



การวิเคราะห์การโก่งเดาะของรางรถไฟเนื่องจากอุณหภูมิสูง  
Analysis of Rail Buckling Due to High Temperature

มนต์ชัย พุกชัยไเลิศ\*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

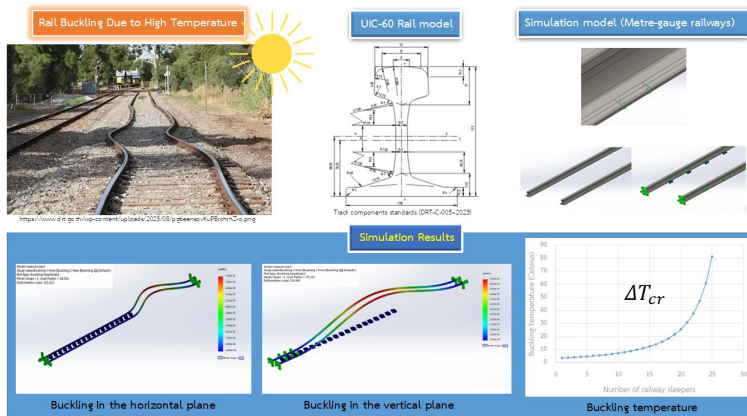
Monchai Pukvilailert\*

Department of Mechanical Engineering, Thammasat Engineering School, Thammasat University, Pathum Thani 12120

Received 27 June 2025; Received in revised 15 October 2025; Accepted 31 October 2025

GRAPHICAL ABSTRACT

ABSTRACT



The buckling of railway tracks during Thailand’s summer season occurs frequently and is a major cause of problems in rail transport, including increased track maintenance, rail replacements, and even train derailments. This research analyzes the causes of track buckling due to rising rail temperatures using the finite element method with linear buckling analysis. The results indicate that fastening devices installed between the rails and sleepers play a critical role in preventing track buckling as the rail temperatures approach critical levels. For a standard

25-meter-long rail, when at least 25 of the 30 fastening components are properly installed and securely connected to both the rail and the sleepers, the likelihood of rail buckling can be effectively reduced. Under these conditions, the critical buckling temperature of the rail increases to above 80 °C.

คำสำคัญ

การโก่งเดาะ; รางรถไฟ; ไฟไนต์เอลิเมนต์

Keywords

Buckling; Railway; Finite element

บทคัดย่อ

การโก่งของรางรถไฟในฤดูร้อนของประเทศไทยเกิดขึ้นเสมอและเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาในการเดินทางด้วยรถไฟ เช่น การซ่อมแซมรางรถไฟและการเปลี่ยนรางรถไฟที่เพิ่มขึ้น จนถึงการดกรางของรถไฟ งานวิจัยนี้จึงวิเคราะห์สาเหตุการโก่งเดาะของรางรถไฟเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของรางรถไฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Linear buckling analysis พบว่า อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวที่ติดตั้งกับรางรถไฟและหมอนรางรถไฟมีผลอย่างมากต่อการเพิ่มการป้องกันการโก่งของรางรถไฟเมื่อรางรถไฟมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่า Buckling temperature สำหรับกรณีรางรถไฟมาตรฐาน 25 เมตร จำนวนอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวที่ติดตั้งเป็นอย่างดีกับรางรถไฟและหมอนรองรางรถไฟอย่างน้อย 25 ตำแหน่งจากทั้งหมด 30 ตำแหน่งตลอดความยาวของรางรถไฟนั้นสามารถป้องกันอุบัติเหตุที่เกิดจากการโก่งของรางรถไฟเพราะรางรถไฟมีค่า Buckling temperature เพิ่มสูงขึ้นกว่า 80 องศาเซลเซียส

\*ผู้รับผิดชอบบทความ: pmonchai@engr.tu.ac.th

DOI:

## 1. บทนำ

การขนส่งทางรถไฟในประเทศไทยมีความสำคัญอย่างมากในการขนส่งมวลชนและทางการค้า ซึ่งเป็นพื้นฐานของการพัฒนาของประเทศ ดังนั้นระบบรางรถไฟของประเทศไทย จึงควรได้รับการปรับปรุง พัฒนาการตรวจสอบและบำรุงรักษาให้มีการใช้งานได้อย่างถูกต้องปลอดภัย และ ยืดอายุการใช้งาน ที่ผ่านมาจากทางรถไฟของประเทศไทยประสบปัญหาการโก่งเดาะของรางรถไฟอยู่เสมอ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อสภาพอากาศของประเทศมีอุณหภูมิสูง เช่น ในฤดูร้อน ทำให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุในการขนส่งทางรถไฟได้ จึงควรมีการศึกษาหาแนวทางป้องกันและแก้ไข

มีงานวิจัยหลายฉบับที่ผ่านมามีศึกษาการโก่งเดาะของรางรถไฟในประเทศไทยอยู่พอสมควร เช่น งานวิจัยการโก่งเดาะของโครงสร้างทางรถไฟที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของรางรถไฟที่มีขนาดความกว้างของราง 1 เมตร (Meter gauge) และเป็นรางชนิดเชื่อมกันต่อเนื่อง (Continuous welded rail, CWR) โดยใช้ระเบียบวิธี Finite element method และใช้เอลิเมนต์แบบ Beam element [1,2] งานวิจัยเรื่องคุณภาพของโครงสร้างฐานรากทางรถไฟมีผลต่อการโก่งตัวและทรุดตัวของรางรถไฟด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [3] และการทดสอบในสนาม [4] การศึกษาแรงในรางเชื่อมยาวระหว่างสะพานและทางวิ่งเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ที่ยอมให้รางเคลื่อนที่ได้ตามแนวยาว (Zero longitudinal restrain, ZLR) [5] และงานวิจัยที่ศึกษาความเค้นของคลิปปัดรางรถไฟด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [6]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือวิเคราะห์การโก่งเดาะของรางรถไฟเนื่องจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของรางรถไฟและอิทธิพลของสภาพการยึดจับรางรถไฟ (Fastening system) ของตัวอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางรถไฟ (Fastener) โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และใช้แบบจำลองรางรถไฟที่มีรูปร่าง พื้นทึ่หน้าตัด ความยาวตามมาตรฐานของรางรถไฟ ด้วยเอลิเมนต์แบบ 3 มิติชนิด Solid elements 3D ซึ่งจะแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้

Beam element แบบ 1 มิติ [7,8,9,10,11,12] หรือแบบ Analytical solution [13] ซึ่งเอลิเมนต์แบบ 3 มิตินี้จะสามารถจำลองโมเดลรางรถไฟให้ใกล้เคียงกับรูปร่างของรางรถไฟได้ดีกว่างานวิจัยที่ผ่านมา และงานวิจัยนี้มีความสำคัญที่สามารถแสดงการจำลองและวิเคราะห์การโก่งของรางที่เกิดขึ้นเนื่องจากรูปร่างของรางรถไฟและอุปกรณ์จับยึดได้ดียิ่งขึ้นกว่างานวิจัยที่ผ่านมา

## 2. วิธีการวิจัย

### 2.1 แรงกดเมื่อรางรถไฟขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ

การโก่งเดาะของรางรถไฟเนื่องจากอุณหภูมินั้น มีสาเหตุมาจากเมื่อรางรถไฟมีอุณหภูมิสูงขึ้น รางรถไฟจะเกิดการยืดขยายตัวตามหลักการของ Thermal strain ดังสมการที่ (1)

$$\delta = \alpha \Delta T L \quad (1)$$

โดยที่  $\delta$  คือ ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของรางรถไฟตามแนวแกน [m]

$\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำรางรถไฟ [°C]

$\Delta T$  คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจากอุณหภูมิจำลองของรางรถไฟที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด (Zero thermal strain) [°C]

$L$  คือ ความยาวของรางรถไฟ [m]

ในกรณีที่รางรถไฟสามารถขยายตัวได้อิสระตามความยาวของราง การโก่งตัวของรางรถไฟจะไม่เกิดขึ้น ถึงแม้จะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของรางรถไฟ อย่างไรก็ตามโดยปกติที่ปลายทั้งสองด้านของรางรถไฟจะมีการเชื่อมต่อหรือจับยึดกับอุปกรณ์ที่ใช้ต่อกับรางรถไฟอีกทางหนึ่งเสมอ ดังนั้นจึงทำให้ปลายทั้งสองด้านของรางรถไฟมีการขยายตัวที่ไม่อิสระ โดยมีแรงกด  $P$  กระทำที่ปลายทั้งสองด้านของรางซึ่งเป็นแรงปฏิกิริยาที่รางกระทำต่อกัน สำหรับกรณีการยึดตัวของรางรถไฟที่เกิดจาก

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ปลายทั้งสองด้านถูกยึดแน่น ซึ่งทำให้รางรถไฟไม่มีการเปลี่ยนแปลงความยาว แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\delta_t = \alpha \Delta T L - \frac{PL}{AE} = 0 \quad (2)$$

ดังนั้น

$$P = \alpha AE \Delta T \quad (3)$$

โดยที่  $P$  คือ แรงกดที่กระทำตามแนวความยาวของรางรถไฟ [N]

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของรางรถไฟ [ $m^2$ ]

$E$  คือ ค่า Elastic modulus ของวัสดุที่ใช้ทำรางรถไฟ [Gpa]

## 2.2 การหาค่า Buckling temperature

แรงกด  $P$  จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น  $\Delta T$  และเมื่อถึงจุดๆ หนึ่งแรงกด  $P$  จะเท่ากับแรงวิกฤต  $P_{cr}$  ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการโก่งเดาะของรางรถไฟนั่นเอง สำหรับกรณีที่ปลายทั้งสองข้างของรางรถไฟถูกจับยึดแน่นไม่มีการเคลื่อนที่ (Fixed ends) แรงวิกฤตที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะสามารถแสดงได้ตาม Euler critical buckling load ดังสมการที่ (4)

$$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2} \quad (4)$$

โดยที่  $I$  คือ โมเมนต์ของพื้นที่หน้าตัดรอบแกนที่มีค่าน้อยที่สุด (Moment of inertia) [ $m^4$ ]

เมื่อแรงกด  $P$  ในสมการที่ (3) เท่ากับแรงวิกฤต  $P_{cr}$  ในสมการที่ (4) จะได้

$$P = P_{cr}$$

$$\alpha AE \Delta T = \frac{4\pi^2 EI}{L^2}$$

ดังนั้นทางทฤษฎีเราจะได้  $\Delta T$  ที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะของชิ้นงาน (Buckling temperature) หรือใช้สัญลักษณ์ว่า  $\Delta T_{cr}$  ดังนี้

$$\Delta T_{cr} = \frac{4\pi^2 I}{\alpha AL^2} \quad (5)$$

## 2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method)

การหาค่า Buckling temperature ( $\Delta T_{cr}$ ) ในงานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์บนพื้นฐานของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical analysis) ของสมการสมมูลในรูปแบบของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับ Linear buckling analysis แสดงในสมการที่ (6)

$$[K_B - \lambda K_G]\{q\} = 0 \quad (6)$$

โดยที่  $K_B$  คือ Structural stiffness matrix [N/m]

$K_G$  คือ Geometric stiffness matrix [N/m]

$\lambda$  คือ Critical value หรือ Load factor [-]

$q$  คือ Eigen vector [m]

ซึ่งค่า  $\lambda$  คือ Load factor (Buckling factor of safety) นั้นอยู่ในรูปแบบของค่า Factor of safety ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FEM (Finite element method) ดังสมการที่ (7)

$$\lambda = \frac{\Delta T_{cr}}{\Delta T} \quad (7)$$

ในวิธีการวิเคราะห์ Buckling analysis นี้เรากำหนดให้ภาระทางความร้อนของปัญหาคือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป  $\Delta T = 1$  ดังนั้นเราจะได้ว่าค่า Load factor ที่ได้จากการคำนวณจะเท่ากับค่า  $\Delta T_{cr}$  ดังแสดงในสมการที่ (8)

$$\lambda = \Delta T_{cr} \tag{8}$$

โดยมีสมมติฐานที่สำคัญคือการไม่พิจารณาแรงเสียดทานจากหินโรยทาง (Ballast) และ กำหนดให้หมอนรองรางรถไฟเป็น Rigid body

### 2.4 คุณสมบัติทางกลของรางรถไฟ (Mechanical properties of rails)

รางรถไฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ รางที่มีมาตรฐานหน้าตัดรางแบบ UIC-60 (International union of railways) [9] แสดงดัง Figure 1 ซึ่งมีใช้ในการรถไฟของประเทศไทยโดยกำหนดให้มีความยาวของรางเท่ากับ 25 เมตร เนื่องจากปัจจุบันกำหนดใช้ความยาวรางมาตรฐานยาวท่อนละ 25 เมตร [10] โดยคุณสมบัติทางกลของโมเดลรางรถไฟ (Mechanical properties) แสดงตาม Table 1 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยการคำนวณทฤษฎีและการทำ Simulation ในงานวิจัยนี้เพื่อหาค่า  $\Delta T_{cr}$

## 3. ผลการวิจัย

### 3.1 การตรวจสอบแบบจำลอง (Model validation)

เราตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากทางทฤษฎีและค่าที่ได้จากการทำ Simulation ด้วยวิธี Buckling analysis ของโปรแกรม Solidworks บนพื้นฐานของ Finite element Method ชนิด Mesh ที่ใช้เป็น Solid mesh แบบ 3 มิติ (Jacobian 4 points) จำนวนประมาณ 74,000 Elements ต่อ 1 รางรถไฟ ซึ่งเป็นจำนวนเอลิเมนต์ที่ละเอียดที่สุด (Fine) และได้ผลที่ลู่เข้าด้วย (Convergence) สำหรับโมเดลที่ใช้ในการตรวจสอบคือ รางรถไฟเดี่ยว 1 ราง ขนาดความยาว 25 เมตร ที่กำหนดให้ที่ปลายทั้ง

2 ด้านของรางถูกจับยึดแน่นไม่เคลื่อนที่ (Fixed support) และที่ด้านข้างของฐานรางมีการใส่ Fixture ที่จำลองการจับยึดของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยว (Fastener) กับรางรถไฟและหมอนรองรางรถไฟ (Railway sleeper) โดยให้ภาระภายนอก (External load) เป็นอุณหภูมิที่สูงขึ้น เริ่มด้วยการหาค่าแรงวิกฤตจากสมการที่ (4)

$$P_{cr} = \frac{4\pi^2(205,000)(5,234,308)}{(25,000)^2} = 67,779 \text{ N}$$

และในกรณีเดียวกันนี้ เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วย Solidworks simulation โดยใช้ Buckling study จะได้

$$P_{cr} = 67,671 \text{ N}$$

ซึ่งเปรียบเทียบแล้วได้ผลใกล้เคียงกันมาก จากนั้นแทนค่าในสมการที่ (5) เราจะได้  $\Delta T_{cr}$  จากทางทฤษฎี

$$\Delta T_{cr} = \frac{(67,779)}{(1.17 \times 10^{-5})(7,906.73)(205,000)} = 3.57^\circ C$$

และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์การโก่งเดาะของรางรถไฟในกรณีเดียวกันนี้โดยใช้ Buckling study ของ Solidworks simulation ผลการวิเคราะห์จะได้ค่า Load factor หรือค่า  $\Delta T_{cr}$  ดังสมการที่ (8) ซึ่งแสดงค่าของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะของรางรถไฟ พบว่าผลลัพธ์จากการ Simulation ที่แสดงดัง Figure 2 มีความสอดคล้องใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีพื้นฐาน ดังนี้

$$\Delta T_{cr} = 3.48^\circ C$$

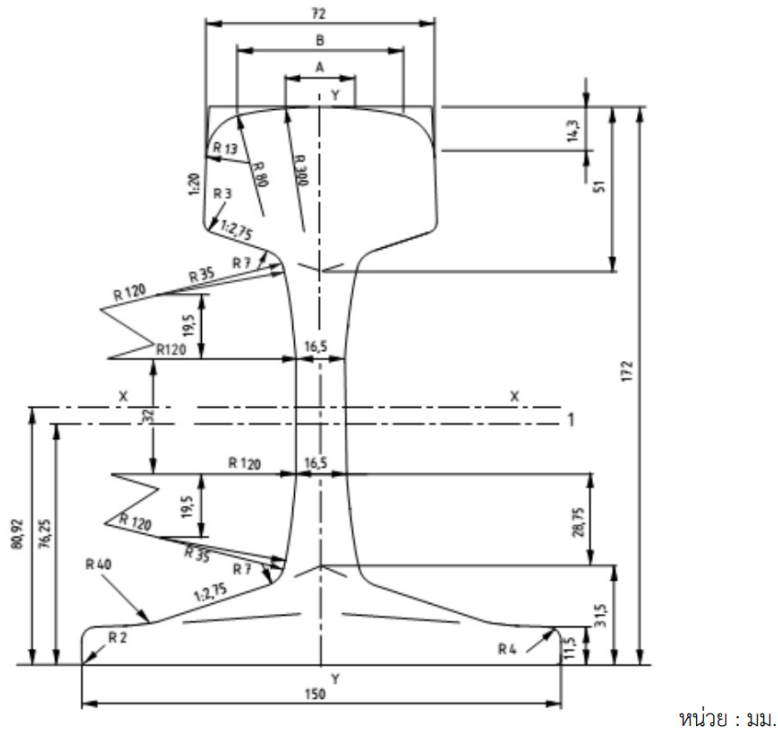


Figure 1 Rail cross-section type UIC60.

Table 1 Mechanical properties of Rails

Railway track length	25 Meter
Material	AISI1020 Cold rolled
Elastic's modulus	205 GPa
Cross-sectional shape	UIC-60
Cross-section area	7,906 mm <sup>2</sup>
Moment of inertia of the cross-sectional area about the x-axis	31,357,623 mm <sup>4</sup>
Moment of inertia of the cross-sectional area about the y-axis (minimum value)	5,234,308 mm <sup>4</sup>

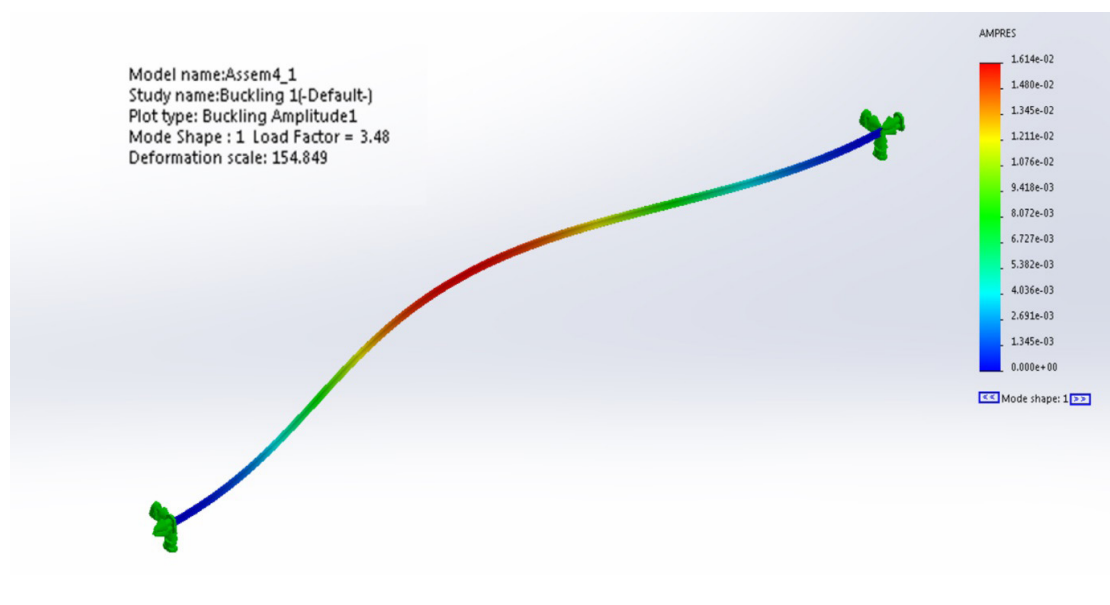


Figure 2 Buckling temperature analysis of a rail fixed at both ends.

### 3.2 การโก่งเดาะของรางรถไฟรางเดี่ยว

เริ่มด้วยการพิจารณาสภาพการติดตั้งของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวที่ส่งผลต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้เกิดการโก่งเดาะของราง โดยเริ่มจากกรณีที่อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวไม่มีหรือเสื่อมสภาพและใช้งานไม่ได้ จากนั้นจึงค่อยๆ เพิ่มจำนวนอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวที่ติดตั้งและทำงานได้ปกติขึ้นทีละจุดตลอดความยาวของรางรถไฟ ตามตำแหน่งของหมอนรางรถไฟ ในงานวิจัยนี้เราแทนอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวด้วยการใส่ประเภทของการยึดเหนี่ยว (Restraint type) ที่ด้านข้างของฐานรางตามตำแหน่งอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวและหมอนรางรถไฟซึ่งโดยมีความห่างกันในแต่ละจุดเท่ากับ 60 เซนติเมตรตามมาตรฐานทั่วไป โดยอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวนี้ในโปรแกรม Solidworks กำหนดขึ้นโดยใช้ Fixture แบบ On flat face ซึ่งกำหนดให้พื้นผิวของรางบริเวณนั้นไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวขึ้นลง แต่สามารถเคลื่อนที่ในแนวตามความยาวของรางรถไฟได้ และอยู่บนสมมติฐานที่ไม่คิดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างรางรถไฟกับแผ่นรองรางรถไฟเนื่องจากแผ่นรองรางอาจมีการเสื่อมสภาพ แสดงใน Figure 3

จากผลการวิเคราะห์พบว่า ในกรณีที่ไม่มีอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวจับยึดกับรางเลยนั้น เมื่ออุณหภูมิของรางเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยคือ 3.64 องศาเซลเซียส จะทำให้รางรถไฟโก่งเดาะในแนวนอน จากนั้นจึงเพิ่มการจับยึดกับอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวทีละจุดโดยแต่ละจุดจะมีตำแหน่งบริเวณจับยึด 2 ฝั่งของราง ตลอดความยาวของราง โดยการจับยึดนี้ควบคุมการเคลื่อนที่ของรางไม่ให้ออกไปทางด้านข้าง พบว่าถ้าเราเพิ่มจำนวนอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวมากขึ้นตามความยาวของราง ทำให้อุณหภูมิที่เกิดการโก่งเดาะ (Buckling temperature) สูงขึ้นด้วย ดังแสดงใน Figure 4 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มความต้านทานในการโก่งเดาะมากขึ้นเมื่อมีการจับยึดรางกับอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น และการเพิ่มจำนวนการจับยึดรางกับอุปกรณ์ยึดเหนี่ยว ตั้งแต่ 1 ถึง 18 จุด ทำให้อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะค่อยๆ เพิ่มขึ้น โดยที่แนวการโก่งเป็นแนวนอน ดังตัวอย่างใน Figure 5 อย่างไรก็ตาม ถ้าเพิ่มการจับยึดที่ต้านทานการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของรางจำนวน 19 ถึง 25 จุด การโก่งของรางรถไฟจะเปลี่ยนเป็นการโก่งแนวตั้งแทน ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มการจับยึด (Restrain)

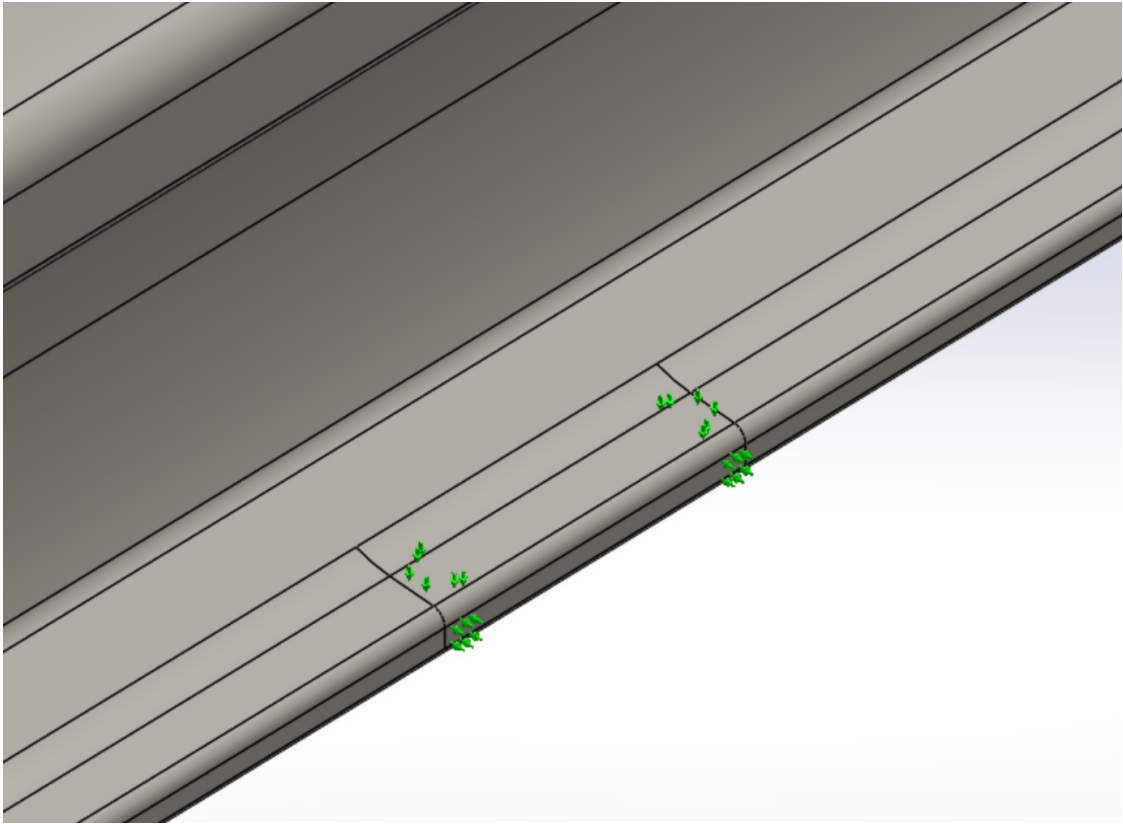


Figure 3 Fastening point on the rail.

ที่ด้านทานการเคลื่อนที่ทางแนวตั้งของรางซึ่งเปรียบเสมือนการกดของคลิป (Clip) ของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางรถไฟนั่นเอง จึงสามารถทำให้เกิดการโก่งในแนวนอนเท่านั้น และเมื่อนำผลการวิเคราะห์ตลอดความยาวของรางพบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนอุปกรณ์การยึดเหนี่ยวมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะจะเพิ่มขึ้นและเพิ่มอย่างรวดเร็วในช่วงหลัง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ้ารางรถไฟมีการจับยึดกับอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางเป็นอย่างดีแล้วจะเพิ่มความต้านทานการโก่งเดาะเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นอย่างมาก

อีกกรณีที่น่าสนใจคือ การโก่งแนวตั้งของรางรถไฟ เพราะรางรถไฟสามารถเกิดการโก่งขึ้นได้ทั้งแนวนอนและแนวตั้ง ถึงแม้เมื่อพิจารณารูปร่างของพื้นที่หน้า

ตัดตรงรถไฟแล้วการโก่งในแนวตั้งจะเกิดขึ้นได้ยากกว่าการโก่งในแนวนอน ดังนั้นเพื่อพิจารณาเฉพาะการโก่งในแนวตั้ง การวิเคราะห์จึงเริ่มต้นด้วยการให้รางมีอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวติดตั้งตลอดความยาวของรางรถไฟ และกำหนดให้อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวมีการจับยึด (Restrain) ที่ทำให้รางรถไฟไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวนอนแต่ให้มีการเคลื่อนที่อิสระในแนวตั้งเท่านั้น เปรียบเสมือนกับอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวนั้นยึดรางรถไฟเข้ากับหมอนรองรางรถไฟที่มั่นคงและไม่มีการเคลื่อนที่ จากนั้นจึงค่อยๆ เพิ่มให้อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวมีการจับยึดที่สามารถกดรางรถไฟไม่ให้เคลื่อนที่ในแนวตั้งได้ที่ละจุด ซึ่งผลการวิเคราะห์อุณหภูมิที่ทำให้รางรถไฟเกิดการโก่งในแนวตั้งนี้ แสดงได้ดัง Figure 6

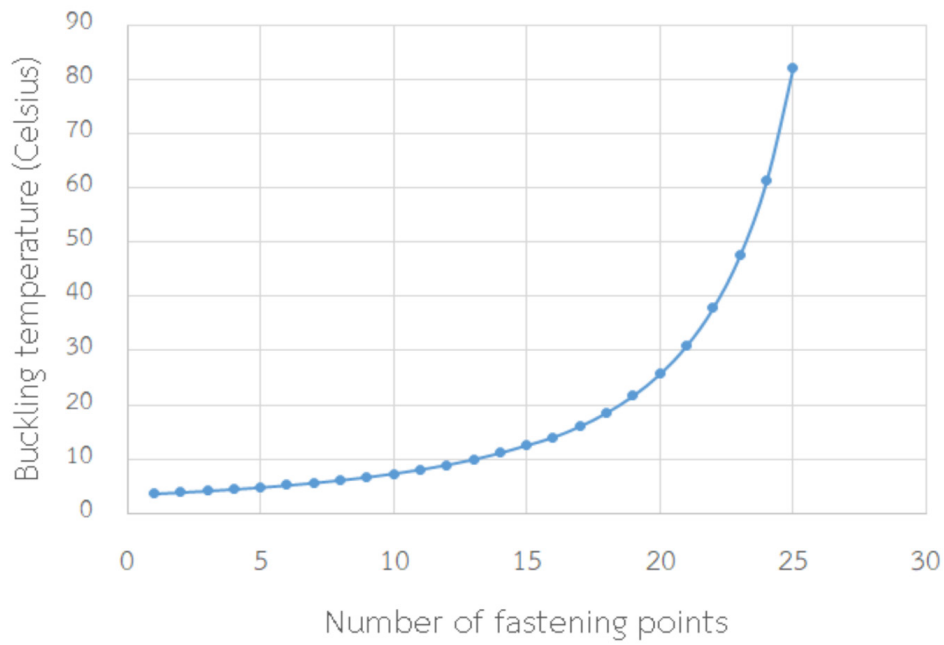


Figure 4 The relationship between buckling temperature and the number of rail fastening points.

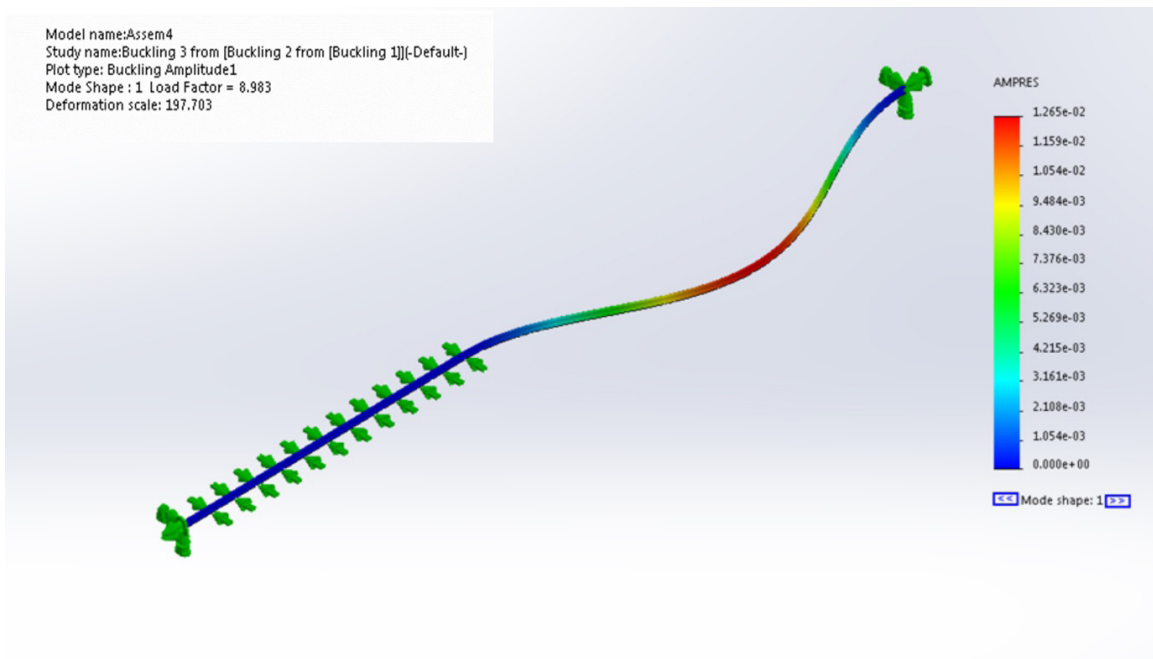
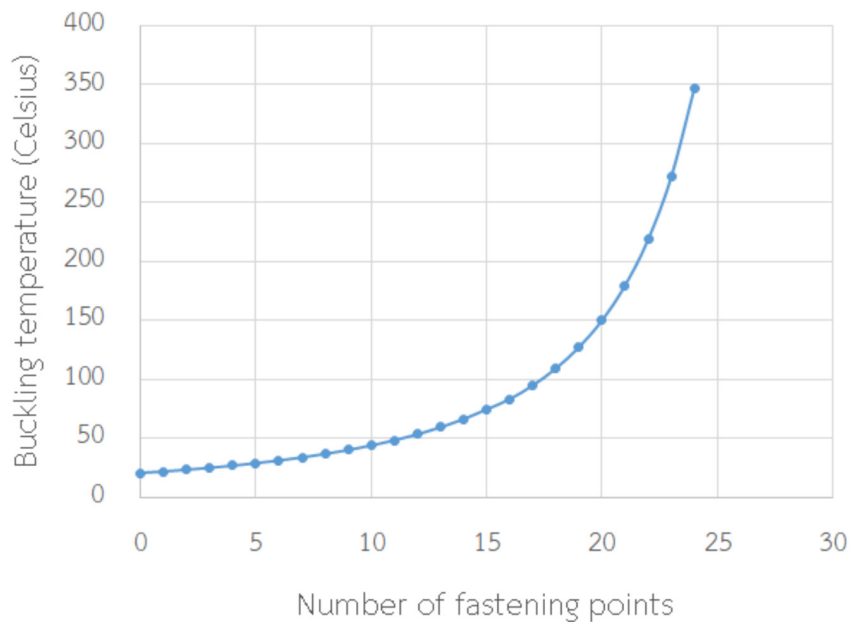


Figure 5 Lateral buckling of the rail.



**Figure 6** The relationship between the vertical buckling temperature and the number of rail fastening points.

จากรูปแสดงให้เห็นว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะในแนวตั้ง และจำนวนอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวที่จับยึดการเคลื่อนที่นั้น มีลักษณะที่คล้ายกันกับกรณีการโก่งในแนวนอนที่แสดงใน Figure 4 เพียงแต่อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการโก่งแนวตั้งนั้นสูงกว่าการโก่งในแนวนอนอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของพื้นที่หน้าตัดของรางด้วย ที่น่าสังเกตคือเมื่ออุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางรถไฟมีความสามารถในการกตรรางรถไฟในแต่ละตำแหน่งของหมอนรางรถไฟแล้ว จะทำให้อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะในแนวตั้งนั้นต้องมีค่าสูงมาก ซึ่งหมายถึงการโก่งเดาะเกิดขึ้นได้ยากขึ้นนั่นเอง จาก Figure 6 จำนวนของอุปกรณ์ที่ยึดเหนี่ยวรางรถไฟในแนวตั้งเพียง 15 ตัวจาก 24 ตัว สามารถป้องกันการโก่งเดาะเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นได้ถึง 80 องศาเซลเซียส โดยรูปแบบของความสัมพันธกราฟทั้ง 2 ไม่เป็นเชิงเส้นและมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

### 3.3 การโก่งเดาะของรางรถไฟรางคู่

การวิเคราะห์รางรถไฟเฉพาะรางเดี่ยวที่กล่าวข้างต้นนี้แสดงให้เห็นถึงกรณีที่หมอนรางรถไฟมีความมั่นคงแข็งแรงและไม่มีการเคลื่อนที่ทางแนวรางหรือแนวด้านข้าง ดังนั้นถึงแม้จะทำการจำลองรางรถไฟ 2 รางพร้อมกัน ก็ยังคงได้ผลลัพธ์ที่เหมือนกันทั้ง 2 รางนั่นเอง อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้มีการพิจารณารางรถไฟพร้อมกัน 2 รางที่เชื่อมต่อกันด้วยหมอนรางรถไฟและอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวในแต่ละช่วงระยะห่างประมาณ 60 เซนติเมตร โดยกำหนดให้ความกว้างของรางรถไฟเท่ากับ 1 เมตร

สำหรับโมเดลในการทำ Simulation แสดงใน Figure 7 ส่วนของหมอนรางรถไฟจะถูกแทนที่ด้วยการใช้ Connection set แบบ Rigid connector โดยกำหนดให้หมอนรางรถไฟเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body) ไม่มีการยุบหรือยืดตัว ทำให้ระยะห่างระหว่างรางทั้ง 2 เท่ากับ 1 เมตรเสมอไม่เปลี่ยนแปลง (มาตรฐาน Meter gauge) แต่ยังสามารถเคลื่อนตัวได้ในแนวด้านข้าง

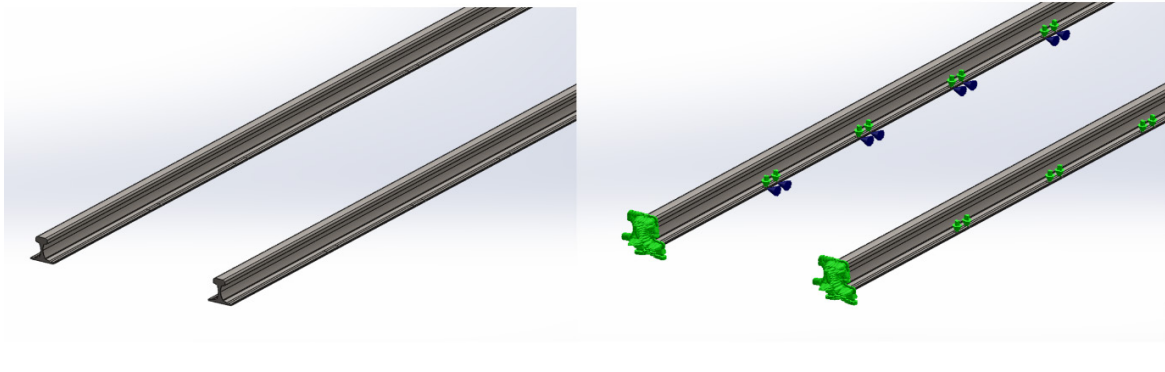


Figure 7 Railway model and fastening setup (Boundary conditions).

เปรียบเสมือนไม่คิดแรงต้านที่เกิดจากหินโรยทางรถไฟที่ด้านข้างของหมอนรางรถไฟ ส่วนอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวนั้นกำหนดให้มีการจับยึดที่กดให้รางรถไฟให้ไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวขึ้นลง เปรียบเสมือนกตรางรถไฟให้ติดกับหมอนรองรางรถไฟ แต่ให้มีการเคลื่อนที่ในแนวแกนของรางรถไฟได้โดยมีสมมติฐานที่แรงเสียดทานในแนวแกนระหว่างรางรถไฟกับอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวนี้มีผลค่อนข้างน้อยเพราะแผ่นรองรางรถไฟกับตัว Clip ของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวมีการขรุขระและสึกกร่อน

การวิเคราะห์การโก่งเดาะของรางรถไฟคู่จากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เริ่มด้วยเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ของปลายทั้ง 2 ด้านของรางรถไฟ จากนั้นค่อยๆ เพิ่มการติดตั้งอุปกรณ์จับยึดและหมอนรองรางรถไฟเข้ากับรางรถไฟทีละจุด ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าในช่วงเริ่มต้นการโก่งเดาะจะเกิดขึ้นในแนวนอน จนถึงการติดตั้งจำนวนหมอนรางรถไฟเท่ากับ 19 ท่อน จะเปลี่ยนแนวโก่งเป็นการโก่งในแนวตั้งแทน แสดงดัง Figure 8 และ Figure 9 ตามลำดับ เราจะเริ่มกำหนดให้อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวมีการจับยึด (Restrain) ที่กดให้รางติดกับหมอนรางรถไฟ เพื่อให้การโก่งอยู่ในแนวนอนเหมือนเดิม และดำเนินการวิเคราะห์โดยเพิ่มจำนวนหมอนรองรางรถไฟตามความยาวของรางรถไฟ ผลการวิเคราะห์เพื่อหาอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะในแนวนอนแสดงดัง Figure 10

จากกราฟใน Figure 10 แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์มีลักษณะใกล้เคียงและสอดคล้องกับกรณีการโก่งเดาะแนวนอนของรางรถไฟรางเดี่ยวใน Figure 4 ด้วยการเชื่อมต่อรางรถไฟด้วยหมอนรางรถไฟที่กำหนดให้เป็นวัตถุแข็งเกร็งและสามารถเคลื่อนตัวได้ในแนวด้านข้าง ถ้ารางรถไฟมีการติดตั้งอย่างดีกับหมอนรางรถไฟเพียงจำนวนเกินกว่า 25 ท่อนแล้ว การจะเกิดการโก่งเดาะในแนวนอนเนื่องจากการเพิ่มของอุณหภูมินั้นต้องมากกว่า 80 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงมาก เช่น ถ้าปกติรางรถไฟมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อุณหภูมิรางรถไฟที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะต้องสูงถึง 105 องศาเซลเซียส ซึ่งสำหรับประเทศไทยอุณหภูมิรางที่มีการบันทึกไว้มีค่าสูงสุดประมาณ 56 องศาเซลเซียส [11] ดังนั้นจะเห็นว่าการโก่งเดาะที่เกิดเมื่ออุณหภูมิร้อนขึ้นในฤดูร้อนของเมืองไทยนั้น น่าจะเกิดจากการติดตั้งของรางรถไฟกับหมอนรางรถไฟที่ไม่ดีเพียงพอในจำนวนหลายจุดพร้อมกัน เพราะโมเดลรางรถไฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีจำนวนหมอนรองรางไฟทั้งหมด 30 ท่อนสำหรับรางรถไฟยาว 25 เมตร ดังนั้น ถ้ามีการติดตั้งรางรถไฟกับหมอนรองรางรถไฟที่ตีแน่นหนามันคงมากกว่า 25 จุดแล้วหรือมีอุปกรณ์จับยึดเสื่อมประมาณไม่เกิน 20% ของจำนวนทั้งหมดนั้นจะทำให้ลดการโก่งเดาะที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน โดยที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยแรงต้านการเคลื่อนที่ของหมอนรองรางรถไฟจากหินโรยทางรถไฟเลย ซึ่งโดยความเป็น

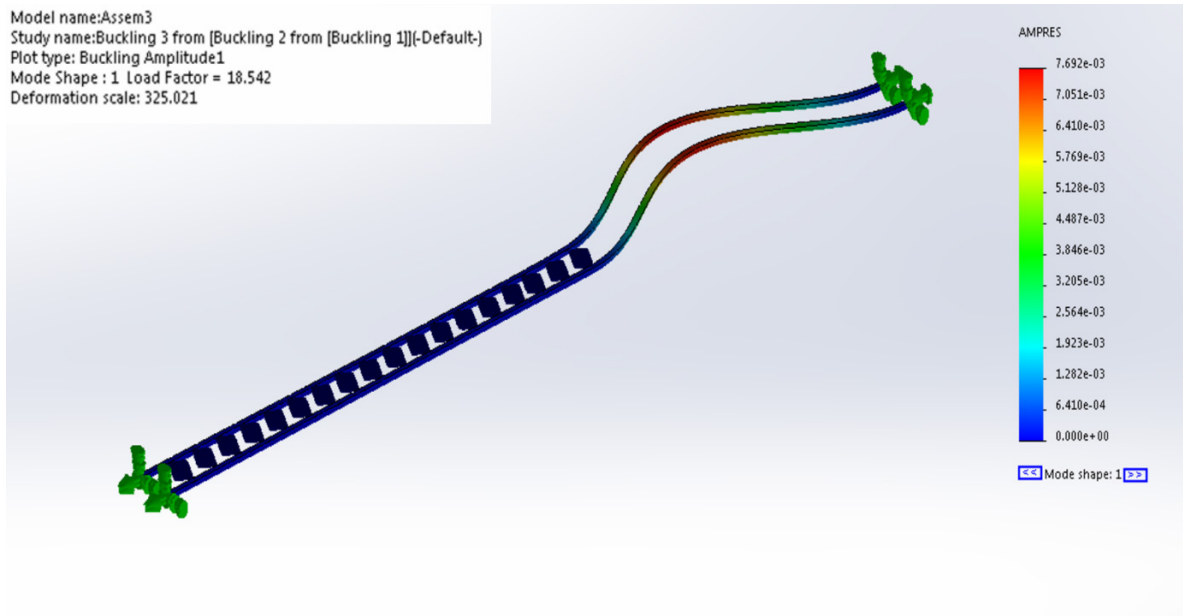


Figure 8 Lateral buckling of the railway track.

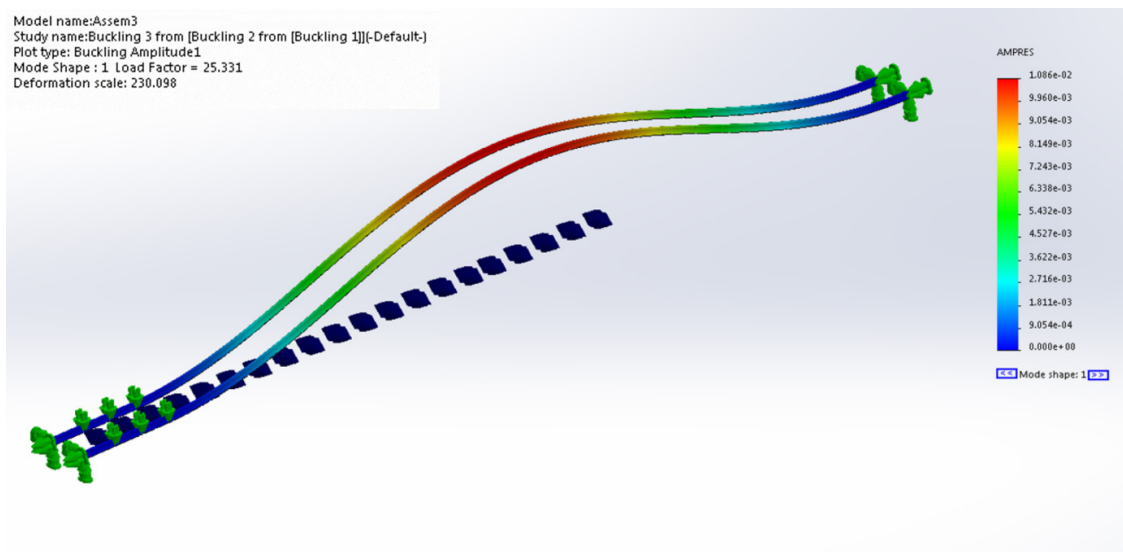
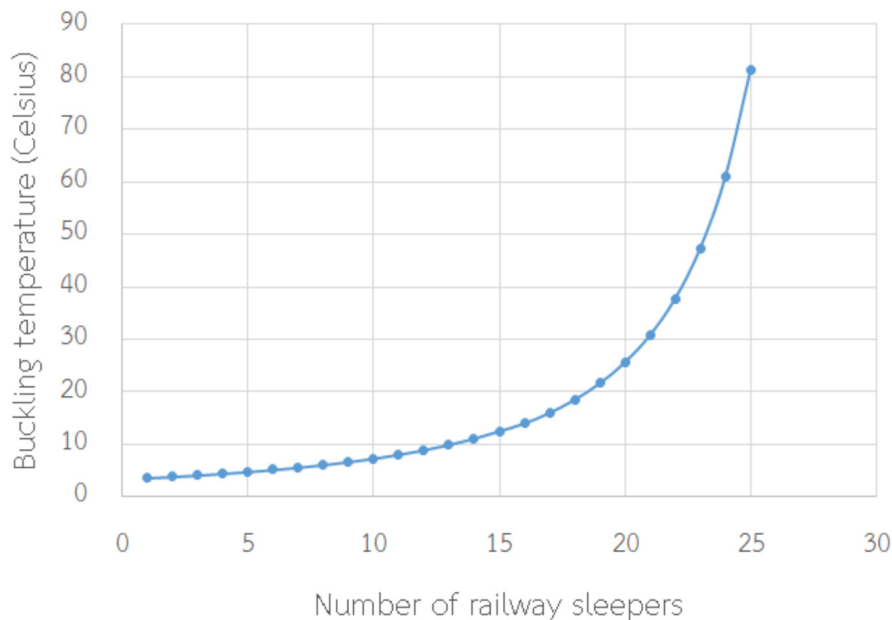


Figure 9 Vertical buckling of the railway track.

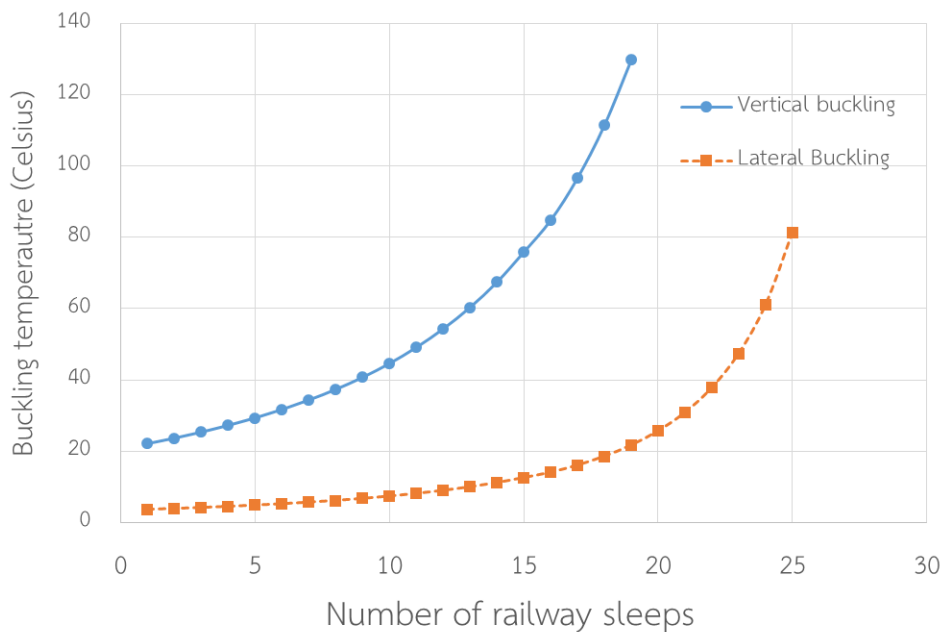


**Figure 10** The relationship between the lateral buckling temperature of the railway and the number of railway sleepers.

จริงแล้วหินโรยทางรถไฟก็ไม่ได้มีหน้าที่หลักในการต้านการเคลื่อนที่ของหมอนรองรถไฟโดยตรงอยู่แล้ว และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [1,7] ที่เป็นรางยาวขนาด 60 เมตรจะมีค่า Buckling temperature อยู่ที่ประมาณ 50 องศาเซลเซียสซึ่งต่ำกว่าในงานวิจัยนี้ ด้วยสาเหตุที่เป็นเพราะว่างานวิจัยดังกล่าวใช้โมเดลรางที่มีขนาดยาวกว่าในงานวิจัยนี้

สำหรับการโก่งเดาะในแนวตั้งของรางรถไฟ กำหนดให้รางคู่เชื่อมต่อกันด้วยหมอนรองรางรถไฟตลอดทั้งความยาวของราง แล้วจึงค่อยๆ เพิ่มจำนวนหมอนรองรางรถไฟพร้อมอุปกรณ์เหนี่ยวรางรถไฟ แล้วทำการวิเคราะห์หาอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปทำให้เกิดการโก่งตัวในแนวตั้ง และนำมาเปรียบเทียบกับการโก่งของรางรถไฟคู่ในแนวนอนแสดงได้ดัง Figure 11 ซึ่งกำหนดให้

อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางรถไฟนั้นจะมีการจับยึดเพื่อถ่วงรางไฟให้ติดกับหมอนรองรางรถไฟ เมื่อเพิ่มจำนวนจุดยึดเหนี่ยวขึ้น อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้เกิดการโก่งตัวในแนวตั้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากกราฟจะเห็นว่าแค่จำนวนจุดยึดเหนี่ยวที่ติดตั้งเพียง 16 จุด จากจำนวนหมอนรองทั้งหมด 30 ท่อนแล้ว สามารถทนอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปก่อนการโก่งเดาะได้สูงถึง 80 องศาเซลเซียส ถ้าเป็นอุณหภูมิของรางรถไฟก็ประมาณ 100 องศาเซลเซียสเลยทีเดียว ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าถึงแม้หมอนรองรางรถไฟจะไม่มี ความต้านทานการเคลื่อนที่ด้านข้าง แต่ถ้ามีการจับยึดกับอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางรถไฟที่ดีแล้ว จะช่วยให้ลดการโก่งเดาะจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิได้อย่างมาก



**Figure 11** The relationship between the vertical buckling temperature of the railway and the number of railway sleepers.

#### 4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์การโก่งเดาะของรางรถไฟเนื่องจากอุณหภูมิของรางที่เพิ่มขึ้น และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะกับการจับยึดของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวของรางรถไฟสำหรับรางรถไฟเดี่ยวและรางรถไฟคู่ที่วางบนหมอนรองรางรถไฟ จากผลการวิเคราะห์พบว่า จำนวนของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวและการจับยึดที่ดีกับรางรถไฟติดกับหมอนรองรางไฟนั้น ส่งผลอย่างมากต่อการโก่งเดาะของรางรถไฟ โดยถ้าอุปกรณ์จับยึดอยู่ในสภาพดีและมีการติดตั้งกับรางรถไฟและหมอนรองรางไฟอย่างแน่นหนาแล้วจะป้องกันการโก่งเดาะของรางรถไฟเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างมากและสูงถึงกว่า 80 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์จับยึดนั้นเป็นส่วนสำคัญในการป้องกันการโก่งของรางรถไฟ ดังนั้นจึงควรมีการวางแผนการตรวจสอบอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรวมถึงการบำรุงรักษาให้อยู่ในสภาพใช้งานได้ดีอย่างสม่ำเสมอ

#### 5. References

- [1] Anusonadisai, P. and Ngamkhanong, C., 2021, Buckling Analysis of Meter Gauge Railway Track, 2101499 Civil Engineering Project, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand. (in Thai)
- [2] Sunee, N., Tilaphat, P. and Ngamkhanong, C., 2023, Nonlinear Buckling Analysis of Railway Tracks with a Tight Curve, 2101499 Civil Engineering Project, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand. (in Thai)
- [3] Inthanu, T., Chubuppakarn, T., Chalermyanon, T. and Manakun, C., 2023, The Behavior of Sub Structure of Railway Train-Induce Load, GTE07-1-7, In: Proceedings of 28<sup>th</sup> National Convention

- on Civil Engineering, Phuket, Thailand. (in Thai)
- [4] Yimsiri, S., 2016, Mechanism of Railway Sub-structure Deterioration: Case Study of Northern Line, Research Report, Burapha University, Chonburi, 63 p. (in Thai)
- [5] Hasinpi, C., Samranjai, N., Leetrakul, S. and Tansarotwanich, P., 2014, Stress Analysis of Continuous Welded Rail Considering Track-Bridge Interaction Phenomena, Bachelor Thesis, Naresuan University, Phitsanulok, 112 p. (in Thai)
- [6] Chainakorn, P., Keunkieow, P. and Chaikul, P., 2021, The Stress Analysis of Railway Fastenings Clips using Finite Element Method, pp.183-190, In: Proceedings of 5<sup>th</sup> National Academic Conference of Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Phra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand. (in Thai)
- [7] Ngamkhanong, C., Wey, C. M. and Kaewunruen, S., 2020, Buckling analysis of interspersed railway tracks, Appl. Sci. 10 (9): 3091.
- [8] Ngamkhanong, C., Kaewunruen, S. and Baniotopoulos, C., 2021, Influences of ballast degradation on railway track buckling, Eng. Fail. Anal. 122: 105252.
- [9] Track Components Standards (DRT-C-005-2023), Department of Rail Transport. (in Thai)
- [10] The Knowledge Accumulation of Rail Transportation: Case Study of Infrastructure, 2015, Research Report, King Mongkut's University of Technology Thonburi and State Railway of Thailand, p. 12. (in Thai)
- [11] Office of Transport and Traffic Policy and Planning (OTP), 2017, Railway Structure Design and Construction Manual. Technical Publication of the Office of Transport and Traffic Policy and Planning (OTP), Bangkok, Thailand, p. 145. (in Thai)
- [12] Carvalho, J., Delgado, J., Calçada, C. and Delgado, R., 2013, A new methodology for evaluating the safe temperature in continuous welded rail tracks, Int. J. Struct. Stab. Dyn. 13 (7): 1350016.
- [13] Yang, G. and Bradford, M. A., 2016, Thermal-induced buckling and postbuckling analysis of continuous railway tracks, Int. J. Solids Struct. 97-98: 637-649.