

Train-Track-Soil dynamic interaction analysis

จอมพล บุญวิเศษ¹ พันเทพ ดาราอัมพรนิธิ² และ ชยุตม์ งามโขheng³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

ในอนาคตอันใกล้ประเทศไทยกำลังจะมีรถไฟความเร็วสูงหลายสายเกิดขึ้นเพื่อรองรับการคมนาคม การท่องเที่ยว และการขนส่ง ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการเติบโตทางด้านเศรษฐกิจและความเป็นอยู่ โดยการที่โครงสร้างรถไฟนี้จะก่อประโยชน์สูงสุดนั้นเราต้องมีความรู้เรื่องการติดตั้ง ดูแลรักษา และปัญหาที่จะเกิดขึ้นตามมา ในงานศึกษานี้ ผู้ศึกษาเล็งมุ่งเน้นไปที่ศึกษาปัญหาการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในชั้นดินที่และศึกษาวิธีการลดการสั่นสะเทือนที่มาจากโครงสร้างทางรถไฟแบบมีชั้นหินโรยทาง (Ballasted Track) ด้วยการจัดตั้ง Under Sleeper Pads (USPs) และ Under Ballast Mats (UBMs)

ในการศึกษาที่ผู้ศึกษาได้มีการจำลองโมเดล 3D ด้วยวิธีการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ เป็นการนำค่าประมาณจากแบบจำลองมาแก้ปัญหาเชิงวัสดุ เชิงโครงสร้าง บนโปรแกรม LS-DYNA ในหลักพื้นฐานของ multibody simulation principle, finite element method และ perfectly matched layer จะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของตัวโครงสร้างทางรถไฟ และดิน โดยพิจารณาระบบโครงสร้างที่มีการประยุกต์ใช้ USPs และ UBMs ในแต่ละความเร็วที่มีความสอดคล้องกับรถไฟความเร็วสูงที่จะมีการเปิดใช้ในอนาคต

จากผลการวิจัยพบว่า ความเร็วของรถไฟมีผลต่อการความสั่นพั่นธ์แบบแปรผันตรงต่อการตอบสนองแบบพลศาสตร์ของโครงสร้างและชั้นดินโดยรอบ ยกเว้น USPs แบบ soft ที่มีประสิทธิภาพลดลงในเรื่องการทรุดตัวของรางที่ความเร็วสูง แต่การติดตั้ง USPs แบบ stiff จะช่วยลดการทรุดตัวของรางและลดการสั่นสะเทือนในดินได้ดี จากผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยนี้ทำให้เกิดความเข้าใจพฤติกรรมการช่วยลดการทรุดตัวของราง การลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในชั้นดิน ของการติดตั้ง USPs และ UBMs สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงสร้างรถไฟความเร็วสูงที่จะมีในประเทศไทยในอนาคต คำสำคัญ : รถไฟความเร็วสูง, โครงสร้างทางรถไฟแบบมีชั้นหินโรยทาง, USPs, UBMs

Abstract

In the near future, Thailand will have several high-speed rail lines to support transportation, tourism, and economic growth. In order to maximize the benefits of this rail infrastructure, it is important to have knowledge about installation, maintenance, and potential issues that may arise. In this senior project, the focus is on studying the problem of vibration that occurs in the ground layer and investigating ways to reduce this vibration caused by the ballasted track structure. This is accomplished by installing Under Sleeper Pads (USPs) and Under Ballast Mats (UBMs).

The project includes a 3D simulation model created using the finite element method and perfectly matched layer on the LS-DYNA program, which demonstrates the mechanical behavior of the rail structure and ground. The study considers the use of USPs and UBMs for different speeds corresponding to the high-speed rail lines that will be implemented in the future.

The research findings indicate that the speed of a train affects the nonlinear relationship between the dynamic response of the structure and the surrounding soil. With the exception of soft USPs, which are less effective in reducing rail degradation at high speeds, the installation of stiff USPs can effectively reduce rail degradation and ground vibration. The results of this study provide a better understanding of the behavior of USPs in reducing rail degradation and ground vibration. The installation of

USPs and UBMs can be applied to high-speed railway structures that will be built in Thailand in the future.

Keywords : High speed Train, Ballasted Track, USPs, UBMs

1. บทนำ

ปัจจุบันการคมนาคมในโลกนี้มีหลายประเภทที่แตกต่างกันทั้งด้านข้อดีและข้อเสีย เช่น การรับน้ำหนักสินค้าที่บรรทุก ความรวดเร็วในการถึงที่หมายของผู้โดยสาร หรือแม้กระทั่งค่าใช้จ่ายในการคมนาคม พฤติกรรมเหล่านี้ของมนุษย์จึงทำให้เกิดการพัฒนาในด้านเทคโนโลยี เพื่อให้เกิดการคมนาคมที่มีประสิทธิภาพ หนึ่งในนั้นคือการพัฒนาทางด้านโครงสร้างพื้นฐานระบบราง (Railway Infrastructure System) เนื่องจากเป็นการคมนาคมที่สะดวก รวดเร็ว และแม่นยำในเส้นทางการสัญจรในปัจจุบันประเทศจีนมีการวิจัยและคิดค้นพัฒนาองค์ความรู้ เช่น รถไฟความเร็วสูง การพัฒนาการขนส่งระบบรางนั้นไม่เพียงแต่จะตอบสนองทางด้านความสะดวก รวดเร็ว แล้วนั้นยังเป็นการส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจ ส่งเสริมการท่องเที่ยว เป็นอีกหนึ่งปัจจัยในการพัฒนาและขับเคลื่อนของประเทศ

ในประเทศไทยมีแผนที่จะพัฒนาความเร็วสูงทั้งหมด 4 สาย โดยแหล่งเชื่อมต่อสำคัญ ได้แก่ 1.กรุงเทพฯ-พิษณุโลก-เชียงใหม่ 2. กรุงเทพฯ-นครราชสีมา-หนองคาย 3.สนามบินดอนเมือง-สุวรรณภูมิ-อุตะภา 4.กรุงเทพฯ-ปาดังเบซาร์ ซึ่งจะมีการเปิดใช้ในอนาคต และจะทำให้มีการเชื่อมโยงตลาดการค้าระหว่างกลุ่มลุ่มแม่น้ำโขง เนื่องจากประเทศไทยถือเป็นศูนย์กลางการค้าของอินโดจีน ทั้งนี้การจะมีได้ซึ่งการคมนาคมนั้นต้องอาศัยการออกแบบ องค์ความรู้ รวมไปถึงความเหมาะสม ในการก่อสร้างและดูแล

ประเทศไทยมีการพัฒนา ส่งเสริม และผลักดันให้เกิดโครงสร้างพื้นฐานระบบรางที่มีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามการที่สิ่งก่อสร้างหนึ่งที่จะเกิดขึ้นได้นั้น เราต้องคำนึงถึงการซ่อมบำรุงรักษา ปัญหาที่เกิดขึ้นหลังจากการใช้งานหรือระหว่างใช้งาน ซึ่งปัญหาอาจจะเกิดได้จากการกระทบกันของล้อและราง และเกิดความเค้นที่หมอนรองคอนกรีต และเป็นผลเสียโดยตรงต่อ ballast หรือพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหมอนรองและ ballast ที่น้อยเกินไป เป็นต้น (P J Grabe 2016) เหตุนี้เลยมีการพัฒนาองค์ความรู้เข้ามาแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น

ปัจจัยที่มีผลต่อการพังทลายของชั้นหินโรยทางนั้นเกิดจากหลากหลาย ได้แก่ 1.การเคลื่อนย้ายของน้ำหนักอยู่ตลอด 2.ปัจจัยจากสารเคมีและอากาศจากสิ่งแวดล้อม 3.การพัดพาของเศษกรวดจากพื้นผิวข้างบน 4.จำนวนการคมนาคมที่สูงเกินไป 5.การพังของหมอนรองคอนกรีต (Selig(1985) & Meeker(1990)) เพราะเหตุนี้จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อมาช่วยในการลดความเสียหาย เช่น 1.Under Sleeper Pads (USPs) เป็นแผ่นยางโพลียูรีเทนติดตั้งไว้ระหว่างหมอนรองคอนกรีตและชั้นหินโรยทาง ช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัส ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น 2.Under Ballast Mat (UBM) มีลักษณะคล้ายกับ USPs มีการติดตั้งไว้ข้างล่างของชั้นหินโรยทาง ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการเคลื่อนที่ระบบราง ช่วยลดการสั่นที่เกิดในการคมนาคม แต่อย่างไร

ก็ตามการติดตั้งแผ่นยางอาจทำให้สติเฟ่นของโครงสร้างลดลงซึ่งอาจทำให้รางเคลื่อนที่มากขึ้น ดังนั้นการติดตั้งชั้นส่วนเหล่านี้ควรมีการออกแบบและเลือกใช้ชนิดที่เหมาะสมการศึกษาที่เลยมุ่งเน้นที่ศึกษาเพื่อแก้ปัญหาการเสื่อมสภาพของระบบทางรถไฟแบบมีชั้นหินโรยทาง การสั่นสะเทือนที่กระทบต่อชั้นหินและดินข้างใต้ ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ผ่านของรถไฟรุ่น CR300AF รวมถึงการศึกษาผลของการถ่ายเทความเค้นสู่ชั้นหินที่เกิดจากรถไฟความเร็วสูง เพื่อนำผลการศึกษาไปประยุกต์และใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างทางรถไฟโดยการใช้แผ่นยาง USP และ UBM

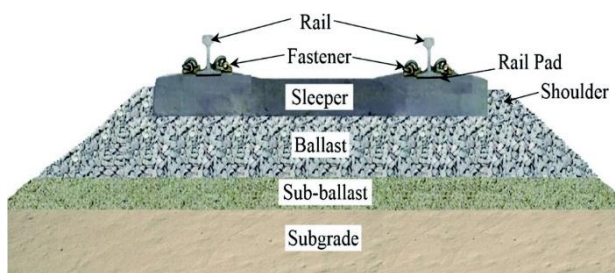
2. ระเบียบวิจัย

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง (Related Theory)

โครงสร้างทางรถไฟนั้นเมื่อพิจารณาจากโครงสร้าง สามารถแบ่งออกเป็นได้ 2 ประเภท ได้แก่ โครงสร้างทางแบบมีชั้นหินโรยทาง (Ballasted Track System) และโครงสร้างทางแบบไม่มีชั้นหินโรยทาง (Slab Track System)

โครงสร้างแบบมีชั้นหินโรยทาง (Ballasted Track System) เป็นโครงสร้างที่ถูกออกแบบและสร้างขึ้นในปีค.ศ.1865 โดยการมีชั้นหินโรยทางอยู่ชั้นถัดมาจากหมอนรองคอนกรีต ซึ่งช่วยลดแรงที่ส่งลงมาที่ชั้นดินด้านใต้ ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้โครงสร้าง ช่วยเรื่องการระบายน้ำ และยังช่วยในการถ่ายต่อการซ่อมแซมโครงสร้างทางรถไฟ โครงสร้างแบบนี้มีข้อดีคือ มีราคาถูก สะดวกต่อการก่อสร้าง มีการระบายน้ำที่ดี แต่ก็มีข้อเสียที่มีเสียงดังเวลาที่มีการคมนาคม เกิดความเสียหายได้ง่ายเมื่อผ่านการใช้งานต้องมีการดูแลและซ่อมแซมบ่อยๆ ความเร็วของรถไฟมีการจำกัดไว้ที่ไม่สูงมาก มีช่วงระยะเวลาการใช้งานประมาณ 15-20 ปี

โครงสร้างทางรถไฟแบบไม่มีชั้นหินโรยทาง (Ballastless Track หรือ Slab Track)เป็นระบบรางที่ไม่ได้มีการใช้ชั้นหินโรยทาง โดยทั่วไปจะถูกออกแบบโครงสร้างอยู่ในรูปแบบของ คอนกรีตและถ่าน



รูปที่ 1 Ballasted Track System (Md. Abu Sayeed,2017)

หินผสมกัน หรือแม้แต่คอนกรีตอัดแรง ใช้ในการรับน้ำหนัก และถ่ายน้ำหนักบนโครงสร้างหมอนรอง ซึ่งมีข้อดี ได้แก่ มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงที่ถูกกว่าแบบใช้หินโรยทาง ผุพังที่เกิดโครงทางรถไฟน้อยลง มีความมั่นคงในโครงสร้างและมีเสียงที่เบากว่า มีระยะเวลาการใช้งานประมาณ 50-60 ปี มักใช้กับรถไฟความเร็วสูงเพิ่มความความสะดวกสบายให้กับผู้โดยสาร แต่ก็มีข้อเสีย ได้แก่ ค่าการก่อสร้างที่สูงกว่า ไม่สามารถ

ก่อสร้างในพื้นที่ที่ชั้นดินข้างล่างมีความอ่อนนุ่ม และความสามารถในการพัฒนาโครงสร้างแบบนี้ยังจำกัดอยู่ โดยโครงสร้างของทางรถไฟมีข้อดีและข้อด้อยต่างออกไปตามการใช้งาน โครงสร้างทางรถไฟแบบมีชั้นหินโรยทางเหมาะกับการก่อสร้างที่ร่วมกับรถไฟที่ไม่ได้มีความเร็วสูงมาก และมีราคาที่ถูกกว่า ส่วนโครงสร้างทางรถไฟที่ไม่มีชั้นหินโรยทางเหมาะกับการรถไฟที่มีความเร็วสูงเนื่องจากมีการเสีรูปของโครงสร้างที่น้อยกว่า

2.2 FEM Modeling

การจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการนำค่าประมาณจากแบบจำลองมาแก้ปัญหาในเชิงวัสดุ เชิงโครงสร้าง และอื่นๆ ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้ โดยอาศัยการแก้ปัญหาจากระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ด้วยระเบียบวิธีตัวเลขเพื่อหาผลลัพธ์โดยประมาณของปัญหาที่กำหนด โดยโมเดลจะถูกแบ่งโดเมนของโครงสร้างเป็นองค์ประกอบย่อยเรียกว่า element โดยสามารถกำหนดความละเอียดของ element ได้ ซึ่ง element จะถูกกำหนดคุณสมบัติตามค่าที่เรากรอกเข้าไป

Element สามารถมีได้ตั้งแต่ 1 มิติ ถึง 3 มิติ โดย 1 มิติจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือโค้ง ใช้ในการวิเคราะห์งานที่มีลักษณะเป็นโครง 2 มิติจะมีลักษณะเป็นรูปร่างสามเหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยม ใช้ในการวิเคราะห์งานที่เป็นพื้นผิว หรือผนังบาง

3 มิติ มีทั้งรูปทรงแบบ Tetrahedral, Pentahedral และ Prism ใช้ในการวิเคราะห์ที่เป็นปริมาตรตัน

ในงานวิจัยนี้จะใช้การจำลองทั้ง 3 แบบ โดยโมเดลนี้จะเราจะแบบออกเป็นการจำลองทั้งหมด 3 โมเดลคือ 1.โมเดลรถไฟ 2.โมเดลโครงสร้างทางรถไฟ 3.โมเดลของชั้นดิน ในการจำลองจะทาบโปรแกรม LS-DYNA ซึ่งเป็นโครงสร้างรถไฟรุ่น

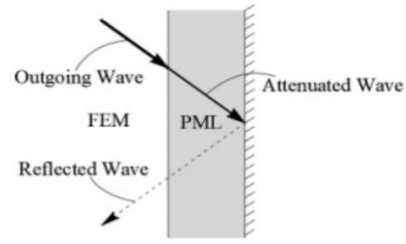
CR 300 และกำหนดค่าวัสดุต่างๆเช่นดิน จากตัวอย่างดินจากประเทศจีนซึ่งมีความใกล้เคียงกับดินภายในกรุงเทพมหานคร



รูปที่ 2 การจำลอง Element ด้วยวิธี Finite Element

2.2.1 โมเดลรถไฟความเร็วสูงและระบบราง

ผู้จัดทำได้มีการอ้างอิงการจำลองโมเดลรถไฟจากงานวิจัยของ Li et al. ในปี 2020 โดยตัวรถ, โบกี้ และชุดล้อเป็น rigid-bodies โมเดล 1 และ 2 มิติ จะเชื่อมกันด้วยลูกสูบ (Damper) และสปริง (Spring) และจะพิจารณาโมเดลนี้มี DOF (Degree of Freedom) ในแนวตั้ง เนื่องจากการสั่นส่วนใหญ่เกิดขึ้นในแนวตั้ง แต่ในรถไฟจะมี DOF 10 DOF ได้แก่ การเคลื่อนที่ในแนวตั้งและการหมุนแนวตั้งของตัวรถ 2 DOF, การเคลื่อนที่แนวตั้งและการหมุนของโบกี้ 2 DOF และการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของชุดล้อ 4 DOF



Use Perfectly Matched layer (PML)

รูปที่ 3 Vehicle Models (Li. Ting, 2020)

โดยแรงกระทำระหว่างล้อและรางถูกจำลองบนพื้นฐานทฤษฎีของ Hertz contact theory โดยแรงกระทำนี้สามารถคำนวณจากสมการ

$$F = K_H \times (Z_w - Z_r - \delta)$$

K_H คือ ค่า stiffness แนวตั้งของ contact spring ระหว่างล้อและราง โดยมีค่าเท่ากับ 1.325×10^9 N/m

Z_w คือการเคลื่อนที่แนวตั้งของล้อ

Z_r คือการเคลื่อนที่แนวตั้งของราง

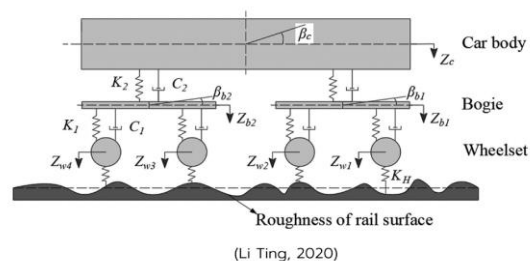
δ คือค่าความขรุขระของผิวราง

2.2.2 โมเดลของดิน

จากโครงสร้างแบบจำลองดินของงานศึกษานี้ เป็นรูปแบบโครงสร้างที่ได้รับการพัฒนาจากประเทศจีน และถูกปรับมาใช้ในการศึกษานี้ให้มีความเหมาะสมและใกล้เคียงกับ Bangkok Clay เพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้ศึกษาทางศึกษาหรือการนำไปใช้ในอนาคต

และผู้ศึกษาได้ใช้วิธี *Perfectly Matched Method (PML)* โดยกำหนดให้ชั้นดิน clay soil มีพฤติกรรมแบบ *Visco-Elastic Materials* ซึ่งวิธีนี้นิยมใช้กันในโมเดลที่มีขอบเขตไม่จำกัด เช่นโมเดลดินที่เรากำลังทำการศึกษายู่นี้ โดยในการศึกษานี้เราได้จำกัดขอบเขตในการศึกษาเป็นพื้นที่โดยรอบ เพื่อให้การจำลองนี้ได้มุ่งเห็นถึงความสำคัญในการลดการสั่นสะเทือนหลักๆที่เกิดขึ้นในโมเดล ช่วยลดการส่งผ่านคลื่นที่ไม่ได้ส่งผลจนมีนัยยะ

รูปที่ 4 Absorbing Boundary of PML (Li. Ting, 2020)



ในการจำลองการสั่นสะเทือนจากชั้นดิน ผู้ศึกษาได้อาศัยการประมาณค่าด้วย *Rayleigh Damping of Soil* โดยจะประมาณค่าเชิงการทดสอบเพื่อลดความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบ และผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของดิน

ดังสมการข้างล่างนี้

$$C = \alpha M + \beta K$$

โดย M = mass matrix of the system

K = stiffness matrix of the system

โดยเราให้สัมประสิทธิ์ที่คูณเข้ากับ M เป็น 0 และสัมประสิทธิ์ที่คูณเข้ากับ K เป็น 0.0002 เพื่อให้ง่ายต่อการประมาณค่า การสันนิษฐานหรือเราสามารถกล่าวได้ว่า ค่าของความหน่วงในชั้นดิน พิจารณาจากผลของค่า stiffness ที่เกิดจากการเรียงตัวกันของชั้นดินเป็นหลัก (Li, Su et al.2019) โดยรูปข้างล่างจะแสดงให้เห็นถึงหน้าตัดของชั้นดิน ที่ทำการ Model

2.3 คุณสมบัติวัสดุ (Material properties)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของยานพาหนะ

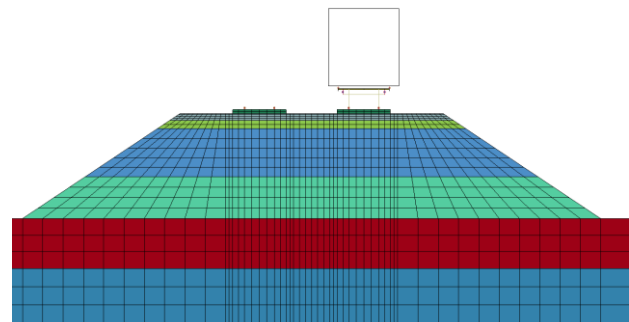
Properties	Values	Unit :
Mass of Car Body	40,000	[kg]
Mass of Bogies	3,200	[kg]
Mass of Wheelset	2,400	[kg]
Inertia of Pitch Motion of the Car Body	5.47×10^5	[kg.m ²]
Inertia of Pitch Motion of the Bogies	6,800	[kg.m ²]
Inertia of Pitch Motion of the Wheelset	1,210	[kg.m ²]
Primary Suspension Stiffness	1.04×10^6	[N/m]
Primary Suspension Damping	5×10^4	[N.s/M]
Secondary Suspension Stiffness	4×10^5	[N/M]
Secondary Suspension Damping	6×10^5	[N.s/M]

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของชั้นหินโรยทาง

Properties	Values	Unit :
Mass Density of the Ballast	1,800	[kg/m ³]
Poisson's Ratio of the Ballast	0.3	[mm/mm]
Modulus of Elasticity of the Ballast	1.5×10^8	[N/m ²]
Stiffness of the Rails Pads	5.0×10^7	[N/m]
Damping of the Rails Pads	7.5×10^4	[N.s/m]

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของชั้นดิน

Properties	Values	Unit :
Soil		
Depth of Surface Layer of the Subgrade	0.4	[m]
Density of Surface Layer of the Subgrade	2,300	[kg.m ³]
Modulus of Elasticity of Surface Layer of the Subgrade	2×10^8	[Pa]
Poisson's Ratio of Surface Layer of the Subgrade	0.25	[mm/mm]
Depth of Bottom Layer of the Subgrade	2.3	[m]
Density of Bottom Layer of the Subgrade	1,950	[kg.m ³]
Modulus of Elasticity of Bottom Layer of the Subgrade	1.5×10^8	[Pa]
Poisson's Ratio of Bottom Layer of the Subgrade	0.35	[mm/mm]
Depth of the Subgrade	2.00	[m]
Density of the Subgrade	2100	[kg.m ³]
Modulus of Elasticity of the Subgrade	1.1×10^8	[Pa]
Poisson's Ratio of Bottom of the Subgrade	0.3	[mm/mm]
Depth of 1 st layer of Ground	2.4	[m]
Density of 1 st layer of Ground	1,900	[kg.m ³]
Modulus of Elasticity of the 1 st layer of Ground	4.2×10^7	[Pa]
Poisson's Ratio of Bottom of 1 st layer of Ground	0.3	[mm/mm]
Depth of 2 nd layer of Ground	2.62	[m]
Density of 2 nd layer of Ground	2,010	[kg.m ³]
Modulus of Elasticity of the 2 nd layer of Ground	8.3×10^7	[Pa]
Poisson's Ratio of Bottom of 2 nd layer of Ground	0.36	[mm/mm]



รูปที่ 4 ตัวอย่างหน้าตัดโครงสร้างทางรถไฟ จาก LS-DYNA

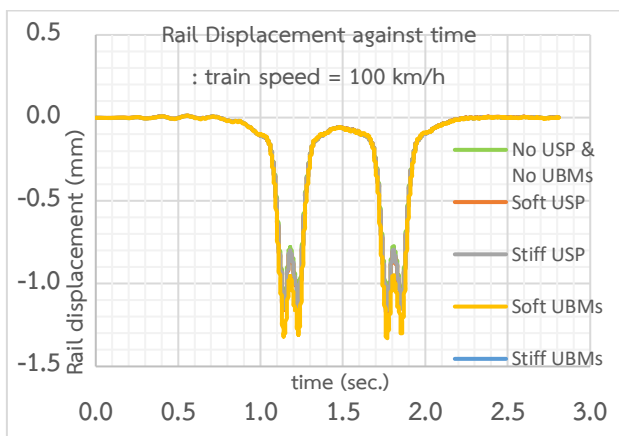
3. ผลการดำเนินงานวิจัย

3.1 การทรุดตัวของราง (Rail displacement)

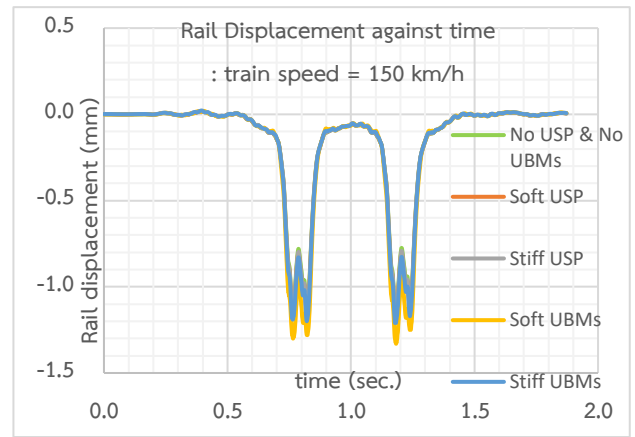
ในส่วนนี้จะนำเสนอผลการทรุดตัวเทียบกับเวลาที่ได้จากแต่ละชนิด โครงสร้างทางรถไฟที่ความเร็วรถไฟเท่ากันเป็นจำนวนสามความเร็ว จากนั้นจะนำค่าการทรุดตัวที่มากที่สุดในแต่ละกรณีมาเปรียบเทียบเทียบกับความเร็วทั้งสามความเร็วดังกล่าว

3.1.1 Time-history Plot

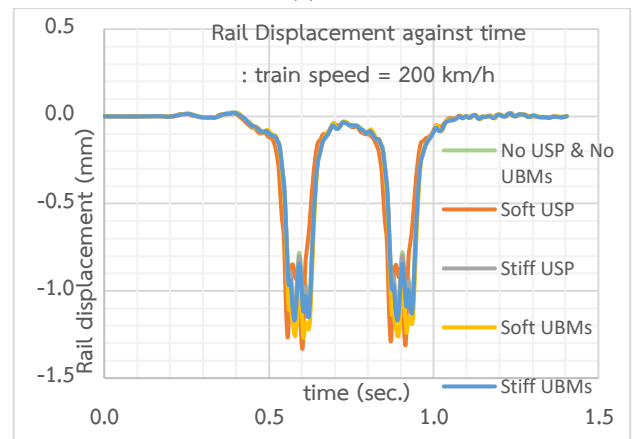
จากการพิจารณาการทรุดตัวของรางเทียบกับเวลาในขณะที่รถไฟวิ่งผ่าน จะใช้จุดกึ่งกลางรางเป็นตัวแทนในการพิจารณาและพิจารณาเทียบผลที่ได้แต่ละกรณีที่มีความเร็วเดียวกัน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น ที่ความเร็ว 100, 150 และ 200 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ดังกราฟรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าในกราฟทั้งสามความเร็ว จะมีการทรุดตัวของรางอย่างเห็นได้ชัด 2 ช่วง และเนื่องจากโมเดลรถไฟที่ใช้มีทั้งหมด 2 โบกี้ แสดงให้เห็นว่าช่วงทั้งสองคือการทรุดตัวของรางขณะที่โบกี้หน้าและโบกี้หลังวิ่งผ่านจุดที่เรากำลังพิจารณานั้นเอง โดยที่ความเร็วรถไฟ 100 และ 150 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ค่าการทรุดตัวที่ได้ในแต่ละกรณีจะมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นกรณีที่โครงสร้างถูกเสริมด้วย Soft UBM จะมีค่าการทรุดตัวของรางมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ ดังรูป (a) และ (b) ขณะที่รูป (c) เมื่อรถไฟวิ่งด้วยความเร็ว 200 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สิ่งที่แตกต่างจากสองความเร็วแรกก็คือโครงสร้างที่เสริมด้วย Soft USP จะมีการทรุดตัวมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยทั้งโครงสร้างที่ถูกเสริมด้วย Soft USP และ โครงสร้างที่ถูกเสริมด้วย Soft under ballast mat (UBM) จะทำให้เกิดการทรุดตัวที่มากกว่ากรณีที่ไม่มีการเสริมหรือเสริมอุปกรณ์แบบแข็ง (No USP&UBM/ Stiff USP/ Stiff UBM) จึงสรุปได้ว่าที่ความเร็วรถไฟต่ำ โครงสร้างทางรถไฟที่ถูกเสริมด้วย Soft UBM จะทำให้รางเกิดการทรุดตัวได้มาก และเมื่อความเร็วสูงขึ้นการเสริมด้วย Soft USP ก็จะทำให้รางทรุดตัวได้มากขึ้นเช่นกัน.



(a)



(b)

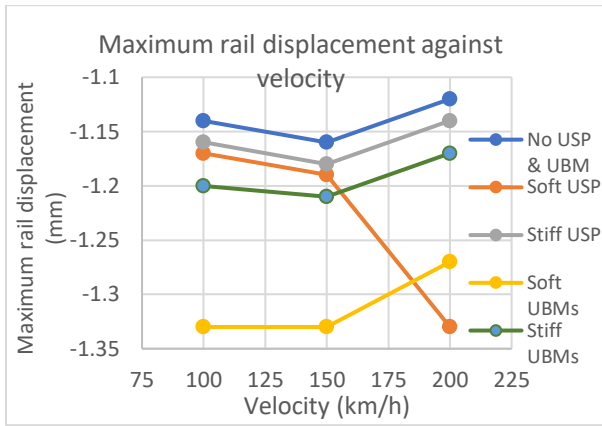


(c)

รูปที่ 5 กราฟ Rail displacement ของจุดบนรางรถไฟ ซึ่งได้จากโครงสร้างทางรถไฟชนิดต่างกัน เมื่อรถไฟวิ่งที่ความเร็ว (a) 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (b) 150 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (c) 200 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

3.1.2 Maximum rail displacement – train velocity plot

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวที่มากที่สุดของราง (Maximum Rail Displacement) และ ความเร็วรถไฟ (Velocity) ดังรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าโมเดลที่มีการติดตั้ง USP และ UBM มีแนวโน้มที่ทำงานได้ดีมากขึ้นที่ความเร็วมากขึ้น (ตั้งแต่ 150 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) แต่โมเดลที่มีการติดตั้ง USP แบบ soft นั้นที่ความเร็วมากกว่า 150 กิโลเมตรต่อชั่วโมงนั้น เพิ่มการทรุดตัวของราง ถึงแม้ว่า USPs จะถูกออกแบบมาเพื่อความยืดหยุ่นต่อระบบโครงสร้างเพื่อเพิ่มการเคลื่อนที่ตอบสนองได้ดีขึ้น และลดแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ดี ในกรณีที่รถไฟมีความเร็วสูง USP แบบ stiff จะสามารถรับแรงที่เกิดขึ้นในระบบโครงสร้างได้ดีกว่า และในกรณีที่ USP แบบ soft ทำให้เกิดการทรุดตัวของรางที่มากขึ้น อาจเพราะ ค่า Stiffness และ Damping Coefficient ของชุดตัวอย่างมีค่าที่น้อยเกินไปจึงก่อให้เกิดการทรุดตัวของรางที่มากขึ้น



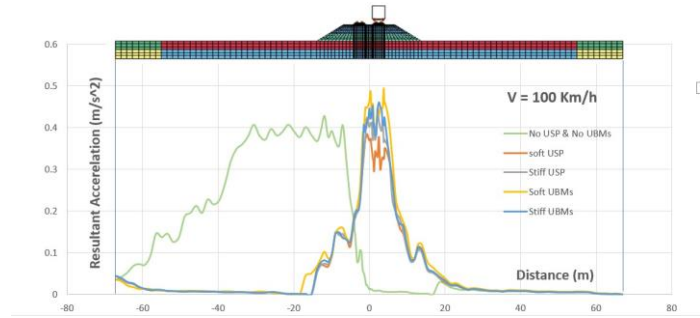
รูปที่ 6 กราฟ Maximum rail displacement – train velocity ในแต่ละรูปแบบโครงสร้างทางรถไฟ

3.2 การสั่นสะเทือนที่ผิวดิน (Ground Vibration)

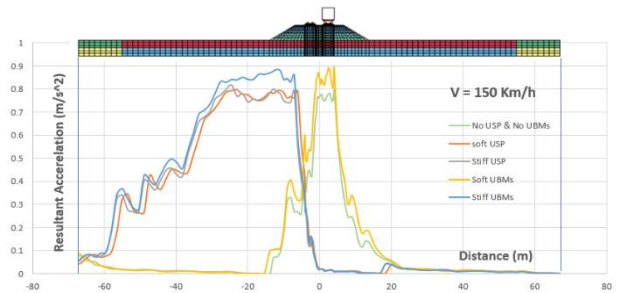
3.2.1 Resultant acceleration

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของชั้นดินจะพิจารณาจากกราฟความเร็ว (Resultant Acceleration) เทียบกับ เวลา (Time) ที่เกิดขึ้นบน Node ต่างๆ ในแบบจำลอง FEM ของโครงสร้างทางรถไฟ โดยจะนำค่าความเร็วสูงสุด (Maximum resultant acceleration) ของแต่ละ node มาเป็นตัวแทนของความเร็ว ณ ตำแหน่งต่างๆ ของชั้นดินตามระยะห่างจากศูนย์กลางของโครงสร้างทางรถไฟ ได้ดังรูปที่ 7 จากทั้งสามกราฟ จะเห็นได้ว่า เมื่อความเร็วของรถไฟเพิ่มขึ้นความเร็วในชั้นดินก็จะเพิ่มตามไปด้วย อีกทั้งโครงสร้างทางรถไฟที่ถูกเสริมด้วย Soft UBM มีโอกาสจะเกิดความเร็วมากที่สุด

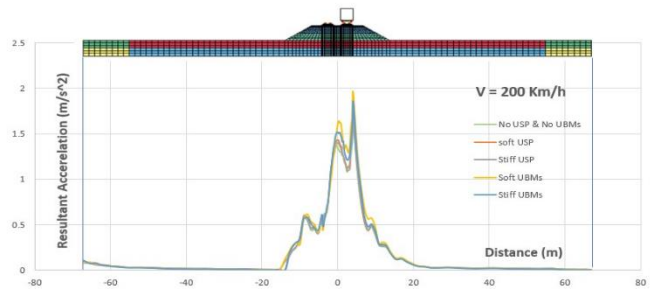
เมื่อพิจารณาที่ความเร็วรถไฟเท่ากัน รูป (a) ที่ความเร็วรถไฟ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จะพบว่าโครงสร้างที่ถูกเสริมด้วย Soft USP จะเกิดความเร็วที่น้อยที่สุด ขณะที่โครงสร้างที่ไม่มีอุปกรณ์เสริม (No USP & UBM) จะมีลักษณะกราฟที่ต่างออกมา โดยจะมีความเร็วสูงในฝั่งที่ติดกับรางที่รถไฟไม่ไดวิ่ง และมีช่วงที่มีความเร็วสูงค่อนข้างกว้าง ต่างจากในโครงสร้างรูปแบบอื่นที่ความเร็วสูงสุดจะอยู่ใกล้กับทางรถไฟมากที่สุดแล้วจึงลดลงตามระยะที่ห่างออกไป ทั้งนี้รูปแบบกราฟของโครงสร้างที่ไม่มีอุปกรณ์เสริม (No USP & UBM) ที่ความเร็วรถไฟ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จะคล้ายคลึงกันกับกราฟที่ได้จากโครงสร้างทางรถไฟที่ถูกเสริมด้วย Soft USP, Soft UBM หรือ Stiff UBM ที่ความเร็วรถไฟ 150 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สาเหตุที่ได้กราฟลักษณะเช่นนี้ ผู้วิจัยคาดว่าเกิดมาจากการสั่นพ้อง (Resonance) ที่เกิดในดิน และในส่วนของกราฟที่ได้จากโครงสร้างทางรถไฟที่ความเร็วรถไฟ 150 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่เหลือจะมีลักษณะเหมือนกันกับกราฟที่ได้จากโครงสร้างทางรถไฟที่ความเร็วรถไฟ 200 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานทั่วไป นั่นก็คือความเร็วจะมากที่สุดบริเวณกึ่งกลางรางและจะค่อยลดลงตามระยะทางที่ห่างออกมา



(a)



(b)

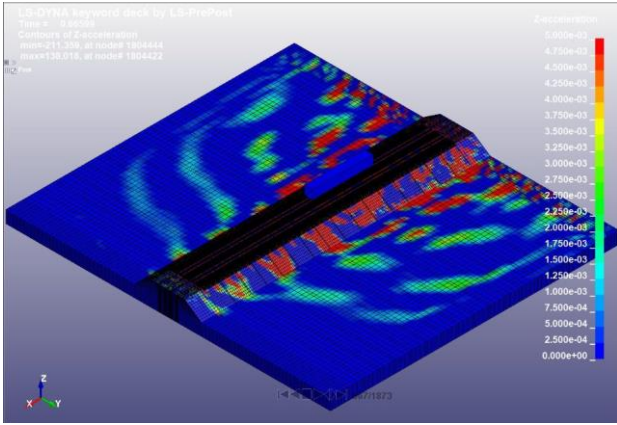


(c)

รูปที่ 7 กราฟ Maximum Resultant acceleration ของ node บนหน้าตัดดินบริเวณกึ่งกลางโครงสร้างทางรถไฟรูปแบบต่างๆ เมื่อรถไฟวิ่งที่ความเร็ว (a) 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (b) 150 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (c) 200 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

3.2.2 Acceleration contour

เป็นภาพที่แสดงถึงเส้นชั้นความสูงของความเร็วในแนวตั้งที่เกิดบนผิวดินขณะที่รถไฟวิ่งผ่าน โดยจะแสดงออกมาในรูปแบบของแถบสี ซึ่งจะเห็นได้ว่าการสั่นสะเทือนในชั้นดินนั้นจะมีค่ามากที่สุดบริเวณใกล้ราง มีรูปแบบกระจายตัวออกไปเป็นคลื่นรอบตัวโบกี้รถไฟ และที่ความเร็วมากขึ้น การสั่นสะเทือนก็จะมากขึ้น ซึ่งการที่การติดตั้ง USPs และ UBMs นั้นจะช่วยลดการสั่นสะเทือนได้ดี โดยเฉพาะ การติดตั้ง USPs แบบ Stiff ที่จะเห็นได้ชัดว่ามีการช่วยลดการสั่นสะเทือนในชั้นดินได้ดี



รูปที่ 8 รูป acceleration contour ขณะรถไฟกำลังวิ่ง ของตัวอย่าง
โครงสร้างทางรถไฟที่เสริม USP

4. บทสรุป

4.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยโดยศึกษาผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ isolation layer อันได้แก่ USPs และ UBMs ทั้งชนิดอ่อน(soft) และชนิดแข็ง(stiff) ในโครงสร้างทางรถไฟแบบชั้นหินโปรยทาง(Ballasted track) เปรียบเทียบกับโครงสร้างทางรถไฟแบบชั้นหินโปรยทาง(Ballasted track) ที่ไม่ถูกเสริมด้วย isolation layer ใดๆเลย ทำได้โดยการสร้างแบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟแบบชั้นหินโปรยทาง(Ballasted track) บนโปรแกรม LS-DYNA ในรูปแบบต่างๆ ทั้งที่มีและไม่มี isolation layer แล้วทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์จากค่าการทรุดตัวของราง (Rail displacement) และ ค่าการสั่นสะเทือนของชั้นดิน (Ground vibration) ได้ดังนี้

- การทรุดตัวของราง (Rail displacement) หากรถไฟวิ่งด้วยความเร็ว 100-150 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จะเกิดขึ้นมากอย่างเห็นได้ชัด ในโครงสร้างทางรถไฟที่เสริมด้วย Soft UBM และในความเร็วที่เพิ่มขึ้นเป็น 200 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โครงสร้างทางรถไฟที่เสริมด้วย Soft USP ก็จะมีการทรุดตัวที่มากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นหากไม่ต้องการให้เกิดการทรุดตัวบริเวณรางมาก ไม่ควรเลือกใช้ Isolation layer แบบ soft หากต้องการใช้ควรใช้แบบ stiff อีกทั้งผลการทรุดตัวที่ได้ยังนำไปสู่ผลสรุปที่ว่า Isolation layer ทั้ง USP และ UBM ไม่สามารถลดการทรุดตัวที่เกิดขึ้นบนรางได้อย่างมีนัยสำคัญ

- จากค่าการทรุดตัวที่มากที่สุดของราง(Maximum rail displacement) ส่วนใหญ่จะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือค่า Maximum rail displacement ที่ความเร็ว 150 กิโลเมตรต่อชั่วโมงจะมีค่ามากกว่าที่ความเร็ว 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เล็กน้อยจนแทบไม่แตกต่าง แต่ที่ความเร็ว 200 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ค่า Maximum rail displacement จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นในกรณีของ โครงสร้างทางรถไฟที่เสริมด้วย Soft USP ที่ค่าจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีรถไฟความเร็ว 200 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จึงนำไปสู่ข้อสรุปการใช้งานคือ การเลือกใช้ Soft USP สามารถทำได้ในการใช้ความเร็วรถไฟต่ำกว่า 150 กิโลเมตร

ต่อชั่วโมง เนื่องจากยังไม่ก่อให้เกิดการทรุดตัวที่มาก แต่ที่ความเร็วสูงขึ้นจะทำให้ค่าการทรุดตัวเพิ่มขึ้นสูงมากจึงไม่เหมาะในการใช้

- การเกิดความเร่งบนพื้นดิน (Resultant acceleration) จะมีลักษณะสองแบบคือ 1.แบบตามสมมติฐานทั่วไปนั้นคือมีความเร่งสูงที่บริเวณกึ่งกลางรางแล้วค่อยลดลงในดินที่ห่างออกไป โดยในกรณีนี้การใช้ Soft USP จะก่อให้เกิดความเร่งที่น้อยที่สุด 2.แบบที่เกิดความเร่งสูงบริเวณด้านข้างรางที่ไม่มีรถไฟวิ่ง ซึ่งช่วงบริเวณดินที่ได้รับ ความเร่งที่สูงนั้นจะกว้างกว่าในกรณีแรก แล้วจึงค่อยๆลดลงไปตามระยะห่าง ซึ่งการเกิดลักษณะนี้อาจเป็นผลมาจากชนิดของดิน, ความเร็วรถไฟและ Isolation layer ที่นำมาเสริม ดังนั้นหากต้องการลดความสั่นสะเทือนของพื้นที่บริเวณโดยรอบ (Ground vibration) จึงควรเลือกใช้ Soft USP มาเสริมโครงสร้างทางรถไฟ หากแต่ต้องตรวจสอบความเร็วรถไฟที่ใช้วิ่งและคุณสมบัติของดินก่อนเพื่อไม่ให้เกิดความเร่งลักษณะเดียวกันกับกรณีที่สองนั่นเอง

4.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

- ควรมีการศึกษา และค้นคว้านำผลการทดลองจากการตอบสนองของโครงสร้างรถไฟ ในภาคสนาม เพื่อยืนยันความถูกต้อง
- สำรองตัวอย่างของดินในบริเวณที่มีการก่อสร้างรถไฟความเร็วสูง เพื่อที่จะมีการปรับค่าคุณสมบัติของดินให้สามารถประยุกต์ใช้กับดินในบริเวณที่ก่อสร้างได้ดียิ่งขึ้น
- ควรมีการเพิ่มจำนวนโมเดลโดยการจำกัดความเร็วสูงสุดให้สอดคล้องกับความเร็วสูงสุดของรถไฟ เพื่อเป็นกรณีศึกษาเพิ่มเติม
- ควรมีการเพิ่มจำนวนโมเดลที่มีการติดตั้ง USPs และ UBMs ที่ค่า stiffness ที่มากกว่านี้ เพื่อเป็นกรณีศึกษาเพิ่มเติม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ต้องขอขอบคุณอาจารย์ชยุตม์ งามโขง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และ นายสุรพันธ์ นพรัตน์ ที่ให้ข้อเสนอในการทำวิจัย ให้คำแนะนำและคำปรึกษาทั้งในด้านทฤษฎี และประสบการณ์ในงานวิจัย ตลอดจนช่วยในการติดตามผลความคืบหน้าและการปรับปรุงแก้ไขตลอดของโครงการครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ting Li, Qian Su, Sakdirat Kaewunruen (2020). Influences of dynamic material properties of slab track component on the train-track vibration interactions. School of Civil Engineering, Southwest Jiatong University, Chengdu 610031, China.
- [2] Bowen, Di Wang, Bingbing Wang, Xingyu Chen, Joao Pombo (2022). Vibration Reduction in Ballasted Track Using Ballast Mat: Neumerical and Experimental Evaluation by Wheelset Drop Test. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, No.3, Shangyuan Village, Haidian District, Beijing 100044, China.
- [3] Anders Johansson, Jens C.O. Nielsen, Rikard Bolmsvik, Anders Karlstrom, Roger Lunden (2022). Under sleeper pads-Influence on dynamic train-track interaction. Department of Applied Mechanics/CHARMEC, Chalmers University of Technology, SE-412 96 Göteborg, Sweden.
- [4] P J Gräbe, B F Mtshotana, M M Sebati, E Q Thünemann (2016). The effects of under-sleeper pads on sleeper-ballast interaction. South African Institution of Civil Engineering.
- [5] Ting Li, Qian Su, Sakdirat Kaewunruen (2020). Influences of piles on the ground vibration considering the train-track-soil dynamic interactions. School of Civil Engineering, Southwest Jiatong University, Chengdu 610031, China.
- [6] Ting Li, Qian Su, Sakdirat Kaewunruen (2020). Seismic metamaterial barrier for ground vibration mitigation in railways considering the train-track-soil dynamic interactions. School of Civil Engineering, Southwest Jiatong University, Chengdu 610031, China.
- [7] Zhiping Zeng, Abdulmumin Ahmed Shuaibu, Fushan Liu, Mengxuan Ye, Weidong Wang (2020). Experimental study on the vibration reduction characteristics of the ballasted track with rubber composite sleepers. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China.
- [8] Sinniah K. Navaratnarajah, B. Indratna (2018). Influence of Under Sleeper Pads on Ballast Behavior Under Cyclic Loading: Experimental and Numerical Studies. University of Technology, New South Wales, Australia.
- [9] Mr.Suraoan Noppharat (2022). Dynamic Train-Track-Soil Interaction at Track Transition Zone by Using Under Sleeper Pads and Under Slab Mat. Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Pathumwan 10330, Bangkok.
- [10] Mr.Thanapol Sirithaweasuk, Mr.Tirapon Kajornkiatnukul (2021). Effect of High-Speed Train on Railway Track Vibration. Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Pathumwan 10330, Bangkok.