

## การวิเคราะห์การโก่งเดาะแบบไม่เชิงเส้นของโครงสร้างทางรถไฟบริเวณทางโค้ง

### Nonlinear buckling analysis of railway tracks with a tight curve

ณัฐภูมิ นุญย์<sup>1</sup> ภัทรกุลพงศ์ ติลภัทร<sup>2</sup> และ ชยุตม์ งามโชนง<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

#### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการขยายตัวของความต้องการใช้งานระบบขนส่งทางรางได้เพิ่มขึ้นอย่างมาก พร้อมกับโครงการพัฒนาเส้นทางรถไฟให้ครอบคลุมทุกพื้นที่ในประเทศไทยเนื่องด้วยความสามารถในการขนส่งที่มีความจุสูง ระยะเวลาเดินทางที่แน่นอนและความสะดวกในการเข้าถึงระบบขนส่งถึงโครงการสร้างเส้นทางใหม่จะมีการขยายตัวอย่างมากแต่ทุกเส้นทางที่ใช้งานย่อมต้องได้รับการดูแลบำรุงรักษาให้อยู่ในสภาพปลอดภัยพร้อมใช้งานเพื่อลดผลกระทบต่อโครงสร้างรางรถไฟที่มีผลมาจากสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างยิ่งภาวะโลกร้อนที่มีความผันแปรของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นอาจจะทำให้เพิ่มความเสี่ยงการเกิดการโก่งเดาะต่อระบบโครงสร้างรางรถไฟได้ซึ่งเพิ่มความเสี่ยงที่จะเกิดการสูญเสียในการใช้งานทั้งด้านทรัพย์สินและชีวิตจำนวนมาก

จากผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้รางรถไฟชนิดเชื่อมต่อเนื่อง (Continuous Welded Rail) ซึ่งเป็นรางที่ใช้ในรางรถไฟไทยทำให้เกิดความเค้นภายในรางสะสมจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจนอาจจะเกินค่าที่รางรถไฟสามารถต้านทานทำให้เสียความสามารถคงอยู่ในเส้นทางที่ออกแบบไว้เนื่องจากเกิดพฤติกรรมการโก่งเดาะในทางรถไฟโดยจากงานวิจัยศึกษาวิเคราะห์การโก่งเดาะของรางที่ผ่านมาเห็นได้ว่ามีการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติรางรถไฟทางตรงปกติอย่างมากแต่สำหรับรางรถไฟทางโค้งนั้นยังไม่มีการศึกษาอย่างเพียงพอทางคณะผู้ทำวิจัย ฉบับนี้จึงได้ใช้การวิเคราะห์ความสามารถต้านทานการโก่งเดาะในรางรถไฟในทางโค้งจากผลของอุณหภูมิในแบบจำลอง 3 มิติ ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบ Finite Element โดยในการทำแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ได้คำนึงถึงตัวแปรที่มีผลต่างๆ ได้แก่ รัศมีของทางโค้ง ความต้านทานด้านข้างจาก ballast และ sleeper การยกตัวทางโค้ง (Cant) ความไม่สมบูรณ์ของทางรถไฟ ผลจากการศึกษาจะทำให้ทราบพฤติกรรมของราง

คำสำคัญ: ทางรถไฟ, การโก่งเดาะของรางรถไฟ, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, แรงกระทำจากอุณหภูมิ

#### Abstract

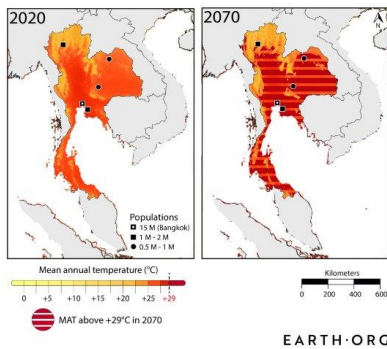
Currently, the expansion of the demand for rail transport systems has greatly increased, along with the project to develop railway routes to cover all areas in Thailand due to its high-capacity transport, definite travel time, and convenient access to the transport system. The project to create new routes will expand greatly, but all routes in use must be maintained to be safe and ready for use to reduce the impact on the railway structure that results from the changing environment, especially global warming which has a variable temperature. This could increase the risk of buckling in the railway structure, which increases the risk of massive loss of use in both property and life.

The result of the increased temperature affects the Continuous Welded Rail, which is a rail used in Thai railways, causing internal tension in the rail accumulated from the increased temperature until it may exceed the value that the railway can resist, causing the loss of ability to stay in the designed route due to the buckling behavior in the railway. From the research, the study of the buckling of the rail has seen that there is a lot of research on the properties of normal straight rails, but for curved railway tracks, there is not enough research. This research, therefore, uses the analysis of the ability to resist buckling in railway tracks in curves from the results of temperature in 3D modeling by the Finite Element analysis method. In making the model for analysis, various factors are considered, such as the radius of the curve, lateral resistance from

Key words: Railway track, Track Buckling, Finite Element Model, Thermal load

## 1. คำนำ

ในปัจจุบันการขยายตัวของความต้องการใช้งานระบบขนส่งทางรางได้เพิ่มขึ้นอย่างมากพร้อมกับโครงการพัฒนาเส้นทางรถไฟให้ครอบคลุมทุกพื้นที่ในประเทศไทยเนื่องด้วยความสามารถในการขนส่งในระยะทางไกลนั้นมีประสิทธิภาพ ระยะเวลาเดินทางที่แน่นอน และความสะดวกในการเข้าถึงระบบขนส่ง ส่งผลให้เกิดโครงการสร้างเส้นทางใหม่ขยายตัวออกไปอย่างมาก แต่เนื่องจากสภาวะโลกร้อนในปัจจุบันส่งผลกระทบต่อโครงสร้างรางรถไฟที่มีผลมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป จากการคาดการณ์ของ Earth.org ประเทศไทยจะมีอุณหภูมิในจุดสูงสุดเพิ่มขึ้นไปอีก 29 องศาเซลเซียส ในอีก 50 ปีข้างหน้า



รูปที่ 1 การคาดการณ์อุณหภูมิในประเทศไทย (Earth.org, 2563)

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้ส่งผลต่อโครงสร้างทางรถไฟแบบที่ประเทศไทยใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งเป็นลักษณะแบบมีหินโรยทาง (Ballasted track) ผนวกกับปัจจุบันที่ใช้รางรถไฟที่มีลักษณะเชื่อมกันต่อเนื่อง (Continuous Welded Rail) ซึ่งทำให้รางรถไฟมีอัตราส่วนความยาวต่อหน้าตัด (Slenderness ratio) สูงส่งผลให้รางรถไฟมีแนวโน้มสูงที่จะเกิดการโก่งคด (Buckling) เนื่องจากโครงสร้างเหล็กเกิดการขยายตัวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดแรงอัดขึ้นภายในโครงสร้างทางรถไฟ อาจจะทำให้เพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดการโก่งคดในระบบโครงสร้างทางรถไฟได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนโค้งของทางรถไฟเนื่องจากแรงอัดที่เกิดขึ้นในทางรถไฟจะไม่อยู่ในแนวแกนทั้งหมด (Axial Force) เหมือนกับทางตรงทำให้เกิดแรงดันข้าง (Lateral Force) ที่ส่งผลต่อระบบหินโรยทางและหมอนรองทางโดยตรงที่จะต้องต้านทานแรงดังกล่าว ซึ่งเพิ่มความเสี่ยงที่จะเกิดผลกระทบในการใช้งานหากเกิดพฤติกรรมการโก่งคดขณะขบวนรถไฟวิ่งอยู่บนจุดดังกล่าวอาจจะทำให้พลิกคว่ำได้ ทำให้สูญเสียทั้งด้านทรัพย์สินและชีวิตจ้านวนมหาศาล

มีการรายงานข่าวเดือนมกราคม 2552 ที่กรุงเมลเบิร์นประเทศออสเตรเลีย (AIDR, 2552) เกิดรางคดงอในช่วงทางโค้งเนื่องจากผลของคลื่นความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 45.1 °C ต้องใช้น้ำฉีดเพื่อลดอุณหภูมิ และเช่นเดียวกันในสหราชอาณาจักรใกล้กับเมืองลินคอล์น (Lincoln) เมื่อวันที่ 4 กรกฎาคม 2559 พบการคดงอของรถไฟขนส่งสินค้าขนาดใหญ่ (The LINCOLNITE, 2559) ในวันที่ร้อนที่สุดของปีของสหราชอาณาจักร ส่งผลกระทบต่อสินค้าที่ล้าเสี่ยงอย่างมาก ซึ่งเหตุการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นในประเทศไทยเช่นกัน เมื่อวันที่ 24 เมษายน 2560 เกิดเหตุการณ์

การโก่งคดของรางรถไฟระหว่างเส้นทาง รือเสาะ-ลาโล๊ะ ใน อ.รือเสาะ จ.นราธิวาส (สำนักข่าวไทย, 2560) ส่งผลให้รถไฟต้องหยุด การให้บริการเป็นเวลากว่า 2 ชั่วโมง แม้ว่าจะไม่มีรายงานรถไฟคดงออย่างที่เกิดในสหราชอาณาจักร แต่เหตุการณ์นี้ก็ส่งผลเสียหายต่อเครือข่ายระบบรางในพื้นที่ภาคใต้เป็นวงกว้าง และยังเกิดเหตุการณ์แบบนี้บ่อยๆเป็นประจำในวันที่มีอุณหภูมิสูง อย่างล่าสุดในวันที่ 30 เมษายน 2567 เกิดรางคดงอ ระหว่างสถานีร่อนพิบูลย์-สถานีชุมทางเขาชุมทอง จ.นครศรีธรรมราช (สำนักข่าวอมรินทร์, 2567) ทำให้ต้องหยุดขบวนชั่วคราวฉีดน้ำลดอุณหภูมิและใช้น้ำแข็งหล่อเย็น เพื่อให้รางกลับมาอยู่ในสภาพปกติประมาณ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 2 การโก่งตัวของทางรถไฟ ระหว่างสถานีรือเสาะ-สถานีลาโล๊ะ (สำนักข่าวไทย, 2560)



รูปที่ 3 การโก่งตัวของทางรถไฟระหว่างสถานีร่อนพิบูลย์-สถานีชุมทางเขาชุมทอง (สำนักข่าวอมรินทร์, 2567)

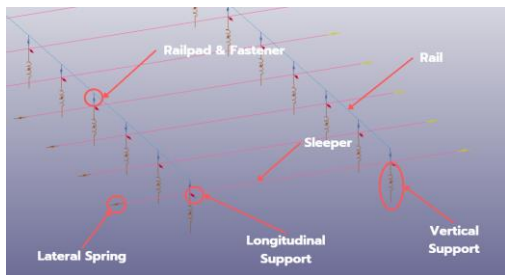
ปัญหาการโก่งคดจากผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงนี้มีแนวโน้มที่จะเกิดมากขึ้นและรุนแรงขึ้นและเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อระบบรางที่ทำให้เสมือนระบบรางขาดช่วงไม่สามารถใช้งานขนส่งได้ทั้งเส้นทาง หรือหากเกิดการโก่งคดขณะที่ขบวนผู้โดยสารผ่านอาจจะทำให้เกิดความสูญเสียขนาดใหญ่ได้ ทางผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญของการศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบจากอุณหภูมิกับรางรถไฟโดย ได้ใช้การจำลองสภาพการใช้งานของทางรถไฟในทางโค้ง นำเอาผลการวิจัยที่ผ่านมาประยุกต์ใช้ทั้งความต้านทานด้านข้าง คุณสมบัติของรางรถไฟ หมอนรองรางรถไฟ ประกอบการใช้โปรแกรมวิเคราะห์แบบ Finite Element อย่าง LS-Dyna เพื่อจำลองตัวแปรที่แตกต่างกันอย่างระมัดระวัง ความสูงของโค้ง

แนวตั้งที่แตกต่างกัน การจำลองความเสีรูปก่อนได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิด้วย Sine wave และนำผลอุณหภูมิที่ทำให้เสีรูปมาหาแนวโน้มความสามารถในการต้านทานที่ยอมรับได้ของทางรถไฟเพื่อหาแนวทางป้องกันการโก่งเดาะที่เกิดจากผลของอุณหภูมิก่อนจะเกิดความเสียหายและนำไปสู่การกำหนดมาตรฐานการป้องกันการโก่งเดาะของทางรถไฟจากอุณหภูมิต่างกันมีประสิทธิภาพ

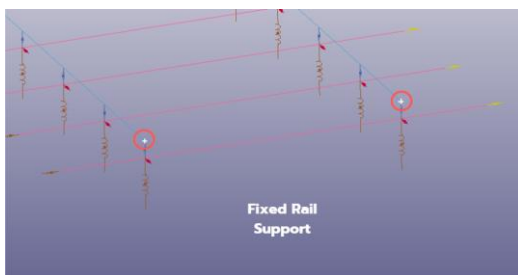
## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

### 2.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

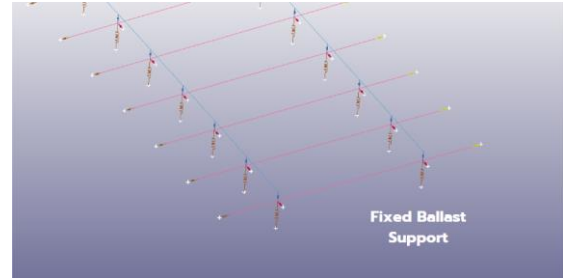
เพื่อที่จะศึกษาแบบ และอุณหภูมิสูงสุดที่ก่อให้เกิดการโก่งเดาะของทางรถไฟแบบมีชั้นหินโรยทางบริเวณทางโค้งนั้น แบบจำลองจะถูกสร้างและวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Ansys LS-DYNA ซึ่งจะคำนึงถึงตัวแปรที่สำคัญ คือ รัศมีทางโค้ง 200 และ 2000 เมตร โดยในแต่ละรัศมีจะกำหนดให้มีการยกโค้ง (Cant or Superelevation) เท่ากับ 0, 50, 85, 115 และ 150 มิลลิเมตร โดยที่มีลักษณะเป็นทางรถไฟชั้นหินโรยทางขนาดมาตรฐาน (Standard gauge) มีระยะห่างระหว่างหมอนรอง 0.6 เมตร ทั้งหมด 100 ช่วง รวมเป็นความยาวทั้งสิ้น 60 เมตร โดยกำหนดให้รางและหมอนรองทางเป็น Beam elements ที่มีการเพิ่มคุณสมบัติการยึดหดตามอุณหภูมิเพื่อจำลองคุณสมบัติของเหล็ก และสำหรับระบบยึดจับรางรถไฟ (Fastening System) จะสร้างโดยใช้สปริง Discrete elements จำนวน 6 ชั้นเพื่อยึดรางให้วางอยู่ติดกับหมอนรอง เพื่อด้านทานการเคลื่อนตัวและการหมุนทั้ง 3 ทิศทาง สำหรับในส่วนของหินโรยทางจะถูกจำลองด้วยสปริงเชื่อมติดกับปลาย หมอนรองทางทั้งสองฝั่งตามแกน Local axis ในทิศทางตามยาวของหมอนรถไฟขนาดตัวอักษรและการเว้นระยะ



รูปที่ 4 ส่วนประกอบแบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟ



รูปที่ 5 Boundary Condition ที่ปลายรางของแบบจำลอง



รูปที่ 6 Boundary Condition สปริงที่เชื่อมกลับหมอนรองรางของแบบจำลอง

จากรูปที่ 5 และ 6 กำหนด Boundary Condition ให้กับโมเดลจำลองของทางรถไฟที่บริเวณรางรถไฟ และบริเวณ Support ที่เชื่อมกับหมอนรองรางรถไฟเพื่อกำหนดขอบเขตในการวิเคราะห์การเกิดการโก่งเดาะของรางรถไฟและกำหนดให้เกิดการโก่งเดาะที่บริเวณกึ่งกลางของทางรถไฟ

### 2.2 Material properties

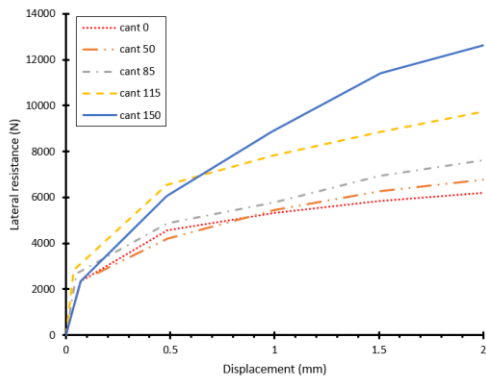
การทำ Finite Element Modeling นอกจากขึ้นโครงสร้างและขอบเขตของ Model แล้วจำเป็นต้องกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่จำลองขึ้นมา ในงานวิจัยนี้เรากำหนดให้รางรถไฟมีคุณสมบัติเป็นเหล็กหน้าตัด UIC60 หมอนรองรถไฟประเภทคอนกรีต ค่าของชั้นหินโรยทางและระบบยึดจับรางรถไฟจำลองเป็นสปริง ค่าคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชั้นส่วนต่างๆ แสดงในตารางที่ 1-4

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาเป็นแบบการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลาโดยทำการเพิ่มอุณหภูมิให้กับทางจาก 0 ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยจะศึกษาความต้านทานทางด้านข้างของหมอนรถไฟและหินโรยทางแบบไม่เชิงเส้นทั้งในช่วงฮิสเทติกโซนและช่วงพลาสติกโซนดังรูปที่ 7 เนื่องจากในการศึกษาในอดีตได้มีการศึกษาโครงสร้างทางรถไฟโดยใช้ความต้านทานทางด้านข้างในช่วงฮิสเทติกโซนเป็นส่วนมาก

ตารางที่ 1 ค่าความต้านทานของสปริง

| พารามิเตอร์            | ค่าของวัสดุ         | หน่วย                    |
|------------------------|---------------------|--------------------------|
| ความต้านทานทางด้านข้าง | ดังรูปที่ 4         | นิวตัน/มิลลิเมตร         |
| ความต้านทานตามยาว      | 11000               | นิวตัน/มิลลิเมตร         |
| ความต้านทานแนวตั้ง     | $2.193 \times 10^4$ | นิวตัน/มิลลิเมตร         |
| แผ่นรองรางในแนวแกน X   | $7.000 \times 10^4$ | นิวตัน/มิลลิเมตร         |
| แผ่นรองรางในแนวแกน Y   | $7.000 \times 10^4$ | นิวตัน/มิลลิเมตร         |
| แผ่นรองรางในแนวแกน Z   | $1.700 \times 10^4$ | นิวตัน/มิลลิเมตร         |
| แผ่นรองรางในแนวแกน RX  | $7.500 \times 10^7$ | นิวตัน-มิลลิเมตร/เรเดียน |
| แผ่นรองรางในแนวแกน RY  | $7.500 \times 10^7$ | นิวตัน-มิลลิเมตร/เรเดียน |
| แผ่นรองรางในแนวแกน RZ  | $7.500 \times 10^7$ | นิวตัน-มิลลิเมตร/เรเดียน |

Note: X = แกนทางด้านข้าง (lateral), Y = แกนตามยาว (longitudinal), Z = แกนในแนวตั้ง (vertical)



รูปที่ 7 แรงต้านทานด้านข้างและการเคลื่อนตัวของหมอนรถไฟ กรณีความกว้างใหญ่ทาง 300 มิลลิเมตร

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาค่าความต้านทานของสปริงแทนค่าความต้านทานด้านข้างของหินโรยทาง สำหรับแรงต้านทานด้านข้างจะกำหนดค่าแบบไม่เชิงเส้นซึ่งสามารถหาได้จากกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานด้านข้างและการเคลื่อนตัวของหมอนรถไฟ ดังรูปที่ 7 ที่จะแสดงถึงค่าความต้านทานทางด้านข้างของการยกโค้ง 0, 50, 85, 115 และ 150 มิลลิเมตรเปรียบเทียบกับ โดยค่าที่นำมาใช้ ได้มาจากผลการทดสอบจากงานวิจัยในอดีต (ref. Aela et al., 2023) โดยค่าของแรงที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของหมอนรถไฟตั้งแต่ 0 - 2 มิลลิเมตรจะถูกพิจารณาให้เป็นความต้านทานการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ความต้านทานการโค้งเดาะทางด้านข้างจากชั้นหินโรยทางและหมอนรองเป็นสิ่งที่สำคัญมากที่สุด เราจึงนำค่าจากกราฟดังกล่าวแสดงรูปที่ 7 มาใส่ในแบบจำลองไปยังส่วนที่เป็นสปริงที่ติดอยู่บริเวณปลายของหมอนรองทั้งสองด้าน ซึ่งจะมีการยกโค้งทั้งหมด 5 ระดับ คือ 0, 50, 85, 115 และ 150 มิลลิเมตร ในแต่ละการยกโค้งก็จะมีค่าความต้านทานทางด้านข้างที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุ

| พารามิเตอร์                       | ค่าของวัสดุ           | หน่วย                      |
|-----------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| รางรถไฟ (เหล็ก)                   |                       |                            |
| โมดูลัส                           | $2 \times 10^5$       | เมกะปาสคาล                 |
| ความหนาแน่น                       | 7850                  | กิโลกรัม/เมตร <sup>3</sup> |
| อัตราส่วนปัวซอง                   | 0.25                  |                            |
| สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน | $1.17 \times 10^{-5}$ | 1/องศา                     |
| หมอนรองคอนกรีต                    |                       |                            |
| โมดูลัส                           | $3.745 \times 10^4$   | เมกะปาสคาล                 |
| โมดูลัสของแรงเฉือน                | $1.05 \times 10^4$    | เมกะปาสคาล                 |
| ความหนาแน่น                       | 2740                  | กิโลกรัม/เมตร <sup>3</sup> |
| อัตราส่วนปัวซอง                   | 0.25                  |                            |
| ความต้านทานการบิดของตัวยึดจับราง  | 75                    | กิโลกรัม-เมตร/เรเดียน      |

ตารางที่ 3 คุณสมบัติหน้าตัดของรางรถไฟชนิด UIC60

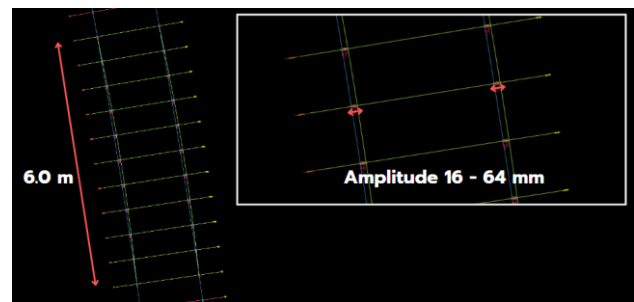
| พารามิเตอร์              | ค่าของวัสดุ           | หน่วย                  |
|--------------------------|-----------------------|------------------------|
| พื้นที่หน้าตัด           | $2 \times 10^5$       | มิลลิเมตร <sup>2</sup> |
| โมเมนต์ความเฉื่อยในแกน z | 7850                  | มิลลิเมตร <sup>4</sup> |
| โมเมนต์ความเฉื่อยในแกน y | 0.25                  | มิลลิเมตร <sup>4</sup> |
| ค่าคงที่การบิด           | $1.17 \times 10^{-5}$ | มิลลิเมตร <sup>4</sup> |
| พื้นที่รับแรงเฉือน       | $3.745 \times 10^4$   | มิลลิเมตร <sup>2</sup> |

ตารางที่ 4 คุณสมบัติหน้าตัดของหมอนรองคอนกรีต

| พารามิเตอร์              | ค่าของวัสดุ         | หน่วย                  |
|--------------------------|---------------------|------------------------|
| พื้นที่หน้าตัด           | $4.086 \times 10^4$ | มิลลิเมตร <sup>2</sup> |
| โมเมนต์ความเฉื่อยในแกน z | $1.773 \times 10^8$ | มิลลิเมตร <sup>4</sup> |
| โมเมนต์ความเฉื่อยในแกน y | $1.099 \times 10^8$ | มิลลิเมตร <sup>4</sup> |
| ค่าคงที่การบิด           | $2.353 \times 10^8$ | มิลลิเมตร <sup>4</sup> |
| พื้นที่รับแรงเฉือน       | $4.086 \times 10^4$ | มิลลิเมตร <sup>2</sup> |

### 2.3 การเสียนแนวทางรถไฟ (Initial misalignment)

ในงานวิจัยนี้เราจะใส่การเสียนแนวทางรถไฟ ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบผลของการเสียนแนวทางรถไฟในรูปแบบของเส้นโค้งไซน์ โดยพิจารณาค่าขนาดของการเสียนแนวหลายกรณี ในงานวิจัยนี้ จะคำนึงถึงความยาวของการเสียนแนว (Initial Misalignment Wavelength) อยู่ที่ 6.0 เมตร และคำนึงถึงขนาดของการเสียนแนว (Initial Misalignment Amplitude) 16, 32, 48, 64 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยที่การเสียนแนวจะเกิดขึ้นที่ตรงกลางของความยาวรางรถไฟ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการโค้งเดาะที่เกิดขึ้นในโครงสร้างทางรถไฟ



รูปที่ 8 การเสียนแนวทางรถไฟในแบบจำลอง

### 2.4 อุณหภูมิที่กระทำกับแบบจำลอง

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการโค้งเดาะของรางรถไฟ อุณหภูมิก็เป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดการโค้งเดาะ โดยทำการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่ง 200 องศาเซลเซียส เพื่อจำลองและวิเคราะห์ให้ครอบคลุมการโค้งเดาะที่เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในสถานการณ์จริงโดยที่อุณหภูมิ 200 องศา

เซลล์เซียม จะสามารถครอบคลุมพฤติกรรมกรรมการวิบัติแบบโก่งเดาะของโครงสร้างทางรถไฟ รวมถึงเห็นพฤติกรรมหลังเกิดการโก่งเดาะ และสำหรับกรณีที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ไม่สามารถครอบคลุมพฤติกรรมกรรมการวิบัติของรางรถไฟได้ดี ทำการเพิ่มขอบเขตการวิเคราะห์อุณหภูมิถึง 500 องศาเซลเซียส

### 2.5 อุณหภูมิโก่งเดาะของทางรถไฟ

จากการศึกษาหาข้อมูลพบว่าผลการวิเคราะห์ผลของการโก่งเดาะในโครงสร้างทางรถไฟในอดีตและผลของการตรวจวัดจากภาคสนามนั้น มีข้อมูลที่จำกัด ซึ่งในอดีตส่วนใหญ่จะวิเคราะห์ผลโดยพิจารณาโครงสร้างทางรถไฟแบบมีชั้นหินโรยทาง โดยงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการศึกษาในอดีต (ref. Hasan et al., 2021) กับแบบจำลองที่สร้างใหม่โดยใช้คุณสมบัติ, เงื่อนไข ให้เหมือนกับการวิจัยในอดีต

$$\Delta T_c = 50 \times \frac{R \times F_{QVW}}{A \times E \times \alpha} \quad (1)$$

- โดยที่ R คือ รัศมีความโค้ง (ม.)
- F<sub>QVW</sub> คือ ค่าความต้านทานทางด้านข้าง (นิวตัน/ซม.)
- A คือ พื้นที่หน้าตัดของราง (มม.<sup>2</sup>)
- E คือ ค่าโมดูลัสของยัง (นิวตัน/ซม.<sup>2</sup>)
- α คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (1/°C)

## 3. ผลการศึกษา

### 3.1 Model Validation

ก่อนการวิเคราะห์ผลการศึกษาที่เราได้รับ ต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการวิจัยในอดีต ซึ่งในการตรวจสอบจะใช้งานวิจัยทางรถไฟแบบชั้นหินโรยทางในการตรวจสอบจากสมการที่ 1 โดยมีค่าผลเปรียบเทียบที่ได้แสดงดังตารางที่ 5 สำหรับทางรถไฟที่มีรัศมีความโค้ง 200 เมตร

โดยกำหนดค่าตัวแปรแบบเชิงเส้นเพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดจากงานวิจัยในอดีต โดยขอบเขตของกรณีศึกษาสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองให้เป็นไปตามข้อจำกัดจากงานวิจัยทางรถไฟแบบชั้นหินโรยทาง (ref. Hasan et al., 2021)

ตารางที่ 5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางรถไฟรัศมีความโค้ง 200 เมตร

| การยกโค้ง (มิลลิเมตร) | Hassan (2021) (°C) | Model R200 (°C) | % ความแตกต่าง |
|-----------------------|--------------------|-----------------|---------------|
| 0                     | 57.81              | 56.00           | 3.23          |
| 50                    | 62.98              | 64.80           | 2.81          |
| 85                    | 70.85              | 72.00           | 1.59          |
| 115                   | 90.64              | 89.60           | 1.16          |
| 150                   | 117.18             | 113.80          | 2.97          |

จากตารางที่ 5 ทั้ง 5 กรณีที่ทำการตรวจสอบข้างต้นมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกับงานวิจัยในอดีตค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.35% ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ไม่เกิน 5% จึงสามารถสรุปยืนยันได้ว่าแบบจำลองที่จะใช้วิเคราะห์ต่อไปนี้มีความน่าเชื่อถือ

### 3.2 ผลการศึกษาที่ได้รับ

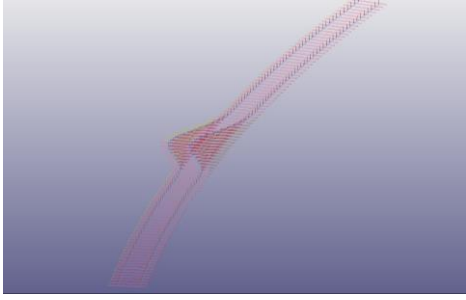
ในงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการโก่งเดาะในโครงสร้างทางรถไฟขนาดมาตรฐาน โดยพิจารณาผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปและผลของตัวแปรต่าง ๆ จากแบบจำลองทางเมตร มีชั้นหินโรยทางความกว้างไหล่ทาง 300 มิลลิเมตร โดยพิจารณากรณีที่รัศมี 200 และ 2000 เมตร ในแต่ละรัศมีจะมีการยกโค้ง 0, 50, 85, 115 และ 150 มิลลิเมตร ในแต่ละการยกโค้งจะมีการเสียแนวทางรถไฟความยาว 6.0 เมตร ขนาด 0, 16, 32, 48, และ 64 มิลลิเมตร ดังที่แสดงในตารางที่ 6 เพื่อเปรียบเทียบผลของการโก่งเดาะในกรณีต่าง ๆ โดยค่าของการโก่งเดาะสามารถหาได้จากการนำผลของแรงตามแนวแกน (Axial Force) และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมาสร้างเป็นกราฟแล้วจึงดูถึงความสามารถในการรับแรงตามแนวแกนในแต่ละกรณีว่ามีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิเท่าใด

ตารางที่ 6 แบบจำลองการวิจัยทั้งหมด

| รัศมี (ม.) | ความกว้างไหล่ทาง (มม.) | การยกโค้ง (มม.)     | การเสียแนวทางรถไฟ |                   |
|------------|------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
|            |                        |                     | ความยาว (ม.)      | ขนาด (มม.)        |
| 200        | 300                    | 0, 50, 85, 115, 150 | 6.0               | 0, 16, 32, 48, 64 |
| 2000       | 300                    | 0, 50, 85, 115, 150 | 6.0               | 0, 16, 32, 48, 64 |

#### 3.2.1 รูปแบบการโก่งเดาะ

รูปร่างโก่งเดาะ โดยปกติจะมีทั้งหมด 3 ประเภท ได้แก่ Symmetrical buckling, Asymmetrical buckling และ Sinusoidal buckling โดยในงานวิจัยนี้ในทุกๆกรณี ทั้งกรณีที่มีและไม่มีเสียแนวทางรถไฟ กรณีรัศมีทางโค้งที่ต่างกัน และการยกโค้งที่ต่างกันพบว่าในทุกกรณีจะเกิดการโก่งเดาะแบบ Symmetrical buckling โดยจากแบบจำลองจะพบว่าการโก่งเดาะจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีการสูญเสียแนวทางรถไฟดังแสดงในรูปที่ 6

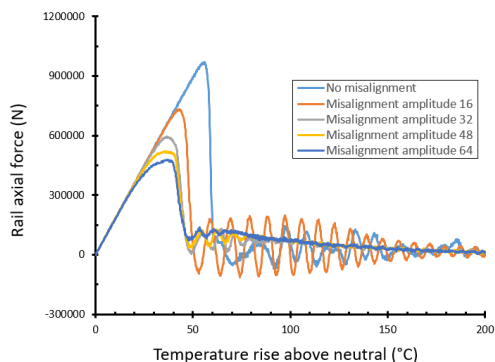


รูปที่ 9 แบบจำลองการโก่งเดาะกรณีที่มีการเสียนแนวทางรถไฟ  
รัศมีความโค้ง 200 เมตร

### 3.2.2 แรงตามแนวแกน

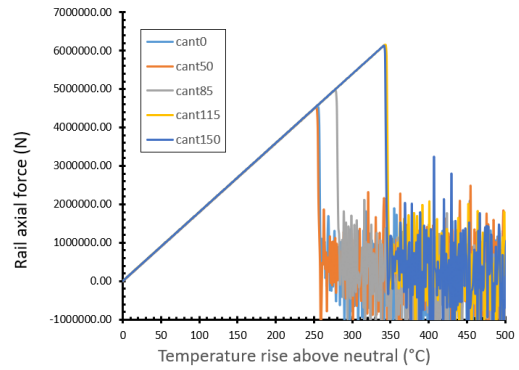
จากการวิเคราะห์อุณหภูมิที่สามารถต้านทานการโก่งเดาะ เมื่อดูรูปแบบการเกิดการโก่งเดาะ ผลการวิเคราะห์เมื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปและแรงตามแนวแกน จากรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่ากราฟที่แสดงนั้นพบว่าเมื่ออุณหภูมิเริ่มเพิ่มขึ้นจาก 0 แรงตามแนวแกนจะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ จนถึงอุณหภูมิหนึ่งที่ทำให้แรงตามแนวแกนเกิดการลดลงอย่างฉับพลัน แสดงให้เห็นว่ารางรถไฟเกิดการโก่งเดาะแบบทันทีทันใด (Snap-through buckling) ซึ่งในช่วงก่อนเกิดการโก่งเดาะ รางรถไฟสัมผัสกับอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดอ้างอิงที่ไม่ทำให้เกิดความเค้นในราง (Neutral Temperature) แรงตามแนวแกนถูกเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง ซึ่งเมื่อถึงจุดที่เกิดการโก่งเดาะ แรงตามแนวแกนจะถูกลดลงแบบทันทีจนกระทั่งรางจะกลับเข้าสู่โหมดที่คงตัว ซึ่งจุดควบคุมวิกฤต (Critical Limit Point) จะเป็นจุดที่แสดงค่าอุณหภูมิสูงสุดที่รางจะสามารถคงสภาพปกติก่อนที่จะเกิดการโก่งเดาะได้ ในช่วงหลังเกิดการโก่งเดาะ ทำให้สามารถกำหนดอุณหภูมิที่ปลอดภัยได้ที่จะไม่ทำให้นั้นเกิดการโก่งเดาะถ้าอุณหภูมินั้นมีค่าไม่ถึงค่าที่กำหนด

จากรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกน และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในกรณีรัศมี 200 เมตร ที่ไม่มีการยกโค้งในกรณีที่มีและไม่มีการเสียนแนวทางรถไฟทั้งหมด 5 รูปแบบ อุณหภูมิที่เกิดการโก่งเดาะและแรงตามแนวแกนที่สามารถรับได้จะลดต่ำลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับรางรถไฟในกรณีที่ไม่มีการเสียนแนวทางรถไฟ เมื่อเปรียบเทียบในกรณีที่มีการเสียนแนวทางรถไฟ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในกรณีรัศมี 200 เมตร และไม่มีการยกโค้ง

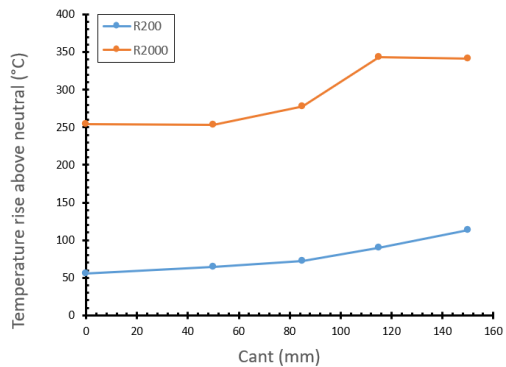
จากรูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกน และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในกรณีรัศมี 2000 เมตร กรณีที่ไม่มีการเสียนแนวทางรถไฟ มีค่าแรงตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงไม่แสดงถึงอุณหภูมิการโก่งเดาะที่อุณหภูมิขอบเขต 200 องศาเซลเซียส โดยทำการขยายขอบเขตเพิ่มเติมในการศึกษาในกรณีไม่มีการเสียนแนวทางรถไฟ ไปถึงขอบเขตใหม่ 500 องศาเซลเซียสดังรูปที่ โดยแสดงถึงอุณหภูมิโก่งเดาะของรางรถไฟที่อุณหภูมิสูงกว่ากรณีที่มีการเสียนแนวทางรถไฟในแต่ละการยกโค้งมากอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในความเป็นจริง



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและอุณหภูมิกรณีรัศมี 2000 เมตรและไม่มีการเสียนแนวทางรถไฟ

### 3.2.3 รัศมี

รัศมีที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลต่ออุณหภูมิการโก่งเดาะ โดยเมื่อพิจารณาถึงความกว้างไหล่ทาง, การยกโค้ง, และการเสียนแนวทางรถไฟที่เหมือนกัน เมื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของ FEM ผ่านโปรแกรม Ansys LS-DYNA มาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการยกโค้งและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละรัศมี พบว่าเมื่อมีค่ารัศมีสูง จะส่งผลให้อุณหภูมิโก่งเดาะสูงมากขึ้นตาม ทำให้รางรถไฟสามารถต้านทานการโก่งเดาะได้สูงยิ่งขึ้น



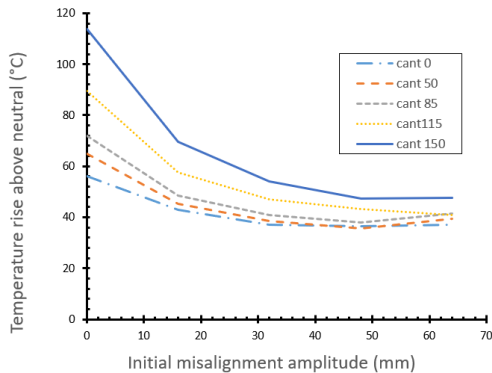
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างการยกโค้งทางรถไฟและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกรณีทางรถไฟไม่มีการเสียนแนวทางรถไฟ

จากรูปที่ 12 พบว่าเมื่อมีค่ารัศมีสูง จะส่งผลให้อุณหภูมิโก่งเดาะของรางรถไฟสูงขึ้นตาม ทำให้รางรถไฟสามารถต้านทานการโก่งเดาะได้สูงยิ่งขึ้น

อุณหภูมิโก่งเดาะของรางรถไฟกรณีรัศมี 2000 เมตร สูงกว่า กรณีรัศมี 200 เมตร มากถึง 282.52%

### 3.2.4 การเสียนแนวทางรถไฟ

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาผลของการเสียนแนวทางรถไฟความยาว 6.0 เมตร โดยจะแบ่งเป็นขนาดของการเสียนแนว 4 ขนาด ได้แก่ 16, 32, 48 และ 64 มิลลิเมตร



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของการเสียนแนวทางรถไฟ และ อุณหภูมิที่เกิดการโก่งเดาะ กรณีรัศมี 200 เมตร

จากรูปที่ 13 พบว่าเมื่อมีการเพิ่มขนาดของการเสียนแนวทางรถไฟทำให้ อุณหภูมิโก่งเดาะของรางรถไฟนั้นต่ำลง ทำให้ความต้านทานการโก่งเดาะ ของรถไฟต่ำลง โดยทุกค่าการยกโค้งมีพฤติกรรมเหมือนกันทั้งหมด และ ทางรถไฟจะมีความต้านทานการโก่งเดาะได้มากกว่าในการยกโค้งที่สูงกว่า

## 4. บทสรุป

การวิเคราะห์ผลของการโก่งเดาะของโครงสร้างทางรถไฟขนาด มาตรฐาน (Standard Gauge) ซึ่งพิจารณาผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ไปในกรณีศึกษาต่างๆ ได้แก่ รัศมีความโค้ง การยกโค้ง และการเสียนแนวทางรถไฟซึ่งผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปสามารถหาได้จากแรงตามแนวแกนของ รางรถไฟ จากการศึกษาพบว่าในกรณีที่มีความแตกต่างของรัศมี ยิ่งรัศมี มาก ค่าแรงตามแนวแกนวิกฤตจะสูงขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานการโก่ง เดาะก็จะยิ่งสูงมากขึ้นตาม ในส่วนของความต้านทานด้านข้าง ในกรณีที่มี รัศมีเดียวกันแต่มีการยกโค้งมากขึ้น พบว่ายิ่งการยกโค้งสูง ความต้านทาน การโก่งเดาะก็สูงขึ้นตามเช่นกัน และถ้าหากมีการเสียนแนวทางรถไฟ ยิ่ง ขนาดการเสียนแนวมีค่ามากในความยาวที่เท่ากัน ความต้านทานการโก่ง เดาะจะต่ำลง

โดยจากการศึกษาผลของพารามิเตอร์ทั้ง 3 ประเภท แบบจำลองที่ สามารถต้านทานการโก่งเดาะได้มากที่สุดตรงกับผลการทำแบบจำลองใน กรณี รัศมีทางรถไฟ 2000 เมตร ค่าการยกโค้ง 150 มิลลิเมตร และไม่มีการ เสียนแนวทางรถไฟ โดยสามารถต้านทานอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปได้สูงถึง 341 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นไปไม่ได้ที่จะเกิดขึ้นจริง ในทางกลับกันแบบจำลองที่ สามารถต้านทานการโก่งเดาะได้น้อยที่สุดตรงกับผลการทำแบบจำลองใน

กรณี รัศมีทางรถไฟ 200 เมตร ไม่มีการยกโค้ง และมีการเสียนแนวทางรถไฟ ขนาด 64 มิลลิเมตร โดยสามารถต้านทานอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปได้เพียง 37 องศาเซลเซียสเท่านั้น ทำให้สามารถสรุปแนวทางการป้องกันการเกิดการ โก่งเดาะของรางรถไฟที่มีรัศมีความโค้งต่ำได้คือ เพิ่มการยกโค้งของทาง รถไฟให้สูงเท่ากับหรือมากกว่าค่ายกโค้งสมดุลและหมั่นตรวจสอบไม่ให้เกิด การเสียนแนวทางรถไฟเพราะการเสียนแนวทางรถไฟจะทำให้การต้านทานการ โก่งเดาะของทางรถไฟได้ลดลง

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมในงานวิจัยนี้สามารถนำไปศึกษาต่อยอดโดยการ ทำแบบจำลองทางรถไฟที่มีการโค้งในแนวโค้ง รวมถึงการจำลองแรงที่ กระทำในกรณีเพิ่มเติมเช่น กรณีทางรถไฟได้รับแรงกระทำที่มาจากน้ำหนัก รถไฟบนรางเพียงอย่างเดียว หรือกรณีทางรถไฟได้รับทั้งแรงที่กระทำจาก อุณหภูมิคู่กับแรงกระทำที่มาจากน้ำหนักของรถไฟบนรางทำให้ ความสามารถในการต้านทานการโก่งเดาะของรางรถไฟเปลี่ยนไป รวมไปถึง การศึกษาถึงความสัมพันธ์ของทางโค้งที่มีความหลากหลายทางรัศมีทั้ง รัศมีที่อยู่ระหว่างงานวิจัยชิ้นนี้เพื่อหาการคาดการณ์ และการเพิ่มจุดเปลี่ยน รัศมีที่มีการผสมหลายรัศมีใน 1 เส้นทางหรือรูปตัว S เพื่อช่วยทำความเข้าใจพฤติกรรมทางด้านทานการโก่งเดาะของโครงสร้างทางรถไฟได้มากขึ้น เพื่อให้ทางรถไฟได้ใช้งานอย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงสุด

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.ชยุตม์ งามขนิง อาจารย์ที่มีบทบาทสำคัญและมีความสำคัญ ในการช่วยเสนอแนะและชี้แนะในการดำเนินการปริญญานิพนธ์นี้ ตลอดจน ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเลือกใช้เครื่องมือที่เหมาะสมและการวิเคราะห์ ข้อมูลอย่างมืออาชีพ ที่มีส่วนสำคัญในการสนับสนุนการดำเนินการปริญญานิพนธ์

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ สำหรับคุณประโยชน์อันพึงเกิดจาก ปริญญานิพนธ์นี้ ให้แก่คณาจารย์ที่เคารพทุก ท่าน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ขอมอบคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นสถานที่ให้ ความรู้และประสบการณ์ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Carvalho, J., Delgado, J., Calcada, R., & Delgado, R. (2013). A new methodology for evaluating the safe temperature in continuous welded rail tracks. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 13(02), 1350016.
- [2] Khatibi, F., Esmaeili, M., & Mohammadzadeh, S. (2017). DEM analysis of railway track lateral resistance. *Soils and Foundations*, 57(4), 587-602.
- [3] Ngamkhanong, C., Kaewunruen, S., & Baniotopoulos, C. (2021a). Influences of ballast degradation on railway track buckling. *Engineering Failure Analysis*, 122, 105252.

- [4] Machan S., & Tangwongwan S. (2022). Buckling temperature analysis of railway track using FEM. Chulalongkorn University, Thailand.
- [5] Aela, P., Zong, L., Powrie, W., & Jing, G. (2023). Influence of ballast shoulder width and track superelevation on the lateral resistance of a monoblock sleeper using discrete element method. *Transportation Geotechnics*, 42, 101040.
- [6] Bracciali, A., Folgarait P. (2004). New Sensor for Lateral & Vertical WheelRail Forces Measurements. Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali
- [7] The Engineering ToolBox (2008). Concrete Properties, 22 June 2008, pp.1.
- [8] Ngamkhanong, C., Kaewunruen, S., & Baniotopoulos, C. (2021b). Nonlinear buckling instabilities of interspersed railway tracks. *Computers & Structures*, 249, 106516.
- [9] Hasan, N. (2021). Buckling of a ballasted curved track under unloaded conditions. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(6), 16878140211025187.
- [10] Vitaly A. (2021). Monitoring and Evaluation of the Lateral Stability of CWR Track, Institute of Railway Systems and Public Transport, University of Dresden
- [11] Janin, G., Prud'homme, M.A. (1969). The stability of tracks laid with long welded rails. *Int. Rail*, 46, 459–487
- [12] Oslakovic IS, Maat HWT, Hartmann A, Dewulf G. (2013) Risk assessment of climate change impacts on railway infrastructure, 2013.
- [13] 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).