียวอ่อนมักประสบปัญหาในการก่อสร้างเป็นอย่างมากเนื่องจากคุณสมบัติของดินเหนียวอ่อนที่เป็นดินชั้นฐานรากมีกำลังรับแรงเฉือนต่ำและมีการบีบอัดตัวคายน้ำสูง เมื่อมีแรงมากระทำการยุบตัวของชั้นดินจะไม่เกิดในทันทีแต่จะใช้ระยะเวลาในการยุบตัวที่ค่อนข้างยาวนาน ประกอบกับพื้นที่ภาคกลางเป็นที่ราบและน้ำท่วมถึงการออกแบบและก่อสร้างทางหลวงจำเป็นต้องยกระดับคันทางให้สูงพ้นระดับน้ำท่วม ทำให้ระดับของผิวทางจะสูงเกินกว่าระดับความสูงวิกฤต (Critical Height) ที่ดินฐานรากจะสามารถรองรับน้ำหนักของคันทางได้ หากก่อสร้างสูงกว่าระดับดังกล่าวก็จะทำให้คันทางต้องประสบปัญหาด้าน

เสถียรภาพ ทำให้การออกแบบและก่อสร้างไม่สามารถยกระดับของผิวทางได้ไม่สูงเท่าที่ควร ต้องประสบปัญหาการทรุดตัวและมีอายุการใช้งานที่สั้นส่งผลให้หน่วยงานของรัฐต้องสูญเสียงบประมาณในการก่อสร้างและบูรณะเป็นจำนวนมาก

### 2.2 เทคนิคการเสริมเสถียรภาพและการทรุดตัวของคันทาง

การก่อสร้างคันทางบนพื้นที่ดินเหนียวอ่อนมักประสบปัญหา 2 ประการ คือ 1) ปัญหาด้านเสถียรภาพ และ 2) ปัญหาด้านการทรุดตัว ในปัญหาด้านเสถียรภาพคันทาง คันดินถ่วงน้ำหนัก (Counterweight Berm) อาจเป็นทางเลือกที่ดีทางเลือกหนึ่งโดยการเพิ่มน้ำหนักที่ปลายสุดของคันทางของเชิงลาดคันทางเพื่อเพิ่มกำลังต้านแรงเฉือนที่ปลายของเชิงลาด พื้นที่บริเวณปลายเชิงลาดอาจเคลื่อนที่ขึ้นหรือบวมขึ้นเนื่องจากน้ำหนักของคันทาง การวางคันดินถ่วงน้ำหนักในตำแหน่งที่คาดว่าจะมีการบวมตัวของพื้นดินสามารถต้านการเคลื่อนตัวของแนววิบัติได้ การก่อสร้างสามารถทำได้ง่ายโดยสามารถใช้วัสดุชนิดเดียวกับคันทางนั้น อย่างไรก็ตามการใช้คันดินถ่วงน้ำหนักก็มีข้อจำกัดบางประการที่ในการก่อสร้างต้องใช้เขตทางค่อนข้างกว้างแต่ไม่สามารถแก้ปัญหาเรื่องการทรุดตัวของคันทางได้ เนื่องจากเป็นการเพิ่มน้ำหนักให้กับดินชั้นฐานรากที่ต่ำลงไป [2]

ปัญหาด้านการทรุดตัวของคันทางสามารถแก้ไขด้วยการลดน้ำหนักของวัสดุถมที่กดทับบริเวณดินใต้ฐานรากดังนั้นจึงเป็นการลดการทรุดตัวของโครงสร้างรวมถึงการลดแรงดันด้านข้างโครงสร้างซึ่งจะทำให้ขนาดของฐานรากและกำแพงกันดินมีขนาดเล็กลง ที่ผ่านกรมทางหลวงได้ใช้วัสดุ Low Density Cellular Concrete (LDCC) ใช้สำหรับก่อสร้างคันทางบนดินเหนียวอ่อนมีการก่อสร้างที่แปลงทดสอบบริเวณทางหลวง 417 - บรรจบทางหลวง 401 จังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยใช้แอริโฟม ผสมมอร์ต้า ให้เป็นวัสดุมวลเบาที่มีความหนาแน่น 800 -1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่กำลังรับแรงอัด 28 วัน ตั้งแต่ 13.3 ksc และ 45.6 ksc จากการติดตามพฤติกรรมทรุดตัวของคันทางดินมวลเบา พบว่า มีการทรุดตัวน้อยกว่าคันทางดินซีเมนต์และคันทางดินถมตามลำดับอย่างมีนัยสำคัญ [2]

นอกเหนือจากการใช้ LDCC สำหรับการก่อสร้างคันทางแล้ว LDCC ยังเหมาะในงานซ่อมอุดโพรงคอสสะพานที่ชำรุด เป็นวัสดุมวลเบาที่มีความสามารถไหลและเข้าไปสู่โพรงช่องว่างในโครงสร้างได้ดี ซึ่งมีการจัดเรียงตัว (Self-Leveling) และมีความสามารถในการไหล (Workability) ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการอุดโพรงช่องว่างที่อยู่ใน Approach Structure ที่การทำงานแบบปกติไม่สามารถทำได้หรือทำได้ยาก

กรมทางหลวงยังได้ทดลองใช้ดินเหนียวผสมซีเมนต์มวลเบา (Air Foamed Mixed Stabilized Soil) สำหรับงานก่อสร้างคันทาง โดยได้ดำเนินการบนทางหลวงหมายเลข 35 บริเวณกิโลเมตรที่ 72 โดยใช้ แอริโฟม ผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และดินเหนียวในที่แทนที่วัสดุทรายถม โดยได้ดำเนินการก่อสร้างคันทางดินเหนียวมวลเบาเป็น 3 ชั้น ชั้นละ 0.50 เมตร รวมความหนาเป็น 1.50 เมตร โดยมีการกำหนดคุณสมบัติของดินเหนียวมวลเบา ดังนี้ ความหนาแน่นประมาณ 1 ตัน/ลูกบาศก์เมตร มีค่า Unconfined Compressive Strength (UCS.) ไม่น้อยกว่า 4 ksc ที่อายุบ่ม 28 วันซึ่งเทียบที่ CBR ที่ 10 % และกำหนดให้ความสามารถในการไหล 180

มิลลิเมตร ผลการทดสอบได้เปรียบเทียบกับทรุดของคันทางที่สร้างด้วยการก่อสร้างวิธีปกติพบว่ามีทรุดตัวที่ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ [2]

วัสดุชนิดต่าง ๆ ที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุถมงานทางเพื่อใช้ในการลดทรุดตัวที่แตกต่าง (Differential Settlement) ระหว่างคันทางและโครงสร้างสะพานสามารถแบ่งออกได้หลายประเภทตามตารางที่ 1

### 2.3 การใช้วัสดุ Expanded Polystyrene Geofoam (EPS) ในงานทาง

Expanded Polystyrene Geofoam (EPS) คือ พลาสติกประเภท Thermal Plastic ชนิดหนึ่งซึ่งสามารถหลอมละลายเป็นของเหลวเมื่อถูกความร้อน ผลิตโดยการผสม Polystyrene (PS) ร้อยละ 90 ถึง 95 กับสารที่ทำให้ขยายตัว ได้แก่ ก๊าซ Pentane (C.H.) ซึ่งเป็นตระกูลเดียวกับก๊าซหุงต้ม หรือ Butane (C.H.) จะทำปฏิกิริยากักเก็บก๊าซ Pentane เอาไว้ภายใน เมื่อวัสดุได้รับความร้อนจากไอน้ำ Polystyrene (PS) จะกลายเป็นเม็ดโฟม จากนั้น จึงนำไปขึ้นรูปได้ตามต้องการ วัสดุ EPS มีคุณสมบัติเฉพาะที่ทำให้เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับงานก่อสร้างคันทางซึ่งน้ำหนักเบามาก เมื่อเทียบกับดินจะมีน้ำหนักเพียง 1-2 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดิน ทำให้ลดแรงกระทำที่มีต่อคานฐานรากในแนวตั้งเกิดแรงกระทำด้านข้างน้อยมากจึงสามารถลดระบบค้ำยันด้านข้างก่อสร้างได้รวดเร็วเมื่อเทียบกับงานก่อสร้างคันทางแบบเดิมที่ต้องบดอัดดินเป็นชั้น ๆ วัสดุ EPS จึงถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาคันทางทรุดตัวมากเกินไป การทรุดตัวที่แตกต่างบริเวณคอสะพาน และการทดแทนวัสดุดินถมหลังกำแพงกันดินซึ่งง่ายต่อการเคลื่อนย้าย ทำการติดตั้งได้ง่าย และลดระยะเวลาในการก่อสร้างทำให้ช่วยลดต้นทุนแรงงานและทรัพยากรได้ EPS สามารถควบคุมการผลิตให้มีความหนาแน่น และกำลังรับแรงอัดตามความต้องการในการใช้งานได้ทำให้มีเสถียรภาพสูงในการใช้งาน และยังมีอัตราการดูดซึมน้ำต่ำทำให้มีความสามารถในการต้านทานความชื้นและการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้เป็นอย่างดีทำให้เหมาะกับโครงการก่อสร้างและซ่อมบำรุงสายทางที่มีปริมาณการจราจรสูง และมีระยะเวลาในการดำเนินการที่ค่อนข้างจำกัด [1]

ปัจจุบัน EPS ได้ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างทางด้านวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะงานด้านวิศวกรรมปฐพี (หรือเรียกว่า EPS Geofoam) เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่น คือ น้ำหนักเบา ทนทาน และรับแรงได้ดี ประเทศที่ได้นำ EPS Geofoam ไปใช้อย่างแพร่หลาย ได้แก่ นอร์เวย์ เนเธอร์แลนด์ สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และ เยอรมันนี่ เป็นต้น ประเทศนอร์เวย์ และเนเธอร์แลนด์ได้นำ EPS Geofoam มาใช้ครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1965 และ ค.ศ. 1970 ตามลำดับ โดยใช้เป็นวัสดุถมบริเวณเชิงลาดสะพานเพื่อแก้ปัญหาการทรุดตัวที่แตกต่างระหว่างสะพานและถนน ในประเทศเยอรมันนี่ EPS Geofoam ถูกใช้เป็นครั้งแรกเมื่อประมาณทศวรรษ 1960 เพื่อเป็นฉนวนป้องกันการแข็งตัวของวัสดุโครงสร้างทาง (Frost Protection) ในระหว่างปี ค.ศ. 1985 ถึง 1987 ประเทศญี่ปุ่นได้มีการประยุกต์ใช้ EPS Geofoam มากถึง 1.3 ล้านลูกบาศก์เมตร ในโครงการก่อสร้างมากถึงประมาณ 2,000 โครงการ สำหรับประเทศสหรัฐอเมริกาได้เริ่มนำ EPS Geofoam มาใช้ในการก่อสร้างทาง เมื่อ ปี ค.ศ. 1989 สำหรับโครงการก่อสร้างถนนในมลรัฐโคโรลาโด ระหว่างปี ค.ศ. 1997 ถึง 2001 EPS Geofoam ได้นำมาใช้ในโครงการก่อสร้าง Interstate I-15 ในเมือง Salt Lake City ซึ่งเป็นโครงการที่ใช้ EPS Geofoam สูงถึง

100,000 ลบ.ม เพื่อก่อสร้างทางให้เสร็จทัน Winter Olympic Game ในปี 2002 และโครงการก่อสร้างนี้ได้รับยกย่องเป็น Outstanding Civil Engineering Achievement (OCEA) จากสถาบัน The American Society of Civil Engineering (ASCE) [3]

ตารางที่ 1 วัสดุถมเบาประเภทต่างๆ [4]

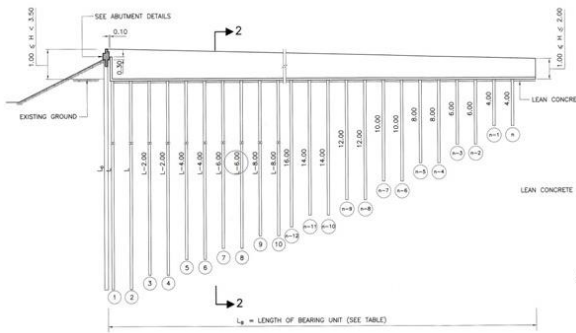
ชนิดของวัสดุถมเบา	ความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม)	หมายเหตุ
EPS BLOCK	0.01-0.03	มีน้ำหนักที่เบามาก เป็นวัสดุที่ทำมาจากเรซินสังเคราะห์
Expanded-Beads ผสมกับดิน	≥ 0.7	น้ำหนักจะแปรผันตามอัตราส่วนผสม การมากกว่าบดอัด มีคุณลักษณะของบดอัดและการเสีรูปร่างเหมือนดิน
Air Foamed Mortar and Air Foamed Lightweight Stabilized Soil	≥ 0.5	ความหนาแน่นสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสม สามารถแข็งตัวได้เองสามารถใช้ดินที่เหลือจากการก่อสร้างเป็นส่วนผสม
Foaming Urethane	0.03 -0.04	มีน้ำหนักเบาสามารถหล่อในที่ได้โดยจะแข็งตัวได้เอง
Cal ASH, Granulated Slag, etc.	1.0-1.5	เป็นวัสดุถมเม็ดแข็งตัวได้เอง
Volcanic Ash Soil	1.2-1.5	วัสดุธรรมชาติ
Hollow Structures	1.0	เป็นการใช้ท่อเป็นรูปทรงกระบอกหรือสี่เหลี่ยม
เศษไม้(Wood chips)	0.7-1.0	ส่วนมากจะใช้ในกรณีอยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดินเพื่อป้องกันการผุกร่อน
หินดินดาน (Shales)	1.1	ขนาดประมาณ 12 ถึง 76 มม.
Tire Chips	0.7-0.9	ส่วนมากใช้เพื่อระดับน้ำใต้ดินโดยจะต้องมีดินปิดที่อย่างน้อย 0.9 เมตร

ในประเทศไทยได้นำ วัสดุ EPS มาทดลองใช้แทนวัสดุคันทางมากกว่า 20 ปี แล้ว ได้แก่ กรมทางหลวง กรมโยธาธิการ และกรมทางหลวงชนบทแต่อาจยังไม่นำมาใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากการศึกษาวิจัยถึงผลกระทบในระยะยาวว่าเป็นอย่างไร ประกอบกับในอดีต EPS ราคาที่ค่อนข้างสูงทำให้ไม่เป็นที่แพร่หลาย โครงการที่ได้ดำเนินการทดลองใช้แล้วเสร็จ ได้แก่ งานก่อสร้างคอสะพานบริเวณตำบลสองคลอง จังหวัดฉะเชิงเทรา (กรมโยธาธิการ), ทางสายลาดห้วย - บางพลี (กรมโยธาธิการ), ถนนศรีนครินทร์ กิโลเมตรที่ 16.500 (กรมทางหลวง) และโครงการก่อสร้างสะพานตามแนวถนนราชพฤกษ์ (กรมทางหลวงชนบท) และล่าสุด กรมทางหลวง โดยกองทางหลวงพิเศษระหว่าง ได้ดำเนินการทดลองการใช้วัสดุ EPS บริเวณแปลงทดสอบบริเวณคอสะพาน ที่ กิโลเมตรที่ 1+500 บนทางหลวงพิเศษ หมายเลข 7 บริเวณถนน Spur road เชื่อมทางหลวงหมายเลข 34 [3]

### 2.4 โครงสร้างคอสะพาน (Transition Structure) ของกรมทางหลวง

แบบก่อสร้างช่วงคอสะพาน (Transition Structure) ตามแบบมาตรฐานของกรมทางหลวง [5] จะใช้โครงสร้าง Bearing Unit เพื่อปรับการทรุดตัวของโครงสร้างสะพานและคันทางบนพื้นที่ดินอ่อนตามรูปที่ 1 กำหนดให้มีการตอกเสาเข็มไล่ระดับความยาวเสาเข็มเริ่มจากเสาเข็มต้นริม

สุดของสะพานหรือเสาเข็มของ Abutment โดยกำหนดให้ความยาวของเสาเข็มต้นแรกของ Bearing Unit มีความยาวเท่ากับเสาเข็มของ Abutment สะพาน และความยาวของเสาเข็มจะลดลงทีละ 2 เมตร ทุก 2 ดับ จนเหลือความยาวเสาเข็มช่วงสุดท้ายที่ความยาว 4 เมตร ความยาวของ Bearing Unit นั้นจะแปรผันตามความของเข็มต้นแรกสุด เมื่อโครงสร้างทางหลวงผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลาหนึ่ง คันทางส่วนที่ตั้งอยู่บนดินฐานรากที่เป็นดินเหนียวอ่อนจะมีการทรุดตัวอย่างต่อเนื่องตามธรรมชาติ การทรุดตัวของคันทางทำให้เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างของบริเวณคอสสะพานทำให้ต้องปรับระดับเสริมผิวทางด้วยแอสฟัลท์อย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อดินชั้นฐานราก ยิ่งเป็นการเพิ่มอัตราการทรุดตัวให้มากยิ่งขึ้น ผลของการทรุดตัวและการเพิ่มน้ำหนักของผิวทางมากยิ่งขึ้นโดยการเสริมผิวจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัดที่บริเวณพื้นของ Bearing Slab เนื่องจากเสาเข็ม Bearing Unit มีการไถระดับความยาวส่งผลให้เกิดการแตกร้าวชำรุดเสียหายบริเวณแผ่นพื้น Bearing Slab



รูปที่ 1 ลักษณะของ Bearing Unit บริเวณคอสสะพานบนพื้นที่ดินอ่อน [4]

### 3. การแก้ปัญหาการทรุดตัวของคอสสะพานบนทางหลวงพิเศษ

#### 3.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้มวลเบาบริเวณคอสสะพาน

สาเหตุของการทรุดตัวของคอสสะพาน มักเกิดจากสาเหตุดังต่อไปนี้ คือ 1) การทรุดตัวของดินเดิมเนื่องมาจากน้ำหนักกระทำภายนอก 2) การทรุดตัวของดินถมคอสสะพาน 3) การทรุดตัวเนื่องจากการบดอัดดินไม่ได้ตามข้อกำหนดซึ่งอาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากการเข้าไปดำเนินการบดอัดได้ยากเนื่องจากข้อจำกัดด้านพื้นที่ไม่สามารถนำเครื่องจักรบดอัดที่เหมาะสมเข้าดำเนินการได้ และ 4) การใช้วัสดุถมที่ไม่ได้มาตรฐานในการก่อสร้างเช่นคุณสมบัติการระบายน้ำที่ไม่เหมาะสม หรือการใช้วัสดุที่มีค่า PI มากเกินไป [6] การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์สามารถแก้ปัญหาการทรุดตัวของบริเวณคอสสะพานได้ [7] โดยการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ในความลึกไถระดับตามความเหมาะสม Hoppe [8] เสนอให้เพิ่มความยาวของ Approach Slab ในระดับที่ต่ำกว่าผิวทางช่วงต่อเนื่องกับคอสสะพานและใช้วัสดุพื้นทาง (Base) และผิวทางปรับระดับให้สูงกว่าระดับพื้นสะพานเล็กน้อย (Pre-Camber) เพื่อให้ว่าในกรณีที่คอสสะพานเกิดทรุดจะไม่เกิดการการกระโดดในขณะที่มียานพาหนะแล่นผ่าน [9] เสนอให้ใช้แผ่นพื้น Approach slab ที่มีส่วนประกอบของคาน (Ribbed Slab) เพื่อให้โครงสร้างสามารถรับแรงดัดได้มากขึ้นเมื่อเกิดการทรุดตัวของบริเวณคอสสะพาน อีกทั้งสามารถลดความหนาของพื้นได้

ในปี 2557 กรมทางหลวง ได้ศึกษาแนวทางการแก้ปัญหาการทรุดตัวของคอสสะพานอย่างยั่งยืน โดยพื้นที่ศึกษาอยู่ที่บริเวณทางเชื่อม (Spur road) ระหว่างทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 และถนนบางนา-ตราด (ทล.34) บริเวณกิโลเมตรที่ 1+500 การศึกษาได้เปรียบเทียบวิธีการแก้ปัญหาการทรุดตัวของคอสสะพานโดยวิธีการใช้วัสดุมวลเบา 2 ชนิด คือ Expanded Polystyrene Foam (EPS) และ Low Density Cellular Concrete (LDCC) นำมาแทนที่วัสดุถมภายในโครงสร้างคอสสะพาน และนำค่าการทรุดตัวมาเปรียบเทียบกับทรุดตัวของการเสริมผิวแอสฟัลท์ที่คอสสะพานแบบปกติ (Asphalt Overlay) การใช้มวลเบาในการจัดการกับปัญหาการทรุดตัวของคอสสะพานเป็นวิธีที่ให้ผลดีที่สุดในแง่ของทางกลศาสตร์ การแทนที่ของทรายถมบริเวณคอสสะพานด้วยวัสดุมวลเบาเป็นการลดน้ำหนักกระทำกับฐานรากเสาเข็ม Bearing Unit ทำให้ดินชั้นฐานรากเกิดการบวมตัว (Heaving) ขึ้นเล็กน้อย แสดงว่าดินชั้นฐานรากกลับเข้าสู่สภาวะอีลาสติก และจะทำให้การทรุดตัวที่จะเกิดขึ้นในอนาคตหลังจากที่บูรณะคอสสะพานโดยการใช้มวลเบาเปิดใช้จะมีอัตราการลดลงอย่างมาก ความหนาของวัสดุมวลเบาจะหนาที่สุดในช่วงที่ติดกับ Abutment ของสะพาน และจะค่อยๆบางลงเรื่อย ๆ เพื่อปรับการทรุดตัวให้เท่ากับคันทาง [3]

การแก้ปัญหาการทรุดตัวของคอสสะพานด้วยการใช้การเสริมผิวด้วยแอสฟัลท์เป็นวิธีที่ใช้กันอยู่ทั่วไปไปปัจจุบัน ข้อดีของวิธีนี้คือการบำรุงรักษาสามารถทำได้ง่าย สะดวก ใช้เวลาในการดำเนินการน้อย และงบประมาณที่ใช้ในการดำเนินการต่อครั้งค่อนข้างต่ำ แต่หากดำเนินการเสริมผิวบ่อยครั้งจะมีความหนาแน่นน้ำหนักกระทำเหนือ Bearing Slab เกินกำลังรับแรงเฉือนที่รับได้จะทำให้เกิดการวิบัติของแผ่นพื้นรองรับคันทาง Bearing Slab เนื่องจากคอสสะพานวางอยู่บนดินอ่อนมีการทรุดตัวที่สูง ดังนั้นจะต้องมีการเสริมผิวทางบ่อยครั้งทำให้งบประมาณที่ใช้ในการบำรุงรักษาสูงตามไปด้วย ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาเฉพาะหน้าไม่มีความยั่งยืนทำให้สูญเสียงบประมาณบำรุงรักษาเกินความจำเป็น

#### 3.2 พฤติกรรมทรุดตัวของวัสดุมวลเบาบริเวณคอสสะพานในแปลงทดสอบ

การติดตามพฤติกรรมการทรุดตัวของคอสสะพานที่ใช้วัสดุมวลเบา EPS LDCC และการใช้ Asphalt Overlay ปกติ การวัดการทรุดตัวที่ผิวทางดำเนินการวัดทุก ๆ 5 เมตรโดยเริ่มวัดการทรุดตัวที่คอสสะพานตั้งแต่บริเวณจุดใกล้ที่สุดกับ Abutment ออกไปเป็นระยะทางประมาณ 100 เมตร ระยะของ Bearing Unit จะมีความยาวประมาณ 45 เมตรจากโครงสร้าง Abutment พฤติกรรมทรุดตัวของผิวทางในคอสสะพานที่การติดตั้ง EPS และ LDCC จะมีการทรุดตัวมากบริเวณปลายของเชิงลาดซึ่งเป็นช่วงปลายของ Bearing Unit เนื่องจากบริเวณนี้มีความยาวของเสาเข็มค่อนข้างสั้น เพื่อให้มีการปรับพฤติกรรมการทรุดตัวของบริเวณปลายโครงสร้างเป็นระดับเดียวกับคันทางที่ไม่มีระบบฐานรากเสาเข็มรองรับและการทรุดตัวของผิวทางจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเข้าใกล้ Abutment เนื่องจากมีความยาวเสาเข็มรองรับโครงสร้าง Bearing Unit ที่ยาวใกล้เคียงกับโครงสร้างสะพาน จากการติดตามการทรุดตัวตามระยะเวลา โดยเริ่มวัดการทรุดตัวเมื่อ มิถุนายน 2558 จนถึง เมษายน 2565 การทรุดตัวโดยรวมใน LDCC จะมีการทรุดตัว

มากกว่า EPS เล็กน้อย และคอสสะพานที่ปรับปรุงด้วยการ Asphalt Overlay จะมีค่าการทรุดตัวมากที่สุด [3], [10] และมีการปูทับผิว Asphalt หลายครั้ง

### 3.3 การนำผลการศึกษามาแก้ปัญหาการทรุดตัวของคอสสะพาน

กรมทางหลวงได้นำผลการศึกษาจากแปลงทดสอบมาออกแบบแก้ไขการทรุดตัวของคอสสะพานบนทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 ช่วงกิโลเมตรที่ 26+000 ถึง กิโลเมตรที่ 38+000 ซึ่งคอสสะพานมีการทรุดตัวและสภาพที่อาจเกิดความไม่ปลอดภัยต่อผู้ใช้ทาง ตามมาตรฐานการออกแบบของ AASHTO ปี 2011 [11] กำหนดให้ค่าที่ความเร็ว 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ต้องมีค่าโค้งงายและโค้งคว่ำ (Crest and Sag Vertical Curve) ไม่น้อยกว่า 95 และ 63 ตามลำดับ แต่ค่าที่วัดได้จริงในสนาม พบว่าความเร็วที่ผู้ใช้ทางสามารถแล่นผ่านคอสสะพานบริเวณดังกล่าวได้อย่างปลอดภัยไม่ควรใช้ความเร็วเกิน 80-90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตารางที่ 2 แสดงค่าโค้งงายและโค้งคว่ำของสะพานบนทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 ในช่วง กิโลเมตรที่ 26+000 ถึงกิโลเมตรที่ 38+000 [10]

ตารางที่ 2 ค่า Sag and Vertical Curve (K) บริเวณคอสสะพาน ในช่วง กิโลเมตรที่ 26+000 ถึง กิโลเมตรที่ 38+000

กิโลเมตรที่	ชื่อคลอง	ขาขึ้น	ขาลง
26+856	คลองปากพัง	39.5	40
27+325	คลองบางซา	40	40
28+570	คลองช้างตาย	33.7	35.1
28+889	คลองพระองค์เจ้าไชยานุชิต	35.1	34.2
30+884	คลองกาหลง	22.87	25.9
31+952	คลองเป็ง	33.5	34.4
32+862	คลองไทรโยค	28.8	28.6
34+214	คลองปิ่นแก้ว	24.4	25.6
34+870	คลองห้วยนา	25.4	25
36+173	คลองพระยานคร	33.3	32.9

ตารางที่ 3 มาตรฐานการออกแบบคันทางและคอสสะพานด้วยวัสดุ EPS [6]

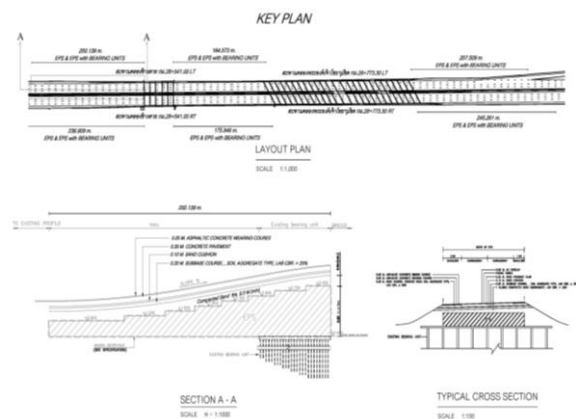
รายการตรวจสอบ	ค่ามาตรฐานทดสอบ
Slope Stability	$FS \geq 1.5$
Hydraulic Uplift	$FS \geq 1.2$
Hydraulic Sliding	$FS \geq 1.2$
Stress at EPS	< ชิดจำกัดความเค้นยืดหยุ่นของวัสดุ EPS และ $FS \geq 1.2$

ตารางที่ 4 เสถียรภาพคันทาง EPS ในกรณีเกิดน้ำท่วมที่ระดับต่าง ๆ

ผลกระทบของระดับน้ำที่ระดับความสูงต่าง ๆ	อัตราส่วนความปลอดภัย
-1 เมตร	1.596
0 เมตร	1.596
1 เมตร	1.540
2 เมตร	1.534

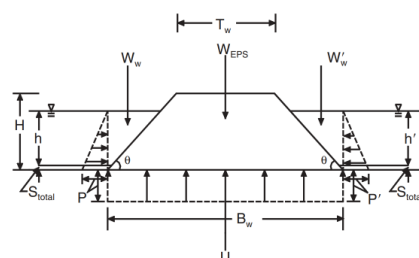
รูปที่ 2 แสดงรูปหน้าตัดทั่วไป (Typical Cross Section) ของคอสสะพานที่ได้ออกแบบ ซึ่งจะมีการดำเนินการขุดเปิดวัสดุเพื่อนำวัสดุเดิมออกแล้วแทนที่ด้วยวัสดุ EPS ซึ่งแนวทางการออกแบบจะต้องสอดคล้องกับ

ออกแบบวัสดุ EPS ตามตารางที่ 3 แนะนำโดย [12] ลักษณะชั้นดินบริเวณที่จะก่อสร้างโดยเบื้องต้นมีดังนี้ จากระดับผิวทางถึงความลึกประมาณ 4 เมตร เป็นชั้นทรายซึ่งเกิดจากทรายนกคันทางในการก่อสร้างทางหลวงพิเศษฯ จากระดับความลึกของดินฐานรากที่ระดับ 4 เมตร ถึงที่ความลึกประมาณ 11 เมตร พบดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) ซึ่งมีการปรับปรุงคุณภาพดินชั้นฐานรากด้วยวิธี PVD ที่ความลึกประมาณ 11 เมตรถึง 22 เมตร มีเป็นดินเหนียวที่มีความอ่อนตัวมาก (Very soft clay) เนื่องจากเป็นบริเวณที่ความลึกของ PVD ไปไม่ถึงจึงไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพดิน ที่ระดับความลึก 22 ถึง 25 เมตร จะพบชั้นดินเหนียวอ่อนอีกครั้งและความลึกตั้งแต่ 25 เมตรลงไปจนถึงจุดสิ้นสุดของหลุมเจาะลักษณะดินฐานรากในส่วนนี้จะเป็นดินทรายที่มีความแน่นปานกลาง (Medium Dense Sand) [10] การจำลองสถานการณ์กรณีเกิดน้ำท่วมคันทางที่ระดับความลึกต่างๆ ให้ค่าความปลอดภัยดังตารางที่ 4 ซึ่งมีความมากกว่า 1.5 ที่เป็นค่ามาตรฐานการออกแบบทั่วไปของลาดคัน



รูปที่ 2 รูปแบบการก่อสร้างปรับปรุงคอสสะพาน

การตรวจสอบของการยกตัว (Hydraulic Uplifting) ของวัสดุ EPS อ้างอิงจาก [12] อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการลอยตัวของวัสดุ EPS ตามมาตรฐานกำหนดให้ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1.2 ตามสมการที่ 1 และสามารถจัดเรียงใหม่ได้เป็นสมการที่ 2 และใช้ในการคำนวณหาค่าน้ำหนักกดทับ  $O_{REQ}$  (Uplift) ที่จำเป็นเพื่อให้ได้ค่าความปลอดภัยตามมาตรฐาน เพื่อป้องกันการลอยตัวของคันทาง ตารางที่ 5 แสดงค่าแรงกดทับเพิ่มเติม  $O_{REQ}$  (Uplift) เพื่อป้องกันไม่ให้คันทางคอสสะพานที่ปรับปรุงด้วยวัสดุ EPS เกิดการลอยตัวของคันทางในรูปที่ 3 ข้อมูลจากตารางแสดงให้เห็นว่า ความหนาของชั้นทรายที่ทับอยู่บนวัสดุ EPS และน้ำหนักของโครงสร้างชั้นทาง เพียงพอสามารถรับความสูงของระดับน้ำสูงไม่เกิน 2.5 เมตร หากเกิดกรณีที่ระดับน้ำมีความสูงเกิน 2.5 เมตร จะเกิดการลอยตัวของคันทางและวัสดุ EPS



รูปที่ 3 Schematic Diagram สำหรับตรวจสอบค่าการลอยตัวของวัสดุ EPS

$$FS(Uplift) = \frac{W_{EPS} + W_w + W'_{w} + O_{REQ}}{\gamma_w \times (h + S_{total}) \times B_w} \geq 1.2 \quad (1)$$

$$O_{REQ}(Uplift) = [1.2 * \gamma_w * (h + S_{total}) * B_w] - [(W_{EPS} + W_w + W'_{w})] \quad (2)$$

$$FS(Sliding) = \frac{[(W_{EPS} + W_w + O_{REQ}) - (\frac{1}{2}(h + S_{total}) * \gamma_w * B_w)] * \tan \delta}{\frac{1}{2}(\gamma_w * (h + S_{total})^2)} \geq 1.2 \quad (3)$$

$$O_{REQ}(Sliding) = \frac{1.2(\frac{1}{2}(\gamma_w * (h + S_{total})^2)}{\tan \delta} + (\frac{1}{2}((h + S_{total}) * \gamma_w) * B_w) - W_{EPS} - W_w \quad (4)$$

โดย  $O_{REQ}(Uplift)$  คือ แรงเพิ่มเติมที่ต้องใช้หนี้อลอยตัว (Hydraulic Uplifting) ให้ได้ความปลอดภัยที่ต้องการ

$O_{REQ}(Sliding)$  คือ แรงเพิ่มเติมที่ต้องใช้หนี้อลอยตัว (Hydraulic Sliding) ให้ได้ความปลอดภัยที่ต้องการ

$W_{EPS}$  คือ น้ำหนักของ EPS-block geofoam

$W_w$  คือ องค์ประกอบแนวตั้งของน้ำหนักของน้ำบนผิวเชิงลาดเหนือฐานของคันทางด้านต้นน้ำ

$W'_{w}$  คือ องค์ประกอบแนวตั้งของน้ำหนักของน้ำที่หน้าคันทางด้านท้ายน้ำ

$\gamma_w$  คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ

$S_{total}$  คือ การทรุดตัวทั้งหมด

$B_w$  คือ ความกว้างของคันทางด้านล่าง

$\delta$  คือ มุมแรงเสียดทานระหว่าง วัสดุ EPS และดินฐานราก

ตารางที่ 5 ค่าแรงกดทับ  $O_{REQ}$  เพื่อป้องกันการลอยตัว (Hydraulic Uplifting) และป้องกันการไถลของคันทาง (Hydraulic Sliding) ของคันทางที่ระดับน้ำความสูงต่าง ๆ

$h_w$ (ม.)	$\gamma_{EPS}$ (ตัน/ลบ.ม)	$V_{EPS}$ (ลบ.ม)	$W_{EPS}$ (ตัน)	$W_w$ (ตัน)	$W'_{w}$ (ตัน)	$B_w$ (ม.)	$O_{REQ}$ (Uplift) (ตัน)	$O_{REQ}$ (Sliding) (ตัน)	น้ำหนักคันทางรวม* (ตัน)
0.5	0.024	66	1.58	0.25	0.25	34	18.32	7.08	94.72
1.0	0.024	66	1.58	1.00	1.00	34	37.22	16.06	94.72
1.5	0.024	66	1.58	2.25	2.25	34	55.12	25.37	94.72
2.0	0.024	66	1.58	4.00	4.00	34	72.02	35.01	94.72
2.5	0.024	66	1.58	6.25	6.25	34	87.92	44.97	94.72
3.0	0.024	66	1.58	9.00	9.00	34	102.82	55.25	94.72**

\*หมายเหตุ น้ำหนักคันทางรวม ได้แก่ ทรายถมบนวัสดุหนา 1 เมตร แอสฟัลท์ หนา 0.10 เมตร ชั้นรองพื้นทางหนา 0.20 เมตร และชั้นพื้นทาง 0.20 เมตร

การเคลื่อนตัว (Hydraulic Sliding) ของคันทาง EPS เมื่อเกิดน้ำท่วมอาจเกิดกรณีที่แรงดันน้ำที่ไม่สมดุล เช่น กรณีที่ความสูงน้ำเป็นศูนย์ แนวโน้มที่คันทางจะไถลภายใต้แรงดันน้ำที่ไม่สมดุลนั้นจะถูกต้านด้วยแรงเสียดทานระหว่างวัสดุ EPS และดินฐานราก ถึงแม้ว่ามุมเสียดทาน  $\delta$  ระหว่างวัสดุ EPS และดินฐานรากค่อนข้างสูงแต่น้ำหนักโดยรวมของคันทาง EPS มีน้ำหนักน้อยจึงส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานน้อยส่งผลให้เกิดการไถลของคันทางภายใต้แรงดันน้ำที่ไม่สมดุล สมการที่ 3 แสดงค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการต้านทานการไถลของวัสดุ EPS และเมื่อจัดรูปสมการใหม่สามารถหาน้ำหนักกดทับ  $O_{REQ}$  (Sliding) ที่ป้องกันไม่ให้เกิดการไถลได้ตามสมการที่ 4 สามารถคำนวณหาน้ำหนักกดทับที่ป้องกัน

การเกิดการเคลื่อนของคันทางโดยสมมติให้ไม่มีน้ำท่วมบริเวณท้ายน้ำและกำหนดให้  $\delta$  มีค่าเท่ากับ 2 ใน 3 ของค่ามุมเสียด (φ) ของวัสดุทรายถมตารางที่ 5 แสดงค่าแรงกดทับเพิ่มเติม  $O_{REQ}$  (Sliding) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ปรับปรุงด้วยวัสดุ EPS เกิดการไถล ผลลัพธ์ที่แสดงในตารางแสดงให้เห็นว่า ความหนาของชั้นทรายที่ทับอยู่บนวัสดุ EPS และน้ำหนักของโครงสร้างคันทาง เพียงพอสามารถรับความสูงของระดับน้ำที่ 3 เมตร โดยไม่เกิดการเคลื่อนตัว (Hydraulic Sliding) ของคันทางและวัสดุ EPS

เสถียรภาพภายใน (Internal Stability) ของคันทางที่สร้างด้วยวัสดุ EPS คือ กำลังการรับน้ำหนักของวัสดุ EPS การวิเคราะห์ความสามารถในการรับน้ำหนักประกอบด้วยการเลือกประเภท EPS ที่มีคุณสมบัติเพียงพอเพื่อรองรับน้ำหนักของโครงสร้างคันทางที่วางอยู่บนวัสดุ EPS และน้ำหนักของจราจรที่วิ่งอยู่บนผิวทางโดยไม่ก่อให้เกิดความเค้นที่มากเกินไปต่อวัสดุ EPS ที่จะทำให้เกิดการเสียรูปและนำไปสู่การทรุดตัวของผิวทางได้ ซึ่งความเค้นที่เกิดขึ้นต้องไม่เกินขีดจำกัดความเค้นยืดหยุ่นของวัสดุ EPS ที่เลือกใช้ (ตารางที่ 6) ความเค้นที่เกิดขึ้นที่ผิวบนสุดของวัสดุ EPS คือ ผลรวมของผลกระทบของแรงจาก (1) น้ำหนักของยานพาหนะที่ถ่ายจากล้อรถบรรทุกลงสู่ผิวบนของ EPS (2) อิทธิพลจากแรงกระแทกเนื่องจากน้ำหนักของยานพาหนะ (Impact Load) และ อิทธิพลของน้ำหนักของโครงสร้างคันทางที่อยู่เหนือชั้นบนสุดของวัสดุ EPS ขึ้นไป ตามสมการที่ 5 โดย  $Q_c$  คือ ขีดจำกัดความเค้นยืดหยุ่นของวัสดุ EPS ที่เลือกใช้ จะต้องมีความมากกว่าหรือเท่ากับ  $Q_{total}$  คือ ผลรวมของน้ำหนักที่มีอิทธิพลต่อวัสดุ EPS และ FS คือ ตัวแปรความปลอดภัยในกรณีนี้ใช้ 1.2 ตามลำดับ

$$Q_c \geq Q_{total} * FS \quad (5)$$

ตารางที่ 6 ขีดจำกัดความเค้นยืดหยุ่นของวัสดุ EPS อ้างอิงจาก [12]

ชนิดของวัสดุ EPS	ความหนาแน่นของ EPS (กก./ลบ.ม)	ขีดจำกัดความเค้นยืดหยุ่นของวัสดุ EPS (kPa)
EPS40	16	40
EPS50	20	50
EPS70	24	70
EPS100	32	100

ในกรณีที่เกิดความเค้นที่ผิวบนสุดมากที่สุดคือกรณีรถบรรทุก 12 ล้อ ตามมาตรฐานควบคุมน้ำหนักบรรทุก น้ำหนักกระทำที่เพลาลังของรถบรรทุก 12 ล้อ คือ 20 ตัน ดังนั้นน้ำหนักที่ลงต่อล้อเท่ากับ 2.5 ตัน ซึ่งสามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวสัมผัสของยางล้อรถบรรทุกได้ ตามสมการที่ 6 โดย  $A_c$  คือ ผิวสัมผัสของล้อบนผิวทาง  $Q_c$  คือ น้ำหนักที่ลงที่ล้อ และ  $q$  คือ แรงดันลมภายในล้อ ถูกกำหนดให้เท่ากับ 689 kPa (100 psi) ความเค้นที่ผิวบนสุดของวัสดุ EPS เนื่องจากอิทธิพลของล้อรถบรรทุกสามารถพิจารณาได้จากพฤติกรรมการกระจายของน้ำหนักบรรทุกด้วยวิธี 2 : 1 ที่ระดับความลึก z ดังแสดงในรูปที่ 4

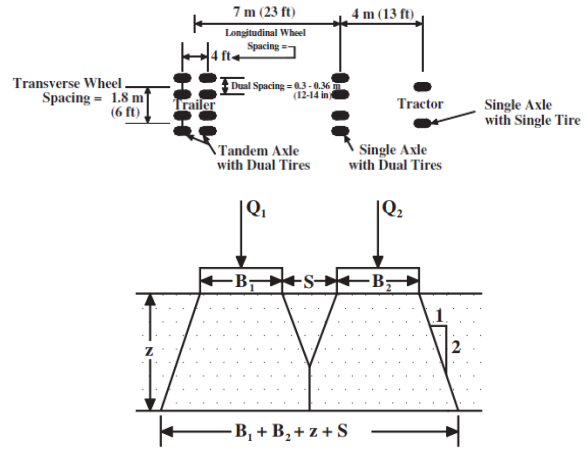
$$A_c = \frac{Q_c}{q} \quad (6)$$

ความเค้นที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของการกระจายน้ำหนักบรรทุกที่ลงที่ล้อไปสู่ผิวบนสุดของวัสดุ EPS โดยการคำนวณใช้วิธี 2:1 และได้คำนวณอิทธิพลของการกระจายน้ำหนักของโครงสร้างผิวทางและชั้นทางต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย ผิวทางแอสฟัลต์ หนา 10 เซนติเมตร (Wearing and Binder Course) วัสดุพื้นทางหนา (Base Course) 20 เซนติเมตร วัสดุชั้นรองพื้นทางหนา 20 เซนติเมตร และ วัสดุถมคันทาง (Embankment) หนา 1.00 เมตร จากน้ำหนักกระทำที่เป็นน้ำหนักเคลื่อนที่ (Live Load) ที่เกิดจากล้อของรถบรรทุก และน้ำหนักคงที่ (Static Load) จะเกิดความเค้นที่ผิวด้านบนของวัสดุ EPS ประมาณ 46.303 kN/sq.m และเมื่อพิจารณาความปลอดภัยที่ 1.2 จะสามารถกำหนดค่าความเค้นที่ยอมให้บนผิวบนสุดของวัสดุ EPS ได้ เท่ากับ 55.564 kN/sq.m (ตารางที่ 7) เมื่อเปรียบเทียบขีดจำกัดการรับความเค้นของวัสดุ EPS แสดงในตารางที่ 6 จะต้องกำหนดใช้ชนิดของวัสดุ EPS ชนิด EPS70 ซึ่งสามารถรับความเค้นได้ไม่เกิน 70 kN/sq.m หากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่เกิดขึ้นที่ระดับความลึกต่าง ๆ ที่เกิดจากอิทธิพลของน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกและน้ำหนักของโครงสร้างชั้นทางที่มีความหนาต่าง ๆ สามารถกำหนดช่วงความลึกของโครงสร้างชั้นทางที่ยอมให้เพื่อไม่ให้ความเค้นที่เกิดขึ้นบนผิวบนสุดของวัสดุ EPS ไม่เกินขีดจำกัดความเค้นยืดหยุ่นของวัสดุ EPS เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติที่ชั้นวัสดุ EPS จากรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นที่เกิดขึ้นกับความลึกของชั้นโครงสร้างทาง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความหนาของชั้นทางรวมควรควบคุมอยู่ที่ความลึกประมาณ 0.70 เมตร ถึง 2.20 เมตร เพื่อควบคุมไม่ให้ความเค้นที่เกิดขึ้นเกินค่าขีดจำกัดความเค้นยืดหยุ่นของวัสดุชนิด EPS70 ซึ่งสามารถป้องกันการวิบัติที่ชั้นวัสดุ EPS ได้

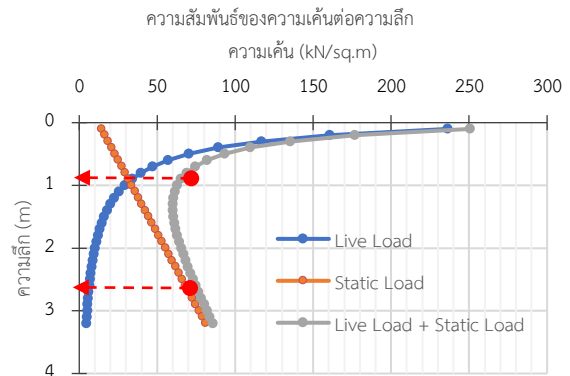
ตารางที่ 7 ความเค้นที่ผิวของวัสดุ EPS

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
$Q_l$ (น้ำหนักล้อต่อล้อ = 2.5 ตัน) (20 ตัน: 8 ล้อ)	25.000	kN
$Q = Q_l \times 1.3$	32.500	kN
$q$ (แรงดันลมยาง)	689.000	kN/sq.m
$A_c$ (ผิวสัมผัสของล้อบนผิวทาง)	0.036	Sq.m
$L' = \left( \frac{A_{rect}}{0.5277} \right)^{1/2}$	0.262	m
$B = 0.6 * L'$	0.157	m
$L = 0.8712 * L'$	0.228	m
$z$ (ความลึกจากผิวทางถึง วัสดุ EPS)	1.500	m
$S$ (ระยะห่างระหว่างล้อ)	0.360	m
$\sigma_{ll} = Q^2 / [(B_1 + B_2 + z + s)(L + z)]$ (ความเค้นจาก Live Load)	17.303	kN/sq.m
$\sigma_{pavement} = 2.4 * 0.1 * 10$	2.400	kN/sq.m
$\sigma_{subbase} = 1.9 * 0.2 * 10$	3.800	kN/sq.m
$\sigma_{base} = 1.9 * 0.2 * 10$	3.800	kN/sq.m
$\sigma_{soil} = 1.9 * 1.0 * 10$	19.000	kN/sq.m

$\sigma_{total} = \sigma_{ll} + \sigma_{pavement} + \sigma_{subbase} + \sigma_{base} + \sigma_{soil}$	46.303	kN/sq.m
$\sigma_c = \sigma_{total} \times 1.2$	55.564	kN/sq.m



รูปที่ 4 วิธีการประมาณความเค้นกรณีมีน้ำหนักกระทำ 2 จุดใกล้เคียงกัน ด้วยวิธี 2:1

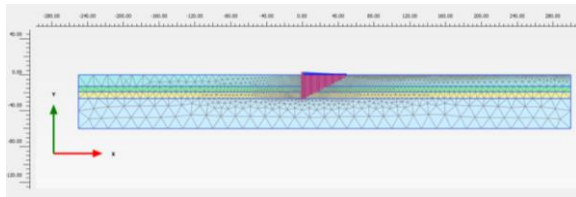


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของความเค้นที่เกิดขึ้นกับความลึก

### 3.4 การวิเคราะห์การทรุดตัวของคันทางคอสะพานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบการทรุดตัวของคันทางคอสะพานที่ใช้วัสดุทรายถมซึ่งไม่มีวัสดุ EPS (Without EPS: W/O EPS) และวัสดุถมที่มี EPS (Within EPS: W/I EPS) บนเสาเข็มอ่อนความยาว (Bearing Unit) ในการศึกษาได้ใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์ รูปแบบ 2 มิติ ซึ่งได้กำหนดขอบเขตแบบจำลองมีระยะห่างมากพอที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์ และแบบจำลองวัสดุถมที่มี EPS จะใช้การการทดแทนวัสดุดินถมเดิมโดยพิจารณาความลึกจากผิวดินให้มีลึกน้อยกว่า 0.70 เมตร ตามการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ผ่านมา ดังรูปที่ 6 ซึ่งใช้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method; FEM) เพื่อเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของเชิงลาดคันทางคอสะพานในระยะเวลาต่างๆ และเปรียบเทียบการทรุดตัวตามเวลาเมื่อเชิงลาดคอสะพานได้ถูกเพิ่มน้ำหนักจากการเสริมผิวด้วย Asphalt Overlay ข้อมูลคุณสมบัติชั้นดินในบริเวณดินอ่อนกรุงเทพฯ

(Bangkok clay) และคุณสมบัติของ EPS ตามค่าตัวแปรแสดงในตารางที่ 8 - 10



1) ขอบเขตของแบบจำลอง



2) เชิงลาดคั่นทางคอสพานที่มีวัสดุ EPS

รูปที่ 6 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของแบบจำลองคั่นทางคอสพาน

ตารางที่ 8 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์

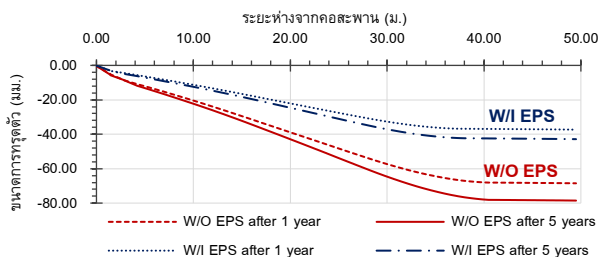
Material Set			Density		Permeability		Stiffness		Strength	
Identification	Material	Type	$\gamma_{unsat}$	$\gamma_{sat}$	$k_v$	$k_h$	$E'$	$\mu$	$c'$	$\phi$
Unit	Model	Undrained	(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	(m/Day)	(m/Day)	(kPa)		(kPa)	(Deg)
Soft Clay	MC	Undrained	16.0	16.3	0.0004	0.0004	1,300	0.35	13	21
Medium Clay	MC	Undrained	17.0	18.0	0.0004	0.0004	4,800	0.30	48	13
Stiff Clay	MC	Drained	18.0	19.0	0.0002	0.0002	7,000	0.25	70	26
Dense Sand	MC	Drained	20.0	20.0	0.8640	0.8640	40,000	0.25	0.01	36
Fill Mat. on EBM	MC	NP.	19.0	20.0	0.8640	0.8640	40,000	0.25	0.01	36
EPS*	MC	Undrained	0.20	0.22	0.0000	0.0000	5,500	0.125	41.88	2

ตารางที่ 9 Strength and Deformation Parameters สำหรับเสาเข็ม

Pile Type	Cross Section	$f'_c$	$E^c$	A	EA	$L_{spacing}$
	(m)	(ksc)	(kPa)	(m <sup>2</sup> )	(kN)	(m)
Hollow Core Pile*	0.65 x 0.65	350	28,455,304	0.3845	$1.09 \times 10^7$	2.00
Square Pile	0.22 x 0.22	350	28,455,304	0.0484	$1.38 \times 10^6$	2.00

ตารางที่ 10 Stiffness Properties สำหรับ Base Slab

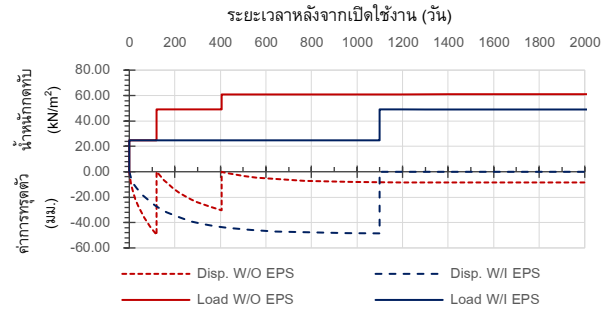
Axial Stiffness, EA	EI	Weight	Poisson's Ratio
(kN/m)	(kN.m <sup>2</sup> /m)	(kN/m)	
$8.537 \times 10^6$	$6.402 \times 10^4$	24	0.15



รูปที่ 7 การทรุดตัวของเชิงลาดคั่นทางคอสพานในระยะเวลาต่างๆ

รูปที่ 7 แสดงค่าการทรุดตัวของเชิงลาดคั่นทางคอสพานที่ใช้วัสดุทรายถมซึ่งไม่มีวัสดุ EPS (W/O EPS) และวัสดุถมที่มี EPS (W/I EPS) บนเสาเข็มผ่นความยาว (Bearing Unit, BU) ในระยะเวลาต่างๆ พบว่าค่าการทรุดตัว

จาก Abutment จะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนถึงปลายสุดของ BU เนื่องจากบริเวณคอสพานมีความยาวที่ปลายเสาเข็มอยู่ระดับลึกกว่า โดยค่าการทรุดตัวของ W/I EPS หลังการใช้งาน 1 ปี และ 5 ปี มีค่าการทรุดตัวเริ่มคงที่ ที่ระยะประมาณ 40 เมตร จากคอสพาน เท่ากับ 36 มิลลิเมตร และ 42 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนค่าการทรุดตัวของ W/O EPS จะมีค่ามากกว่า W/I EPS ประมาณ 1 เท่า ซึ่งในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าเชิงลาดคั่นทางคอสพานที่ใช้วัสดุถมร่วมกับ EPS จะช่วยลดการทรุดตัวได้มากกว่าที่ใช้วัสดุถมปกติ



รูปที่ 8 การทรุดตัวตามเวลาเมื่อเชิงลาดคอสพานได้ถูกเพิ่มน้ำหนักจากการเสริมผิวด้วย Asphalt Overlay

จากปัญหาค้นทางที่ก่อสร้างบริเวณดินเหนียวอ่อนมีการทรุดตัวอย่างต่อเนื่องและมักถูกเสริมผิวด้วยการใช้ Asphalt Overlay ที่เป็นการเพิ่มน้ำหนักกดทับลงบนคั่นทางคอสพาน ในครั้งนี้ จึงได้วิเคราะห์เปรียบเทียบผลจากค่าการทรุดตัวจากน้ำหนัก Asphalt Overlay ที่เพิ่มขึ้น ระหว่าง W/O EPS และ W/I EPS โดยกำหนดตำแหน่งที่ติดตามค่าการทรุดตัวบนเชิงลาดที่ระยะ 40 เมตร จากคอสพาน ซึ่งเป็นจุดที่มีค่าการทรุดตัวเริ่มคงที่และเข้าใกล้ค่าทรุดตัวมากที่สุดที่ปลาย BU แสดงผลดังรูปที่ 8 โดยกำหนดการทรุดตัวระยะแรกก่อนจะทำ Asphalt Overlay ที่ -50.00 มิลลิเมตร ซึ่งถือได้ว่าเป็นค่าการทรุดตัวที่ทำให้มีผลต่อความความสะดวกสบายและปลอดภัยของผู้ขับขี่นั้น W/O EPS ใช้ระยะเวลาที่ 120 วัน ส่วน W/I EPS ใช้ระยะเวลาที่ 1,100 วัน ต่อมาในการทรุดตัวระยะที่สองหลังจากทำ Asphalt Overlay รอบแรกแล้ว น้ำหนักที่กดทับได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งใน W/O EPS ยังแสดงผลการทรุดตัวอย่างต่อเนื่องจึงจำเป็นต้องทำ Asphalt Overlay รอบที่สอง จึงจะทำให้การทรุดตัวระยะหลังมีค่าน้อยกว่า -10 มิลลิเมตร ส่วน W/I EPS เมื่อทำ Asphalt Overlay รอบแรกแล้วค่าการทรุดตัวจะมีค่าน้อยมาก ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่าเชิงลาดคั่นทางคอสพานที่ใช้วัสดุถมร่วมกับ EPS จะช่วยเพิ่มระยะเวลาที่จะเข้าดำเนินการทำ Asphalt Overlay และช่วยลดการทรุดตัวระยะยาวได้มากกว่าที่ใช้วัสดุถมปกติ เนื่องจาก EPS มีน้ำหนักเบา สามารถลดน้ำหนักกดทับลงบนคั่นทางคอสพานได้

#### 4. ข้อได้เปรียบของวัสดุ EPS ในเชิงสิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์

##### 4.1 ข้อได้เปรียบของวัสดุ EPS ในเชิงสิ่งแวดล้อม

การใช้วัสดุ EPS อาจสามารถลดงบประมาณในการก่อสร้างโครงสร้างงานทางหรือโครงสร้างงานสะพานโดยรวมทั้งโครงการได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้วัสดุ EPS หากมีการใช้จำนวนมากก็สามารถลดต้นทุนการผลิตต่อหน่วยได้อย่างมีนัยสำคัญ ในโครงการที่ดำเนินการก่อสร้างใหม่ที่ต้องมีการก่อสร้าง Bearing Unit สำหรับโครงสร้างสะพาน หากนำวัสดุ EPS มาใช้



ทดแทนวัสดุถมในโครงสร้างก็จะสามารถลดขนาดโครงสร้าง เช่น เสาเข็ม และพื้น Bearing Unit เนื่องจากมีน้ำหนักเบา เมื่อติดตั้งในกำแพงกันดินจะทำให้สามารถลดขนาดโครงสร้างได้มีอัตราส่วนแรงดันด้านข้างน้อยมาก (Poisson Ratio) ดังนั้น งบประมาณก่อสร้างโครงสร้างโดยรวมจะลดลงตามสัดส่วนไปด้วย การใช้วัสดุ EPS ยังมีความเหมาะสมกับงานขยายคันทางบริเวณที่ไม่ได้มีการปรับปรุงคุณภาพ เนื่องจากมีอัตราการทรุดตัวน้อยมาก ซึ่งคันทางเดิมอาจผ่านการทรุดตัวไปบ้างแล้ว เมื่อใช้วัสดุนี้ในตำแหน่งที่ติดกับคันทางเดิม ด้วยคันทาง EPS มีน้ำหนักเบาจะเกิดการทรุดตัวน้อยทำให้การทรุดตัวที่แตกต่าง (Differential Settlement) ระหว่างคันทางเดิมและที่ขยายด้วย EPS มีค่าน้อยมาก นอกจากนี้ EPS ยังเหมาะกับการก่อสร้างหรือบูรณะทาง ในเขตเมืองเป็นการลดผลกระทบต่อมลพิษของโอเอเซีย และการดำเนินให้แล้วเสร็จได้ในเวลาอันสั้น ซึ่งจะช่วยให้ลดค่าใช้จ่ายทางตรงและทางอ้อมได้เป็นอย่างมาก

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบการใช้เชื้อเพลิงในการขนส่งทรายถมกับวัสดุ EPS

รายการ	ทรายถม	EPS	หมายเหตุ
ราคาค้นทุนวัสดุ (บาท/ลบ.ม)	596.64	2,288.69	ราคาค้นทุน
ปริมาตรแน่น (ลบ.ม)	29,000.00	29,000.00	ปริมาณตามบัญชี ปริมาตรในแบบก่อสร้าง
ปริมาตรหลวม (ลบ.ม)	40,600.00*	29,000.00	*ปริมาตรแน่น x 1.4
หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม)	1,900.00	24.00	
น้ำหนักบรรทุกต่อเที่ยว (กก.)	13,000.00	528.00	
ปริมาตรต่อการขน 1 เที่ยว (ลบ.ม)	5.00	22.00*	*กระบะบรรทุกขนาด 2.4x6x1.5 ม.
จำนวนเที่ยวในการขนส่ง	8,120.00	1,318.00	ปริมาตรหลวม/ปริมาตรขนส่งต่อเที่ยว
อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันรถเปล่า	5.30	5.30	[13]
อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันที่น้ำหนักบรรทุก ประมาณ 500 กก. (กิโลเมตร/ลิตร)	-	5.20	[13]
อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันที่น้ำหนักบรรทุก ประมาณ 13,000 กก. (กิโลเมตร/ลิตร)	4.10	-	[13]
ระยะขนส่ง (กิโลเมตร)	50.00	50.00	สมมติระยะทางขนส่ง 50 กิโลเมตร
จำนวนน้ำมันที่ใช้ทั้งหมดต่อเที่ยว (เที่ยวบรรทุก 1 เที่ยว เทียบเปล่า 1 เที่ยว) (ลิตร)	21.63	19.05	
จำนวนน้ำมันที่ใช้ทั้งหมดในการขนส่งวัสดุ ทรายถม/EPS ทั้งโครงการฯ (ลิตร)	175,628.16	25,107.04	
คิดเป็นค่าขนส่งวัสดุทั้งหมด (ราคาน้ำมัน 30 บาทต่อลิตร)	5,268,844.91	753,211.18	
คิดเป็นปริมาณคาร์บอนที่ปล่อย (กก.)	474,196.04	67,789.01	อัตราการปล่อย คาร์บอน 2.7 กก./ลิตร

การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบปริมาณเชื้อเพลิงที่ถูกใช้ในการขนส่งวัสดุระหว่างวัสดุถมปกติและวัสดุ EPS แสดงในตารางที่ 11 โดยใช้ข้อมูลปริมาณ

วัสดุ ESP ในบัญชีปริมาณงานในแบบก่อสร้างงานแก้ไขการทรุดตัวคอสะพาน [10] โดยเปรียบเทียบการใช้วัสดุ EPS และวัสดุทรายถมคันทางในปริมาณที่เท่า ๆ กัน จากข้อมูลในตารางแสดงให้เห็นว่า หากเปรียบเทียบการใช้วัสดุทรายถมและวัสดุ EPS ในจำนวนปริมาตรที่เท่ากันจะมีจำนวนเที่ยวในการขนส่งวัสดุที่ต่างกันมาก เนื่องจากน้ำหนักต่อหน่วยของทรายถมหนักกว่าวัสดุ EPS ค่อนข้างมาก และน้ำหนักต่อเที่ยวในการขนส่งวัสดุทรายถมคันทางถูกจำกัดด้วยพิกัดน้ำหนักตามกฎหมาย แตกต่างกับวัสดุ EPS ที่มีหน่วยน้ำหนักน้อยสามารถถูกขนมาบริเวณก่อสร้างได้คราวละมาก ๆ และปริมาณที่ขนส่งถูกจำกัดด้วยขนาดของกระบะบรรทุก เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วจะเห็นว่าปริมาณการเผาผลาญน้ำมันแตกต่างกัน ทำให้ประหยัดค่าน้ำมันเชื้อเพลิงได้เป็นจำนวนมากอีกด้วย ซึ่งการพิจารณาข้างต้นนี้ยังไม่รวมค่าใช้จ่ายค่าดำเนินการในการบรรทุกวัสดุที่ต้องใช้ชุดเครื่องจำนวนมากที่ต้องมีการเผาผลาญเชื้อเพลิง และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องจักรและค่าใช้จ่ายอื่น เช่น ค่าแรงบุคลากรที่ควบคุมเครื่องจักร การขนวัสดุถมที่หนักจำนวนมากผ่านโครงข่ายทางหลวงจะทำให้เกิดความเสียหายและอายุการใช้งานของโครงสร้างชั้นทางที่รถบรรทุกวัสดุแล่นผ่านซึ่งเป็นภาระต่องบประมาณในการบำรุงรักษาทาง นอกจากนี้หากพิจารณาในแง่ของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจะเห็นว่าเกิดปริมาณคาร์บอนที่ปลดปล่อยจากการเผาไหม้น้ำมันดีเซลจากเครื่องยนต์ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการขนส่งทรายถมและวัสดุ EPS ที่แตกต่างกันถึง 7 เท่า

#### 4.2 ข้อได้เปรียบของวัสดุ EPS ในเชิงเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ในเชิงเศรษฐศาสตร์ด้านการลงทุนในกรณีที่มีการก่อสร้างคอสะพานใหม่ด้วยการใช้โครงสร้างเสาเข็มผ่นความยาว (Bearing unit) ซึ่งดำเนินการเปรียบเทียบวัสดุถมภายในคอสะพานระหว่างทรายถมปกติและวัสดุ EPS เพื่อหาความคุ้มค่าของการลงทุนในการใช้วัสดุ EPS และระยะเวลาการคุ้มทุนด้วยวิธีการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) คือ “ผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันรวมของกระแสเงินสดรับสุทธิตลอดอายุโครงการกับมูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุน โดยใช้อัตราคิดลด (Discount rate) อัตราได้อัตราหนึ่งมาปรับมูลค่าของกระแสเงินสดที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาให้มาอยู่ที่จุดเดียวกัน คือ ณ ปัจจุบัน” วิธีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ หรือ NPV นับเป็นเครื่องมือในการประเมินความเป็นไปได้ของการลงทุนที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีการนำเรื่องค่าของเงินตามเวลามาร่วมพิจารณา และเป็นการคำนวณกระแสเงินสดที่เกิดขึ้นในช่วงอายุของโครงการที่พิจารณา การคำนวณหามูลค่าปัจจุบันสุทธิแสดงในสมการที่ 7

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+k)^t} - I \quad (7)$$

โดย  $CF_t$  คือ กระแสเงินสดรับสุทธิ ณ ปีที่  $t$   
 $I$  คือ เงินสดจ่ายลงทุนของโครงการ  
 $k$  คือ ค่าของทุนหรืออัตราผลตอบแทนที่ต้องการ  
 $n$  คือ อายุของโครงการ

การวิเคราะห์มูลค่าสุทธิโดยใช้ข้อมูลในการบำรุงรักษาคอสะพานในปี 2562 2563 และ 2564 ที่มีการใช้งบประมาณบำรุงปกติเพื่อดำเนินการปรับ

ระดับคอสสะพาน บริเวณสะพานข้ามคลองข้างตาย กม. 28+567 และ สะพานข้ามคลองพระองค์เจ้าไชยานุชิต กม.28+892 ข้อมูลในตารางที่ 12 แสดงให้เห็นว่า คอสสะพานต้องมีการปรับระดับคอสสะพานให้มีความราบเรียบ บ่อยครั้งเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ใช้ทางในขณะที่ขับผ่าน ข้อมูลการ บำรุงรักษาคอสสะพานดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ ข้อมูลแสดงในตารางที่ 13 แสดงค่าก่อสร้างและค่าบำรุงรักษาเปรียบเทียบ ระหว่างคอสสะพานปกติและคอสสะพาน EPS โดยมีการตั้งสมมติฐานในการ วิเคราะห์ให้เห็นในกรณีที่มีการก่อสร้างคอสสะพานใหม่จำนวน 1 คอสสะพาน และวิเคราะห์เฉพาะส่วนประกอบของโครงสร้างคือ ทราดยม วัสดุ EPS และ ส่วนประกอบของงานบำรุงเช่นงานเสริมผิว งานปรับระดับคอสสะพาน งาน กำแพงแบริเออร์ และงานสีตีเส้น ที่ต้องดำเนินการตามระยะเวลาเป็นต้น โดยการก่อสร้างเริ่มต้นที่ การก่อสร้างวัสดุคอสสะพานทั้งทราดยมปกติ และวัสดุ EPS ในส่วนของคอสสะพานปกติจะมีการทรุดตัวมากกว่าและจะมีการ เสริมปรับระดับคอสสะพานด้วยวัสดุ Asphalt Leveling และดำเนินการ ตีเส้นจราจรทุกปีเพื่อให้เกิดความราบเรียบในขณะที่ขับผ่านคอสสะพาน มีการ ชูตใสและปูผิว Asphalt บริเวณที่เสื่อมสภาพทุก 5 ปี พร้อมดำเนินการต่อ ความสูงของคอนกรีตแบริเออร์ ในส่วนของคอสสะพานที่ใช้วัสดุ EPS จะเกิด การทรุดตัวน้อยมาก การบำรุงรักษาจึงมีเฉพาะการชูตใสและการปูผิว Asphalt ใหม่ทุกๆ 5 ปี

ตารางที่ 12 การใช้งบประมาณบำรุงปกติเพื่อปรับระดับคอสสะพานคลองข้างตาย และคลองพระองค์เจ้าไชยานุชิต

บำรุงปกติ	คลองข้างตาย กม. 28+567				คลองพระองค์เจ้าไชยานุชิตกม. 28+892			
	ซ้ายทาง (LT)		ขวาทาง (RT)		ซ้ายทาง (LT)		ขวาทาง (RT)	
	ขาขึ้น	ขาลง	ขาขึ้น	ขาลง	ขาขึ้น	ขาลง	ขาขึ้น	ขาลง
2562		497,080		497,080	497,080	497,080	497,080	497,080
2563	497,080	497,080	497,080	497,080			497,080	497,080
2564	497,080		497,080		497,080	497,080		
เฉลี่ยต่อปี	331,387	331,387	331,387	331,387	331,387	331,387	331,387	331,387

ตารางที่ 13 รายการค่าใช้จ่ายเปรียบเทียบระหว่างคอสสะพานปกติและคอสสะพาน EPS

ลำดับที่	รายการ	คอสสะพานปกติ (บาท)	คอสสะพาน EPS (บาท)
1	ทราดยม	1,800,000	720,000
2	EPS		3,520,000
3	Asphalt Leveling เพื่อปรับคอสสะพาน	331,400 * ทุกปี	-
4	งานตีเส้นจราจร ทุกปี	12,960 * ทุกปี	12,960.00 * ทุก 5 ปี
5	งานเพิ่มความสูงคอนกรีตแบริเออร์	180,000 * ทุก 5 ปี	-
6	งานชูตใส+overlay	370,440 * ทุก 5 ปี	370,440 * ทุก 5 ปี

ตารางที่ 14 แสดงการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ระหว่างคอสสะพานปกติและคอสสะพาน EPS โดยกำหนดใช้ Discount Rate

เท่ากับ 12% และเปรียบเทียบมูลค่าปัจจุบันสุทธิตามสมมติฐานที่ได้นำเสนอข้างต้น ความคุ้มค่าของการใช้วัสดุ EPS เปรียบเทียบกับวัสดุคอสสะพานปกติ พบว่าวัสดุ EPS จะมีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ที่ระยะเวลาประมาณ 15 ปี แสดงให้เห็นว่าจากมูลค่าลงทุนรวมในปีปัจจุบันสุทธิ (NPV) ของคอสสะพานปกติจะมีความมากกว่าคอสสะพานที่ใช้วัสดุ EPS ซึ่งในความเป็นจริงจุดคุ้มทุนอาจเกิดที่ระยะเวลาสั้นกว่าที่ได้ดำเนินการคำนวณเนื่องจากวัสดุ EPS มีน้ำหนักน้อยกว่าวัสดุทราดยมค่อนข้างมาก ทำให้เกิดการชำระคืนต่อโครงสร้างและผิวทางค่อนข้างน้อย หากนำข้อได้เปรียบข้อนี้มาออกแบบโครงสร้างของ Bearing Unit บริเวณคอสสะพานจะทำให้ขนาดของโครงสร้างลดลงซึ่งเป็นการประหยัดงบประมาณในการก่อสร้างโดยรวมของโครงการฯ

ตารางที่ 14 การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบมูลค่าปัจจุบันสุทธิระหว่างคอสสะพานปกติและคอสสะพาน EPS

ปีที่	คอสสะพานปกติ	คอสสะพาน EPS	Discount rate	NPV (คอสสะพานปกติ)	NPV (คอสสะพาน EPS)
0	-1,800,000	-4,240,000	12%	-1,800,000	-4,240,000
1	-344,360	-	12%	-2,107,464	-4,240,000
2	-344,360	-	12%	-2,381,986	-4,240,000
3	-344,360	-	12%	-2,627,095	-4,240,000
4	-344,360	-	12%	-2,845,942	-4,240,000
5	-894,800	- 383,400	12%	-3,353,675	-4,457,551
6	-344,360	-	12%	-3,528,139	-4,457,551
7	-344,360	-	12%	-3,683,910	-4,457,551
8	-344,360	-	12%	-3,822,991	-4,457,551
9	-344,360	-	12%	-3,947,171	-4,457,551
10	-894,800	- 383,400	12%	-4,235,272	-4,580,996
11	-344,360	-	12%	-4,334,267	-4,580,996
12	-344,360	-	12%	-4,422,656	-4,580,996
13	-344,360	-	12%	-4,501,575	-4,580,996
14	-344,360	-	12%	-4,572,037	-4,580,996
15	-894,800	- 383,400	12%	-4,735,514	-4,651,042
16	-344,360	-	12%	-4,791,687	-4,651,042
17	-344,360	-	12%	-4,841,841	-4,651,042
18	-344,360	-	12%	-4,886,621	-4,651,042
19	-344,360	-	12%	-4,926,604	-4,651,042
20	-894,800	- 383,400	12%	-5,019,365	-4,690,788

## 5. บทสรุป

การใช้วัสดุผสมเบ้าชนิดต่างๆ เช่น วัสดุ EPS ในการลดการทรุดตัวของคอสสะพานและคันทาง เป็นส่งเสริมให้หน่วยงานบำรุงรักษาทางหลวงลดภาระงบประมาณในซ่อมคอสสะพานอย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่จำเป็นต้องดำเนินการเสริมผิวบริเวณคอสสะพานบ่อยครั้ง ซึ่งเป็นการเพิ่มน้ำหนักให้กับโครงสร้างทั้งบริเวณเสาเข็มผ่อนความยาว (Bearing Unit) และเป็นการเร่งอัตราการบีบอัดตัวคาน้ำ (Consolidation Settlement) ทำให้ยังต้องดำเนินการเสริมผิวบ่อยครั้งขึ้น ในบางคอสสะพานบนทางหลวงพิเศษฯ ต้องดำเนินการเสริมผิวมากกว่า 1 ครั้งต่อปี ในการประยุกต์ใช้ วัสดุ EPS จะสามารถลดการทรุดตัวของคันทางบริเวณคอสสะพานอย่างมีประสิทธิภาพในระยะยาว การใช้วัสดุ EPS ในการก่อสร้างคอสสะพานและคันทางเป็นการเพิ่ม

ความปลอดภัยให้ผู้ใช้ทาง เนื่องจากการลดภาระการซ่อมบำรุงคอสะพานลงไปได้มาก ลดปัญหาการปิดช่องจราจรเพื่อการบำรุงทาง ทำให้เกิดปัญหาการจราจรติดขัดบนสายทางน้อยลง อีกทั้ง การจัดสรรงบประมาณเพื่อใช้ในการทรุดตัวต่างระดับต้องใช้ระยะเวลาในการรอการอนุมัติงบประมาณมาดำเนินการในระหว่างที่รอคิวทางอาจมีการปิดทางเพื่อเบี่ยงจราจรอาจส่งผลให้เกิดอุบัติเหตุต่อผู้ใช้ทางได้

ปัจจุบันราคาของวัสดุ EPS มีราคาถูกลงอย่างมากเมื่อเทียบกับราคาของ EPS ในอดีตเนื่องจากการใช้กันอย่างแพร่หลายในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมด้านอื่น เมื่อนำราคามาเปรียบเทียบกับราคาของวัสดุถม เช่น ดิน และทรายที่ใช้กันทั่วไปก็มีความต่างกันไม่มากนัก ซึ่งมีเหตุผลมาจากราคาซื้อขายที่ดินที่เพิ่มมากขึ้น ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่ปรับสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และในการใช้วัสดุถมจะต้องใช้เครื่องจักรในการทำงานดินหลายชนิดในการดำเนินการ อีกทั้ง การดำเนินการก็เป็นไปได้ช้าเนื่องจากต้องใช้การบดอัดวัสดุเป็นชั้น ๆ และต้องดำเนินการทดสอบทำให้เกิดความสูญเสียทั้งเวลาและเงินในกระบวนการทำงาน ในบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่นจะส่งผลกระทบต่อจราจรอย่างมากเนื่องจากต้องปิดการจราจรในบางช่องทางเป็นเวลานาน ซึ่งต่างกับการใช้ EPS เป็นวัสดุถมซึ่งผู้ดำเนินการสามารถทำงานให้แล้วเสร็จในเวลาอันสั้น อีกทั้ง ยังประหยัดเวลา และพลังงานในการขนส่งและติดตั้งด้วยวัสดุ EPS มีน้ำหนักเพียง 1% ของวัสดุถมคันทางทั่วไป และมีการใช้เครื่องจักรในการดำเนินการก่อสร้างน้อยกว่ามาก วัสดุ EPS เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ดังนั้น น้ำหนักของรถบรรทุกขนส่งวัสดุ EPS จะไม่ทำให้โครงสร้างสะพานและผิวทางที่ต้องบรรทุกผ่านต้องเสียหายเมื่อเทียบกับวัสดุถมปกติ ซึ่งเมื่อดำเนินการแล้วเสร็จจะต้องดำเนินการซ่อมทางหลวงที่ต้องขนส่งวัสดุผ่านด้วย

การนำวัสดุ EPS มาใช้ในงานก่อสร้างเพื่อลดการทรุดตัวของคอสะพานและคันทางจะต้องใช้ความรู้ความเข้าใจในวิชาด้านวิศวกรรมสาขาต่าง ๆ ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของดินชั้นฐานรากบริเวณตำแหน่งที่จะก่อสร้าง คุณสมบัติทางเคมีและเชิงกลต่างๆของวัสดุ EPS เพื่อนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มาวิเคราะห์ด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์และนำมาวิเคราะห์หาค่าความน่าเชื่อถือ (Reliability Analysis) ของโครงสร้างคอสะพานโดยรวมเพื่อให้ได้ระบบโครงสร้างที่มีความแข็งแรงคงทนต่อสภาพแวดล้อม ซึ่งการวิเคราะห์ข้างต้นประกอบด้วย การวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทาง (Slope Stability Analysis) ซึ่งจะต้องได้ระดับค่าตัวแปรความปลอดภัย (Factor of Safety) ไม่น้อยกว่า 1.5 การตรวจสอบค่าการลอยตัว (Hydraulic Uplifting) และการเคลื่อนตัว (Hydraulic Sliding) ของวัสดุ EPS ในคันทางโดยการจำลองสถานการณ์กรณีการเกิดน้ำท่วมสายทางที่ระดับต่าง ๆ การวิเคราะห์หาความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง EPS ที่ระดับความลึกต่าง ๆ การวิเคราะห์ทั้ง 3 กรณีข้างต้นต้องได้ระดับค่าตัวแปรความปลอดภัย (Factor of Safety) ไม่น้อยกว่า 1.2

การใช้วัสดุ EPS สามารถลดงบประมาณในการก่อสร้างโครงสร้างงานทางหรือโครงสร้างงานสะพานได้ในโครงการที่ดำเนินการก่อสร้างใหม่หากนำวัสดุ EPS มาใช้จะสามารถลดขนาดโครงสร้างได้เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและมีอัตราส่วนแรงดันด้านข้างน้อยมาก (Poisson Ratio) เมื่อนำมาใช้กับ

โครงสร้างกำแพงกันดินจะทำให้ลดขนาดโครงสร้างได้อย่างเป็นนัยสำคัญ ดังนั้น งบประมาณก่อสร้างโครงสร้างโดยรวมและการบำรุงรักษาจะลดลงตามสัดส่วนไปด้วย การใช้วัสดุ EPS ยังมีความเหมาะสมกับงานขยายคันทางบริเวณที่ไม่ได้มีการปรับปรุงคุณภาพเนื่องจากมีอัตราการทรุดตัวน้อยมากซึ่งคันทางเดิมมีการทรุดตัวไปบ้างแล้ว เมื่อใช้วัสดุนี้ จะเกิดการทรุดตัวที่แตกต่าง (Differential Settlement) ค่อนข้างน้อย นอกจากนี้ EPS ยังเหมาะกับการก่อสร้างหรือบูรณะทางในเขตเมืองเป็นการลดผลกระทบต่อมลพิษของไอเสีย และการดำเนินการให้แล้วเสร็จได้ในเวลาอันสั้น ซึ่งจะทำให้ลดค่าใช้จ่ายทางตรงและทางอ้อมได้เป็นอย่างมาก

### เอกสารอ้างอิง

- [1] โครงการ การประยุกต์ใช้วัสดุมูลเบาประเภท EPS Geofom ในการก่อสร้างทาง รายงานขั้นสุดท้าย (Final Report) สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง กุมภาพันธ์ 2557
- [2] โครงการศึกษาการปรับปรุงดินเพื่อลดระยะเวลาการก่อสร้างคันทางบนดินอ่อน รายงานขั้นสุดท้าย (Final Report) สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง ตุลาคม 2558
- [3] โครงการศึกษา วิเคราะห์ ประเมินแนวทางการปัญหา การทรุดตัวคอสะพานอย่างมีประสิทธิภาพ รายงานขั้นสุดท้าย (Final Report) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กองทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง กรมทางหลวง มกราคม 2559
- [4] Miki, H. (1996). New trend of earth structure in highway earthwork series etc, Dobokugijyutu, Vol. 5 1, No.2 (in Japanese).
- [5] Department of Highways Standard Drawing 2015
- [6] Briaud, J. and Hoffman, S., Settlement of bridge approaches (The Bump at the End of the Bridge) NCHRP Synthesis 234, 1997
- [7] Kai Qiu Lin and Ing Hieng Wong, Use of Deep Cement Mixing to Reduce Settlements at Bridge Approaches, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Volume 125 Issue 4 - April 1999
- [8] Edward J. Hoppe, GUIDELINES FOR THE USE, DESIGN, AND CONSTRUCTION, OF BRIDGE APPROACH SLABS, Virginia Transportation Research Council (A Cooperative Organization Sponsored Jointly by the Virginia Department of Transportation and the University of Virginia), 1999
- [9] C. S. Cai; X. M. Shi; G. Z. Voyiadjis; and Z. J. Zhang, Structural Performance of Bridge Approach Slabs under Given Embankment Settlement, Journal of Bridge Engineering, Volume 10, Issue 4, July 2005
- [10] งานสำรวจดิน วิเคราะห์ เสนอแนวทางแก้ไขปัญหาคาทรุดตัวคอสะพานระหว่าง กิโลเมตรที่ 26+000 ถึง กิโลเมตรที่ 38+000 บนทาง

หลวง หมายเลข 7 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กอง  
ทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง กรมทางหลวง กันยายน 2563

- [11] AASHTO. A Policy On Geometric Design. Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2011
- [12] Stark, T. D, Horvath, J. S. and Leshinsky, D. 2004, Guideline and Recommended Standard for Geofoam Applications in Highway Embankments, NCHRP REPORT 529 , Transportation Research Board, US.
- [13] วชิรินทร์ ดงบัง การศึกษาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถที่ใช้เพื่อการขนส่ง “A Study to Fuel Consumption Rate for the Transports Vehicle” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา