

บทคัดย่อ

การปรับปรุงทางรถไฟเพื่อยกระดับความเร็วของรถไฟในการให้บริการถือเป็นเรื่องที่กำลังได้รับความสนใจทั่วโลก ทั้งนี้เนื่องจากการขนส่งระบบรางกำลังกลายเป็นระบบการขนส่งหลักที่สำคัญในอนาคต เนื่องด้วยเป็นการขนส่งที่ใช้พลังงานน้อย มีความปลอดภัยสูง มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และคุ้มค่ากว่าเมื่อเทียบกับระบบขนส่งทางถนน และทางอากาศ อย่างไรก็ตาม ด้วยขีดจำกัดของโครงสร้างพื้นฐานที่รองรับการขนส่งระบบรางในยุคก่อนได้ถูกออกแบบและก่อสร้างเพื่อรองรับการให้บริการในการขนส่งสินค้า และผู้โดยสารที่ความเร็วในการให้บริการที่ไม่สูงมากนัก ดังนั้นการที่จะนำรถไฟที่มีประสิทธิภาพสูงที่สามารถทำความเร็วได้สูงขึ้นมาวิ่งในโครงสร้างทางรถไฟเดิมจำเป็นจะต้องพิจารณาปัจจัยทางวิศวกรรมที่อาจจะส่งผลกระทบต่อความปลอดภัย และความสะดวกสบายของผู้โดยสารในการให้บริการให้เป็นไปตามมาตรฐานบทความนี้จะทำการรวบรวมปัจจัยทางวิศวกรรมที่ต้องคำนึงถึง ในการดำเนินการเพื่อการยกระดับความเร็วของรถไฟ ซึ่งให้เห็นถึงข้อจำกัดด้านต่าง ๆ อันอาจซึ่งเป็นอุปสรรคในการยกระดับความเร็วของรถไฟ โดยทำการรวบรวมจากงานวิจัย และถอดบทเรียนในการดำเนินการที่ผ่านมาของประเทศต่าง ๆ เพื่อการเรียนรู้ และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการพัฒนาระบบรางของประเทศไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

มุมมองทางวิศวกรรม

ในการยกระดับความเร็วของรถไฟ

Engineering Viewpoint in Raising the Speed of Railway



1. บทนำ

ในการยกระดับความเร็วของการเดินรถของระบบรางนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงสมรรถภาพของทั้งระบบซึ่งประกอบไปด้วยสามส่วนคือ 1) โครงสร้างพื้นฐาน (infrastructure) 2) ตัวยาน (train) และ 3) ระบบการจัดการ (operation system) ทั้งนี้ในการยกระดับความเร็วจะต้องมีการปรับปรุงระบบให้สามารถรองรับความเร็วที่เพิ่มขึ้นทั้งในด้านค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และที่สำคัญที่สุดคือความปลอดภัย ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของปัจจัยต่าง ๆ ที่ต้องคำนึงถึงเมื่อต้องการยกระดับความเร็วของการเดินรถ

อย่างไรก็ตามหากพิจารณาถึงการสั่นสะเทือน (vibration) และเสถียรภาพ



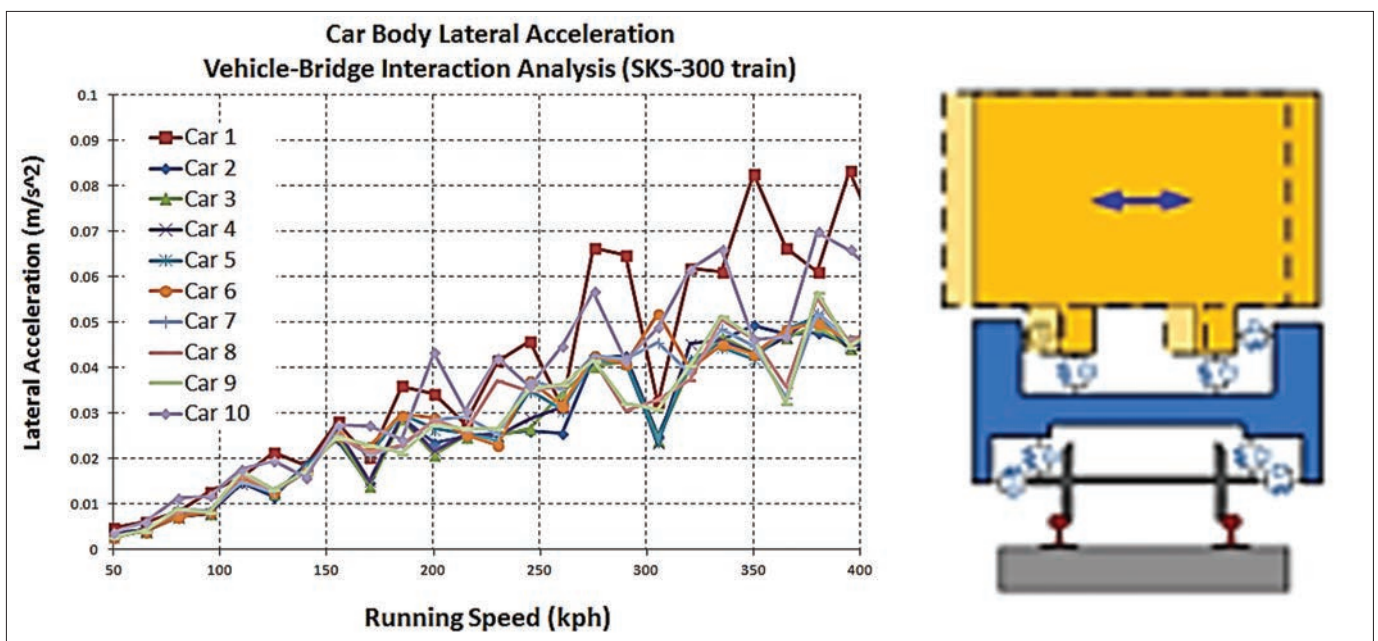
(stability) ของรถไฟซึ่งมีผลโดยตรงต่อความปลอดภัย (safety) และความสามารถในการใช้งานได้ของระบบ (serviceability) [2,4] จะพบว่ามีปัจจัยหลักดังนี้

- ◆ ปัจจัยจากโครงสร้างที่รองรับทางวิ่ง (roadbed) เช่น คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของ คันทาง สะพาน และอุโมงค์ เป็นต้น
- ◆ ปัจจัยจากตัวทางวิ่ง (track) เช่น รัศมีโค้ง ความไม่ราบเรียบของทางวิ่ง ชุดประแจ ชนิดของราง หินโรยทาง คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของทางวิ่ง เป็นต้น
- ◆ ปัจจัยจากตัวรถไฟ (train) เช่น คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของตัวรถไฟ และชุดช่วงล่าง รวมทั้งพฤติกรรมการสัมผัสกันระหว่างล้อ และราง เป็นต้น

โดยปกตินั้น การสั่นสะเทือนของรถไฟจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความเร็ว [1,2] กล่าวคือหากใช้ความเร็วที่สูงขึ้นการสั่นสะเทือนของตัวรถไฟจะมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 1 แสดงถึงความเร่งทางด้านข้างของตัวรถไฟที่มีค่าสูงขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความเร็วที่เพิ่มขึ้นยังมีผลให้แรงทางพลศาสตร์ต่าง ๆ ที่กระทำต่อตัวรถไฟ เช่น แรงหนีศูนย์กลาง แรงกระแทก มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย [1,2,6,12] ซึ่งแรงเหล่านี้จะมีผลทำให้เสถียรภาพของตัวรถไฟนั้นลดลง ดังนั้นหากพิจารณาถึงการเพิ่มความเร็วในการเดินรถ วิศวกรจะต้องนำปัจจัยต่าง ๆ ดังกล่าวไว้ข้างต้นไปใช้วางแผน และออกแบบระบบเพื่อให้สามารถยกระดับความเร็วของรถไฟได้ตามต้องการ โดยมีความปลอดภัย และความสามารถในการใช้งานได้อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ [3,4,6,10,11]

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วของรถไฟ [13]

โครงสร้างพื้นฐาน	ตัวรถ	ระบบการจัดการ
<ul style="list-style-type: none"> • ลักษณะทางกายภาพ-Geometry (รัศมีโค้ง ช่วงรอยต่อระหว่างทางตรง และทางโค้ง ระยะห่างระหว่างทางวิ่ง ระยะห่างระหว่างสถานี โค้งแนวตั้งและความลาดชัน) • โครงสร้างทาง-Roadbed (คันทาง สะพาน และอุโมงค์) • ทางวิ่ง-Track (ประแจ ราง แผ่นพื้น ไม้หมอน และหินโรยทาง) • ระบบจ่ายไฟฟ้า-Catenary system • ระบบอาณัติสัญญาณ-Signaling system • สภาพแวดล้อม-Environment (ระดับของเสียงและการสั่นสะเทือน) 	<ul style="list-style-type: none"> • กำลังขับเคลื่อน-Traction • ระบบเบรก-Brake • เสถียรภาพขณะวิ่งด้วยความเร็ว-Stability • ความสะดวกสบายของผู้โดยสาร-Ride comfort • การเก็บกักอากาศภายในห้องโดยสาร-Air tightness • ระบบรับส่งไฟฟ้า-Power collect performance 	<ul style="list-style-type: none"> • ระบบการจัดการเดินรถ-Train operation system • ระบบรักษาความปลอดภัย-Safety system • ระบบการซ่อมบำรุง-Maintenance system



รูปที่ 1 ตัวอย่างความเร่งทางด้านข้างของตัวรถไฟที่มีค่าสูงขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น

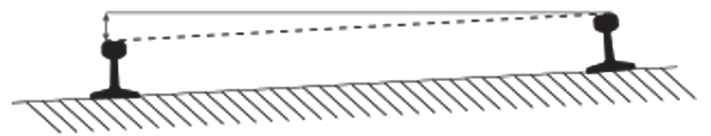


2. ปัจจัยของทางวิ่งที่มีผลต่อความเร็วในการเดินรถ รัศมีของโค้งของทางวิ่ง (curve radius) และระดับการยกโค้ง (cant)

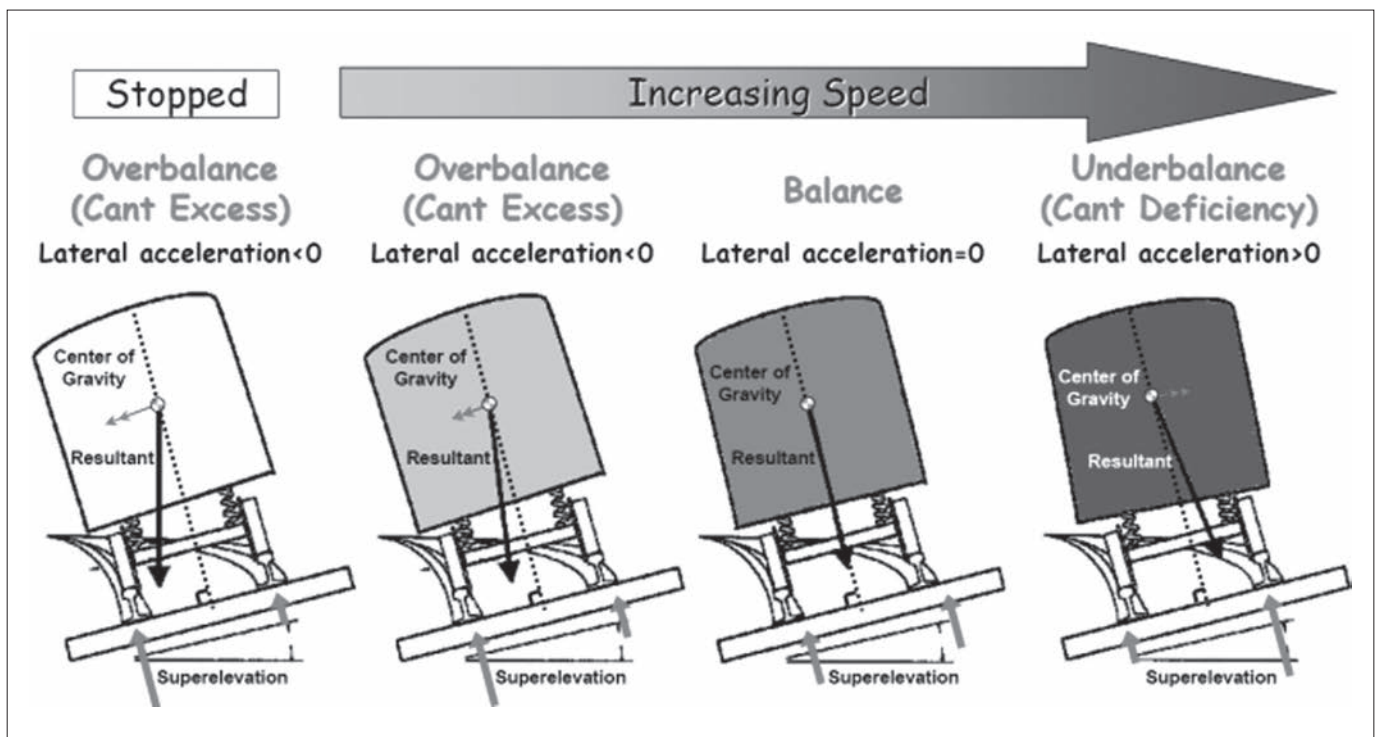
เป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อแรงกระทำทางด้านข้างบนตัวรถที่เกิดขณะแล่นบนทางโค้ง โดยปกติแล้วความเร็วในการออกแบบริศมีโค้งจะกำหนดให้แรงหนีศูนย์กลางนั้นหักล้างกับแรงโน้มถ่วงพอดี (balance situation) โดยค่าความเร็วดังกล่าวเรียกว่าความเร็วสมดุล (balance speed) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีโค้ง ระดับการยกโค้ง และความเร็วสมดุลได้ดังสมการด้านล่าง

$$V = \sqrt{\frac{C_m + C_d}{11.8}} \cdot \sqrt{R}$$

โดย V คือความเร็วสมดุล (km/h), R คือรัศมีโค้ง (m), C_m คือระดับการยกโค้งสูงสุด (maximum cant, mm) และ C_d คือระดับการยกโค้งสมดุลที่เกิดจากการใช้ความเร็วที่เกินกว่าจุดสมดุล (cant deficiency, mm) ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้ได้กับทางวิ่งที่มีระยะห่างระหว่างราง 1.435 เมตร (standard gauge)



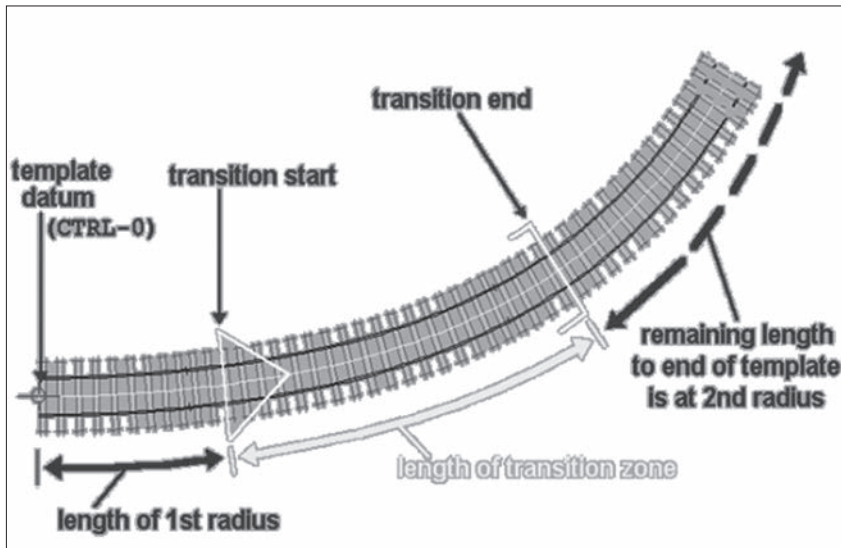
รูปที่ 2 ทางวิ่งบริเวณโค้ง และความต่างระดับของหัวราง (cant)



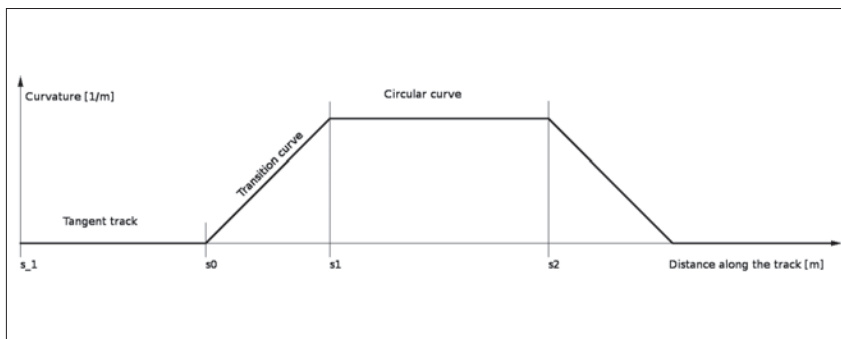
รูปที่ 3 แรงที่กระทำต่อรถไฟขณะวิ่งผ่านโค้ง [14]

ช่วงรอยต่อระหว่างทางตรง และทางโค้ง (transition zone)

เป็นช่วงที่ทางวิ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงรัศมีมีความโค้งจากทางตรง (tangent) ไปสู่ช่วงที่มีรัศมีคงที่ (constant radius) ทั้งนี้ในช่วงรอยต่อดังกล่าวยังมีการเปลี่ยนแปลงของระดับการยกโค้ง ซึ่งความต่างระดับของหัวรางทั้งสองข้าง (cant) จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ซึ่งเรียกว่าการบิดของทางวิ่ง (track twist) โดยการออกแบบทางวิ่งในช่วงดังกล่าว จะต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของรถไฟขณะเริ่มเข้าโค้งเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแรงหนีศูนย์กลาง รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำที่ล้อที่เกิดขึ้นขณะที่เคลื่อนผ่านช่วงที่มีการบิดของทางวิ่งอีกด้วย



รูปที่ 4 ช่วงรอยต่อระหว่างทางตรงและทางโค้งของทางวิ่ง (transition zone) [16]



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของรัศมีบนทางวิ่งในช่วงต่างๆ [17]

ระยะห่างระหว่างทางโค้งต่อเนื่อง (length between multiple curves)

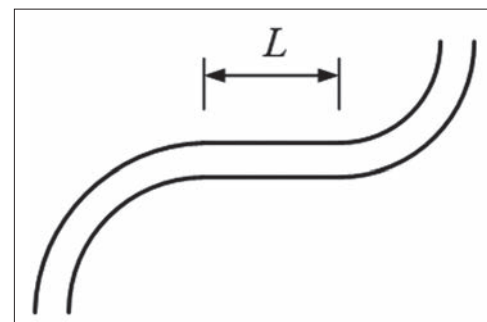
เป็นช่วงบนทางวิ่งสำหรับเว้นระยะทางระหว่างทางตรง และทางโค้งต่อเนื่อง ซึ่งจำเป็นต้องเว้นระยะให้เพียงพอ เพื่อลดการสั่นสะเทือนของรถไฟหลังจากแล่นผ่านโค้งหนึ่งไปยังอีกโค้งหนึ่ง โดยระยะทางที่ต้องเผื่อไว้จะแปรผันกับคาบการสั่นสะเทือนทางด้านข้างของตัวรถไฟ โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 1.8 วินาที ซึ่งทำให้สามารถคำนวณระยะทางระหว่างโค้งที่ต้องเผื่อไว้ได้ดังสมการ

$$L = T_n \cdot \frac{V}{3.6}$$

โดย L คือระยะทางระหว่างโค้ง (m), คือ V ความเร็วที่ใช้ออกแบบ (km/h) และ T_n คือคาบการสั่นสะเทือนด้านข้างของรถไฟมีค่าประมาณ 1.8 วินาที [13] ดังตารางที่ 2 แสดงค่าระยะทางระหว่างโค้งที่ใช้สำหรับการออกแบบระบบรางของประเทศเกาหลี [13]

ตารางที่ 2 ระยะทางระหว่างโค้งตามมาตรฐานของประเทศเกาหลี [13]

Design Speed (Km/h)	Minimum length of straight line and curve(m)
350	180
200	100
150	80
120	60
$V \leq 70$	40



รูปที่ 6 ระยะห่างระหว่างทางโค้งต่อเนื่อง (length between multiple curves)

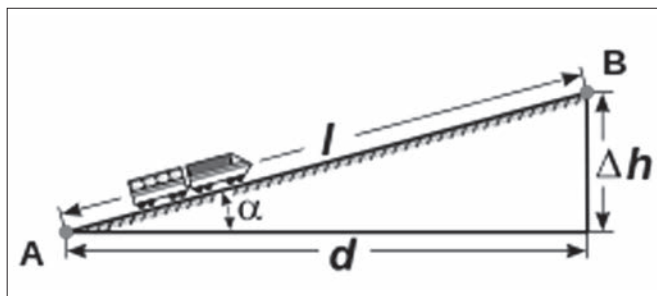
ความลาดชันของทางวิ่ง (grade & slope)

ความลาดชันของทางวิ่งโดยปกติจะถูกกำหนดด้วยกำลังลาดของรถไฟ ซึ่งปกติแล้วรถไฟขนส่งผู้โดยสารจะสามารถไต่ทางชันได้มากกว่า

รถไฟขนส่งสินค้า ดังตารางที่ 3 แสดงค่าความลาดชันของทางวิ่งตามมาตรฐานของประเทศเกาหลี [13]

ตารางที่ 3 ค่าความลาดชันของทางวิ่งตามมาตรฐานของประเทศเกาหลี [13]

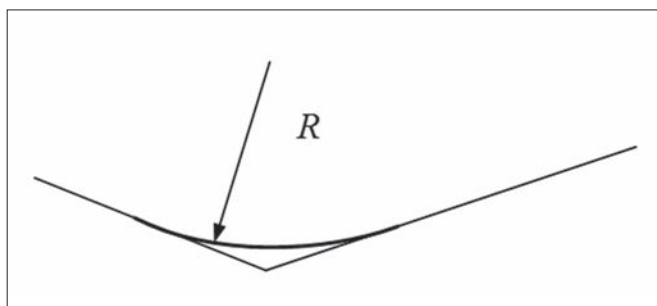
Design speed (km/h)		Maximum grade (%)
High speed passenger	250≤350	35
	200≤350	25
Mixed passenger cargo line	150≤200	10
	120≤150	12.5
	70≤120	15
	≤70	25
Electrified line		35



รูปที่ 7 ลักษณะของความลาดชันของทางวิ่ง (grade & slope)

โค้งแนวตั้ง (vertical curve)

รัศมีของโค้งในแนวดิ่งจะมีผลต่อการสั่นสะเทือนของรถไฟ กล่าวคือหากรัศมีโค้งยิ่งกว้าง การสั่นสะเทือนที่เกิดจากการกระแทกขณะที่รถไฟวิ่งผ่านก็จะยิ่งลดลง ซึ่งการกำหนดความกว้างของรัศมีโค้งนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วที่ออกแบบ



รูปที่ 8 ลักษณะของโค้งแนวตั้ง (vertical curve)

ระยะห่างระหว่างทางวิ่ง

(distance between center of the track)

ระยะห่างระหว่างทางวิ่งต้องมีเพียงพอ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการลู่กลิ้งของรถไฟไปบนทางวิ่งอื่นขณะที่รถไฟเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง เนื่องจากการโยกของตัวรถไฟ นอกจากนี้ในกรณีของรถไฟความเร็วสูง แรงจากอากาศพลศาสตร์จะมีผลต่อรถไฟอย่างมาก จึงต้องมีการเผื่อระยะห่างของทางวิ่งเพื่อคงไว้ซึ่งเสถียรภาพของรถไฟขณะแล่นสวนกันด้วย



รูปที่ 9 รอยต่อของราง (rail joint)

รอยต่อของราง (rail joint)





รอยต่อของรางจะทำให้เกิดการกระแทกกระทั้นระหว่างราง และล้อรถไฟขณะแล่นผ่าน ซึ่งทำให้เกิดปัญหาทั้งในด้านการสึกหรอของราง และรถไฟ รวมทั้งยังส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของรถไฟอีกด้วย ในปัจจุบันเพื่อลดปัญหาดังกล่าวจึงมีการใช้รางแบบเชื่อมยาว (Continuous Welded Rail-CWR) ซึ่งรอยต่อของรางชนิดนี้จะเรียบ และเป็นเนื้อเดียวกันกับราง ทำให้รถไฟสามารถแล่นผ่านได้ด้วยความเร็วสูงโดยไม่เกิดการกระแทกขึ้น



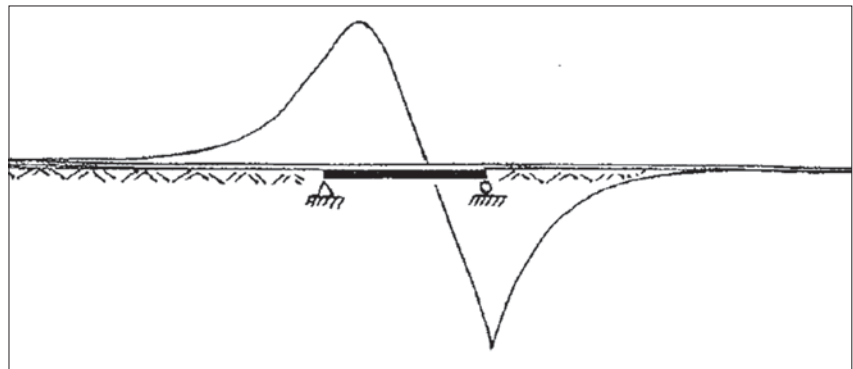
รูปที่ 10 การก่อสร้างรางแบบเชื่อมยาว (Continuous Welded Rail-CWR) [18]

ในปัจจุบัน มีการเชื่อมราง CWR สองแบบคือ เชื่อมโดยประสานเนื้อเหล็กเรียกว่า base metal welding และเชื่อมโดยเติมเนื้อเหล็กไปในช่องว่างระหว่างรางเรียกว่า material filling technique โดยวิธีการทั้งสองแบบถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4

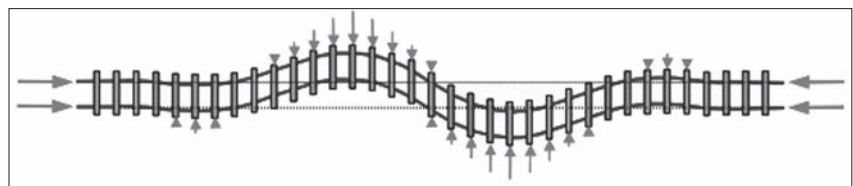
ตารางที่ 4 การเชื่อมรางแบบต่าง ๆ และประเทศที่ใช้งาน [13]

Classify	Rail Welding			
	Base Metal Welding		Material Filling	
Method	Base Metal Welding		Material Filling	
Category	Flashbutt	Gas Pressed	Thermit	Arc
Using State	World wide	Japan Korea	World wide	Japan
Work view				

สำหรับรางแบบเชื่อมยาวนั้น วิศวกรจำเป็นต้องคำนึงถึงหน่วยแรงตามแนวยาวของราง (longitudinal stress) ที่อาจทำให้เกิดความเสียหายต่อราง และทางวิ่งได้ โดยจะต้องคำนึงถึงผลรวมของหน่วยแรงในสภาวะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นขณะใช้งาน เช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การเบรก และการเร่งของรถไฟ การแอ่นตัวของสะพาน [5] ดังรูปที่ 11 แสดงตัวอย่างการกระจายตัวของหน่วยแรงตามยาวที่เกิดขึ้นในรางแบบเชื่อมยาว และรูปที่ 12 ถึง 15 แสดงถึงผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ ที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรง และการเสียรูปของรางรถไฟที่จำเป็นต้องคำนึงถึงในการออกแบบ และปรับปรุงโครงสร้างทางรถไฟ



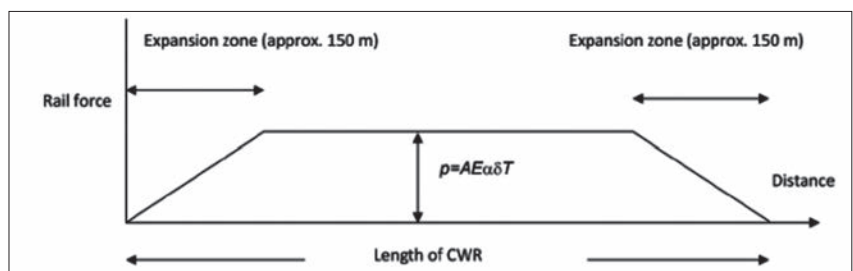
รูปที่ 11 ตัวอย่างของหน่วยแรงตามยาวที่เกิดขึ้นในรางแบบเชื่อมยาว (longitudinal stress in CWR) [5]



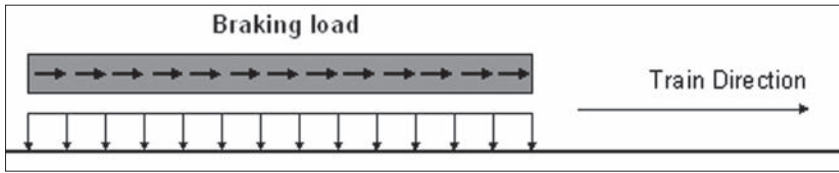
รูปที่ 12 การเสียรูปของทางวิ่งที่เกิดจากหน่วยแรงตามยาว (track buckling) [15]

ชั้นหินโรยทาง (ballast layer)

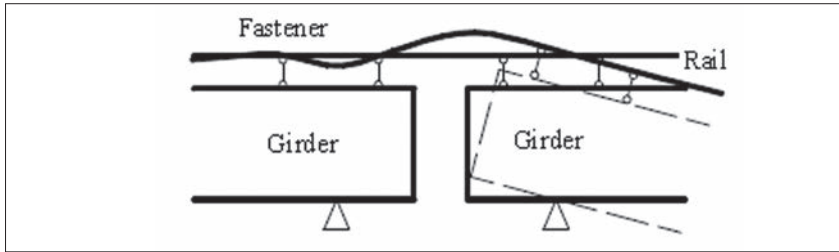
สำหรับรางแบบใช้หินโรยทางนั้น (ballasted track) ความกว้าง และความหนาของชั้นหินโรยทางจะต้องมีเพียงพอที่จะต้านแรงกระทำจากล้อรถไฟได้ ซึ่งโดยปกติแรงกระทำจากล้อรถไฟที่ส่งผ่านไปยังไม่หมอน และหินโรยทางจะเพิ่มมากขึ้นตามความเร็วของรถไฟ รูปที่ 16



รูปที่ 13 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีผลต่อหน่วยแรงในราง

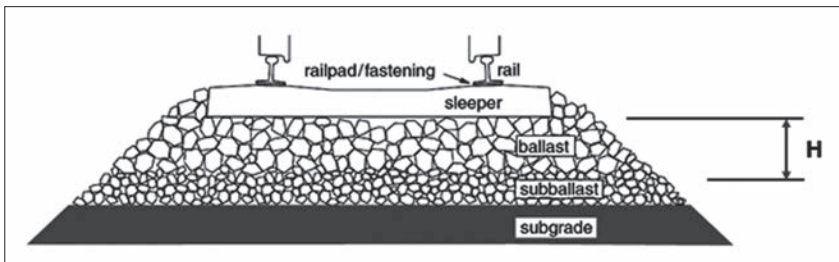


รูปที่ 14 แรงเบรกของรถไฟที่มีผลต่อหน่วยแรงในรางแบบเชื่อมยาว [5]



รูปที่ 15 การโค้งตัวของสะพานที่มีผลต่อหน่วยแรงในรางแบบเชื่อมยาว [5]

แสดงตัวอย่างรูปตัดของทางวิ่งแบบใช้หินโรยทาง โดยประเทศที่ใช้งานระบบรางจะมีการกำหนดมาตรฐานของความหนาของชั้นหินโรยทางไว้ดังเช่นประเทศอังกฤษ และประเทศเกาหลี [7,13] ที่ได้กำหนดถึงความหนาของชั้นหินโรยทางไว้ตามระดับความเร็วที่ออกแบบ ดังตารางที่ 5 และ 6 แสดงถึงความหนาที่ต้องการของชั้นหินโรยทางที่ความเร็วระดับต่าง ๆ



รูปที่ 16 ทางวิ่งแบบใช้หินโรยทาง (ballasted track)

ตารางที่ 5 ความหนาที่ต้องการของชั้นหินโรยทางที่ตามมาตรฐานของสมาคมระบบรางของประเทศอังกฤษ [7]

TRACK CONSTRUCTION CODE	SLEEPER TYPE	MINIMUM BALLASTED DEPTH
Cat 1	Concrete or hard wood	300
Cat 2	Steel	200
	Concrete, hard wood or twin bloc	250
Cat 3	Steel	150
Cat 4	Concrete, hard wood	200
Cat 5	or twin bloc	
Cat 6		

ตารางที่ 6 ความหนาที่ต้องการของชั้นหินโรยทางที่ความเร็วระดับต่าง ๆ ตามมาตรฐานของประเทศเกาหลี [13]

Design Speed(km/h)	Min. Ballast Thickness(mm)
230<350	350
120<230	300
70<120	270 ⁽¹⁾
≤70	250 ⁽¹⁾

⁽¹⁾When CWR is the 300 mm.

ปัจจุบันมีการใช้งานทางวิ่งที่ไม่ใช้หินโรยทาง (ballastless track) ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้แผ่นพื้นคอนกรีตปูพื้นเพื่อรองรับรางแทนชั้นหินโรยทาง ดังแสดงในรูปที่ 17 โดยทางวิ่งชนิดดังกล่าวมีข้อดีคือรางจะมีค่าความแข็งเกร็ง (stiffness) มากกว่าเมื่อเทียบกับรางแบบใช้หินโรยทาง



รูปที่ 17 ตัวอย่างทางวิ่งที่ไม่ใช้หินโรยทาง (ballastless track)

ประแจ (turnout)

โดยปกติรถไฟจะต้องลดความเร็วลงขณะที่วิ่งผ่านประแจ ทั้งนี้ล้อ และรางจะเกิดการกระแทกขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของจุดสัมผัสระหว่างล้อ และรางบริเวณประแจ ในปัจจุบันมีการพัฒนาประแจที่เรียกว่า movable nose crossing ซึ่งได้ออกแบบให้ลดการกระแทกระหว่างล้อ และราง ทำให้รถไฟสามารถแล่นผ่านประแจดังกล่าวได้เร็วขึ้น ดังตารางที่ 8 แสดงความเร็วที่สามารถใช้ได้สำหรับประแจแบบต่าง ๆ ตามมาตรฐานของประเทศเกาหลี [13]

ตารางที่ 7 ประแจ (turnout) แบบต่าง ๆ



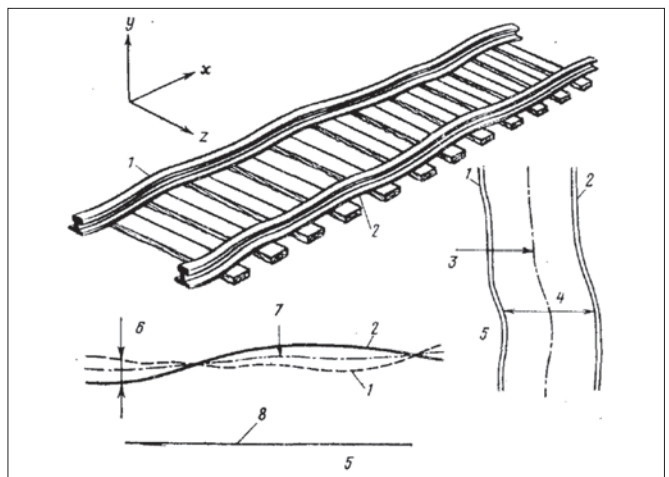
ตารางที่ 8 ระดับความเร็วที่ยอมให้แล่นผ่านสำหรับประแจแบบต่าง ๆ ตามมาตรฐานของประเทศเกาหลี [13]

Type	Speed
Moveable Nose Crossing	> 160 km/h
Rigid Manganese Crossing (Con.T)	150 km/h
Rigid Manganese Crossing (W.T)	130 km/h
Bolted rail switch & Crossing (W.T)	< 90 km/h

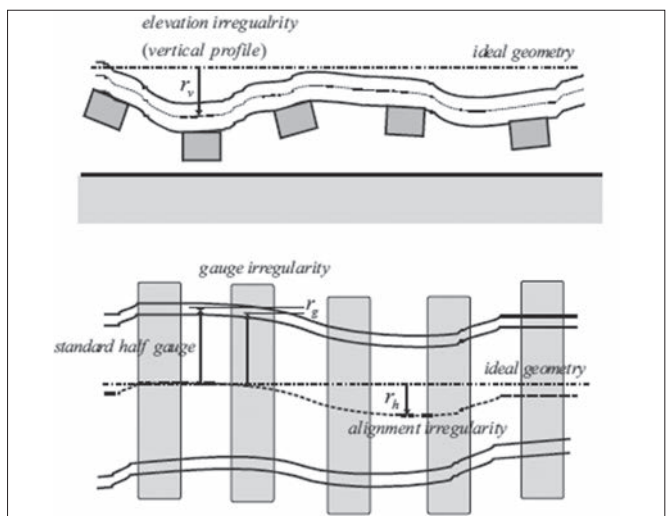
ความไม่ราบเรียบของทางวิ่ง (track irregularities)

โดยปกติแล้วทางวิ่งจะมีความไม่สม่ำเสมอทั้งระดับในแนวราบและแนวตั้ง [1,2,11,12] ซึ่งปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นแม้ว่าทางวิ่งจะยังคงอยู่ในสภาพใหม่ก็ตาม นอกจากนี้เมื่อมีการใช้งานเกิดขึ้น ความไม่ราบเรียบของทางวิ่งก็จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงกระทำจากรถไฟ โดยทางวิ่งแบบใช้หินโรยทาง (ballasted track) จะเกิดปัญหาดังกล่าวมากกว่าทางวิ่งแบบไม่ใช้หินโรยทาง (ballastless track) ในงานระบบรางจะจำแนกความไม่ราบเรียบของทางวิ่งไว้ 4 ประเภทคือ

- ◆ ความไม่ราบเรียบทางแนวตั้ง (elevation irregularities)
- ◆ ความไม่ราบเรียบของความต่างระดับของหัวราง (cross elevation irregularities)
- ◆ ความคดเคี้ยวทางด้านแนวนอน (alignment irregularities)
- ◆ ความไม่สม่ำเสมอของระยะห่างระหว่างหัวราง (gauge irregularities)

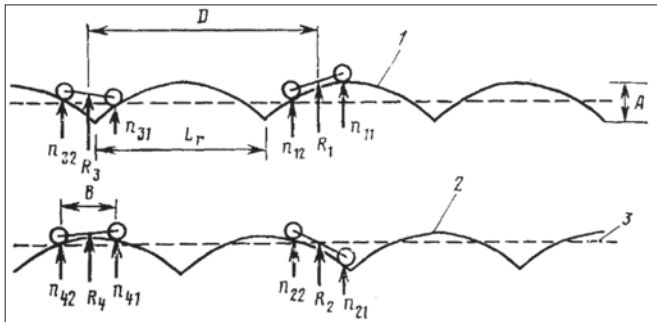


รูปที่ 18 ความไม่ราบเรียบของทางวิ่ง [1]

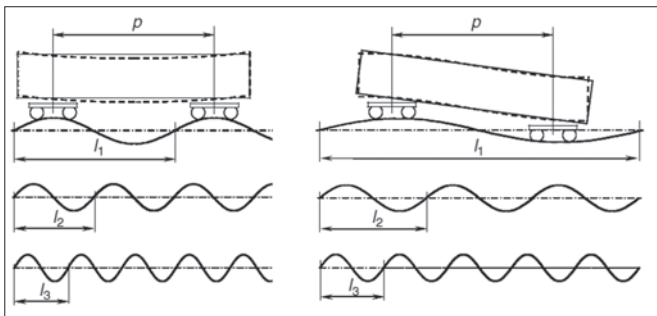


รูปที่ 19 ความไม่ราบเรียบของทางวิ่งโดยจำแนกเป็นกรณีต่าง ๆ

เมื่อรถไฟแล่นผ่านทางวิ่งที่มีความไม่ราบเรียบแล้วก็จะเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น ซึ่งความไม่ราบเรียบที่มีช่วงคลื่นสั้น (short wave length) ดังแสดงในรูปที่ 20 จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนอย่างมากในบริเวณล้อ และโบกี้รถไฟส่งผลให้ความปลอดภัยของรถไฟลดลง และความไม่ราบเรียบที่มีช่วงคลื่นยาว (long wave length) ดังแสดงในรูปที่ 21 จะมีผลต่อความรู้สึกสะทกสะท้านของผู้โดยสาร เนื่องจากการสั่นสะเทือนของตัวรถจะตอบสนองในย่านความถี่ต่ำ



รูปที่ 20 ความไม่ราบเรียบของทางวิ่งแบบช่วงคลื่นสั้น (short wave length irregularities) [1]

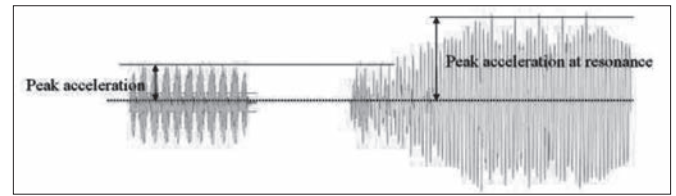


รูปที่ 21 ความไม่ราบเรียบของทางวิ่งแบบช่วงคลื่นยาว (long wave length irregularities) [1]

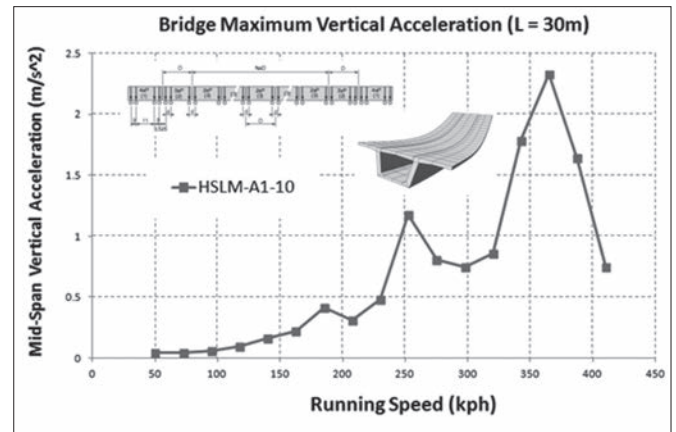
การสั่นสะเทือนของสะพาน (bridge vibration)

ในขณะที่รถไฟแล่นผ่านสะพานนั้นแรงจากล้อรถไฟจะถูกถ่ายลงสู่สะพานผ่านราง และทางวิ่งส่งผลให้สะพานเกิดการสั่นสะเทือนในทางกลับกัน เมื่อสะพานเกิดการสั่นสะเทือนแล้วก็จะส่งผ่านแรงกลับไปยังล้อรถไฟ ส่งผลให้การสั่นสะเทือนบนรถไฟเปลี่ยนไปจากปกติเช่นกัน โดยพฤติกรรมดังกล่าวเรียกว่าการสั่นสะเทือนแบบปฏิสัมพันธ์กันระหว่างรถไฟ และสะพาน (bridge-train dynamic interaction) [1,2,6,8,9,10,12] ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสามารถทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงต่อรถไฟ และสะพานได้ถ้าหากความเร็วของรถไฟนั้นอยู่ในช่วงที่ทำให้เกิดการสั่นพ้องต่อสะพาน (resonance) ดังรูปที่ 22 แสดงการสั่นสะเทือนของสะพานในสภาวะปกติ และสภาวะสั่นพ้อง (resonance) โดยจะเห็นได้ว่ามีการ

เพิ่มขึ้นของความรุนแรงในการสั่นสะเทือนอย่างชัดเจนเมื่อเกิดการสั่นพ้องขึ้น

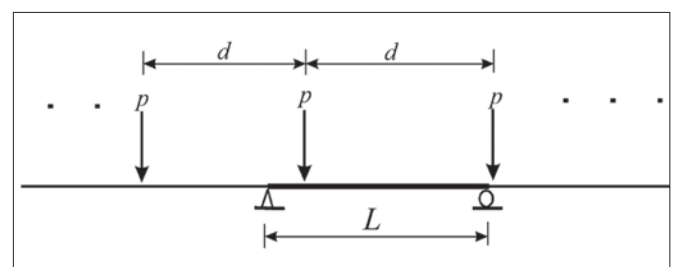


รูปที่ 22 การสั่นสะเทือนของสะพานในสภาวะปกติและสภาวะสั่นพ้อง (resonance)



รูปที่ 23 ตัวอย่างค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นบนสะพานเมื่อรถไฟแล่นผ่านที่ความเร็วต่างๆ

ในการออกแบบสะพานเพื่อรองรับรถไฟนั้น สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือ พฤติกรรมการสั่นพ้องของรถไฟ และสะพานนั้นสามารถเกิดขึ้นได้แม้ในขณะที่รถไฟแล่นอยู่ในย่านความเร็วต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของแรงกระทำจากล้อรถไฟมีรูปแบบเป็นแรงแบบขบวน (series forces) นั้นสามารถทำให้เกิดการสั่นพ้องต่อสะพานได้ทั้งย่านความเร็วต่ำ และความเร็วสูง รูปที่ 23 แสดงตัวอย่างผลการตอบสนองของสะพานแบบกล่อง (Box Girder) ที่เกิดจากการจำลองแรงแบบขบวนดังแสดงในรูปที่ 24 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเร่งสูงสุดเกิดที่ความเร็ว 250 kph และ 350 kph ซึ่งเกิดจากการสั่นพ้องดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว



รูปที่ 24 แรงแบบขบวน (series forces) [12]



3. บทสรุป

การยกระดับความเร็วของการเดินรถในระบบรางนั้น จำเป็นที่จะต้องมองถึงปัจจัยให้ครบวงจรตั้งแต่ด้านโครงสร้างพื้นฐาน ตัวรถและระบบการบริหารจัดการ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะต้องถูกนำมาพิจารณาทั้งในขั้นตอนของการออกแบบ ก่อสร้าง และใช้งาน เพื่อให้ทำให้ใช้งานระบบได้อย่างปลอดภัย และมีประสิทธิภาพ

บทความนี้กล่าวถึงปัจจัยทางวิศวกรรมในด้านโครงสร้างพื้นฐานที่มีผลต่อการยกระดับความเร็วของการเดินรถ โดยจะสังเกตได้ว่าบริเวณสำคัญที่ต้องคำนึงถึงบนทางวิ่งคือ ช่วงทางโค้ง และช่วงสับหลัก ซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นจุดที่รถไฟต้องลดความเร็วลงเมื่อวิ่งผ่าน ดังนั้นหากต้องการยกระดับความเร็วของการเดินรถจะ

ต้องปรับปรุงบริเวณดังกล่าวให้รถสามารถวิ่งผ่านได้ด้วยความเร็วที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยทางด้านรอยต่อ และความไม่ราบเรียบของรางรวมทั้งพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของโครงสร้างที่รองรับทางวิ่งที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของรถไฟอีกเช่นกัน ดังนั้นเมื่อมีการออกแบบปรับปรุงทางวิศวกรรมแล้ว การทดสอบ และประเมินโครงสร้างพื้นฐาน และรถไฟ ถือเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องดำเนินการเพื่อให้เกิดความมั่นใจในความปลอดภัยให้เป็นที่ไปตามมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ [3,4,6] ทั้งนี้นอกจากการประเมินสมรรถนะทางวิศวกรรมแล้ว ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ตลอดอายุของการให้บริการ (Life Cycle) ก็เป็นสิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงด้วยเช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Fryba L., “Dynamics of Railway Bridges”, T. Telford, 1996
- [2] Simon I., “Handbook of Railway Vehicle Dynamics”, Taylor&Francis Group, 2006
- [3] UIC (International Union of Railways), “Leaflet 513 Guidelines for Evaluating Passenger Comfort in Relation to Vibration in Railway Vehicles”, 2003
- [4] UIC (International Union of Railways), “Leaflet 518 OR Testing and Approval of Railway Vehicles from the Point of View of Their Dynamic Behavior - Safety - Track Fatigue - Ride quality”, 3rd Edition, 2005
- [5] UIC (International Union of Railways), “Leaflet 774-3 R Track/Bridge Interaction Recommendations for Calculations”, 2nd Edition, 2001
- [6] UIC (International Union of Railways), “ Leaflet 776-2 R Design Requirements for Rail-Bridge based on Interaction Phenomena between Train, Track and Bridge”, 2nd Edition, 2009
- [7] Railway Group Standard, “Track Standards Manual - Section 6: Ballast and Formation”, Railtrack PLC 1995
- [8] Tae-Jun Cho, Myung Kwan Song, Do Hyung Lee, “Reliability Analysis for the Uncertainties in Vehicle and High-Speed Railway Bridge System based on an Improved Response Surface Method for Nonlinear Limit States”, An International Journal of Nonlinear Dynamics and Chaos in Engineering Systems, 2009
- [9] Dinh Van Nguyen, Kim Ki-Du, Shim Jae Soo, Choi Eun Soo, Suthasupradit Songsak, “Development of Three-Dimensional Dynamic Analysis Model High Speed Train-Bridge Interaction”, Journal of Korean Society of Steel Construction, 20 (2008) 151-163.
- [10] People’s Republic of China Ministry of Railway, “Code for Design of High Speed Railway (in Chinese)”, TB 10621 – 2009/ J 971 – 2009, China Railway Press, Beijing, 2009
- [11] Federal Railroad Administration, “Track safety standards, Code of Federal Regulations (CFR)”, United States Government, 49CFR213
- [12] Yang Y.B., “Vehicle-Bridge Interaction Dynamics”, World Scientific, 2004
- [13] Korean Railroad Research Institute-KRRI, “Conditions for Speed Up of the Railway”, Korea/Thailand Railway Cooperation Seminar, 2014

[14] Brian Marquis, “Cant Deficiency, Curving Speeds and Tilt”, Seminar of Federal Railroad Administration

[15] Coenraad Esveld, “Modern Railway Track”, MRT Production, 2001

[16] www.templot.com

[17] www.gensys.se

[18] www.amtrackdowneaster.com

ประวัติผู้เขียนบทความ



ดร.รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา

การศึกษา : Doctor of Engineering (Structural Engineering), Asian Institute of Technology (AIT)

ตำแหน่งปัจจุบัน : - ผู้อำนวยการ สถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมถนนและระบบราง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- คณะกรรมการนโยบายระบบราง วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
- อนุกรรมการบริหารโครงการก่อสร้าง การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย
- คณะกรรมการอำนวยการจัดประชุมวิชาการเทคโนโลยีระบบขนส่งทางราง สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ
- นายทะเบียนและอนุกรรมการวิชาการ สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
- ผู้เชี่ยวชาญของสำนักวิจัยและพัฒนาการตรวจเงินแผ่นดิน สำนักงานการตรวจเงินแผ่นดิน



ดร.ทรงศักดิ์ สุธาสุประดิษฐ์

การศึกษา : Ph.D. of Rural Engineering (field of structural engineering), Konkuk University, Korea

ตำแหน่งปัจจุบัน : - รองผู้อำนวยการ สถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางด้านนวัตกรรมถนนและระบบราง มหาวิทยาลัยนเรศวร
- อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร



นายปิรตน์ เปาเลี้ยง

การศึกษา : Master of Engineering (Structural Engineering), Naresuan University

ตำแหน่งปัจจุบัน : - นักวิจัยประจำสถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมถนนและระบบราง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- นักศึกษาปริญญาเอก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร