

พฤติกรรมบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านของทางรถไฟและเทคนิคการปรับปรุงประสิทธิภาพ

Behavior of Railway Track at Transition Zone and Performance

Improvement Techniques :A Review

ปิยรัตน์ เปาเล้ง^{1*}, รัฐภูมิ ปริชาติปรีชา², ทรงศักดิ์ สุธาสุประดิษฐ์³

Piyarat Paoleng^{1*}, Rattapoohm Parichatprecha², Songsak Suthasupradit³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จ.พิจิตร

^{2,3} สถานีวิจัยเพื่อความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมถนนและระบบราง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

*Corresponding author: Ppaoleng@gmail.com

บทคัดย่อ

ตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน (Transition zone) บนทางรถไฟเป็นบริเวณที่มีความแตกต่างกันของโครงสร้างที่รองรับทางซึ่งจะส่งผลให้ทางรถไฟในบริเวณดังกล่าวมีค่าสติฟเนส (Stiffness) ที่ต่างกัน ในขณะที่รถไฟเคลื่อนที่ผ่านบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน บริเวณที่มีสติฟเนสต่ำกว่าจะมีการยุบตัวของทางรถไฟมากกว่า ส่งผลให้เกิดแรงกระแทกของล้อที่กระทำต่อราง (Wheel-rail impact force) พฤติกรรมดังกล่าวเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความเสื่อมสภาพและความเสียหายอย่างรุนแรงกับทางรถไฟบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน ดังนั้นบริเวณดังกล่าวจึงจำเป็นต้องมีรอบการบำรุงรักษาที่มากกว่าทางรถไฟในบริเวณอื่น อย่างไรก็ตามการเลือกใช้เทคนิควิธีการปรับปรุงสติฟเนสของทางรถไฟที่เหมาะสมจะช่วยชะลอการเสื่อมสภาพของทางรถไฟให้มีอายุการใช้งานนานขึ้นรวมถึงลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา บทความฉบับนี้ได้ทำการรวบรวมเทคนิคการปรับปรุงประสิทธิภาพของทางรถไฟบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน คุณสมบัติทางกล ประสิทธิภาพการลดทอนการสั่นในแต่ละเทคนิค และมาตรฐานต่างๆที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงได้รวบรวมและสำรวจวิธีการปรับปรุงและปัญหาที่เกิดขึ้นกับตำแหน่งเปลี่ยนผ่านในเส้นทางรถไฟระหว่างเมืองของทางรถไฟแห่งประเทศไทยในปัจจุบัน ผลจากการศึกษาเปรียบเทียบกับบทความนี้สามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับการปรับปรุงโครงสร้างทางรถไฟในบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

คำสำคัญ: ตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน, แรงกระแทกของล้อที่กระทำต่อราง, สติฟเนส

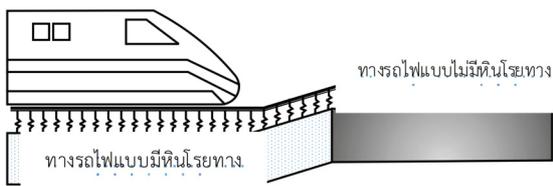
Abstract

Transition zone have a different track stiffness according to the various kind of railway track substructure. While trains passing through side of lower stiffness will cause settlement, which will affect the wheel-rail impact force. This force is the main cause of deterioration lead to damage of the railway so these areas require special maintenance, that resulting in expensive cost. However, the appropriated rail improve techniques will reduce the deterioration of railways and cost of maintenance. The improvement techniques, mechanical properties, related standards, and case studies from the State of Railway of Thailand are investigated in this article. The comparative study results obtained can be applied as a guideline for performance enhancement of the railway transition zone effectively.

Keywords: Transition Zone, Substructure, Wheel-rail impact force, Stiffness

1. บทนำ (Introduction)

ตำแหน่งระหว่างช่วงรอยต่อของทางรถไฟแบบใช้หินโรยทาง (Ballast track, Open track) กับทางรถไฟแบบไม่มีหินโรยทาง (Ballastless track) หรือ ทางรถไฟที่วางบนโครงสร้างคอนกรีต (Concrete track, Slab track) เช่น โครงสร้างสะพาน (Bridge) อุโมงค์ (Tunnel) หรือท่อทางลอดระบายน้ำ (Culvert) หรือเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสตีฟเนสของทางรถไฟในแบบทันทีทันใด จะเรียกว่า ตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน (Transition zones) [1-7] ซึ่งเกิดจากความไม่ต่อเนื่องกัน (Discontinuities) ของโครงสร้างใต้ทางรถไฟ [8] ดังแสดงในรูปที่ 1

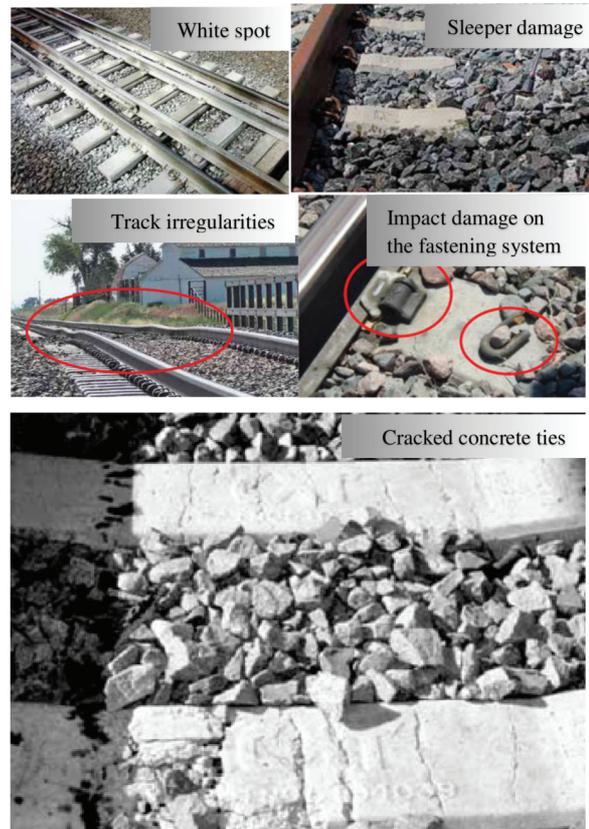


รูปที่ 1 ลักษณะของตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน (Transition zone) (ปรับปรุงจาก [2])

ทางรถไฟในบริเวณดังกล่าว จะมีลักษณะสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อ การสั่นสะเทือนต่อรถไฟอยู่ 2 ประการ คือ 1. การเปลี่ยนแปลงของสตีฟเนสในแนวตั้ง (Vertical stiffness) ของทางรถไฟ เนื่องจากโครงสร้างมีคุณสมบัติทางกล (Mechanical properties) แตกต่างกัน 2. ความแตกต่างของการทรุดตัว (settlement) ในชั้นโครงสร้างในส่วนล่างของทางรถไฟ (Sub structure) [8] โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างทางรถไฟแบบไม่มีหินโรยทางจะเกิดการทรุดตัวที่น้อยกว่าทางรถไฟแบบใช้หินโรยทาง [9] ดังนั้นเมื่อรถไฟวิ่งผ่านบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านจะเกิดการกระแทกที่ล้อขึ้นจากระดับผิวทางที่มีการยุบตัวที่ต่างกัน โดยสามารถรับรู้ได้จากการกระโดด (Bump) ของรถไฟ เนื่องจากการเปลี่ยนความเร่งในแนวตั้ง [7] และส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักกระทำ (Wheel load) ซึ่งจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสื่อมสภาพ และ ความเสียหายกับทางรถไฟอย่างรวดเร็ว [10, 11]

ลักษณะของการเสื่อมสภาพของทางรถไฟในบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านจะพบได้หลายรูปแบบ เช่น การเกิดฝุ่นขาว เนื่องจากการขัดสีระหว่างกันของหินโรยทาง (White spot) การทรุดตัวของทางรถไฟบนหินโรยทาง ความสามารถระบายน้ำลดลง การเกิดการกร่อนของหมอนเนื่องจากการขัดสีของหินโรยทางโดยรอบ หมอนคอนกรีตมีรอยร้าวเนื่องจากแรงกระแทก ลักษณะคลื่นบนหัวราง (Rail corrugation) ความไม่

สม่ำเสมอของรางตามยาว (Track irregularities) เนื่องจากพฤติกรรมทางพลวัตของระบบรถไฟ ตลอดจนหมุดยึดรางขาดเนื่องจากแรงดึงเพราะการทรุดตัวของทางรถไฟ เป็นต้น [2, 12-15] ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะความเสียหายที่บริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน [1]

ปัจจัยจากปัญหาในบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ 1. ปัญหาที่ตัวโครงสร้างทางวิ่งและส่งผลกระทบที่เกี่ยวข้องกับตัวรถไฟ และ 2. ปัญหาทางด้านเสียงและการสั่นสะเทือน ทั้งนี้ปัญหาที่เกิดขึ้น ในแต่ละหน่วยงานจะมีแนวทางหรือเทคนิคในการปรับปรุงบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านที่แตกต่างกัน โดยในประเทศไทยยังไม่มีมาตรฐานหรือการรวบรวมข้อมูลของการเทคนิคในการปรับปรุงฯ จึงทำให้ยังไม่มีข้อมูลด้านประสิทธิภาพและความเหมาะสมของการใช้วิธีการปรับปรุงในตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการรวบรวมเทคนิคการปรับปรุงสตีฟเนสของทางรถไฟในบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน และสรุปเป็นแนวทางของการประยุกต์ใช้ในประเทศไทยต่อไป

2. วัตถุประสงค์ (Objectives)

2.1 เพื่อรวบรวมเทคนิคและมาตรฐานในการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบันทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ

2.2 เพื่อเปรียบเทียบเทคนิคการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบันทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ

3. ผลการรวบรวมเทคนิคการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านที่มีในปัจจุบัน

ทางรถไฟโดยทั่วไปแล้วจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภท คือ ประเภทที่ 1 เป็นทางรถไฟแบบใช้หินโรยทาง (Ballast track) เป็นทางรถไฟที่ใช้กับรถไฟประเภทธรรมดา (Conventional) หรือเป็นทางรถไฟแบบดั้งเดิม (Classical track) โดยหินโรยทาง จะทำหน้าที่กระจายแรงจากหมอนลงชั้นดิน (Uniformly) รองรับแรงกระทำจากโครงสร้างทางรถไฟ, สามารถระบายน้ำได้ง่าย, เป็นเสมือนวัสดุที่สามารถยืดหยุ่นเพื่อรองรับแรงทาง พลวัตจากการกระทำของรถไฟ, รักษาเสถียรภาพของทางรถไฟ และยับยั้งการเจริญเติบโตของวัชพืช [16, 17] ประเภทที่ 2 โครงสร้างทางรถไฟแบบไม่ใช้หินโรยทาง (Ballastless track) หรือทางรถไฟแบบวางบนแผ่นพื้นคอนกรีต (Slab track หรือ Concrete track) ซึ่งจะแตกต่างจากทางวิ่งรถไฟแบบก่อนหน้า โดยมีการเปลี่ยนแปลงในส่วนของการหินโรยทาง และชั้นรองหินโรยทาง (Sub-Ballast) เป็นการเทคอนกรีตเพื่อเชื่อมกับตัวหมอนรถไฟที่เป็นหมอนคอนกรีต (Concrete sleeper) โดยทางประเภทนี้จะมีข้อดีที่ลดความสูงของโครงสร้างทาง มีเสถียรภาพที่ดีกว่าและมีอายุการใช้งานยาวนานกว่า อย่างไรก็ตามทางรถไฟชนิดนี้มีข้อด้อยคือ ราคาค่าก่อสร้างสูง ต้องใช้เทคนิคการก่อสร้างที่ซับซ้อนและมีผลกระทบจากเสียงที่ค่อนข้างรุนแรง สำหรับทางรถไฟระหว่างเมืองในปัจจุบันยังนิยมใช้ทางรถไฟชนิดมีหินโรยทางเป็นหลักในหลายๆประเทศ อาทิ สหรัฐอเมริกา จีน เกาหลีใต้และประเทศไทย เป็นต้น [18]

สติฟเนส (Track Stiffness) ที่ต่างกันกับทางรถไฟเป็นสาเหตุหลักของปัญหาที่เกิดขึ้นบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน โดยค่าดังกล่าวสามารถคำนวณได้โดยอัตราส่วนของแรงกดต่อระยะการหลุดตัวหรือการแอ่นตัวของรางดังแสดงในสมการที่ 1 [1, 19]

$$K = P/y \quad (1)$$

โดยที่ K คือ สติฟเนสของทางรถไฟ (Track stiffness)

P คือ น้ำหนักกระทำจากล้อรถไฟ (Wheel load)

y คือ การแอ่นตัวของราง (Rail deflection)

การแอ่นตัวของราง y จะใช้ทฤษฎีการคำนวณโมดูลัสของการยืดหยุ่นทางรถไฟ (Track modulus) ซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายกับคานที่วางบนพื้นดิน (Beam-on-elastic foundation) โดยที่การหาค่าการแอ่นตัว ณ ตำแหน่งใดๆ บนรางดังแสดงในสมการที่ 2

$$y(x) = -\frac{P \cdot \beta}{2u} \cdot e^{-\beta \cdot x} \cdot [\cos(\beta x) + \sin(\beta x)] \quad (2)$$

$$\text{และ } \beta = \left(\frac{u}{4EI_z}\right)^{\frac{1}{4}}$$

โดยที่ E คือ โมดูลัสของการยืดหยุ่นของราง (Modulus of elasticity of the rail)

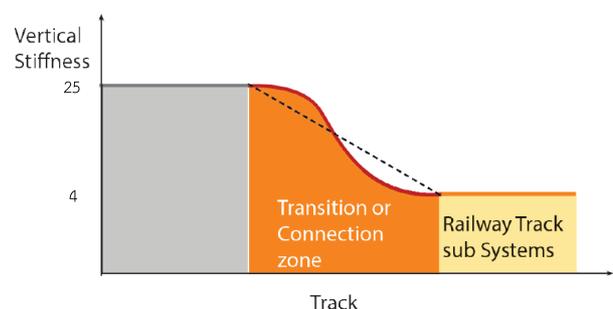
I_z คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของราง

u คือ ค่าโดยประมาณของโมดูลัสของทางรถไฟ

ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างสติฟเนสของทางรถไฟ (track stiffness) กับ โมดูลัสของทางรถไฟ (u) ดังแสดงในสมการที่ 3

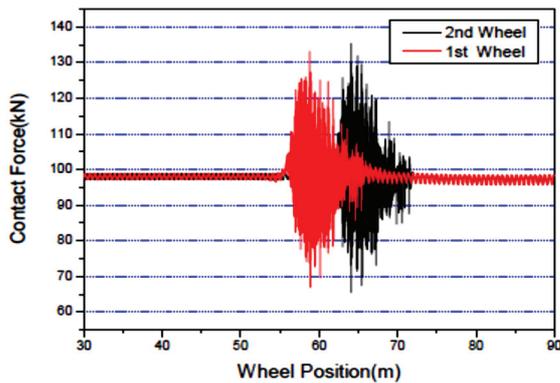
$$u = (k)^{4/3} / (64EI)^{1/3} \quad (3)$$

ทั้งนี้โดยทั่วไปทางรถไฟแบบมีหินโรยทางและไม่มีหินโรยทางจะมีสติฟเนสแตกต่างกันประมาณ 6 เท่าดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความแตกต่างของสติฟเนสแนวตั้ง [20]

การที่รถไฟวิ่งผ่านบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านจะส่งผลให้มีปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นซึ่งสามารถจำแนกออกได้เป็น 4 ปัจจัยได้แก่ 1. การเปลี่ยนแปลงของความสูงเพลาล้อแบบทันทีทันใด (Rapid changes of axle elevation) 2. การกระจายแรงที่แตกต่างกัน (Uneven load distribution) 3. มีแรงแบบกระแทก (Impact loads) และ 4. มีสติฟเนสที่สูง (High-stiffness) แต่ความหน่วงหรือการยืดหยุ่น (Low-damping) ของสะพานต่ำ [19] ซึ่งจะเกิดแรงที่กระทำต่อล้อและราง (Wheel-rail contact force) สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4

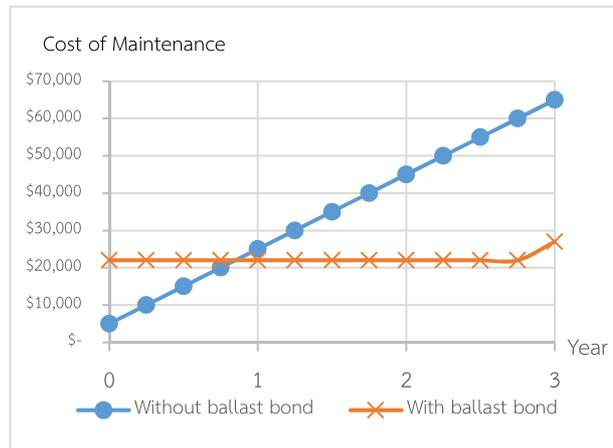


รูปที่ 4 แรงกระทำระหว่างล้อและรางบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน [10]

ทั้งนี้แม้ว่าตำแหน่งรอยต่อระหว่างทางรถไฟแบบใช้หินโรยทางกับทางรถไฟแบบไม่ใช้หินโรยทางหรือตำแหน่งเปลี่ยนผ่านจะเป็นเพียงบริเวณที่ไม่มาก แต่ตำแหน่งดังกล่าวจะเป็นต้นเหตุสำคัญของความเสื่อมสภาพของทางรถไฟ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวอาจนำไปสู่การลดลงของความสะดวกสบายของการโดยสาร (Riding Comfort หรือ Riding Index) และอาจทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยของการใช้เส้นทาง รวมทั้งทำให้ทางรถไฟเสื่อมสภาพลงอย่างรวดเร็ว[21] ตลอดจนส่งผลให้งบประมาณในการบำรุงรักษาทางรถไฟสูงขึ้นอีกด้วย [8, 11, 22] จากผลการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาสามารถสรุปเป็นแนวทางในการดำเนินการเพื่อลดผลกระทบบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านได้ดังนี้

- การลดพฤติกรรมทางพลวัตของทางรถไฟในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสตีฟเนส
- การเปลี่ยนสตีฟเนสให้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน
- การทำให้ค่าการทรุดตัวของทางรถไฟแบบมีหินโรยทางในบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านต่ำลง
- จัดทำความยาวของตำแหน่งเปลี่ยนผ่านที่เหมาะสมสำหรับการลดทอนการสั่น และเหมาะสมในด้านเศรษฐศาสตร์ โดยพิจารณาจากค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง และบำรุงรักษา [2, 6]

จากการรวบรวมข้อมูลยังพบอีกว่ารอบของการบำรุงรักษาของตำแหน่งเปลี่ยนผ่านจะอยู่ที่ 2 ถึง 8 ครั้งต่อทางรถไฟปกติ 1 ครั้ง [2, 3, 14] ดังนั้นจึงควรมีการจัดการตำแหน่งเปลี่ยนผ่านที่เหมาะสมเพื่อลดจำนวนรอบของการซ่อมบำรุงลง ดังจะเห็นได้จากผลการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ที่ได้รวบรวมไว้ในรายงานการบำรุงรักษาเส้นทางรถไฟในประเทศออสเตรเลีย ดังแสดงในรูปที่ 5 [23]



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบก่อน และ หลังการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน [23]

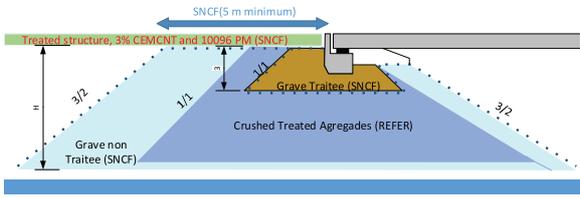
จากรูปที่ 5 พบว่าการปรับปรุงสตีฟเนสของทางวิ่งรถไฟจะสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงโครงสร้างทางรถไฟลงได้ประมาณ 3 เท่าตลอดระยะเวลา 3 ปี [24, 25]

เทคนิคที่ใช้ในการปรับปรุงในตำแหน่งเปลี่ยนผ่านจะมีปัจจัยที่ต้องพิจารณา 2 ปัจจัยคือ 1.ปรับปรุงฝั่งที่สตีฟเนสต่ำ กว่า (Soft side) 2.ลดสตีฟเนสแนวตั้ง (Vertical track stiffness) บนสะพาน [26-28] ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการในการปรับปรุงประสิทธิภาพบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านขึ้นมาหลายวิธี เช่น เพิ่มความยาวหมอน การลดระยะหมอน การใช้เทคนิคการฉีตพ่นวัสดุพอลิเมอร์ (Polymer) หรือ ใช้ยางมะตอยร้อน (Hot-Mixed Asphalt) ใช้พื้นปรับการทรุดตัว (concrete approach slabs) ใช้หินโรยทางบนสะพาน (Ballasted bridge decks) และใช้แผ่นยาง (Rail pad, Tie pads and Ballast mats) [19] โดยในแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 วิธีการปรับปรุงสตีฟเนสบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านสำหรับทางรถไฟด้วยการปรับปรุงชั้นดิน

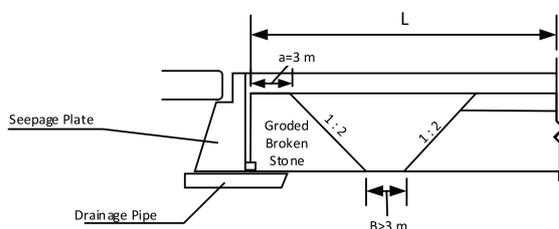
สำหรับวิธีการปรับปรุงสตีฟเนสบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านสำหรับทางรถไฟด้วยการปรับปรุงชั้นดินจะมีเทคนิคซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ คือ ปรับปรุงคุณสมบัติของดิน และปรับเปลี่ยนรูปแบบของชั้นดิน Luis Miguel Gouveia Coelho, 2015 [24] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านในชั้นดินเดิม (Soil subgrade section) โดยทำการปรับปรุงให้ลักษณะชั้นดินมีลักษณะคล้ายกับลิมด์ังแสดงในรูปที่ 6 และปรับปรุงคุณสมบัติของดินให้มีสตีฟเนสตามการออกแบบ เช่นในบริเวณที่ใกล้กับจุดต่อมอดับริม (Abutment) ของสะพานจะมีการปรับปรุงดินโดยการผสมซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 3 โดยเทคนิคนี้มีการนำไปประยุกต์ใช้กับเส้นทางสายโปรตุเกสตอนใต้

ในส่วนของโครงสร้างดินที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงจะอยู่ด้านบนสุด ติดชั้นหินโรยทาง มีช่วงความยาวประมาณ 4 เมตร ซึ่งเทคนิคของการปรับปรุงของประเทศโปรตุเกส และฝรั่งเศสบริเวณตำแหน่งหน้าสัมผัสระหว่างดินคันทางกับดินที่ไม่ได้ปรับปรุง จะใช้อัตราส่วนความเอียงเป็น 3:2 และส่วนที่ผสมซีเมนต์เป็นอัตราส่วน 1:1 ดังแสดงในรูปที่ 6



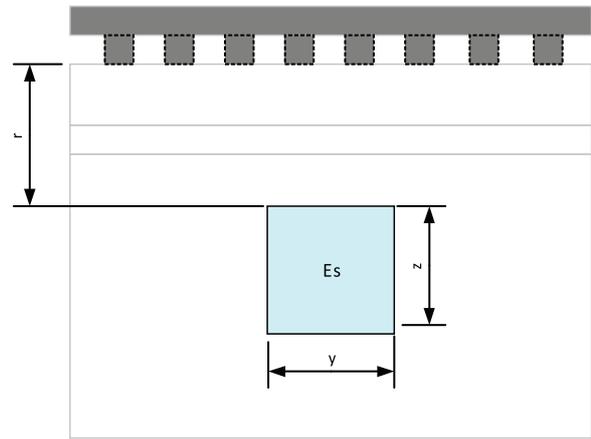
รูปที่ 6 เทคนิคการปรับปรุงสทิพเนสบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านสำหรับทางรถไฟด้วยการปรับปรุงชั้นดิน (ปรับปรุงจาก [24])

ทั้งนี้ในส่วนของประเทศจีนมีการพัฒนามาตรฐานของการออกแบบการปรับปรุงชั้นดิน เพื่อรองรับการพัฒนาเส้นทางรถไฟความเร็วสูง ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของการใช้ทางรถไฟประเภทแผ่นพื้นคอนกรีต และมีตำแหน่งที่เปลี่ยนผ่านจำนวนมากโดย Shan, Albers et al., 2013 [29] ได้ศึกษาผลทางพลวัตต่อความยาวของตำแหน่งเปลี่ยนผ่านของรูปแบบโครงสร้างชั้นดินซึ่งในประเทศจีนได้กำหนดมาตรฐานสำหรับการออกแบบลักษณะของชั้นดินในบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน สำหรับรถไฟความเร็วสูง ดังแสดงในรูปที่ 7



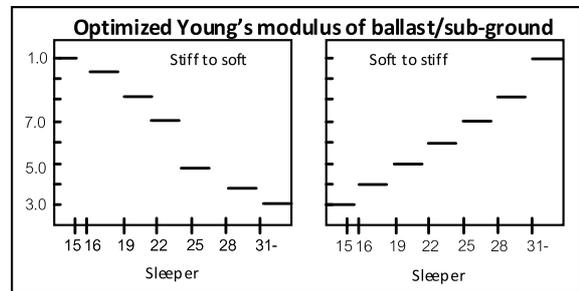
รูปที่ 7 ลักษณะของมาตรฐานการออกแบบตำแหน่งเปลี่ยนผ่านในประเทศจีนแบบ Two-part transition zone (ปรับปรุงจาก [29])

Wehbi, M., et al., 2013 [30] ได้ทำการศึกษาผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของมวลดินในรูปแบบต่างๆของชั้นดินเดิม (subgrade) ทั้งในด้านขนาดและความลึก ดังแสดงในรูปที่ 8 และ วิเคราะห์ปัจจัยที่เกิดขึ้นกับประสิทธิภาพของทางวิ่งรถไฟในตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน โดยในการศึกษาได้ทำการออกแบบโครงสร้างและระบบทางรถไฟด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) และพัฒนาแบบจำลองเป็นทางวิ่งรถไฟยาว 40 เมตรตามรูปแบบของโครงสร้างรถไฟ (ส่วนล่าง) ชนิด UK substructure



รูปที่ 8 การศึกษาปัจจัยของรูปทรงของมวลดินต่อพฤติกรรมทางพลวัตที่เกิดขึ้นในบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน (ปรับปรุงจาก [30])

นอกจากนี้ยังมีศึกษาการเปลี่ยนแปลงความยืดหยุ่นของมวลดินด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข [31] โดยทำการเปลี่ยนแปลงความยืดหยุ่นของมวลดิน โดยสมมติค่าจากค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (E) 30 เมกะปาสคาล ที่ตำแหน่งก่อนเข้าสะพาน 15 ช่วงหมอน (ระยะประมาณ 9 เมตร) และโมดูลัสความยืดหยุ่น (E) 100 เมกะปาสคาล ที่ตำแหน่งออกสะพานไปแล้ว 15 ช่วงหมอน ดังแสดงในรูปที่ 9 จากผลการศึกษาพบว่า สามารถลดแรงกระทำระหว่างล้อและรางได้ประมาณร้อยละ 4 หลังจากที่ได้ทำการปรับปรุงทางแล้ว



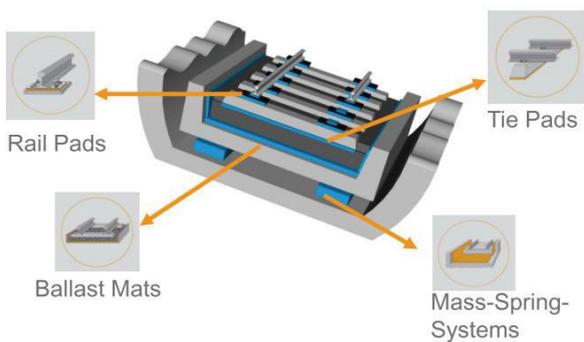
รูปที่ 9 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่น และ ระยะของตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน (ปรับปรุงจาก [31])

จากผลการทบทวนงานวิจัยจะพบว่าเทคนิคในการปรับปรุงชั้นดินบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านจะพิจารณาจากปัจจัยหลัก 2 ปัจจัย คือ 1.การปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น การผสมซีเมนต์ การผสมกรวด เป็นต้น และ 2.เทคนิคในการออกแบบรูปแบบของชั้นดิน เช่น ความลาดชัน เป็นต้น [11] อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้มีการนำไปใช้ในหลายประเทศทั้งประเทศฝรั่งเศส โปรตุเกส จีน และ สเปน รวมถึงมีวิธีการได้ระบุไว้ในมาตรฐาน UIC 719R [32] อีกด้วย แต่เนื่องจากกรรมวิธีการปรับปรุงสทิพเนสด้วยเทคนิคนี้จะต้องมีการวางแผนของการปรับปรุงตั้งแต่ก่อนเริ่มดำเนินการก่อสร้าง จึงอาจจะไม่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างทางรถไฟที่มีการ

ก่อสร้างแล้วเสร็จและเริ่มดำเนินการเปิดใช้งานเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

3.2 วิธีการปรับปรุงสภาพเสถียรภาพตำแหน่งเปลี่ยนผ่านสำหรับทางรถไฟด้วยการใช้แผ่นยาง

การใช้เทคนิคการปรับปรุงด้วยแผ่นยางในปัจจุบันได้มีการทดลองใช้ในประเทศทวีปยุโรป กับโครงสร้างทางรถไฟส่วนล่างที่มีฐานรองที่แข็งเพื่อลดทอนการเปลี่ยนรูป (Deformation) และการสึกหรอของหินโรยทาง [33, 34] ซึ่งคุณสมบัติของแผ่นยางจะช่วยลดเสียงและควบคุมการสั่นของทางรถไฟได้ [35] ทั้งนี้เทคนิคการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านด้วยการใช้แผ่นยางมีด้วยกันหลายลักษณะดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 เทคนิคการใช้แผ่นยางเพื่อปรับปรุงสภาพเสถียรภาพตำแหน่งเปลี่ยนผ่านสำหรับโครงสร้างทางรถไฟ [36]

Quirchmair, M. and H. Loy, 2016 [2, 36] ได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงสภาพเสถียรภาพของทางรถไฟที่ตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน โดยการใช้รูปแบบของแผ่นยางรองราง (Pad or Rail pad) ดังแสดงในรูปที่ 11



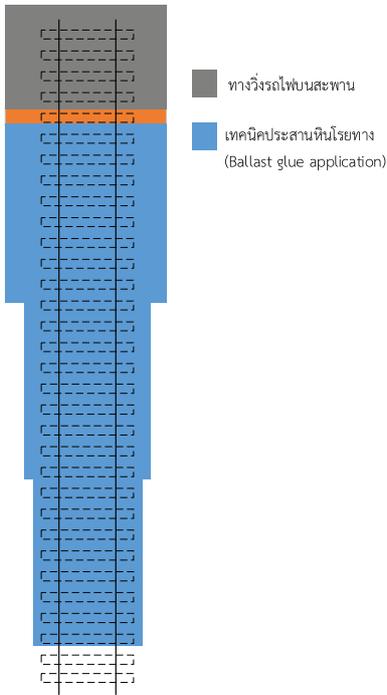
รูปที่ 11 เทคนิคการใช้แผ่นยางในการปรับปรุงสภาพเสถียรภาพตำแหน่งเปลี่ยนผ่านสำหรับทางรถไฟ

โดยใช้การวิเคราะห์แรงทางพลศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข จากแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์อิเลเมนต์พบว่า การปรับปรุงโครงสร้างทางรถไฟโดยใช้แผ่นยางสามารถช่วยลดแรงกระทำที่เกิดขึ้นที่โครงสร้างส่วนบนได้ประมาณร้อยละ 12.5

Dahlberg, 2010 [31] ได้ทำการศึกษาวิธีการปรับปรุงโครงสร้างทางรถไฟด้วยการใช้แผ่นยางโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยได้ทำการสมมติใช้แผ่นยางความหนา 20 มิลลิเมตร ติดบริเวณกึ่งกลางหมอนรองรางเหล็กใช้สตีเฟนส 5 ค่าคือ 10, 160, 130, 120 และ 180 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ (โดยใน 2 หมอนสุดท้ายจะเป็นค่าที่มีความแข็งสูงสุด) และทำการทดสอบโดยการใช้น้ำหนักเคลื่อนที่ (Moving load) พบว่าแผ่นยางสามารถช่วยลดแรงกระทำระหว่างล้อและรางได้ประมาณร้อยละ 5 ทั้งนี้เทคนิคการใช้แผ่นยางรองรางอาจจะต้องมีอุตสาหกรรมการผลิตที่เอื้อต่อการพัฒนา และการนำไปใช้งาน รวมถึงการพัฒนางานวิจัยในการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุให้เป็นไปตามที่ได้ออกแบบ

3.3 วิธีการปรับปรุงสภาพเสถียรภาพตำแหน่งเปลี่ยนผ่านสำหรับทางรถไฟด้วยการใช้วัสดุพอลิยูรีเทน

Sakdirat Kaewunruen, 2015 [23] ได้ศึกษาเทคนิคการปรับปรุงสภาพเสถียรภาพของทางรถไฟบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านโดยการใช้พอลิยูรีเทน (polyurethane) บริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านของสะพานในเมืองนิวเซาท์เวล (New South Wales) ประเทศออสเตรเลีย (Australia) โดยการฉีดยูรีเทน (Polyurethane) เพื่อเคลือบหินโรยทาง เป็นการฉีดยูรีเทนเต็มไหล่ทาง 6 หมอน ฉีดยูรีเทนเต็มไหล่ทาง 6 หมอน เฉพาะที่หมอนรองรางเพิ่มความยาวหมอนรองราง 6 หมอน และครึ่งความยาวหมอนอีก 6 หมอนดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 เทคนิคการปรับปรุงสตีเฟนสบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านสำหรับทางรถไฟด้วยการใช้พอลิยูรีเทนเคลือบหินโรยทาง (Glue Ballast) (ปรับปรุงจาก [23])

จากเทคนิคนี้พบว่าการใช้เทคนิคปรับปรุงทางรถไฟจากการใช้พอลิยูรีเทน ค่าการสั่นสูงสุด (Maximum amplitude) ของรางในตำแหน่งเปลี่ยนผ่านมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการยึดเกาะกันของหินโรยทาง (Ballast adhesion) ในขณะที่การสั่นที่เกิดขึ้นของหมอนรองรางมีค่าเท่าเดิม อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้จะช่วยลดการกระจายของหินโรยทาง และการขัดสีระหว่างกัน และสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาได้ประมาณ 1.7 ถึง 2.5 เท่าในระยะเวลา 3 ปี

ทั้งนี้ในส่วนของการนำไปประยุกต์ใช้เทคนิคการปรับปรุงสตีเฟนสบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านสำหรับทางรถไฟด้วยการใช้พอลิยูรีเทนอาจจะต้องมีการพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุให้เป็นไปตามการออกแบบ เช่น มีการทนทานต่อความร้อนหรือการลามไฟ ความสามารถให้น้ำสามารถซึมผ่านได้แต่ยังคุณสมบัติในการยึดประสานอย่างดีเป็นต้น รวมไปถึงการพิจารณาถึงการใช้อุปกรณ์เครื่องมือเฉพาะในการนำไปใช้ฉีดพ่นพอลิยูรีเทน เนื่องจากความร้อนของตัววัสดุ รวมถึงการควบคุมความหนาของการฉีดพ่นพอลิยูรีเทนลงไปที่หินโรยทางอีกด้วย

3.4 วิธีการปรับปรุงสตีเฟนสบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านสำหรับทางรถไฟด้วยการใช้รางเสริม

สำหรับหน่วยงานทางด้านระบบรางของประเทศเยอรมนี (The German Federal Railway) ได้มีการพัฒนาการออกแบบสำหรับเส้นทางรถไฟความเร็วสูงในเมือง (Inter City

Express : ICE) โดยในส่วนของการรางจะมีการติดตั้งกึ่งกลางระหว่างรางที่ใช้สำหรับให้รถไฟวิ่งจริงและในส่วนที่อยู่บริเวณทางรถไฟที่เป็นแบบหินโรยทาง [37] ซึ่งลักษณะการติดตั้งนี้จะเป็นข้อกำหนดของการก่อสร้างทางรถไฟซึ่งจะต้องมีการติดตั้งรางกันตก (Guard rails) ในบริเวณตำแหน่งที่อยู่บนสะพานและยื่นออกมาในบริเวณที่เป็นทางรถไฟแบบหินโรยทางซึ่งจะทำหน้าที่เป็นรางเสริม (Auxiliary rail) [1]

Y.S.Kang et al.,2014 [10] ได้ทำการวิจัยโดยใช้รางเสริม โดยทำการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ก่อนที่จะนำไปติดตั้ง ณ สถานการณ์การใช้งานจริง โดยลักษณะของตำแหน่งเปลี่ยนผ่านของทางรถไฟที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 13 เทคนิคการปรับปรุงสตีเฟนสบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านสำหรับทางรถไฟด้วยการใช้รางเสริม [10]

จากผลการศึกษาพบว่าการใช้เทคนิคการปรับปรุงสตีเฟนสบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านสำหรับทางรถไฟด้วยการใช้รางเสริม สามารถช่วยลดทอนแรงกระทำ ได้ประมาณร้อยละ 15

จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงสตีเฟนสบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านสำหรับทางรถไฟด้วยการใช้รางเสริมเป็นเทคนิคที่มีความซับซ้อนน้อย ใช้เวลาการดำเนินการติดตั้งไม่นาน และไม่ต้องใช้เครื่องมือเฉพาะ

3.5 วิธีการปรับปรุงสตีเฟนสบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านสำหรับทางรถไฟด้วยการขยายขนาดของหมอนรองรางรถไฟ

เทคนิคการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านจากการใช้ขนาดหมอนที่มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็นอีกเทคนิคหนึ่งในการปรับปรุงสตีเฟนส เพราะจะเพิ่มพื้นที่การกระจายแรง (Bearing area) สู่หินโรยทาง ทำให้น้ำหนัก แผ่นกระจาย ได้มากขึ้น โดยประสิทธิภาพของวิธีการนี้จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของหินโรยทางที่รองรับหมอนรองราง และต้องพิจารณาถึงการปรับปรุงใน

ชั้นดินคันทาง (Embankment) ให้มีพื้นที่มากยิ่งขึ้นในกรณีของสะพานแคบหรืออุโมงค์ [38]



รูปที่ 14 เทคนิคการปรับปรุงสตีฟในสบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านสำหรับทางรถไฟด้วยการขยายขนาดของหมอนรองรางรถไฟ[38]

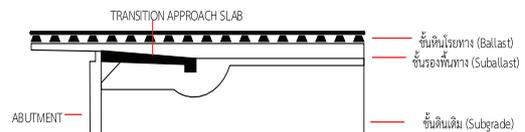
เทคนิคการปรับปรุงสตีฟในสบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านสำหรับทางรถไฟด้วยการขยายขนาดของหมอนรองรางรถไฟเป็นเทคนิคที่มีการใช้กันมาอย่างยาวนาน ความซับซ้อนในการติดตั้งน้อย (เหมือนกับการติดตั้งหมอนปกติ) และไม่ต้องใช้เทคโนโลยีในการผลิตที่สูงมาก

3.6 เทคนิคของการผสมผสานหลายเทคนิคของการปรับปรุงในบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน

การปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านให้มีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านก็คือ การใช้เทคนิคการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านด้วยการผสมผสาน (Combination) ของหลากหลายเทคนิควิธีสำหรับในส่วนที่เป็นโครงสร้างในชั้นบน (Superstructure) และ โครงสร้างในชั้นล่าง (Substructure) ทั้งนี้มีรูปแบบของการ ปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านระบุไว้ในมาตรฐาน UIC 719 R [39] ใ้ว่าการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านจะมีองค์ประกอบที่สำคัญก็คือ การมีคุณภาพของชั้นดินที่ดีหรือมีชั้นรองรับที่มีคุณภาพสูง ซึ่งการใช้เทคนิคการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านแบบผสมผสาน จะให้ผลของประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้เทคนิคการปรับปรุงฯ ในรูปแบบเดียว [8]

ปัจจุบันหลายๆพื้นที่ของบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านได้มีการปรับปรุงโดยใช้เทคนิคแบบผสมผสาน เช่น โครงการของ MRTA [40] ได้มีการใช้เทคนิคของการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านแบบการขยายขนาดหมอนรองรางรถไฟ (Variable length

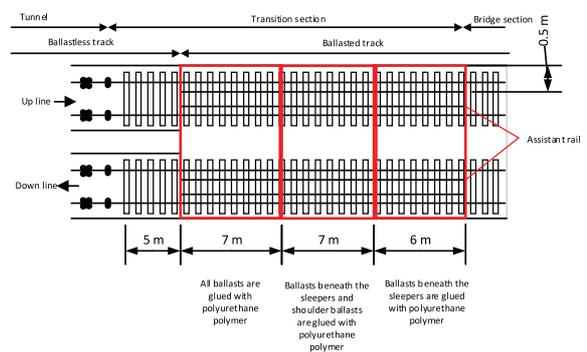
sleeper) ร่วมกับการใช้พื้นปรับการหลุดตัว ซึ่งการใช้รูปแบบของการผสมผสานจะสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาได้ถึง 3 เท่าเมื่อเทียบกับการปรับปรุงฯแบบปกติ อย่างไรก็ตามถึงแม้ในปัจจุบันมีการศึกษาเทคนิคการคำนวณผลทางพลวัตในเชิงตัวเลข ซึ่งได้มีการรวบรวมและแสดงผลการวิเคราะห์การปรับปรุงทางด้วยวิธีผสมผสานเทคนิคต่างๆ แต่การประยุกต์ใช้ในงานจริงยังพบค่อนข้างน้อย



รูปที่ 15 รูปแบบการปรับปรุงโครงสร้างส่วนบนบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน (ปรับปรุงจาก [8])

3.7 วิธีการปรับปรุงสตีฟในสบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านสำหรับทางรถไฟด้วยการใช้รางเสริม ร่วมกับ พอลิยูรีเทน

Zhao, C., et al.,2015 [41] ได้ทำการทดสอบ ณ เส้นทางรถไฟเซี่ยงไฮ้-คุนหมิง (Shanghai-Kunming) ที่รองรับความเร็ว 160 กม./ชม. มีระยะของตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน 25 เมตร โดยเทคนิคการปรับปรุงโครงสร้างทางรถไฟได้แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 1 ทำการฉีดพ่นพอลิยูรีเทนลงไปที่หินโรยทางและขั้นตอนที่ 2 คือติดตั้งเสริมยาว 25 เมตร ขนาดราง 60 กก./ม. โดยในบริเวณที่เป็นตำแหน่งเปลี่ยนผ่านแบ่งออกเป็น 3 ช่วง โดยช่วงที่ 1 ทำการเคลือบหินโรยทางทั้งหมดด้วยพอลิยูรีเทน ช่วงที่ 2 ทำการฉีดลงไปเฉพาะด้านใต้หมอนรองรางและไหล่ทาง และช่วงที่ 3 พ่นเคลือบเฉพาะด้านใต้หมอนรองรางรถไฟดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 16 รูปแบบของตำแหน่งเปลี่ยนผ่านทั้ง 3 ช่วง (ปรับปรุงจาก [41])

การติดตั้งเครื่องมือสำหรับการทดสอบครั้งนี้ได้ทำการติดตั้งเครื่องมือเพื่อวัดความเร่งในแนวตั้งของทางรถไฟซึ่งพบว่า ทางรถไฟแบบที่ไม่ได้มีเทคนิคการปรับปรุงฯแรงกระทำสูงสุดที่

เกิดขึ้นระหว่างล้อกับรางของล้อรถไฟทางด้านซ้ายและล้อทางด้านขวาเท่ากับ 72.79 และ 69.60 กิโลนิวตัน ตามลำดับ ในขณะที่หากใช้เทคนิคการปรับปรุงสตีฟเนสของทางรถไฟโดยใช้พอลิยูรีเทนแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างล้อและรางสูงสุดของล้อรถไฟทางด้านซ้ายและล้อทางด้านขวาเท่ากับ 63.60 และ 62.74 กิโลนิวตัน ซึ่งลดแรงกระทำระหว่างล้อและรางได้ประมาณร้อยละ 12.7 และ 9.86 ตามลำดับ และเมื่อใช้เทคนิคการปรับปรุงสตีฟเนสของทางรถไฟโดยใช้พอลิยูรีเทนร่วมกับรางเสริมแรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างล้อและรางสูงสุดของล้อรถไฟทางด้านซ้ายและล้อทางด้านขวาเท่ากับ 60.69 และ 60.74 กิโลนิวตัน (kN) ซึ่งลดแรงกระทำระหว่างล้อและรางได้ประมาณร้อยละ 15.4 และ 16.6 ตามลำดับ

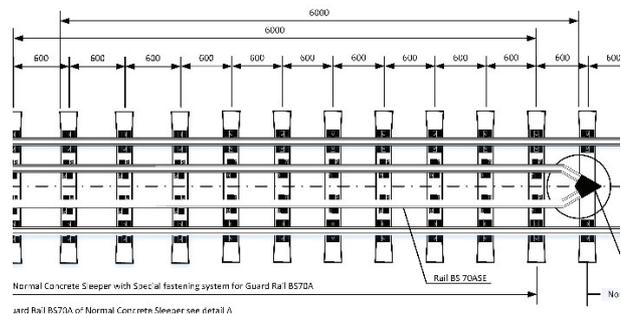
4. ผลการสำรวจบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านในประเทศไทย

ประเทศไทยมีตำแหน่งเปลี่ยนผ่านที่เกิดจากสะพาน อุโมงค์ และช่องน้ำรวมกันถึงประมาณ 5,900 จุด ตลอดสายทางประมาณ 4,300 กิโลเมตรของการรถไฟแห่งประเทศไทย อย่างไรก็ตามยังพบข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาและออกแบบการเพิ่มประสิทธิภาพของตำแหน่งเปลี่ยนผ่านของทางรถไฟในประเทศไทยอยู่น้อยมาก ซึ่งนักวิจัยได้ทำการสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลสภาพปัจจุบันของบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านในประเทศไทย โดยทำการสำรวจตำแหน่งเปลี่ยนผ่านบริเวณสะพาน และแบ่งความยาวสะพานออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ สะพานช่วงสั้น ความยาวประมาณ 5-15 เมตร สะพานช่วงความยาวปานกลาง ความยาวประมาณ 15-50 เมตร และ ความยาวสะพานที่มีความยาวมากกว่า 50 เมตร ขึ้นไป ดังแสดงในรูปที่ 17 เพื่อเก็บข้อมูลของลักษณะการปรับปรุงบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านต่อช่วงความยาวสะพานที่แตกต่างกันซึ่งพบว่า ทางรถไฟในบริเวณก่อนเข้าสะพานจะมีการติดตั้งรางเสริมที่อยู่ในบริเวณกึ่งกลางราง โดยทั่วไปจะเรียกว่ารางกันตก หรือ Guard rail มีหน้าที่เพียงป้องกันความเสียหายรุนแรงจากอุบัติเหตุจากกรณีรถไฟตกรางในช่วงสะพาน เช่น รถไฟหลุดรางกระแทกกับโครงเหล็กด้านข้างสะพาน และเพื่อป้องกันการเก็บกู้รถไฟ โดยไม่ได้ออกแบบเพื่อลดการสั่นสะเทือนบริเวณดังกล่าวแต่อย่างใด ทั้งนี้ขนาดความยาวของรางกันตกความเหมาะสมต่างๆเป็นไปตามแบบมาตรฐานของการรถไฟแห่งประเทศไทย



รูปที่ 17 การติดตั้งรางเสริมระหว่างรางบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่านของเส้นทางรถไฟระหว่างเมืองในประเทศไทย

จากผลการสำรวจยังพบอีกว่าการติดตั้งรางกันตกบนสะพานช่วงสั้นจะติดตั้งรางกันตกที่อยู่เฉพาะในช่วงสะพาน ช่วงความยาวปานกลางจะติดตั้งรางกันตกขึ้นมาในทางรถไฟที่มีหินโรยทางความยาวประมาณ 15 เมตร อย่างไรก็ตามจากข้อมูลของการรถไฟแห่งประเทศไทยได้มีแบบการติดตั้งรางกันตกซึ่งใช้รางขนาด BS70 ASE และความยาวที่ยื่นออกมาจากสะพานประมาณ 6 เมตรดังแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 18 แบบก่อสร้างรางกันตก (Guard Rail)

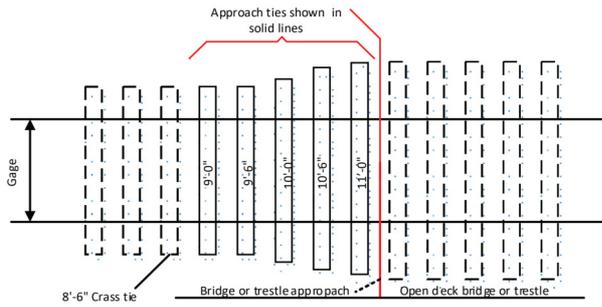
จากผลการรวบรวมข้อมูลของเทคนิคการปรับปรุงในบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน ซึ่งมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ทั้งคุณสมบัติทางกล พื้นที่ศึกษา ความยาวของการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน และประสิทธิภาพในแต่ละเทคนิค สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 1

5. มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน

มาตรฐานของเทคนิคการปรับปรุงโครงสร้างทางรถไฟในบริเวณรอยต่อระหว่างทางรถไฟแบบใช้หินโรยทางและทาง

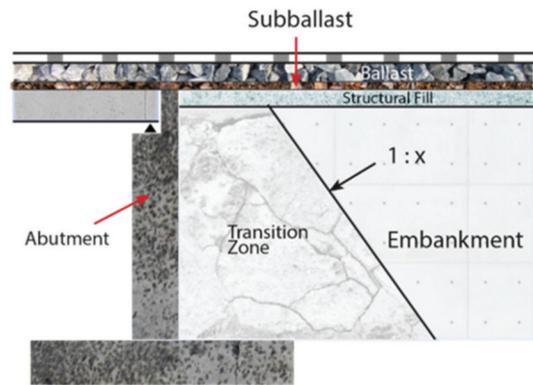
รถไฟแบบไม่ใช้หินโรยทางได้มีระบุไว้ในมาตรฐานสากลและมาตรฐานระดับประเทศดังนี้

5.1 คู่มือของการวางแผนก่อสร้างทางรถไฟ AREMA 2005a [42] ใช้เทคนิคของการปรับปรุงคือการขยายขนาดของหมอนรองรางรถไฟ โดยเพิ่มขนาดจากหมอนรองปกติ ขนาด 8 ฟุต 6 นิ้ว (260 ซม.) เพิ่มขึ้นครึ่งละ 6 นิ้ว (15 ซม.) และ ขนาดหมอนสุดท้ายที่ติดกับโครงสร้างสะพานมีขนาด 11 ฟุต (335 ซม.) ดังแสดงในรูป 19

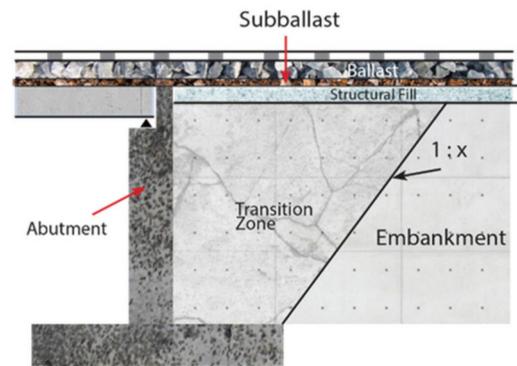


รูปที่ 19 มาตรฐานการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านของ AREMA Plan Number.913-52 (ปรับปรุงจาก [1])

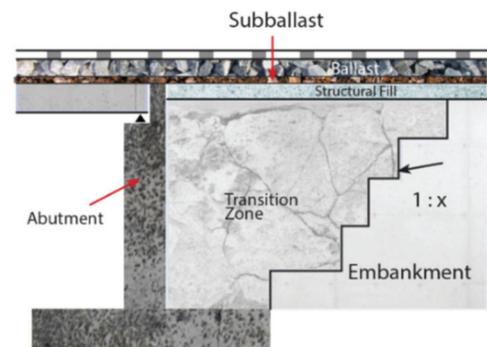
5.2 มาตรฐาน UIC 719R [32] ได้มีการระบุปัจจัยของการเกิดพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในตำแหน่งเปลี่ยนผ่านไว้แบบกว้าง ซึ่งประกอบด้วย 1.ตอม่อตบรีม (Abutment) 2.ขั้นตอนการดำเนินงานก่อสร้าง 3.ความเร็วของรถไฟ 4.ความสูงของดินคันทาง และ 5.ค่าที่ยอมให้ของความต่างระดับการทรุดตัว โดยคำแนะนำในตำแหน่งเปลี่ยนผ่านที่ระบุไว้คือ การบดอัดชั้นดินที่ดี การใช้ซีเมนต์ผสมกับวัสดุในโครงสร้างทางรถไฟเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ และ จัดการระบบการระบายน้ำให้มีประสิทธิภาพ โดยการออกแบบความลาดชันของการเปลี่ยนแปลงชั้นดิน (Slope) บริเวณจุดเปลี่ยนผ่าน มี 3 วิธีที่แนะนำคือ SNCF Method ของประเทศฝรั่งเศส (France's National State owned Railway Company) MAV Method ของประเทศฮังการี (Hungarian Railway) และ DB Method ของประเทศเยอรมัน (German National Railway) ดังแสดงในรูปที่ 20



ก. ลักษณะตำแหน่งเปลี่ยนผ่านแบบ SNCF Method



ข. ลักษณะตำแหน่งเปลี่ยนผ่านแบบ MAV Method



ค. ลักษณะตำแหน่งเปลี่ยนผ่านแบบ DB Method

รูปที่ 20 มาตรฐานการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านของ UIC 719R

ทั้งนี้ จะเห็นว่าในต่างประเทศเทคนิคการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านได้มีการระบุเป็นมาตรฐานสำหรับการก่อสร้างทางรถไฟเพื่อลดความเสื่อมสภาพในบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน อย่างไรก็ตามประเทศไทยปัจจุบันมีจำนวนสะพานและช่องน้ำทั้งสิ้นประมาณ 5,900 ตำแหน่ง แต่ยังไม่มีความมาตรฐานกลางที่ระบุเกี่ยวกับเทคนิคในการก่อสร้างบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน ซึ่งอาจจะต้องเร่งดำเนินการพัฒนามาตรฐานขึ้น โดยอาจต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศ ลักษณะทางกายภาพของชั้นดิน ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ และเทคนิควิธีในการปรับปรุงที่เหมาะสมต่อไป

6. สรุปผลการศึกษา

จากผลการรวบรวมเทคนิคการปรับปรุงในบริเวณตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน ปัญหาที่เกิดขึ้น คุณสมบัติทางกลและประสิทธิภาพในแต่ละเทคนิค รวมถึงมาตรฐานที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ดังนี้

6.1 เทคนิคการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านที่มีการใช้ในปัจจุบันจะพบว่าแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การปรับปรุงในโครงสร้างส่วนล่าง คือการปรับปรุงคุณภาพ และ รูปแบบชั้นดินเป็นต้น และการปรับปรุงโครงสร้างส่วนบนคือการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุ คุณสมบัติทางกล และการใช้วัสดุเสริมเพื่อปรับปรุงตามแต่ละองค์ประกอบของโครงสร้าง อย่างเช่น การเพิ่มขนาดราง การใช้แผ่นยาง การฉีดพ่นพอลิยูรีเทน เป็นต้น ทั้งนี้ในส่วนของเทคนิคการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านที่มีการระบุไว้ในมาตรฐานต่างๆจะพบว่า มีมาตรฐานสากลที่ระบุถึงการออกแบบในตำแหน่งเปลี่ยนผ่านจาก 2 มาตรฐานคือ AREMA ที่ระบุถึงการปรับขนาดของหมอนให้มีขนาดยาวขึ้นเมื่ออยู่บริเวณทางรถไฟที่วิ่งขึ้นสะพาน กับ UIC719R ที่ระบุในส่วนของการปรับปรุงโครงสร้างชั้นดิน ทั้งนี้ในแต่ละประเทศก็จะมีพัฒนาเทคนิคของตำแหน่งเปลี่ยนผ่านที่แตกต่างกันออกไป อย่างเช่นที่ประเทศจีนจะใช้เทคนิควิธีการปรับรูปแบบของชั้นดิน (Two-part Transition Zone) รวมถึงในประเทศฝรั่งเศส ฮังการี เยอรมันที่ระบุถึงข้อกำหนดในการออกแบบ

ตำแหน่งเปลี่ยนผ่านที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เทคนิคการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านที่มีการใช้ในประเทศไทยจากการสืบค้นข้อมูล และการลงสำรวจพื้นที่จริงพบว่า จะใช้เทคนิคที่เป็นพื้นฐานของคำแนะนำการออกแบบจากของประเทศเยอรมนี (The German Federal Railway) คือการใช้รางกันตกจากในโครงสร้างสะพานยื่นมาในส่วนของทางรถไฟบนชั้นดินคันทาง ซึ่งทำหน้าที่คล้ายกับรางเสริม แต่อย่างไรก็ตามยังไม่พบข้อมูลของประเทศไทยที่ระบุถึงเทคนิคในการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านที่มีการใช้งานในปัจจุบัน

6.2 จากเปรียบเทียบเทคนิคการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่านที่มีการใช้งานในปัจจุบันพบว่า ในแต่ละเทคนิคจะมีกระบวนการในการตรวจสอบการวัดแรงกระทำจากล้อกับรางออกเป็นหลากหลายลักษณะ เช่น แรงกระทำของล้อกับราง การสั่นของราง การสั่นของหมอน การสั่นของพื้นคอนกรีต ซึ่งหากพิจารณาในเฉพาะรูปแบบของแรงที่กระทำระหว่างล้อกับราง (Wheel-Rail contact force) จะพบว่าเทคนิคการปรับปรุงแบบไม่ผสมผสานจะมีความสามารถในการลดทอนแรงกระทำระหว่างล้อและรางอยู่ระหว่างร้อยละ 6 ถึง 13 ในขณะที่เทคนิคของการผสมผสานสามารถจะให้ผลของการลดทอนแรงกระทำเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 25 ดังนั้นเทคนิควิธีการผสมผสานหลายวิธีจึงเป็นเทคนิคที่ควรจะไปศึกษาพัฒนาต่อไป

อย่างไรก็ดี การประยุกต์ใช้เทคนิคต่างๆจะต้องคำนึงถึงปัญหาและอุปสรรคที่อาจเกิดในการก่อสร้างจริง ซึ่งเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงโครงสร้างส่วนล่างอาจจะไม่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างทางรถไฟที่มีการก่อสร้างแล้วเสร็จและเริ่มดำเนินการเปิดใช้งานเป็นที่เรียบร้อยแล้ว เนื่องจากจะต้องดำเนินการปิดการเดินรถไฟขณะดำเนินการ ทั้งนี้ในปัจจุบันมีเทคนิคที่มีการปรับเฉพาะในโครงสร้างส่วนบนหลากหลายวิธีซึ่งสามารถดำเนินการได้โดยรวดเร็ว โดยจะต้องมีการวิจัยเพื่อหาความเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้กับประเทศไทยต่อไป

ตารางที่ 1 สรุปผลการรวบรวมรูปแบบและประสิทธิภาพในแต่ละเทคนิค

เทคนิคการปรับปรุงตำแหน่งเปลี่ยนผ่าน	งานวิจัย	พื้นที่ศึกษา	ความยาวช่วง เบี่ยงผ่าน (เมตร)	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) (ตามชนิดวัสดุ)	ประสิทธิภาพของการ ลดทอนแรงกระทำระหว่าง ล้อและราง (ประมาณร้อยละ)
เทคนิคการปรับปรุงชั้นดิน	Yao Shan, 2013 [29]	จีน (China)	30	65 เมกะปาสคาล (Mpa)	13 (Vertical Acceleration of Slab)
เทคนิคการใช้แผ่นยาง	Quirchmair, M., 2015 [2] Quirchmair, M., 2016 [3] Dahlberg, T. [31]	เม็กซิโก (Mexico) N/A	15 27	N/A 30 เมกะปาสคาล (Mpa)	12.5 6-8
เทคนิคการประสานหินโรยทาง(พอลิยูรีเทน)	Sakdirat Kaewunruen, 2015 [23] Zhao, C., et al., 2015 [41]	ออสเตรเลีย (Australia) จีน (China)	13.8 25	N/A Tensile Strength 20 Mpa Compression Strength 40 Mpa	N/A 17 (Vertical Acceleration of Rail)
เทคนิคการใช้รางเสริม	Y.S.Kang, et al. (2014) [10]	เกาหลีใต้ (South Korea)	25	สถิติในตารางเสริม 3090×10 ⁸ (กิโลนิวตัน (kN)/ม ⁴)	16
เทคนิคการขยายขนาดของหมอนรองรางรถไฟ	Inmculada Gallego, 2012 [11]	โปรตุเกส (Portugal)	20	3680 – 8000 เมกะปาสคาล (Mpa)	N/A
เทคนิคการใช้รางเสริมร่วมกับพอลิยูรีเทน	Zhao, C., et al., 2015 [41]	จีน (China)	25	N/A	25
การใช้รางกันตก (Guard rail) จากในโครงสร้างสะพานยื่นมาใน ส่วนของทางรถไฟบนชั้นดินคันทาง ซึ่งทำหน้าที่คล้ายกับรางเสริม	ข้อมูลการสำรวจเส้นทางรถไฟระหว่างเมือง (Intercity Rail) ของการรถไฟแห่งประเทศไทย	ไทย (Thailand)	ไม่แน่นอน	N/A	N/A

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร และ สถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมถนนและระบบราง ที่เอื้อเพื่อข้อมูลและทุนสนับสนุนจนทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

8. อ้างอิงอ้างอิง

- [1] Jenks, C. W. (2006). Design of track transitions. Transportation Research Board.
- [2] Quirchmair, M., & Loy, H. (2015). Managing Track Stiffness in Transition Zones. *Railway Gazette International*.
- [3] Quirchmair, M., & Loy, H. (2016). Optimization at track transition zones by specially engineered PU pads. *Rail Business*[Focus-India].
- [4] COELHO, E. Z. (2011). Dynamics of railway transition zones in soft soils. (Doctor), University of Porto, Portugal, Portugal.
- [5] Optimisation of Transition Zones. (2016). In gatzner (Ed.).
- [6] Cristina Alves Ribeiro, Rui Calçada, & Delgado, R. (2017). Experimental assessment of the dynamic behaviour of the train-track system at a culvert transition zone. *Engineering Structures*, 138 215–228.
- [7] SHAHBAZ RASHID. (2011). Parametric study of bridge response to high speed trains : Ballasted track on concrete bridges. (Master of Science Thesis), KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden
- [8] Sañudo, R., dell'Olio, L., Casado, J. A., Carrascal, I. A., & b, S. D. (2016). Track transitions in railways: A review. *Construction and Building Materials*, 112, 140–157.
- [9] Sañudo, R., Miranda, M., Markine, V., & dell'Olio, L. (2016). The Influence of Train Running Direction and Track Supports Position on The Behaviour of Transition Zones. *Transportation Research Procedia*, 18, 281 – 288. doi:10.1016/j.trpro.2016.12.037
- [10] Y.S.Kang, Yang, S. C., Lee, H. S., Kim, Y. B., Jang, S. Y., & Kim, E. (2014). A Study of Track and Train Dynamic Behavior of Transition Zone Between Concrete Slab Track and Ballasted Track.
- [11] Inmculada Gallego, Santos Sánchez-Cambronero, & Rivas, A. (2012). Criteria for Improving the Embankment- Structure Transition Design in Railway Lines. *Infrastructure Design, Signalling and Security in Railway*, 355-374.
- [12] Roberto Sañudo, Mikel Cerrada, Borja Alonso, & dell'Olio, L. (2017). Analysis of the influence of support positions in transition zones. A numerical analysis. *Construction and Building Materials*, 145, 207–217.
- [13] Ngoc Trung Ngo, & Buddhima Indraratna. (2016). Improved Performance of Rail Track Substructure Using Synthetic Inclusions: Experimental and Numerical Investigations. *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.*, 2(24). doi:10.1007/s40891-016-0065-3
- [14] José N. Varandas, Paul Hölscher, & Manuel A.G. Silva. (2011). Dynamic behaviour of railway tracks on transitions zones. *Computers and Structures*, 89, 1468–1479.
- [15] Yohannes, T. (2015). Effect of Track Stiffness Variation on the Dynamic Response of Passenger Vehicle. Addis Ababa University.
- [16] Coenraad Esveld. (2001). MODERN RAILWAY TRACK (Second Edition ed.). Delft University of Technology: MRT-Productions, Netherlands.
- [17] Selig, E. T., & Waters, J. M. (1994). Track geotechnology and substructure management.
- [18] Coenraad Esveld. (2010). Recent Developments in High-Speed Track. First International Conference on Road and Rail Infrastructure, Croatia.
- [19] Timothy D. Stark, Stephen T. Wilk, & Rose, J. G. (2016). Design and Performance of Well-Performing Railway Transitions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. doi:10.3141/2545-03
- [20] Giannakos, K. and S. Tsoukantas, Transition Zone between Ballastless and Ballasted Track: Influence of Changing stiffness on acting forces. *SciVerse ScienceDirect*, 2012. 48: p. 3548-3557.
- [21] Real, T., Zamorano, C., Hernández, C., Garcia, J. A., & Real, J. I. (2016). Static and Dynamic Behavior of Transitions between Different Railway Track Typologies. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(4), 1356-1364.
- [22] Eric Berggren. (2010). Railway Track Stiffness Dynamic Measurements and Evaluation for Efficient Maintenance. (Doctoral Thesis), KTH Engineering Science.
- [23] Sakdirat Kaewunruen. (2015). Impact damage mechanism and mitigation by ballast bonding at railway bridge ends. *The International Journal of Railway Technology*. doi:10.4203/ijrt.3.4.x

- [24] Luis Miguel Gouveia Coelho. (2015). Structure/Embankment Transitions in Railway Infrastructures Behaviour and National and International Practices. Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico, P-1049-1001.
- [25] Powrie, W. (2015). Understanding and improving the track system. *Railway Gazette International*.
- [26] Li, D., D. Otter, et al. (2010). Railway bridge approaches under heavy axle load traffic: problems, causes, and remedies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F-Journal of Rail and Rapid Transit*, 224(F5), 383-390. doi:10.1243/09544097jrtr345
- [27] Li, D. Q., & D. Davis. (2005). Transition of railroad bridge approaches. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(11), 1392-1398.
- [28] Mishra, D., E. Tutumluer, et al. (2012). Investigation of differential movement at railroad bridge approaches through geotechnical instrumentation. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 13(11), 814-824. doi:10.1631/jzus.A12ISGT7
- [29] Yao Shan, Bettina Albers, & Savidis, S. A. (2013). Influence of different transition zones on the dynamic response of track-subgrade systems. *Computers and Geotechnics*, 48, 21-28.
- [30] Wehbi, M., Burrow, D. M., Ghatoara, D. G., & Shi, D. J. (2013). Investigating the Effects of Soft Spots on the Functional and Structural Condition of a Railway Track.
- [31] Dahlberg, T. (2010). Railway Track Stiffness Variations – Consequences and Countermeasures. *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 8(No. 1).
- [32] UIC-719-R. (2015a). Earthworks and track bed construction for railway lines leaflets and Reports (pp. 114).
- [33] Nimbalkar S, & B, I. (2016). Improved performance of ballasted rail track using geosynthetics and rubber shockmat. *J Geotech Geoenviron Eng*, 142(8).
- [34] Lakus̃i S, Ahac M, & I, H. (2010). Experimental investigation of railway track with under sleeper pad. *Proceedings of the 10th Slovenian road and transportation congress*, 386–393.
- [35] Auersch L. (2006). Dynamic axle loads on tracks with and without ballast mats: numerical results of three-dimensional vehicle-track-soil models. *Proc Inst Mech Eng F*, 220(2), 169–183.
- [36] Quirchmair, M. (2016). Elasticity in Railway Superstructure: Managing Track Stiffness in Transition Zones and Turnouts.
- [37] Kerr, A. D., & B. E. Moroney. (1993). Track Transition Problems and Remedies. *American Railway Engineering Association*, 742, 267–298.
- [38] Lund, H., & Åswårdh, A. (2014). Transition zones between ballasted and ballastless tracks. *Lund University*.
- [39] UIC-719-R. (2015b). Earthworks and track bed construction for railway lines, UIC leaflets and Reports (pp. 114).
- [40] Read, D., & Li, D. (2006). Design of track transitions. *TCRP Research Results Digest*, 79.
- [41] Zhao, C., Wang, P., Yi, Q., & Meng, D. (2015). Application of Polyurethane Polymer and Assistant Rails to Settling the Abnormal Vehicle-Track Dynamic Effects in Transition Zone between Ballastless and Ballasted Track. *Hindawi Publishing Corporation, Shock and Vibration*(Article ID 826362), 9. doi:http://dx.doi.org/10.1155/2015/826362
- [42] AREMA. (2005a). Plan 913-52 Portfolio of Trackwork Plans.