

พฤติกรรมของโครงสร้างฐานรากทางรถไฟภายใต้แรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักรถไฟ

The Behavior of Sub Structure of Railway Train-Induce Load

ฐิตินันท์ อินธนะ¹, ธนันท์ ชุบอุปการ^{2*}, ธนิต เฉลิมยานนท์³ และชยุตพงศ์ มานะกุล⁴

^{1,2,3,4} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา

*Corresponding author; E-mail address: tanan.c@psu.ac.th

บทคัดย่อ

โครงสร้างฐานรากของทางรถไฟ ประกอบด้วย ชั้นดินเดิม (Subsoil) ชั้นรองพื้นทาง (Subgrade) ชั้นรองหินโรยทาง (Sub ballast) และชั้นหินโรยทาง (Ballast) ซึ่งพฤติกรรมการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงกระทำแบบพลศาสตร์เนื่องจากการเดินรถเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โครงสร้างฐานรากทางรถไฟเกิดความเสียหาย จนเป็นเหตุให้เกิดอุบัติเหตุ ความล่าช้า และความไม่สะดวกสบายในการโดยสาร แต่การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนโดยตรงทำได้ยาก เนื่องจากโครงสร้างฐานรากของทางรถไฟมีส่วนประกอบหลายชั้น ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ จะทำการประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างฐานรากของทางรถไฟ เมื่อได้รับแรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักรถไฟแบบสถิตย์ศาสตร์ (Static Load) เปรียบเทียบที่คุณภาพวัสดุต่าง ๆ ของโครงสร้างฐานรากทางรถไฟ โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม PLAXIS 3D ผลการวิเคราะห์ พบว่า เมื่อชั้นวัสดุโครงสร้างมีคุณภาพแย่ โครงสร้างทางรถไฟมีค่าการทรุดตัวสูงสุดประมาณ 30.0 มิลลิเมตร มีค่าการกระจายความเค้นสูงสุดในแนวตั้ง ประมาณ 0.11 MPa และค่าโมดูลัสมีค่าการกระจายตัวมากที่สุดอยู่ในช่วง 5,000 – 80,000 MPa ในโครงสร้างชั้นดินเดิม แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติในชั้นดินเดิมมีผลต่อการโก่งตัวของทางรถไฟมากกว่าชั้นทางอื่น ๆ ดังนั้นในการซ่อมบำรุงทางรถไฟควรให้ความสำคัญในการปรับปรุง ซ่อมแซมในโครงสร้างชั้นดินเดิมด้วย นอกเหนือจากการปรับปรุงในชั้นหินโรยทาง

คำสำคัญ: โครงสร้างฐานรากทางรถไฟ, สถิตย์ศาสตร์, น้ำหนักรถไฟ

Abstract

The vibration behavior in rail transport systems can cause significant damage to train foundations, leading to accidents, delays, and discomfort for passengers. The substructure of the railway includes several materials, including subsoil, subgrade, sub ballast, and ballast, making it challenging to conduct dynamic forces analysis. In this project, we aim to evaluate the behavior of substructures of railway train-induced load by static load method compared to the quality of the track substructure by 3D simulation via PLAXIS 3D software. Our

results show that the maximum displacement is 30.0 millimeters, the maximum vertical stress is 0.11 MPa, and the distribution of track modulus was in the subsoil range of 5,000 – 80,000 MPa when the track substructure was poor quality.

Keywords: Sub Structure of Railway, Static analysis, Train load

1. บทนำ

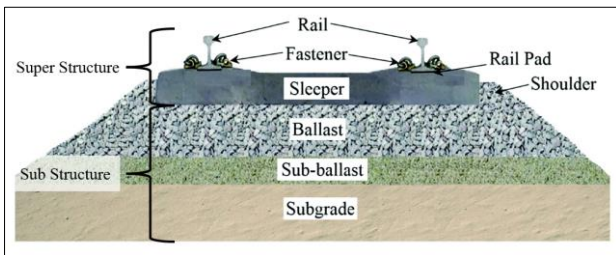
การคมนาคมขนส่งทางรถไฟ หรือการขนส่งทางราง นับว่าเป็นการขนส่งที่อยู่กับคนไทยมาตั้งแต่อดีตจนปัจจุบัน เนื่องจากมีเส้นทางที่ครอบคลุมพื้นที่ทั่วทุกภาคของประเทศไทย และประชาชนสามารถเข้าถึงได้อย่างสะดวก อย่างไรก็ตามพบว่าการรถไฟแห่งประเทศไทยมีค่าใช้จ่ายจำนวนมากในการบำรุงรักษาทางรถไฟทั้งระบบเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยเฉพาะการบำรุงรักษาในส่วนของปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อความเสี่ยงต่าง ๆ เพื่อให้ประชาชนที่ใช้บริการได้รับความปลอดภัยสูงสุดในการใช้บริการ จากการศึกษาพบว่าปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความปลอดภัย คือการสูญเสียเสถียรภาพของโครงสร้างฐานรากของทางรถไฟ อันเป็นผลจากความสามารถในการรับน้ำหนัก และแรงสั่นสะเทือนเนื่องจากการเดินรถ จากการศึกษาในอดีตพบว่าความเสียหายของโครงสร้างฐานรากทางรถไฟ และการเสียรูปของทางรถไฟ มีหลากหลายสาเหตุ เช่น น้ำในชั้นทาง แรงกระทำเนื่องจากขบวนรถ ความถี่เนื่องจากขบวนรถ และการปนเปื้อนของหินโรยทาง ซึ่งส่งผลให้เกิดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงที่ไม่ได้คาดคิด ดังนั้นเพื่อที่จะจัดการกับปัญหาและลดค่าใช้จ่ายเนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างฐานรากทางรถไฟอย่างเหมาะสม จำเป็นจะต้องเข้าใจพฤติกรรมความเสียหายของฐานรากต่อแรงกระทำและการเสียรูปที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำแบบสถิตย์ศาสตร์ (น้ำหนักคงที่ของรถไฟ)

บทความฉบับนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างฐานรากของทางรถไฟเมื่อได้รับแรงกระทำจากน้ำหนักรถไฟแบบสถิตย์ศาสตร์ (Static Load) เท่านั้น โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 3D ซึ่งทำการจำลองโครงสร้างทางรถไฟแบบ 3 มิติ และวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณภาพวัสดุของฐานรากทางรถไฟที่มีคุณภาพแย่ (Poor) คุณภาพมาตรฐาน (Standard) และคุณภาพดีเยี่ยม (Excellent) ของแต่ละชั้นวัสดุของโครงสร้างฐานรากทางรถไฟ เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพของโครงสร้างฐานรากทางรถไฟให้มีเสถียรภาพเพียงพอต่อการใช้งานใน

ปัจจุบัน เช่น โครงการก่อสร้างทางรถไฟทางคู่ และโครงการรถไฟความเร็วสูงที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

2. โครงสร้างฐานรากทางรถไฟ

ทางรถไฟของประเทศไทยในปัจจุบันมีระยะทางรวม 4,044 กิโลเมตร แบ่งเป็น โครงสร้างทางรถไฟแบบทางเดี่ยว 3,687 กิโลเมตร ทางคู่ 250 กิโลเมตร และทางสาม 107 กิโลเมตร [1] โดยส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง (Railway Ballasted Track) ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วยโครงสร้างส่วนบน และโครงสร้างส่วนล่าง ดังรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 1 โครงสร้างฐานรากของทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง [2]

2.1 โครงสร้างส่วนบน (Super Structure)

โครงสร้างส่วนบน (Super Structure) ประกอบด้วย รางรถไฟ (Rail) อุปกรณ์ยึดจับรางรถไฟ (Fastener) และหมอนรองรางรถไฟ (Sleeper)

2.1.1 รางรถไฟ (Rail)

รางรถไฟ คือ โครงสร้างเหล็กตามแนวยาว มีหน้าที่นำทางล้อรถไฟให้วิ่งไปตามรางที่มีความเรียบและต่อเนื่อง สามารถรับน้ำหนักได้ในลักษณะเดียวกับคาน และถ่ายน้ำหนักลงสู่หมอนรองรางรถไฟ

2.1.2 อุปกรณ์ยึดจับรางรถไฟ (Fastener)

อุปกรณ์ยึดจับรางรถไฟ มีหน้าที่ในการยึดรางให้ติดกับหมอนรองรางรถไฟ ซึ่งจะช่วยให้รางมีความมั่นคง และต้านการเคลื่อนที่ของรางรถไฟ

2.1.3 หมอนรองรางรถไฟ (Sleeper)

หมอนรองรางรถไฟ ปัจจุบันผลิตจากคอนกรีตอัดแรง มีหน้าที่ช่วยจับยึดรางรถไฟให้อยู่กับที่ และยึดรางรถไฟทั้งสองรางให้มีระยะห่างเท่ากัน รวมถึงช่วยถ่ายน้ำหนักจากล้อรถไฟลงสู่ชั้นหินโรยทาง

2.2 โครงสร้างส่วนล่าง (Sub Structure)

โครงสร้างส่วนล่าง (Sub Structure) ประกอบด้วย ชั้นหินโรยทาง (Ballast) ชั้นรองชั้นหินโรยทาง (Sub Ballast) ชั้นรองพื้นทาง (Sub grade) และชั้นดินเดิม (Subsoil)

2.2.1 ชั้นหินโรยทาง (Ballast)

คือวัสดุที่ใช้โรยทางและทำการบดอัดในชั้นบนสุดของโครงสร้างฐานราก ซึ่งอยู่ใต้หมอนรองรางรถไฟ โดยปกติแล้วหินที่มีความแข็ง, มีเหลี่ยมมุม, และมีความต้านทานต่อการขีดสีนี้ เป็นองค์ประกอบที่จะช่วยให้ทางรถไฟเป็น

ทางที่สมบูรณ์แบบ มีหน้าที่ให้ความยืดหยุ่นและดูดซับพลังงานจากรางรถไฟดูดซับเสียงในอากาศ ช่วยในการระบายน้ำเมื่อน้ำขัง และยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชบนทางรถไฟ [3]

2.2.2 ชั้นรองใต้หินโรยทาง (Sub Ballast)

ชั้นรองใต้หินโรยทาง เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นหินโรยทาง และชั้นรองพื้นทาง โดยมีหน้าที่ลดแรงกระทำให้อยู่ในระดับที่ชั้นรองพื้นทางหรือชั้นดินเดิมสามารถรับได้ และป้องกันการแทรกซึมของมวลละเอียดและดินเดิม รวมถึงป้องกันการเกิดน้ำขังในชั้นหินโรยทางซึ่งเป็นสาเหตุของการผุกร่อนในชั้นหินโรยทาง [3]

2.2.3 ชั้นรองพื้นทาง (Subgrade)

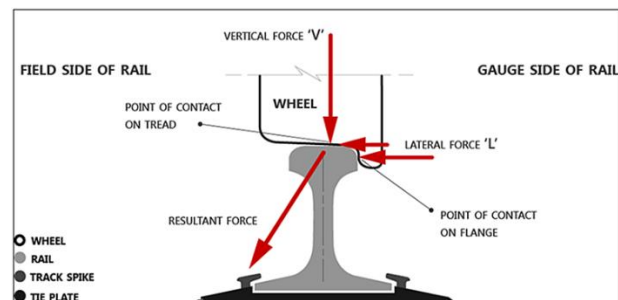
ชั้นรองพื้นทาง เป็นชั้นที่ใช้สำหรับการรองรับการก่อสร้างโครงสร้างฐานรากทางรถไฟให้มีความเสถียรภาพ โดยอิทธิพลจากแรงกระทำที่เกิดจากขบวนรถไฟ ซึ่งแรงที่กระทำนั้นสามารถส่งผลกระทบต่อลึกประมาณ 5 เมตร ภายใต้มอนรองรางรถไฟ ซึ่งเป็นความลึกที่มากกว่าความลึกของชั้นหินโรยทางและชั้นรองใต้ชั้นหินโรยทาง ดังนั้น ชั้นรองพื้นทางจึงเป็นโครงสร้างที่มีความสำคัญ และยังมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของทางรถไฟและการบำรุงรักษา [3]

2.2.4 ชั้นดินเดิม (Subsoil)

ชั้นดินเดิม คือ องค์ประกอบของฐานรากทางรถไฟที่อยู่ด้านล่างสุด ชั้นดินเดิมควรเป็นดินชนิดที่ที่มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักของโครงสร้างทางรถไฟชั้นอื่น ๆ และน้ำหนักจากรถเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟได้

3. แรงกระทำที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างทางรถไฟ

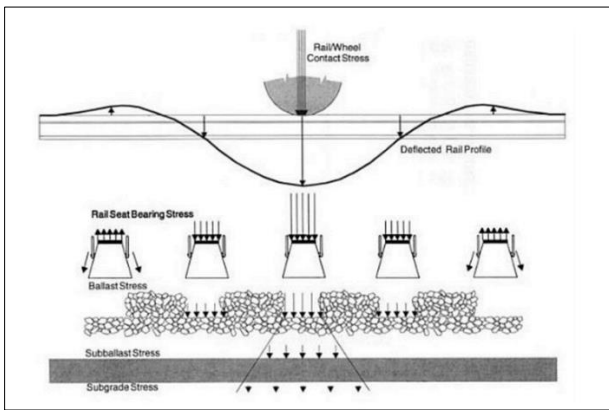
เมื่อขบวนรถไฟวิ่งอยู่บนทางรถไฟจะมีแรงกระทำที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างทางรถไฟ มีทั้งแบบสถิตยศาสตร์ (Static Load) และแบบพลศาสตร์ (Dynamic Load) ซึ่งส่งผลกระทบต่อโครงสร้างฐานรากของทางรถไฟทั้งโครงสร้างส่วนบน และโครงสร้างส่วนล่าง สามารถแบ่งแรงกระทำได้เป็น 3 แรง ได้แก่ แรงในแนวตั้ง (Vertical Force) แรงด้านข้าง (Lateral Force) และแรงตามแนวยาว (Longitudinal Force) ดังแสดงในรูปที่ 2 อย่างไรก็ตามการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างฐานรากภายใต้แรงกระทำแบบสถิตยศาสตร์ เนื่องจากน้ำหนักของรถไฟ (แรงในแนวตั้ง) เท่านั้น



รูปที่ 2 แรงกระทำที่เกิดขึ้นบนรางรถไฟ [4]

3.1 แรงในแนวตั้ง (Vertical Force)

แรงในแนวตั้ง พิจารณาจากแรงที่ตั้งฉากกับระนาบของรางรถไฟ คือ แรงที่เกิดจากล้อของรถไฟเนื่องจากน้ำหนักของรถไฟ มีค่าเท่ากับ 20 ตัน เพลลา แรงในแนวตั้งที่กระทำจะทำให้รางรถไฟโก่งตัวต่ำลงที่จุดของล้อ สัมผัสกับราง และส่วนที่ห่างออกไปทั้งหลังและหน้ารางจะยกขึ้นดังแสดงใน รูปที่ 3 ถ้าแรงยกไม่สามารถทดแทนด้วยน้ำหนักของรางและหมอนรองราง รวมถึงแรงเสียดทานของหินโรยทางด้วย การเคลื่อนตัวนี้จะเป็นสาเหตุของการเกิด Pumping ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพของส่วนประกอบของ โครงสร้างทางรถไฟ โดยสามารถคำนวณหาค่าน้ำหนักล้อพลศาสตร์ (P_d ขณะรถไฟเคลื่อนที่) สำหรับการออกแบบโครงสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรย ทางจากน้ำหนักล้อสถิตยศาสตร์ (P_s ไม่มีการเคลื่อนที่ของรถไฟ) ได้จาก สมการที่ (1) [5]



รูปที่ 3 ลักษณะการกระจายแรงจากล้อรถไฟไปสู่โครงสร้างฐานราก [4]

$$P_d = \phi P_s \quad (1)$$

โดยที่ P_d คือ น้ำหนักรถไฟขณะเคลื่อนที่ (kN), ϕ คือ ค่าการ กระแทก (Impact factor) และ P_s คือ น้ำหนักรถไฟไม่มีการเคลื่อนที่ (kN) สำหรับค่าการกระแทก (Impact factor) ได้แปรเปลี่ยนตามปัจจัย หลายชนิด ได้แก่ ความเร็วรถ น้ำหนักรถ ความแข็งเกร็งของระบบกัน สะเทือนของรถ และคุณภาพหรือสภาพทางรถไฟ [5]

จากรูปที่ 3 สามารถคำนวณหาแรงที่มากที่สุดที่ผิวสัมผัสระหว่างราง รถไปกับหมอนรองรางซึ่งพัฒนาจากทฤษฎีอิลาสติก โดยสมมติให้ราง หมอนรองราง และชั้นโครงสร้างทางส่วนล่างเป็นอิลาสติกได้ตั้งสมการที่ (2) และแรงที่ผิวสัมผัสระหว่างหมอนรองรางกับหินโรยทาง โดยสมมติให้หมอน รองรางถ่ายแรงไปยังหินโรยทางอย่างสม่ำเสมอเท่ากันตลอดความยาวของ หมอนรองราง [5] ได้ตั้งสมการที่ (4)

$$q_{rmax} = D_f \times P_d \quad (2)$$

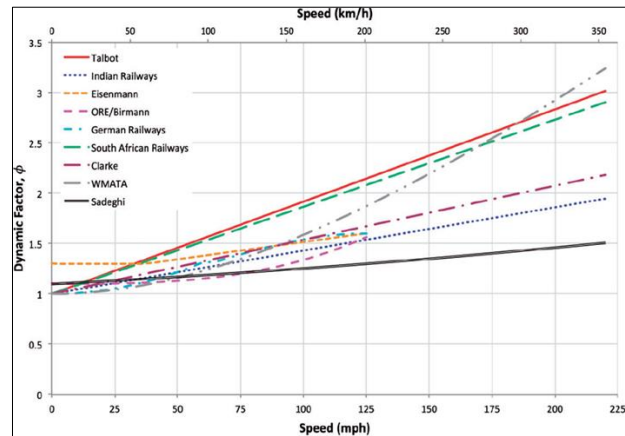
โดยที่ q_{rmax} คือ แรงที่ผิวสัมผัสระหว่างรางกับหมอนรองราง (kN), D_f ค่าคงที่สำหรับหมอนรองรางคอนกรีตคำนวณได้จากสมการที่ (3) และ P_d คือ น้ำหนักรถไฟขณะเคลื่อนที่ (kN)

$$D_f = 0.45 + 5.77 \times 10^{-2} S_s \quad (3)$$

โดยที่ S_s คือ ระยะห่างระหว่างหมอนรองราง (เมตร)

$$P_b = 2 \left(\frac{q_{rmax}}{BL} \right) \quad (4)$$

โดยที่ P_b คือ แรงที่ผิวสัมผัสระหว่างหมอนรองรางกับหินโรยทาง (kN), q_{rmax} คือ แรงที่ผิวสัมผัสระหว่างรางรถไฟกับหมอนรองราง (kN), B คือ ความกว้างของหมอนรองราง (เมตร) และ L คือความยาวของหมอน รองราง (เมตร) และเนื่องจากผลกระทบเชิงพลศาสตร์น้ำหนักที่กระทำต่อ รางย่อมมากกว่าน้ำหนักบรรทุกทุกปกติ ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกโดยวิธี สถิตยศาสตร์ ต้องใช้ตัวคูณขยายจากผลกระทบทางพลศาสตร์ (Dynamic Load Magnification Factor, DLF) ที่ความเร็วต่าง ๆ ของรถไฟที่คำนวณ โดยทฤษฎีต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ค่า DLF ที่ความเร็วต่าง ๆ ของรถไฟ ที่คำนวณโดยทฤษฎีต่าง ๆ [6]

3.2 แรงด้านข้าง (Lateral Force)

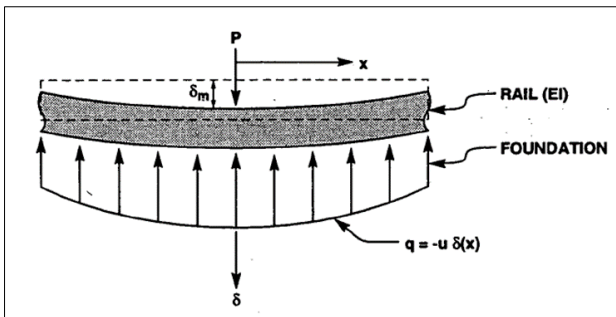
แรงด้านข้างคือแรงที่ขนานกับด้านยาวของหมอนรองรางรถไฟ แบ่ง ออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ 1) แรงจากล้อรถไฟทางด้านข้าง (Lateral Wheel Force) มาจากส่วนประกอบทางด้านข้างของแรงเสียดทานระหว่าง ล้อกับรางและจากแรงที่ล้อแฉลบออกจากราง ที่มาของแรงจากล้อรถไฟ ด้านข้าง คือการที่รถไฟเคลื่อนที่แล้วเกิดการแกว่ง, การกระโดด เป็นผลมา จากที่ไบกรีดไฟเกิดการสูญเสียเสถียรภาพที่ความเร็วสูง และเกิดแรงหนี ศูนย์กลางจากการโค้ง แรงด้านข้างจากล้อรถไฟมีความซับซ้อนมากและ มักจะถูกปรับแก้มากกว่าแรงในแนวตั้ง (รูปที่ 2)

3.3 แรงตามแนวยาว (Longitudinal Force)

แรงตามแนวยาวคือแรงที่ขนานกับรางรถไฟ มาจากหลายสาเหตุ ได้แก่ แรงดูดจากหัวรถจักรรวมถึงแรงที่ต้องการเร่งความเร็ว แรงเบรกจากหัวรถจักรและโบกี้ การขยายตัวและหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิ และการเกิดคลื่นของราง

3.4 Static Bedding Modulus

ตามทฤษฎี Static Bedding Modulus รางรถไฟถูกพิจารณาเป็นเหล็กที่มีความยาวไม่สิ้นสุดวางอยู่บนฐานรากที่มีความยืดหยุ่นแบบต่อเนื่อง ค่า Bedding Modulus เป็นค่าที่แสดงถึงความยืดหยุ่นของทั้งระบบราง ได้แก่ รางรถไฟ หมอนรองราง ชั้นหินโรยทาง ชั้นรองใต้หินโรยทาง ชั้นรองพื้นทาง และชั้นดินเดิม และทำการวิเคราะห์เพื่อประเมินค่าการโก่งตัวของรางรถไฟวิ่งผ่าน การวัดค่า Static Bedding Modulus โดยทั่วไปแล้วจะทำการวัดเมื่อต้องการทราบว่ารางรถไฟโก่งตัวได้มากที่สุดเท่าไร เมื่อรถไฟวิ่งผ่านอย่างช้า ๆ หรือ เมื่อรถไฟจอดอยู่หนึ่ง ๆ ค่า Bedding Modulus คืออัตราส่วนระหว่าง ความเค้น (Stress) และค่าการโก่งตัว (Deflection) ดังแสดงในรูปที่ 5 และสามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (5)



รูปที่ 5 Beam on elastic modulus model [7]

$$u = \sqrt[3]{\left(\frac{P}{\delta_r}\right)^4 / 64E_r I_r} \quad (5)$$

โดยที่ u หมายถึง ค่า Static Bedding Modulus (MPa), P คือน้ำหนักที่กระทำบนรางรถไฟ (kN), δ_r คือ การยุบตัวในแนวดิ่ง (mm), E_r คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของรางรถไฟ (MPa) และ I_r คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (m^4)

4. การสร้างแบบจำลองโครงสร้างฐานรากของทางรถไฟ และการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงของงานทางด้านวิศวกรรมโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง แต่การที่จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องนั้นจะต้องมีการสร้างแบบจำลอง มีการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ และมีการเลือกใช้เทคนิคการหาค่าตอบที่เหมาะสม ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้

โปรแกรม PLAXIS 3D ในการวิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างฐานรากทางรถไฟจากแรงกระทำแบบสถิตยศาสตร์เนื่องจากน้ำหนักของรถไฟ

4.1 การสร้างแบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟ

ลักษณะหน้าตัดของโครงสร้างทางรถไฟที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง มีค่าความชันของชั้นรองพื้นทาง (Subgrade) และชั้นรองชั้นหินโรยทาง (Sub ballast) คือ 1:2 ส่วนความชันของชั้นหินโรยทาง (Ballast) คือ 1:1.25 ขนาดของหมอนรองรางมีขนาดโดยประมาณกว้าง 20 ซม. สูง 21 ซม. ยาว 1.5 ม. ระยะห่างระหว่างหมอนรองรางเท่ากับ 60 ซม. รางรถไฟมีระยะห่างกัน 1.0 ม. [8] ความหนาของแต่ละชั้นวัสดุแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความหนาของชั้นวัสดุต่าง ๆ ของโครงสร้างฐานรากทางรถไฟ

ชั้นวัสดุ	ความหนา (ม.)
ชั้นหินโรยทาง (Ballast)	0.3
ชั้นรองชั้นหินโรยทาง (Sub ballast)	0.3
ชั้นรองพื้นทาง (Subgrade)	0.1
ชั้นดินเดิม (Subsoil)	10.0

4.2 การกำหนดคุณสมบัติของชั้นวัสดุ แรงกระทำ และเงื่อนไขขอบของแบบจำลอง

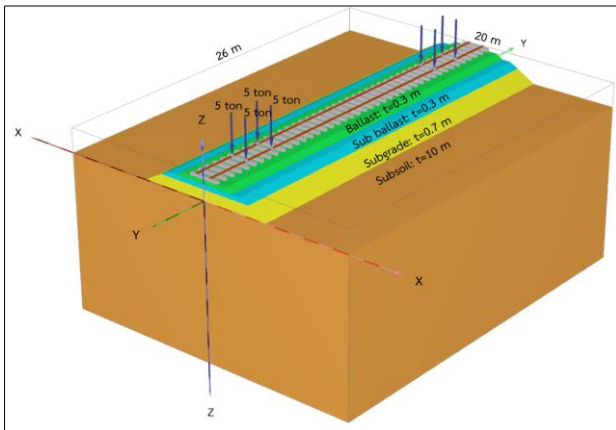
คุณสมบัติของชั้นวัสดุของโครงสร้างฐานรากทางรถไฟในการศึกษาค้นครั้งนี้ได้จำลองให้ชั้นดินเดิมเป็นชั้นดินอ่อนคล้ายดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ และปรับเปลี่ยนแต่ละชั้นวัสดุในการจำลองให้มีคุณภาพแย่ (Poor) คุณภาพมาตรฐาน (Standard) และคุณภาพดีเยี่ยม (Excellent) รายละเอียดแสดงได้ดังตารางที่ 2 เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในชั้นวัสดุต่าง ๆ เมื่อได้รับแรงกระทำแบบสถิตยศาสตร์จากน้ำหนักของรถไฟ ซึ่งได้กำหนดแรงกระทำแบบจุด (Static Load) ลงบนโครงสร้างทางรถไฟ จำนวน 4 จุดต่อเพลลา รวม 2 เพลลา (ดูโดยสารรถไฟมี 2 เพลลา คือเพลลาหน้า และเพลลาหลัง) แต่ละจุดมีแรงกระทำเท่ากับ 5 ตัน รวม 20 ตันต่อเพลลา สำหรับเงื่อนไขขอบของแบบจำลองได้กำหนดให้การเคลื่อนที่ตามแนวยาวของทางรถไฟเท่ากับศูนย์ หรือไม่เกิดการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y ดังแสดงในรูปที่ 6

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของชั้นวัสดุต่างๆ ที่นำเข้าแบบจำลองตามคุณภาพต่างๆ [9]

ชั้นวัสดุ	γ	E	ν	c	ϕ
รางรถไฟ	78.0	2.1×10^7	0.15	-	-
หมอนรองรางรถไฟ	8.0	1.0×10^7	0.15	-	-
คุณภาพแย่ (Poor)					
ชั้นหินโรยทาง	15.6	1.668×10^4	0.2	0.0	73.05
ชั้นรองชั้นหินโรยทาง	16.67	6.0×10^4	0.35	0.0	35.0
ชั้นรองพื้นทาง	16.0	1.25×10^4	0.4	15.0	12.0
ชั้นดินเดิม	16.0	5×10^3	0.33	5.0	22.0
คุณภาพมาตรฐาน (Standard)					
ชั้นหินโรยทาง	15.6	2.134×10^4	0.2	0.0	58.47
ชั้นรองชั้นหินโรยทาง	19.0	9.0×10^4	0.35	0.1	30.0
ชั้นรองพื้นทาง	18.0	8.0×10^4	0.3	5.0	30.0

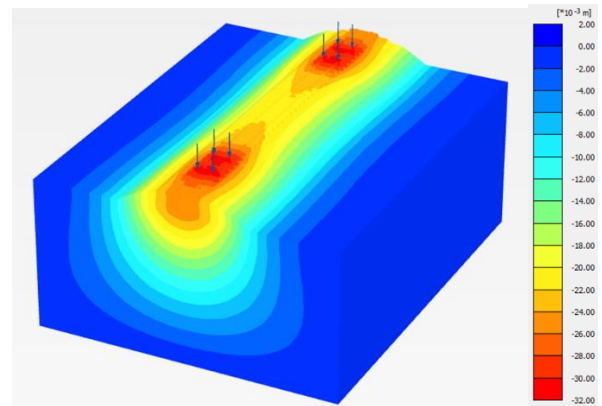
ชั้นวัสดุ	γ	E	ν	c	ϕ
ชั้นดินเดิม	17.0	6×10^4	0.33	18.0	22.0
คุณภาพดีเยี่ยม (Excellent)					
ชั้นหินโรยทาง	15.6	2.478×10^4	0.2	0.0	52.47
ชั้นรองชั้นหินโรยทาง	21.3	1.0×10^5	0.35	0.0	45.0
ชั้นรองพื้นทาง	18.0	1.0×10^5	0.3	0.0	50.0
ชั้นดินเดิม	18.0	8×10^4	0.33	18.0	40.0

โดยที่ γ คือ ค่าความหนาแน่น (kN/m^3), E คือ ค่ายังโมดูลัส (kN/m^2), ν คือ ค่าอัตราส่วนปัวซอง, c คือ ค่าแรงยึดเหนี่ยว (kPa) และ ϕ คือ ค่ามุมเสถียรภาพใน (degree)



รูปที่ 6 แบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟด้วยโปรแกรม PLAXIS 3D

(Subgrade) สำหรับชั้นวัสดุอื่น ๆ กำหนดให้มีคุณภาพมาตรฐาน (Standard) พบว่า ในกรณีที่มีชั้นดินเดิม และชั้นรองพื้นทาง ที่มีคุณภาพแย่มาก (Poor) จะเกิดการโก่งตัวมากที่สุดที่รางรถไฟประมาณ 17 มิลลิเมตร สำหรับกรณีที่มีชั้นดินเดิม และชั้นรองพื้นทาง ที่มีคุณภาพดีเยี่ยม (Excellent) จะเกิดการโก่งตัวมากที่สุดที่รางรถไฟประมาณ 2.6 มิลลิเมตร และสังเกตได้ว่าบริเวณขอบคันทางด้านข้างทั้งด้านซ้ายและด้านขวาชั้นดินเดิมเกิดการปลิ้นพังขึ้นประมาณ 0.12 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นการบีบอัดของดินพื้นทางเนื่องจากการรับน้ำหนักคงที่และมากเกินไปทำให้ดินพื้นทางที่อ่อนถูกดันให้ปลิ้นออกทางด้านข้างที่ละน้อย ๆ (Progressive Shear Failure) ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 7 ผลการจำลองค่าการทรุดตัวในแนวตั้งของโครงสร้างฐานรากทางรถไฟที่โครงสร้างชั้นวัสดุต่าง ๆ มีคุณภาพแย่มาก

5. พฤติกรรมของโครงสร้างฐานรากทางรถไฟ

พฤติกรรมของโครงสร้างทางรถไฟเมื่อได้รับแรงกระทำแบบสถิตยศาสตร์เนื่องจากน้ำหนักของรถไฟได้แสดงผลในรูปแบบของค่าการทรุดตัวในแนวตั้ง (Vertical Displacement) ค่าการกระจายความเค้นในแนวตั้ง (Vertical Stress) และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละชั้นวัสดุ Static Bedding Modulus เปรียบเทียบที่คุณภาพต่าง ๆ ของแต่ละชั้นวัสดุของโครงสร้างทางรถไฟ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

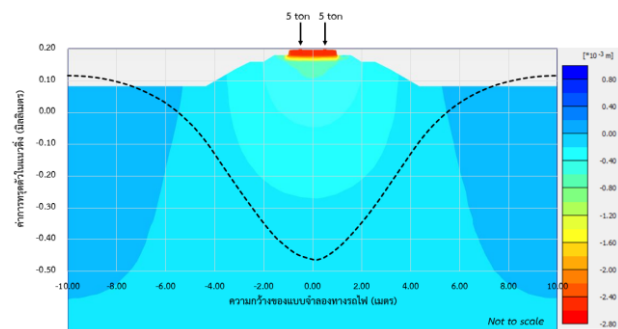
5.1 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้ง (Vertical Displacement)

ผลการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งแสดงให้เห็นว่าคุณภาพของชั้นวัสดุส่งผลต่อการโก่งตัวของรางรถไฟภายใต้น้ำหนักบรรทุก โดยพบว่าวัสดุโครงสร้างฐานรากของทางรถไฟที่มีคุณภาพแย่มาก จะทำให้รางรถไฟเกิดการโก่งตัวสูงสุดประมาณ 30.0 มิลลิเมตร ณ ตำแหน่งที่สัมผัสกับล้อรถไฟ (ตำแหน่งที่น้ำหนักกระทำ) ดังแสดงในรูปที่ 7 สำหรับวัสดุที่มีคุณภาพมาตรฐาน และคุณภาพดีจะทำให้รางรถไฟมีค่าการโก่งตัวประมาณ 4.6 มิลลิเมตร และ 3.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ สำหรับชั้นวัสดุอื่น ๆ ของโครงสร้างฐานรากสามารถแสดงค่าการทรุดตัวในแนวตั้งได้ดังตารางที่ 3

นอกจากนี้ สังเกตได้ว่าการทรุดตัวในแนวตั้งได้ส่งผลกระทบต่อชั้นดินเดิมทั้ง 3 กรณี จึงได้ทำการวิเคราะห์ในกรณีที่ปรับเปลี่ยนคุณภาพของชั้นวัสดุทั้ง 3 แบบเฉพาะชั้นดินเดิม (Subsoil) และชั้นรองพื้นทาง

ตารางที่ 3 ค่าการทรุดตัวในแนวตั้งของชั้นวัสดุต่าง ๆ

ชั้นวัสดุ	ค่าการทรุดตัวในแนวตั้ง (มิลลิเมตร)		
	คุณภาพแย่มาก (Poor)	คุณภาพมาตรฐาน (Standard)	คุณภาพดีเยี่ยม (Excellent)
รางรถไฟ (Rail)	30.0	4.60	3.20
หมอนรองรางรถไฟ (Sleeper)	29.0 – 30.0	4.00 – 4.25	2.60 – 3.00
ชั้นหินโรยทาง (Ballast)	20.0 – 24.0	2.25 – 4.25	1.60 – 3.00
ชั้นรองชั้นหินโรยทาง (Sub ballast)	16.0 – 24.0	1.50 – 3.00	1.20 – 2.40
ชั้นรองพื้นทาง (Subgrade)	12.0 – 24.0	1.00 – 2.50	0.80 – 2.40
ชั้นดินเดิม (Subsoil)	0.0 – 24.0	0.00 – 2.50	0.00 – 2.00

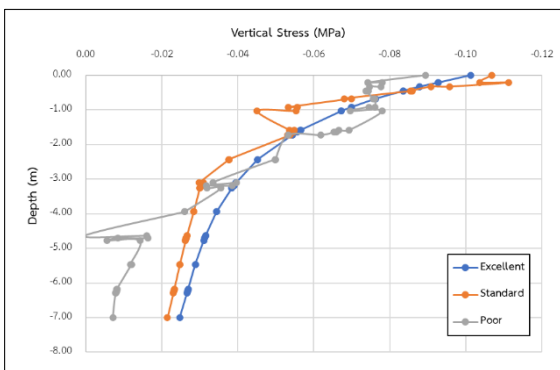


รูปที่ 8 ผลการจำลองค่าการทรุดตัวในแนวตั้งของโครงสร้างฐานรากทางรถไฟที่ชั้นดินเดิม และชั้นรองพื้นทางมีคุณภาพดี

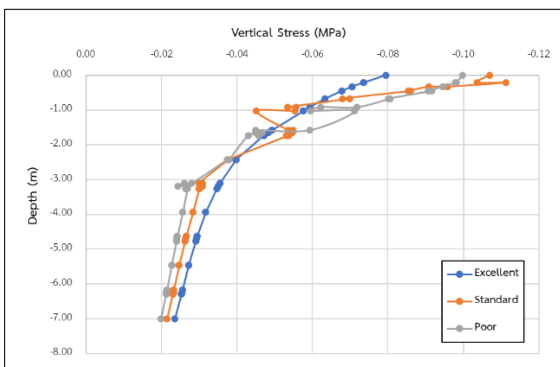
5.2 ค่าการกระจายความเค้นในแนวดิ่ง (Vertical Stress)

ผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้นในแนวดิ่ง ในที่นี้ขอเสนอความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวดิ่งกับความลึกของโครงสร้างทางรถไฟในกรณีที่ปรับเปลี่ยนคุณภาพของวัสดุทั้ง 3 แบบ ในโครงสร้างชั้นดินเดิม (Subsoil) และชั้นรองพื้นทาง (Subgrade) สำหรับชั้นวัสดุอื่น ๆ กำหนดให้มีคุณภาพมาตรฐาน พบว่า มีค่าการกระจายความเค้นสูงสุดประมาณ 0.11 MPa ทั้งในโครงสร้างชั้นดินเดิม และชั้นรองพื้นทาง โดยในชั้นดินเดิมมีการกระจายความเค้นในแนวดิ่งในแต่ละคุณภาพของวัสดุแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ส่วนในชั้นรองพื้นทางมีการกระจายความเค้นในแนวดิ่งในแต่ละคุณภาพของวัสดุใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 9 และรูปที่ 10 ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังพบว่าการกระจายความเค้นในแนวดิ่งสอดคล้องกับค่าการทรุดตัวในแนวดิ่ง กล่าวคือ บริเวณที่มีค่าการทรุดตัวในแนวดิ่งสูงจะมีค่าการกระจายความเค้นในแนวดิ่งมากกว่าบริเวณที่มีค่าการทรุดตัวในแนวดิ่งต่ำ

จากผลการวิเคราะห์จะเห็นว่าในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนคุณภาพของวัสดุในโครงสร้างชั้นดินเดิมทำให้แนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นในแนวดิ่งกับความลึกของโครงสร้างทางรถไฟมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าโครงสร้างชั้นอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าหากคุณภาพของวัสดุในโครงสร้างชั้นดินเดิมมีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลกระทบต่อทรุดตัว และการกระจายความเค้นในแนวดิ่งกับโครงสร้างฐานรากทางรถไฟมากกว่าการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของวัสดุในโครงสร้างชั้นอื่น ๆ



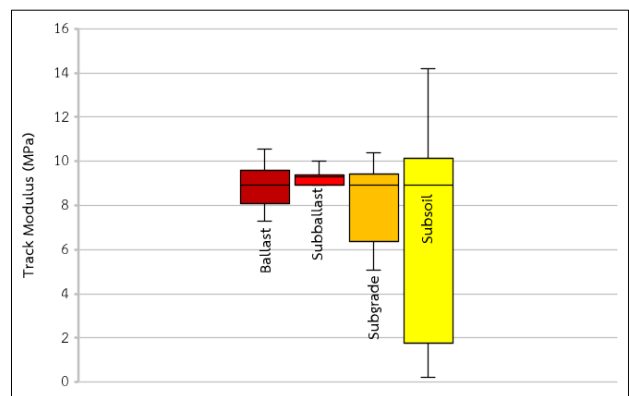
รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้นในแนวดิ่งของโครงสร้างฐานรากทางรถไฟในชั้นดินเดิม (Subsoil) ที่วัสดุมีคุณภาพต่าง ๆ



รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้นในแนวดิ่งของโครงสร้างฐานรากทางรถไฟในชั้นรองพื้นทาง (Subgrade) ที่วัสดุมีคุณภาพต่าง ๆ

5.3 ค่า Static Bedding Modulus

การวิเคราะห์ค่า Static Bedding Modulus ของแต่ละชั้นวัสดุของทางรถไฟวิเคราะห์ที่ได้จากการนำค่าการทรุดตัวในแนวดิ่งที่ได้จากหัวข้อ 5.1 ของแต่ละชั้นวัสดุไปแทนที่ด้วยสมการที่ (5) พบว่าค่า Static Bedding Modulus ของรางในกรณีที่เปลี่ยนแปลงคุณภาพของโครงสร้างชั้นวัสดุในชั้นดินเดิม (Subsoil) จะมีขอบเขตการกระจายกว้างกว่าในกรณีที่เปลี่ยนแปลงคุณภาพของชั้นวัสดุอื่น ๆ และมีค่า Static Bedding Modulus น้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 11 หากวัสดุในโครงสร้างชั้นดินเดิมที่มีความอ่อนตัวหรือความแข็งแรงต่ำกว่ามาตรฐาน ซึ่งหมายถึงรางรถไฟจะมีการโก่งตัวมากกว่าในโครงสร้างชั้นอื่น ๆ หากมีน้ำหนักที่กระทำเท่าเดิม



รูปที่ 11 ค่า Static Bedding Modulus ของแต่ละชั้นวัสดุของโครงสร้างทางรถไฟส่วนล่าง

6. สรุปผล

ผลการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างฐานรากทางรถไฟที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักรถไฟแบบสถิตย์ศาสตร์ (Static Load) โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม PLAXIS 3D พบว่า โครงสร้างฐานรากของทางรถไฟในชั้นดินเดิม (Subsoil) เป็นชั้นโครงสร้างที่มีความสำคัญที่สุดต่อเสถียรภาพของโครงสร้างทางรถไฟ เนื่องจากเมื่อปรับเปลี่ยนคุณภาพของโครงสร้างชั้นดินเดิมจะส่งผลกระทบต่อทรุดตัวของรางรถไฟอย่างเห็นได้ชัด หากโครงสร้างชั้นดินเดิมมีความอ่อนตัวจะส่งผลให้เกิดการทรุดตัวมากกว่าโครงสร้างชั้นอื่น ๆ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ยังพบอีกว่าในโครงสร้างชั้นดินเดิมยังมีช่วงของค่าอีลาสติคโมดูลัสที่ต่ำและค่อนข้างกว้างกว่าโครงสร้างชั้นวัสดุอื่น ๆ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการทรุดตัวมากกว่าโครงสร้างชั้นอื่น ๆ ด้วยเช่นกัน เนื่องจากชั้นวัสดุที่มีค่าอีลาสติคโมดูลัสต่ำจะส่งผลให้โครงสร้างทางรถไฟเกิดการโก่งตัวที่บริเวณรางรถไฟมากกว่าชั้นวัสดุที่มีค่าอีลาสติคโมดูลัสสูง ดังนั้น การออกแบบก่อสร้าง และการบำรุงรักษาทางรถไฟแบบมีหินโรยทางจึงควรตรวจสอบและปรับปรุงให้โครงสร้างชั้นดินเดิมมีคุณภาพที่อยู่เสมอ นอกเหนือจากการปรับปรุงเฉพาะในชั้นหินโรยทางดังเช่นในปัจจุบัน เพื่อลดความเสียหายของโครงสร้างฐานรากทางรถไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7. ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาในครั้งนี้คณะผู้วิจัยได้เปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีตพบว่า การวิเคราะห์พฤติกรรมต่าง ๆ ของโครงสร้างทางรถไฟด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในรูปแบบ 2 มิติ และรูปแบบ 3 มิติ ให้ผลการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน เพียงแต่การวิเคราะห์ในรูปแบบ 3 มิติ ใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่นานกว่าเนื่องจากมีความละเอียด และจำนวนของเอลิเมนต์ที่มากกว่า ดังนั้น การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ ก็เพียงพอต่อผลการศึกษาแล้ว อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ได้ศึกษาเฉพาะแรงที่กระทำกับโครงสร้างทางรถไฟแบบสถิตยศาสตร์เท่านั้น เพื่อให้ผลการศึกษาถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้นจะต้องวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อโครงสร้างทางรถไฟแบบพลศาสตร์ด้วย นอกจากนี้ การปรับปรุงโครงสร้างฐานรากของทางรถไฟให้มีคุณภาพดีอยู่เสมอ นั้น อาจต้องนำวัสดุเสริมกำลังที่สามารถช่วยลดแรงสั่นสะเทือน และลดการปนเปื้อนในชั้นหินรอยทางเข้ามาใช้ เช่น การใช้แผ่นยางรองใต้ชั้นรองชั้นหินรอยทาง เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (บพข.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณศูนย์วิจัยภัยพิบัติทางธรรมชาติภาคใต้ สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนข้อมูล และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] การรถไฟแห่งประเทศไทย (2560). Complete guide to SRT.4.0 โครงข่ายรถไฟทางไกลของไทยในปัจจุบัน. *วารสารรถไฟสัมพันธ์*.
- [2] Abu Sayeed and Mohamed A. Shahin. (2016). Design of ballasted railway track foundations using numerical modelling. Part I: Development. *Canadian Geotechnical Journal*. 55(3): 353-368.
- [3] สยาม ยิ้มศิริ (2559). กลไกการเสื่อมสภาพของโครงสร้างฐานรากของทางรถไฟ: กรณีศึกษาของทางรถไฟสายเหนือ. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. กันยายน 2559.
- [4] Canadian National Railway Company (2015). 2015 Annual Information Form. February 1, 2016.
- [5] สำนักนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร. (2561). คู่มือการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างทางรถไฟ. กรมขนส่งทางบก.
- [6] B.J. Van Dyk, J.R. Edwards, M.S. Dersch, C.J. Ruppert, and C.PL Barkan², Evaluation of dynamic and impact wheel load factors and their application in design processes, Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit 2016, 0(0) 1–11.
- [7] Selig ET, & Waters JM. (1994). Track geotechnology and substructure management. Thomas Telford.
- [8] ธวัช จีวบุญชู, พิษณุ พลกายนุวัตร (2564). กรณีศึกษาปรับปรุงโครงสร้างทางรถไฟส่วนล่างด้วยวัสดุเสริมกำลังทางปฐพี. *การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26, การประชุมออนไลน์, 23 – 25 มิถุนายน 2564*.
- [9] Navaratnarajah, S. K., Indraratna, B., & Nimbalkar, S. (2016). Application of shock mats in rail track foundation subjected to dynamic loads. *Procedia engineering*, 143, 1108-1119.