

การวิเคราะห์ผลตอบแทนเชิงพลศาสตร์ในช่วงรอยต่อโครงสร้างทางรถไฟโดยใช้แผ่นวัสดุยื่นหยุน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DYNAMIC RESPONSE OF RAILWAY TRACK TRANSITION  
USING RESILIENT MATERIALS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ในช่วงรอยต่อ
	โครงสร้างทางรถไฟโดยใช้แผ่นวัสดุเย็นหยุ่น
โดย	นายสุรพันธุ์ นพรัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุตม์ งามโขมง

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธิดารัตน์ วิสุทธิเสรีวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุตม์ งามโขมง)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สุรพันธุ์ นพรัตน์ : การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ในช่วงรอยต่อโครงสร้างทาง  
 รถไฟโดยใช้แผ่นวัสดุยืดหยุ่น. ( DYNAMIC RESPONSE OF RAILWAY TRACK  
 TRANSITION USING RESILIENT MATERIALS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ชยุตม์ งาม  
 โขนง

ปัจจุบันโครงสร้างพื้นฐานระบบราง มีแนวโน้มในการพัฒนาสูงขึ้นเป็นอย่างมาก จากข้อดี  
 ของการใช้งานที่มีความสะดวก การรับน้ำหนักบรรทุกได้สูง สามารถกำหนดเวลาได้แม่นยำ  
 ประเทศที่มีสถิติความก้าวหน้าในการพัฒนาระบบขนส่งทางรางอันดับต้นได้แก่ ประเทศจีน ที่ได้มี  
 การวิจัยองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับงานวิศวกรรมด้านระบบรางอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการ  
 พัฒนารถไฟความเร็วสูง (High Speed Train) หนึ่งในปัญหาสำคัญที่พบคือ ปัญหาช่วงรอยต่อ  
 (Track Transition) สาเหตุมาจากการเปลี่ยนรูปแบบทำให้ค่า Track Stiffness เกิดการ  
 เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เกิดความเร่ง และแรงเชิงพลศาสตร์มากกว่าปกติ โครงสร้างจะเกิดความ  
 เสียหาย และในระยะยาวส่งผลให้เกิดการหลุดตัวบริเวณรอยต่อที่ไม่เท่ากัน จำเป็นต้องดูแลรักษา  
 ซ่อมบำรุงมากกว่าปกติ ปัจจุบันโครงสร้างทางรถไฟในประเทศไทยจะมีการพัฒนาทางรถไฟ  
 ความเร็วสูงด้วยโครงสร้างทางแบบ Slab Track ด้วยเทคโนโลยี Chinese Railway Track  
 System (CRTS Type III) จากประเทศจีน ในโครงการรถไฟความเร็วสูง ไทย-ลาว-จีน พบว่ามีส่วน  
 ของเส้นทางที่เป็น Transition ระหว่าง Ballasted Track และ Slab Track ซึ่งในงานวิจัยนี้จะ  
 นำเอาโครงสร้างลดการสั่นสะเทือนประเภท Under Sleeper Pads (USPs) และ Under Slab  
 Mat (USMs) มาใช้งานร่วมกัน เพื่อช่วยลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น และปรับปรุงการเปลี่ยนแปลง  
 ค่า Track Stiffness ให้เหมาะสม จากการศึกษาในงานวิจัยในอดีต พบว่ามีการปัญหา Track  
 Transition ด้วยวิธีการหลากหลาย แต่ยังไม่ได้มีการศึกษาในแง่ของการใช้งานร่วมกันในโครงสร้าง  
 ช่วยลดการสั่นสะเทือนแบบผสมผสานที่มากเพียงพอ เป็นเหตุสมควรให้ต้องทำการวิจัยเพิ่มเติม  
 เกี่ยวกับการลดการสั่นสะเทือน แรงกระแทก (Impact Load) และการหลุดตัวที่ไม่เท่ากันที่เกิดขึ้น  
 เพื่อนำมาปรับใช้เป็นแนวทางในการศึกษาเพิ่มเติม ในหัวข้อที่มีความเกี่ยวข้อง ต่อไป

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6470299421 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Track Transition, Dynamic Train-Track-Soil Interactions, Under Sleeper Pads (USPs), Under Slab Mats (USMs)

Surapan Noppharat : DYNAMIC RESPONSE OF RAILWAY TRACK TRANSITION USING RESILIENT MATERIALS. Advisor: Asst. Prof. CHAYUT NGAMKHANONG, Ph.D.

Railway infrastructure development is a growing trend around the globe, offering numerous benefits. However, one of the significant challenges is the track transition problem that arises from changing track sections. This leads to abrupt changes in track stiffness, resulting in substantial damage to the track structure due to the differential settlement, thereby increasing maintenance costs. In Thailand, the first phase of Thailand's high speed rail project has introduced a slab track system from China combined with traditional ballasted tracks at several sections. It is important to note that transition area can be critical and. However, the combined method of using both Under Sleeper Pads (USPs) and Under Slab Mats (USMs) has not been widely adopted, even though it has the potential to reduce track vibration, impact load, and differential settlement. This paper presents the 3D train-track-soil finite element model at railway track transition zone with USPs and USMs. Numerical results from a train-track-soil model computed using LS-DYNA are validated with field measurements and previous numerical results. While there are various ways to address these problems, the mixed method of using USPs and USMs is found to be an alternative to mitigate the problem at railway track transition.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2022

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชยุตม์ งามโขง ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ซึ่งได้คอยให้คำแนะนำ และเสนอข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในงานวิจัยครั้งนี้ รวมไปถึงช่วยในการตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างยิ่งมา ณ ที่นี้ด้วย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธิดารัตน์ วิสุทธิ์เสรีวงศ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ ซึ่งเป็นประธาน และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความกรุณาในการให้คำแนะนำ ดิชม และตรวจสอบแก้ไขข้อผิดพลาดในวิทยานิพนธ์ในฉบับนี้ ทำให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นจนสำเร็จผลได้ด้วยดี

ท้ายที่สุด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอน ถ่ายทอดวิชาความรู้ทุกศาสตร์ ทุกแขนง และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้คอยสั่งสอนอบรม และให้การสนับสนุน ตั้งแต่วัยเยาว์จนสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี และโท

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า โครงการฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจต้องการศึกษา รวมไปถึงสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาในเชิงวิชาการให้เกิดประโยชน์ในสังคมต่อไป

สุรพันธุ์ นพรัตน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มา และความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตในการศึกษา.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินการศึกษา.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1.1 ระบบโครงสร้างทางรถไฟ (Railway track system).....	7
2.1.2 องค์ประกอบของโครงสร้างทาง (Railway Track Component).....	9
2.1.3 การถ่ายน้ำหนักลงบนโครงสร้างทางรถไฟ (Load Transfer on Track Structures). 14	
2.1.4 ช่วงรอยต่อของระบบราง (Track Transition Zone).....	16
2.1.5 การสั่นสะเทือนของโครงสร้างระบบราง (Vibrations of Track Structures).....	18

2.1.6 การสั่นพ้อง (Resonance).....	19
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.2.1 การแก้ปัญหาการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ผ่านของขบวนรถไฟ .....	20
2.2.2 การศึกษาที่เกี่ยวกับการแก้ปัญหาในบริเวณ Track Transition Zone .....	23
2.2.3 การศึกษาการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับแผ่นวัสดุยึดหุ่น.....	26
2.2.4 สรุปประเด็นการแก้ปัญหา Track Transition จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	28
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย .....	32
3.1 การจำลองโครงสร้างทางรถไฟในช่วงของ Track Transition .....	32
3.2 การจำลองโครงสร้างทางรถไฟโดยใช้โปรแกรม LS-DYNA.....	34
3.2.1 การจำลองโครงสร้างของโมเดลขบวนรถไฟ (Train Modeling).....	36
3.2.2 การจำลองโครงสร้างของโมเดลทางรถไฟ (Track Modelling) .....	38
3.2.3 การจำลองโครงสร้างของโมเดลชั้นดิน (Ground Modelling).....	42
3.3 การแบ่งกรณีศึกษาการลดการสั่นสะเทือนโดยใช้ USPs และ USMs.....	46
บทที่ 4 ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม LS-DYNA .....	50
4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Validation).....	50
4.2 ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Responses) .....	51
4.2.1 การกระจัดของราง (Rail Displacement).....	52
4.2.2 ความเค้นของโครงสร้างทาง (Track Stress).....	59
4.2.2.1 ความเค้นของชั้นหินโรยทาง (Stress of Ballast).....	61
4.2.2.2 ความเค้นของชั้นหินโรยทาง (Stress of Ballast).....	64
4.2.3 ความเร่งของพื้นดิน (Ground Acceleration).....	67
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย .....	73
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	73
5.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม.....	74



บรรณานุกรม.....	76
ประวัติผู้เขียน.....	84



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	สรุปประเภทของ USPs และข้อแนะนำในการใช้งานจาก UIC (International Union of Railways) (Ngamkhanong & Kaewunruen, 2020).....	27
ตารางที่ 2	สรุปประเด็นการแก้ปัญหาที่สำคัญในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Transition Zones.....	29
ตารางที่ 3	สรุปประเด็นการแก้ปัญหาที่สำคัญในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Transition Zones (ต่อ)...	30
ตารางที่ 4	Properties of the Vehicle (Qi & Zhou, 2020).....	38
ตารางที่ 5	Properties of the Ballasted Track (Galvin et al., 2010) .....	41
ตารางที่ 6	Properties of the CRTS Type III : Slab Track (Wang et al., 2016).....	42
ตารางที่ 7	Properties of the Soil for Validation (Wang et al., 2016).....	44
ตารางที่ 8	Properties of the 3 Types of Under Sleeper Pads, USPs (Ngamkhanong et al., 2020).....	46
ตารางที่ 9	Properties of the 3 Types of Under Slab Mat, USMs (Kaewunruen et al., 2018).....	47
ตารางที่ 10	Study Case for the Analysis in LS-DYNA.....	48
ตารางที่ 11	การตรวจสอบความถูกต้องของ Train-Track Interaction ของฝั่ง Ballasted Track (Wang et al., 2016).....	50
ตารางที่ 12	การตรวจสอบความถูกต้องของ Train-Track Interaction ของฝั่ง Slab Track. ....	51

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 Ballasted Track Components (Sayeed & Shahin, 2016) .....	8
ภาพที่ 2 (a) CRTS Type I, (B) CRTS Type II, (c) CRTS Type III, และ (d) CRTS Double Block (DB) (Wang et al., 2016) .....	9
ภาพที่ 3 Sectional of Rails 60 E1 : UIC-60 Rail (Leboeuf, 2018) .....	9
ภาพที่ 4 Track Gauge (keralarail.com).....	11
ภาพที่ 5 Prestressed Concrete Sleeper (agcorailfasteners.com) .....	12
ภาพที่ 6 Subgrade Transition Wedge Design for High Speed Line (Sañudo et al., 2016) .....	13
ภาพที่ 7 Types of Slab Tracks in China (a) CRTS Type I (Prefabricated Slab Track), (b) CRTS Type II (Prefabricated Slab Track), (c) CRTS Type I Double Block Slab Track, (d) CRTS Type II Double Block Slab Track. (Ren et al., 2021) .....	14
ภาพที่ 8 Loaded Distribution in Stress Term (Modern Railway Track, 2011).....	15
ภาพที่ 9 การทรุดตัวของบริเวณ Ballasted Track และ โครงสร้างสะพาน (National Academics of Sciences, 2006).....	17
ภาพที่ 10 Accident on Hanover-Hamburg Railway Line. (2019) (mx-schroeder.medium.com) .....	19
ภาพที่ 11 Transition Zone Between Soft Track and Stiff Track.....	33
ภาพที่ 12 2D Analytical Models and 3D Simplified Models on Track Transition (Sañudo et al., 2016) .....	34
ภาพที่ 13 Typical Elements used in the Analysis (dynasupport.com/tutorial/elements) .....	35
ภาพที่ 14 Vehicle Models (a) Multibody Simulation (Li et al., 2020) (b) แบบจำลองขบวนรถไฟในโปรแกรม LS-DYNA .....	37

ภาพที่ 15 Roughness with Distance and PSD with Wave Length (Li et al., 2020).....	39
ภาพที่ 16 Ballasted Track (with Dimensional Modified) (a) Galvín et al. (2010) (b) Ballasted Track Section in LS-DYNA.....	40
ภาพที่ 17 Slab Track (a) CRTS Type III (An et al., 2017) (b) Slab Track Section in LS-DYNA.....	41
ภาพที่ 18 Absorbing Boundary of PML (Li et al., 2020).....	43
ภาพที่ 19 หน้าตัดของโมเดลชั้นดิน (Cross-Section of Ground Models).....	44
ภาพที่ 20 Transition Models in LS-DYNA.....	45
ภาพที่ 21 Transition Models with Under Sleeper Pads in LS-DYNA.....	49
ภาพที่ 22 การกระจัดที่แตกต่างกัน ตลอดแนวรอยต่อโครงสร้างทาง เปรียบเทียบกับค่า Track Stiffness ในกรณีที่ไม่มีการติดตั้งแผ่นวัสดุยึดหยุ่น.....	51
ภาพที่ 23 การกระจัดของรางเปรียบเทียบกับค่า Track Stiffness ตลอดแนว Transition 50 [km/hr] (a) Very Stiff USPs, (b) Stiff USPs, และ (c) Medium Stiff USPs.....	52
ภาพที่ 24 การกระจัดของรางเปรียบเทียบกับค่า Track Stiffness ตลอดแนว Transition 100 [km/hr] (a) Very Stiff USPs, (b) Stiff USPs, และ (c) Medium Stiff USPs.....	53
ภาพที่ 25 การกระจัดของรางเปรียบเทียบกับค่า Track Stiffness ตลอดแนว Transition 150 [km/hr] (a) Very Stiff USPs, (b) Stiff USPs, และ (c) Medium Stiff USPs.....	54
ภาพที่ 26 การกระจัดของรางเปรียบเทียบกับค่า Track Stiffness ตลอดแนว Transition 200 [km/hr] (a) Very Stiff USPs, (b) Stiff USPs, และ (c) Medium Stiff USPs.....	55
ภาพที่ 27 การกระจัดของรางเปรียบเทียบกับค่า Track Stiffness ตลอดแนว Transition 250 [km/hr] (a) Very Stiff USPs, (b) Stiff USPs, และ (c) Medium Stiff USPs.....	56
ภาพที่ 28 ร้อยละผลต่างการกระจัดบริเวณรอยต่อ ที่มีการติดตั้ง USPs และ USMs (a) 50 [km/hr], (b) 100 [km/hr], (c) 150 [km/hr], (d) 200 [km/hr], และ (e) 250 [km/hr].....	57
ภาพที่ 29 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในการหาจำนวนช่วงในการติดตั้ง USPs และ USMs กรณี Stiff USMs (a) 50 [km/hr] (b) 250 [km/hr].....	58

ภาพที่ 30 การกระจายตัวค่าความเค้นในแนวตั้งของชั้น Ballast ที่บริเวณตำแหน่งที่มีน้ำหนักรถล้อ กระทำในกรณีความเร็ว 250 [km/hr] (a) กรณีไม่มีการติดตั้ง USPs (b) กรณี Typical USPs และ Medium Stiff USMs .....	59
ภาพที่ 31 การกระจายตัวค่าความเค้นในแนวตั้งของชั้น Concrete Base กรณีความเร็ว 250 [km/hr] (a) กรณีไม่มีการติดตั้ง USMs (b) กรณี Typical USMs และ Medium Stiff USPs .....	60
ภาพที่ 32 การกระจายตัวของค่าความเค้นในแนวตั้งที่ชั้น Ballast กรณีค่าความเร็ว (a) 50 [km/hr], (b) 100 [km/hr], (c) 150 [km/hr], (d) 200 [km/hr], และ (e) 250 [km/hr].....	63
ภาพที่ 33 ค่าความเค้นในแนวตั้งสูงสุดในชั้น Ballast แต่ละค่าความเร็ว 50-250 [km/hr].....	64
ภาพที่ 34 การกระจายตัวของค่าความเค้นในแนวตั้งในชั้น Concrete Base กรณีค่าความเร็ว (a) 50 [km/hr], (b) 100 [km/hr], (c) 150 [km/hr], (d) 200 [km/hr], และ (e) 250 [km/hr].....	66
ภาพที่ 35 ค่าความเค้นในแนวตั้งสูงสุดในชั้น Concrete Base แต่ละค่าความเร็ว 50-250 [km/hr] .....	67
ภาพที่ 36 Ground Dynamic Response of Transition Zone, 250 km/hr.....	67
ภาพที่ 37 Dynamic Response in the term of Acceleration of Ground in Criticl Section without USMs and USPs.....	68
ภาพที่ 38 Dynamic Response in the term of Acceleration of Ground in Criticl Section by using (a) Stiff USMs with Very Stiff USPs (b) Stiff USMs with Stiff USPs and (c) Stiff USMs with Medium USPs .....	69
ภาพที่ 39 Dynamic Response in the term of Acceleration of Ground in Criticl Section by using (a) Medium Stiff USMs with Very Stiff USPs (b) Medium Stiff USMs with Stiff USPs and (c) Medium Stiff USMs with Medium USPs.....	70
ภาพที่ 40 Dynamic Response in the term of Acceleration of Ground in Criticl Section by using (a) Typical USMs with Very Stiff USPs (b) Typical USMs with Stiff USPs and (c) Typical USMs with Medium USPs .....	71
ภาพที่ 41 ค่าความเร่งสูงสุดในกรณีที่มีการใช้ USPs และ USMs ที่ต่างกัน ในช่วงความเร็ว 50 – 250 [km/hr] .....	72

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มา และความสำคัญ

องค์ความรู้ทางด้านวิศวกรรม รวมถึงความก้าวหน้าในด้านเทคโนโลยีการก่อสร้างในยุคปัจจุบัน ทำให้เกิดการพัฒนาด้านคมนาคมในหลากหลายด้าน หนึ่งในนั้นคือการพัฒนาทางด้านการสร้างพื้นฐานระบบราง (Railway infrastructure system) ที่มีแนวโน้มที่จะพัฒนาสูงขึ้นเป็นอย่างมากในยุคปัจจุบัน อันเนื่องมาจากข้อดีของการใช้งานการขนส่งทางราง ที่ส่งเสริมให้เกิดความสะดวกในแง่ที่หลากหลาย เช่น ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกได้ในขีดจำกัดที่สูงมากกว่าการขนส่งในรูปแบบอื่น เป็นรูปแบบการขนส่งที่สามารถกำหนดเวลาได้ค่อนข้างแม่นยำ เนื่องจากมีเส้นทางการขนส่งที่แน่นอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่มีการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจ และสังคม ย่อมส่งผลต่อการพัฒนาทางด้านสาธารณสุขภาคอื่นภายในประเทศเช่นกัน โดยประเทศที่มีสถิติในด้านความก้าวหน้าในการพัฒนาระบบขนส่งทางรางอันดับต้นของโลก ได้แก่ ประเทศจีน ที่ได้มีการศึกษา วิจัย คิดค้น และพัฒนาองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อ งานวิศวกรรมทางด้านระบบรางมาอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยเฉพาะการพัฒนาเพื่อให้เกิดความความก้าวหน้าของเทคโนโลยีรถไฟความเร็วสูง (High speed train) ที่จะมาเป็นระบบขับเคลื่อนที่สำคัญทางด้านเศรษฐกิจในปัจจุบันไปจนถึงอนาคต เพื่อให้สอดคล้องต่อขับเคลื่อนและพัฒนาประเทศ รวมไปถึงส่งเสริมสาธารณสุขภาคในการดำเนินชีวิตประจำวันของคนในประเทศ

ประเทศไทยในปัจจุบัน ที่ได้มีการวางแผน และทำการพัฒนาด้านการคมนาคมทางด้านระบบรางที่มากขึ้นกว่าแต่ก่อน ได้มีการรับเอาเทคโนโลยีการออกแบบ และก่อสร้างจากประเทศจีน เข้ามาทำการก่อสร้างในส่วนของเส้นทางที่เป็นแหล่งเชื่อมต่อสำคัญ ได้แก่ โครงการรถไฟความเร็วสูงไทย-ลาว-จีน โดยเมื่อมีการใช้รูปแบบการก่อสร้าง และมาตรฐานการออกแบบจากต่างประเทศ ทำให้ต้องมีการนำมาปรับใช้ทั้งในเรื่องของการวิเคราะห์ การออกแบบ รวมไปถึงคำนึงถึงความเหมาะสม มีความสอดคล้อง และเหมาะสมต่อการใช้งานเข้ากับสภาพภูมิประเทศ โดยในบางกรณี ก็จำเป็นต้องมีการปรับปรุง แก้ไข เพื่อให้ลักษณะที่เหมาะสมกับประเทศไทย โดยการที่จะปรับแก้ หรือปรับปรุงการออกแบบเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีนั้น มีความจำเป็นอย่างมากที่วิศวกรที่มีความเกี่ยวข้องกับระบบราง จะต้องมีความรู้ความเข้าใจอย่างเพียงพอต่อหลักการที่ใช้ในการออกแบบ หรือพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟความเร็วสูงที่กำลังจะเกิดขึ้น โดยในแง่ของวิศวกรรมโครงสร้าง ที่จะต้องเน้นคำนึงถึงความแข็งแรง ปลอดภัย ต่อผู้ใช้งานเป็นหลัก อีกทั้งยังสามารถช่วยให้เกิดความประหยัดต่อการออกแบบได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์

โครงสร้างระบบราง (Railway track system) โดยทั่วไปจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของราง หรือประเภทของโครงสร้างทางที่ใช้ ให้เข้ากับในแต่ละพื้นที่ ในแต่ละภูมิภาค ประเทศ ทำให้มีสิ่งที่ต้องการในการพิจารณาถึงในเรื่องของเสถียรภาพ ในการใช้งานของโครงสร้างทาง การคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง ปัญหาการสั่นสะเทือนจากการวิ่งผ่านของขบวนรถไฟ หนึ่งในปัญหาสำคัญเกี่ยวกับโครงสร้างทางรถไฟ ได้แก่ ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับช่วงรอยต่อของระบบราง (Track transition) หรือการที่โครงสร้างทาง มีการเปลี่ยนรูปแบบ อันเป็นต้นเหตุในการที่ทำให้ค่า Track stiffness ในแนวตั้งของโครงสร้างทาง เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (NAMURA & SUZUKI, 2007) ทำให้มีความเร่งในแนวตั้งที่สูงขึ้น เกิดแรงเชิงพลศาสตร์ที่มากกว่าปกติในบริเวณนั้น โครงสร้างทางจะเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความสามารถในการรับแรงที่ต่างกัน ในระยะยาวส่งผลให้เกิดเกิดการหลุดตัวของโครงสร้างทาง ณ บริเวณรอยต่อที่ไม่เท่ากัน และทำให้มีความต้องการในการดูแลรักษา หรือการซ่อมบำรุงที่มากกว่าโครงสร้างทางปกติ

การแก้ปัญหาช่วง Track transition ในอดีตได้มีการศึกษาถึงปัญหาที่เกิดขึ้น รวมถึงมีการตรวจสอบเพื่อแก้ไขปัญหา ทั้งในแง่ของการจำลองโครงสร้างในแบบจำลอง ด้วยโปรแกรมที่มีการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical models) และเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการตรวจวัดค่าจริงจากภาคสนาม (Field measurements) เพื่อทำการปรับปรุงแก้ไข และพัฒนาโครงสร้างจำลองให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น (Sañudo et al., 2016) ได้ทำการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และทำการจำแนกถึงแนวทางการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับ Track transition โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มหลัก ซึ่งในแต่ละแนวทางมีความแตกต่างกันทั้งในแนวการประสิทธิภาพในการแก้ปัญหา ค่าใช้จ่ายในการปรับปรุง และระยะเวลาในการใช้งาน ผู้ออกแบบควรที่จะคำนึงถึงผลกระทบในหลากหลายด้าน เพื่อให้เกิดความเหมาะสมต่อสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นจริง ที่จะทำให้การใช้งานของทางรถไฟ เกิดเสถียรภาพต่อทั้งโครงสร้างทาง และมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน

จากที่ได้กล่าวมา ระบบรางรถไฟภายในประเทศไทย มีการใช้งานรูปแบบของระบบทางรถไฟแบบ Ballasted track ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และจะมีการพัฒนารูปแบบทางรถไฟความเร็วสูงด้วยรูปแบบโครงสร้างทางแบบ Slab track ด้วยรูปแบบเทคโนโลยี Chinese Railway Track System หรือ CRTS Type III ที่รับมาจากประเทศจีน ในโครงการการก่อสร้างรถไฟ ความเร็วสูง ไทย-ลาว-จีน ซึ่งพบว่ามีส่วนที่เป็น Transition ระหว่าง Ballasted track และ Slab track เนื่องจากการศึกษา งานวิจัยในอดีต ผู้วิจัยพบว่าการสั่นสะเทือน และการหลุดตัวที่ไม่เท่ากัน ในบริเวณ Transition Zone (Shih et al., 2019) ด้วยวิธีการหลากหลายรูปแบบ แต่ยังไม่ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับ Track transition ในแง่ของการใช้งานร่วมกันในวัสดุยืดหยุ่น (Resilient material) ในส่วนของโครงสร้างทางแบบ Ballasted Track ไปยัง Slab Track ที่มากเพียงพอ

ในงานวิจัยนี้จะนำเอาโครงสร้างลดการสั่นสะเทือนประเภท Under Sleeper Pads (USPs) และ Under Slab Mat (USMs) มาใช้ร่วมกัน เนื่องจากความเหมาะสมในการใช้งาน USPs กับ รูปแบบของโครงสร้าง Ballasted Track ที่ยังคงมีการใช้งานภายในประเทศเป็นหลัก และในฝั่งของ Slab Track ที่สามารถติดตั้ง USMs ในชั้นของ Isolation Layers ได้ เพื่อช่วยในการลด และ ปรับปรุงการเปลี่ยนแปลงของค่า Track Stiffness ในช่วงของ Transition ให้เกิดความเหมาะสม และ เพื่อพัฒนาเป็นแนวทางในการใช้งานโครงสร้างที่ช่วยในการลดการสั่นสะเทือนแบบผสมผสาน ต่อไป

นอกเหนือจากนั้นด้วยการที่ USPs และ USMs เป็นวัสดุที่ผลิตจากยางพาราธรรมชาติ ซึ่งเป็นสินค้าประเภทพืชเศรษฐกิจในประเทศไทย จึงถือเป็นข้อดี และเป็นเหตุสมควรให้ต้องมีการ ศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับการลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น รวมถึงการลดแรงกระแทก (Impact Load) และการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของบริเวณที่เกิดขึ้น ใช้สำหรับเป็นแนวทางในการศึกษาเพิ่มเติม และเพื่อให้สอดคล้องกับประโยชน์ที่จะเกิดขึ้น ในการศึกษาเพิ่มเติมในหัวข้อที่มีความเกี่ยวข้อง หรือ ใกล้เคียงต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ของการวิจัยดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาผลกระทบจากการสั่นสะเทือน ปฏิสัมพันธ์ระหว่างขบวนรถ และโครงสร้างทางรถไฟ (Train-Track-Soil Interaction) ในโครงสร้างทางบริเวณช่วง Transition zone ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของทางรถไฟจาก Ballasted Track System เป็น Slab Track System
2. เพื่อพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟความเร็วสูง ในช่วงรอยต่อของทางรถไฟแบบ Ballasted Track System และ Slab Track System ในโปรแกรม LS-DYNA
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของรถไฟความเร็วสูง ที่มีผลต่อโครงสร้างรถไฟในช่วงของ Track Transition ที่มีการใช้ Under Sleeper Pads (USPs) และ Under Slab Mat (USMs) สำหรับการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งาน รูปแบบ และ ชนิดของโครงสร้างที่ช่วยลดการสั่นสะเทือนที่เหมาะสม เพื่อแก้ไขปัญหาในช่วงของ Track Transition Zone
4. เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างมาตรฐานการออกแบบ การบำรุงรักษา และการเสริมกำลัง โครงสร้างทางรถไฟในช่วง Track Transition ละเพื่อช่วยลดการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทางรถไฟ



### 1.3 ขอบเขตในการศึกษา

ในการวิจัยนี้ได้มีการกำหนดขอบเขตของการศึกษา เพื่อควบคุมให้ผลวิเคราะห์ที่ได้ให้เกิดความสอดคล้อง และสามารถนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบได้ ดังต่อไปนี้

1. พิจารณาการจำลอง Model ของขบวนรถไฟเป็นแบบ Multi-Body Simulations และการจำลองในช่วงของ Track Transition ที่ใช้ในการจำลองเป็นแบบ Fully Coupled Train Track Models โดยจำลอง Track System ด้วย Beam Element, Discrete Element และ Solid Element
2. พิจารณาการจำลอง Model ของชั้นดินโดยรอบด้วย Finite Element Models แบบ 3D Solid Element Models และวิธี Perfectly Matched Layer (PML)
3. พิจารณาการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟความเร็วสูง ในช่วงความเร็วไม่เกิน 250 [km/hr]
4. พิจารณาผลจากขบวนรถไฟ CR 400BF : Fuxing Hao EMU Train มีค่า Axle Load ที่ใช้ในการออกแบบ = 17 [Tons] (Qi & Zhou, 2020)
5. พิจารณา Model ของชั้นดินที่ใช้ในการจำลอง ให้คำนึงถึงผลของพฤติกรรมแบบ Visco-Elastic Materials บนพื้นฐานการจำลองด้วยโปรแกรม LS-DYNA

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

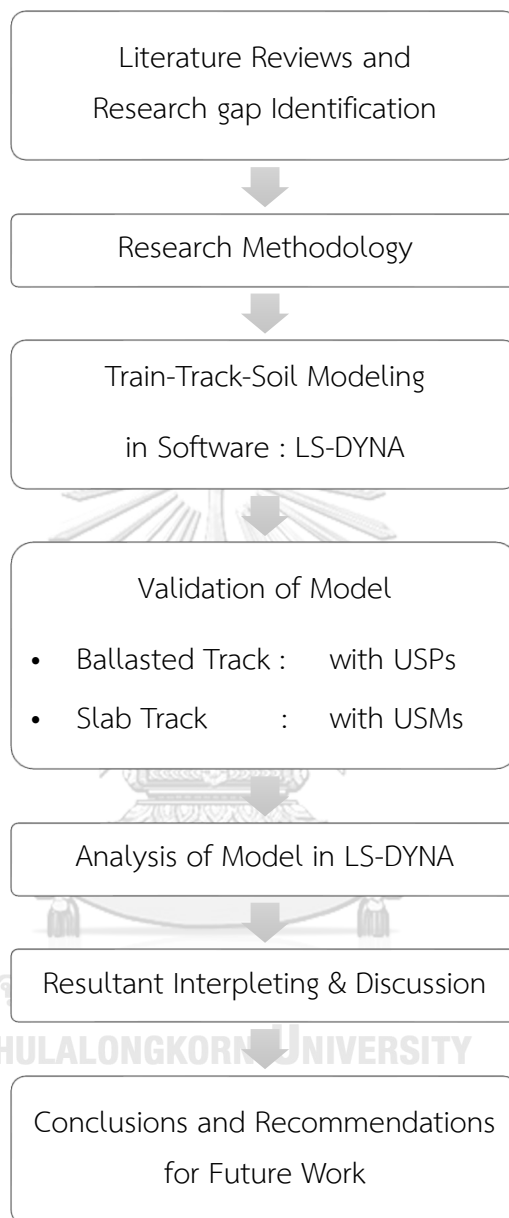
ผลจากการศึกษาจากงานวิจัยในครั้งนี้ คาดว่าจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปศึกษาเพิ่มเติมและพัฒนาต่อยอด ทั้งในแง่ของการใช้งานโครงสร้างช่วยลดการสั่นสะเทือน ได้แก่ USPs และ USMs ที่มีผลต่อการช่วยลดการสั่นสะเทือนในโครงสร้างทางรถไฟความเร็วสูง รวมไปถึงคาดว่าจะสามารถนำไปใช้ในการช่วยปรับปรุง และพัฒนา โครงสร้างทางรถไฟในช่วงของ Track Transition โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในเส้นทางที่มีโครงการรถไฟความเร็วสูงที่จะมีการก่อสร้างในประเทศ เพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดต่อการใช้งาน และสามารถช่วยในการวิเคราะห์ และออกแบบการใช้งานการลดการสั่นสะเทือนด้วยโครงสร้างที่หลากหลาย ในช่วงรอยต่อในทางรถไฟความเร็วสูงที่เกิดขึ้น หรือกำลังจะเกิดขึ้นในอนาคตได้

### 1.5 ขั้นตอนในการดำเนินการศึกษา

ในการวิจัย ผู้วิจัยได้จัดลำดับขั้นตอน และวิธีการ ในการดำเนินการศึกษาปัญหา ดังนี้

1. ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในช่วงของ Track Transition รวมถึงศึกษาทฤษฎีพื้นฐานในเรื่องโครงสร้างทาง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหา ศึกษาบทความทางวิชาการที่มีความเกี่ยวข้องในหัวข้อผลของ USPs และ USMs ที่มีผลต่อการลดความเร่ง และค่า Stiffness ในราง ศึกษาการแก้ไขปัญหาคาการสั่นสะเทือนของระบบราง ทั้งระบบรางที่ใช้หินโรยทาง (Ballasted Track System) และไม่ใช่หินโรยทาง (Slab Track System)
2. กำหนดขอบเขตของปัญหาในงานวิจัย และจัดทำระเบียบวิธีวิจัย
3. พัฒนาแบบจำลองโครงสร้าง ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ที่โครงสร้าง LS-DYNA โดยประกอบไปด้วยการจำลองโครงสร้างของ Train Models, Track Models และ Ground Models และพัฒนาแบบจำลองตามกรณีศึกษาที่มีการติดตั้ง USPs และ USMs เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณี
4. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Validation) โดยทำการตรวจสอบค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม LS-DYNA กับผลที่ได้จากการทดสอบ (Field Measurement) ทั้งในกรณีของ Ballasted Track และ Slab Track
5. ทำการวิเคราะห์ผลจากการจำลอง ในแง่ของผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่ได้จากโปรแกรม LS-DYNA ได้แก่ การทรุดตัวของราง, ความเค้นที่เกิดขึ้นภายใน Sleeper, ความเร่งที่เกิดขึ้นในชั้นดิน ทั้งก่อน และหลัง การทำการปรับค่า Stiffness ของ Track Transition อันเนื่องมาจากการใช้ USPs และ USMs
6. สรุปผลการวิจัยที่ได้ และข้อเสนอแนะเพิ่มเติม รวมถึงแนวทางในการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคต

โดยสามารถเขียนสรุปเป็นแผนภาพ แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนวิธีการศึกษาได้ เป็นลำดับขั้นตอนได้ ดังนี้



## บทที่ 2

### ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

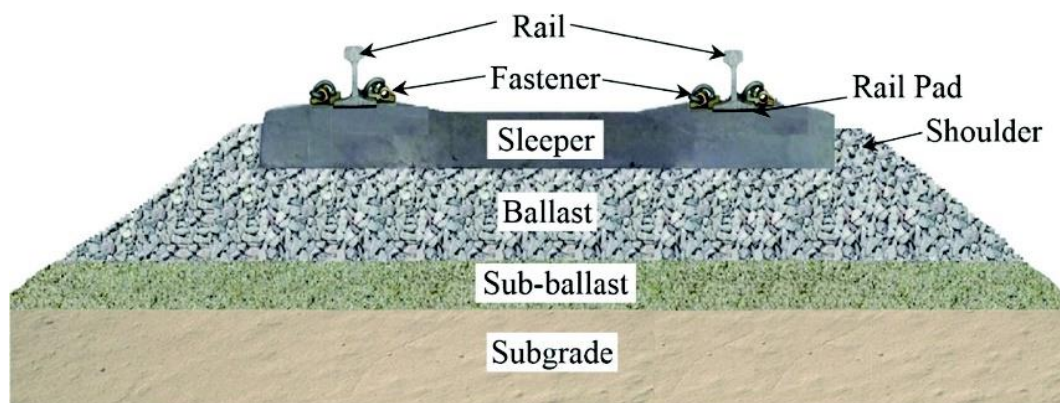
ในบทนี้ ผู้วิจัยได้ทำการสรุปรวบรวมเนื้อหาที่มีความเกี่ยวข้อง และทฤษฎีพื้นฐานที่จำเป็นต่อการทำความเข้าใจการแก้ปัญหาช่วงของ Track Transition ในโครงสร้างทาง รวมทั้งยังทำการสรุปข้อมูลจากหนังสือ เอกสารทางวิชาการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งข้อเสนอทางวิชาการที่มีความเกี่ยวข้องต่อเรื่อง Track Transition เพื่อใช้ในการอ้างอิงสำหรับงานวิจัย โดยในส่วนของทฤษฎี จะครอบคลุมในหัวข้อของพลศาสตร์โครงสร้างทางรถไฟ (Track Dynamics) รวมไปถึงพื้นฐานโครงสร้างระบบราง (Railway Track System)

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 ระบบโครงสร้างทางรถไฟ (Railway track system)

ระบบโครงสร้างทางรถไฟ (Railway track system) เป็นระบบการขนส่งรูปแบบหนึ่ง ที่นิยมใช้ในการขนส่ง คมนาคม และการใช้งานในด้านอุตสาหกรรม มีการพัฒนารูปแบบการเดินทางมาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยุคปัจจุบัน ที่ได้มีการพัฒนาทั้งในด้านการออกแบบ และการก่อสร้างอย่างต่อเนื่อง ในกลุ่มประเทศที่มีความเจริญทางเศรษฐกิจสูง โครงสร้างทางรถไฟเมื่อพิจารณาตามประเภทของโครงสร้าง โดยใช้หินโรยทางเป็นเกณฑ์ในการแบ่ง สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ โครงสร้างทางแบบใช้หินโรยทาง (Ballasted track system) และโครงสร้างทางแบบไม่ใช้หินโรยทาง (Slab track system)

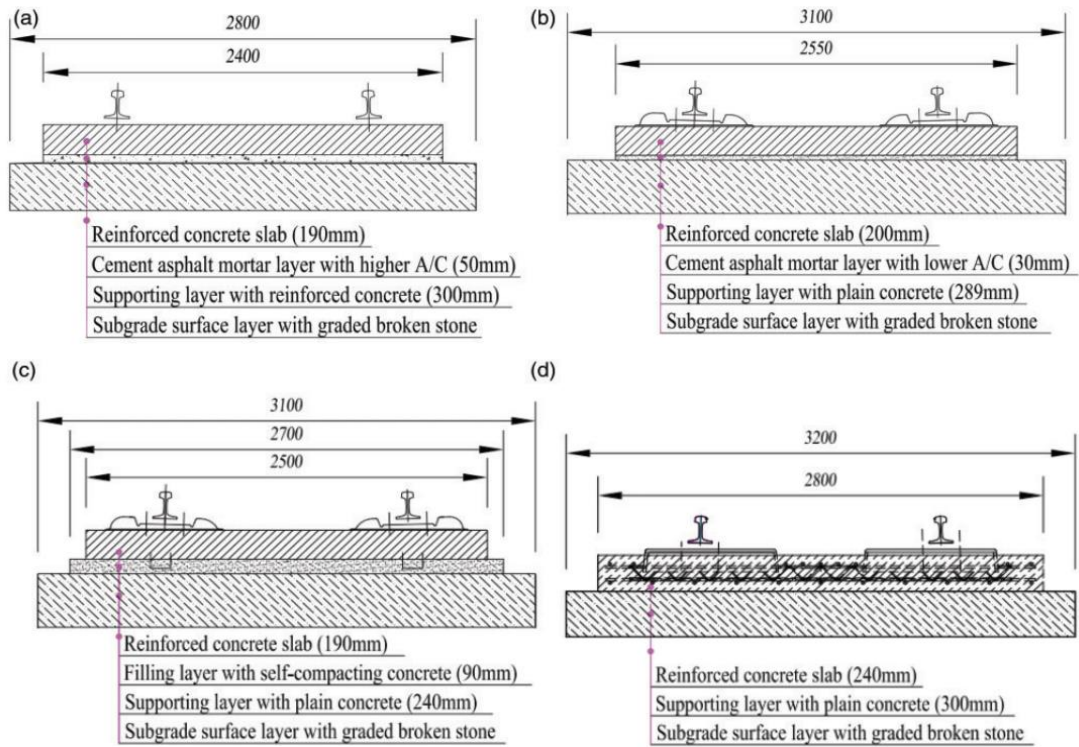
โครงสร้างทางแบบใช้หินโรยทาง (Ballasted track) คือ โครงสร้างทางรถไฟที่มีการใช้หินโรยทาง (Ballast) มาใช้เป็นวัสดุหลัก ในการรับน้ำหนักอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของรถไฟ และน้ำหนักบรรทุก เป็นที่นิยมมากในช่วงแรกของการพัฒนาโครงสร้างทางรถไฟ เนื่องจากการใช้วัสดุประเภทหินโรยทาง ที่เป็นวัสดุธรรมชาติ สามารถหาได้ง่ายจากอุตสาหกรรมการผลิตหลากหลายแหล่ง และมีราคาถูก เมื่อเทียบกับโครงสร้างประเภทอื่น โดยหลักการมีการนำเอาวัสดุประเภทหิน มาทำการบดอัด ใช้เป็นชั้นของโครงสร้างในการ ช่วยลดความสั่นสะเทือน และถ่ายน้ำหนักลงไปยังโครงสร้างที่อยู่ในระดับที่ต่ำกว่า ลงไปสู่ชั้นดิน ซึ่งโครงสร้างทางแบบใช้หินโรยทาง โดยทั่วไปจะมีองค์ประกอบของโครงสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 Ballasted Track Components (Sayeed & Shahin, 2016)

โครงสร้างทางแบบไม่ใช้หินโรยทาง (Ballast-less Track หรือ Slab Track) คือ ระบบรางอีก รูปแบบหนึ่งที่ไม่ได้ใช้หินโรยทาง เป็นวัสดุหลักในการก่อสร้าง โดยทั่วไปแล้วจะถูกออกแบบให้เป็น ลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในรูปแบบของ แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก หรือคอนกรีตอัดแรง ใช้ในการ รับกำลัง และถ่ายน้ำหนักแทนในส่วนของโครงสร้างหมอนรองราง รวมถึงวัสดุในชั้นทางอื่น ซึ่งเป็น รูปแบบโครงสร้างที่มีการพัฒนาขึ้นมาใหม่ หลังจากการใช้งานโครงสร้างทางแบบใช้หินโรยทาง มีความเหมาะสมในการใช้งานเป็นโครงสร้างของทางรถไฟที่ไม่ต้องการให้มีการทรุดตัวของราง หรือ ต้องการให้เกิดการเสีรูปร่างที่น้อยมาก แต่ในแง่ของการก่อสร้าง ประเภทของวัสดุที่ใช้ และค่าใช้จ่ายใน การบำรุงรักษา จะพบว่าค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าโครงสร้างทางแบบใช้หินโรยทาง โดยในหลายประเทศจะ มีการพัฒนารูปแบบของรางที่มีรูปแบบหน้าตัดของโครงสร้างที่ไม่เหมือนกัน ตามแต่มาตรฐาน ข้อกำหนด หรือลักษณะการก่อสร้างที่เหมาะสมในแต่ละประเทศ ซึ่งรูปแบบของโครงสร้างทางที่ถูก พัฒนาขึ้นในประเทศจีน ที่ได้มีการพัฒนารูปแบบของโครงสร้างทางประเภท Slab Track เพื่อการใช้งานร่วมกับรถไฟความเร็วสูง แบ่งได้เป็นทั้งหมด 4 รูปแบบ อันได้แก่ CRTS Type I, CRTS Type II, CRTS Type III, และ CRTS Double Block (DB) (Wang et al., 2016) ซึ่งแต่ละรูปแบบจะมี ลักษณะแสดงดังภาพที่ 2

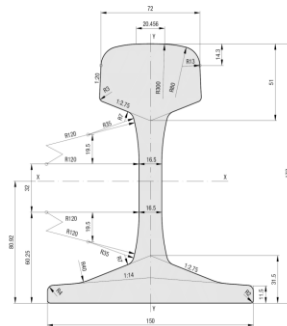
Ntotsios et al. (2019) ได้ทำการศึกษาเชิงเปรียบเทียบ การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในชั้นดิน (Ground Vibration) ระหว่าง Ballasted Track และ Slab Track ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษา พบว่า ความไม่สม่ำเสมอของระดับการรับน้ำหนักในทาง ในกรณีที่มีการจัดเรียงชั้นดินที่มีความอ่อนตัวสูง กว่าอยู่ด้านบน การใช้โครงสร้างทางรถไฟแบบ Slab Track ในบริเวณดินที่มีความอ่อนตัวสูง ค่า ความเร็ววิกฤตของขบวนรถจะสูงกว่า และโดยทั่วไปแล้วการใช้ Slab Track ทำให้เกิดการเสีรูปร่างของ โครงสร้างทางรถไฟที่ต่ำกว่า และนิยมใช้เป็นโครงสร้างหลักของรถไฟที่มีการวิ่งด้วยความเร็วที่สูง เนื่องจากต้องมีการรักษาเสถียรภาพในการวิ่งของขบวนรถให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



ภาพที่ 2 (a) CRTS Type I, (B) CRTS Type II, (c) CRTS Type III, และ (d) CRTS Double Block (DB) (Wang et al., 2016)

2.1.2 องค์ประกอบของโครงสร้างทาง (Railway Track Component)

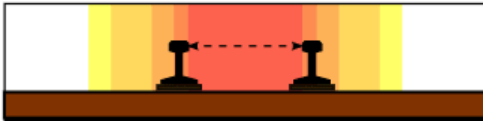

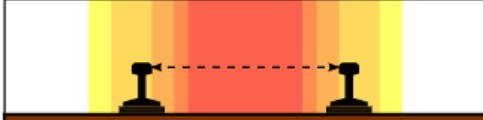

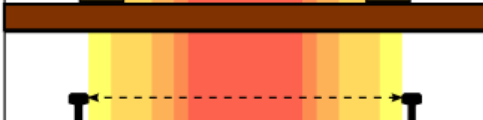
ลักษณะของโครงสร้างทางรถไฟจะมีองค์ประกอบย่อยในการถ่ายแรง หรือรับน้ำหนักบรรทุกของขบวนรถไฟ ที่แตกต่างกัน ค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ถูกเลือกในการนำมาใช้งานก็มีความต่างกัน ตามลักษณะประเภทของการใช้งาน โดยในส่วนนี้จะนำเสนอองค์ประกอบของโครงสร้างทาง ในแต่ละส่วนของทั้ง Ballasted Track System และ Slab Track System รวมถึงประเด็นหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับทางรถไฟ ซึ่งโครงสร้างทางแบบ Ballasted Track จะมีองค์ประกอบของโครงสร้างดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3 Sectional of Rails 60 E1 : UIC-60 Rail (Leboeuf, 2018)

ราง (Rail) เป็นโครงสร้างเหล็กหรือคอนกรีต หนาความยาวโดยประมาณ 15 เมตร อาจจะมีการเชื่อมต่อกันเพื่อให้เกิดความต่อเนื่องเป็น Continuous Rail หรือใช้ Fastener System (Xiao et al., 2022) ในการยึดรั้งเข้าด้วยกัน มีรูปแบบหน้าตัดเป็นรูปแบบที่ต่างกัน ตามการใช้งาน เพื่อใช้งานกับรูปแบบล้อที่มีความเฉพาะ โดยรูปแบบหน้าตัดของรางที่นิยมใช้กันเป็นอย่างมาก ได้แก่ หน้าตัดแบบ Vignole's Rails ที่ได้มีการแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งนอกเหนือจากนั้นยังมีการใช้งานรางรูปแบบอื่น อาทิ เช่น รางกัน (Auxiliary Rail) เป็นรางเสริมที่ช่วยในการป้องกันการตกรางของขบวนรถไฟ และคอยทำหน้าที่บังคับให้รถไฟสามารถวิ่งผ่านบริเวณนั้นไปอย่างปลอดภัยได้ นิยมใช้งานในบริเวณที่มีความเสี่ยงในการเคลื่อนที่ผ่านของขบวนรถไฟ โดยเฉพาะในช่วงของ Track Transition บริเวณสะพาน ที่มีการนิยมเอารางกันมาใช้งานร่วมด้วย รางกันจะช่วยประคองแนวการเปลี่ยนแปลงของล้อให้อยู่ในแนวของการเคลื่อนที่ ไม่อย่างนั้นในบางกรณีอาจจะพบว่ามีแรงกระทำในแนวด้านข้างที่มากกว่าปกติ อาจจะทำให้ล้อ เกิดการยกตัวที่มากกว่าปกติ จนเป็นเหตุทำให้เกิดการตกรางได้ หรือนอกจากนั้นอาจจะยังมีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมในบางระบบ อาทิเช่น รถไฟฟ้ามหานคร ที่จะมีการใช้ระบบไฟฟ้าในการเคลื่อนที่ จะต้องมีการใช้รางที่สาม (Third Rail) เข้ามาช่วยในการทำงานของระบบไฟฟ้า และอาณัติสัญญาณ ซึ่งในการป้องกันการสั่นสะเทือน สามารถใช้การติดตั้ง แผ่นรองราง (Rail Pad) ที่ตำแหน่ง Rail Seat เพื่อที่จะช่วยลดการส่งผ่านความเค้นไปยัง Substructures และเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของโครงสร้างราง (Sol-Sánchez et al., 2014)

ขนาดของทางรถไฟ (Track Gauge) เป็นระยะห่างระหว่างจุดสัมผัสภายในของ Wheelset ที่สัมผัสกับส่วนบนของราง ของรางทั้ง 2 ด้าน ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดรูปแบบของขบวนรถไฟที่วิ่งผ่าน ซึ่งในโครงการทางรถไฟความเร็วสูงเชื่อมต่อ 3 สนามบิน จะใช้การจำลองโครงสร้างทางรถไฟแบบ CRTS Type III ซึ่งมีค่า Track Gauge อยู่ที่ 1.435 [m] เป็นระบบแบบ Standard Gauge จะแตกต่างจากระบบ Gauge ที่ใช้เป็นมาตรฐานในประเทศไทย ที่เป็นรูปแบบ Meter Gauge

	<b>Narrow Gauge</b> 610 mm 2 ft
	<b>Narrow Gauge</b> 762 mm 2 ft 6 in
	<b>Meter Gauge</b> 1000 mm 3 ft 3 <sup>3</sup> / <sub>8</sub> in
	<b>Standard Gauge</b> 1435 mm 4 ft 8 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> in
	<b>Broad Gauge</b> 1676 mm 5 ft 6 in

ภาพที่ 4 Track Gauge (keralarail.com)

หมอนรองราง (Sleeper) เป็นโครงสร้างหลักในการรับแรง และช่วยในการกระจายแรงต่อจากส่วนของราง ส่งผ่านไปยังชั้นของหินโรยทาง และชั้นดิน มีหลายรูปแบบ อาทิเช่น ไม้ คอนกรีตอัดแรง เหล็ก วัสดุโพลีเมอร์ (Ferro et al., 2020) เป็นต้น โดยวัสดุที่นิยมนำมาใช้งานมาก คือ หมอนรองรางแบบคอนกรีตอัดแรง (Prestressed Concrete Sleeper) เนื่องจากคุณสมบัติที่สามารถรับแรงอัดได้ดีในส่วนของคอนกรีต และการเสริมกำลังในการรับแรงดึงในชั้นส่วนด้วย การใช้เหล็กอัดแรงและด้วยต้นทุนที่ต่ำ ทำให้เป็นที่นิยมใช้กันมากในประเทศไทย หลังจากเปลี่ยนผ่านจากวัสดุประเภทไม้ ที่เป็นวัสดุธรรมชาติ มีการเสื่อมสภาพตามเวลา (El-sayed et al., 2021) (Remennikov & Kaewunruen, 2014) ซึ่งด้วยการเสื่อมสภาพที่สามารถเกิดขึ้นได้ และการออกแบบเพื่อการใช้งานในระยะยาว การนำเอาระเบียบวิธี FEM มาใช้ในการวิเคราะห์การใช้งานของหมอนรองราง เพื่อนำค่าการวิเคราะห์ที่ได้ ตรวจสอบกับค่าที่ได้จากการทดสอบแบบ Full Scale Testing เป็นการทดสอบที่นิยมอย่างมากในปัจจุบัน (Momoya et al., 2016)





ภาพที่ 5 Prestressed Concrete Sleeper (agcorailfasteners.com)

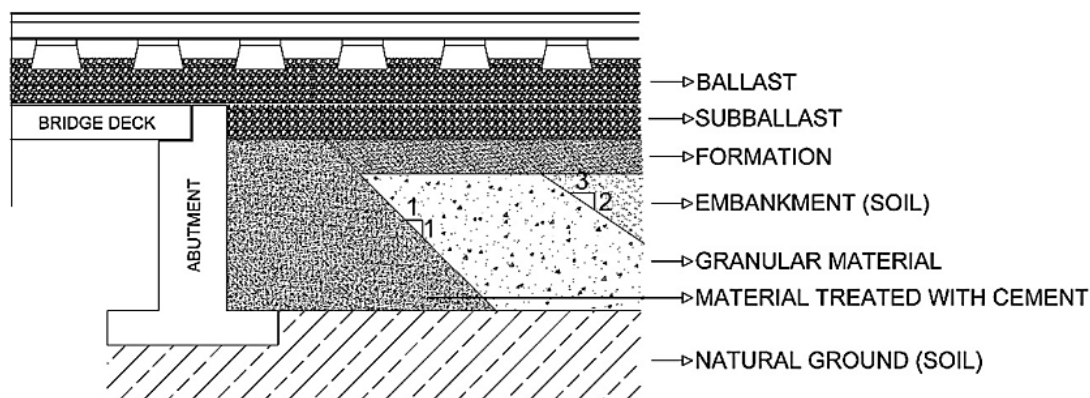
ชั้นหินโรยทาง (Ballast Layer) เป็นชั้นที่ใช้วัสดุประเภทหินแกรนิต หินก้อนคลุก ผ่านการแยกขนาดที่เหมาะสม และทำการบดอัดให้ได้ความแข็งแรงก่อนการใช้งาน (Sol-Sanchez et al., 2020) นิยมใช้อย่างมากในอดีตเนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถหาได้โดยง่าย จากแหล่งทรัพยากรสมัยก่อนที่มีลักษณะทางภูมิประเทศเป็นภูเขาหินปูน จำนวนมาก มีข้อดีในการช่วยระบายน้ำ และแต่มีข้อจำกัดในด้านของการทำงานในระยะยาว จะพบว่าย่างผ่านสภาพใช้งานนาน Ballasted Track จะมีการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากหินแกรนิตที่ใช้ เกิดการรุ่มพุง (Fouling) อันเนื่องมาจากแรงที่กระทำซ้ำเป็นเวลานาน

Varandas et al. (2020) ศึกษาผลการเปลี่ยนรูปในระยะยาวของ Aggregates รวมถึงพฤติกรรมในการช่วยลดการสั่นสะเทือนแบบ Nonlinear และแนวทางในการปรับปรุง โดยการจำลองด้วย 3D Finite Element พบว่าการทรุดตัวถาวรในระยะยาวของ Sleeper เมื่อทำการทดสอบบริเวณปลายของ Sleeper จะพบความแตกต่างของค่า Displacement ที่ได้ในการเคลื่อนที่ด้วยแรงกระทำซ้ำ มากกว่าบริเวณกึ่งกลาง ที่ไม่ได้มีความต่างระหว่างแรงที่กระทำครั้งเดียว กับแรงที่กระทำซ้ำ ส่วนความเค้นในกรณีของรางโดยแรงที่กระทำซ้ำ บริเวณกึ่งกลาง Sleeper จะเป็นบริเวณที่มีความเค้นมากที่สุด ส่วนในกรณีที่แรงกระทำเพียงหนึ่งครั้ง ความเค้นในแนวตั้งบริเวณปลาย Sleeper จะมีค่ามากกว่าบริเวณกึ่งกลาง แสดงให้เห็นถึงการเสื่อมสภาพในการรับน้ำหนักของ Sleeper ในการทำงานระยะยาว (30000 รอบ) ที่จะทำให้เกิดความเสียหายในบริเวณกึ่งกลางจากการใช้งานที่เพิ่มขึ้น

ชั้นดิน (Subgrade Layer) เป็นชั้นที่รองรับชั้นหินโรยทาง เพื่อทำให้เกิดเสถียรภาพในการรับน้ำหนักของการเคลื่อนที่ ส่วนมากจะนิยมปรับปรุงคุณภาพความแข็งแรงในชั้นนี้ เพื่อให้เหมาะสมต่อน้ำหนักบรรทุกที่จะใช้งาน โดยการประยุกต์ใช้เพื่อการปรับปรุงคุณภาพดิน มีหลากหลายรูปแบบ เช่น ในช่วงของรอยต่อบริเวณสะพาน ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยในด้านข้างชั้นทางจะออกแบบให้เป็น Slope ในอัตราส่วนที่เหมาะสมกับรูปแบบของการใช้งาน (Kouroussis et al., 2016)

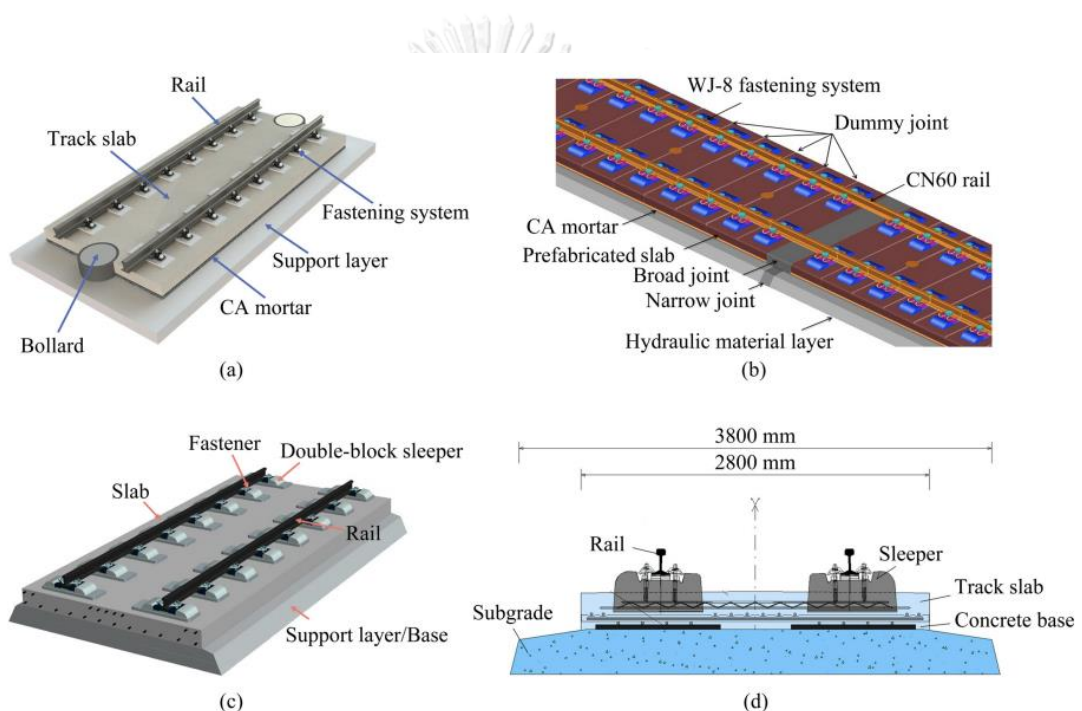
Connolly et al. (2013) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนของชั้นดิน บริเวณที่มีการวิ่งผ่านของรถไฟความเร็วสูง โดยทำการจำลองด้วย Numerical Models และขบวนรถไฟแบบ Thalys Model (Lyratzakis et al., 2020) และเปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่าที่วัดจากภาคสนาม พบว่าผลกระทบของการสั่นสะเทือนในระยะใกล้เคียง โครงสร้างทางที่ใช้ Soft Embankment จะมีการทรุดตัวที่มากที่สุด มากกว่าการไม่ใช้ Embankment ซึ่งจะมีโอกาสสูงในการเพิ่มความเสียหายในการทรุดตัวของชั้นโครงสร้าง และการตรวจของขบวนรถไฟ อันเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนในระยะใกล้เคียงจะมีผลของการสะท้อนกลับของคลื่นการสั่นสะเทือน เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ผ่านของคลื่นจากตัวกลางหนึ่ง ไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง ทำให้เกิดการตอบสนองที่อาจจะมากกว่าปกติในระยะใกล้เคียง ส่วนในระยะที่ห่างออกไปจากโครงสร้างทางจะพบว่าการลดของการสั่นสะเทือน อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนรูปของพลังงานในการส่งผ่าน ไปยังตัวกลางที่ไกลขึ้น และโดยทั่วไปการเพิ่มค่า Stiffness ของชั้น Embankment จะช่วยลดการสั่นสะเทือนตลอดแนวของโครงสร้างทางรถไฟ

Gallego et al. (2011) ได้มีการศึกษาแบบ Parametric Study ในเรื่องของ Vertical Track Stiffness ที่มีผลต่อการออกแบบโครงสร้างทางในการวิ่งของ รถไฟความเร็วสูง พบว่าการปรับปรุงคุณภาพของชั้น Subgrade มีผลเป็นอย่างมากต่อการรับน้ำหนักในการเคลื่อนที่ของทางรถไฟ โดยจากการศึกษา ค่า Vertical Stiffness ส่งผลโดยตรงกับค่า Stress และ Displacement ในชั้นดิน



ภาพที่ 6 Subgrade Transition Wedge Design for High Speed Line (Sañudo et al., 2016)

ในส่วนของระบบรางที่ไม่มีการใช้หินโรยทาง (Ballast-Less Track or Slab Track System) จะมีรูปแบบของโครงสร้าง และการออกแบบที่ต่างกันไปในแต่ละข้อกำหนดในแต่ละประเทศ โดยจะมีการออกแบบโดยใช้รูปแบบแผ่นพื้นของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในรูปแบบที่หลากหลาย เช่น Floating Slab, Direct Fixed Slab, Embedded Track เป็นต้น (Ling et al., 2020) (Qu et al., 2019) ดังตัวอย่างของรูปแบบเทคโนโลยีโครงสร้างที่ถูกพัฒนาโดยประเทศจีนในภาพที่ 7 ซึ่งอาจจะมีการใช้งานร่วมกับแผ่นวัสดุที่เป็น Resilient Materials หรือองค์ประกอบอื่นร่วมเพื่อช่วยในการรับน้ำหนัก กระจายแรง และทำให้ระบบรางเกิดเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 7 Types of Slab Tracks in China

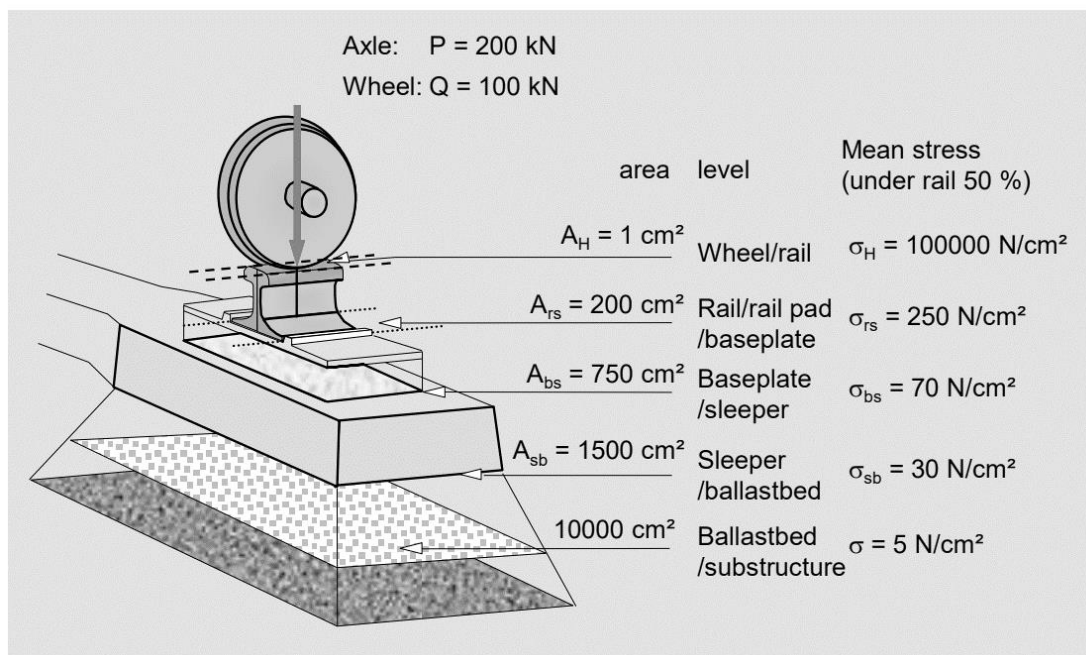
(a) CRTS Type I (Prefabricated Slab Track), (b) CRTS Type II (Prefabricated Slab Track),  
(c) CRTS Type I Double Block Slab Track, (d) CRTS Type II Double Block Slab Track.

(Ren et al., 2021)

### 2.1.3 การถ่ายน้ำหนักลงบนโครงสร้างทางรถไฟ (Load Transfer on Track Structures)

จากที่ได้กล่าวในเรื่องของการทำงาน ในแต่ละส่วนของโครงสร้างทางรถไฟแบบถาวรแล้ว ในด้านการรับน้ำหนักของโครงสร้างระบบราง ซึ่งมีหน้าที่ในการรองรับการเคลื่อนที่ของรถไฟ และทำให้การเคลื่อนที่ที่เกิดการมีเสถียรภาพ (Stability) ในแต่ละองค์ประกอบของโครงสร้างระบบราง จะต้องมีการส่งถ่ายน้ำหนักโดยในแต่ละองค์ประกอบของโครงสร้างราง จะทำหน้าที่ในการถ่าย

น้ำหนัก หรือกระจายความเค้น ลงไปยังโครงสร้างที่อยู่ต่ำกว่า ไปยังชั้นดินด้านล่าง โดยในภาพที่ 2.8 จะแสดงตัวอย่างการถ่ายน้ำหนักจากเพลลา (Axle Load) ที่มีขนาด 200 [kN] หรือ ล้อ (Wheel Load) 100 [kN] ไปยังโครงสร้างของราง และแสดงการกระจายแรง หรือน้ำหนัก ลงไปยังชั้นดินด้านล่าง



ภาพที่ 8 Loaded Distribution in Stress Term (Modern Railway Track, 2011)

ในแต่ละชั้นของโครงสร้างทางจะมีการกระจายแรงเพื่อให้เกิดสภาพสมดุลของการเคลื่อนที่ของรถไฟ โดยถ้าในโครงสร้างทางที่ต้องมีค่านึงถึงการออกแบบ หรือการใช้วัสดุที่มีอย่างจำกัด จะต้องมีค่านึงถึงความสามารถในการรับแรง หรือลดความเค้นในระหว่างการส่งผ่านแรงในชั้นส่วนโครงสร้าง Sadri and Steenberg (2018) ได้ทำการศึกษาแบบ Parametric Study เกี่ยวกับผลกระทบของการเสื่อมสภาพของราง และสมรรถภาพของการใช้งานในระยะยาว โดยใช้ผลของการส่งผ่านพลังงาน อันเนื่องมาจากการสั่นของขบวนรถไฟไปยังโครงสร้างที่อยู่ต่ำกว่า เพื่อศึกษาผลกระทบจากค่าตัวแปรที่ถูกใช้ในการออกแบบ และมีความเกี่ยวข้องต่อโครงสร้างทางรถไฟ ซึ่งในแต่ละชั้นส่วนจะมีการส่งผ่านของพลังงาน ในแต่ละโครงสร้างของระบบราง (Sadri & Steenberg, 2018) พบว่าพลังงานในการส่งผ่านจะแปรผันตามความเร็วในการวิ่งของรถไฟ ค่า Stiffness ของชั้น Ballast และชั้น Substructures มีผลอย่างมากต่อการกำหนดการส่งผ่านของพลังงานในชั้นของโครงสร้าง และการทำให้ชั้น Subgrade มีความอ่อน หรือมีความสามารถในการให้ตัวที่มากยิ่งขึ้น จะไม่ได้ส่งผลต่อรถไฟที่วิ่งด้วยความเร็วในช่วง 100 – 200 [km/hr] มากนัก

Tucho et al. (2022) ทำการวิเคราะห์ Stress Analysis และการเปลี่ยนรูปของ Substructure อันเนื่องผลมาจากการเคลื่อนที่ผ่านของรถไฟความเร็วสูง โดยทำการศึกษากลไกการเคลื่อนที่ ที่อยู่ในช่วงความเร็ว 60 – 450 [km/hr] ซึ่งทำการวิเคราะห์ และจำลองระบบรางแบบ Ballast Track System ด้วยโปรแกรม Finite Element Analysis พบว่า เมื่อขบวนรถวิ่งด้วยความเร็วที่น้อย หรือต่ำกว่า 120 [km/hr] จะส่งผลให้การกระจายตัวของความเค้นเป็นรูปแบบของ Cardioid Shaped Path และเมื่อขบวนรถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่มากกว่า 300 [km/hr] รูปแบบการกระจายความเค้นในแนวตั้งของพื้นจะเปลี่ยนแปลง เป็นรูปแบบของความเค้นที่มีความเอียงแบบ Oblique เพิ่มขึ้น แปรผันตามความเร็วที่รถไฟวิ่ง ซึ่งเกิดจากการรวมผลของ Shear Failure ในชั้น Substructure ในส่วนของการศึกษาค่า Stress Amplification Factor, SAF ของชั้น Substructures พบว่า แปรผันโดยตรงกับค่าโมดูลัสของชั้นดิน (Subgrade Stiffness) และระยะความลึกของชั้น Subgrade และในเรื่องของ Critical Speed เพื่อนที่จะให้เกิดเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ของขบวนรถ พบว่าควรจำกัดการใช้ความเร็วอยู่ที่ 60 [%] ของ Critical Speed เนื่องจากชั้นของ Ballasted Layers จะเกิดความเสียหายด้วย Shear Failure หรือควรมีการตรวจสอบเพื่อปรับปรุงคุณภาพในการก่อสร้างจริง เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างเกิดประสิทธิภาพ

#### 2.1.4 ช่วงรอยต่อของระบบราง (Track Transition Zone)

รอยต่อของระบบราง (Track Transition) สามารถพบได้โดยทั่วไป ได้แก่ การเปลี่ยนช่วงของรางรถไฟแบบ Open Track ระหว่าง Ballasted Track และ Slab Track, ช่วงรอยต่อของทางกับโครงสร้างสะพาน (Bridge), ช่วงที่มีการเปลี่ยนเส้นทางราง (Turnout Zone), บริเวณช่วงรอยต่อระหว่างก่อนเข้า และออกอุโมงค์ (Tunnel) เป็นต้น ในปัญหาของ Track Transition ที่พบในการใช้งาน และด้านการบำรุงรักษา ในด้านกายภาพพบว่าเมื่อมีการใช้งาน การวิ่งผ่านของรถไฟ ย่อมทำให้เกิดการทรุดตัวที่ต่างกันของบริเวณที่มีความต่างของค่า Stiffness ที่ต่างกัน (Pourzeynali et al., 2021) ดังตัวอย่างการทรุดตัวของสะพาน ดังภาพที่ 2.9 ซึ่งในปัจจุบันได้มีการจำลองโครงสร้าง Track Transition ด้วยรูปแบบการแก้ปัญหาที่ต่างกัน โดยอาศัยการจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรม (Punetha et al., 2021) เพื่อสะดวกต่อการหาผลลัพธ์ในรูปแบบของ Numerical Solution



ภาพที่ 9 การทรุดตัวของบริเวณ Ballasted Track และ โครงสร้างสะพาน  
(National Academics of Sciences, 2006)

Sañudo et al. (2016) ได้ทำการศึกษา และรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Track Transition Zone โดยพบว่าประเด็นหลักในการที่ควรพิจารณาถึงปัญหาการสั่นสะเทือนที่มากกว่าปกติในบริเวณนี้ คือ 1. การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของ Track Stiffness และ 2. การทรุดตัวของชั้นแนวทางที่มากกว่าปกติ ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นต้นเหตุทำให้เกิดแรงทางพลศาสตร์ที่มากกว่าปกติ ซึ่งในบางกรณีที่มีความต่างของแนวระดับรางที่มาก อาจกล่าวได้ว่าแรงที่เกิดขึ้นเป็น แรงกระแทก (Impact Load) ที่จะก่อให้เกิดความเสียหายที่มากกว่าปกติ Sañudo et al. (2016) ได้ทำการสรุปหลักการแก้ไขปัญหาลักษณะเกี่ยวกับบริเวณ Track Transition ได้เป็น 4 หัวข้อ ซึ่งจะกล่าวถึงในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อ 2.2.2 การศึกษาที่เกี่ยวกับการแก้ปัญหาในบริเวณ Track Transition Zone ต่อไป

ในส่วนของการสร้างระบบรางในทางแบบปกติ การจำลองได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อสามารถนำมาใช้ในการคำนวณ ได้มีการจำลองเป็น Analytical Model ได้หลากหลายรูปแบบ Setua et al. (2015) ได้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบ การจำลองรูปแบบของ Track ด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์หลายแบบ เพื่อทำการติดตามหาค่าของ Receptance และ Decay Rate เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาโมเดลที่ใช้ในแต่ละกรณี ต่อไป (Setua et al., 2015) โดยพบว่า ค่าการเสถียรของการจำลองโดยใช้ Timoshenko Beam on Single Layer Continuous Support มีค่าการเสถียรที่มากกว่า การจำลองด้วย Euler Beam on Single Layer Continuous Support เนื่องจากการยอมให้มีผลของ Shear Deflection ได้ และการจำลองด้วย Euler Beam on Double Layer Continuous Support จะให้ผลที่มีความสอดคล้องที่มากกว่าการจำลองด้วย Single Layer และจะให้ผลของค่า Resonance ในหลาย Mode มากกว่า

### 2.1.5 การสั่นสะเทือนของโครงสร้างระบบราง (Vibrations of Track Structures)

การจะพิจารณาถึงผลของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของรถไฟผ่านโครงสร้างทาง และชั้นดิน จะต้องเริ่มต้นวิเคราะห์แนวคิดจาก พลศาสตร์ของการเคลื่อนที่ ที่มีแรงทางพลศาสตร์ภายนอกที่มากระทำ โดยจากการเคลื่อนที่ผ่านของขบวนรถไฟ (Kouroussisa et al., 2014) ซึ่งได้มีวิธีวิเคราะห์พื้นฐานมาจากระบบการสั่นสะเทือนโดยทั่วไป (General Dynamic Excitations) มีลักษณะเป็นการสั่นสะเทือนที่ทำให้เกิดการตอบสนองแบบชั่วคราว (Transient Response) จากการสั่นที่เกิดจากขบวนรถไฟ ที่มีลักษณะเป็นคาบ (Periodic Excitation) ตามความเร็วของรถไฟในขณะนั้น โดยมีรูปแบบของสมการในการใช้อธิบายระบบของปัญหาเป็นสมการการเคลื่อนที่โดยทั่วไป

ระบบการสั่นสะเทือนโดยทั่วไป การใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการอธิบาย พฤติกรรมของโครงสร้าง เราสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการสมดุลต่อการเคลื่อนที่ เป็นสมการควบคุม ในระบบของการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์จะมีตัวแปรที่สำคัญ และเกี่ยวข้อง ได้แก่ มวล (Mass), ค่าความหน่วง (Damping) และ ค่าสติฟเนส (Stiffness) ของระบบ ที่จะใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของระบบในช่วงเวลาที่ต่างกันได้ โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการของการเคลื่อนที่ (Equation of Motion)

Farooq et al. (2021) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ Tire Derived Aggregates (TDA) ในชั้นโครงสร้างของ Ballasted Track และ Slab Track เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในด้านการใช้งานในระยะยาว ด้วยการจำลองด้วยการวิเคราะห์ 3D Finite Element Models พบว่าการใช้งาน TDA มีผลต่อการช่วยลดค่า Peak Acceleration ในทั้งโครงสร้างทางแบบ Ballasted Track และ Slab Track นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้งาน TDA ใน Slab Track ช่วยในการลดค่า Vertical Stress มากกว่า Horizontal Stress ส่วนในฝั่ง Ballasted Track ช่วยทั้งในด้านการลดค่า Vertical และ Horizontal Stress เมื่อมีการเพิ่มของค่าน้ำหนักบรรทุกทุกจากล้อ และความเร็วในการวิ่งของขบวนรถไฟ ในส่วนของการพัฒนาแบบจำลองสามารถทำนายผลค่าของการทรุดตัวของโครงสร้างในสถานะ Cyclic Loaded ที่มีจำนวนรอบการกระทำซ้ำที่น้อย แต่ในทางการใช้งานจริงจะถือว่ามีจำนวนรอบของแรงที่กระทำซ้ำจำนวนมาก ควรต้องมีการศึกษา และประเมินสภาพของการใช้งานในระยะยาวอย่างต่อเนื่อง และยังพบว่า การใช้งาน TDA ในการช่วยลดการตอบสนองต่อการทรุดตัวในแนวตั้งใน Slab Track มีประสิทธิภาพ มากกว่าการใช้งานในระบบรางแบบ Ballasted Track

ในกรณีของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟ ที่มีองค์ประกอบจากชิ้นส่วนทางกลหลายชิ้นส่วน การจำลองที่ใช้ในการจำลองรถไฟให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ย่อมมีความซับซ้อนมากขึ้นตาม จะต้องอาศัยหลักของการแยกพิจารณาชิ้นส่วนมวล หรือพิจารณาแยกแต่ละองค์ประกอบตามแต่ละ Degree of Freedom, DOFs อย่างเป็นทางการในการจำลอง

โครงสร้าง ซึ่งเป็นวิธีที่ถูกใช้ในการพิจารณาเพื่อให้เกิดความง่ายต่อการคำนวณ แต่จะต้องพิจารณาการแบ่ง DOFs เพื่อให้สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ หรือพฤติกรรมเคลื่อนที่ของระบบจริง ซึ่งในกรณีของขบวนรถไฟที่ทำการศึกษาในงานวิจัย จะกล่าวถึงการแยกชิ้นส่วนเพื่อพิจารณา DOFs ให้เหมาะสม ในหัวข้อ 3.2.1 การจำลองโครงสร้างของโมเดลทางรถไฟ (Track Modelling)

#### 2.1.6 การสั่นพ้อง (Resonance)

ปัญหาสำคัญของการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ของโครงสร้าง ได้แก่ ปรากฏการณ์การสั่นพ้องของโครงสร้าง (Resonance Phenomenon) เป็นปรากฏการณ์ที่การสั่นสะเทือนจากภายนอก (External Excitation) ที่มากระทำกับระบบ มีความถี่ในการสั่นตรงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง ทำให้เกิดการตอบสนองที่มากกว่าปกติ อาจอยู่ในรูปของการเคลื่อนที่ หรือความเร่งในการสั่นที่มากกว่าปกติ (Shih et al., 2018) โดยพฤติกรรมจะมีการเพิ่มขึ้นของผลการตอบสนองที่มากขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่โดยทั่วไปแล้ว ผลตอบสนองที่กระทำต่อโครงสร้างที่มากกว่าปกติจะสร้างความเสียหายในระดับที่มากจนเกินขีดความสามารถของวัสดุที่จะรับได้ และจะเกิดการเสียหายขององค์ประกอบโครงสร้างในที่สุด อันเนื่องมาจากขีดความสามารถในการรับกำลังภายในวัสดุ จากภาพที่ 10 แสดงตัวอย่างของการเสียหายของประเทศไทยเยอรมัน ในรถไฟความเร็วสูง ที่เกิดจากการที่ Wheel Set ที่ส่วนของ Wheel Flange เกิดความเสียหาย ทำให้โครงสร้างล้อไม่สามารถคงเสถียรภาพต่อการเคลื่อนที่ได้ และทำให้เกิดการตกราง (Derailment) ในที่สุด ซึ่งต้นเหตุในความเสียหายที่เกิดขึ้นในส่วนโครงสร้างล้อ เกิดจากการที่โครงสร้างมี Fatigue ที่เกิดการสะสม โดยสิ่งที่ส่งผลโดยตรงเกิดจากวัสดุที่ใช้ ร่วมกับสภาพการใช้งานที่อาจจะการสั่นสะเทือนที่มากกว่าปกติ ซึ่งในกรณีนี้ส่งผลโดยตรงกับ Wheel-Rail Contact Force Interaction

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 10 Accident on Hanover-Hamburg Railway Line. (2019)

(mx-schroeder.medium.com)



โดยการวิ่งของรถไฟในความเร็วที่สูงขึ้น จะส่งผลโดยตรงกับปัญหาที่จะเกิดขึ้นในบางกรณี ที่มีการตอบสนองจากค่าความถี่ที่ตรงกัน ซึ่งในการออกแบบโครงสร้างที่มีความเกี่ยวข้องกับทางรถไฟ โดยทั่วไป จะพิจารณาถึงความสำคัญในผลกระทบนี้อยู่เสมอ แต่ในทางปฏิบัติก็มีการควบคุมความเร็วของรถไฟ โดยจะลดระดับความเร็วใช้งานให้น้อยกว่าปกติ เพื่อหลีกเลี่ยง ค่าความเร็ววิกฤต (Critical Speed) ที่การวิ่งของรถนั้นจะทำให้เกิดผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่มากเกินไป (Norén-Cosgriff et al., 2018) ทำให้โครงสร้างทาง หรือโครงสร้างขบวนรถไฟเกิดความเสียหายได้

เช่นเดียวกันกับในการออกแบบโครงสร้างทางทั้งรูปแบบโครงสร้างแบบ Ballasted Track และ Slab Track การเคลื่อนที่ผ่านของรถไฟความเร็วสูง ย่อมมีความเสี่ยงมากกว่าที่ในบางค่าความเร็วของขบวนรถ จะส่งผลโดยตรงกับการสั่นสะเทือนโดยรอบของโครงสร้าง มากกว่าการวิ่งด้วยความเร็วที่ต่ำกว่า ผลกระทบเชิงพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นอาจจะทำให้เกิดปรากฏการณ์การสั่นพ้อง ขึ้นได้ในระบบ ทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหาย หรืออาจจะไม่สามารถใช้งานได้ตามปกติ ในการวิเคราะห์ผลของการวิจัย จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาผลของการวิ่งผ่านของขบวนรถไฟในความเร็วที่ต่างกัน เพื่อให้ได้ผลของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในช่วงความเร็ว หรือสามารถวิเคราะห์ในเชิงของค่าการสั่นที่ต่างกัน

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งหัวข้อได้เป็น 3 กลุ่ม คือ การแก้ปัญหาการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ผ่านของขบวนรถไฟ, การศึกษาการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องช่วงของ Track Transition, และ การศึกษาการแก้ปัญหาคารสั่นสะเทือนโดยใช้ Under Sleeper Pads ซึ่งในตอนท้ายจะมีการสรุปเนื้อหาของงานวิจัยที่ได้ศึกษา ในส่วนของการแก้ปัญหา Track Transition แบ่งตามแต่ละหัวข้อ เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ รวมทั้งสามารถแสดงถึงข้อจำกัดในงานวิจัยที่เคยมีมาได้ และเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาเพิ่มเติมในหัวข้อที่มีความเกี่ยวข้อง ต่อไป

### 2.2.1 การแก้ปัญหาคารสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ผ่านของขบวนรถไฟ

Galvin et al. (2010) ทำการจำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลข เพื่อประเมินผลกระทบจากการเคลื่อนที่ผ่านของรถไฟ ที่มีผลต่อการส่งผ่านของการสั่นสะเทือนไปยังชั้นดินบริเวณด้านล่าง เพื่อใช้ในการตรวจสอบว่าการจำลองด้วยโมเดลแบบ Euler-Bernulli's Beams ว่ามีความสอดคล้องต่อการเคลื่อนที่ผ่านของรถไฟจากการทดสอบอย่างไร ซึ่งผลการศึกษาพบว่า การจำลองการเคลื่อนที่ผ่านของรถไฟทั้งแบบ 3D Model และ 2.5D Approach มีค่าแอมพลิจูดของการสั่นที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบ โดยค่าที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าต่ำกว่า

Nie et al. (2021) ทำการศึกษาเกี่ยวกับ Dynamics Load ที่มีผลต่อพฤติกรรมในระยะยาวของ Ballasted Track ในห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดสอบแบบ Full Scale Testing เพื่อวัดค่าผลตอบสนองของโครงสร้างในชั้นต่าง ๆ ที่ได้จากการเปลี่ยนค่าความเร็วขบวนรถ (100 [km/hr] และ 300 [km/hr]) และค่าน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ (17 [Tons] และ 22 [Tons]) พบว่า ความเร็วในการวิ่งของขบวนรถมีผลโดยตรงต่อผลตอบสนองของ Sleeper (3 – 4 เท่า) ต่างจากการเพิ่มของ Load ที่กระทำ ที่ไม่ได้ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของ Sleeper มากนัก (1.25 เท่า) Stress ในชั้นดินที่เกิดจากการสั่นสะเทือนภายนอก จะมีค่าสูงขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกของแรงที่กระทำ และความเร็วในการวิ่งของขบวนรถ ไม่ได้มีผลต่อค่า Stress โดยตรง ซึ่งค่า Maximum Stress จะอยู่ตรงกับตำแหน่งของแนวราง หรือ Rail Seat และมีค่าน้อยที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางของ Sleeper ส่วนในเรื่องของ Permanent Deformation อันเนื่องมาจากแรงกระทำซ้ำ พบว่าแนวโน้มที่รถไฟที่ใช้ความเร็วสูง ทำให้เกิดการเสีรูปลาวรรในชั้น Ballasted Layers ที่สูงกว่ารถไฟที่ใช้ความเร็วที่ต่ำกว่า อันเนื่องมาจากการเพิ่มของ Dynamic Loads

Mishra et al. (2014) ทำการศึกษาเชิงวิเคราะห์เกี่ยวกับ Transition Behavior ของชั้นทางในโครงสร้างรถไฟความเร็วสูง โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อตรวจวัด และเปรียบเทียบค่าที่ได้กับแบบจำลองที่สร้างขึ้นของโครงสร้างทางรถไฟแบบ Ballasted Track โดยทำการรวมพฤติกรรมของวัสดุในแต่ละชั้นเพื่อใช้เป็นแนวทางในการควบคุมการหลุดตัวถาวรที่จะเกิดขึ้นในแต่ละชั้น โดยพบว่าโดยส่วนมากการจำลองโครงสร้างทางแบบ Ballasted Track ไม่ได้คำนึงถึงผลของการเป็นอนุภาคย่อยของหินโรยทาง ทำให้ผลของพฤติกรรมที่เกิดขึ้น อาทิเช่น ความเร่งในแนวตั้ง หรือค่าการหลุดตัวเป็นค่าที่ได้จากการจำลองด้วย Element ย่อยที่ใช้ ซึ่งในทางพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง การสั่นสะเทือนในแต่ละอนุภาคในชั้นของ Ballasted Layers มีความแตกต่างกัน แปรผันตามตำแหน่ง และการสั่นสะเทือนที่ส่งผ่าน Sleepers ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วย Discrete Element Method (DEM) แล้วนั้นพบว่า การสั่นสะเทือนจะเกิดขึ้นมากในตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุก จากชุดล้อของขบวนรถไฟกระทำ และการสั่นสะเทือน หรือค่าความเร่งที่ตรวจวัดได้จะน้อยลงเมื่อ มีการส่งผ่านไปยังโครงสร้างที่อยู่ในระดับที่ต่ำกว่า

Connolly et al. (2015) พบว่าจากอดีตถึงปัจจุบัน การพัฒนาด้านเทคโนโลยีต่อการขนส่งด้วยระบบรางมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ขบวนรถไฟสามารถทำความเร็วได้มากขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงได้ทำการศึกษา และ รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับ การสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ผ่านของขบวนรถไฟความเร็วสูง นำมาเรียบเรียงเป็นหัวข้อต่าง ๆ ที่ส่งผลกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างระบบราง อันได้แก่ Track, Vehicle, Ground, และ Building เป็นหลัก โดยได้มีการกล่าวถึงบทบาทหน้าที่ของแต่ละองค์ประกอบ ในแง่ของการสั่นสะเทือน และยังได้สรุปแนวทางในการบรรเทาผลกระทบที่อาจจะมากเกินไปในแต่ละด้าน โดยข้อสรุปพบว่า ในแง่ความถี่ของขบวนรถ ที่ส่งผล

โดยตรงต่อระดับความรู้สึกปลอดภัยของผู้โดยสาร ความถี่ต่ำที่อยู่ในช่วง 0.25 – 0.32 [Hz] สามารถส่งผลทำให้เกิด Motion Sickness ต่อผู้โดยสารได้ และความถี่ที่ส่งผลกระทบต่อการอ่าน เขียน อยู่ใน ช่วง 4.00 [Hz] ซึ่งได้นำเสนอการลดโอกาสที่จะเกิดความถี่ดังกล่าวโดย ลดจำนวนมวลที่เป็น Unspring Mass ในระบบ ในส่วนของการออกแบบที่ใช้การคำนวณด้วย Finite Element Method, FEM ควบคู่กันกับ Boundary Element Method, BEM ควรจะพิจารณาการโมเดลด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยความเหมาะสมในแต่ละปัญหา หรือสถานการณ์ และ ควรคำนึงถึงค่าความเร็ววิกฤตที่จะก่อให้เกิดการสั่นที่มากกว่าปกติร่วมในการออกแบบ ซึ่งนิยมให้ใช้ค่าที่ต่ำกว่า Rayleigh Wave Velocity หรือใช้ค่าความเร็ววิกฤตสูงสุดในการออกแบบเป็น 0.70 เท่าของ Rayleigh Wave Velocity และควรให้มีการปรับปรุงโครงสร้างโดยรอบเพื่อให้ลดผลของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริง ในทางปฏิบัติ ซึ่งนิยมใช้เป็นการขุด Trench Deployment หรือปรับปรุงค่า Stiffness ของชั้น Subgrade ตามแนวบริเวณทางรถไฟ

Sayeed and Shahin (2016) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของรถไฟความเร็วสูง ต่อระบบรางแบบใช้หินโรยทาง (Ballasted Track System) เพื่อหาค่าความเร็ววิกฤตที่ส่งผลต่อ Dynamic Response พบว่า ในช่วงของ Critical Speed ผลของการวิเคราะห์แบบ Nonlinear Materials ในชั้น Subgrade ไม่ได้มีความแตกต่างมากกับการวิเคราะห์แบบ Linear Analysis แต่การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นของ Substructure ให้ผลของการเปลี่ยนรูปที่มากกว่าการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น โดยเมื่อดูผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่ได้จากค่า Sleeper Deflections พบว่า ควรมีการจำกัดค่าของความเร็วไว้ที่ 75 [%] ของค่า Critical Speed สำหรับการใช้งานโครงสร้างทางรถไฟแบบ Ballasted Track System ค่า Subgrade Stiffness และความหนาของชั้น Subgrade มีผลโดยตรงต่อตัวคูณขยายค่าทางพลศาสตร์ (Dynamic Amplification Factor, DAF) ซึ่งยิ่งค่า Subgrade Stiffness และค่าความหนาของชั้น Subgrade เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์มีค่าลดลง โดยในค่าความเร็ววิกฤตของขบวนรถ ไม่แปรผันตรงกับค่าน้ำหนักของขบวนรถที่เคลื่อนที่ แต่แปรผันจาก Train Loading Geometry

### 2.2.2 การศึกษาที่เกี่ยวกับการแก้ปัญหาในบริเวณ Track Transition Zone

Ramos et al. (2022) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ Track Transition ของโครงสร้างทางแบบ Slab Track บริเวณรอยต่อของทางเปิดเข้าสู่อุโมงค์ (Tunnel) พบว่าในแง่ของส่วนของโครงสร้างทางภายในอุโมงค์เป็นส่วนที่มีค่า Stiffness ที่สูงกว่าภายนอกมาก ทำให้ในช่วงใกล้เคียงก่อนถึงทางเข้าอุโมงค์ ค่าของ Vertical Accelerations มีค่าที่สูงกว่าปกติมาก และจากการจำลองด้วย Numerical Models สำหรับการใช้งานในระยะยาว พบว่าเกิดการเสียรูปถาวรอย่างมากในโครงสร้างของ Slab Track ซึ่งในการศึกษา ได้แนะนำถึงแนวทางในการใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่น (Resilient Materials) มาช่วยในการกระจายความเค้นในชั้นส่วนของโครงสร้าง ร่วมด้วยกับการปรับปรุงคุณภาพของชั้น Subgrade โดยทำการเปรียบเทียบผลของการใช้งานด้วยวัสดุที่มีความยืดหยุ่น และไม่ใช่ เพื่อให้เกิดสภาพการใช้งานในระยะยาวที่ดี และเพื่อให้เกิดเสถียรภาพที่เพิ่มมากขึ้น จากการลดการสั่นสะเทือนของการเคลื่อนที่ผ่านของขบวนรถไฟในบริเวณช่วงรอยต่อนั้น

Sakhare et al. (2022) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรม และผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ ในช่วง Track Transition โดยพิจารณาบริเวณ Abutment Bridge โดยได้มีการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับส่วนของ Transition Sections ในเรื่องของ Integral Abutment Bridge, IAB ที่จะเป็นการรวมส่วนของ Transition Section จากการแบ่งเป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนของ Broken Stone และส่วนของ Filler ที่เป็นส่วนหลักก่อนจะเป็นตำแหน่ง Bridge Seat ของสะพาน ให้รวมพิจารณาเป็น Section เดียวร่วมกัน ซึ่งในการศึกษาได้ทำการแบ่ง การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เป็นหัวข้อแบบ Parametric Study ซึ่งจะพบว่า ในกรณีของการเปลี่ยนแปลงระยะของ Transition Zone การเพิ่มระยะทำให้เกิดการทรุดตัวที่น้อยลง กรณีของการเปลี่ยนแปลงความหนาของ Transition Zone การเพิ่มขึ้นของความหนาทำให้เกิดการทรุดตัวที่น้อยลงเช่นกัน ในกรณีของการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของ Back Fill Soil การเลือกใช้ดินที่มีความหนาแน่นสูง หรือบดอัดทำให้เกิดความแน่นสูง จะช่วยลด Vertical Displacement ได้ดี ตามระดับความลึกของชั้นดิน ในกรณีของระยะความสูง Integral Abutment พบว่ายิ่งใช้ระยะความสูงมากขึ้น จะทำให้ค่า Track Displacement ในส่วนของโครงสร้างสูงขึ้นตาม และในกรณีของการเปลี่ยนแปลงค่าความเอียงของ Transition Zone พบว่า Track Displacement จะลดลงตาม Inclination Fall ของค่าความเอียงที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นในส่วนของสะพานที่ไม่ได้มีความต่างของการทรุดตัวตาม Inclination Fall นอกจากนั้นยังมีการวิเคราะห์ผลของ Cyclic Loading เพื่อดูผลของการทรุดตัวของโครงสร้างทางในระยะยาว พบว่าการทรุดตัวเกิดมากในชั้นของ Ballasted Layers และ Embankment และการมี Track Transition ช่วยให้การทรุดตัวในบริเวณที่ต่างกันให้ มีความสม่ำเสมอมากขึ้น

Shahraki et al. (2015) ทำการศึกษาด้วยวิธีเชิงตัวเลขด้วยการจำลองโครงสร้างทางรถไฟด้วยโปรแกรม ANSYS เกี่ยวกับ Track Transition Zone ในบริเวณระหว่าง Ballasted Track และ Slab

Track โดยพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า Vertical Stiffness ในโครงสร้างในช่วงรอยต่อ มีผลเป็นอย่างมากในการกำหนดการทรุดตัวในโครงสร้างของ 2 บริเวณที่แตกต่างกัน ส่งผลโดยตรงต่อการเกิด Degradation ของราง และทำให้ต้องมีค่าใช้จ่ายในการดูแล บำรุงรักษาที่สูง อันเนื่องมาจากปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งได้มีการศึกษาแนวทางในการแก้ปัญหาเป็น 3 กรณี ได้แก่ การเพิ่มความยาวของ Sleeper, การใช้รางกัน (Auxiliary Rail), และ การปรับปรุงคุณภาพของชั้น Subgrade โดยติดตามหาผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นของราง, Ballast และ Subgrade อันได้แก่ Vertical Displacement, Vertical Acceleration, และ Vertical Stress ผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Finite Element Analysis พบว่า การปรับปรุงคุณภาพของ Subgrade เป็นวิธีที่ช่วยลดการทรุดตัว และความเร่งในแนวตั้งที่เกิดขึ้นบริเวณ Track Transition ได้มากที่สุด แต่การใช้ Auxiliary Rail ทำให้การเปลี่ยนแปลงของ Displacement, Acceleration, และ Stress มีความสม่ำเสมอมากที่สุด ส่วนในแง่ของการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้น Ballast การใช้ Auxiliary Rail ทำให้ความเค้นในแนวตั้งมีความสม่ำเสมอมากกว่าการเพิ่มขนาดของ Sleeper โดยสรุปการใช้รางกันนิยมใช้อย่างมากในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของ Stiffness ด้วยความรวดเร็ว

Ngamkhanong et al. (2020) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ Baseplate Fastening Systems ในการช่วยลดการสั่นสะเทือน ในบริเวณ Transition Zone ซึ่งได้มีการตรวจสอบผลที่ได้กับผลที่ได้จากงานวิจัยอื่นทั้งในส่วนของ Ballasted Track และ Slab Track โดยได้แบ่งชุดการศึกษาตามค่า Baseplate Stiffness และ Baseplate Weight และได้ทดสอบการจับชุด Base Plate ในช่วงรอยต่อ เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอของการเปลี่ยนแปลง ใน Rail Displacement และ Track Stiffness ที่มากยิ่งขึ้น โดยพบว่า Baseplates ที่มีความยืดหยุ่นที่สูงกว่าจะช่วยในการลดการสั่นสะเทือนที่มากกว่า และยังช่วยในการลด Slab Displacement ซึ่งโดยทั่วไปแนะนำการใช้งานในช่วงของ Track Transition อยู่ในค่า  $400 \text{ [MN/m}^2\text{]}$  และในกรณีของการใช้ Baseplate ที่มีค่าน้ำหนักสูง และค่า Stiffness ที่สูง จะทำให้การเปลี่ยนแปลงของ Rail Displacement มีความสม่ำเสมอมากกว่า ในส่วนของผลของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของ Baseplate ไม่ได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากในส่วน of Slab Track แต่ต้องพิจารณาผลที่อาจจะเกิดขึ้นจากการใช้งาน และการจัดเรียง การใช้งานของ Baseplate ให้มีการลดลงตาม Span พบว่ายังมีระยะเวลาการเว้นช่วงที่มากขึ้น จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงที่มีความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้นในส่วน of Track Transition

Galvin et al. (2010) ทำการศึกษากาการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของ ขบวนรถระบบราง ชั้นดิน และโครงสร้างทางรถไฟ ของรถไฟความเร็วสูง ในการศึกษาได้มีการเปรียบเทียบผลที่ได้จาก Numerical Models กับผลที่ได้จากการวัดค่าการสั่นสะเทือนจากภาคสนาม ของรถไฟความเร็วสูง Cordoba – Malaga HST Line ในส่วนของการศึกษาเชิง Numerical Models มีการจำลองเป็นโมเดลแบบ Fully Three Dimensional Analysis โดยโครงสร้างที่อยู่เหนือพื้นเป็น 3D

Solid Finite Element Model (FEM) และโครงสร้างพื้นเป็น Boundary Element Model (BEM) ซึ่งในส่วนที่มีการจำลองเพื่อศึกษาผลของการสั่นสะเทือนที่ได้ ในช่วงของ Track Transition จาก Ballasted Track ไปยัง Slab Track โดยการเปลี่ยนค่าตัวแปรของ Rail Pad และประเภทของชั้นดิน พบว่า ในด้านของการเปลี่ยนแปลงการใช้งานประเภทของ Rail Pads ในส่วนของการสั่นสะเทือนในราง และหมอนรองราง การใช้ Stiff Rail Pads จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่มีค่าน้อยกว่า แต่ให้ผลตรงกันข้ามกับการสั่นสะเทือนของชั้นดินในระยะไกล ที่การใช้ Soft Rail Pads จะช่วยลดการสั่นสะเทือนบริเวณโดยรอบที่จะเกิดขึ้นได้มากกว่า ในด้านของการเปลี่ยนประเภทของชั้นดิน ชั้นดินที่มีความอ่อนกว่า จะให้ผลของการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากการวิ่งผ่านของขบวนรถไฟที่มากกว่าในทุกบริเวณ และในส่วนสุดท้ายที่มีการติดตามผลของการสั่นสะเทือนตามหน้าตัดการเปลี่ยนแปลงของทางรถไฟ พบว่า ผลของการสั่นสะเทือนมีค่ามากในส่วนของ Transition Zone ที่เป็นส่วนของ Ballasted Track ซึ่งมีการสั่นสะเทือนของราง และพื้นผิวใกล้เคียง ที่มีค่าสูงที่สุด ในกรณีเมื่อมีการจำลองชั้นดิน เป็นแบบ Medium Soil และแผ่นรองรางเป็นแบบ Medium Rail Pad ส่วนการสั่นสะเทือนในหมอนรองราง พบว่ามีผลที่ใกล้เคียงกัน ในฝั่งของ Ballasted Track ที่มีการสั่นสะเทือนที่มากกว่าฝั่งของ Slab Track

Sañudo et al. (2016) ได้ทำการศึกษาปัญหาที่เกิดจากช่วงรอยต่อของ Track Transition ในรูปแบบที่ต่างกัน รวมไปถึงรวบรวมวิธีการแก้ปัญหา การเปลี่ยนแปลงของค่า Vertical Stiffness ในแต่ละกรณีที่แตกต่างกัน โดยได้ทำการสรุปแนวทางในการแก้ไขปัญหา Track Transition ออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ 1. การปรับปรุง Substructure (Infrastructure) 2. การปรับปรุง Superstructure 3. Combined Solutions และ 4. การกำหนดมาตรฐานการออกแบบที่ใช้ในการออกแบบ และก่อสร้าง โดยพบว่า ผลของน้ำหนักบรรทุกที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟ จะส่งผลการสั่นสะเทือนอย่างมากต่อโครงสร้างทางรถไฟที่เป็น Ballasted Track ทั้งในด้านของ Stress และ Displacement จึงต้องมีการปรับปรุงในส่วนของฝั่ง Ballasted Track ให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่ดี Sañudo et al. (2016) ได้มีการรวบรวม และสรุปโมเดลที่ถูกนำมาใช้ในการจำลองโครงสร้าง Track Transitions ที่สำคัญต่อการปรับปรุงคุณภาพโครงสร้าง โดยจำแนกตาม ลักษณะเฉพาะของโมเดลที่ถูกพัฒนา และข้อจำกัดของแต่ละการศึกษา รวมถึงได้มีการแนะนำแนวทางในการศึกษาเกี่ยวกับปัญหาที่เกิดจากช่วง Track Transition ในอนาคต

Park et al. (2020) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนรูปที่มีผลในเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างทางรถไฟที่อยู่ในช่วง Track Transition ผลของการศึกษาด้วย Numerical Model มีการเปรียบเทียบกับบริเวณ Bridge Transition Zone ของสะพานที่สนใจ และได้มีการติดตั้งเครื่องมือที่ทำการวัดค่า พบว่าน้ำหนักกระทำของล้อ ต่อตำแหน่งที่พิจารณา มีค่าการทรุดตัวที่สอดคล้องกันในการติดตั้งด้วยอุปกรณ์วัดค่า และการคำนวณด้วย Numerical Models ในแง่ของการตรวจสอบค่าของความเค้นใน

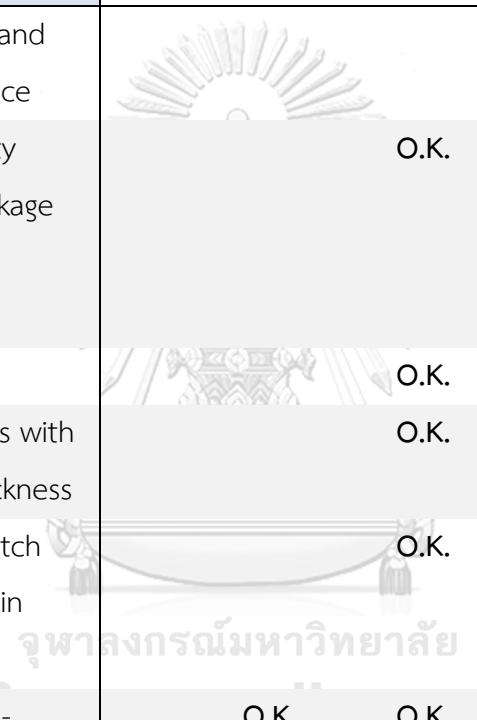
ชั้นโครงสร้าง พบว่า ค่าความเค้นในชั้น Track Concrete Layer, TCL มีค่าสูงกว่าชั้นของ Hydraulic Stabilized Base ที่อยู่ต่ำกว่า แต่ค่าของความเค้นที่เกิดขึ้นมีผลตอบสนองที่สูงขึ้นตามความเร็วของขบวนรถไฟที่วิ่งผ่าน และค่าของ Maximum Stress ที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นโครงสร้าง มีค่าไม่เกินค่า Allowable Stress ที่กำหนดไว้ มีข้อเสนอแนะในกรณีที่แรงกระทำภายในระบบ หรือที่ตำแหน่งเฉพาะ เช่น Wheelset มีค่ามากเกินไป สามารถปรับปรุงได้โดยการเปลี่ยนค่าความยืดหยุ่นของ Spring ที่ใช้ในการยึดรั้ง

### 2.2.3 การศึกษาการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับแผ่นวัสดุยืดหยุ่น

Paixão et al. (2018) ได้ทำการศึกษาการจำลองโครงสร้างด้วย Numerical Simulation บริเวณรอยต่อ Track Transition ระหว่างชั้นดิน และโครงสร้างสะพาน ในการปรับปรุงการสั่นสะเทือนในบริเวณรอยต่อของทางรถไฟกับสะพาน โดยใช้ Under Sleeper Pads เพื่อนำเอาผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้ในการปรับปรุงในด้านการออกแบบเพื่อป้องกันการสั่นสะเทือนในบริเวณ Track Transition ในกรณีอื่น (Sol-Sánchez et al., 2014) และเพื่อศึกษาคุณสมบัติในเชิงพฤติกรรมของ Under Sleeper Pads, USPs ที่มีผลต่อการใช้งานในโครงสร้างทางรถไฟ เนื่องจากคุณสมบัติในการช่วยลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ในชั้นส่วนวัสดุ (Paixão et al., 2015) พบว่า ในช่วงของระยะที่มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดของโครงสร้างทางรถไฟ บริเวณที่ก่อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของหน้าตัด ที่ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า Stiffness จะมีค่าของผลตอบสนองที่มากกว่าปกติ โดยจากในกรณีศึกษาจะได้แก่ ก่อนบริเวณที่จะมีการเปลี่ยนแปลงของ Embankment ไปยัง UGM และก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก UGM เป็น CBM ที่จะพบว่าค่า Rail Displacement และค่า Sleeper Accelerations จาก 2 บริเวณนี้ มีค่าที่มากกว่าปกติ ซึ่งเห็นได้ชัดว่าไม่จำเป็นที่จะต้องเป็นรอยต่อบริเวณใกล้เคียงสะพาน ที่จะทำให้เกิดค่าของการเปลี่ยนแปลงที่มากกว่าปกติ โดยเมื่อแปลงค่าออกมาเป็นแรงในแนวตั้งที่แปรผันตามหน้าตัดแล้ว ได้มีการแบ่งส่วนของการใช้ Under Sleeper Pads เพื่อลดการสั่นสะเทือน และเปรียบเทียบค่า Rail Displacement ของกรณีที่ไม่ใช้ USPs, กรณีการใช้งานปกติ และกรณีที่มีการปรับปรุง USPs พบว่าในกรณีที่มีการปรับปรุงการใช้งาน USPs ให้มีความต่อเนื่องของค่า Stiffness ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าของ Rail Displacement มีความต่อเนื่องใกล้เคียงเชิงเส้น (Paixão et al., 2018) จะส่งผลทำให้ Wheel-Rail Force และค่าของความเร่งในแนวตั้งบริเวณชั้นดินในหน้าตัดที่ต่างกันมีความต่อเนื่องที่มากยิ่งขึ้น

Kaewunruen et al. (2018) ทำการศึกษาอิทธิพล และพฤติกรรมของการใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่น ได้แก่ USPs และ UBMs ในสถานะที่มีความชื้น และสภาวะแห้ง ซึ่งทำการทดสอบใน 3 รูปแบบแรง ได้แก่ Statics Load, Dynamics Load และ Impact Load เพื่อที่จะติดตามหาค่าคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานของวัสดุแต่ละประเภทต่อไป โดยได้มีข้อสรุป การแนะนำการใช้งานรูปแบบของ USPs แต่ละประเภท ในกรณีที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** สรุปประเภทของ USPs และข้อแนะนำในการใช้งานจาก UIC (International Union of Railways) (Ngamkhanong & Kaewunruen, 2020)

	Type of USPs								
	Very Soft	Soft	Medium	Stiff	Very Stiff				
<b>Statics Bedding Modulus, <math>C_s</math> [N/mm<sup>3</sup>]</b>	$C_s \leq 0.10$	$0.10 < C_s \leq 0.15$	$0.15 < C_s \leq 0.25$	$0.25 < C_s \leq 0.35$	$C_s > 0.35$				
USPs Characteristics and Applications in Practice									
Improve Track Quality (Reduce Ballast Breakage and Track/Turnout Pressure)						O.K.		O.K.	
Transition Zones						O.K.		O.K.	
On Existing Structures with Reduced Ballast Thickness						O.K.		O.K.	
Reduction of Long-Pitch low Rail Corrugation in Tight Curves						O.K.		O.K.	
Reduction of Ground-Borne Vibration						O.K.		O.K.	

Esmaili et al. (2022) ได้ทำการทดสอบความแข็งแรงของหินในชั้น Ballast Layer ต่อการทนทานในการเสื่อมสภาพ เมื่อมีแรงกระทำซ้ำเป็นระยะเวลานาน โดยใช้ Under Sleeper Pads ที่มีค่า Stiffness ที่ต่างกัน ผลการทดสอบพบว่า Soft Under Sleeper Pads มีผลทำให้หินเกิดการเสื่อมสภาพ และการทรุดตัวของชั้น Ballast ที่น้อย เมื่อเทียบกับการใช้ Under Sleeper Pads ที่มีความ Stiff ที่มากกว่า ในแง่ของการเสื่อมสภาพของชั้น Ballast สามารถวัดได้จากปริมาณของหินที่เกิดการแตก หรือค่า Ballast Breakage Index, BBI พบว่าการใช้ Soft USPs ช่วยลดการเสื่อมสภาพของหิน และการทดสอบเพื่อหาค่า Damping Ratio ของชั้น Ballast เพื่อใช้ในการนำไปวิเคราะห์ใน



แห่งของการใช้งานต่อไป พบว่า การใช้ Soft USPs ช่วยเพิ่มค่า Damping Ratio ในชั้น Ballasted Layer ที่มากกว่า จึงสรุปว่าในแง่ของการใช้งานที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของ หินในชั้น Ballast การใช้ Soft USPs เป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพ มากกว่า Stiff USPs

Witt (2008) ได้ทำการศึกษาผลของการใช้ Under Sleeper Pads, USPs ในระบบรางแบบใช้หินโรยทาง โดยได้ทำการศึกษาการใช้ Under Sleeper Pads, USPs ทั้ง 3 แบบอันได้แก่ Stiff USPs, Medium USPs, และ Soft USPs เปรียบเทียบกับการไม่ใช้ USPs ในกรณีของ Track Transition ในช่วงของ Soft Track ที่มีช่วงเปลี่ยนผ่านเป็น Stiff Track ในช่วงหนึ่ง โดยผลที่ได้พบว่า ในแง่ของ Wheel/Rail Contact Force การใช้ Soft USPs จะช่วยลดแรงได้มากที่สุด แต่มีค่าใกล้เคียงกับ การใช้ Medium USPs ส่วนในแง่ของ Ballasted Contact Force การใช้ Soft USPs จะช่วยลดแรงได้มากที่สุด และ Soft USPs ช่วยให้การกระจายแรงใน Sleeper ดีมากกว่ากรณีใช้ USPs ประเภทอื่น

#### 2.2.4 สรุปประเด็นการแก้ปัญหา Track Transition จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนของการแก้ปัญหาของระบบรางแบบ Ballasted Track ในช่วงของ Track Transition พบว่า ยังมี การแก้ปัญหาโดยการใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่น (Resilient Materials) หรือวัสดุที่มีความสามารถในการช่วยลดผลตอบสนองที่เกิดขึ้น ในรูปแบบของการใช้การติดตั้ง Under Sleeper Pads ที่ยังไม่ได้รับความนิยมมาก และยังไม่ได้มีการศึกษาการแก้ปัญหาที่มากเพียงพอ

ส่วนท้ายของการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาของ Track Transition ผู้วิจัยจึงได้ทำการสรุป และรวบรวมการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับ Track Transition ที่มีการใช้การจำลองด้วย Numerical Models ในอดีตที่เคยมีมา และมีความเกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาลดการสั่นสะเทือนด้วย USPs และ USMs หรือการใช้โครงสร้างอื่น ซึ่งได้นำมาสรุปตามแต่ละหัวข้อแสดงในตารางที่ 2.2 เพื่อนำมาเปรียบเทียบแนวทางการแก้ปัญหา ตัวแปรที่ต่างกัน ลักษณะเฉพาะของ Numerical Models ที่ทำการศึกษา ข้อจำกัดที่พบ ในการศึกษา

ตารางที่ 2 สรุปประเด็นการแก้ปัญหาที่สำคัญในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Transition Zones

ผู้วิจัย	ประเภทของโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์	ลักษณะเฉพาะของ Model	จุดเด่นในการวิจัย	ข้อจำกัดในการศึกษา
A. Ramos A. Gomes Correia R. Calcada D.P. Connolly	3D Half Plane Models of Track and Ground by ANSYS	Tunnel Transition	- ทำการเปรียบเทียบผลของการใช้งานด้วยวัสดุที่มีความยืดหยุ่น และไม่ใช้เพื่อให้เห็นถึงสภาพความเสียหาย และพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในการใช้งานระยะยาว	
A. Sakhare H. Farooq S. Nimbalkar G R. Dodagoudar	2D Loaded Train on 2D FEM Track and Ground	Bridge Transition (Abutment Zone)	- Integral Abutment Bridge, IAB (Broken Stone + Filler) - Parametric Study	2D FEM
A. Paixao J. Nuno Varandas E. Fortunato R. Calcuda	3D Simulation MATLAB	Bridge Transition	- ใช้ Under Sleeper Pads เพื่อป้องกันการสั่นสะเทือนในบริเวณ Track Transition - ในกรณีศึกษาจะได้แก่ ก่อนบริเวณที่จะมีการเปลี่ยนแปลงของ Embankment ไปยัง UGM และก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก UGM เป็น CBM	3D Unsymmetrical FE Models
M. Shahraki C. Warnakulasooriya Karl J. Witt	3D Half Plane Models of Track and Ground by ANSYS	Ballasted Track to Slab Track	เปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของ - Auxiliary Rails - Different Sleeper Length - Improved Subgrade	
N. Chayut Ming Q. Yan Li Ting K. Sakdirat	3D Multibody Simulation and 3D	Ballasted Track to Concrete Slab Track	Baseplate Fastening System	

	Solid FEM			
P. Galvin	Multibody	Ballasted	Hydraulic Subbase Layer	Multibody
R. Romero	FEM and	Track	for Transition Zone	Models for
J. Dominguez	Boundary	to Slab Track		an Axle
	Element			and Track
	Models			Models.
	(BEMs).			Boundary
				Element
				Models for
				the
				Ground.
S. Park	3D	Open Track	มีการเปรียบเทียบผลที่ได้จาก	
Ja Y. Kim	Multibody	for Ballasted	Numerical Models	กับการตรวจวัด
J. Kim	Simulation	Track to	ค่าที่ได้จากบริเวณภาคสนาม	
S. Lee	and 3D	Concrete Slab		
Kook H. Cho	Solid FEM	Track		

### ตารางที่ 3 สรุปประเด็นการแก้ปัญหาที่สำคัญในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Transition Zones (ต่อ)

ผู้วิจัย	ผลการศึกษา	ความเร็วที่สนใจ [km/hr]
A. Ramos	- เกิดการเสีรูปร่างอย่างมากในโครงสร้างของ Slab Track ซึ่งใน	220
A. Gomes	การศึกษา ได้แนะนำถึงแนวทางในการใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่น (Resilient	
Correia	Materials) มาช่วยในการกระจายความเค้นในชั้นส่วนของโครงสร้าง ร่วม	
R. Calcada	ด้วยกับการปรับปรุงคุณภาพของชั้น Subgrade	
D.P. Connolly		
A. Sakhare	- การเพิ่มระยะ Transition Zone ทำให้เกิดการทรุดตัวที่น้อยลง	60
H. Farooq	- การเพิ่มขึ้นของความหนาทำให้เกิดการทรุดตัวที่น้อยลง	100
S. Nimbalkar	- การเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของ Back Fill Soil	150
G R.	- การเลือกใช้ดินที่มีความหนาแน่นสูง หรือบดอัดทำให้เกิดความแน่นสูง จะ	200
Dodagoudar	ช่วยลด Vertical Displacement ได้ดี ตามระดับความลึกของชั้นดิน	220
	- การใช้ระยะความสูงของ Integral Abutment มากขึ้น จะทำให้ค่า Track	
	Displacement ในส่วนของโครงสร้างสูงขึ้นตาม	
	- Track Displacement จะลดลงตาม Inclination Fall ของค่าความเอียง	
	ที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นในส่วนของสะพานที่ไม่ได้มีความต่างของการทรุดตัวตาม	

Inclination Fall		
A. Paixao	- ค่า Rail Displacement และค่า Sleeper Accelerations จากก่อน	220
J. Nuno	บริเวณที่จะมีการเปลี่ยนแปลงของ Embankment ไปยัง UGM และก่อนที่	
Varandas	จะเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก UGM เป็น CBM มีค่าที่มากกว่าปกติ	
E. Fortunato	- ในกรณีที่มีการปรับปรุงการใช้งาน USPs ให้มีความต่อเนื่องของค่า	
R. Calcuda	Stiffness ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าของ Rail Displacement มีความต่อเนื่อง ใกล้เคียงเชิงเส้น จะส่งผลทำให้ Wheel-Rail Force และค่าของความเร่งใน แนวตั้งบริเวณชั้นดินในหน้าตัดที่ต่างกัน มีความต่อเนื่องที่มากยิ่งขึ้น	
M. Shahraki	- การปรับปรุงคุณภาพของ Subgrade เป็นวิธีที่ช่วยลดการทรุดตัว และ	300
C.	ความเร่งในแนวตั้งที่เกิดขึ้นบริเวณ Track Transition ได้มากที่สุด	
Warnakulasoo	- การใช้ Auxiliary Rail ทำให้การเปลี่ยนแปลงของ Displacement,	
riya	Acceleration, และ Stress มีความสม่ำเสมอมากที่สุด	
Karl J. Witt	- การใช้ Auxiliary Rail ทำให้ความเค้นในแนวตั้งมีความสม่ำเสมอมากกว่า การเพิ่มขนาดของ Sleeper	
N. Chayut	- Baseplates ที่มีความยืดหยุ่นที่สูงกว่าจะช่วยในการลดการสั่นสะเทือนที่	200
Ming Q. Yan	มากกว่า และยังช่วยในการลด Slab Displacement	
Li Ting	- กรณีของการใช้ Baseplate ที่มีค่าน้ำหนักสูง และค่า Stiffness ที่สูง จะ	
K. Sakdirat	ทำให้การเปลี่ยนแปลงของ Rail Displacement มีความสม่ำเสมอมากกว่า - การจัดเรียง Baseplate ให้มีการลดลงตาม Span พบว่ายังมีระยะเวลาเว้น ช่วงที่มากขึ้น จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงที่มีความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้นใน ส่วนของ Track Transition	
P. Galvin	- การสั่นสะเทือนของราง และพื้นผิวใกล้เคียง จะมีค่าสูงที่สุดในกรณีเมื่อมี	298
R. Romero	การจำลองชั้นดิน เป็นแบบ Medium Soil และแผ่นรองรางเป็นแบบ	
J. Dominguez	Medium Rail Pad - การสั่นสะเทือนในหมอนรองราง พบว่ามีผลที่ใกล้เคียงกันกับในกรณีอื่น การสั่นสะเทือนในส่วนของฝั่ง Ballasted Track ที่มีการสั่นสะเทือนที่ มากกว่าฝั่งของ Slab Track	
S. Park	- ค่าความเค้นในชั้น Track Concrete Layer, TCL มีค่าสูงกว่าชั้นของ	100
Ja Y. Kim	Hydraulic Stabilized Base ที่อยู่ต่ำกว่า แต่ค่าของความเค้นที่เกิดขึ้นมี	200
J. Kim	ผลตอบสนองที่สูงขึ้นตามความเร็วของขบวนรถไฟที่วิ่งผ่าน	300
S. Lee	- ค่าของ Maximum Stress ที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นโครงสร้าง มีค่าไม่เกินค่า	
Kook H. Cho	Allowable Stress ที่กำหนดไว้	

### บทที่ 3

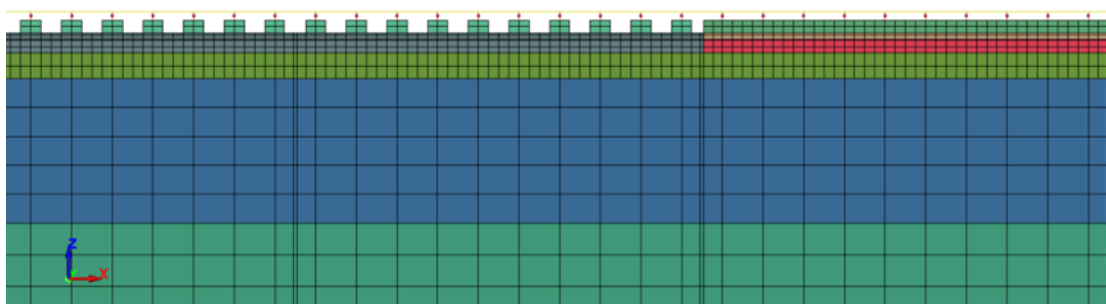
#### ระเบียบวิธีวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึง ระเบียบวิธีในการวิจัย (Research methodology) ที่ผู้วิจัยได้ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งจะประกอบไปด้วย รูปแบบของการจำลองโครงสร้าง ลักษณะเครื่องมือที่ใช้ในการแก้ปัญหา ขั้นตอนการศึกษา และวิธีการในการดำเนินการศึกษาปัญหาที่เกี่ยวข้องกับ Track Transition ระหว่าง Ballasted Track และ Slab Track รูปแบบ CRTS Type III ซึ่งในการวิจัย ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมจำลองโครงสร้าง LS-DYNA เพื่อพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างทาง โดยโปรแกรมได้มีการคำนวณ และวิเคราะห์โครงสร้างโดยอาศัยหลักการของ Finite Element Methods (FEM) มาใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่ได้จากการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟ จากในกรณีทดสอบที่ต่างกัน ซึ่งได้ทำการแบ่งระเบียบวิธีวิจัยได้เป็น 3 หัวข้อ ดังนี้

1. การจำลองโครงสร้างทางรถไฟในช่วงของ Track Transition
2. การจำลองโครงสร้างทางรถไฟโดยใช้โปรแกรม LS-DYNA
3. การแบ่งกรณีศึกษาการลดการสั่นสะเทือนโดยใช้ USPs และ USMs

#### 3.1 การจำลองโครงสร้างทางรถไฟในช่วงของ Track Transition

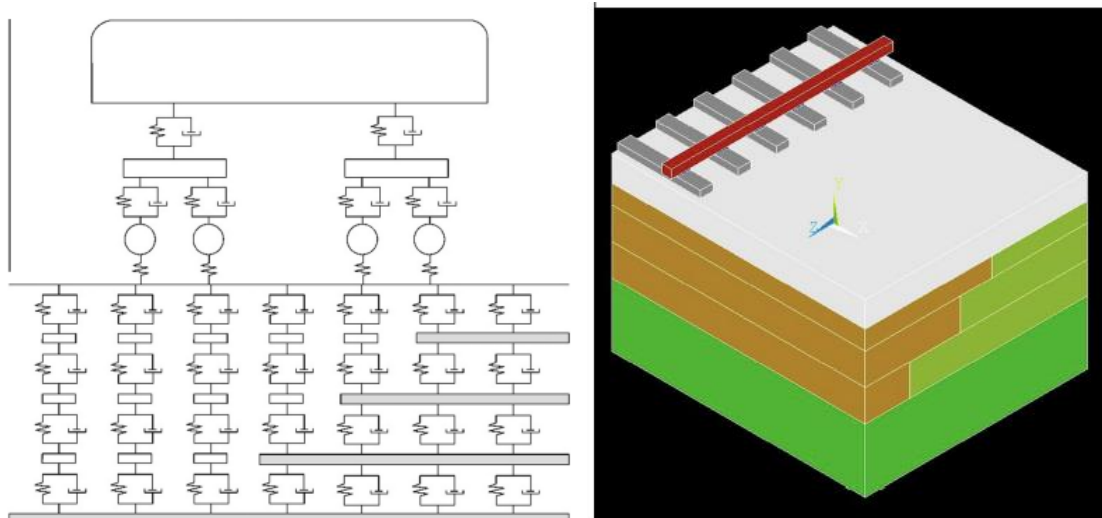
ช่วงของ Track Transition ในโครงสร้างทางโดยทั่วไป มีรูปแบบที่หลากหลายแตกต่างกัน แต่ในกรณีที่ต้องการจะทำการศึกษาในงานวิจัยในครั้งนี้ จะทำการพิจารณาช่วงรอยต่อของโครงสร้างทาง ในส่วนของโครงสร้างทางแบบ Ballasted Track System และ Slab Track System ซึ่งเป็นรูปแบบที่พบได้โดยทั่วไป โดยสาเหตุที่เลือกพิจารณาในช่วงรอยต่อนี้เนื่องจาก การใช้โครงสร้างทางแบบ Ballasted Track System ซึ่งยังคงได้รับความนิยมการใช้งานอยู่ และสามารถพบได้โดยทั่วไปในโครงสร้างทางในทุกเส้นทาง รวมถึงการนำมาพิจารณาการใช้งานร่วมกับโครงสร้างทางแบบ Slab Track System จากลักษณะข้อดีของรูปแบบของโครงสร้างทางประเภทนี้ อาทิเช่น ประสิทธิภาพในการใช้งาน, ความแข็งแรงทนทาน, การเสียรูปของโครงสร้างที่มีค่าน้อย ทำให้มีการถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน รวมถึงในแง่ของการนำมาใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นในกลุ่มของรถไฟความเร็วสูง หรือ กลุ่มรถไฟ City Line ซึ่งในอนาคตอาจจะถูกใช้งานร่วมกันกับระบบรางที่มีอยู่เดิม



ภาพที่ 11 Transition Zone Between Soft Track and Stiff Track

เมื่อพิจารณาลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโครงสร้างทางรถไฟในบริเวณ Track Transition โดยอาศัยหลักของการวิเคราะห์โครงสร้างในเชิงพลศาสตร์ จะพบว่าในฝั่ง Slab Track จะเป็นส่วนของโครงสร้างที่มีการเสถียรน้อยกว่า ส่งผลไปถึงเรื่องการทรุดตัวที่น้อยกว่าฝั่งของ Ballasted Track เนื่องจากคุณสมบัติของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นรูปแบบของการจำลองโครงสร้างจะสามารถอธิบายได้ว่าทางฝั่งของ Slab Track จะมีค่า Stiffness ที่สูงกว่า ฝั่ง Ballasted Track (Indraratna et al., 2019) (Gallego et al., 2011) ดังรูปที่ 3.1 จะแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างทางแบบ Ballasted Track ที่มีความแตกต่างของค่า Track Stiffness ในชั้น Substructure ที่แตกต่างกัน ส่งผลทำให้เกิดแรงที่เพิ่มขึ้นมากในช่วงรอยต่อ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาโครงสร้างได้รับความเสียหายและเกิด Track Degradation

การใช้งาน USPs ในการแก้ปัญหาค่าความต่างของค่า Stiffness จึงควรจะเริ่มทำการติดตั้งที่ขอบสิ้นสุดของรอยต่อ Transition มาทางด้านฝั่งของ Ballasted Track และจะมีการเปลี่ยนค่าตามระยะทาง เพื่อให้ค่า Stiffness เกิดการลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่ง Models ในการจำลองทางฝั่งของโครงสร้างที่เป็น Slab Track จะมีการจำลองส่วนของ Under Slab Mat (USMs) ในตำแหน่งช่วงที่ใกล้กับบริเวณรอยต่อ เพื่อทำให้ค่า Stiffness ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมากเกินไป ซึ่งเมื่อทำการจำลองร่วมกับโครงสร้างกับขบวนรถไฟที่จำลองแบบ Multi-Body Simulation แล้ว จะได้รูปแบบของการจำลองช่วงของ Track Transition ได้ดังภาพที่ 12 เป็นรูปแบบการจำลองแบบ Fully coupled models ซึ่งในการวิเคราะห์จะดูผลตอบสนองทางพลศาสตร์ที่ได้ จากการใช้งาน USPs และ USMs ที่มีค่า Stiffness แตกต่างกันในแต่ละประเภท



ภาพที่ 12 2D Analytical Models and  
3D Simplified Models on Track Transition (Sañudo et al., 2016)

### 3.2 การจำลองโครงสร้างทางรถไฟโดยใช้โปรแกรม LS-DYNA

ในส่วนต้นจะทำการอธิบายแนวคิดทางทฤษฎี และหลักการ FEM ที่เกี่ยวข้อง ต่อการใช้โปรแกรม LS-DYNA และจะอธิบายการจำลองโครงสร้างของระบบการเคลื่อนที่ อันได้แก่ ขบวนรถไฟ (Vehicle model), ทางรถไฟ (Track model), และ ดิน (Ground model) รวมถึงค่าคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการจำลอง

โปรแกรม LS-DYNA Software เป็นโปรแกรมการวิเคราะห์ผลตอบสนอง อันเนื่องมาจากการสั่นสะเทือน มีการทำงานโดยคำนวณด้วยวิธีการเชิงตัวเลข วิเคราะห์แบบลำดับขั้นเวลา (Time step) และได้ผลของการวิเคราะห์เป็น Numerical results มีการใช้งานที่หลากหลายทั้งแง่ของการตรวจสอบเพื่อใช้งานจริง และการวิจัยเพื่อการศึกษา เหมาะต่อการวิเคราะห์รูปแบบของการเปลี่ยนแปลงเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้าง ในหลากหลายรูปแบบ อาทิเช่น ปัญหาการชนของโครงสร้าง การวิเคราะห์การตอบสนองต่อการสั่นสะเทือน และ การส่งผ่านของความร้อนไปยังชิ้นส่วนโครงสร้าง เป็นต้น

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) เป็นวิธีวิเคราะห์โครงสร้างรูปแบบหนึ่งที่นิยมในการนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาเชิงวิศวกรรมในปัจจุบัน เป็นวิธีการประมาณเชิงตัวเลข ที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการวิเคราะห์โครงสร้างที่ต้องการใช้การคำนวณที่ต้องการความละเอียดสูง โดยมีหลักการในการคำนวณโดยการทำการแบ่งชิ้นส่วนของโครงสร้างเป็นชิ้นส่วนย่อยขนาดเล็ก เรียกว่า Element และทำการจำลองรูปแบบของชิ้นส่วนขนาดเล็กนั้น ด้วยรูปแบบทางเรขาคณิตที่สามารถใช้สมการ Differential Equations กำกับควบคุมเพื่อหาผลลัพธ์ได้

โดยแต่ละชิ้นส่วนขนาดเล็กจะเชื่อมต่อกันด้วยจุดต่อ เรียกว่า Node ซึ่งในการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์ และการเคลื่อนที่ จะใช้ในการประมาณเพื่อหาค่าการเคลื่อนตัว (Displacement) ที่เปลี่ยนไป ณ จุดนี้

#### Discrete Elements



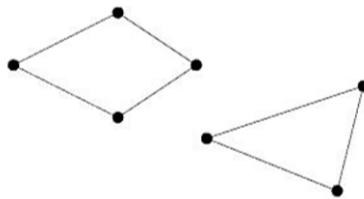
Spring

#### Beam and Truss Elements



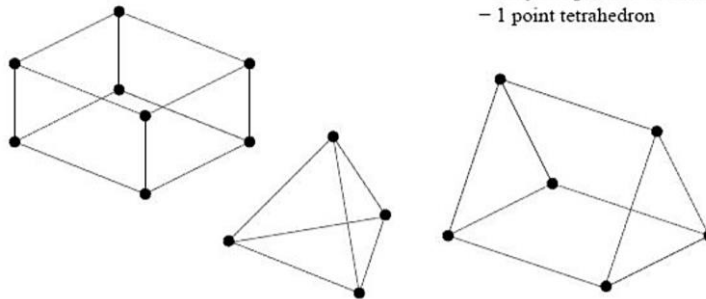
- Hughes-Liu with cross section integration
- Belytschko-Schwer resultant beam
- truss (resultant)
- discrete beam/cable
- spotweld beam

#### Shell Elements



- Hughes-Liu
- Belytschko-Tsay
- C0 triangular shell
- Belytschko-Tsay membrane
- S/R Hughes-Liu
- Fully integrated shell

#### Solid Elements



- constant stress solid element
- fully integrated S/R solid
- 1 point tetrahedron

ภาพที่ 13 Typical Elements used in the Analysis

([dynasupport.com/tutorial/elements](http://dynasupport.com/tutorial/elements))

ในการวิจัยจะมีการนำเอาระเบียบวิธี FEM มาใช้ในขั้นตอนของการจำลองการวิ่งของขบวนรถไฟด้วยโปรแกรม LS-DYNA ซึ่งในโปรแกรม ผู้วิจัยจะทำการ Model โดยใช้ประเภทของ Element ได้แก่ 1D Beam Elements ที่แต่ละ Element ประกอบไปด้วย 2 Node ในส่วนที่เป็นโครงสร้างราง และ 3D Solid Elements ที่แต่ละ Element ประกอบด้วย 8 Node ในองค์ประกอบที่เป็นโครงสร้างทาง และชั้นดิน โดยจะเชื่อมต่อกันด้วย Discrete Elements หรือ Suspension System

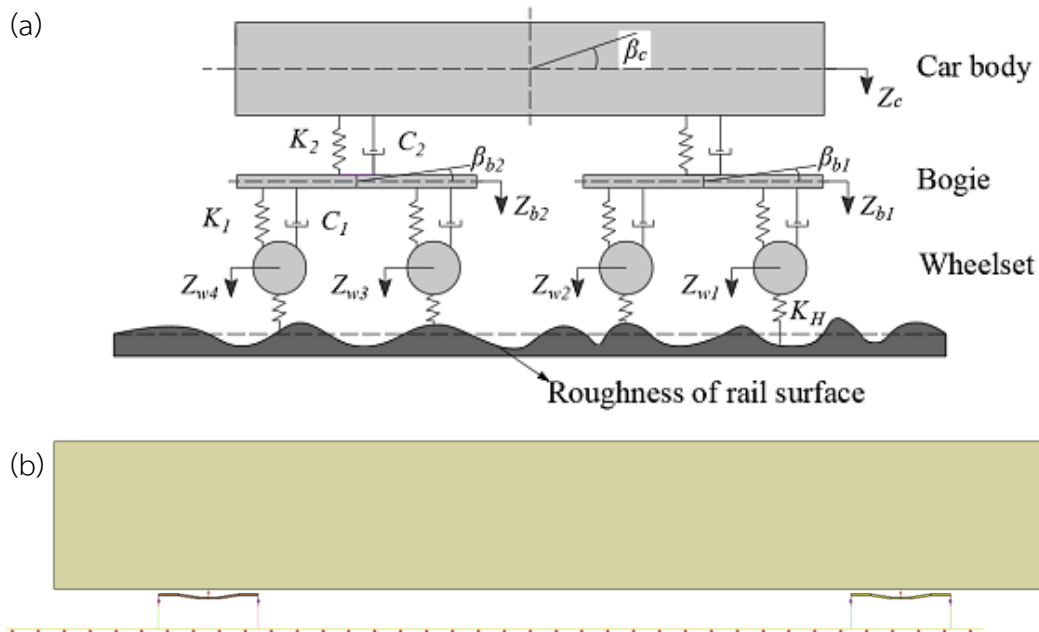


การจำลองโครงสร้าง และคำนวณผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่ได้ ซึ่งแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้น ภายในโปรแกรมได้แบ่งโมเดลที่ใช้ในการจำลองออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การโมเดลขบวนรถ (Train Modeling) ด้วยหลักการ Multi-Body Simulation ที่จะมีการจำลองโครงสร้างของขบวนรถไฟเป็น 3 ส่วนย่อย ได้แก่ ขบวนรถไฟ (Car Body), ชุดโบกี้ (Bogies), และ ชุดล้อ (Wheelset) ต่อมาเป็นการโมเดลโครงสร้างระบบราง หรือทางรถไฟ (Track Modeling) ด้วยหลักการ Finite Element Method และท้ายสุดได้แก่ การโมเดลชั้นดิน (Ground Modeling) ด้วยหลักการ Finite Element Method (FEM) และ Perfectly Mesh Element (PML) โดยจะอธิบายการจำลองโครงสร้างในแต่ละส่วน และค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ ตามลำดับ

### 3.2.1 การจำลองโครงสร้างของโมเดลขบวนรถไฟ (Train Modeling)

ในการจำลองโครงสร้างของขบวนรถไฟ จะใช้การจำลองเป็นแบบ Multi-Body Simulations (Huang et al., 2014) โดยแบ่งเป็น 3 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ 1. ขบวนรถ (Vehicle) จำลองเป็น Rigid Car Body เนื่องจากไม่ต้องการให้เกิดการเสียรูปของขบวนรถที่ใช้ และเพื่อทำให้การง่ายต่อการคำนึงถึงผลกระทบต่อโครงสร้างหลักชุดอื่น 2. ชุดโบกี้รถไฟ (Bogies) จำลองโดยใช้ Shell Element เพื่อพิจารณาถึงผลอันเนื่องมาจากการดัด (Bending) ในชิ้นส่วนของโครงสร้าง และ 3. ชุดเพลาล้อ (Wheelset) จำลองเป็น Beams Element เนื่องจากการคำนึงถึงการเสียรูปในโครงสร้าง 2 แนวแกน ได้แก่ แนวตั้ง และตามแนวการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟ โดยในการเชื่อมต่อของแต่ละองค์ประกอบของขบวนรถไฟ มีการเชื่อมต่อกันด้วย Suspension System ที่ประกอบไปด้วย Spring และ Damper ที่จะจำลองด้วย Discrete Element อย่างละ 1 ชุด

โดยในส่วนของการจำลองขบวนรถไฟ มีค่าคุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้อง เป็นข้อมูลของขบวนรถไฟ CR 400BF : Fuxing Hao EMU Train ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่ง Vehicle Models เนื่องจากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนจะสนใจพิจารณาการเคลื่อนที่ในแนวตั้งเป็นหลัก ทำให้สามารถแบ่ง Degree of Freedom (DOFs) ที่สนใจได้เป็น 10 DOFs ได้แก่ Vertical Displacement and Rotation of 1 Rigid Car Body, Vertical Displacement and Rotation of 2 Bogies และ Vertical Displacement of 4 Wheelset ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 Vehicle Models (a) Multibody Simulation (Li et al., 2020)

(b) แบบจำลองขบวนรถไฟในโปรแกรม LS-DYNA

Dumitriu and Dihoru (2021) ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพล ผลของการดัด (Bending Effect) ของขบวนรถไฟ เป็นผลมาจาก Flexibility ที่ไม่เท่ากันในโครงสร้างขบวนรถไฟ โดยสนใจความแตกต่างของผลการสั่นสะเทือนใน Vertical Vibration และผลตอบสนองใน Modal Analysis ระหว่างขบวนรถไฟแบบ Rigid Car Body และแบบ Flexible Car Body โดยทำการวิเคราะห์แบบ Analytical Study และทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้กับผลตอบสนองจาก Numerical Simulation พบว่า การสั่นสะเทือนของ Car Body จะมีค่าสูงขึ้นตามความเร็วของขบวนรถไฟ ในขบวนรถไฟที่เป็น Rigid Car Body จะมีอิทธิพลของผลอันเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนที่มากในส่วนของ Bogies แต่ในการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูง การเปลี่ยนแปลงความเร่งที่ Car Body Center จะมีค่าสูงตามมวลของขบวนรถไฟ

โดยรูปแบบของรถไฟที่จะมีการนำมาใช้งานจริง ในโครงการรถไฟความเร็วสูงในไทย จะได้แก่ ขบวนรถไฟ CR 300 : Fuxing Hao EMU Train ซึ่งเป็นขบวนที่ถูกพัฒนาภายในประเทศจีน โดยมีต้นแบบมาจากขบวน CR 400 : Fuxing Hao EMU Train ที่ได้รับเทคโนโลยีการออกแบบ ต้นแบบของขบวนรถไฟมาจากประเทศเยอรมัน (Qi & Zhou, 2020) แต่ในรุ่น CR 300 จะปรับให้ความเร็วในการวิ่งที่ใช้ในการออกแบบ อยู่ในช่วงความเร็วที่ลดลงมา โดยขบวน CR 300 สามารถทำความเร็วสูงสุดได้อยู่ที่ 300 [km/hr] (Zhai et al., 2015)

#### ตารางที่ 4 Properties of the Vehicle (Qi & Zhou, 2020)

Properties	Values	Unit :
<b>CR 400 BF : Fuxing Hao EMU Train</b>		
Mass of Car Body	68,000	[kg]
Mass of Bogies	3,200	[kg]
Mass of Wheelset	2,400	[kg]
Inertia of Pitch Motion of the Car Body	$5.47 \times 10^5$	[kg.m <sup>2</sup> ]
Inertia of Pitch Motion of the Bogies	6,800	[kg.m <sup>2</sup> ]
Primary Suspension Stiffness	$1.04 \times 10^6$	[N/m]
Primary Suspension Damping	$5 \times 10^3$	[N.s/m]
Secondary Suspension Stiffness	$4 \times 10^5$	[N/m]
Secondary Suspension Damping	$6 \times 10^3$	[N.s/m]

โดยในรูปแบบของการใช้งานกับโครงการในประเทศไทย จะถูกควบคุมความเร็วใช้งานให้อยู่ในช่วงไม่เกิน 250 [km/hr] ดังนั้นในการศึกษาจะใช้การจำลองโมเดลของขบวนรถด้วย CR 400 แต่จะปรับค่าของ Car Body Mass ให้เป็นตาม Static Axle Load ของขบวน CR 300 ให้เกิดความเหมาะสมต่อการจำลอง ในส่วนของ Wheel-Rail Contact Force ระหว่างล้อ และราง จะสามารถคำนวณได้จากผลตอบสนองของโปรแกรม LS-DYNA มีพื้นฐานการคำนวณจากทฤษฎี Hertz's contact theory ซึ่งจะใช้สมการที่เกี่ยวข้อง ดังสมการที่ 3.1

$$F = K_H \times (z_w - z_r - \delta) \quad (3.1)$$

โดย	$K_H$	=	Vertical Stiffness of Wheel-Rail Contact Spring ซึ่งมีค่า $1.325 \times 10^9$	[N/m]
	$z_w$	=	Vertical displacement of wheel	[m]
	$z_r$	=	Vertical displacement of rail	[m]
	$\delta$	=	Track irregularity or roughness of rail surface	[m]

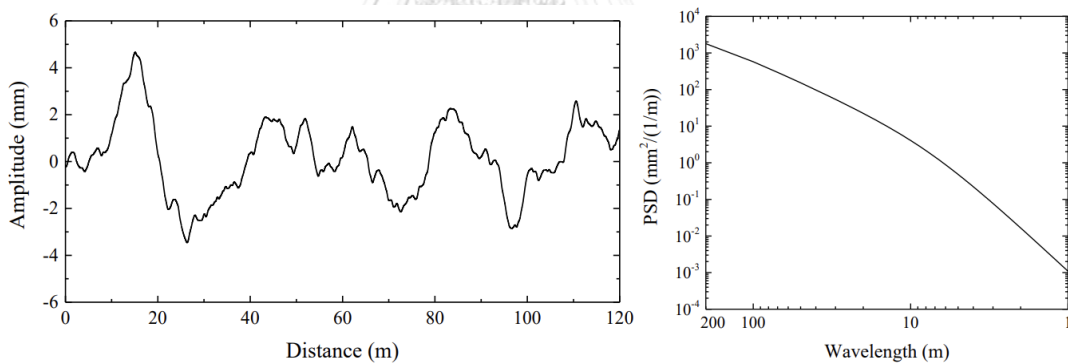
#### 3.2.2 การจำลองโครงสร้างของโมเดลทางรถไฟ (Track Modelling)

ในส่วนของการสร้างทางรถไฟ ส่วนของ Superstructure ประกอบไปด้วย Rail จำลองด้วย Beam Element เชื่อมต่อกับ Sleeper ด้วย Rail Pads ที่ถูกจำลองด้วย Discrete Element ได้แก่

Spring และ Damper ซึ่งในการจำลองจะพิจารณาถึงผลของ Irregularity of Track จาก Germany High Speed Rail (Sheng et al., 2004) เนื่องจากการพัฒนารูปแบบโครงสร้างทางของ CRTS ในประเภท CRTS Type I และ II ได้รับต้นแบบการพัฒนาจากประเทศเยอรมัน และญี่ปุ่น โดยจะพิจารณาอิทธิพลของ Irregularity ใน Rail จากการคำนวณค่า Power Spectrum Density (PSD) Function ดังแสดงความสัมพันธ์ ในสมการที่ 3.2 หรือสามารถแปลงค่าให้อยู่ในรูปของ Vertical roughness ได้ดังภาพที่ 15

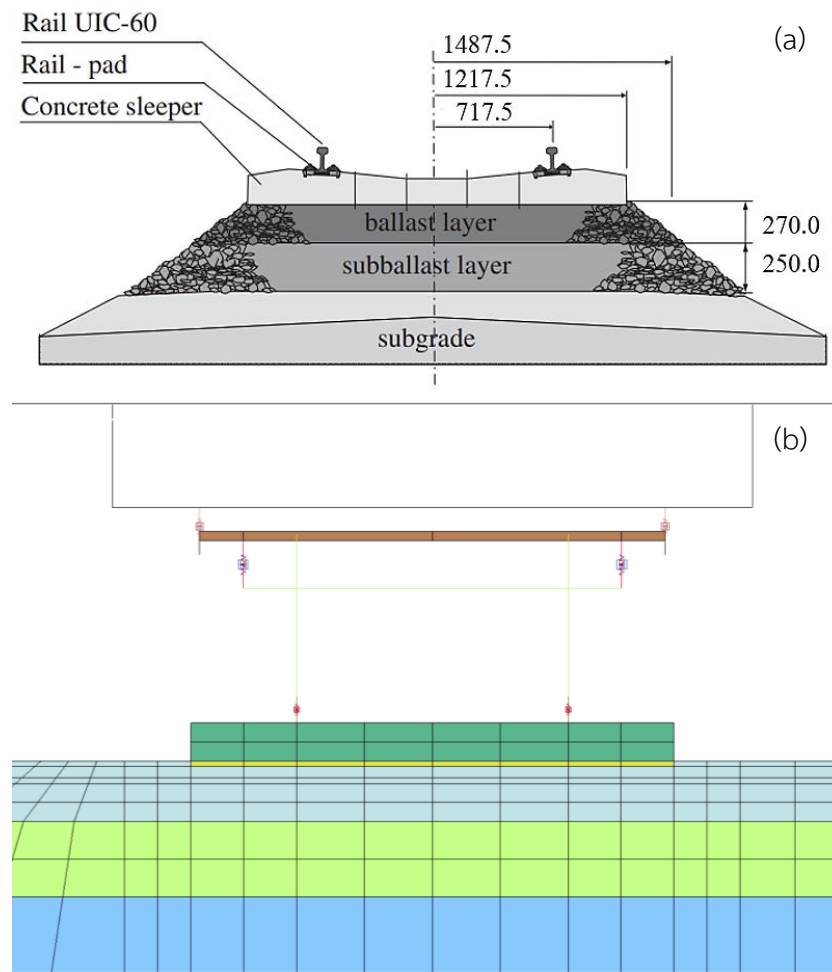
$$S_v(\Omega) = \frac{A_v \Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_r^2)(\Omega^2 + \Omega_c^2)} \quad (3.2)$$

โดย	$A_v$	=	Roughness Constant มีค่า $4.032 \times 10^{-7}$	[m <sup>2</sup> .Rad/m]
	$Z_w$	=	Spatial Frequency of the Roughness	
	$\Omega_c$	=	Cutoff Frequency มีค่า 0.8246	[Rad/m]
	$\Omega_r$	=	Cutoff Frequency มีค่า 0.0206	[Rad/m]



ภาพที่ 15 Roughness with Distance and PSD with Wave Length (Li et al., 2020)

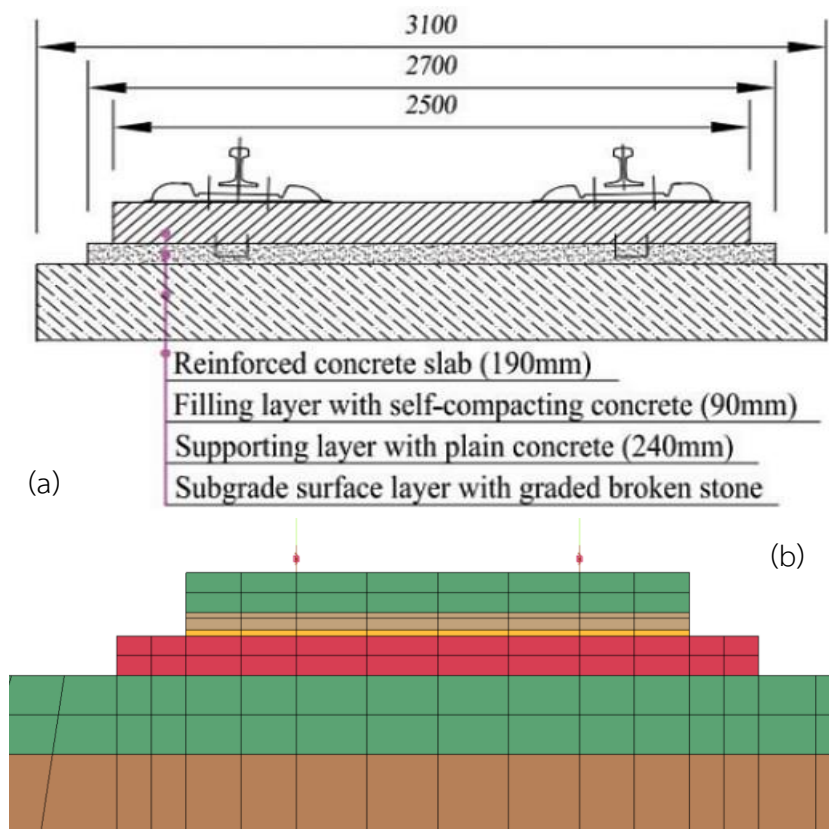
ในส่วนของโครงสร้างอื่น ทั้งในด้าน Ballasted Track ที่ได้แก่ Sleeper, USPs, Ballast Layer, Sub Ballast Layer และโครงสร้างทางฝั่ง Slab Track ที่ประกอบไปด้วย Reinforced Concrete Slab, Filling Layer with Self-Compacting Concrete, Supporting Layer with Plain Concrete และในส่วนของ Substructure หรือ Subgrade จะใช้การจำลองเป็นแบบ 3D Finite Element Models หรือมีการจำลองโครงสร้างด้วย Solid Element ซึ่งรูปที่ 3.6 และ 3.7 จะแสดงองค์ประกอบของโครงสร้างทาง ทั้งในส่วนของ Ballasted Track และ Slab Track : CRTS Type III ตามลำดับ



ภาพที่ 16 Ballasted Track (with Dimensional Modified)

(a) Galvín et al. (2010) (b) Ballasted Track Section in LS-DYNA

โครงสร้างทางฝั่งของ Ballasted Track ได้มีการปรับค่า Dimension ในบางส่วนของโครงสร้างให้มีความเหมาะสม และสอดคล้องต่อการนำมาใช้ในแบบจำลองนี้ โดยในส่วนของ Sleeper ที่ใช้ใน Model มีระยะความกว้าง x ความยาว x ความหนา เป็น  $0.30 \times 1.25 \times 0.25$  [m<sup>3</sup>] เป็น Concrete Sleeper และจะมีค่าคุณสมบัติวัสดุที่แสดงในตารางที่ 3.2 Properties of the Ballasted Track (Galvín et al., 2010) ส่วนในตารางที่ 3.3 Properties of the CRTS Type III : Slab Track (Wang et al., 2016) จะแสดงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างฝั่ง Slab Track



ภาพที่ 17 Slab Track (a) CRTS Type III (An et al., 2017)

(b) Slab Track Section in LS-DYNA

ตารางที่ 5 Properties of the Ballasted Track (Galvín et al., 2010)

Properties	Values	Unit :
<b>Ballasted Track :</b>		
Mass Density of the Ballast	1500	[kg/m <sup>3</sup> ]
Poisson's Ratio of the Ballast	0.2	[mm/mm]
Modulus of Elasticity of the Ballast	$280 \times 10^6$	[N/m <sup>2</sup> ]
Mass Density of the Sub-Ballast	1500	[kg/m <sup>3</sup> ]
Poisson's Ratio of the Sub-Ballast	0.2	[mm/mm]
Modulus of Elasticity of the Sub-Ballast	$140 \times 10^6$	[N/m <sup>2</sup> ]
Stiffness of the Rails Pads	$5.0 \times 10^7$	[N/m]
Damping of the Rail Pads	$7.5 \times 10^4$	[N.s/m]
Mass Density of the Ballast	1500	[kg/m <sup>3</sup> ]

ตารางที่ 6 Properties of the CRTS Type III : Slab Track (Wang et al., 2016)

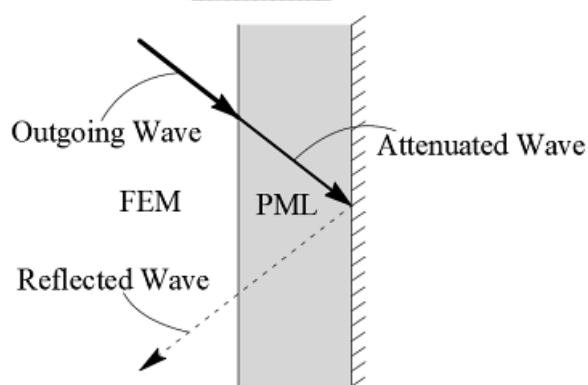
Properties	Values	Unit :
<b>CRTS Type III :</b>		
Mass Density of the Rail	7830	[kg/m <sup>3</sup> ]
Modulus of Elasticity of the Rail	2.059 x 10 <sup>11</sup>	[kg/m <sup>2</sup> ]
Poisson's Ratio of the Rail	0.3	[mm/mm]
Stiffness of the Rails Pads *	5.0 x 10 <sup>7</sup>	[N/m]
Damping of the Rail Pads	7.5 x 10 <sup>4</sup>	[N.s/m]
Thickness of Concrete Slab	0.20	[m]
Mass Density of the Concrete Slab	2500	[kg/m <sup>3</sup> ]
Modulus of Elasticity of the Concrete Slab **	3.6 x 10 <sup>10</sup>	[kg/m <sup>2</sup> ]
Poisson's Ratio of the Concrete Slab	0.2	[mm/mm]
Thickness of Self Compacting Concrete	0.09	[m]
Mass Density of the Self Compacting Concrete	2500	[kg/m <sup>3</sup> ]
Modulus of Elasticity of Self Compacting Concrete **	3.4 x 10 <sup>9</sup>	[kg/m <sup>2</sup> ]
Poisson's Ratio of Self Compacting Concrete	0.2	[mm/mm]
Thickness of Concrete Base	0.2	[m]
Mass Density of the Concrete Base	2500	[kg/m <sup>3</sup> ]
Modulus of Elasticity of the Concrete Base **	3.2 x 10 <sup>10</sup>	[kg/m <sup>2</sup> ]
Poisson's Ratio of the Concrete Base	0.2	[mm/mm]
<u>Noted</u> : * is Dynamics Stiffness.		
** is Reference Static Value, Strain Rate Dependent.		

### 3.2.3 การจำลองโครงสร้างของโมเดลชั้นดิน (Ground Modelling)

ในส่วนของการจำลองชั้นดิน เนื่องจากโครงสร้างทาง CRTS Type III เป็นรูปแบบโครงสร้างที่ได้รับการพัฒนามาจากประเทศจีน และถูกนำมาปรับใช้เป็นการจำลองโครงสร้างทางรถไฟในประเทศไทย จึงได้ทำการจำลองโครงสร้างชั้นดินจากรูปแบบของชั้นดินที่เหมาะสม ตามแบบของชั้นดินในประเทศไทย เพื่อให้เกิดความสอดคล้อง โดยเมื่อพิจารณาตามแนวเส้นทางรถไฟ ช่วงดินที่ใกล้กับอ่าวไทยจะพบว่ามีลักษณะเป็นชั้นดินที่มีความอ่อนตัวสูง หรือ Bangkok Clay Soil การจำลองโครงสร้างชั้นดินจะพิจารณาเป็นโครงสร้างดิน ในบริเวณดังกล่าว ซึ่งจะประกอบไปด้วยชั้นดินหลักทั้งหมด 4 ชั้น ได้แก่ Soft Clay, Medium Stiff Clay, Hard Stiff Clay และชั้น Sand โดยที่มีการจำลองโครงสร้างชั้น

ดินโดยการใช้ 3D Finite Element Modelling ในส่วนของชั้นดินที่เป็น Clay Soil โดยกำหนดให้เป็นพฤติกรรมแบบ Visco-Elastic Materials และใช้วิธี Perfectly Matched Method (PML) ในการจำลองชั้นดินที่เป็นขอบเขตของแบบจำลอง ซึ่งวิธีที่เลือกใช้ PML เป็นวิธีที่นิยมเป็นอย่างมาก ต่อการจำลองโมเดลที่มีขนาดไม่จำกัด อาทิเช่นโมเดลของชั้นดิน โดยทำการจำลองด้วยการจำกัดขอบเขตบริเวณโดยรอบของโมเดล เพื่อให้การจำลองที่ได้ มีประสิทธิภาพในการแสดงผลตอบสนองของการสั่นสะเทือน อันเนื่องมาจากการแสดงผลของการสะท้อนกลับของคลื่นที่มีขนาดเล็กของ Element ที่ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการสั่นสะเทือนในวงกว้าง ช่วยลดการส่งผ่านของคลื่นที่ไม่มีความสำคัญ เพื่อพิจารณาผลของการส่งผ่านของการสั่นสะเทือนหลัก ด้วยหลักการการดูดซับคลื่นของขอบเขต ดังภาพที่ 18 Absorbing Boundary of PML (Li et al., 2020) จะแสดงหลักการของการดูดซับคลื่น

ในส่วนของชั้นดินที่ถูกใช้ในการออกแบบทางประเทศจีน ถูกพัฒนามาจากส่วนของ Beijing-Shanghai High Speed Line ซึ่งจะประกอบไปด้วยชั้นดินทั้งหมด 5 ชั้น ได้แก่ Top Clay, Bottom Clay, Completely Weathered Amphibolite, Highly Weathered Amphibolite และ Weakly Weathered Amphibolite (Li et al., 2020) ซึ่งจะนำเอาข้อมูลของชั้นดินจากจีนที่เป็นต้นแบบของการจำลอง มาใช้ในขั้นตอนของการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Validation) จากผลตอบสนองที่ได้ ภายหลังจากทำการวิเคราะห์ ต่อไป



ภาพที่ 18 Absorbing Boundary of PML (Li et al., 2020)

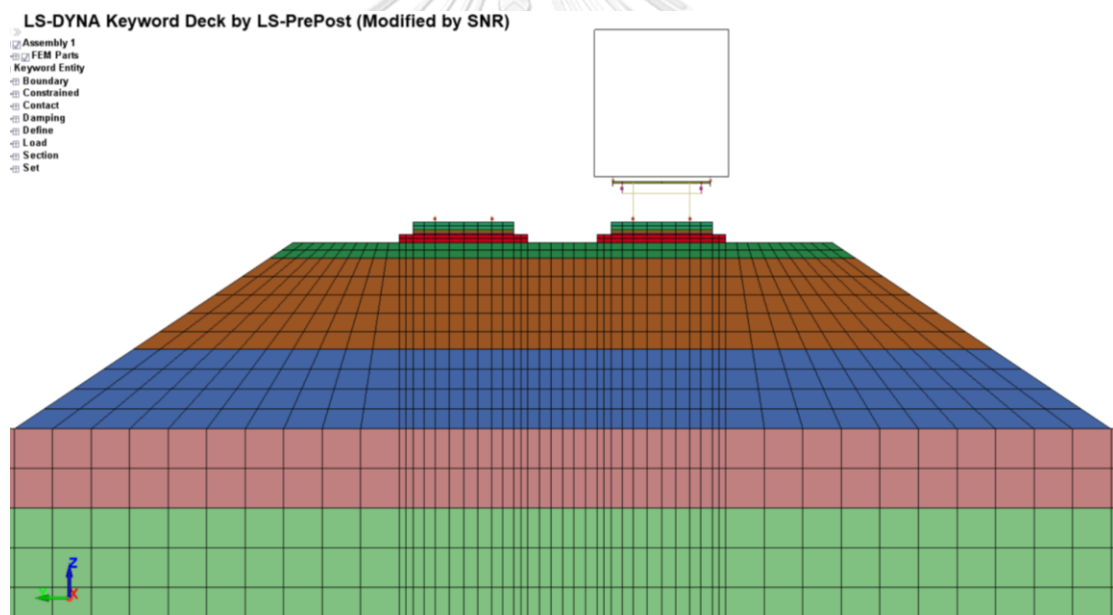
ในส่วนของโครงสร้างชั้นดิน ไม่สามารถหาค่าความหน่วงที่ถูกต้องได้โดยตรง เนื่องจากมีความซับซ้อนในการตรวจวัดหาค่าความหน่วง (Damping Ratio) ในชั้นดินในทางภาคสนาม (Connolly et al., 2013) การจำลองโครงสร้างในโปรแกรม จึงอาศัยการประมาณค่าด้วย Rayleigh Damping of Soil โดยจะใช้การประมาณค่าเชิงการทดสอบ เพื่อลดความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบ และผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของชั้นดิน ดังสมการที่ 3.3



$$C = \alpha M + \beta K \quad (3.3)$$

โดย  $M$  = Mass Matrix of the System  
 $K$  = Stiffness Matrix of the System

ในการวิจัยนี้ กำหนดค่าของสัมประสิทธิ์  $\alpha = 0$  และ  $\beta = 0.0002$  เพื่อให้ง่ายต่อการประมาณค่า Rayleigh Damping หรืออาจจะกล่าวได้ว่า ค่าของความหน่วงในชั้นดิน พิจารณาจากผลของค่า Stiffness ที่เกิดจากการเรียงตัวกันของชั้นดินเป็นหลัก (Li et al., 2019) โดยรูปที่ 19 จะแสดงหน้าตัดของชั้นดิน ที่ทำการ Model โดยในส่วนของ Element ที่ทำการกำหนดเป็น Boundary ในการกำหนดให้เป็นชั้นของ PML จะอยู่บริเวณโดยรอบขนานทุกด้านของชั้นดิน

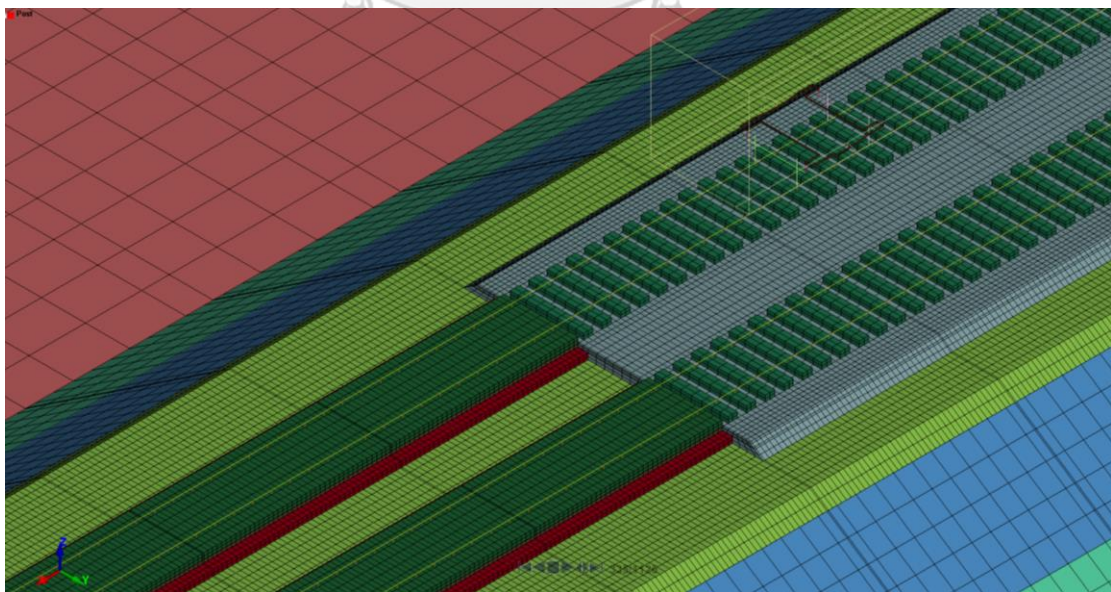


ภาพที่ 19 หน้าตัดของโมเดลชั้นดิน (Cross-Section of Ground Models)

#### ตารางที่ 7 Properties of the Soil for Validation (Wang et al., 2016)

Properties	Values	Unit :
<u>Soil</u>		
Depth of Surface Layer of the Subgrade	0.4	[m]
Density of Surface Layer of the Subgrade	2300	[kg.m <sup>3</sup> ]
Modulus of Elasticity of Surface Layer of the Subgrade	5.47 x 10 <sup>5</sup>	[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	1950	[kg.m <sup>3</sup> ]
Modulus of Elasticity of Bottom Layer of the Subgrade	$1.50 \times 10^8$	[Pa]
Poisson's Ratio of Bottom Layer of the Subgrade	0.35	[mm/mm]
Depth of the Subgrade	2.00	[m]
Density of Subgrade	2100	[kg.m <sup>3</sup> ]
Modulus of Elasticity of the Subgrade	$1.10 \times 10^8$	[Pa]
Poisson's Ratio of Subgrade	0.3	[mm/mm]
Depth of 1 <sup>st</sup> Layer of Ground	2.4	[m]
Density of 1 <sup>st</sup> Layer of Ground	1900	[kg.m <sup>3</sup> ]
Modulus of Elasticity of the 1 <sup>st</sup> Layer of Ground	$4.2 \times 10^7$	[Pa]
Poisson's Ratio of 1 <sup>st</sup> Layer of Ground	0.3	[mm/mm]
Depth of 2 <sup>nd</sup> Layer of Ground	13.1	[m]
Density of 2 <sup>nd</sup> Layer of Ground	2010	[kg.m <sup>3</sup> ]
Modulus of Elasticity of the 2 <sup>nd</sup> Layer of Ground	$8.3 \times 10^7$	[Pa]
Poisson's Ratio of 2 <sup>nd</sup> Layer of Ground	0.36	[mm/mm]



ภาพที่ 20 Transition Models in LS-DYNA

### 3.3 การแบ่งกรณีศึกษาการลดการสั่นสะเทือนโดยใช้ USPs และ USMs

ในกรณีศึกษาจะทำการวิเคราะห์ผลที่ได้ จากการติดตั้ง USPs โดยใช้ค่า Stiffness ของ USPs ที่ต่างกันในการแก้ปัญหาช่วงของ Transition Zone จากบริเวณทางรถไฟแบบ Ballasted Track ไปยังทางรถไฟแบบ Slab Track เพื่อติดตามหาผลของการลดการสั่นสะเทือนที่ได้ในรูปแบบของ ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ และค่าของการทรุดตัวที่ต่างกันในแต่ละรูปแบบ ซึ่งในการวิเคราะห์จะทำการจำลองโมเดลของ USPs และ USMs ให้เป็น Solid Element ที่มีค่าคุณสมบัติของวัสดุดังตารางที่ 3.5 Properties of the 3 Types of Under Sleeper Pads และ ตารางที่ 3.6 Properties of the 3 Types of Under Slab Mat, USMs

#### ตารางที่ 8 Properties of the 3 Types of Under Sleeper Pads, USPs

(Ngamkhanong et al., 2020)

Properties	Values	Unit :
<b><u>Under Sleeper Pads, USPs</u></b>		
Thickness of USPs	0.01	[m]
Width of USPs	0.30	[m]
Length of USPs	1.25	[m]
Density of USPs	700	[kg/m <sup>3</sup> ]
Poisson's Ratio of USPs	0.35	[mm/mm]
Bedding Modulus of the Medium Stiff USPs	0.15	[N/mm <sup>3</sup> ]
Bedding Modulus of the Stiff USPs	0.25	[N/mm <sup>3</sup> ]
Bedding Modulus of the Very Stiff USPs	0.35	[N/mm <sup>3</sup> ]

เพื่อให้ง่ายต่อการจัดชุดวิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลอง จะแบ่งกรณีศึกษาเป็นแต่ละกรณี ดัง ตารางที่ 3.7 โดยจะแบ่งกรณีที่น่าสนใจ เป็น 4 กรณีย่อย ได้แก่ 1. กรณีไม่ติดตั้ง USPs 2. กรณีติดตั้ง Soft USPs 3. กรณีติดตั้ง Medium USPs 4. กรณีติดตั้ง Stiff USPs ซึ่งในแต่ละกรณีย่อยจะมีการติดตั้ง USMs ทั้ง 3 ประเภท เพื่อลดค่า Stiffness ของทางฝั่ง Slab Track และจะทำการจำลองการวิ่งผ่านด้วยขบวนรถไฟในช่วงความเร็วทุก 50 [km/hr] โดยจะตรวจสอบว่าการใช้งาน USPs และ UBMs ในรูปแบบใดที่ช่วยลดผลตอบสนองที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจะนำไปใช้เป็นแนวทางในการศึกษา และการนำไปใช้งาน ต่อไป

## ตารางที่ 9 Properties of the 3 Types of Under Slab Mat, USMs

(Kaewunruen et al., 2018)

Properties	Values	Unit :
<b><u>Under Slab Mat, USMs</u></b>		
Thickness of USMs	0.03	[m]
Width of USMs	2.55	[m]
Length of USMs	6.45	[m]
Density of USMs	700	[kg/m <sup>3</sup> ]
Poisson's Ratio of USMs	0.35	[mm/mm]
Bedding Modulus of the Typical USMs	0.05	[N/mm <sup>3</sup> ]
Bedding Modulus of the Medium Stiff USMs	0.15	[N/mm <sup>3</sup> ]
Bedding Modulus of the Stiff USMs	0.25	[N/mm <sup>3</sup> ]

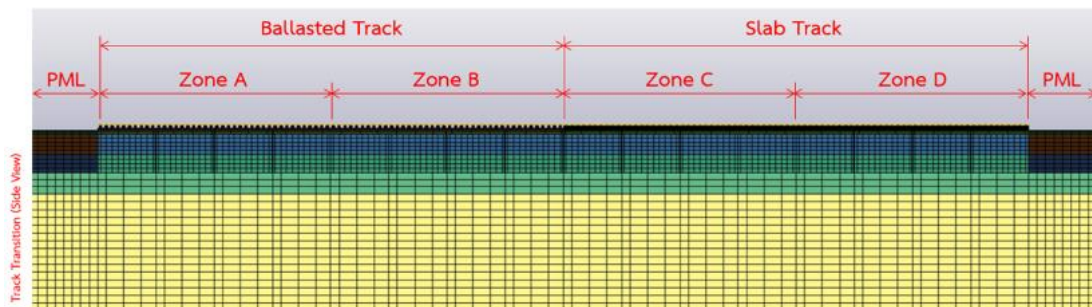
ในกรณีศึกษาของการสั่นสะเทือนที่ต้องการจะตรวจสอบโดยการโปรแกรม จะสนใจในการติดตั้ง USPs ไว้ที่ใต้โครงสร้างของ Sleeper ในฝั่งของ Ballasted Track ในบริเวณที่เป็น Zone B และจะทำการติดตั้ง USMs ไว้ในชั้นของ Isolation Layers (Zheng & Zhu, 2019) ในฝั่งของ Slab Track ใน Zone C ดังรูปที่ 3.10 เพื่อที่จะทำการปรับค่า Track Stiffness ให้มีความใกล้เคียงกันในช่วงของรอยต่อบริเวณ Track Transition โดยองค์ประกอบของทั้ง USPs และ USMs จะถูกใช้เป็นโครงสร้างหลักในการช่วยลดการส่งผ่าน Stress ในชั้นของ Ballast Layers และ Substructures

เมื่อทำการจำลองโครงสร้าง FEM Models ในส่วนของขบวนรถไฟ โครงสร้างทาง และชั้นดินด้วยโปรแกรม LS-DYNA และทำการใส่ค่าคุณสมบัติวัสดุ เพื่อให้มีความสอดคล้องตามแต่ละองค์ประกอบของโครงสร้างเรียบร้อยแล้ว ดังภาพที่ 19 จะทำการวิเคราะห์ผลของการเคลื่อนที่ผ่านของรถไฟ ในช่วงของความเร็วที่ไม่เกิน 250 [km/hr] โดยจะทำการศึกษาทุกช่วงความต่างของความเร็ว 50 [km/hr] หลังจากนั้นจะนำข้อมูลการวิเคราะห์จากโปรแกรม หรือผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่ได้ ในรูปแบบของผลตอบสนองที่ต่างกัน เปรียบเทียบผลในรูปแบบของกราฟ ซึ่งผลตอบสนองที่สนใจในการวิจัย ได้แก่

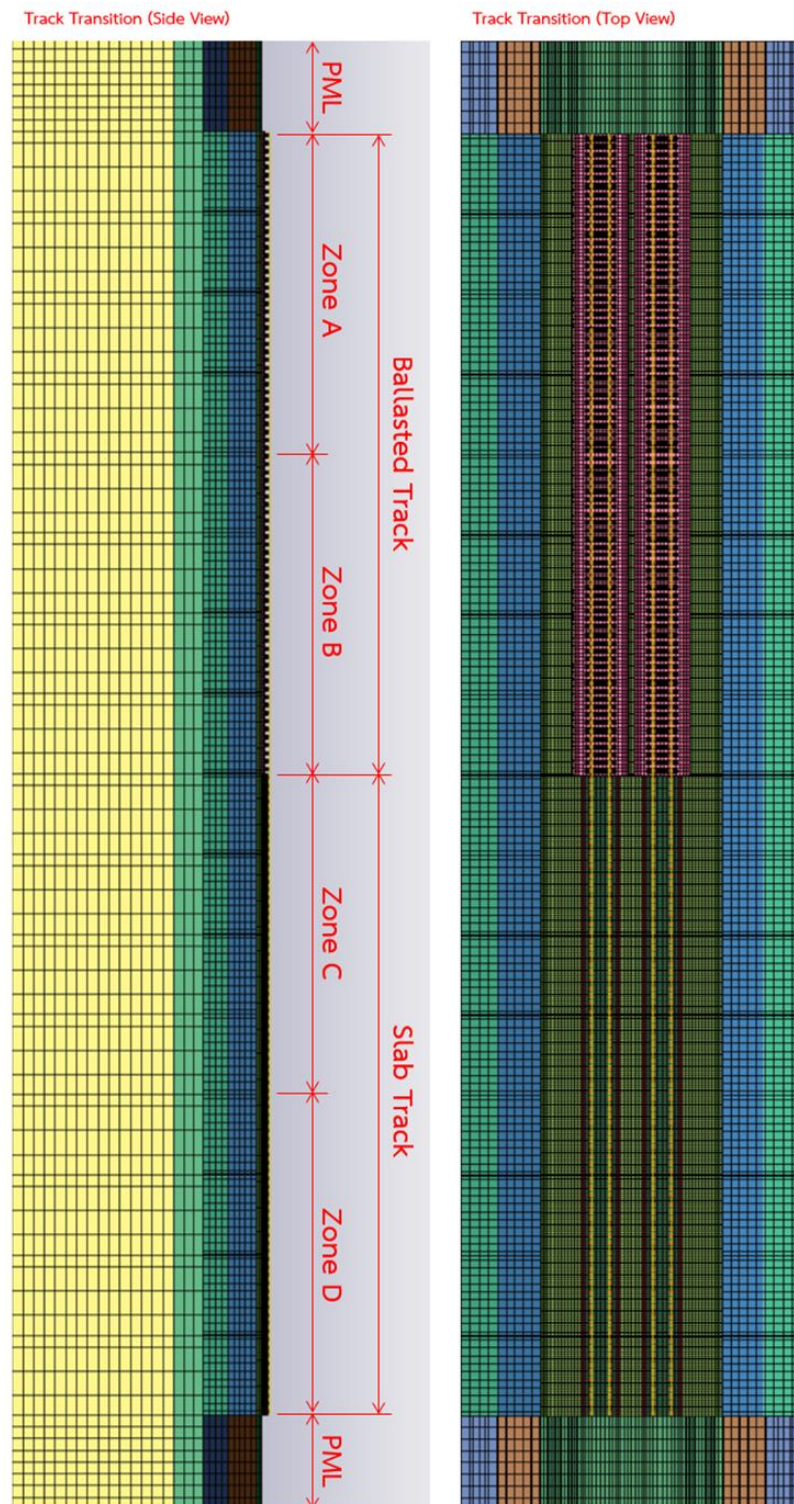
1. Track Stiffness along Location of Track Transition Zone
2. Vertical Displacement of Rail
3. Vertical Stress due on Ballast Layer
4. Vertical Stress on Slab Base Layer
5. Acceleration of Ground at Critical Location

ตารางที่ 10 Study Case for the Analysis in LS-DYNA

Study Case	Transition Zone				
Zone	Zone A	Zone B	Zone C	Zone D	Velocity
Track System	Ballasted Track	Ballasted Track	Slab Track	Slab Track	Considered [km/hr]
	Location along the Track Transition				ภาพที่ 20



Characteristics	N/A	USPs	USMs	N/A	
Case 0 : Controlled Case		w/o USPs	w/o USPs		50, 100, 150, 200, 250
Case 1 :		Medium Stiff	Typical Medium Stiff Stiff		50, 100, 150, 200, 250
Case 2 :		Stiff	Typical Medium Stiff Stiff		50, 100, 150, 200, 250
Case 3 :		Very Stiff	Typical Medium Stiff Stiff		50, 100, 150, 200, 250



ภาพที่ 21 Transition Models with Under Sleeper Pads in LS-DYNA.

## บทที่ 4

### ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม LS-DYNA

ในบทนี้ ช่วงแรกจะนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของโมเดลที่ได้ทำการปรับปรุงเพื่อให้สอดคล้องกับปัญหาที่สนใจ โดยจะทำการเปรียบเทียบกับผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่มีอยู่ก่อนแล้วในงานวิจัยอดีต รายละเอียดการเปรียบเทียบค่าผลตอบสนองจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.1 และการเปรียบเทียบผลลัพธ์ ในแต่ละค่าความเร็วการเคลื่อนที่ รายละเอียดจะแสดงในหัวข้อที่ 4.2

#### 4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Validation)

ขั้นตอนก่อนนำเอาผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ จะต้องตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพของชั้นดิน ให้มีคุณสมบัติวัสดุที่สอดคล้องกับดินกรุงเทพฯ และการลดจำนวน Element ของชั้นดิน จากความหนาของดินเดิม 15 [m] ให้เป็น 5 [m] โดยจะทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากค่าแรงกระทำที่บริเวณล้อ-ราง (Wheel-Rail Contact Force) รวมไปถึงค่าของการกระจัดของราง (Rail Displacement) ที่เกิดขึ้นในการจำลองกับผลที่ได้จากการทดสอบที่ได้มีอยู่ก่อนแล้วจาก Cai et al. (2017) ซึ่งตารางที่ 11 เสนอผลของการเปรียบเทียบในฝั่งของ Ballasted Track และตารางที่ 12 เสนอผลของฝั่ง Slab Track ตามลำดับ

**ตารางที่ 11** การตรวจสอบความถูกต้องของ Train-Track Interaction ของฝั่ง Ballasted Track (Wang et al., 2016)

ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์	ผลการวิเคราะห์จาก Cai et al. (2017)	ผลจากการศึกษาที่ได้	หน่วย
แรงที่กระทำบริเวณระหว่าง ล้อ-ราง	100	115	[kN]
การกระจัดของราง (ที่ใต้แนวราง)	2.606	2.292	[mm]
การกระจัดของราง (ที่กึ่งกลางทาง)	2.604	2.396	[mm]

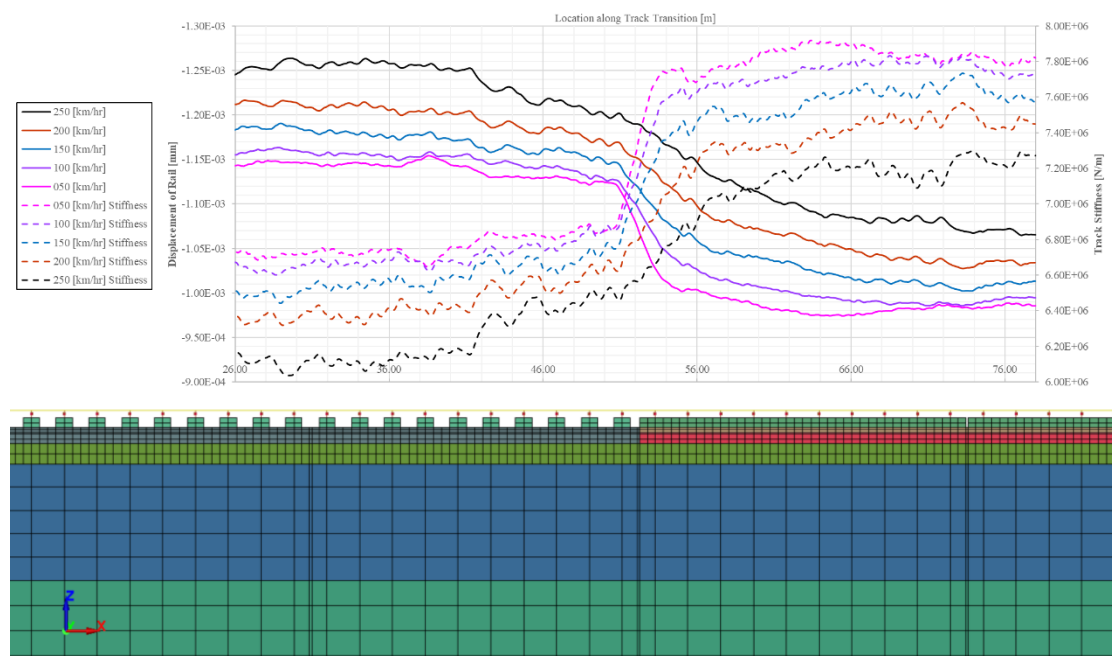
ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบพบว่ามีความใกล้เคียงกัน โดยค่าจากการศึกษาที่ได้จะมีค่าสูงกว่า อันเนื่องมาจากคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการจำลองเป็นดินที่มีความอ่อนตัวสูง (Soft Clay) แต่ยังคงอยู่ในช่วงที่มีค่าใกล้เคียงกัน โมเดลที่ถูกปรับปรุงขึ้นมาใหม่ จึงถือได้ว่า ยังคงมีความน่าเชื่อถือ เหมาะสมกับการนำมาใช้ในการวิเคราะห์ และสามารถนำไปใช้พัฒนาต่อได้

ตารางที่ 12 การตรวจสอบความถูกต้องของ Train-Track Interaction ของฝั่ง Slab Track.

ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์	ผลการวิเคราะห์จาก Cai et al. (2017)	ผลจากการศึกษาที่ได้	หน่วย
แรงที่กระทำบริเวณระหว่าง ล้อ-ราง	98.7	93.36	[kN]
แรงที่กระทำบนแผ่นรองราง	37.648	35.53	[kN]
การกระจัดของราง	0.827	1.198	[mm]

#### 4.2 ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Responses)

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม LS-DYNA ที่อยู่ในรูปของผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ ตามระยะทาง (Distance domain) และ เวลา (Time domain) โดยจะแบ่งเป็นหัวข้อย่อย ตามผลตอบสนองที่สนใจ ในแต่ละชั้นของโครงสร้าง เพื่อติดตามหาปฏิสัมพันธ์ระหว่าง รถไฟ-ทาง-ชั้นดิน (Train-Track-Soil Interaction) โดยแบ่งเป็นหัวข้อย่อย ได้แก่ 1. การกระจัดของราง (Displacement of Rail) 2. ความดันของโครงสร้างทาง ในบริเวณรอยต่อ (Stress of Track Transition) และ 3. ความเร่งของพื้นผิวดินโดยรอบ (Ground Accelerations)

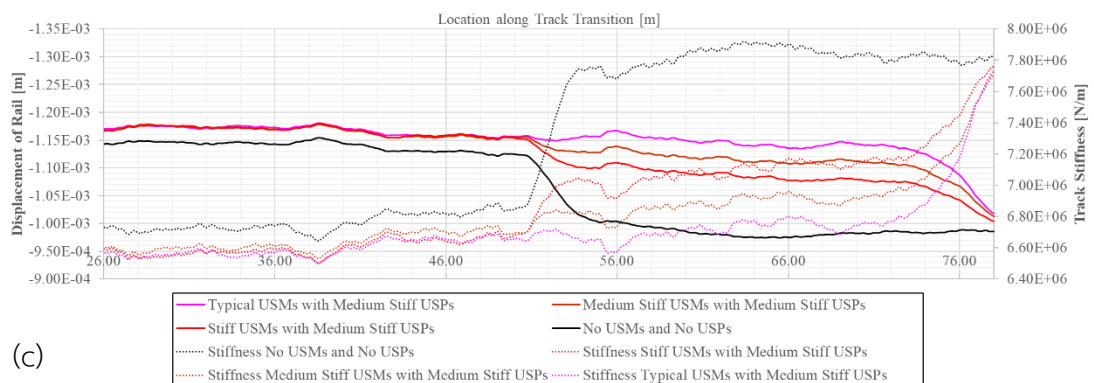
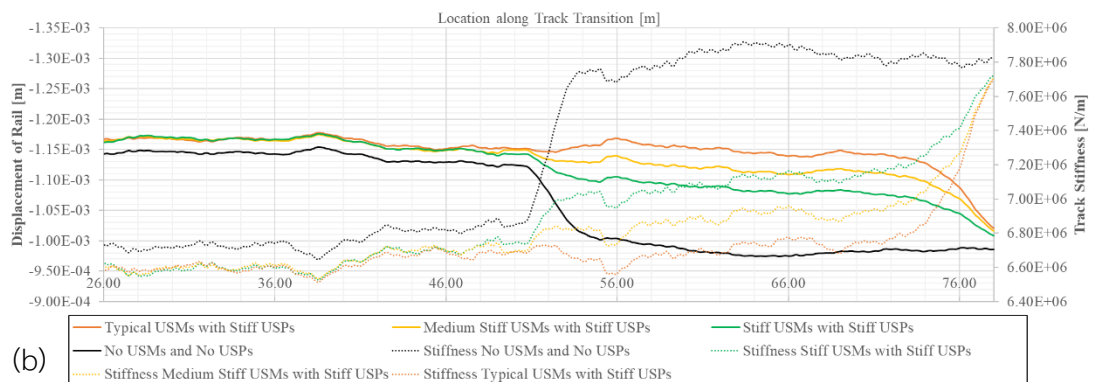
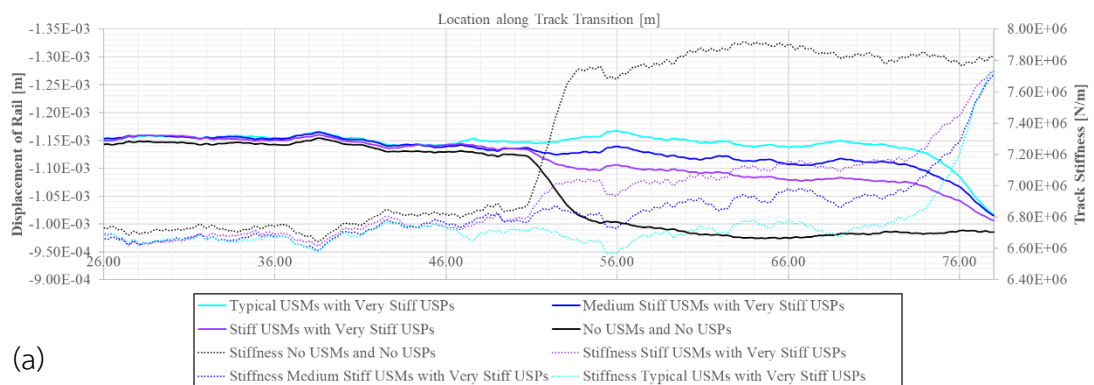


ภาพที่ 22 การกระจัดที่แตกต่างกัน ตลอดแนวรอยต่อโครงสร้างทาง  
เปรียบเทียบกับค่า Track Stiffness ในกรณีที่ไม่มีการติดตั้งแผ่นวัสดุยึดหยุ่น

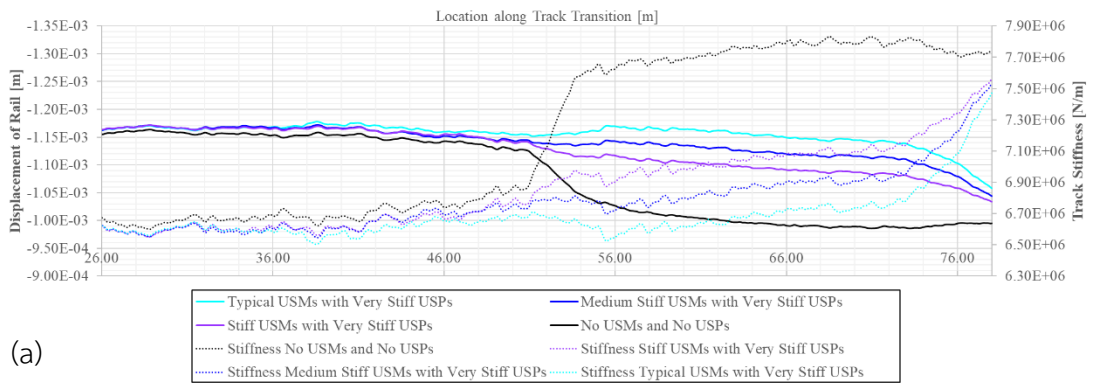


#### 4.2.1 การกระจัดของราง (Rail Displacement)

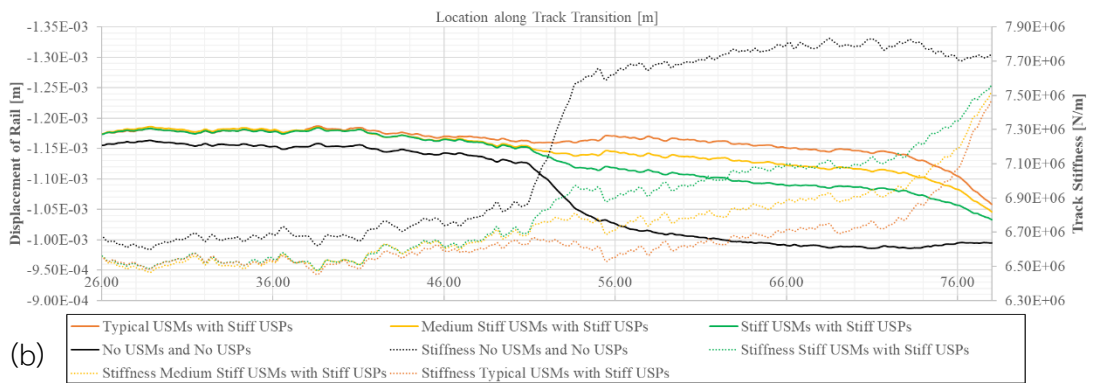
ในกรณีที่ไม่ได้ทำการติดตั้งแผ่น USPs และ USMs จะจัดให้เป็น กรณีควบคุม (Controlled Case) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับในกรณีที่มีการติดตั้งแผ่นวัสดุยืดหยุ่น แบบผสมในกรณีต่างกัน ซึ่ง ภาพที่ 23-27 จะแสดงถึงผลต่างของค่าการกระจัดของราง ตลอดแนวรอยต่อโครงสร้างทาง เทียบกับ ค่า Track stiffness ในกรณีที่ขบวนรถเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วที่ต่างกัน ตั้งแต่ 50 – 250 [km/hr]



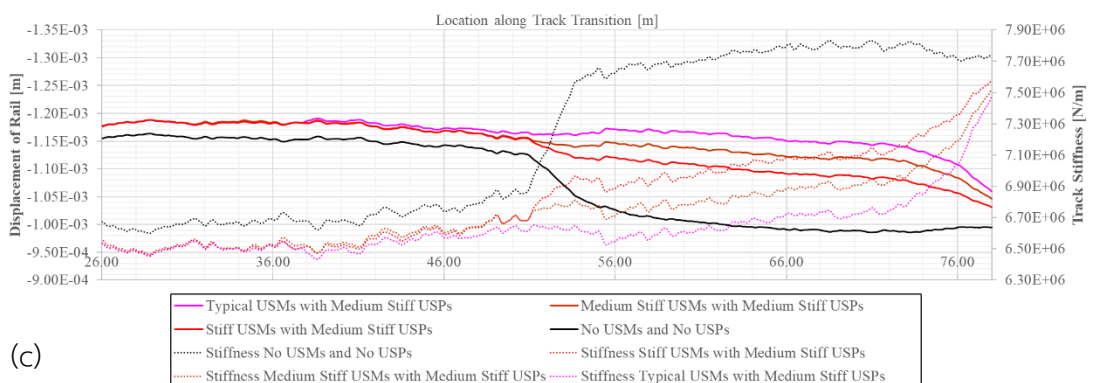
ภาพที่ 23 การกระจัดของรางเปรียบเทียบกับค่า Track Stiffness ตลอดแนว Transition 50 [km/hr] (a) Very Stiff USPs, (b) Stiff USPs, และ (c) Medium Stiff USPs



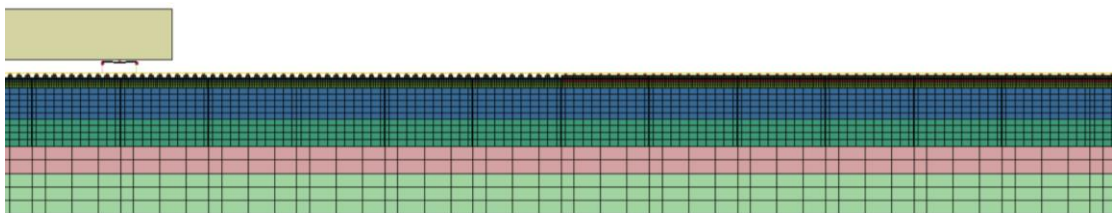
(a)



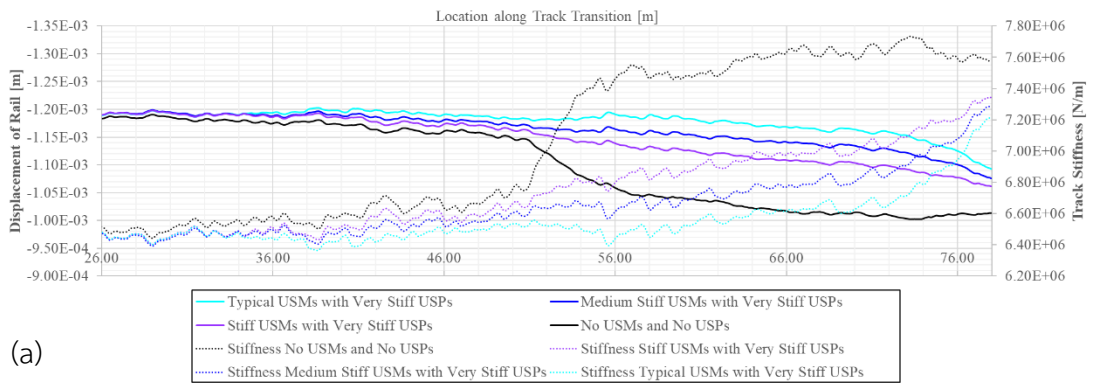
(b)



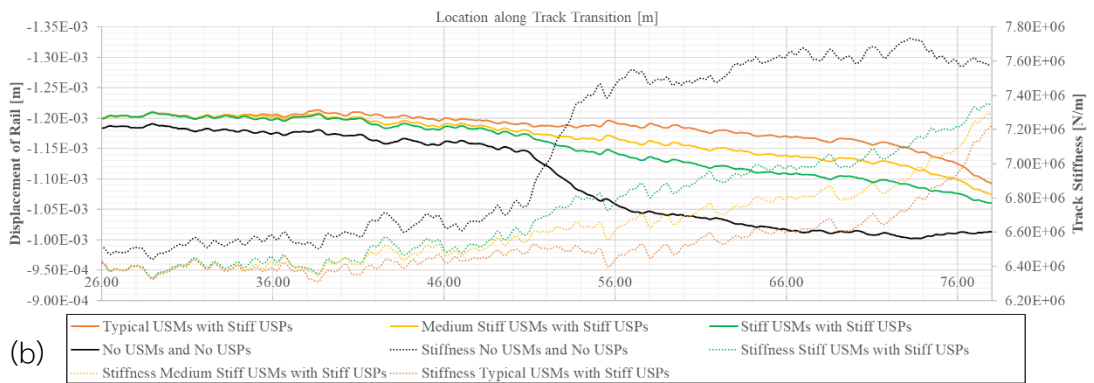
(c)



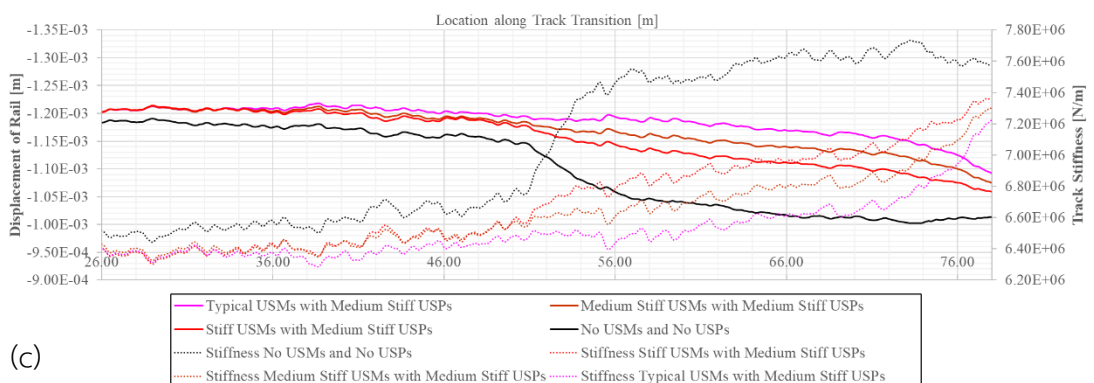
ภาพที่ 24 การกระจัดของรางเปรียบเทียบกับค่า Track Stiffness ตลอดแนว Transition 100 [km/hr] (a) Very Stiff USPs, (b) Stiff USPs, และ (c) Medium Stiff USPs



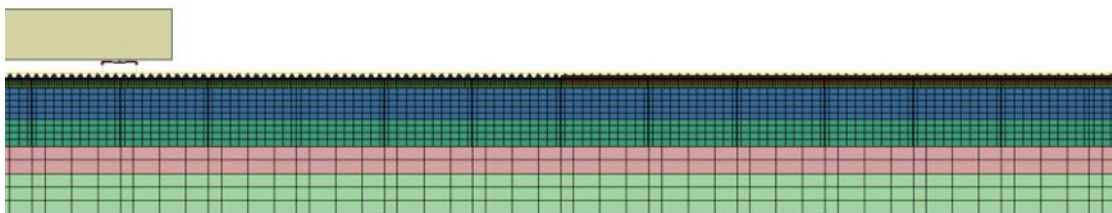
(a)



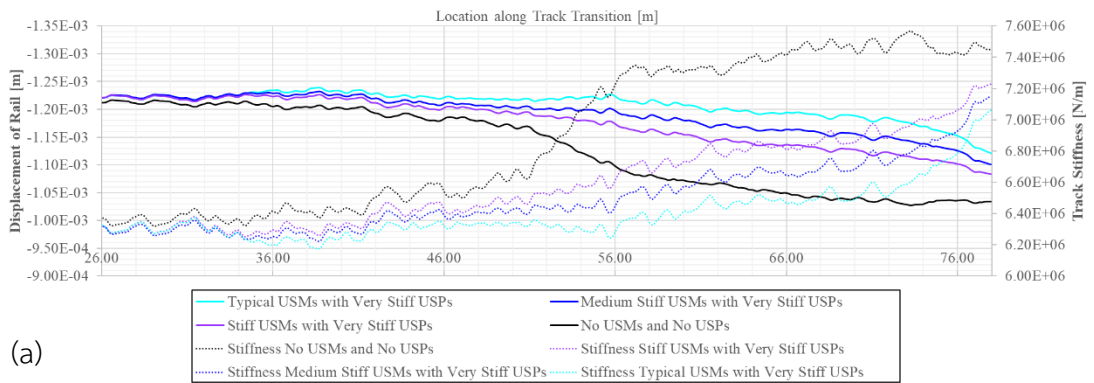
(b)



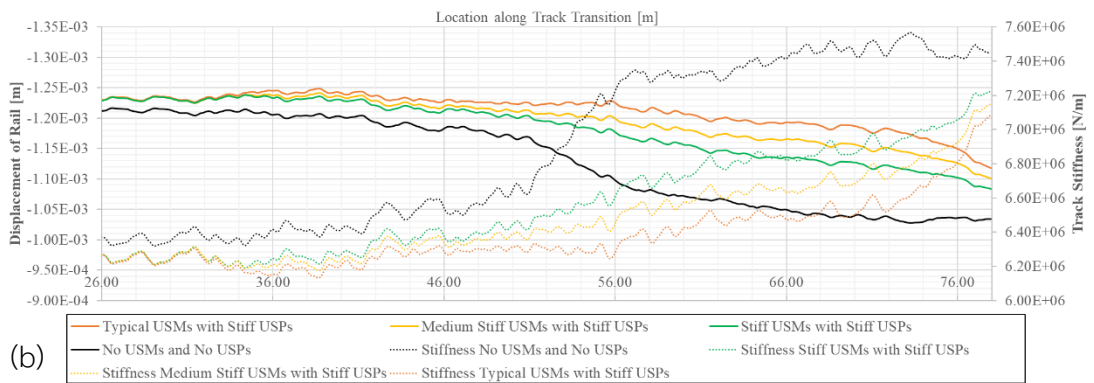
(c)



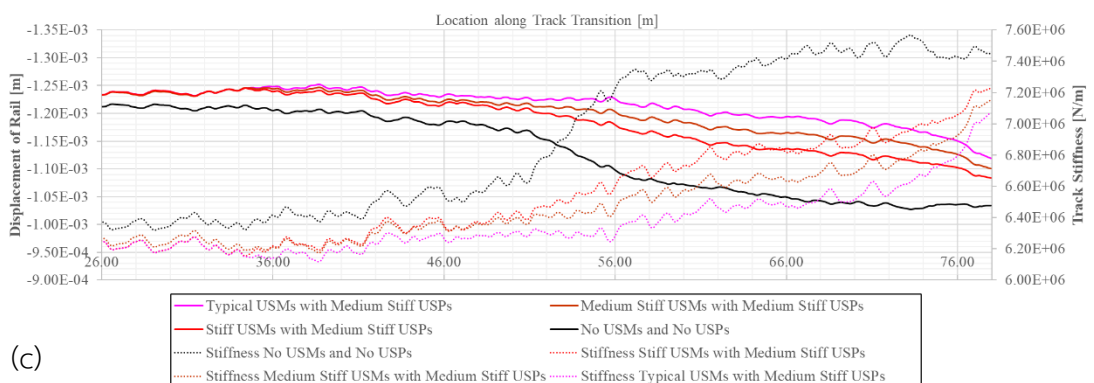
ภาพที่ 25 การกระจัดของรางเปรียบเทียบกับค่า Track Stiffness ตลอดแนว Transition 150 [km/hr] (a) Very Stiff USPs, (b) Stiff USPs, และ (c) Medium Stiff USPs



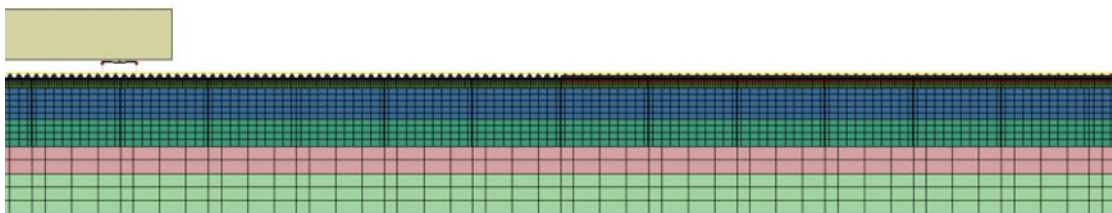
(a)



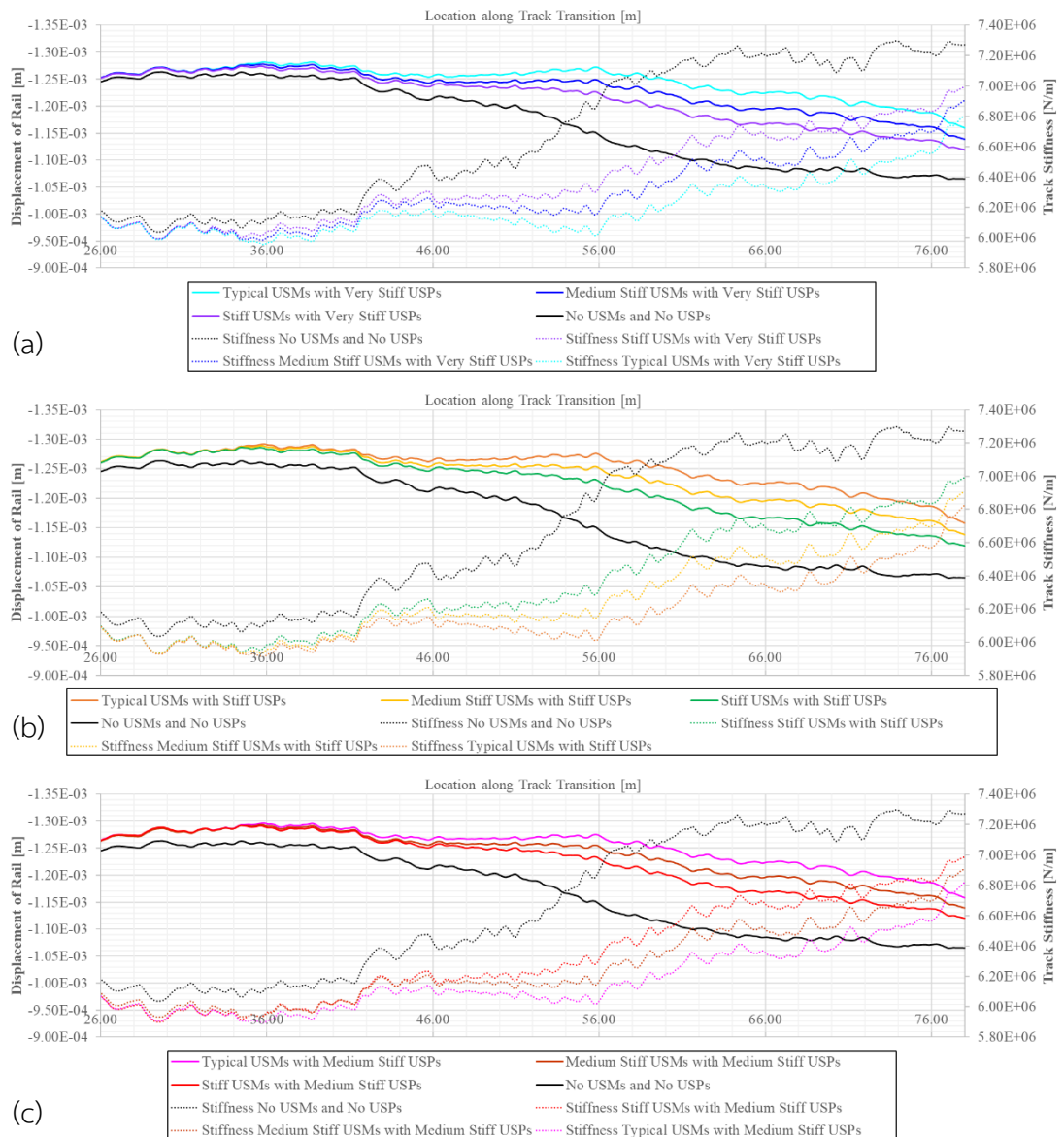
(b)



(c)



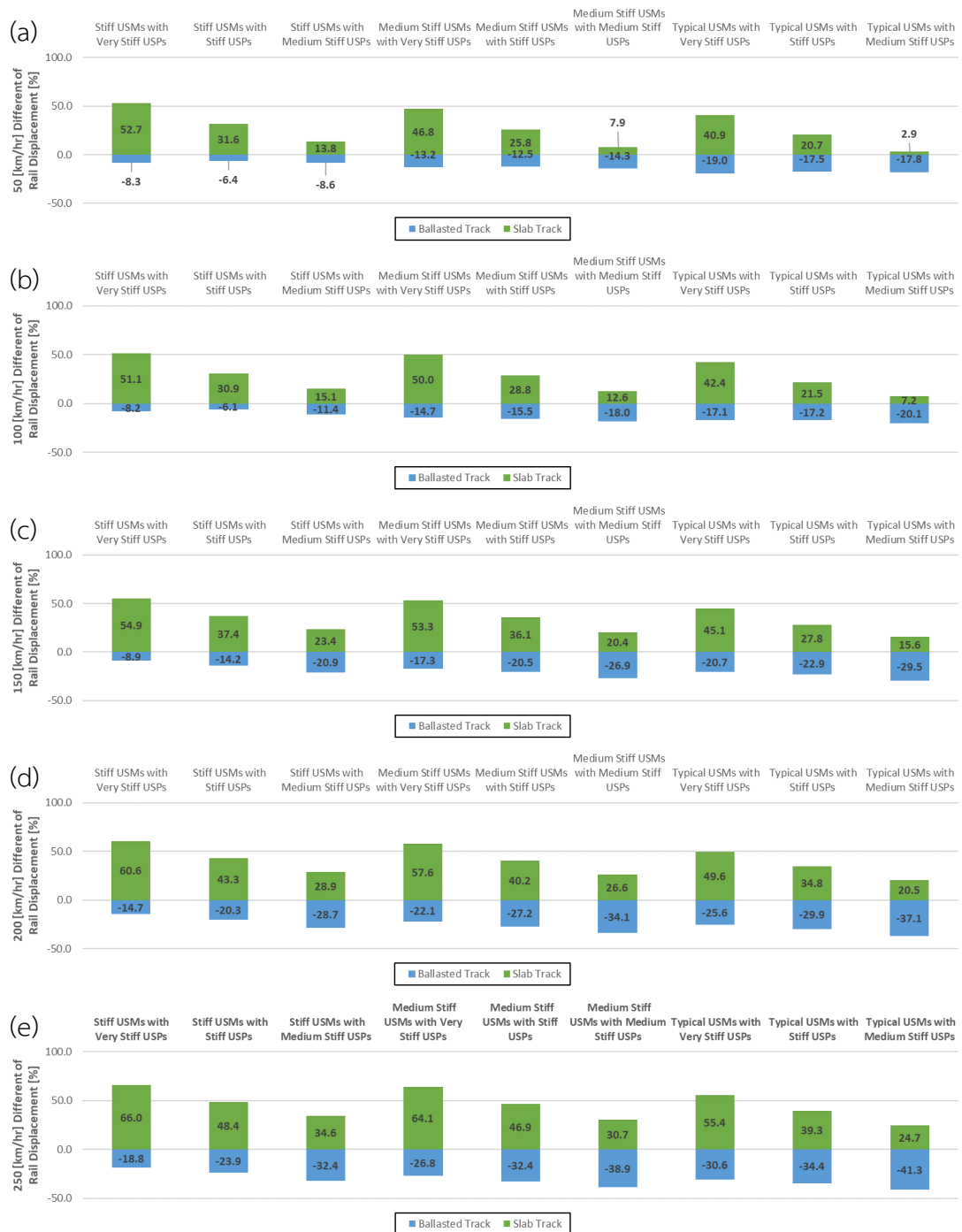
ภาพที่ 26 การกระจัดของรางเปรียบเทียบกับค่า Track Stiffness ตลอดแนว Transition 200 [km/hr] (a) Very Stiff USPs, (b) Stiff USPs, และ (c) Medium Stiff USPs



ภาพที่ 27 การกระจัดของรางเปรียบเทียบกับค่า Track Stiffness ตลอดแนว Transition 250 [km/hr] (a) Very Stiff USPs, (b) Stiff USPs, และ (c) Medium Stiff USPs

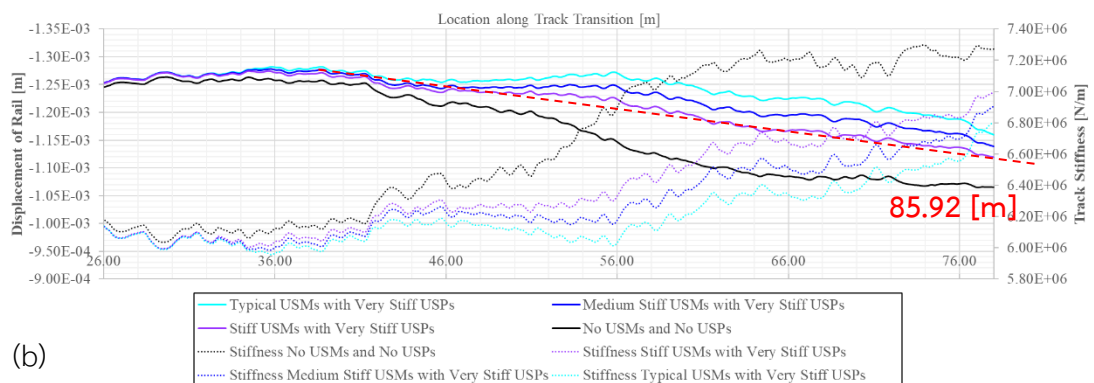
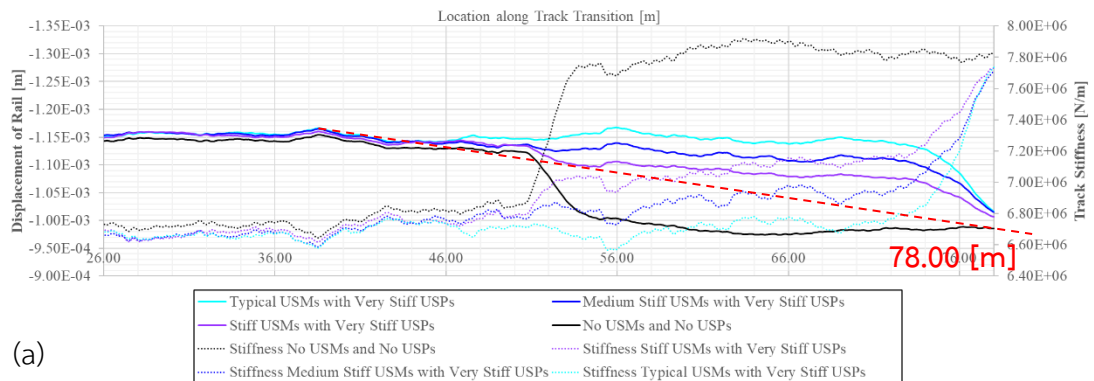
เมื่อนำเอาผลลัพธ์จากการจำลองที่ได้ ในกรณีการใช้งานแผ่นวัสดุยึดหยุ่นที่แตกต่างกัน มาทำการเปรียบเทียบเป็นร้อยละของ การช่วยปรับค่าการกระจัดของราง เทียบกับค่าความต่างของการกระจัดของราง ในกรณีควบคุม หรือไม่ได้มีการติดตั้งแผ่นวัสดุช่วยลดการสั่นสะเทือน โดยจะนำเอาค่าของการกระจัดของราง ที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วงที่มีการติดตั้ง USPs และ USMs ที่บริเวณรอยต่อได้แก่ ตำแหน่งที่ระยะ 46 [m] และ 66 [m] มาเป็นตำแหน่งอ้างอิงในการเปรียบเทียบผล โดยกรณีที่เป็นค่าลบจะแสดงถึงการที่ค่า Track Stiffness มีค่าลดลง หรือ Rail Displacement มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะพบ

ในฝั่งของการใช้ USPs ที่ไม่เกิดการปรับของ Track Stiffness อย่างเหมาะสม โดยผลร้อยละที่ได้จะแสดงเปรียบเทียบในกราฟแท่ง ดังภาพที่ 28 ตามแต่ละค่าความเร็วที่ต่างกัน ดังนี้



ภาพที่ 28 ร้อยละผลต่างการกระจัดบริเวณรอยต่อ ที่มีการติดตั้ง USPs และ USMs

(a) 50 [km/hr], (b) 100 [km/hr], (c) 150 [km/hr], (d) 200 [km/hr], และ (e) 250 [km/hr]



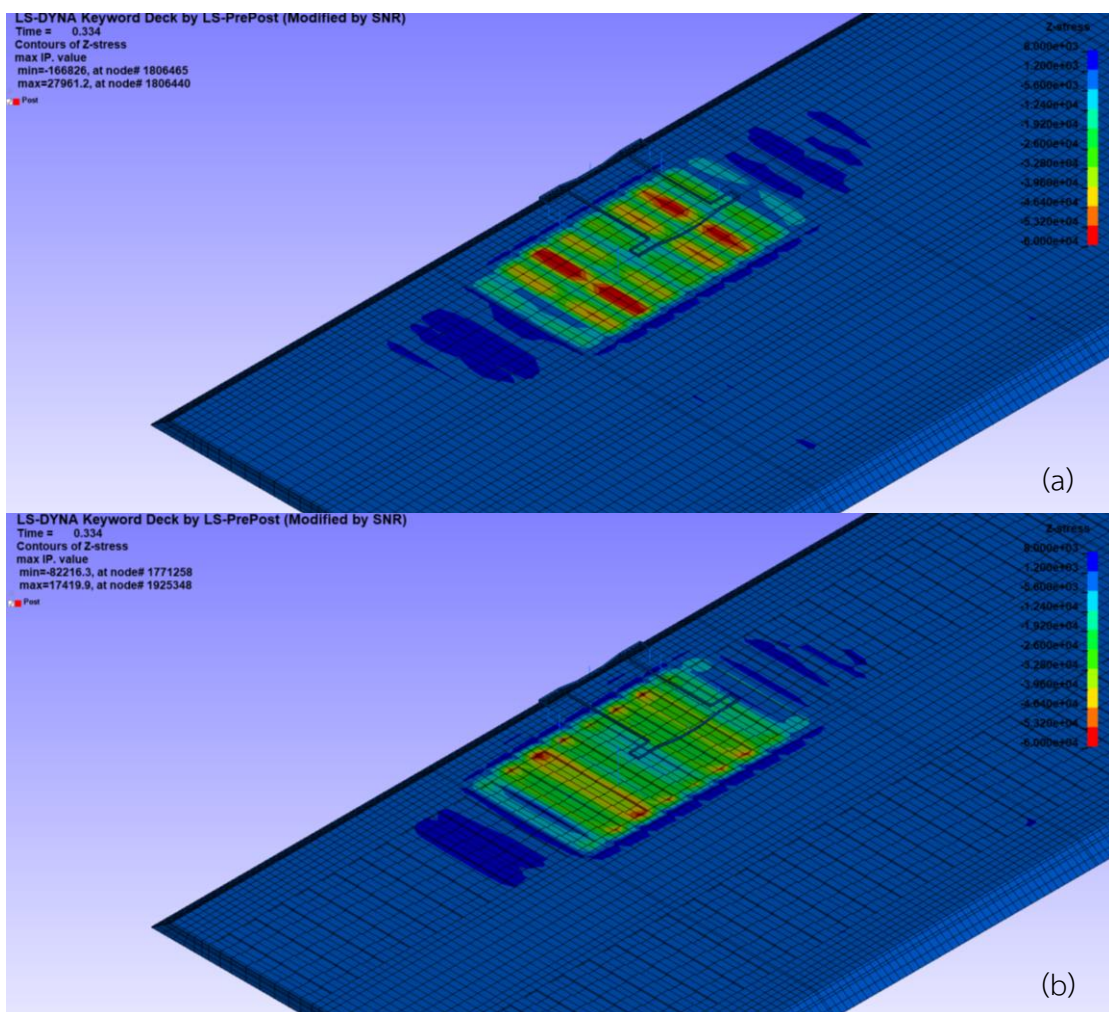
ภาพที่ 29 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในการหาจำนวนช่วงในการติดตั้ง USPs และ USMs  
กรณี Stiff USMs (a) 50 [km/hr] (b) 250 [km/hr]

ในฝั่งของโครงสร้างทางแบบ Slab Track พบว่า มีความแตกต่างของการกระจัดของราง จากการใช้งาน USMs อย่างเห็นได้ชัด โดยที่ USMs ที่มีค่า Stiffness ที่มากกว่าจะช่วยเพิ่ม ค่า Track Stiffness ได้มากกว่า และจะเห็นตามแนวโน้มการกระจัดจากกราฟ ได้ว่า USMs ที่มีค่า Stiffness ที่สูงกว่าจะช่วยให้ระยะทางที่ใช้ หรือจำนวนช่วงของการติดตั้ง เพื่อทำการปรับค่า Track Stiffness จะมีการติดตั้งที่ใช้ระยะที่น้อยกว่ากรณีที่ใช้งาน Medium Stiff USMs หรือ Typical USMs

ทางด้านฝั่งของ Ballasted Track การติดตั้ง USPs เพิ่มในกรณีที่แตกต่างกัน ส่งผลทำให้ค่าการกระจัดของรางเพิ่มมากขึ้น ในทุกกรณี แต่อยู่ในช่วงที่ไม่ได้มีค่าความแตกต่างของการกระจัดที่แตกต่างกันมากจนเกินไป โดยจะอยู่ช่วง 20 [%] ในความเร็วไม่เกิน 100 [km/hr] ส่วนความเร็วที่สูงกว่าจะอยู่ในช่วง 20 - 40 [%] ซึ่งถึงแม้ว่าการใช้ USPs ที่มีค่า Stiffness ตามที่ทำการจำลอง ไม่ได้ช่วยทำให้ค่า Track Stiffness ในฝั่งที่เป็น Ballasted Track เพิ่มมากขึ้น แต่ก็สามารถช่วยลดการสั่นสะเทือน และกระจายแรงที่เกิดขึ้นจาก Sleeper ลงไปสู่ชั้นของ Ballast ได้ดี ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

#### 4.2.2 ความเค้นของโครงสร้างทาง (Track Stress)

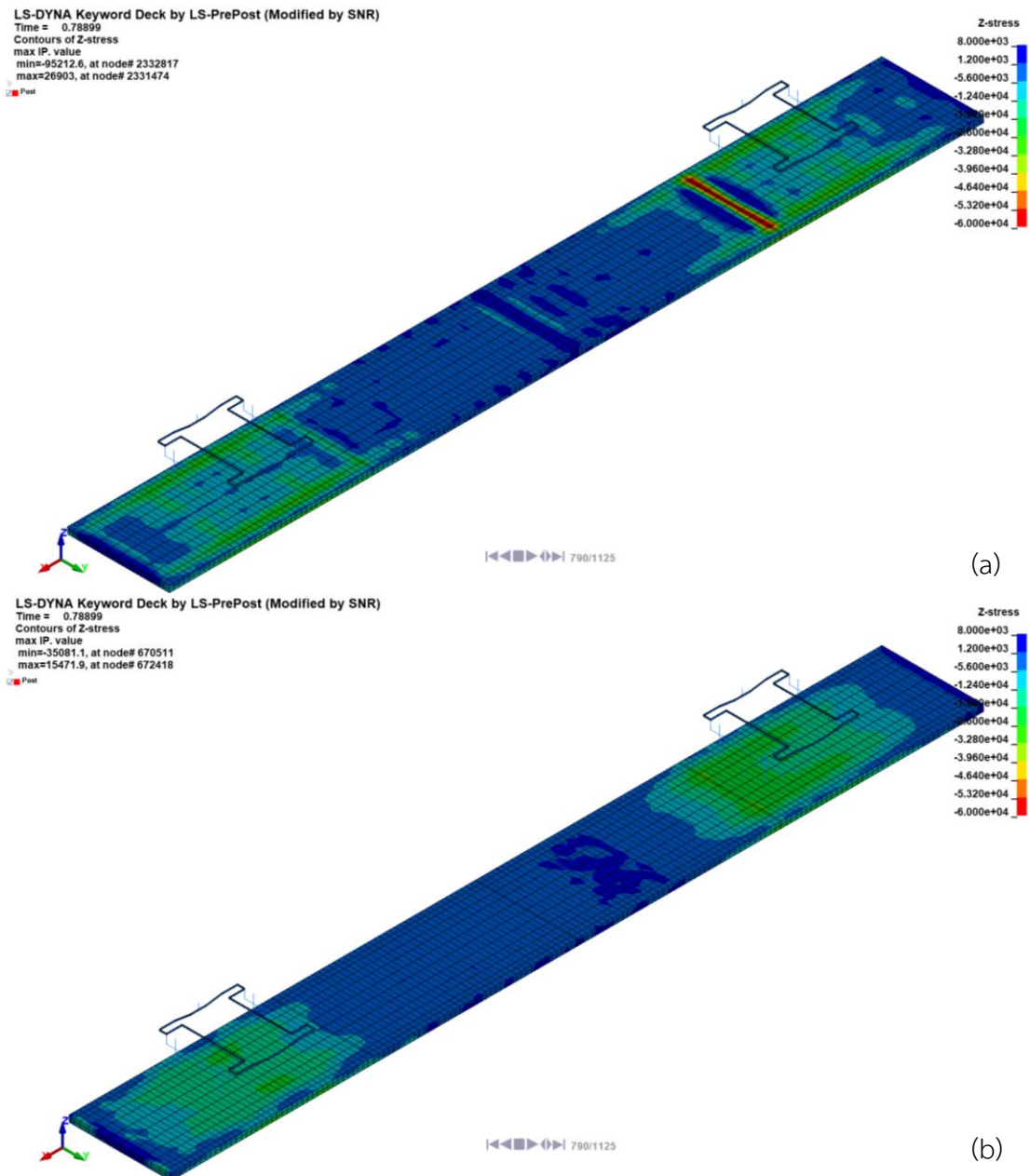
ในส่วนนี้จะพิจารณาถึงผลตอบสนองของโครงสร้างทางในส่วนของราง ทั้ง 2 ประเภท ได้แก่ USPs ที่ใช้กับ Sleeper ในโครงสร้างทางฝั่ง Ballasted Track และ USMs ที่ใช้ในชั้น Isolation Layers ของฝั่งโครงสร้างทางแบบ Slab Track (CRTS Type III) โดยในภาพที่ 30 และ 31 จะแสดงผลลัพธ์ของ Z Stress จากโครงสร้าง Ballast และ Slab Base ที่ได้จากการจำลองตามลำดับ ในบริเวณที่มีน้ำหนักของล้อกระทำ (Wheel Loaded) แสดงให้เห็นถึงการลดลงของค่าความเค้นในแนวตั้งที่ลดลง เปรียบเทียบกันในกรณีที่มีการติดตั้งแผ่นวัสดุยืดหยุ่น และกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง



ภาพที่ 30 การกระจายตัวค่าความเค้นในแนวตั้งของชั้น Ballast ที่บริเวณตำแหน่งที่มีน้ำหนักล้อกระทำในกรณีความเร็ว 250 [km/hr]  
(a) กรณีไม่มีการติดตั้ง USPs (b) กรณี Typical USPs และ Medium Stiff USMs



ความเค้นที่กระจายตัวในแนวตั้ง (Vertical Stress) ที่เกิดขึ้นบนชั้นหินโรยทาง (Ballast Layer) ในโครงสร้างทางฝั่ง Ballasted Track เมื่อทำการปรับค่า Contour Scaling พบว่า กรณีที่มีการติดตั้งแผ่น USPs จะทำให้ค่าความเค้นในแนวตั้งที่สูงในตำแหน่งบริเวณใต้ Rail Seat มีค่าลดลง และมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอรอบพื้นที่ใต้หมอนรองราง

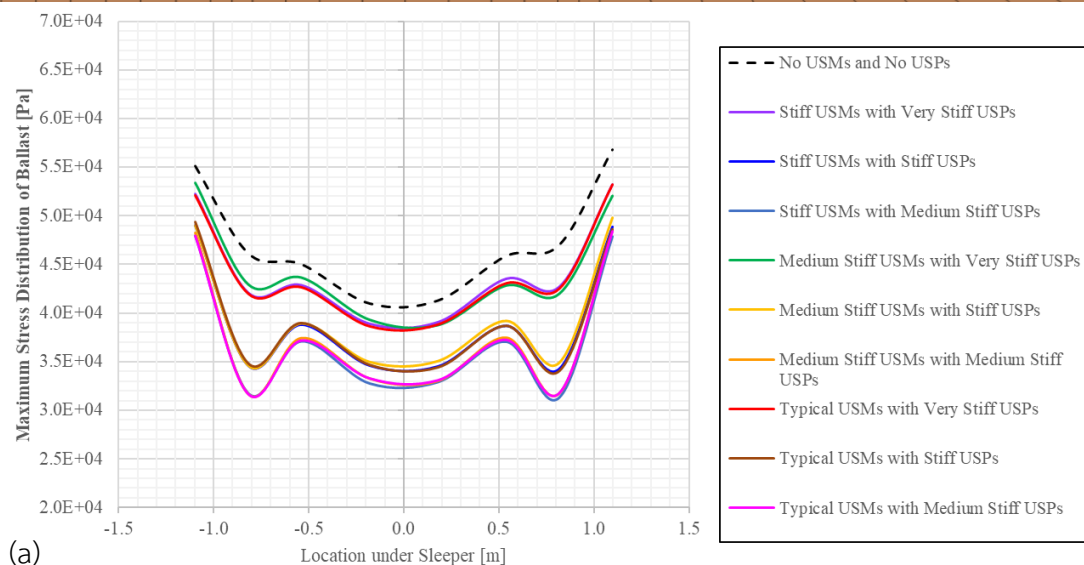
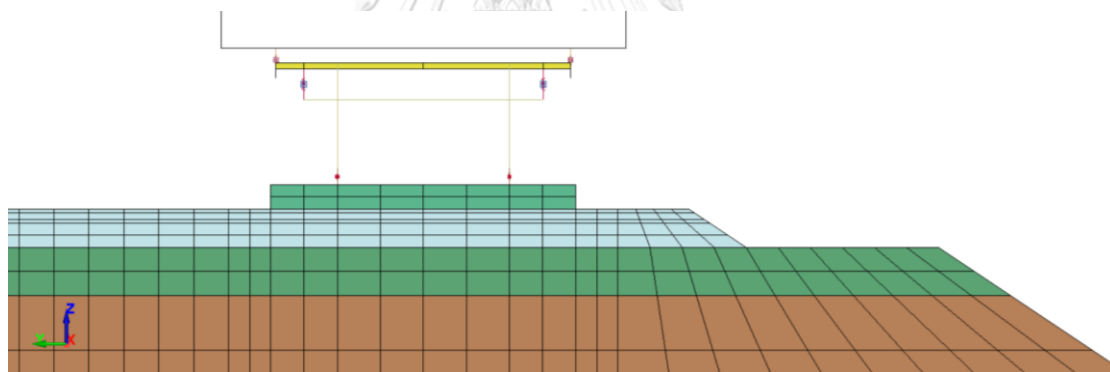


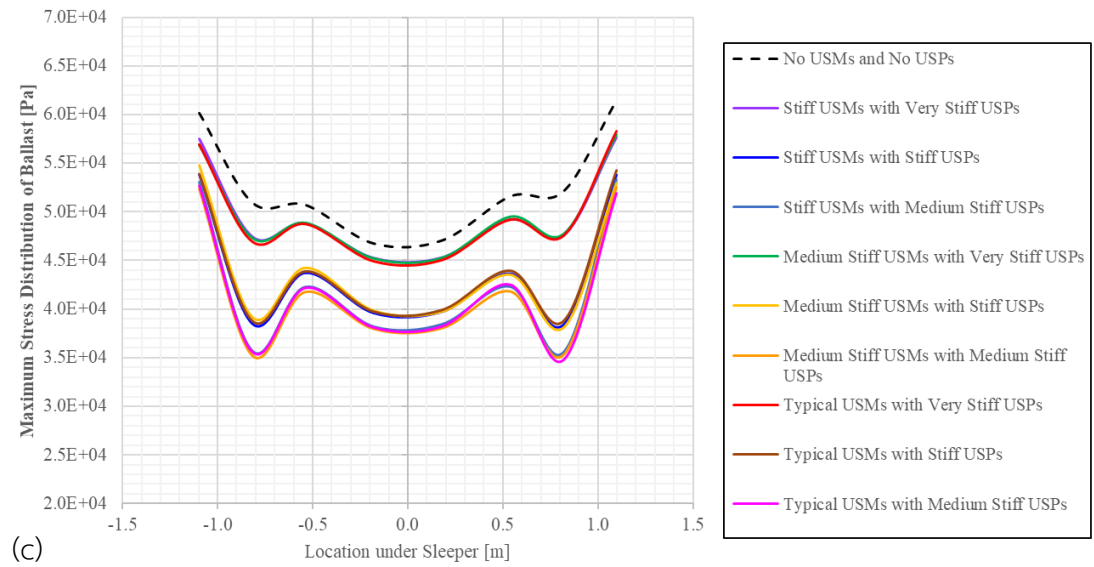
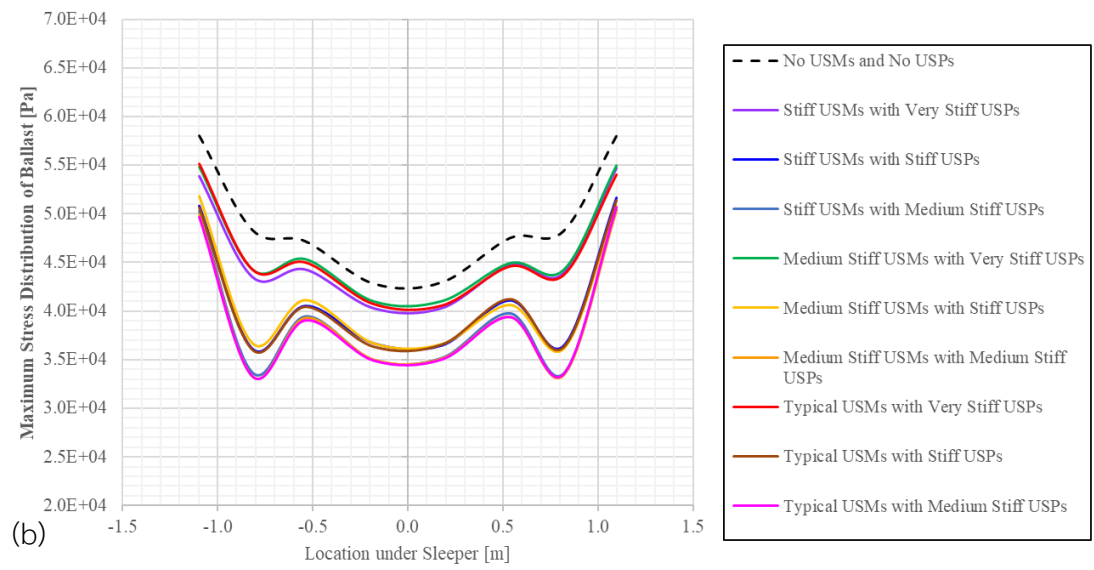
ภาพที่ 31 การกระจายตัวค่าความเค้นในแนวตั้งของชั้น Concrete Base กรณีความเร็ว 250 [km/hr] (a) กรณีไม่มีการติดตั้ง USMs (b) กรณี Typical USMs และ Medium Stiff USPs

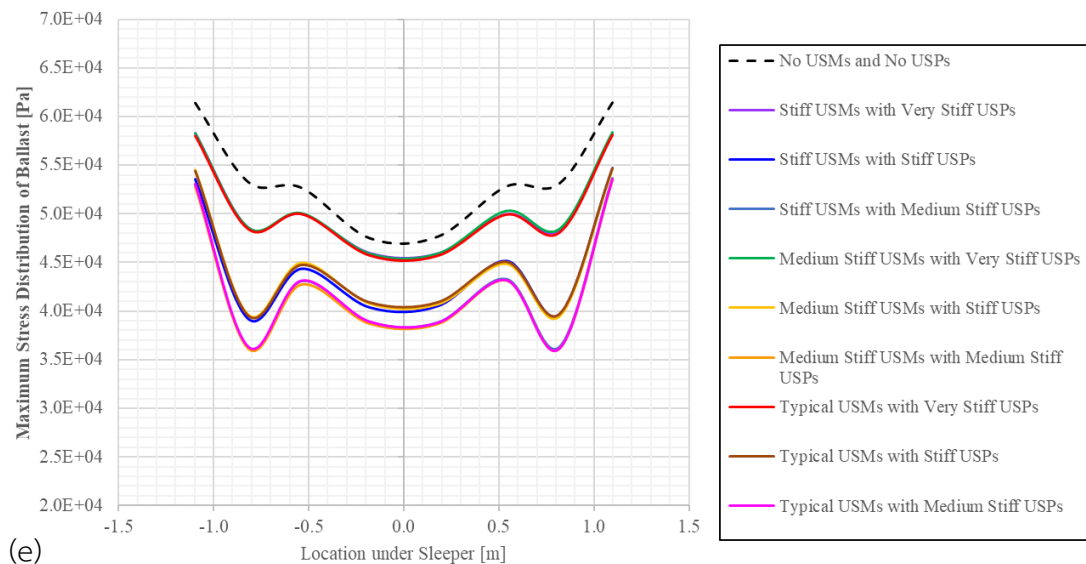
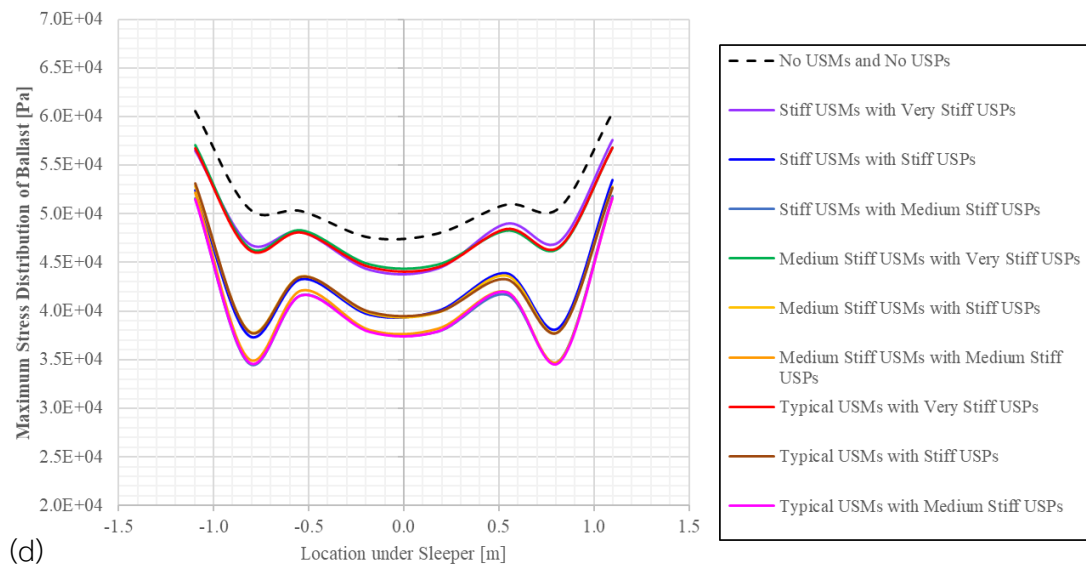
ผลของการกระจายตัวของค่าความเค้นในแนวตั้งที่เกิดขึ้นบนแผ่นพื้นคอนกรีต (Concrete Base) ในโครงสร้างทางฝั่ง Slab Track CRTS Type III เมื่อทำการปรับค่า Contour Scaling พบว่า กรณีที่มีการติดตั้งแผ่น USMs จะช่วยทำให้น้ำหนักของขบวนรถไฟที่กระทำมีการกระจายตัวลงสู่ชั้นโครงสร้างทางได้อย่างสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยให้โครงสร้างทางไม่เกิดการรับน้ำหนักบริเวณเฉพาะจุดที่มากเกินไป และจะช่วยเพิ่มในเรื่องของระยะเวลาในการใช้งานโครงสร้างในระยะยาว

#### 4.2.2.1 ความเค้นของชั้นหินโรยทาง (Stress of Ballast)

ในส่วนแรกผลตอบสนองของชั้น Ballast ในฝั่งของโครงสร้างทางแบบ Ballasted Track จะทำการพิจารณาค่าความเค้นของชั้นหินโรยทาง (Stress on Ballast) ในกรณีที่ได้ทำการติดตั้งโครงสร้างแผ่นยางที่หมอนรองราง USPs ที่ได้ช่วยลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นบนชั้นหินโรยทาง จะเปรียบเทียบอยู่ในรูปภาพตามตำแหน่งของ Element ที่บน Sleeper เพื่อแสดงให้เห็นถึงค่าสูงสุดในการกระจายตัวของค่าความเค้น ที่ตลอดตำแหน่งที่มีการติดตั้ง USPs โดยแบ่งเป็นกรณีของการเคลื่อนที่ผ่านของขบวนรถไฟที่ใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ ที่ต่างกัน



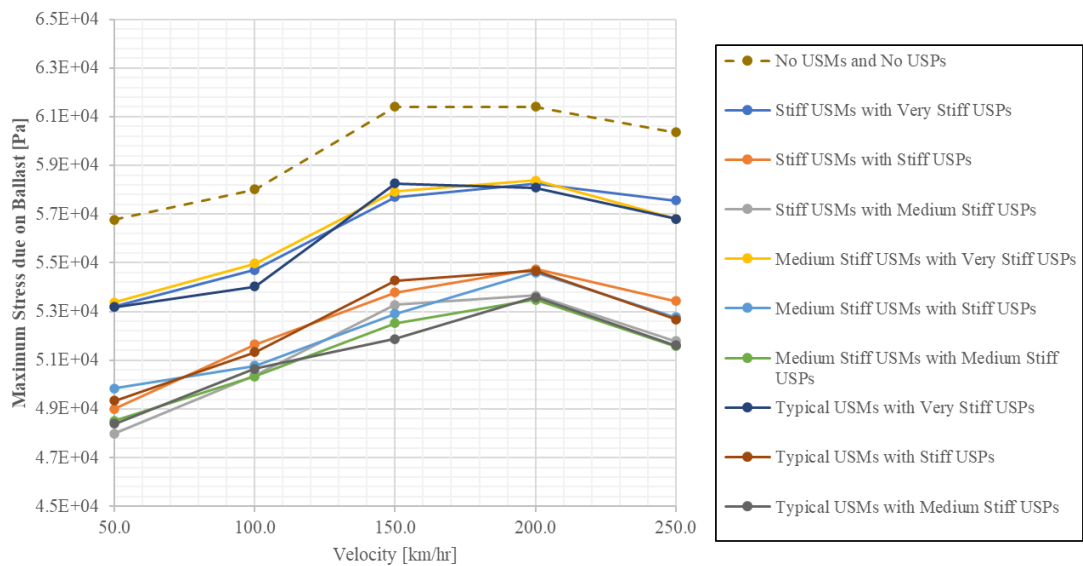




ภาพที่ 32 การกระจายตัวของค่าความเค้นในแนวตั้งที่ชั้น Ballast กรณีค่าความเร็ว

(a) 50 [km/hr], (b) 100 [km/hr], (c) 150 [km/hr], (d) 200 [km/hr], และ (e) 250 [km/hr]

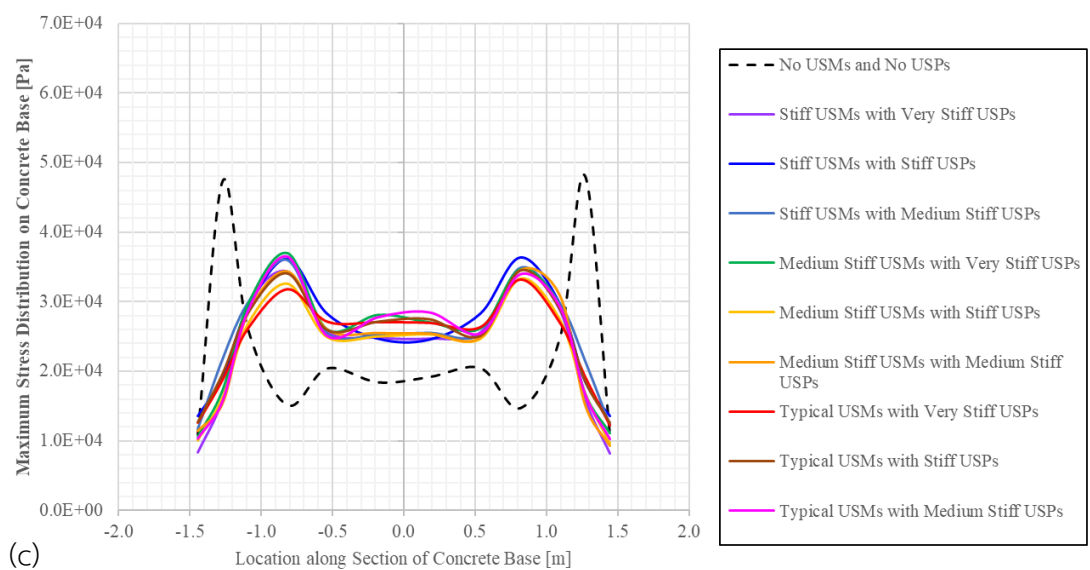
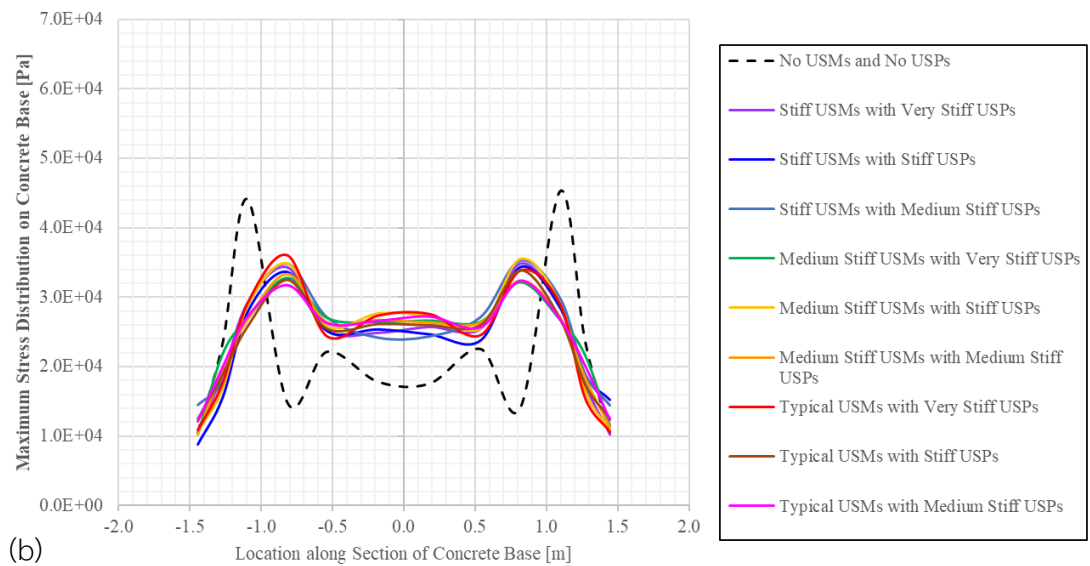
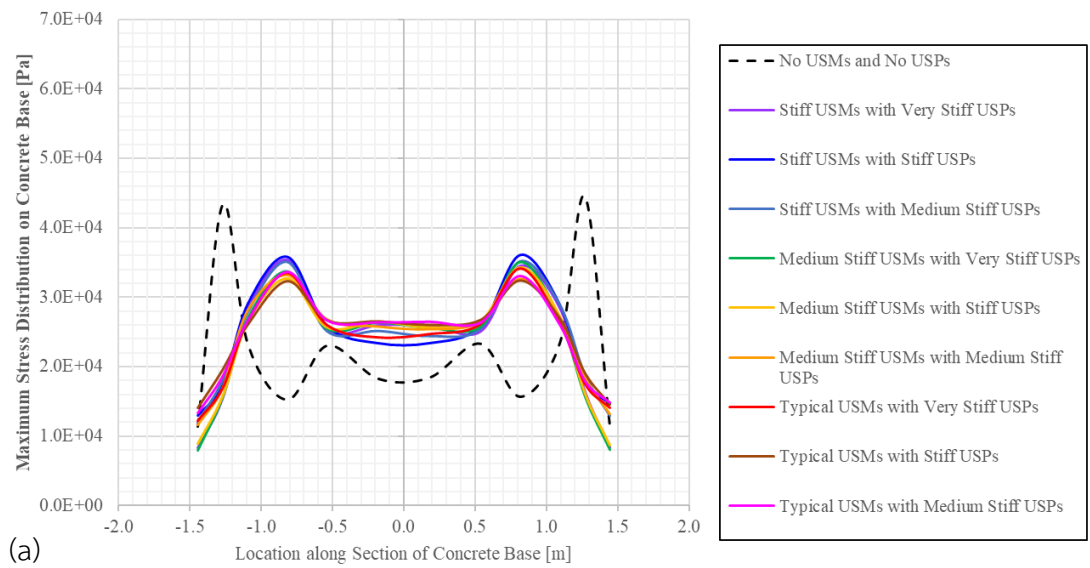
การกระจายตัวของค่าความเค้นในแนวตั้ง (Vertical Stress Distribution) ตลอดแนวของ Sleeper ที่บริเวณผิวของ Ballast ที่เกิด Contact กับแผ่นรองหมอนราง USPs ในกรณีที่ทำการติดตั้ง USPs และ USMs ในกรณีค่าความเร็วที่ต่างกัน พบว่ามีค่าความเค้นสูงสุดที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟ และเมื่อทำการนำค่าความเค้นในแนวตั้งสูงสุด (Maximum Vertical Stress) ที่ในทุกรณียะเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้เคียงกับตำแหน่งล้อของขบวนรถไฟ (Wheel Load) หรือที่ตำแหน่งบริเวณใกล้ราง (Rail Seat Location) แล้วนำมาเปรียบเทียบในช่วงของค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ จะได้ผลดังแสดงดังกราฟ ในภาพที่ 33

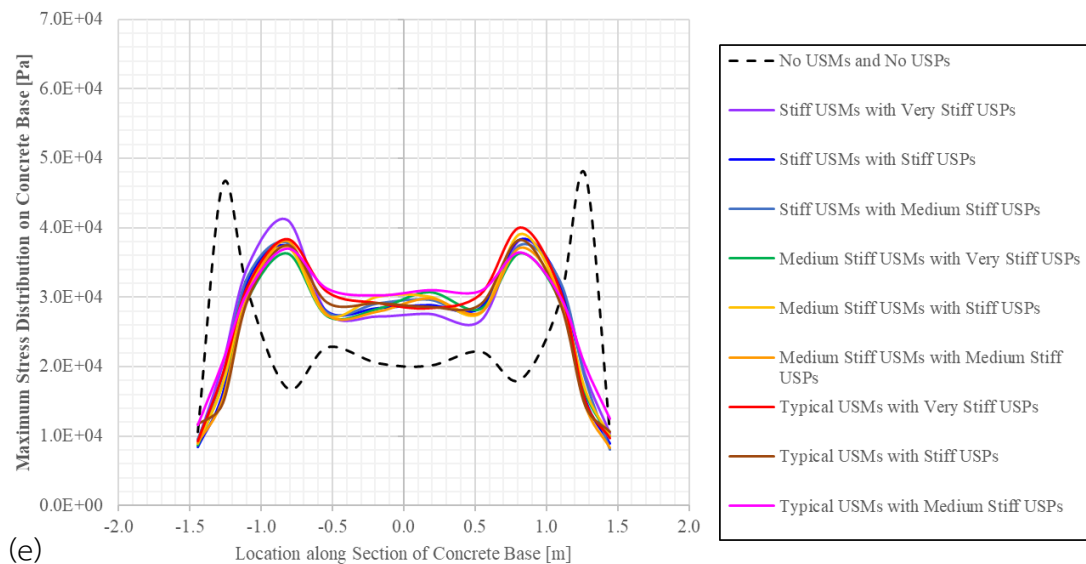
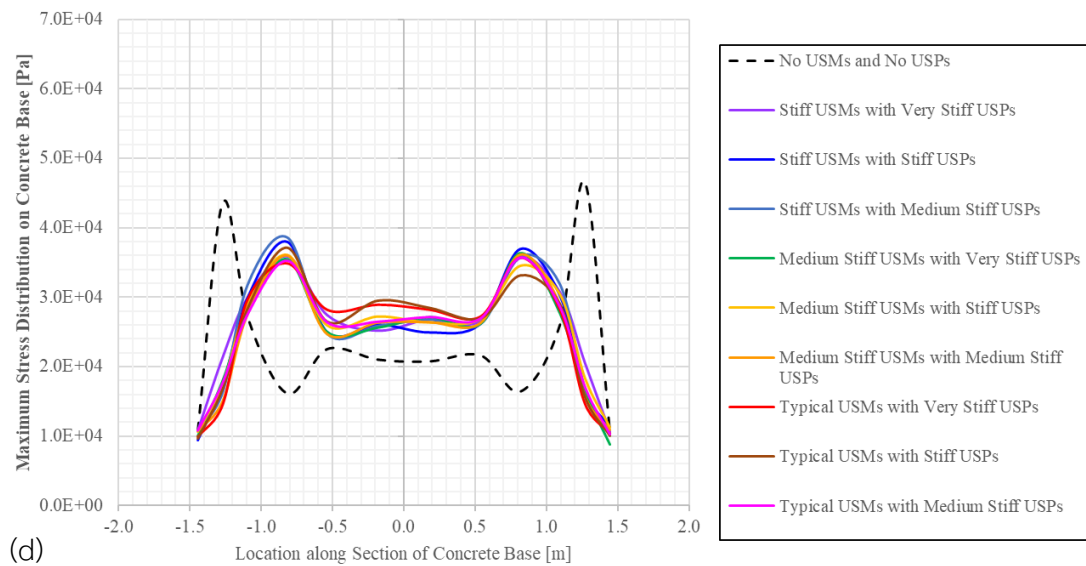


ภาพที่ 33 ค่าความเค้นในแนวตั้งสูงสุด ในชั้น Ballast แต่ละค่าความเร็ว 50-250 [km/hr]

#### 4.2.2.2 ความเค้นของชั้นหินโรยทาง (Stress of Ballast)

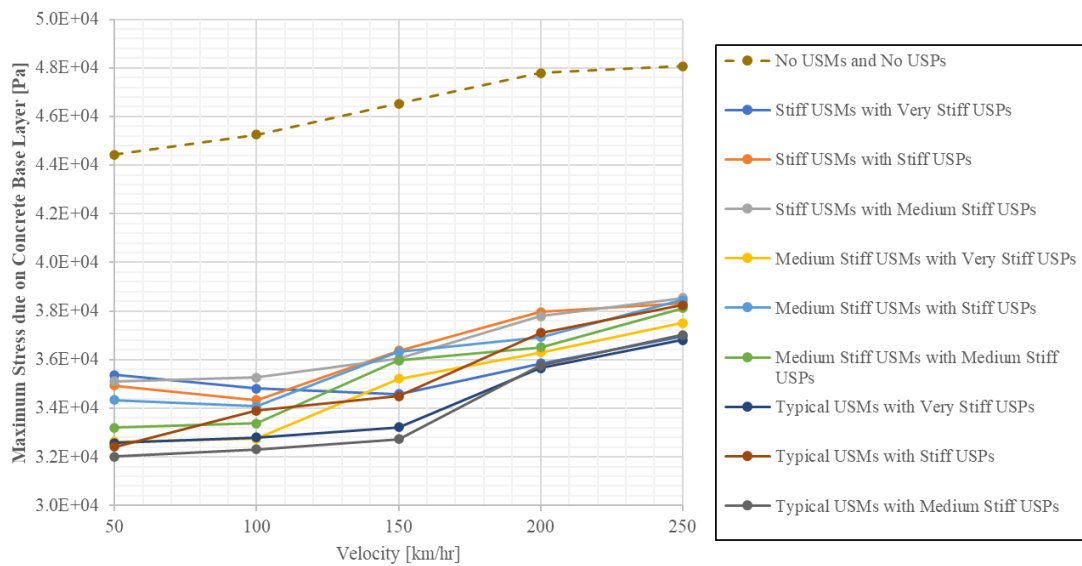
ในฝั่งของโครงสร้างทางรถไฟแบบ Slab Track (CRTS Type III) จะพิจารณาผลตอบสนองค่าความเค้นของชั้นพื้นคอนกรีต (Stress of Concrete Base) เพื่อติดตามดูประสิทธิภาพของการใช้งานของแผ่น USMs ที่ถูกติดตั้งในชั้น Isolation layer ในการช่วยลดการสั่นสะเทือนที่ถูกส่งผ่านไปยังโครงสร้างในระดับล่าง ก่อนที่จะกระจายลงสู่ชั้นดินคันทาง (Subgrade Embankment) ซึ่งจะแสดงเปรียบเทียบอยู่ในรูปของกราฟระหว่างค่าความเค้นสูงสุด ที่แต่ละตำแหน่งของหน้าตัดของ Concrete Slab ดังภาพที่ 34 เพื่อให้เห็นถึงการกระจายตัวของค่าความเค้นที่เกิดขึ้น ซึ่งพบว่าค่าความเค้นสูงสุดบน Concrete Slab มีการเพิ่มขึ้นตามความเร็วของการเคลื่อนที่ของขบวนรถเช่นเดียวกัน แต่ในกรณีที่ไม่ได้มีการติดตั้ง USMs จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นเกิดที่บริเวณปลาย ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ตรงกับปลายของชั้นโครงสร้างด้านบนได้แก่ CA Mortar ในชั้น Isolation layer และในกรณีที่มีการติดตั้ง USMs ไปร่วมด้วย ค่าความเค้นสูงสุดจะอยู่ตรงกับที่ตำแหน่งของ Rail Seat โดยจะเห็นจากกราฟได้ว่าค่าความเค้นในกรณีที่มีการติดตั้ง USMs มีค่าลดลง





ภาพที่ 34 การกระจายตัวของค่าความเค้นในแนวดิ่งในชั้น Concrete Base กรณีค่าความเร็ว (a) 50 [km/hr], (b) 100 [km/hr], (c) 150 [km/hr], (d) 200 [km/hr], และ (e) 250 [km/hr]

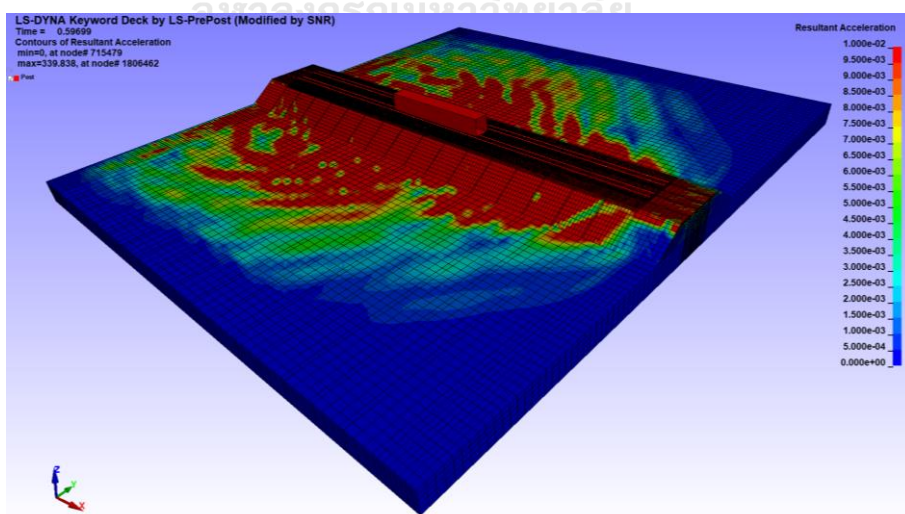
เช่นเดียวกันกับในฝั่ง Ballasted Track เมื่อนำเอาค่าความเค้นสูงสุด (Maximum Stress) ในแต่ละกรณีของการใช้งาน USPs และ USMs มาทำการเปรียบเทียบในค่าความเร็วของการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟที่ต่างกัน พบว่า ค่าความเค้นสูงสุดมีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ และค่าของความเค้น ในกรณีที่มีการติดตั้งเป็น USMs ชนิดเดียวกัน จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 35 ค่าความเค้นในแนวตั้งสูงสุด ในชั้น Concrete Base แต่ละค่าความเร็ว 50-250 [km/hr]

#### 4.2.3 ความเร่งของพื้นดิน (Ground Acceleration)

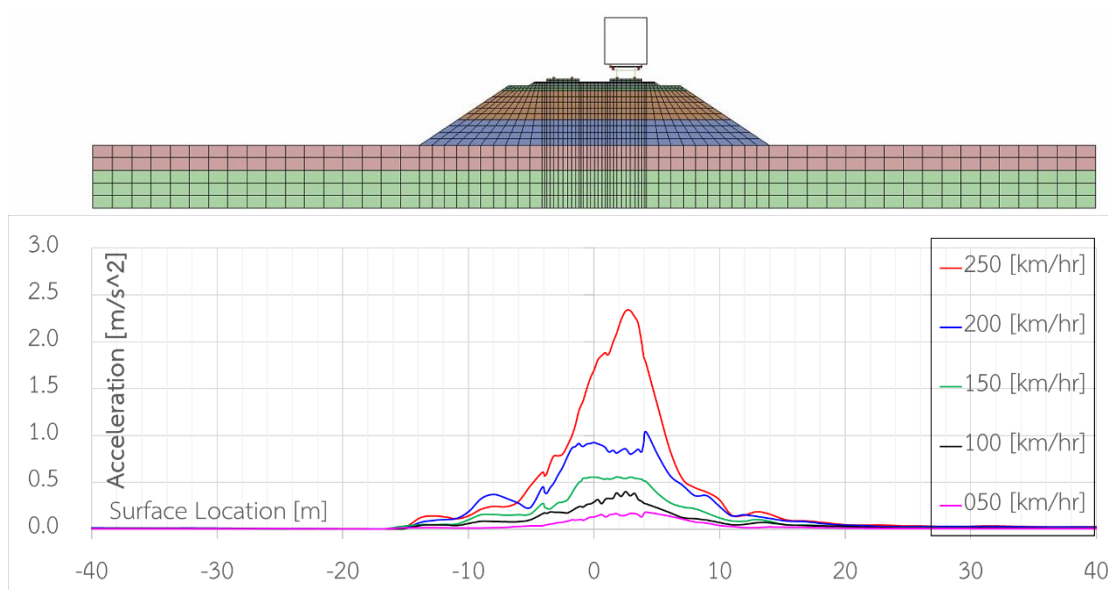
การวิเคราะห์ผลการสั่นสะเทือนของดิน จะพิจารณาผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ในรูปแบบของความเร่ง โดยจะสนใจความเร่งสูงสุดที่บริเวณผิวดิน (Ground Surface) ซึ่งตามปกติของชั้นผิวดินในประเทศไทยที่เลือกใช้ในการจำลอง จะเป็นชั้นดินที่มีความอ่อนตัวสูง (Made Ground) โดยความเร่งที่ผิวดินจะมีค่าสูงที่สุด ที่ตรงกับตำแหน่งกึ่งกลางของขบวนรถไฟ และจะลดลงตามระยะทาง ที่ห่างออกไปในช่วงระยะข้างโครงสร้างทาง จากตำแหน่งที่มีขบวนรถไฟ ไม่เกินระยะ 20 [m]



ภาพที่ 36 Ground Dynamic Response of Transition Zone, 250 km/hr.

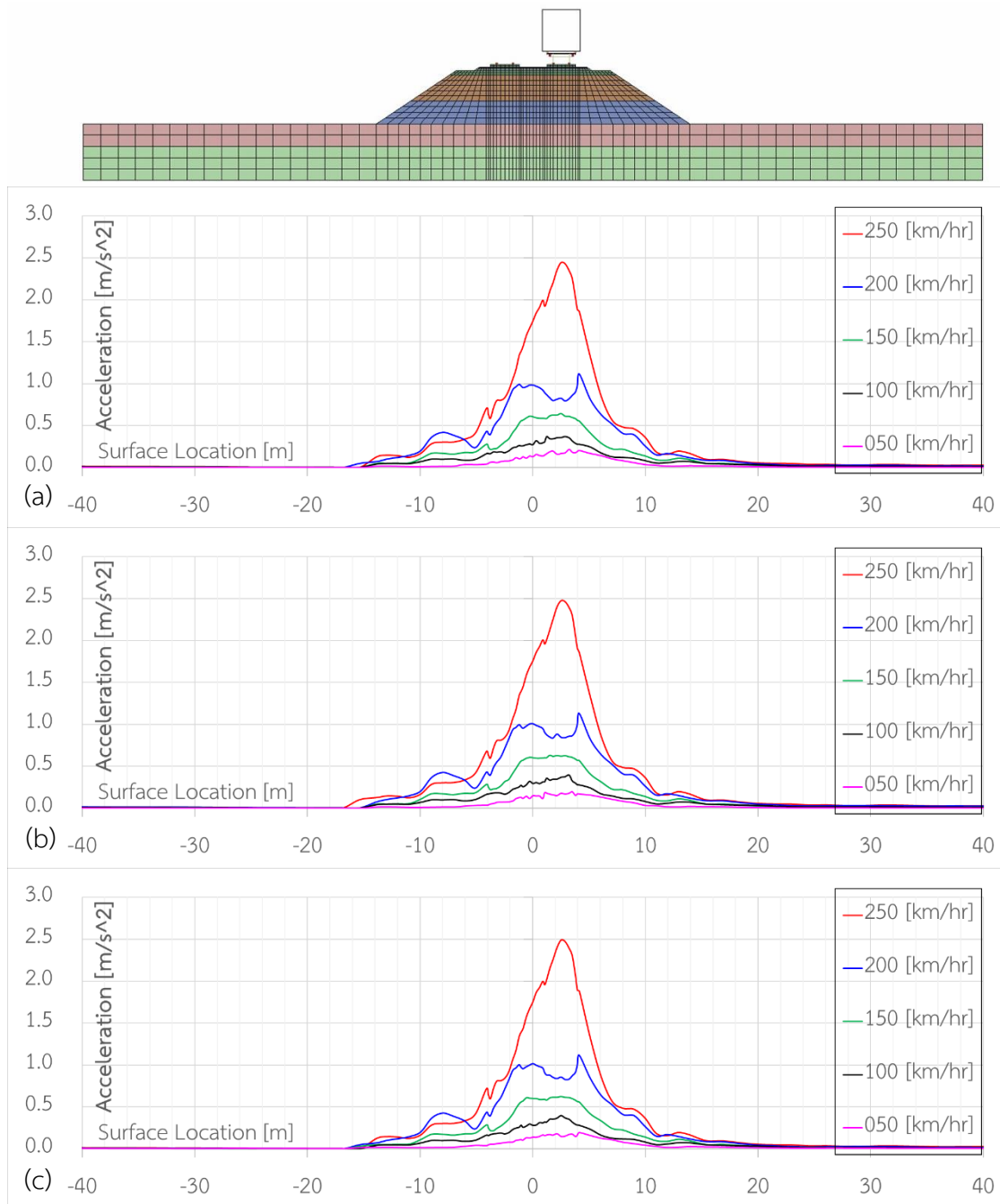


ภาพที่ 37 จะแสดงผลเปรียบเทียบของกราฟของความเร่งที่ผิวดิน บริเวณหน้าตัดโครงสร้างทาง ที่เป็นรอยต่อของโครงสร้างทาง ด้วยการจำลองการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟที่ความเร็วที่ต่างกัน ในกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง USPs และ USMs ในการช่วยลดการสั่นสะเทือนของโครงสร้างทาง ซึ่งจะพบได้ว่า ความเร่งของดินบริเวณผิวจะมีผลตอบสนองที่เพิ่มมากขึ้น ตามความเร็วในการเคลื่อนที่ผ่านของขบวนรถไฟที่มากขึ้นในช่วงบริเวณรอยต่อ

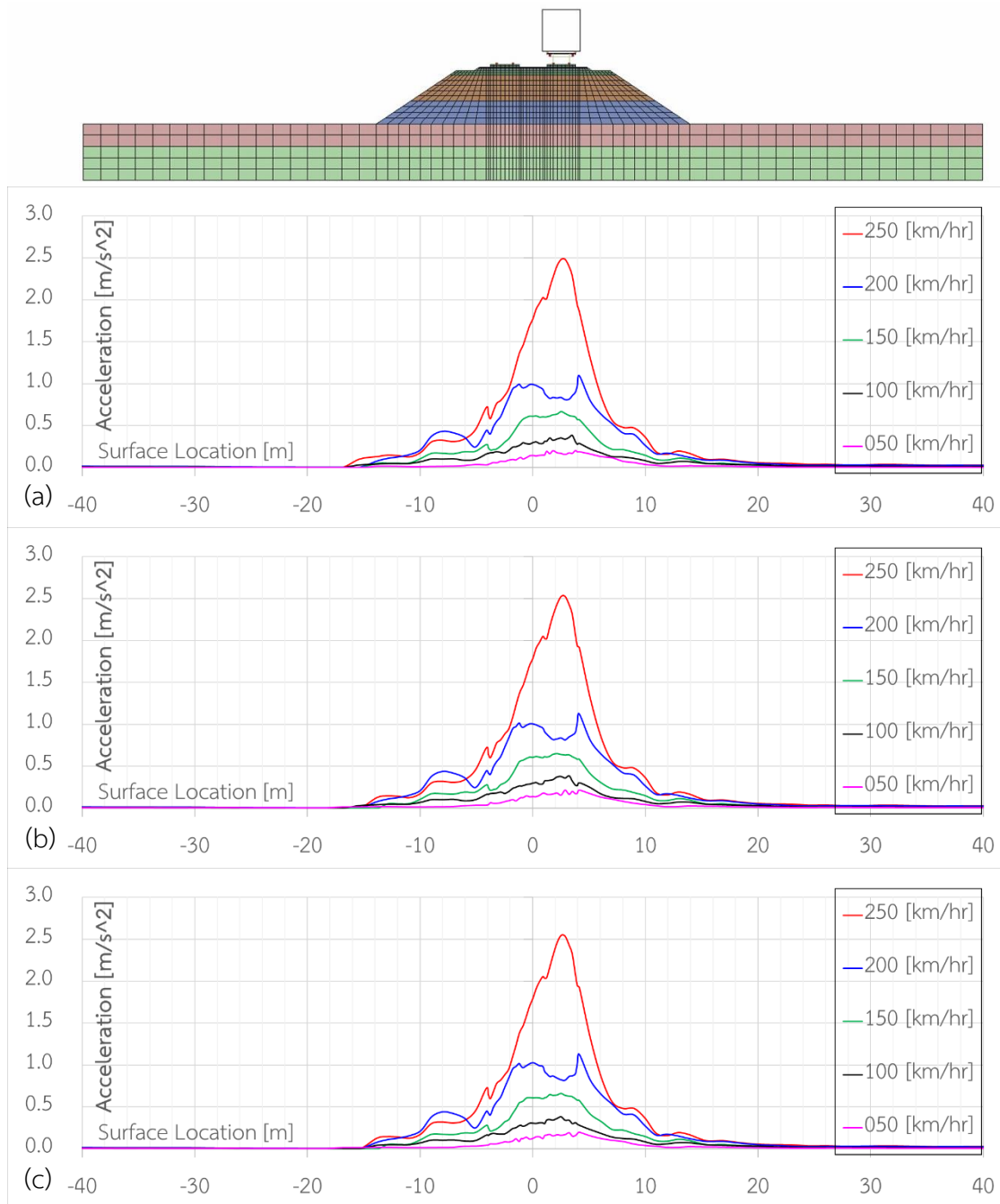


ภาพที่ 37 Dynamic Response in the term of Acceleration of Ground in Critic Section without USMs and USPs.

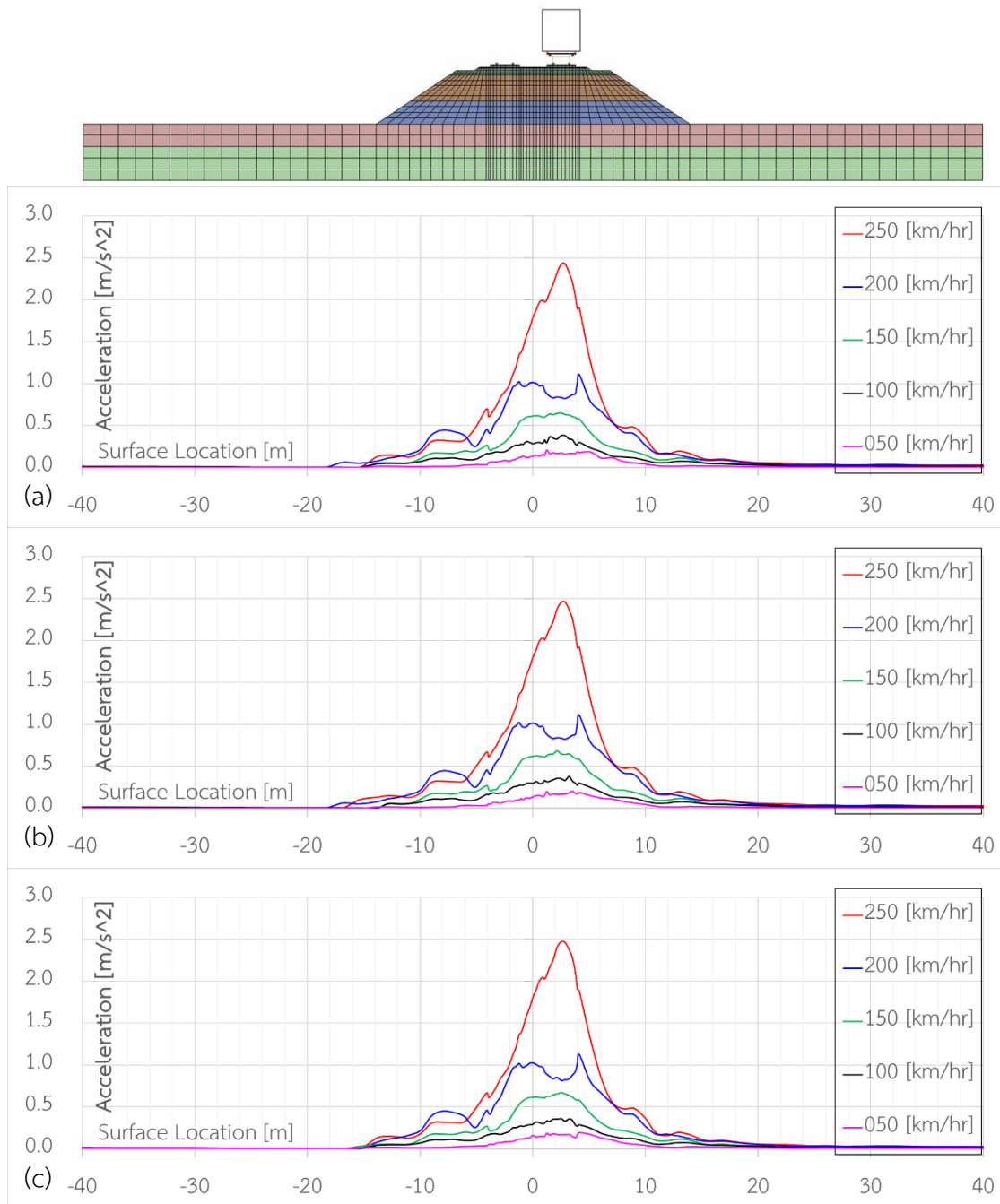
ส่วนต่อมาจะแสดงผลการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของผิวดิน ในกรณีที่มีการติดตั้ง USMs และ USPs ที่มีค่า Stiffness ที่แตกต่างกันอย่างละ 3 รูปแบบ ในแต่ละค่าความเร็วที่ต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบค่าอิทธิพลของแผ่นรองโครงสร้างทาง ที่ส่งผลต่อ ผลตอบสนองของค่าความเร่งที่บริเวณผิวดิน ซึ่งจะพบว่าผลของการสั่นสะเทือนของผิวดิน ที่ได้มีการใช้งานร่วมกันของ USPs และ USMs มีค่าความเร่งที่ใกล้เคียงกัน โดยที่กรณีของการติดตั้งแผ่นวัสดุช่วยลดการสั่นสะเทือน จะมีค่าความเร่งที่สูงกว่ากรณีที่ไม่ได้มีการติดตั้ง เป็นเพราะแผ่น USPs และ USMs มีความหนาเพียง 3 [cm] อาจไม่ได้ช่วยในการลดการสั่นสะเทือนได้อย่างชัดเจนเฉพาะที่บริเวณใกล้เคียงที่มีการติดตั้ง แต่ในโครงสร้างทางที่มีขนาดใหญ่อาจจะต้องอาศัยการปรับปรุงคุณภาพของ องค์ประกอบโครงสร้างทางอื่น เช่น การปรับปรุงค่าใช้ชั้น Sub-ballast และ Subgrade เป็นต้น



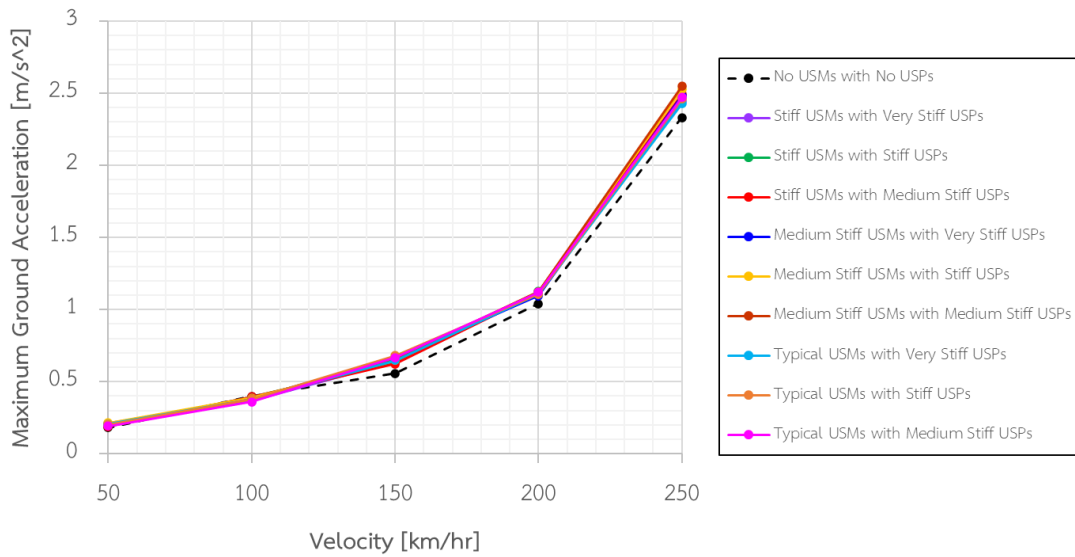
ภาพที่ 38 Dynamic Response in the term of Acceleration of Ground  
in Critical Section by using (a) Stiff USMs with Very Stiff USPs  
(b) Stiff USMs with Stiff USPs and (c) Stiff USMs with Medium USPs



ภาพที่ 39 Dynamic Response in the term of Acceleration of Ground  
in Critical Section by using (a) Medium Stiff USMs with Very Stiff USPs  
(b) Medium Stiff USMs with Stiff USPs and (c) Medium Stiff USMs with Medium USPs



ภาพที่ 40 Dynamic Response in the term of Acceleration of Ground  
in Critical Section by using (a) Typical USMs with Very Stiff USPs  
(b) Typical USMs with Stiff USPs and (c) Typical USMs with Medium USPs



ภาพที่ 41 ค่าความเร่งสูงสุดในการณที่มีการใช้ USPs และ USMs ที่ต่างกัน  
ในช่วงความเร็ว 50 – 250 [km/hr]

ในภาพที่ 41 จะแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร่งสูงสุดในแต่ละกรณีของการใช้งานการติดตั้ง USPs และ USMs ในค่าความเร็วที่ต่างกัน พบว่าค่าความเร่งสูงสุดของชั้นดินที่บริเวณผิวดินที่หน้าตัดของโครงสร้างทางรถไฟ จะเกิดขึ้นในบริเวณตำแหน่งที่ตรงกับตำแหน่งที่มีขบวนรถไฟ และจะลดลงตามระยะห่าง แต่จะมีค่าความเร่งที่เพิ่มขึ้นตามค่าความเร็วที่ใช้ของขบวนรถไฟ ซึ่งจะเห็นได้ว่าในกรณีที่ความเร็ว 50 [km/hr] การติดตั้งแผ่นวัสดุยืดหยุ่นไม่ได้ส่งผลมากต่อค่าความเร่งในชั้นดินที่เกิดขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ติดตั้ง USPs และ USMs ค่าความเร่งของดินที่ความเร็วรถไฟที่มากจะสูงกว่าเพียงเล็กน้อย เนื่องจากผลของการติดตั้งโครงสร้างช่วยลดการสั่นสะเทือนมีขนาดที่บางเมื่อเทียบกับโครงสร้างขนาดใหญ่ จึงไม่สามารถช่วยลดผลตอบสนองที่อยู่ในระดับของชั้นดินได้มาก จำเป็นต้องมีการปรับปรุงค่าคุณสมบัติวัสดุของโครงสร้างที่เป็นองค์ประกอบอื่นร่วมด้วย เพื่อให้เหมาะสมกับในกรณีที่ต้องการจะลดค่าการสั่นสะเทือนของดินจากการวิ่งผ่านของขบวนรถไฟ และค่าความเร่งที่มากที่สุดจากการเคลื่อนที่ผ่านของรถไฟที่มีความเร็ว 250 [km/hr] จะมีค่า 2.55 [m/s<sup>2</sup>]

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

ในบทสุดท้ายจะทำการสรุปผลจากการศึกษาที่ได้ ด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างที่ได้ทำการจำลองและปรับปรุงในโปรแกรม LS-DYNA ที่มีความเหมาะสมในการใช้งานเป็นซอฟต์แวร์ที่ช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEW) และจากที่ได้ทำการปรับปรุงค่าคุณสมบัติของวัสดุของแต่ละองค์ประกอบย่อยของโครงสร้าง เพื่อให้มีความสอดคล้องกับปัญหาที่ต้องการจะศึกษา ได้แก่ การติดตามผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ในการเคลื่อนที่ผ่านของขบวนรถไฟ CR 300BF (Axle Load ไม่เกิน 17 [Tons]) ที่จะถูกใช้ในประเทศไทยในอนาคต ในเส้นทางโครงการรถไฟความเร็วสูง ที่บริเวณช่วงรอยต่อ (Track Transition) ของ ทางรถไฟแบบใช้หินโรยทาง (Ballasted Track) และ Slab Track CRTS Type III ที่พิจารณาการเคลื่อนที่ผ่านของขบวนรถไฟในค่าความเร็วที่ต่างกัน ตั้งแต่ 50 – 250 [km/hr] ที่จะสอดคล้องกับค่าความเร็วที่จะใช้จริงในอนาคต โดยจะมีผลลัพธ์การตอบสนอง และข้อสรุปจากการศึกษาที่ได้ ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาอิทธิพลของผลการติดตั้ง USPs และ USMs ในช่วงรอยต่อของโครงสร้าง จะแยกพิจารณาผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นตาม ผลตอบสนองที่สนใจในส่วนของโครงสร้าง ดังนี้

1. ค่าการกระจัดในแนวตั้งของราง (Vertical Rail Displacement) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่า Track Stiffness ในตำแหน่งที่ตรงกัน พบว่ามีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกัน โดยในด้านของโครงสร้างทางที่มีค่า Track Stiffness ที่สูงกว่า จะมีการกระจัดของรางที่น้อยกว่า
2. ในกรณีการศึกษานี้ การใช้งาน USPs ทุกประเภท ไม่ได้ช่วยลดการกระจัดในแนวตั้งของราง แต่ทำให้เกิดการกระจัดที่เพิ่มขึ้น โดยเพื่อให้เกิดความเหมาะสมสำหรับในกรณีบริเวณรอยต่อของโครงสร้างทางรถไฟสำหรับกรณีการศึกษานี้ มีข้อเสนอแนะว่าจำเป็นต้องทำการปรับค่าคุณสมบัติของวัสดุให้มีค่า Stiffness ที่สูงขึ้น หรือทำการปรับปรุงโครงสร้างอื่น เช่น การปรับปรุงคุณภาพของชั้น Subgrade เพื่อให้ค่า Track Stiffness ด้านฝั่ง Ballasted Track มีการเพิ่มขึ้นโดยรวม
3. การใช้งาน USMs ที่มีค่า Stiffness ที่สูงกว่าจะช่วยเพิ่มค่า Track Stiffness ได้ดีกว่า USMs ที่มีค่าอ่อนกว่า และเหมาะสมจะใช้เป็นชั้นวัสดุที่ช่วยในการปรับค่า Track Stiffness ในช่วงรอยต่อของโครงสร้างทางประเภท CRTS Type III

4. ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นของ Ballast (Vertical Stress on Ballast Layer) ในกรณีที่มีการติดตั้ง USPs พบว่าถึงในกรณีของการปรับค่า Track Stiffness จะไม่ได้ช่วยในการลดค่าความแตกต่างของ Rail Displacement ในบริเวณรอยต่อ แต่ในแง่การส่งผ่านแรง หรือการลดค่าความเค้นที่เกิดขึ้น สามารถช่วยลดและกระจายการส่งผ่านของความเค้นไปยังชั้นของ Ballast ได้ โดยกรณีที่ใช้ Medium Stiff USPs จะช่วยลดค่าความเค้นได้มากที่สุด
5. ส่วนในด้านของ Slab Track การใช้งาน USMs สามารถช่วยลดความเค้นที่เกิดขึ้นลงบนชั้นของ Concrete Base ได้เช่นเดียวกัน
6. ในแง่ของการสั่นสะเทือนบริเวณที่ผิวของชั้นดิน ที่ตำแหน่งของรอยต่อโครงสร้างทางรถไฟ (Acceleration of Ground at Critical Location) พบว่า การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นมีค่าความเร่งเพิ่มขึ้นตาม แรงเชิงพลศาสตร์จากการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟ ที่มีค่าสูงขึ้นตามความเร็วที่เคลื่อนที่ และจะมีค่าความเร่งสูงสุดในตำแหน่งที่มีน้ำหนักรถไฟกระทำ โดยค่าความเร่งจะลดลงตามระยะห่างจากขบวนรถไฟ อยู่ในระยะไม่เกิน 20 [m] ค่าความเร่งที่มากที่สุด  $2.55 \text{ [m/s}^2\text{]}$  เกิดขึ้นในกรณี 250 [km/hr]
7. การติดตั้ง USPs และ USMs ในกรณีที่ใช้เป็นดินอ่อนกรุงเทพฯ ไม่ได้ส่งผลต่อการช่วยลดการสั่นสะเทือนในชั้นดิน แต่ในกรณี 250 [km/hr] ที่มีการใช้ Typical USMs จะมีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุด อยู่ในช่วง 4 – 8 [%] ซึ่งอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง ในกรณีที่ต้องการจะลดค่าความเร่งที่ชั้นดิน จึงจำเป็นต้องใช้การปรับปรุงคุณภาพของชั้นดินเพิ่มเติม

## 5.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

จากการศึกษา พบว่ามีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมที่น่าสนใจ จากผลลัพธ์ในการวิเคราะห์การใช้งานแผ่นวัสดุที่ช่วยลดการสั่นสะเทือนในกรณีของช่วงบริเวณรอยต่อโครงสร้างทาง ดังนี้

(1) USPs ทุกประเภทที่นำมาใช้งาน ได้แก่ Very Stiff, Stiff, Medium Stiff USPs ช่วยในการลดค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนของขบวนรถไฟ ที่กระทำลงชั้นหินโรยทาง แต่ในแง่ของการปรับค่าการการกระจัดของราง ในบริเวณรอยต่อ จึงแนะนำให้มีการใช้งาน USPs ที่มีค่า Stiffness ที่มากที่สุด ควบคู่การปรับปรุงค่า Subgrade Properties, Rail Pads หรือโครงสร้างอื่นในการใช้งานร่วมด้วย เพื่อปรับค่า Track Stiffness ในด้านของ Ballasted Track ให้มีค่าสูงขึ้นเพียงพอ

(2) การใช้งาน USPs แบบที่มีค่า Stiffness ที่น้อย จะช่วยในการลดค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในระดับชั้นของโครงสร้างที่อยู่ต่ำกว่าได้ตีมากที่สุด แต่ในแง่ของการปรับปรุงค่า Track Stiffness โดยรวม จำเป็นต้องเลือกใช้ประเภทความแข็งของ USPs ที่เหมาะสมกับโครงสร้างที่ต้องการใช้งาน ซึ่งในกรณีศึกษา การเลือกใช้ Very Stiff USPs สามารถช่วยในการเพิ่มค่า Track Stiffness ได้มากที่สุด

(3) ส่วนของการใช้งาน USMs ถือว่าเหมาะสมในการนำมาเป็นโครงสร้างที่ช่วยในการลดค่าผลตอบแทนในราง และสามารถช่วยในการปรับปรุค่า Track Stiffness บริเวณรอยต่อของโครงสร้างทางได้ดี จากการศึกษาที่พบ USMs สามารถเพิ่มค่า Track Stiffness โครงสร้างทางได้มากขึ้นอยู่ในช่วง 40 – 60 [%] ของความต่างของบริเวณรอยต่อของโครงสร้างทางทั้ง 2 ประเภท และช่วยลดค่าความเค้นที่กระทำบน Concrete Base ได้ดี

(4) การใช้งานร่วมกันของ USPs และ USMs ในรอยต่อโครงสร้างทางแบบ Ballasted Track และ Slab Track CRTS มีความเหมาะสมในแง่ของการใช้งานที่ตรงกับประเภทของโครงสร้างทาง แต่จำเป็นต้องพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของค่า Track Stiffness เทียบกับระยะทางที่ทำการติดตั้ง ให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

(5) จากกรณีศึกษาพบว่า ในช่วงระยะรอยต่อของโครงสร้างทาง 50 [m] ที่มีการติดตั้ง USPs และ USMs เมื่อใช้งานแผ่นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นแค่เพียงประเภทเดียว ก็สามารถทำให้เกิดการปรับค่า Track Stiffness ได้อย่างเหมาะสมเพียงพอ ไม่จำเป็นต้องใช้งาน USPs หรือ USMs ที่มีค่า Stiffness หลายประเภท ในบริเวณรอยต่อของโครงสร้างทาง

(6) ในกรณีที่เป็น Stiff USMs ที่ได้ให้ผลในการปรับค่า Track Stiffness ได้ดีที่สุด จากในแบบจำลองที่ได้ทำการติดตั้ง USMs เป็นจำนวน 4 [panel] (หรือเป็นระยะทาง 26 [m]) ในค่าความเร็วสูงสุด 250 [km/hr] เมื่อติดตามแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าความชัน มีข้อเสนอแนะในการเพิ่มจำนวนในการติดตั้ง USMs อีก 6 [panel] ให้เป็น 10 [panel] (ระยะทาง 65 [m]) จะเป็นช่วงที่เหมาะสมในการปรับค่า Rail Displacement ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเช่นเดียวกันกับกรณีที่ขบวนรถไฟใช้ความเร็วต่ำ 50 [km/hr] ควรทำการติดตั้งเพิ่ม 4 [panel]



## บรรณานุกรม

- An, B., Wang, P., Xiao, J., Xu, J., & Chen, R. (2017). Dynamic Response of Wheel-Rail Interaction at Rail Weld in High-Speed Railway. *Shock and Vibration*, 2017, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2017/5634726>
- Connolly, D., Giannopoulos, A., & Forde, M. C. (2013). Numerical modelling of ground borne vibrations from high speed rail lines on embankments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 46, 13-19. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.12.003>
- Connolly, D. P., Kouroussis, G., Laghrouche, O., Ho, C. L., & Forde, M. C. (2015). Benchmarking railway vibrations – Track, vehicle, ground and building effects. *Construction and Building Materials*, 92, 64-81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.042>
- Dumitriu, M., & Dihoru, I. I. (2021). Influence of Bending Vibration on the Vertical Vibration Behaviour of Railway Vehicles Carbody. *Applied Sciences*, 11(18). <https://doi.org/10.3390/app11188502>
- El-sayed, H. M., Zohny, H. N., Riad, H. S., & Fayed, M. N. (2021). A Three Dimensional Finite Element Analysis dof Concrete Sleepers and Fastening System Subjected to Coupling Vertical and Lateral Loads. *Engineering Failure Analysis*. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105236>
- Esmaeili, M., Farsi, S., & Shamohammadi, A. (2022). Effect of rock strength on the degradation of ballast equipped with under sleeper pad. *Construction and Building Materials*, 321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126413>
- Farooq, M. A., Nimbalkar, S., & Fatahi, B. (2021). Three-dimensional finite element analyses of tyre derived aggregates in ballasted and ballastless tracks. *Computers and Geotechnics*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104220>
- Ferro, E., Harkness, J., & Le Pen, L. (2020). The Influence of Sleeper Material Characteristics on Railway Track Behaviour Concrete vs Composite Sleeper. *Transportation Geotechnics*. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100348>
- Gallego, I., Muñoz, J., Rivas, A., & Sánchez-Cambronero, S. (2011). Vertical Track Stiffness

as a New Parameter Involved in Designing High-Speed Railway Infrastructure.

*Journal of Transportation Engineering*, 137(12), 971-979.

[https://doi.org/10.1061/\(asce\)te.1943-5436.0000288](https://doi.org/10.1061/(asce)te.1943-5436.0000288)

- Galvín, P., Romero, A., & Domínguez, J. (2010). Fully three-dimensional analysis of high-speed train-track-soil-structure dynamic interaction. *Journal of Sound and Vibration*, 329(24), 5147-5163. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.06.016>
- Huang, H., Gao, Y., & Stoffels, S. (2014). Fully Coupled Three-Dimensional Train-Track-Soil Model for High-Speed Rail. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2448(1), 87-93. <https://doi.org/10.3141/2448-11>
- Indraratna, B., Babar Sajjad, M., Ngo, T., Gomes Correia, A., & Kelly, R. (2019). Improved performance of ballasted tracks at transition zones: A review of experimental and modelling approaches. *Transportation Geotechnics*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100260>
- Kaewunruen, S., Ngamkhanong, C., Papaelias, M., & Roberts, C. (2018). Wet Dry Influence on Behaviors of Closed Cell Polymeric Cross Linked Foams under Static, Dynamic and Impact Loads. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.052>
- Kouroussis, G., Connolly, D. P., Olivier, B., Laghrouche, O., & Costa, P. A. (2016). Railway cuttings and embankments: Experimental and numerical studies of ground vibration. *Sci Total Environ*, 557-558, 110-122. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.016>
- Kouroussis, G., Connolly, D. P., & Verlindena, O. (2014). Railway Induced Ground Vibrations a Review of Vehicle Effects. *Article in International Journal of Rail Transportation* <https://doi.org/10.1080/23248378.2014.897791>
- Leboeuf, M. (2018). UIC High Speed Rail. *UIC*.
- Li, Su, & Kaewunruen. (2019). Saturated Ground Vibration Analysis Based on a Three-Dimensional Coupled Train-Track-Soil Interaction Model. *Applied Sciences*, 9(23). <https://doi.org/10.3390/app9234991>
- Li, T., Su, Q., & Kaewunruen, S. (2020). Influences of Piles on the Ground Vibration considering the Train-Trac-Soil Dynamic Interactions. *Computers and Geotechnics*. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103455>

- Ling, L., Jiang, P., Wang, K., & Zhai, W. (2020). Dynamic Interaction between Rail Vehicles and Vibration Attenuating Slab Tracks. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119545>
- Lyratzakis, A., Tsompanakis, Y., & Psarropoulos, P. N. (2020). Efficient mitigation of high-speed trains induced vibrations of railway embankments using expanded polystyrene blocks. *Transportation Geotechnics*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100312>
- Mishra, D., Qian, Y., Huang, H., & Tutumluer, E. (2014). An integrated approach to dynamic analysis of railroad track transitions behavior. *Transportation Geotechnics*, 1(4), 188-200. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.07.001>
- Momoya, Y., Takahashi, T., & Nakamura, T. (2016). A Study on the Deformation Characteristics of Ballasted Track at Structural Transition zone by Multiactuator moving Loading Test Apparatus. *Transportation Geotechnics*. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.11.001>
- NAMURA, A., & SUZUKI, T. (2007). Evaluation of Countermeasures against Differential Settlement at Track Transitions. *Paper*.
- National Academics of Sciences, E., and Medicine (2006). Design of Track Transitions. *National Academics of Sciences, Engineering, and Medicine* <https://doi.org/10.17226/23228>
- 10.17226/23228
- 10.17226/23228.Visit
- Ngamkhanong, C., & Kaewunruen, S. (2020). Effects of Under Sleeper Pads on Dynamic Responses of Railway Prestressed Concrete Sleepers Subjected to High Intensity Impact Loads. *Engineering Structures*. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110604>
- Ngamkhanong, C., Ming, Q. Y., Li, T., & Kaewunruen, S. (2020). Dynamic train-track interactions over railway track stiffness transition zones using baseplate fastening systems. *Engineering Failure Analysis*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104866>
- Nie, L., Jiang, L., Zhou, W., & Feng, Y. (2021). Mapping Relation between Rail and Bridge

- Deformation Considering Nonlinear Contact of Interlayer. *Materials (Basel)*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/ma14216653>
- Norén-Cosgriff, K., Berggren, E. G., Kaynia, A. M., Dam, N. N., & Mortensen, N. (2018). A new method for estimation of critical speed for railway tracks on soft ground. *International Journal of Rail Transportation*, 6(4), 203-217. <https://doi.org/10.1080/23248378.2018.1474811>
- Ntotsios, E., Thompson, D. J., & Hussein, M. F. M. (2019). A comparison of ground vibration due to ballasted and slab tracks. *Transportation Geotechnics*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100256>
- Paixão, A., Alves Ribeiro, C., Pinto, N. M. P., Fortunato, E., & Calçada, R. (2015). On the use of Under Sleeper Pads in Transition Zones at Railway under passes Experimental Field Testing. *Article in Structure and Infrastructure Engineering*. <https://doi.org/10.1080/15732479.2013.850730>
- Paixão, A., Varandas, J. N., Fortunato, E., & Calçada, R. (2018). Numerical simulations to improve the use of under sleeper pads at transition zones to railway bridges. *Engineering Structures*, 164, 169-182. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.005>
- Park, S., Kim, J. Y., Kim, J., Lee, S., & Cho, K.-H. (2020). Analysis of Dynamic Characteristics of Deformed Concrete Slab Track on Transition Zone in High-Speed Train Line According to Train Speeds. *Applied Sciences*, 10(20). <https://doi.org/10.3390/app10207174>
- Pourzeynali, S., Zhu, X., Ghari Zadeh, A., Rashidi, M., & Samali, B. (2021). Comprehensive Study of Moving Load Identification on Bridge Structures Using the Explicit Form of Newmark- $\beta$  Method: Numerical and Experimental Studies. *Remote Sensing*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/rs13122291>
- Punetha, P., Maharjan, K., & Nimbalkar, S. (2021). Finite Element Modeling of the Dynamic Response of Critical Zones in a Ballasted Railway Track. *Frontiers in Built Environment*, 7. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.660292>
- Qi, Y., & Zhou, L. (2020). The Fuxing: The China Standard EMU. *Engineering*, 6(3), 227-233. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.01.004>

- Qu, X., Ma, M., Li, M., Cao, Y., & Liu, W. (2019). Analysis of the Vibration Mitigation Characteristics of the Ballasted Ladder Track with Elastic Elements. *Sustainability*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/su11236780>
- Ramos, A., Gomes Correia, A., Calçada, R., & Connolly, D. P. (2022). Ballastless railway track transition zones: An embankment to tunnel analysis. *Transportation Geotechnics*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100728>
- Remennikov, A. M., & Kaewunruen, S. (2014). Experimental Load Rating of Aged Railway Concrete Sleepers. *Engineering Structures*. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.06.032>
- Ren, J., Deng, S., Zhang, K., Du, W., & Wu, Q. (2021). Design theories and maintenance technologies of slab tracks for high-speed railways in China: a review. *Transportation Safety and Environment*, 3(4). <https://doi.org/10.1093/tse/tdab024>
- Sadri, M., & Steenbergen, M. (2018). Effects of railway track design on the expected degradation: Parametric study on energy dissipation. *Journal of Sound and Vibration*, 419, 281-301. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.01.029>
- Sakhare, A., Farooq, H., Nimbalkar, S., & Dodagoudar, G. R. (2022). Dynamic Behavior of the Transition Zone of an Integral Abutment Bridge. *Sustainability*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/su14074118>
- Sañudo, R., dell'Olio, L., Casado, J. A., Carrascal, I. A., & Diego, S. (2016). Track transitions in railways: A review. *Construction and Building Materials*, 112, 140-157. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.084>
- Sayed, M. A., & Shahin, M. A. (2016). Three-dimensional numerical modelling of ballasted railway track foundations for high-speed trains with special reference to critical speed. *Transportation Geotechnics*, 6, 55-65. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.01.003>
- Setua, G., Mohantab, M., Srivastavac, J. P., Sarkard, P. K., & Ranjane, V. (2015). Analytical Modeling of Rail Track System. *Conference*.
- Shahraki, M., Warnakulasooriya, C., & Witt, K. J. (2015). Numerical study of transition zone between ballasted and ballastless railway track. *Transportation Geotechnics*, 3, 58-67. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.05.001>

- Sheng, X., Jones, C. J. C., & Thompson, D. J. (2004). A theoretical model for ground vibration from trains generated by vertical track irregularities. *Journal of Sound and Vibration*, 272(3-5), 937-965. [https://doi.org/10.1016/s0022-460x\(03\)00782-x](https://doi.org/10.1016/s0022-460x(03)00782-x)
- Shih, J.-Y., Grossoni, I., & Bezin, Y. (2019). Settlement analysis using a generic ballasted track simulation package. *Transportation Geotechnics*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100249>
- Shih, J. Y., Thompson, D. J., & Ntotsios, E. (2018). Analysis of Resonance Effect for a Railway Track on a Layered Ground. *Transportation Geotechnics*. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.07.001>
- Sol-Sánchez, M., Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gámez, M. C. (2014). The use of Deconstructed Tire Rail Pads in Railroad Tracks, Impact of Pad Thickness. *Materials and Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.062>
- Sol-Sanchez, M., Moreno-Navarro, F., Tauste-Martínez, R., Saiz, L., & Rubio-Gamez, M. C. (2020). Recycling Tire-Derived Aggregate as Elastic Particles under Railway Sleepers, Impact on Track Lateral Resistance and Durability. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123322>
- Tucho, A., Indraratna, B., & Ngo, T. (2022). Stress-deformation analysis of rail substructure under moving wheel load. *Transportation Geotechnics*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100805>
- Varandas, J. N., Paixão, A., Fortunato, E., Zuada Coelho, B., & Hölscher, P. (2020). Long-term deformation of railway tracks considering train-track interaction and non-linear resilient behaviour of aggregates – a 3D FEM implementation. *Computers and Geotechnics*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103712>
- Wang, M., Cai, C., Zhu, S., & Zhai, W. (2016). Experimental Study on Dynamic Performance of Typical Non Ballasted Track System using a Full Scale Test Rig. *Article*. <https://doi.org/10.1177/09544409716634751>
- Witt, S. (2008). The Influence of Under Sleeper Pads on Railway Track Dynamics. *Thesis*.
- Xiao, Y., Chang, Z., Mao, J., Zhou, S., Wang, X., Wang, W., Cai, D., Zhu, H., & Long, Y. (2022). Evaluating the Effect of Rail Fastener Failure on Dynamic Responses of Train Ballasted Track Subgrade Coupling System for Smart Track Condition Assessment. *Article*. <https://doi.org/10.3390/ma15072675>

- Zhai, W., Liu, P., Lin, J., & Wang, K. (2015). Experimental investigation on vibration behaviour of a CRH train at speed of 350 km/h. *International Journal of Rail Transportation*, 3(1), 1-16. <https://doi.org/10.1080/23248378.2014.992819>
- Zheng, W., & Zhu, Z. (2019). Properties of Rubber Under Ballast Mat used as Ballastless Track Isolation Layer in High Speed Railway. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117822>





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สุรพันธุ์ นพรัตน์
วัน เดือน ปี เกิด	16 กันยายน 2541
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	7 หมู่ 9 ซอยประชาอุทิศ 12 แยก 2 ถนนประชาอุทิศ แขวงราษฎร์บูรณะ เขตราษฎร์บูรณะ กรุงเทพฯ 10140



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY