

การวิเคราะห์การโก่งเดาะของโครงสร้างทางรถไฟขนาด 1 เมตร

Buckling analysis of meter gauge railway track

พีรณัฐ อหุสนธ์อดิษฐ์¹ และ ชยุตม์ งามโขง²

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

บทคัดย่อ

ปัจจุบันโครงการรถไฟทางคู่กำลังก่อสร้างขึ้นทั่วประเทศไทยโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความจุ ลดระยะเวลาในการเดินทาง เพิ่มความสะดวกสบายและลดต้นทุนของการขนส่ง เมื่อโครงการทั้งหมดเสร็จสิ้น คาดการณ์ได้ว่าจะมีโครงข่ายรถไฟทางคู่ยาวมากกว่า 3000 กิโลเมตร แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของการให้บริการของรถไฟส่งผลให้ต้องบำรุงรักษาโครงสร้างพื้นฐานของรางรถไฟให้อยู่ในสภาพที่ดีอยู่เสมอ ไม่เพียงแต่อิทธิพลของปริมาณความหนาแน่นของการจราจรที่เพิ่มมากขึ้นเท่านั้นที่สามารถลดประสิทธิภาพของรางรถไฟแต่อิทธิพลของสภาพแวดล้อมภายนอกก็สามารถลดประสิทธิภาพของโครงสร้างทางรถไฟได้เช่นกัน โดยจะพบว่าอิทธิพลของอุณหภูมิถือเป็นปัญหาที่ร้ายแรงที่พบเจอในระบบโครงสร้างพื้นฐานทางรางทั่วโลกเนื่องจากผลกระทบจากการโก่งเดาะของโครงสร้างทาง ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียทรัพย์สินจำนวนมาก การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในรางรถไฟสามารถกระตุ้นความเค้นตามแนวแกนใน Continuous Welded Rail (CWR) และอาจส่งผลให้เกิดการโก่งเดาะของรางรถไฟเมื่อความเค้นเกินจุดที่รางรถไฟสามารถทนได้ ถึงแม้ว่าการโก่งเดาะในรางรถไฟถูกศึกษาเป็นจำนวนมากแต่การศึกษาที่พิจารณาถึงทางรถไฟขนาด 1 เมตร หรือ meter gauge ซึ่งถูกใช้เป็นหลักในประเทศไทย ยังไม่ได้ถูกศึกษามากเท่าที่ควร งานวิจัยฉบับนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ห่ออุณหภูมิที่รางสามารถทนได้ด้วยวิธีวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear analysis) โดยการจำลองโมเดลแบบ 3 มิติ (Three-dimensional railway track model) ด้วยโปรแกรม LS-DYNA ซึ่งจะพิจารณาพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการโก่งเดาะ ได้แก่ ความต้านทานด้านข้างจาก ballast และ sleeper ประเภทของรางรถไฟ และ Misalignment ของรางรถไฟ จากการศึกษาพบว่า เมื่อทางรถไฟมีความต้านทานด้านข้างที่ต่ำผนวกกับขนาด misalignment ที่สูง จะทำให้อุณหภูมิการโก่งเดาะต่ำถึง 66.4 °C ผลลัพธ์จากการวิจัยนี้จะช่วยให้วิศวกรระบบรางเข้าใจพฤติกรรมของกาโก่งเดาะและสร้างความตระหนักรู้ในการตรวจสอบและบำรุงรักษารางให้ดียิ่งขึ้น

คำสำคัญ: รางรถไฟ; การโก่งเดาะ; Meter gauge

Abstract

Presently, double-track railway has been being constructed across Thailand to increase capacity, reduce the travel time, improve service, and thus reduce the logistic cost. Once all the projects are completed, it is expected to have more than 3000 kilometres of double-track railway in Thailand. Due to the increase in train service, it is important to properly maintain the railway track infrastructure to be in a good condition. However, it is not only the increased axle load from train that can degrade track performance but also the influence of the environment. Note that the influence of extreme heat has been listed as one of the serious issues in railway system around the globe. The increase in rail temperature can induce an axial compressive stress in the continuous welded rail (CWR) and this may cause track buckling when the stress reaches the buckling capacity. Even though railway track buckling has been widely studied, the focus on metre gauge railway track, which is a major track type in Thailand, has not been fully mentioned. This study performs a nonlinear analysis of a three-dimensional railway track model using the software LS-DYNA. The major parameters influencing track buckling capacity including lateral resistance from ballast and sleeper, rail type and track misalignment are considered. The results show that these factors significantly reduce the buckling temperature of the track. The lowest possible buckling temperature of the track is found to be 66.4 °C when the poor lateral resistance combined with a high track lateral misalignment. The outcome of this study will help track engineer to understand the behavior of the railway track and raise awareness of track inspection and maintenance to keep the track in good condition.

Key words: Railway track; Track buckling; Meter gauge

1. บทนำ

ปัจจุบันระบบรางมีบทบาทสำคัญในด้านการขนส่งในประเทศไทย และเนื่องจากปัญหาโลกร้อนในปัจจุบันที่มีความรุนแรงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลกระทบต่อประเทศไทยซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มประเทศเขตร้อนชื้น พบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลโดยตรงกับโครงสร้างของทางรถไฟโดยเฉพาะทางรถไฟแบบที่มีหินโรยทาง (Ballasted track) ผนวกกับปัจจุบันที่ใช้รางรถไฟที่มีลักษณะเชื่อมกันต่อเนื่อง (Continuous Welded Rail) ซึ่งทำให้รางรถไฟมีอัตราส่วนความยาวต่อหน้าตัด (Slenderness ratio) สูง ส่งผลให้รางรถไฟมีแนวโน้มสูงที่จะเกิดการโก่งเดาะ (Buckling) เนื่องจากโครงสร้างเหล็กเกิดการขยายตัวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดแรงอัดขึ้นภายในโครงสร้างรางรถไฟ ถ้าหากแรงอัดมีขนาดที่เพิ่มขึ้นจนเกินกว่ากำลังต้านทานการโก่งเดาะ (Buckling strength) รางจะเกิดการวิบัติแบบโก่งเดาะขึ้น (Buckling failure) ในแนวระนาบ

จากแหล่งข่าวในประเทศไทยพบว่า เมื่อปี 2560 สำนักข่าวรายหนึ่งรายงานว่ามีการเกิดเหตุการณ์การโก่งเดาะของรางรถไฟระหว่างเส้นทาง รือเสาะ-ลาโล๊ะ ในพื้นที่รัฐยะลา จ.นราธิวาส (สำนักข่าวไทย, 2560) ส่งผลให้รถไฟต้องหยุด การให้บริการเป็นเวลากว่า 2 ชั่วโมง แม้ว่าจะไม่มีรถไฟตกรางแต่เหตุการณ์นี้ก็ส่งผลเสียหายต่อเครือข่ายระบบรางในพื้นที่ภาคใต้เป็นวงกว้าง เป็นที่พบเห็นได้ในหลายที่ว่ารางรถไฟสามารถเกิดการโก่ง คด งอ ได้ในวันที่มีอุณหภูมิสูง

ปัญหาการโก่งเดาะเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปถือเป็นปัญหาที่สำคัญและมีแนวโน้มที่จะเป็นปัญหาที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิงานวิจัยนี้ขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปต่อรางรถไฟในประเทศไทยที่มีขนาดทางแบบ 1 เมตร (metre gauge track) และหาแนวทางการป้องกันการโก่งเดาะที่เกิดขึ้นจากผลของอุณหภูมิอย่างยั่งยืน

2. ระเบียบวิธีวิจัย

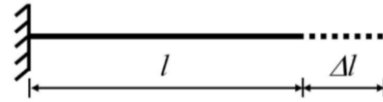
การวิเคราะห์การโก่งเดาะของโครงสร้างทางรถไฟขนาด 1 เมตร โดยจะพิจารณาผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะวิเคราะห์โครงสร้างทางรถไฟที่มีลักษณะแบบชั้นหินโรยทาง และใช้ไม้หมอนแบบไม้ที่ยังคงใช้อยู่ในปัจจุบันและมีความเสี่ยงสูงต่อการโก่งเดาะในช่วงเวลาที่มีอุณหภูมิสูง การวิเคราะห์โครงสร้างจะทำการสร้าง three-dimensional finite element model ขึ้นในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง LS-DYNA (Livermore Software Technology Coporation (LSTC), 2018) โดยวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปโดยใช้วิธีแบบ Nonlinear Buckling Analysis เนื่องจากการใช้วิธีแบบ Nonlinear Buckling Analysis จะทำให้สามารถวัดผลของการ buckling ได้ทั้งก่อนและหลังการเกิดการโก่งเดาะ จึงสามารถเห็นพฤติกรรมเต็มรูปแบบและวิเคราะห์ผลได้ละเอียดกว่าวิธีแบบ Linear Buckling Analysis ซึ่งจะให้ผลการวิเคราะห์เมื่อเกิดการโก่งเดาะเท่านั้น โดยการวิเคราะห์การโก่งเดาะจะเปรียบเทียบหน้าตัดของทางรถไฟ ได้แก่ UIC60 และ UIC54 และเปรียบเทียบกำลังต้านทานด้านข้าง รวมถึงตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

2.1 Railway Track Stability

เสถียรภาพ หรือ stability ในความหมายของวิศวกรโยธาแล้วหมายถึง เสถียรภาพของชิ้นส่วนโครงสร้างอาคาร (structural stability) หรือ เสถียรภาพของชั้นดิน (geotechnical stability) แต่ในทางรถไฟ stability จะหมายถึงความสามารถในการต้าน buckling ของโครงสร้างรถไฟ โดยในทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ buckling สามารถแบ่งได้เป็น Axial force in rail และ Critical buckling load

2.1.1 Axial force in rail

เนื่องจากรางรถไฟถูกสร้างมาจากเหล็กทำให้เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขึ้นจะส่งผลให้เหล็กเกิดการขยายตัว (expansion) หรือ หดตัว (contraction) จากรูปที่ 1 จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีคานเหล็กมีความยาวเท่ากับ l โดยที่ปลายด้านซ้ายของคานเหล็กถูก fixed ไว้แต่ปลายด้านขวาจะถูกปล่อยให้เป็นอิสระ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะส่งผลให้คานเกิดการขยายตัวหรือหดตัว Δl



รูปที่ 1 การขยายตัวของคานเหล็กที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Ngamkhanong (2022))

สังเกตว่าการเปลี่ยนแปลงจะแปรผันกับคุณสมบัติของวัสดุที่เรียกว่า Thermal expansion coefficient, α การเปลี่ยนแปลงของความยาวสามารถคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ดังต่อไปนี้

$$\Delta l = \alpha \Delta T l \quad (1)$$

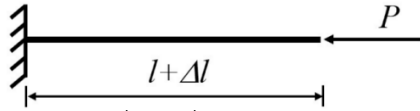
โดยที่	Δl	คือความยาวที่เปลี่ยนไป
	α	คือ Thermal expansion coefficient
	ΔT	คืออุณหภูมิที่เปลี่ยนไป $T_{\text{after}} - T_{\text{before}}$
	l	คือความยาว

ในขณะที่หากกำหนดให้ปลายทั้ง 2 ข้างของคานเหล็กเป็น fixed เพื่อไม่ให้เกิดการหมุนตัวหรือเกิดการเคลื่อนที่ โดยหากเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจะส่งผลให้เกิด stress ในคานเหมือนกับการมีแรงตามแนวแกน axial force มากกระทำที่จุดปลายของคานโดยสามารถหาแรงตามแนวแกน หรือ axial force ได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$P = EA\alpha\Delta T \quad (2)$$

โดยที่	E	คือ young modulus of steel
	A	คือ rail cross sectional area
	α	คือ Thermal expansion of steel ($1.17 \times 10^{-5} 1/C^\circ$)
	ΔT	คือ Temperature change ($T_{\text{rail}} - T_{\text{SFT}}$)

โดยที่ Stress-Free Temperature (SFT) หรือ Neutral Temperature เป็นจุดอ้างอิงที่บอกว่าคุณสมบัติที่ไม่ทำให้รางรถไฟเกิดแรงดึง (Tension) หรือแรงอัด (Compression) โดยในรางสมัยใหม่ส่วนใหญ่ใช้รางรถไฟแบบ Continuous Welded Rail จะทำการยึดรางในแกนตามยาวเพื่อป้องกันไม่ทำให้รางรถไฟเกิดการ buckling จากผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงได้ง่ายจนเกินไป ในประเทศไทยจะใช้ค่า SFT ไว้ประมาณ 27 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2 แรงตามแนวแกนที่กระทำที่ปลายของคาน (Ngamkhanong (2022))

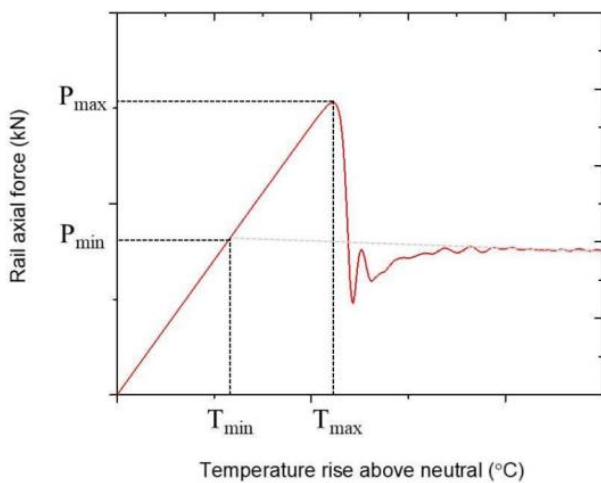
2.1.2 Critical buckling load

การเกิด buckling ในรางรถไฟจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิของโครงสร้างทางรถไฟ โดย Critical buckling load คือแรงสูงสุดที่ไม่ทำให้เกิด buckling สามารถคำนวณ Critical buckling load ได้จาก Euler formula จากสูตรดังต่อไปนี้

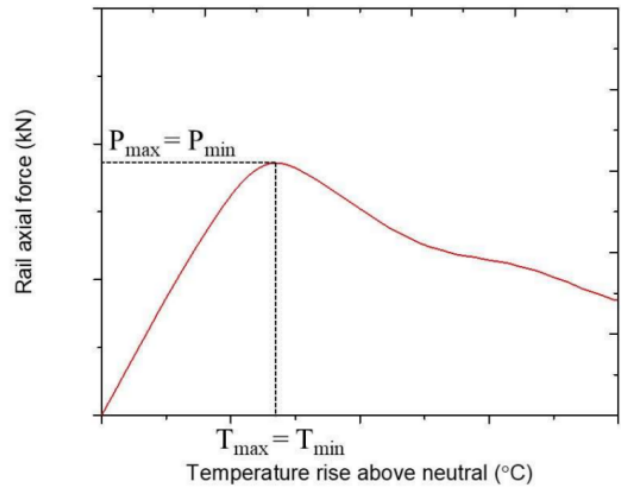
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (3)$$

โดยที่	P_{cr}	คือ the critical buckling load
	L	คือ buckling length
	E	คือ modulus of elasticity
	I	คือ moment of inertia
	k	คือ effective length factor

การเกิด buckling จะมี 2 รูปแบบได้แก่ Snap-through buckling ดังรูปที่ 3 และ Progressive buckling ดังรูปที่ 4 โดยเมื่อทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง axial force กับอุณหภูมิจะพบว่าเมื่อเกิดการ buckling แบบ Snap-through buckling จะส่งผลให้ axial force ลดลงแบบฉับพลัน ในทางกลับกันหากเกิดการ buckling แบบ Progressive buckling จะทำให้ผลของ axial force ค่อยๆลดลง



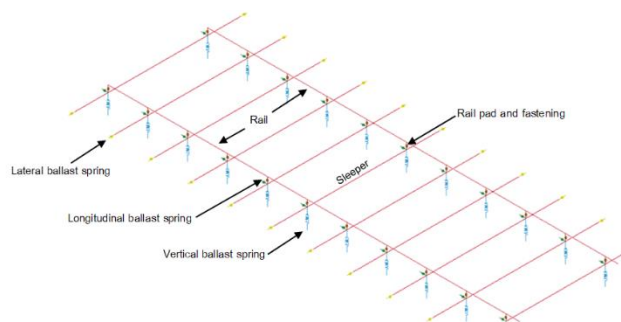
รูปที่ 3 การเกิด buckling แบบ Snap-through buckling (Ngamkhanong (2022))



รูปที่ 4 การเกิด buckling แบบ Progressive buckling (Ngamkhanong (2022))

2.2 Finite Element Modelling (FEM)

การทำ Finite Element Modelling จะใช้โปรแกรม LS-DYNA โดยออกแบบให้เป็น โครงสร้างทางรถไฟที่มีลักษณะแบบชั้นหินโรยทางขนาด 1 เมตร ที่มีความยาว 60 เมตร และมี 100 spans โดยมี spacing 0.6 เมตร ซึ่งกำหนดให้รางรถไฟและไม้หมอนเป็น Beam elements ซึ่งคำนึงถึง shear and flexural deformations โดยที่ rail และ sleeper จะสร้างโดยใช้ SECTION_BEAM และ MAT_ELASTIC โดยที่เพิ่มคุณสมบัติในการยึดหรือหดตามอุณหภูมิ The MAT_ADD_THERMAL_EXPANSION ให้กับ rails เพื่อจำลองคุณสมบัติของเหล็ก ส่วน rail pads และ fasteners โมเดลเป็นสปริงที่สร้างโดยใช้ SECTION_BEAM และ MAT_ELASTIC ให้ rail pads และ fasteners เชื่อมกับ rails และ sleepers ที่ rail seat, rail pad และ fastener จะประกอบไปด้วย translational springs จำนวน 3 ชั้นเพื่อแทน pad stiffness ในแกนทั้ง 3 ทิศทางและใช้ rotational spring จำนวน 1 ชั้นเพื่อแทน fastener resistance ในส่วนของหินโรยทางหรือ ballast เราจะใช้เป็น tensionless support spring โดยจะเชื่อมติดกับปลายทั้ง 2 ฝั่งของ sleeper แทนที่จะเป็น normal spring เนื่องจากมันสามารถทำให้ beam สามารถเคลื่อนที่ไปมาผ่าน support ในขณะที่ไม่คิดผลของ tensile support (Ngamkhanong et al., 2020) ซึ่งจะนำเสนอพฤติกรรมที่สมจริงของ ballast

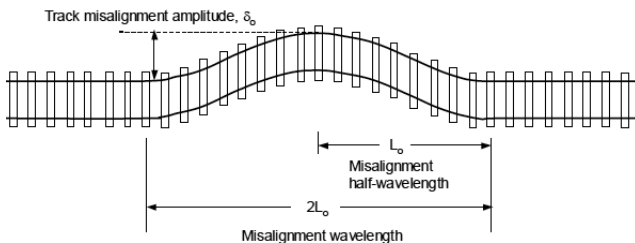


รูปที่ 5 Ballasted railway track modelling

2.3 Boundary conditions

การทำ finite element modelling เราจะต้องกำหนดขอบเขตเงื่อนไขให้ตัว Model โดยในโปรแกรม LS-DYNA จะตั้งค่าผ่านฟังก์ชัน BOUNDARY_SPC_SET เพื่อให้โปรแกรมสามารถวิเคราะห์ค่าต่างๆ ได้ โดยการทำให้ Model โครงสร้างทางรถไฟที่มีลักษณะแบบชั้นหินโรยทางขนาด 1 เมตร ที่มีความยาว 60 เมตร กำหนดให้ปลายทั้ง 2 ฝั่งของ rail ให้มีความสามารถเหมือน fix support เพื่อให้ที่ปลายของโครงสร้างไม่เกิดความเคลื่อนที่และไม่ให้เกิดการหมุนเนื่องจากต้องการวิเคราะห์ให้เหมือนกับสถานการณ์จริงที่จะมีช่วงที่เกิดการ buckling แคบบริเวณใดบริเวณหนึ่งเท่านั้นไม่ให้เกิดการ buckling ทั้งหมด รวมถึงรางแบบ CWR มากไม่เกิดการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์หรือเกิดตำมาๆ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ในบริเวณกึ่งกลางของราง จึงทำให้แบบจำลองสามารถถูกลดขนาดลงได้เหลือ 60 เมตร เพื่อลดเวลาในการวิเคราะห์โครงสร้าง โดยในความเป็นจริงรางแบบ CWR สามารถมีความยาวถึงระดับกิโลเมตร

การทำ finite element modelling และวิเคราะห์ด้วยวิธี nonlinear buckling analysis จะต้องทำการใส่ imperfection หรือ misalignment เป็นเงื่อนไขเนื่องจากในทางทฤษฎีโครงสร้างทางรถไฟจะไม่เกิดการ buckling หากไม่มี imperfection ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบผลของ misalignment รูป sine โดยจะเปรียบเทียบ initial misalignment amplitude ในช่วง 8 – 24 มม. และ initial misalignment wavelength ในช่วง 6000 – 18000 มม. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการโก่งคดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างทางรถไฟ



รูปที่ 6 initial misalignment (Kim Young Hoon (2010))

2.4 Material properties

การทำ finite element modelling นอกจากการสร้างโครงสร้างและกำหนดขอบเขตแล้ว เราจะต้องกำหนดค่าคุณสมบัติต่างของวัสดุหรือ material properties โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณา rail ที่เป็นเหล็ก ซึ่งมี 2 ชนิดได้แก่ UIC60 และ UIC54 ส่วน sleeper จะพิจารณาเป็น timber (hardwood) และค่าของ ballast และ fastener จะจำลองเป็น spring โดยค่าคงที่ของแรงต้านทานตามแนวแกน x ของ ballast ที่ติดอยู่ที่ปลายทั้ง 2 ของ sleeper จะคิดค่าสตีฟเนสของสปริง k ได้แก่ 60 , 120 , 180 , 240 และ 300 N/mm เพื่อเปรียบเทียบผลของ buckling ที่เกิดจากแรงดันจาก ballast และ sleeper

ตารางที่ 1 Material properties.

Parameter list	Characteristic value	Unit
Rail (Steel)		
Modulus	2×10^5	MPa
Density	7850	kg/m ³
Poisson's ratio	0.25	
Thermal expansion	1.17×10^{-5}	1/°C
Timber sleeper (Hardwood)		
Modulus	1.02×10^4	MPa
Shear modulus	3.93×10^3	MPa
Density	2740	kg/m ³
Poisson's ratio	0.2	
Lateral resistance	60 - 300	N/mm
Torsional fastening resistance	225	kNm/rad

ตารางที่ 2 Section properties

Parameter list	Characteristic value	Unit
UIC60		
Section area	7670	mm ²
Moment of inertia about z-axis	5.123e+06	mm ⁴
Moment of inertia about y-axis	3.038e+07	mm ⁴
torsional constant	3.551e+07	mm ⁴
Shear area	7670	mm ²
UIC54		
Section area	6977	mm ²
Moment of inertia about z-axis	2.787e+06	mm ⁴
Moment of inertia about y-axis	2.338e+07	mm ⁴
torsional constant	2.617e+07	mm ⁴
Shear area	6977	mm ²
Timber sleeper (Hardwood)		
Section area	3.750e+04	mm ²
Moment of inertia about z-axis	1.950e+08	mm ⁴
Moment of inertia about y-axis	7.000e+07	mm ⁴
torsional constant	1.760e+08	mm ⁴
Shear area	3.750e+04	mm ²

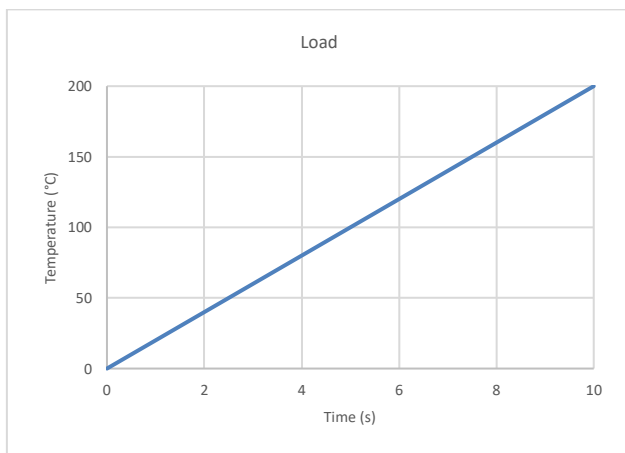
ตารางที่ 3 Spring stiffness

Parameter list	Characteristic value	Unit
Ballast X	60 - 300	N/mm
Ballast Y	11000	N/mm
Ballast Z	2.193e+04	N/mm
Rail pad X	7.000e+04	N/mm
Rail pad Y	7.000e+04	N/mm
Rail pad Z	1.700e+04	N/mm
Rail pad RX	2.250e+08	N/mm
Rail pad RY	2.250e+08	N/mm
Rail pad RZ	2.250e+08	N/mm

Note: X = แขนด้านข้าง (Lateral), Y = แขนตามยาว (Longitudinal), Z = แขนแนวตั้ง (Vertical)

2.4 Load case

ในปัจจุบันมีปัญหาโลกร้อนที่มีความรุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้กับโครงสร้างที่เป็นเหล็กเช่นเดียวกับโครงสร้างทางรถไฟในประเทศไทย ในงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะของทางรถไฟของประเทศไทยภายใต้อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ซึ่งการตั้งค่าของ load จะใช้ฟังก์ชัน THERMAL_LOAD_CURVE เพื่อสร้าง load ของอุณหภูมิซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ อุณหภูมิที่ค่อยๆเพิ่มขึ้นจาก 0 – 200 องศาเซลเซียสภายในระยะเวลา 10 วินาที เพื่อเป็นการจำลองถึงสถานการณ์จริงที่อุณหภูมิจะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นจนเกิดการโก่งเดาะหรือ buckling ขึ้น โดยอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส สามารถครอบคลุมพฤติกรรมการวิบัติแบบโก่งเดาะของโครงสร้างทาง รวมถึงเห็นพฤติกรรมหลังเกิดการโก่งเดาะ



รูปที่ 7 Thermal Load

3. ผลการดำเนินงานวิจัย

จากการทำ Finite Element Modelling โดยใช้โปรแกรม LS-DYNA เพื่อวิเคราะห์การโก่งเดาะหรือ buckling ของโครงสร้างทางรถไฟขนาด 1 เมตร โดยจะพิจารณาผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป

และศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่ส่งผลต่อการโก่งเดาะของทางรถไฟ ในการวิเคราะห์ผลของการโก่งเดาะจะพิจารณาที่กึ่งกลางของรางรถไฟและค่าสูงสุดของแรงตามแนวแกนหรือ axial force ว่ามีค่าที่สูงที่สุด ณ อุณหภูมิที่เท่าใดแล้วจึงนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกันเพื่อหาแนวโน้มพฤติกรรมการวิบัติของโครงสร้างทางรถไฟภายใต้ตัวแปรที่แตกต่างกัน

3.1 Model Validation

จากการศึกษาหาข้อมูลพบว่าการศึกษาวิเคราะห์ผลของ Buckling ในโครงสร้างทางรถไฟในอดีตและผลของการตรวจสอบข้อมูลภาคสนามพบว่าข้อมูลจำกัด ซึ่งส่วนใหญ่ในอดีตจะวิเคราะห์ผลโดยพิจารณาเป็นโครงสร้างทางรถไฟที่มีลักษณะแบบชั้นหินโรยทาง ในการทำ Model Validation จะเปรียบเทียบผลของการศึกษาในอดีตกับ Model ที่สร้างขึ้นใหม่โดยใช้คุณสมบัติต่าง ๆ, เงื่อนไข และหน้าตัดต่างๆให้เหมือนกับกรณีในอดีต ซึ่งเปรียบเทียบกับงานวิจัย 2 งาน ที่ใช้วิธี analytical solutions และเปรียบเทียบกับงานวิจัยอีก 2 งาน ที่ใช้วิธีแบบ finite element analysis (FEA) หมายเหตุในงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบเฉพาะ straight ballasted railway track ที่ใช้ sleepers แบบคอนกรีต ที่มี lateral stiffness เท่ากับ 200 N/mm และมีค่า torsional stiffness เท่ากับ 75k Nm/rad และมีขนาดหน้าตัดของรางเป็นแบบ Standard gauge เท่านั้น

ในงานวิจัยที่วิเคราะห์ผลของ Buckling โดยใช้ analytical solutions จะคำนวณอุณหภูมิที่เกิดการ buckling จาก beam theory และ principle of the virtual displacement equation อุณหภูมิจะถูกคำนวณจาก critical axial force (Prud'Homme and Janin, 1969, Kerr, 1980) ส่วนในงานวิจัยที่วิเคราะห์ผลของ Buckling ที่ใช้วิธีแบบ finite element analysis (FEA) โดยหนึ่งในงานวิจัยที่นำมาเปรียบเทียบใช้โปรแกรม ANSYS จะ model เป็นการรวมกันของ 2 รางรถไฟจนเป็น continuous beam มี 4 springs แทนระบบ fastening และ ballast support ที่มี spacing 1 เมตร ตามความยาวของ continuous beam (Carvalho et al., 2013) ส่วนในอีกงานวิจัยใช้โปรแกรม STRAND7 (Ngamkhanong et al., 2020).

จากตารางที่ 4 ที่นำเสนออุณหภูมิที่เกิด buckling ของงานวิจัยในอดีตและงานวิจัยในปัจจุบัน พบว่าความแตกต่างงานวิจัยในอดีตและงานวิจัยในปัจจุบันมีค่าที่แตกต่างกันคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แค่ 3.7% ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงที่รับได้ แล้วจึงปรับขนาดของรางรถไฟจาก Standard gauge เป็น Meter Gauge และปรับคุณสมบัติต่างๆของ Model เพื่อทำการศึกษาต่อไป

ตาราง 4 Buckling temperatures for model validation (°C).

Analytical solutions		FEM		Average	This study	Difference (%)
Prud'Homme and Janin, 1969,	Kerr, 1980	Carvalho et al. 2013	Ngamkhanong, Wey, and Kaewunruen 2020			
57.7	47.8	50.0	53.0	52.1	54.1	3.7

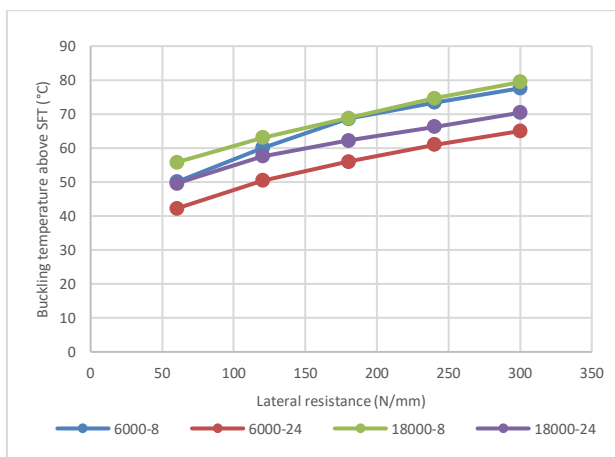
3.2 Parametric Study

ในงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการโก่งเดาะในโครงสร้างทางรถไฟขนาด 1 เมตร โดยที่พิจารณาผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปและผลของตัวแปรต่างๆ ซึ่งแบ่งออกเป็นความต้านทานด้านข้าง (Lateral resistance), หน้าตัดของรางรถไฟ (Rail Section) และ Misalignment เพื่อเปรียบเทียบผลของ buckling ในกรณีต่างๆ โดยค่าของการ buckling สามารถหาได้จากการนำผลของแรงตามยาว (axial force) และอุณหภูมิ มาสร้างเป็นกราฟแล้วจึงดูถึงความสามารถในการรับ axial force ของในแต่ละกรณีว่ามีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิที่เท่าใด

3.2.1 Lateral resistance

ความต้านทานด้านข้างเกิดจากแรงต้านทานของ ballast และ fastener ที่ถูกจำลองให้เป็นสปริงซึ่งมี spring stiffness ที่ค่าๆหนึ่ง ในการศึกษาผลของการโก่งเดาะในโครงสร้างทางรถไฟขนาด 1 เมตร โดยที่พิจารณาผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปและผลของความต้านทานด้านข้าง ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาผลของความต้านทานด้านข้างแค่เฉพาะของ ballast โดยกำหนดค่าของ spring stiffness ได้แก่ 60 , 120 , 180 , 240 และ 300 N/mm

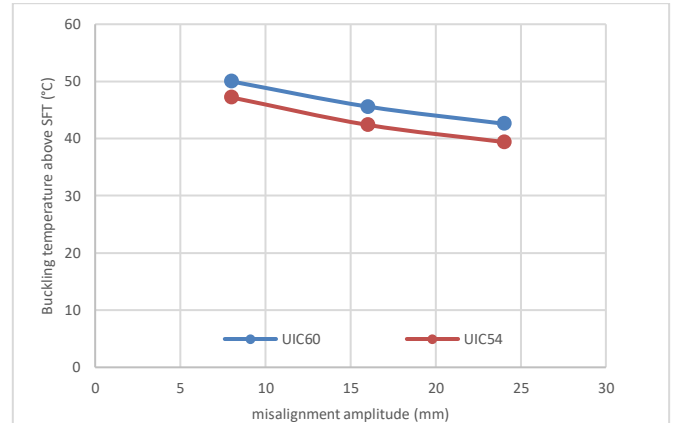
เมื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของ FEM ผ่านโปรแกรม LS-DYNA มาสร้างเป็นกราฟระหว่างแรงตามแนวแกน (N) กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (°C) แล้วจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิเริ่มเพิ่มขึ้นจาก 0 แรงตามแนวแกนจะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ จนถึงอุณหภูมิหนึ่งที่ทำให้แรงตามแนวแกนเกิดการลดลงอย่างฉับพลัน แสดงให้เห็นว่ารางรถไฟเกิดการโก่งเดาะขึ้นแบบ Snap-through buckling และจากรูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในขณะที่เกิดการโก่งเดาะกับความต้านทานด้านข้าง พบว่าเมื่อมีค่า lateral resistance สูง จะส่งผลให้ critical axial force สูงมากขึ้นทำให้รางรถไฟสามารถต้านทานอุณหภูมิได้สูงขึ้น โดยที่การเพิ่ม lateral resistance จาก 60 N/mm เป็น 300 N/mm จะทำให้รางรถไฟสามารถต้านอุณหภูมิเฉลี่ยแล้วได้มากถึง 48.36%



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในขณะที่เกิดการโก่งเดาะ กับ ความต้านทานด้านข้าง

3.2.2 Rail Section

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาหน้าตัดของรางรถไฟ 2 หน้าตัด ได้แก่ UIC60 และ UIC54 ซึ่งค่าของคุณสมบัติต่างๆของทั้ง 2 หน้าตัด จะแสดงอยู่ในตารางที่ 2 จากรูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกน (N) กับ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (°C) โดยเปรียบเทียบหน้าตัดของรางรถไฟ UIC60 และ UIC54 จะพบว่าเมื่อเปรียบเทียบขนาดหน้าตัดจากรางรถไฟ UIC54 และ UIC60 จะพบว่า UIC60 มีความสามารถต้านอุณหภูมิมากกว่าเฉลี่ย 7.2%



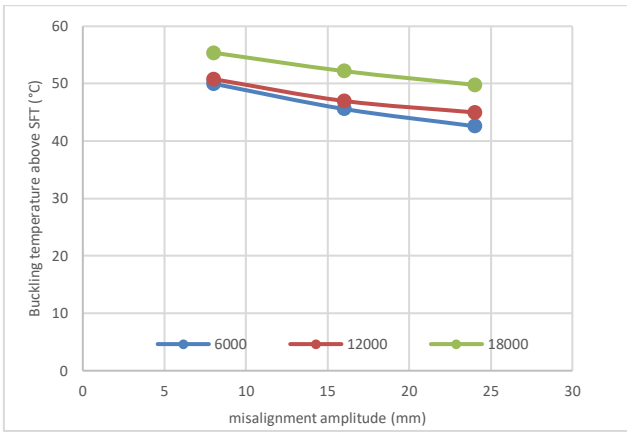
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เกิดการโก่งเดาะกับ misalignment amplitude โดยเปรียบเทียบหน้าตัดของรางรถไฟขนาด UIC60 และ UIC54

3.2.3 Misalignment

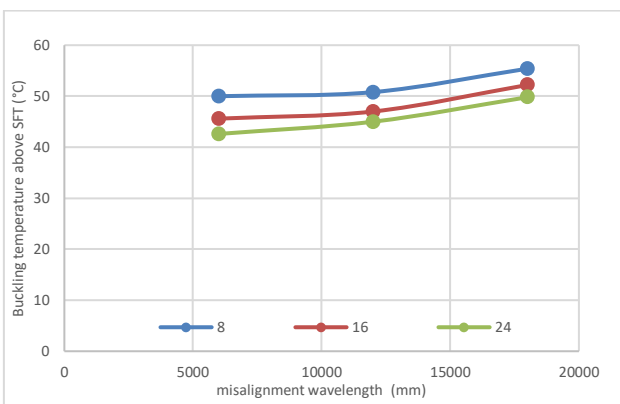
ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาผลของ misalignment โดยจะแบ่งเป็น initial misalignment amplitude 3 ขนาด ได้แก่ 8 , 16 และ 24 มม. และส่วน initial misalignment wavelength จะคิดผล 3 ความยาว ได้แก่ 6000 , 12000 , 18000 มม.

จากรูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในขณะที่เกิดการโก่งเดาะกับ misalignment amplitude โดยเปรียบเทียบ misalignment wavelength ที่ความยาว 6000, 12000 และ 18000 mm จะพบว่าเมื่อเปลี่ยน misalignment amplitude จาก 8 mm เป็น 24 mm มีค่าที่มากขึ้นจะส่งผลให้รางรถไฟสามารถต้านอุณหภูมิน้อยลงเฉลี่ย 12.1 %

จากรูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในขณะที่เกิดการโก่งเดาะกับ misalignment wavelength โดยเปรียบเทียบ misalignment amplitude ขนาด 8, 16 และ 24 mm พบว่าในช่วง wavelength ที่ 6000 และ 12000 mm มีอุณหภูมิที่เกิดการโก่งเดาะที่ใกล้เคียงกันโดยการเปลี่ยน wavelength ที่ 6000 mm เป็น 12000 mm จะเพิ่มอุณหภูมิที่เกิดการโก่งเดาะเพียง 3.43% ในทางกลับกันหากเพิ่ม wavelength จาก 12000 mm เป็น 18000 mm จะส่งผลให้อุณหภูมิที่เกิดการโก่งเดาะมากขึ้นถึง 10.3% ซึ่งการที่อุณหภูมิที่เกิดการโก่งเดาะมากขึ้นจะส่งผลให้รางรถไฟสามารถต้านอุณหภูมิได้มากขึ้น



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในขณะที่เกิดการโก่งเดาะกับ misalignment amplitude โดยเปรียบเทียบ misalignment wavelength 6000, 12000 และ 18000 mm



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในขณะที่เกิดการโก่งเดาะ กับ misalignment wavelength โดยเปรียบเทียบ misalignment amplitude ขนาด 8, 16 และ 24 mm

4. สรุปผลการวิจัย

การวิเคราะห์การโก่งเดาะของโครงสร้างทางรถไฟขนาด 1 เมตร โดยจะพิจารณาผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะวิเคราะห์โครงสร้างทางรถไฟที่มีลักษณะแบบชั้นหินโรยทางโดยจะศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่ส่งผลต่อการโก่งเดาะของทางรถไฟ ได้แก่ Lateral resistance, Rail Section และ Misalignment ซึ่งการโก่งเดาะของโครงสร้างทางรถไฟที่เกิดจากผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถหาค่าได้จากการพิจารณาแรงตามแนวแกนเพื่อหาอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในขณะที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะขึ้น

จากการศึกษาผลของ Lateral resistance ที่ขนาด 60 – 300 N/mm พบว่าเมื่อมี lateral resistance สูง จะส่งผลให้ critical axial force สูงมากขึ้น ทำให้รางรถไฟสามารถต้านทานอุณหภูมิได้สูงขึ้น โดยที่การเพิ่ม lateral resistance จาก 60 N/mm เป็น 300 N/mm จะทำให้รางรถไฟสามารถต้านอุณหภูมิเฉลี่ยแล้วได้มากถึง 48.36%

ในส่วนของ Rail Section จะศึกษาหน้าตัดรางรถไฟขนาด UIC54 และ UIC60 เมื่อเปรียบเทียบหน้าตัดจากรางรถไฟ UIC54 และ UIC60

จะพบว่า UIC60 มีความสามารถในการต้านอุณหภูมิได้มากกว่า UIC54 เฉลี่ย 7.2%

จากการศึกษาผลของ Misalignment พบว่าเมื่อเปลี่ยน misalignment amplitude จาก 8 mm เป็น 24 mm จะส่งผลให้รางรถไฟสามารถต้านอุณหภูมิเฉลี่ยลงเฉลี่ย 12.1 % แต่ในทางกลับกันการเปลี่ยน wavelength ที่ 6000 mm เป็น 12000 mm จะเพิ่มอุณหภูมิที่เกิดการโก่งเดาะเพียง 3.43% ในขณะที่หากเพิ่ม wavelength จาก 12000 mm เป็น 18000 mm จะส่งผลให้อุณหภูมิที่เกิดการโก่งเดาะมากขึ้นถึง 10.3%

จากการศึกษาผลของทั้ง 3 พารามิเตอร์ ของโครงสร้างทางรถไฟที่ใช้ lateral resistance 60 N/mm และใช้หน้าตัดขนาด UIC54 โดยมี misalignment amplitude ขนาด 24 mm และ misalignment wavelength ที่ 6000 mm จะพบว่าอุณหภูมิต่ำที่สุดที่รางสามารถทนได้คือ 39.4 °C โดยเมื่อแปลงค่าให้เป็นอุณหภูมิในรางรถไฟ พบว่ารางรถไฟมีความสามารถในการต้านอุณหภูมิเพียง 66.4 °C ซึ่งสามารถสรุปแนวทางการป้องกันการโก่งเดาะได้โดยเพิ่มชั้นหินหรือการเพิ่มขนาดของรางรถไฟให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และต้องทำการตรวจสอบรางรถไฟไม่ให้เกิด misalignment นอกจากนี้การลดความเร็วของรถไฟในช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงก็จะช่วยเพิ่มความปลอดภัยให้กับรางรถไฟมากยิ่งขึ้น

ผลลัพธ์จากการวิจัยนี้จะช่วยให้วิศวกรระบบรางเข้าใจพฤติกรรมของการโก่งเดาะและสร้างความตระหนักรู้ในการตรวจสอบและบำรุงรักษารางรถไฟที่อยู่เสมอ โดยมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

- ควรพิจารณาผลของการโก่งเดาะใน Shape of misalignment อื่นๆเพิ่มเติม เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะพิจารณา misalignment รูป sine เท่านั้น
- อาจวิเคราะห์ผลของการโก่งเดาะในทางโค้งเพื่อนำมาเปรียบเทียบผลของการโก่งเดาะในทางตรง
- พิจารณาตัวแปรต่างๆ เช่นผลกระทบขนะที่รถไฟกำลังวิ่ง หรือผลกระทบของตำแหน่งในรางรถไฟว่าส่งผลต่อการโก่งเดาะอย่างไร

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้จากอาจารย์ที่ปรึกษาอาจารย์ ดร.ชยุตม์ งามโขมง ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางและการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำปริญญาานิพนธ์นี้ ตลอดจนให้ความรู้อบรมสั่งสอน จนบรรลุเป้าหมายที่ตั้งใจไว้ด้วยดีทุกประการ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และคนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือ รวมถึงบุคคลอื่นที่ไม่ได้กล่าวนามที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ทางผู้จัดทำขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สำหรับคุณประโยชน์อันพึงเกิดจากปริญญาานิพนธ์นี้ ขอมอบให้แก่คณาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นสถานที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

- Carvalho, J., Delgado, J., Calçada, C., Delgado, R. (2013). A new methodology for evaluating the safe temperature in continuous welded rail tracks. *Int. J. Struct. Stab. Dyn*, 13, 1350016.
- Janin, G., Prud'homme, M.A. (1969). The stability of tracks laid with long welded rails. *Int. Rail*, 46, 459–487.
- Kim, Y. H. (2010). Technical trend analysis of railway policy and railway operation. *Proceedings of the KSR Conference, 2010*, 1171-1176.
- Ngamkhanong, C., Wey, C. M., & Kaewunruen, S. (2020). Buckling Analysis of Interspersed Railway Tracks. *Applied Sciences*, 10(9), 3390.
- Ngamkhanong, C., Kaewunruen, S., & Baniotopoulos, C. (2021). Nonlinear buckling instabilities of interspersed railway tracks. *Computers and Structures*, 249, 106516.
- Ngamkhanong, C., Kaewunruen, S., & Baniotopoulos, C. (2021). Influences of ballast degradation on railway track buckling. *Engineering Failure Analysis*, 122, 105252.
- Ngamkhanong, C., Kaewunruen, S., & Baniotopoulos, C. (2021). Thermal buckling behaviour of degraded railway tracks. *VCDRR2021*, 148.
- Ngamkhanong, C., Feng, B., Tutumluer, E., Hashash, Y. M.A., Kaewunruen, S. (2021). Evaluation of lateral stability of railway tracks due to ballast degradation. *Construction and Building Materials*, 278, 122342.
- Oslakovic IS, Maat HWT, Hartmann A, Dewulf G. (2013) Risk assessment of climate change impacts on railway infrastructure, 2013.
- Palin, E. J., Oslakovic, I. S., Gavin, k., Quinn, A. (2021) Implications of climate change for railway infrastructure. *Wiley interdisciplinary reviews: Climate Change*, 12(5).
- Quinn, A.D., Jack, A., Hodgkinson, S., Ferranti, E.J.S., Beckford, J., Dora, J. (2017). *RAIL ADAPT Adapting the Railway for the Future*; International Union of Railways (UIC): Paris, France, 2017.
- Yang, G., Bradford, M.A. (2016). Thermal-induced buckling and postbuckling analysis of continuous railway tracks. *Int. J. Solids Struct*, 97–98, 637–649.
- Zakeri, J.A., Esmaeili, M., Kasraei, A., Bakhtiary, A. (2014) A numerical investigation on the lateral resistance of frictional sleepers in ballasted railway tracks. *Rail Rapid Transit*, 230, 440–449.