

พฤติกรรมของทางรถไฟที่เสริมด้วยวัสดุสังเคราะห์เชิงประกอบภายใต้การใช้งานจริง

BEHAVIOR OF RAILWAY REINFORCED WITH GEOCOMPOSITE UNDER WORKING CONDITION

พัทยศ โคตรมา^{1,*} สยาม ยิ้มศิริ² และ สิทธิภัทร์ เอื้ออภิวรรักษ์¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

² หน่วยวิจัยวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นฐานเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

*Corresponding author; E-mail address: phatyot.khotma@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมภายใต้การใช้งานจริงของทางรถไฟที่มีการติดตั้งวัสดุสังเคราะห์เชิงประกอบ (Geogrid และ Geotextile) โดยทำการศึกษาทางรถไฟสายตะวันออก กม. 67+500 ถึง 68+000 ระหว่างสถานีดอนสีนง และ สถานีแปดริ้ว จ. ฉะเชิงเทรา การศึกษาได้ทำการทดสอบต่างๆต่อทางรถไฟระหว่างการใช้งานจริง โดยประกอบด้วยการทดสอบในสนามคือ (i) การวัดการเคลื่อนตัวของสันราง และ (ii) การตรวจวัดคุณภาพทางด้วย TGM นอกจากนี้ยังทำการเก็บตัวอย่างหินโรยทางและนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อวิเคราะห์การปนเปื้อนของหินโรยทาง ผลการศึกษพบว่า การเสริมกำลังมีผลช่วยลดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเปลี่ยนแปลงของค่าระดับสันรางลงได้เมื่อเทียบกับทางรถไฟที่ไม่มีการเสริมกำลัง นอกจากนี้การเสริมกำลังยังช่วยลดดัชนีความไม่สม่ำเสมอของทาง (P-index) ลงได้ แต่พบว่าการเสริมกำลังไม่ได้มีผลต่อการลดการแตกหักของหินโรยทางลง

คำสำคัญ: ทางรถไฟ, วัสดุสังเคราะห์, การปนเปื้อนของหินโรยทาง, ความไม่สม่ำเสมอของทาง

Abstract

The objective of this research is to study the behavior under working condition of railway track reinforced with geocomposite material, i.e. geogrid and geotextile. The study is carried out at km. 67+500 to 68+000 of the Eastern line (outbound) between Don Si Non and Pad Riew Stations, Chachoengsao Province. Field experiments are carried out, which are (i) rail alignment measurement and (ii) track quality by TGM. Moreover, ballasts are collected for laboratory tests to evaluate their fouling and breakage. The results showed that the reinforcement can improve track irregularity; however, it cannot reduce ballast fouling and breakage.

Keywords: Railway Track, Geocomposite, Ballast Fouling, Track Irregularity

1. บทนำ

ทางรถไฟเมื่อถูกกระทำจากน้ำหนักของขบวนรถไฟที่เคลื่อนผ่านซ้ำๆ จะเกิดการเสื่อมสภาพของชั้นทางซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ (i) หินโรยทางจะมีการแตกหักสะสมมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งส่งผลให้เกิดมวลละเอียดปนเปื้อนในหินโรยทาง และ (ii) สำหรับในชั้นทางมีคุณสมบัติเป็นดินเหนียว เมื่อเวลาผ่านไปหลังการถูกแรงกระทำซ้ำๆ โดยเฉพาะในฤดูฝนจะเกิดโคลนทะเล็กขึ้นมาเจือปนกับชั้นหินโรยทาง สิ่งปนเปื้อนที่เกิดจากการแตกหักหรือโคลนดินเหนียวนี้จะเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคของหินโรยทางทำให้เสียคุณสมบัติการยึดหยุ่นและการระบายน้ำส่งผลให้การดูดซับแรงจากขบวนรถไฟลดลง และทำให้แรงกระแทกระหว่างขบวนรถไฟกับรางเพิ่มสูงมากขึ้น [1] ซึ่งนำไปสู่การก่อให้เกิดความเสียหายแก่ทั้งโครงสร้างของขบวนรถไฟและโครงสร้างของทางรถไฟ ในบางเส้นทางที่มีความเสียหายมากอาจต้องมีการลดความเร็วในการวิ่งผ่านลงซึ่งส่งผลไปยังการจัดการเรื่องเวลา จึงได้มีความพยายามในการติดตั้งวัสดุสังเคราะห์เข้าไปในชั้นทางของทางรถไฟเพื่อแก้ปัญหาการเสื่อมสภาพของชั้นทาง

Bathurst & Raymond [2] ได้ศึกษาการใช้ Geogrid ร่วมกับชั้นหินโรยทาง โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการแบบ Large-Scale ที่ประกอบด้วยระบบ tie/ballast วางบนตัวรองรับที่ถูกจำลองแทนชั้นรองหินโรยทางและชั้นพื้นทางเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเสริม/ไม่เสริม Geogrid และยังคงตรวจสอบผลเนื่องจากความยึดหยุ่นของ support ที่มีต่อการเสียรูปถาวรและการคืนตัว ผลการทดสอบพบว่าหากเสริม Geogrid ที่ความลึก 200 มิลลิเมตรได้เหมาะสมรองรางจะสามารถลดการทรุดตัวของชั้นหินโรยทางลงได้

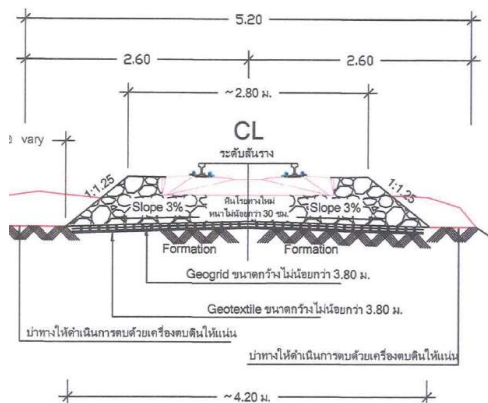
Fernandes et al. [3] ทำการทดสอบกับทางรถไฟจริงโดยแบ่งทางรถไฟออกเป็น 6 ส่วน มีรูปแบบดังนี้ S1 ไม่มีการเสริมกำลัง, S2 เสริมกำลังด้วย Geogrid วางที่ส่วนบน Subgrade, S3 เสริมกำลังด้วย Geogrid วางที่ส่วนบน Sub-ballast, S4 เสริมกำลังด้วย Geotextile วางที่ส่วนบนของ Sub-ballast, S5 เสริมกำลังด้วย Geotextile วางที่ส่วนบนของ Subgrade, และ S6 ไม่มีการเสริมกำลัง ผลการทดสอบพบว่าตำแหน่งที่ดีที่สุดในการให้ค่า Stiffness คือการเสริม Geogrid วางที่ส่วนบน Subgrade (S2) รองลงมาคือการเสริม Geogrid วางที่ส่วนบน Sub-ballast (S3) นอกจากนี้ยังพบอีกว่าส่วนที่เสริม Geogrid วางที่ส่วนบน Sub-ballast (S3) หรือ Section ที่

เสริม Geotextile (S4) ให้ค่า Strain ทั้งแนวตั้งและแนวนอนต่ำที่สุด และยิ่งพบอีกว่าใน Section ที่เสริม Geogrid วางที่ส่วนบน Sub-ballast (S3) ทำให้เกิดการแตกหักของ Ballast ที่น้อยที่สุด

จากงานวิจัยที่ได้ยกมาข้างต้นนี้จึงทำให้นำไปสู่การพยายามใช้วัสดุสังเคราะห์กับชั้นทางรถไฟ งานวิจัยนี้ศึกษาแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยใช้วัสดุสังเคราะห์เชิงประกอบคือ Geogrid และ Geotextile เสริมใต้ชั้นหินโรยทาง โดยศึกษาผลกระทบของวัสดุสังเคราะห์เชิงประกอบต่อพฤติกรรมของทางรถไฟภายใต้การใช้งานจริง

2. สถานที่ทำการทดสอบและแผนการทดสอบ

การทดสอบดำเนินการที่ทางรถไฟสายตะวันออกระหว่างสถานีแปดริ้ว - สถานีดอนสนิม นท์ ขาออกจากกรุงเทพฯ ช่วง กม.67+500 ถึง 68+000 ใน อ.เมืองฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา ทางรถไฟที่ทดสอบเป็นทางตรงยาวและติดตั้งวัสดุสังเคราะห์เชิงประกอบไว้ใต้ชั้นหินโรยทางลักษณะดังรูปที่ 1 วัสดุสังเคราะห์เชิงประกอบประกอบด้วย Geogrid TENSAR TX 190L กว้าง 3.8 เมตรวางบน Geotextile Tencate Mirafi HP 380 กว้าง 4.5 เมตร



รูปที่ 1 ลักษณะการเสริมกำลังด้วยการติดตั้ง Geogrid & Geotextile

การติดตั้งจะใช้วิธีการแบบ Cutter bar ซึ่งเป็นวิธีการติดตั้งที่ไม่จำเป็นต้องรื้อหรือโครงสร้างส่วนบนของทางรถไฟออก (ราง, หมอนรองราง และอุปกรณ์จับยึด) ซึ่งทำได้โดยการใช้เครื่องมือที่มีแขนที่มีความสามารถในการกวาดหินโรยทางบริเวณใต้หมอนรองรางดังในรูปที่ 2(a) จากนั้นโครงสร้างส่วนบนจะถูกยกขึ้นเพื่อทำการปู Geotextile (วางด้านล่าง) และ Geogrid (วางด้านบน) ดังรูปที่ 2(b) แล้วจึงทำการเติมหินโรยทางให้ท่วมโครงสร้างส่วนบนแล้วใช้รถอัดหินวิ่งผ่านเพื่อการบีบอัดหินใต้หมอนและปรับตำแหน่งของรางให้เหมาะสม



(a)



(b)

รูปที่ 2 การติดตั้ง Geogrid & Geotextile ด้วยวิธี Cutter bar

3. แผนการดำเนินการ

ในการทดสอบจะแบ่งเส้นทางเป็น 2 ส่วนโดยเรียกเส้นทางที่มีการเสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์เชิงประกอบว่า “Reinforced” และเส้นทางที่ไม่มีการเสริมกำลังว่า “Unreinforced” โดยทำการเลือกช่วงที่เป็นทางตรงยาวส่วนละ 100 เมตร และไม่มีโครงสร้างอย่างอุโมงค์หรือสะพาน ทำการทดสอบที่เวลาต่างๆ 4 ครั้ง การทดสอบในสนามจะเปรียบเทียบค่า (i) การเปลี่ยนแปลงระดับสันราง และ (ii) ค่าคุณภาพทาง (P-index) ส่วนการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะเปรียบเทียบค่า (i) percent of fouling และ (ii) BBI การทดสอบแต่ละครั้งกำหนดเวลาให้ห่างกันประมาณ 6 เดือน ในการวิเคราะห์จะทำการเปรียบเทียบข้อมูล 2 รอบดังนี้ (i) ครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 และ (ii) ครั้งที่ 3 กับครั้งที่ 4 เนื่องจากระหว่าง 2 รอบดังกล่าวเส้นทางรถไฟไม่ถูกรบกวนจากการวิ่งผ่านของรถอัดหิน

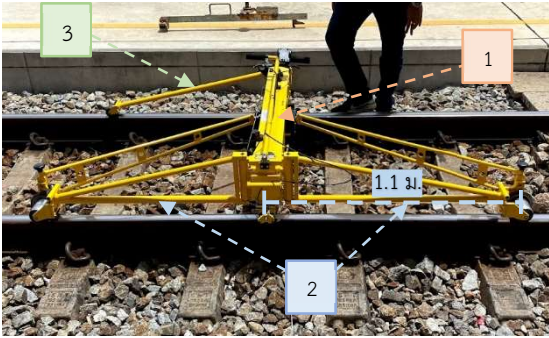
4. การทดสอบในสนาม

4.1 การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของระดับสันราง

ทำการใช้กล้องระดับเก็บค่าระดับของสันรางของทางรถไฟที่ตำแหน่งหมอนเว้นหมอนกับรางทั้ง 2 ข้างของทางรถไฟ (จากหมอนทั้งหมด 170 หมอน)

4.2 การตรวจวัดคุณภาพทาง

ใช้รถเข็นตรวจทางอิเล็กทรอนิกส์ TGM เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับในการวัดดัชนีความไม่สม่ำเสมอของทาง (Track Irregularity Index, P-index) โดยทำการเข็นเครื่อง TGM ไปตามเส้นทางที่ต้องการจะวัด เครื่องจะตรวจวัดค่าสภาพทางทุกๆ 25 เซนติเมตร รูปที่ 3 แสดงลักษณะของเครื่อง TGM ซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วนดังนี้



รูปที่ 3 รถเข็นตรวจทางอิเล็กทรอนิกส์ TGM

ส่วนที่ 1 ท่อนราง ที่สามารถปรับหด-ขยายในแนวแกนได้ตามความกว้างของทางรถไฟและที่ส่วนปลายทั้ง 2 ข้างมีความยืดหยุ่นเพื่อให้สอดคล้องกับเส้นทางที่มีความสูงรางทั้งสองฝั่งที่ไม่เท่ากัน ในส่วนที่ 1 นี้ทำหน้าที่วัดค่าขนาดทาง (Gauge) หากรางทั้งสองฝั่งมีระยะห่างน้อยกว่า 1 เมตรให้มีค่าเป็น “ลบ” แต่หากมีระยะห่างมากกว่า 1 เมตรให้มีค่าเป็น “บวก” และวัดค่าระดับตามขวาง (Cross Level, Cant) ของทางรถไฟ โดยให้ข้างหนึ่งเป็นจุดอ้างอิง หากอีกฝั่งมีระดับต่ำกว่าให้มีค่าเป็น “ลบ” หรือหากสูงกว่าให้มีค่าเป็น “บวก”

ส่วนที่ 2 ท่อนคู่ในฝั่งรางเดียวกัน ชิ้นส่วนทั้งคู่ที่มีความยาว 1 เมตร และ 1.1 เมตร ส่วนนี้ทำหน้าที่วัดค่าแนวราง (Alignment, AL) ปลายทั้งสองด้านจะทำหน้าที่เป็นจุดอ้างอิงแล้ววัดค่าระยะตั้งฉากในแนวนอนกับราง ณ จุดกึ่งกลางระหว่างท่อนคู่นี้ หากมีค่าเป็น “บวก” แสดงว่าแนวรางคดออกหาศูนย์กลางทาง หากมีค่าเป็น “ลบ” แสดงว่าแนวรางคดเข้าหาศูนย์กลางทาง

ส่วนที่ 3 ท่อนเดี่ยวขนานราง ชิ้นส่วนมีความยาว 1 เมตร ที่ปลายมีล้อติดอยู่ ส่วนนี้ทำหน้าที่วัดค่าความแตกต่างของระดับสันรางเดียวกัน (TOP Profile, Top) โดยมีปลายด้านหนึ่งเป็นจุดอ้างอิงหากอีกฝั่งมีค่าสูงกว่าให้มีค่าเป็น “บวก” หรือหากมีค่าต่ำกว่าให้มีค่าเป็น “ลบ”

4.3 ดัชนีความไม่สม่ำเสมอของทาง (Track Irregularity Index, P-index)

องค์ประกอบสำคัญที่สุดของสภาพทางที่คืนันขึ้นอยู่กับ “มิติทางเรขาคณิต (Track Geometry)” ซึ่งประกอบด้วยค่าความคลาดเคลื่อน (ค.ค.ค.) ดังนี้ [4]

- (i) Gauge - ขนาดทางที่ระยะถูกต้องตามมาตรฐาน คือ ทางตรงต้องได้ 1000 มิลลิเมตร และทางโค้งต้องมีการขยายทางให้พอดีตามรัศมีโค้ง
- (ii) Cross Level (Cant) - ทางระดับของรางทั้งสองข้างที่จุดตรงกันต้องเท่ากันสำหรับทางตรง และสำหรับทางโค้งต้องมีการยกรางนอกสูงกว่ารางในตามค่ายกโค้ง
- (iii) Surface (Top) - ระดับสันรางทุกจุดบนสันรางซึ่งวัดไปตามความยาวของรางต้องเท่ากันในทางราบหรือเปลี่ยนแปลงไปที่ละเท่าๆกันในทางที่มีลาด (ในลักษณะของอันดับบวทวิ) หรือการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าการเพิ่มหรือลดระดับของทางที่มีโค้งมุมตั้งการวัดค่าระดับตามยาวให้วัดทั้ง 2 ราง
- (iv) Alignment (AL) - แนวรางต้องเป็นเส้นตรงในทางตรงและเป็นรูปโค้งอย่างสม่ำเสมอในทางโค้ง การวัดสอบแนวรางให้วัดทั้ง 2 ราง
- (v) Twist (Tw) - ความแตกต่างของค่าระดับตามขวาง (Cant) ระหว่างจุด 2 จุดในทางต้องไม่มากเกินไป

ค่า P-index แต่ละรายการหาได้โดยนำค่า ค.ค.ค. ค่าย่อยแต่ละค่า (Cant, Top, AL, และ Tw) ในทางช่วงใดช่วงหนึ่งไปวิเคราะห์โดยอาศัยกระบวนการทางสถิติโดยการเขียนกราฟประมัตถ์กว่าที่เรียกว่า “โค้งปกติ (Normal Curve)” ซึ่งเขียนโดยใช้ค่าเฉลี่ย (m) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่า ค.ค.ค. ดังนี้

$$m = \text{ผลรวมของ } f_i X_i / N$$

$$SD = \sqrt{(S_0^2 - m^2)} ; S_0^2 = \text{ผลรวมของ } f_i X_i^2 / N$$

โดยที่ m = ค่าเฉลี่ยของ ค.ค.ค. $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ (มม.)

N = จำนวนจุด หรือความถี่ของ ค.ค.ค. แต่ละค่า

SD = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) (มม.)

จากนั้นกำหนดค่าของ Limit of Tolerance (a) ไว้ค่าหนึ่ง ทั้งทาง + และทาง - ซึ่ง การรถไฟไทย (รฟท.) กำหนดค่า a เท่ากับ 3 มิลลิเมตร กราฟในส่วนที่เกิน Limit of Tolerance จะนำมาคำนวณคิดเป็นสัดส่วนพื้นที่เทียบกับพื้นที่กราฟทั้งหมดซึ่งจะทำให้ได้ P-index ของแต่ละค่าย่อย จากนั้นคำนวณ P-index ดังสมการที่ (1)

$$P_{Index} = \frac{1}{5} (P_{Cant} + P_{Top} + 2P_{AL} + P_{Tw}) \quad (1)$$

รฟท. กำหนดค่า P-index ให้เหมาะสมกับสภาวะของการบำรุงทางโดยคำนึงถึงด้านความสามารถในการปฏิบัติให้มีความประหยัดและให้มีความสะดวกสบายแก่ผู้โดยสารเป็นประการสำคัญ โดยแบ่งพิสัยของสภาพทางออกเป็น 5 ระดับดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระดับค่าดัชนีความไม่สม่ำเสมอของทาง (P-index)

สภาพทาง	ค่าหรือค่าแต่ละรายการ (%)					P-index (%)
	ระดับ	Top	Cant	Al	Tw	
ดีมาก	A	0 – 13	0 – 5	0 – 9	0 – 14	0 – 10
ดี	B	14 – 20	6 – 13	10 – 20	15 – 27	11 – 20
พอใช้	C	21 – 30	14 – 22	21 – 31	28 – 36	21 – 30
เสีย	D	31 – 40	23 – 31	32 – 41	37 – 46	31 – 40
เสียมาก	E	41 ขึ้นไป	32 ขึ้นไป	42 ขึ้นไป	47 ขึ้นไป	41 ขึ้นไป

5. การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ได้มีการเก็บตัวอย่างหินโรยทางจากในสนามโดยเลือกเก็บส่วนได้หมอนรองรางเพื่อนำมาทดสอบหาขนาดคละ โดยใช้ขนาดของตะแกรงดังนี้ 2", 1½", 1", ¾", ½", 3/8", #4, #16, #40, #60, #100, และ #200 และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D422, D1140, D6913 (wet sieving) และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติดังต่อไปนี้

5.1 การปนเปื้อนของหินโรยทาง (Ballast fouling)

Selig & Walter [1] ได้นิยาม percent of fouling คือน้ำหนักแห้งของหินโรยทางส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 9.5 มม.(3/8 นิ้ว) ต่อน้ำหนักแห้งทั้งหมด และแบ่งระดับการปนเปื้อนดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระดับชั้นของค่า Percentage of fouling

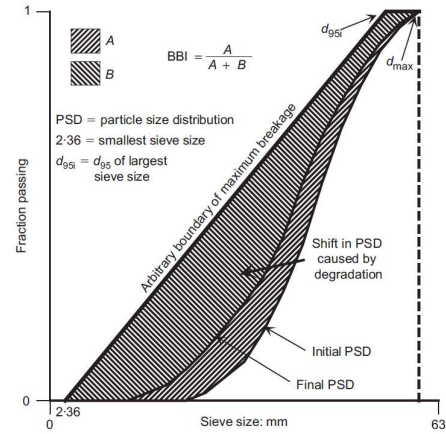
Category	Percentage of fouling (%)
Clean	< 2
Moderately clean	2 to 9.5
Moderately fouled	9.5 to 17.5
Fouled	17.5 to 34
Highly fouled	≥ 34

5.2 Ballast Breakage Index (BBI)

Indraratna *et al.* [5] ได้นิยามดัชนีการแตกหัก (BBI) จากการเปลี่ยนแปลงของกราฟขนาดคละของอนุภาค (PSD) ดังรูปที่ 4 และสมการที่ (2) โดยขอบเขตเส้น Arbitrary boundary of Maximum Breakage คือเส้นที่ลากจากจุดของค่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 95% ของขนาดช่องของตะแกรงร่อนเปิดสูงสุดกับจุดขนาดช่องเปิดเล็กที่สุดของตะแกรงร่อน

$$BBI = \frac{A}{A+B} \quad (2)$$

เมื่อ A = พื้นที่ระหว่างเส้นโค้ง PSD เริ่มต้นและสุดท้าย
B = พื้นที่ระหว่าง PSD สุดท้ายและขอบเขตเส้น Arbitrary boundary of Maximum Breakage



รูปที่ 4 การคำนวณค่า BBI [5]

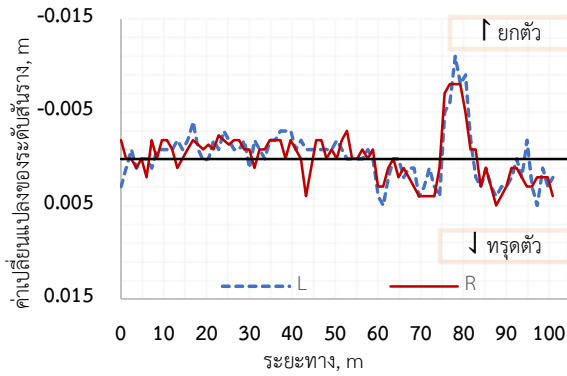
6. ผลการทดสอบ

6.1 การเคลื่อนตัวของระดับสันราง

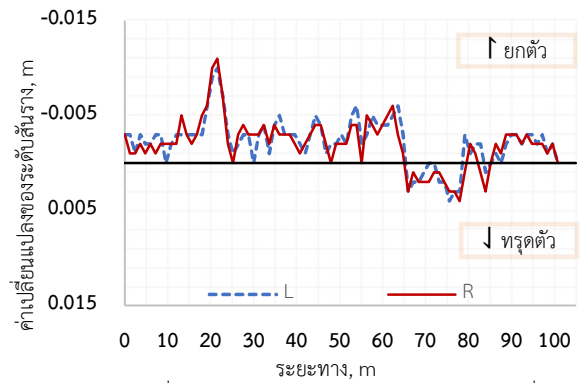
รูปที่ 5 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงของระดับสันรางกับระยะทาง (ค่าบวกคือทรุดตัวลง ค่าลบคือยกตัวขึ้น) ส่วน Unreinforced รอบที่ 1 ดังรูปที่ 5(a) จะสังเกตเห็นว่าสันรางส่วนใหญ่ในช่วง 0 - 60 เมตรแรก สันรางแทบจะไม่มีการเคลื่อนตัวยกขึ้นหรือทรุดตัวลง ในช่วงระยะทาง 60 - 70 และ 85 - 100 เมตร สันรางทรุดตัวลงสูงสุด 0.005 เมตร และในช่วงระยะทาง 70 - 85 เมตร สันรางมีการยกตัวขึ้นสูงสุด -0.010 เมตร และรอบที่ 2 ดังรูปที่ 5(b) พบว่าในช่วง 0 - 65 เมตร สันรางมีการยกตัวขึ้นสูงสุด -0.010 เมตร ช่วง 65 - 80 เมตร สันรางมีการทรุดตัวลงสูงสุด 0.005 เมตร และช่วง 80 - 100 เมตร ยกตัวขึ้นสูงสุด -0.003 เมตร

ส่วน Reinforced รอบที่ 1 ดังรูปที่ 5(c) พบว่าสันรางตลอดระยะทาง 100 เมตร มีค่าทรุดตัวเล็กน้อย โดยทรุดตัวลงสูงสุดที่ 0.005 เมตร และรอบที่ 2 รูปที่ 5(d) พบว่าช่วง 0 - 20 เมตร แรกสันรางมีการทรุดตัวลงสูงสุด 0.007 เมตร และ 20 - 100 เมตร สันรางมีการยกตัวขึ้นสูงสุด -0.005 เมตร

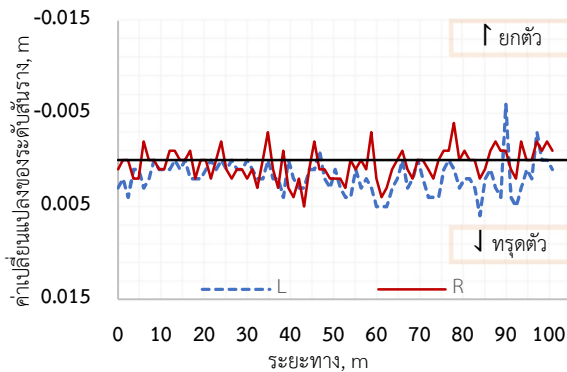
ข้อมูลดังตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยในส่วน Unreinforced รอบที่ 1 พบว่าสันรางมีการยกตัวขึ้นสูงสุดที่รางฝั่งซ้ายเท่ากับ -0.0003 เมตร และรอบที่ 2 จะพบผลที่สอดคล้องกันเนื่องจากสันรางมีการยกตัวขึ้นสูงสุดที่รางฝั่งซ้ายเช่นกันเท่ากับ -0.0023 เมตร ในส่วน Reinforced รอบที่ 1 มีค่าทรุดตัวลงสูงสุดที่รางฝั่งซ้ายเท่ากับ 0.0018 เมตร แต่ในรอบที่ 2 พบว่ามีสันรางมีการยกตัวขึ้นมีค่าสูงสุดที่รางฝั่งขวาเท่ากับ -0.0019 เมตร นอกจากนี้ยังพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยส่วน Unreinforced มีค่าสูงกว่าส่วน Reinforced ในทั้ง 2 รอบซึ่งบ่งบอกว่าการเสริมกำลังนั้นช่วยทำให้สันรางมีค่าที่สม่ำเสมอมากขึ้น



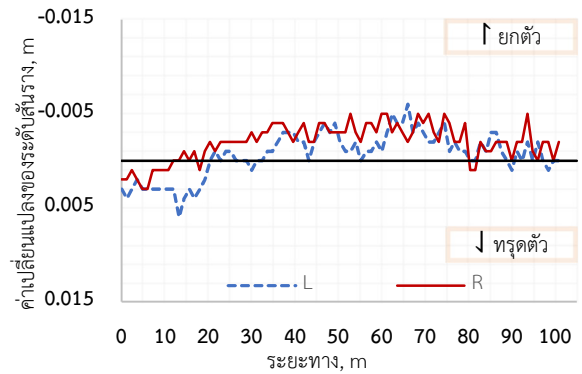
(a) ค่าการเปลี่ยนแปลงของระดับเส้นทาง Unreinforced รอบที่ 1



(b) ค่าการเปลี่ยนแปลงของระดับเส้นทาง Unreinforced รอบที่ 2



(c) ค่าการเปลี่ยนแปลงของระดับเส้นทาง Reinforced รอบที่ 1



(d) ค่าการเปลี่ยนแปลงของระดับเส้นทาง Reinforced รอบที่ 2

รูปที่ 5 ค่าการเปลี่ยนแปลงของระดับเส้นทางกับระยะทาง

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการเปลี่ยนแปลงของเส้นทาง

Section	ฝั่งของราง	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของระดับเส้นทาง, m	SD, m	SD เฉลี่ย, m
Unreinforced รอบที่ 1	L	-0.0003	0.0028	0.0028
	R	-0.0001	0.0027	
Unreinforced รอบ 2	L	-0.0023	0.0025	0.0025
	R	-0.0020	0.0026	
Reinforced รอบที่ 1	L	0.0018	0.0018	0.0017
	R	0.0005	0.0017	
Reinforced รอบที่ 2	L	-0.0006	0.0024	0.0022
	R	-0.0019	0.0020	

6.2 Track irregularity index (P-index)

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดลองที่ได้จาก TGM ซึ่งพบว่าปัญหาของทางรถไฟที่ได้ทดสอบนี้มีมากที่สุด ในค่า Top หรือการเปลี่ยนแปลงของระดับผิวรางรถไฟ เนื่องจากมีค่าที่สูงสุดที่มีอิทธิพลต่อ P-index รวม ของทุกๆ Section ทุกรอบการวัด จากข้อมูลจะเห็นได้ว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของ P-index รวมของ Reinforced

Section มีค่าที่ต่ำกว่า Unreinforced Section ทั้ง 2 รอบ ซึ่งหมายความว่า การสูญเสียความไม่สม่ำเสมอของรูปร่างเรขาคณิตของทางรถไฟใน Reinforced Section มีอัตราที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 4 ค่าของ Top, Cant, AL, Tw, P-index, และค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของ P-index

Section	เวลา, วัน	Top, %	Cant, %	AL, %	Tw, %	P-index, %	Rate of P-index, %/month
Unreinforced รอบที่ 1	เริ่มต้น	20.31	0.01	0.92	0.75	4.40	0.0086
	171	22.92	0.03	5.12	1.32	5.88	
Unreinforced รอบที่ 2	เริ่มต้น	0.39	0.00	3.47	0.04	0.78	0.0045
	107	1.90	0.00	4.28	0.10	1.26	
Reinforced รอบที่ 1	เริ่มต้น	8.25	0.00	0.15	0.50	1.78	0.0037
	171	8.40	0.00	3.58	0.06	2.41	
Reinforced รอบที่ 2	เริ่มต้น	1.40	0.59	2.61	0.90	1.10	0.0003
	107	1.40	0.60	2.74	0.93	1.13	

6.3 Percent of fouling

จากตารางที่ 5 แสดงให้เห็นถึงค่า % fouling จะพบว่าสำหรับ Unreinforced Section ในรอบที่ 2 มีค่าสูงจนถูกจัดให้เป็น Moderately Clean แต่อย่างไรก็ตามอัตราการเพิ่มขึ้นของ %

fouling ก็ยังไม่สามารถบอกได้อย่างชัดเจนว่าทาง Reinforced Section นั้นมีสภาพที่ดีกว่า

ตารางที่ 5 ค่า percentage of fouling

	รอบที่	ระยะเวลา, วัน	fouling initial, %	Fouling final, %	Fouling เพิ่มขึ้น, %/เดือน
New ballast			0.09 (Clean)		
Unreinforced	1	163	0.91 (Clean)	1.25 (Clean)	0.34
	2	160	2.02 (Moderately Clean)	2.39 (Moderately Clean)	0.37
Reinforced	1	163	0.46 (Clean)	1.27 (Clean)	0.81
	2	160	0.36 (Clean)	0.37 (Clean)	0.01

6.4 Ballast breakage index (BBI)

ตารางที่ 6 แสดงค่า BBI ซึ่งมีผลสอดคล้องกับ % fouling โดยพบว่าในรอบที่ 1 เส้นทาง Unreinforced Section นั้นให้ค่าที่ต่ำกว่า แต่ในรอบที่สองกลับเป็น Reinforced Section ให้ค่าที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 6 ค่า BBI

	รอบที่	BBI
Unreinforced	1	0.095
	2	0.102
Reinforced	1	0.173
	2	0.056

7. สรุปผลการทดลอง

ผลการศึกษาทางรถไฟที่มีการเสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์เชิงประกอบ (Geogrid และ Geotextile) สำหรับเส้นทางที่ได้ศึกษานั้น พบว่าการเสริมกำลังมีผลช่วยลดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานการเปลี่ยนแปลงของค่าระดับสันรางลงได้เมื่อเทียบกับทางรถไฟที่ไม่มีการเสริมกำลังและช่วยลดดัชนีความไม่สม่ำเสมอของทาง (P-index) ลงได้ แต่พบว่าการเสริมกำลังนี้ไม่ได้มีผลต่อการลดการแตกหักของหินโรยทางลง โดยผลการศึกษาแสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสันรางในแนวตั้งมีน้อยมาก (ยกขึ้นสูงสุด -0.002 เมตร และทรุดตัวสูงสุด 0.0018 เมตร) จึงสรุปได้ว่าการเสริมกำลังไม่ได้มีผลมากต่อการเปลี่ยนแปลงของสันรางในแนวตั้ง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อดูค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งบ่งบอกถึงความสม่ำเสมอของการทางจะพบว่าการเสริมกำลังนั้นช่วยทำให้เส้นทางมีความสม่ำเสมอมากกว่าแบบไม่เสริมกำลัง ข้อมูลที่ได้จาก TGM ให้ค่า Top (ซึ่งเป็นค่าผลต่างของระดับสันรางในแนวตั้งที่ห่างกัน ทุกๆ 25 เซนติเมตร) สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการ Survey คือพบว่าค่า Top เป็นค่าที่มีปัญหามากที่สุดโดยเฉพาะใน Unreinforced Section ที่ได้ในการทดสอบครั้งที่ 1 มีค่า Top ถึง 22.92% อัตราการเพิ่มขึ้นของ P-index รวมพบว่าใน Reinforced Section มีอัตราการเพิ่มที่ต่ำกว่า Unreinforced Section นั้น

หมายความว่า การเสริมกำลังเป็นผลดีต่อคุณภาพทาง จากผลการทดสอบหินโรยทางพบว่าค่า % fouling และ BBI ของทั้ง 2 Section มีค่าคล้ายกัน ทำให้สรุปได้ว่าการเสริมกำลังนั้นไม่ได้มีผลช่วยลดการแตกหักของหินโรยทางลงได้โดยผลการทดสอบที่ได้สอดคล้องกับ Hussaini et al. [6] ซึ่งพบว่า Geogrid บางชนิดไม่ส่งผลลดค่า BBI ลง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยบูรพา “งบประมาณเงินอุดหนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund ปีงบประมาณ พ.ศ. 2566” เลขที่สัญญา วรรณ 39/2566 และได้รับทุนสนับสนุนการทำวิจัย จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา นอกจากนี้ยังได้รับการสนับสนุนจากกองทุนวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยบูรพา ในการจัดตั้งหน่วยวิจัยวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นฐานเพื่อความยั่งยืน ขอขอบคุณการรถไฟแห่งประเทศไทยที่ให้ความอนุเคราะห์ในการศึกษานี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Selig E.T. and Waters J.M. (1994). *Track Geotechnology and Substructure Management*. Thomas Telford Publishing, 446 pp.
- [2] Bathurst R.J. and Raymond G.P. (1987). *Geogrid Reinforcement of Ballasted Track*. Transportation Research Record 1153, pp.8-14
- [3] Fernandes G. , Paleira E.M. and Gomes R.C. (2008). *Performance of geosynthetic-reinforced alternative sub-ballast material in a railway track*. Geosynthetics International, 15, No. 5, October 2008, pp.311-321
- [4] การรถไฟแห่งประเทศไทย (2538). *คู่มือบำรุงทาง พ.ศ. 2538*. ฝ่ายการช่างโยธา, 447 หน้า.
- [5] Indraratna B. Lackenby J. and Christie D. (2005). *Effect of confining pressure on the degradation of ballast under cyclic loading*. Geotechnique 55, No. 4, May 2005, pp.325-328
- [6] Hussaini S.K.K. , Indraratna B. and Vinod J.S. (2016). *A laboratory investigation to assess the functioning of railway ballast with and without geogrids*. Transportation Geotechnics Volume 6, March 2016, pp.45-54