

การประเมินพื้นที่เสี่ยงของอุบัติเหตุบนทางรถไฟแบบมีชั้นหินโรยทางภายใต้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในประเทศไทย

Risk Assessment of Accident-Prone Areas on Ballasted Tracks under Increasing Temperature in Thailand

ญาณดา ศรีทองเพ็ชร¹ ธาวัน นอกขุนทด² และ ชยุตม์ งามโชนง³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

การโก่งตัวของรางรถไฟเนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Rail Buckling) เป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของระบบทางรถไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่มีภูมิอากาศร้อน เช่น ประเทศไทย ซึ่งมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงฤดูร้อน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแนวทางในการประเมินพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดการโก่งตัวของรางรถไฟจากอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยอาศัยข้อมูลพิกัดตำแหน่งของรางรถไฟ ร่วมกับข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยจากกรมอุตุนิยมวิทยา กำหนดขอบเขตการศึกษาเฉพาะเส้นทางรถไฟสายใต้ ตั้งแต่จังหวัดราชบุรี ถึงจังหวัดเพชรบุรี โดยเลือกศึกษาในช่วงสถานีชุมทางหนองปลาดุก ถึงสถานีชะอำ ทั้งนี้ การวิเคราะห์จำกัดอยู่เฉพาะแรงตามแนวแกน (Axial Force) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเท่านั้น โดยมีได้รวมแรงกระทำในแนวตั้ง (Vertical Load) แรงกระทำด้านข้าง (Lateral Force) หรือปัจจัยเสื่อมสภาพอื่น ๆ เช่น ความคลาดเคลื่อนเริ่มต้นของราง หรือการทรุดตัวของโครงสร้างรองรับ ผลการศึกษาพบว่าช่วงรางที่มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดการโก่งตัวได้แก่ ช่วงสถานี CSM – BKI (33.1%), CLB – RBR (95.3%), RBR – BKB (34.5%), BKB – BOT (35.3%), BPK – PTO (50.0%), และ NPL – BGC (49.0%) โดยพิจารณาจากอัตราส่วนของระยะทางที่อยู่ในช่วงวิกฤตเมื่อเทียบกับระยะทางรวมของแต่ละช่วงสถานี ซึ่งสะท้อนถึงระดับการสะสมของแรงภายในรางในสภาวะที่ไม่สามารถขยายตัวได้ตามธรรมชาติ อันเนื่องมาจากอุณหภูมิแวดล้อมที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในจังหวัดราชบุรีที่มีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 38 – 40 °C และจังหวัดเพชรบุรีระหว่าง 36 – 38 °C ในช่วงเวลาที่ศึกษา นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นว่าแรงภายในรางมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิ และสามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัดเพื่อประเมินความเสี่ยงเบื้องต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนบำรุงรักษา การติดตามสถานการณ์เสี่ยง และการกำหนดมาตรการด้านความปลอดภัยในการเดินรถไฟในอนาคต

คำสำคัญ: การโก่งตัวของราง, แรงตามแนวราง, ช่วงวิกฤต, ทางรถไฟ

Abstract

Rail buckling due to temperature variations is a critical issue affecting the safety of railway systems, particularly in hot climate regions such as Thailand, where extreme heat is prevalent during the summer. This study aims to develop a framework for assessing areas at risk of rail buckling induced by temperature fluctuations, utilizing railway positional data and maximum average temperature data obtained from the Thai Meteorological Department. The study area is limited to the southern railway line, specifically between Ratchaburi and Phetchaburi provinces. The analysis focuses solely on axial force resulting from temperature change, excluding the effects of vertical loads, lateral forces, and other degradation-related factors such as initial misalignment or substructure settlement. The findings reveal that high-risk inter-station segments for rail buckling include CSM – BKI (33.1%), CLB – RBR (95.3%), RBR – BKB (34.5%), BKB – BOT (35.3%), BPK – PTO (50.0%), and NPL – BGC (49.0%). These results are based on the proportion of critical zones, where thermal expansion is significantly restrained, relative to the total length of each railway segment. Such zones are prone to accumulating axial stress as ambient temperatures increase. Ratchaburi and Phetchaburi provinces recorded average maximum temperatures of 38 – 40 °C and 36 – 38 °C, respectively, during the study period. Moreover, the analysis demonstrates a direct correlation between internal rail forces and temperature, suggesting that thermal data can serve as an effective indicator for preliminary risk assessment. The outcomes of this research can support maintenance planning, risk monitoring, and the implementation of safety measures for railway operations in the future.

Keywords: Rail Buckling, Axial Force, Critical Zone, Railway Track

1 บทนำ

ปัจจุบันประชากรมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการขยายตัวและพัฒนาระบบขนส่งในด้านต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการขนส่งทางบก น้ำ อากาศ หรือราง เป็นต้น โดยเฉพาะระบบขนส่งทางรางที่มีการพัฒนาให้ครอบคลุมทั่วพื้นที่ในประเทศไทย ดังแสดงในรูปที่ 1 อีกทั้งการพัฒนาทางรางในปัจจุบันยังคงมีความสำคัญในการเชื่อมโยงเครือข่ายการขนส่งทั้งในระดับภายในประเทศและระหว่างประเทศ เพื่อรองรับการเติบโตของการขนส่งทั้งสินค้าและผู้โดยสารในอนาคตมากไปกว่านั้นระบบขนส่งทางรางยังเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการขนส่งผู้โดยสารและสินค้าที่มีปริมาณมากและมีความเร็วสูง โดยเฉพาะในระยะทางยาว ทำให้การเดินทางมีความสะดวกและช่วยลดระยะเวลาการขนส่ง ซึ่งการมีระบบรางที่เชื่อมโยงระหว่างเมืองและภูมิภาคต่าง ๆ จะช่วยให้เกิดการขยายตัวทางเศรษฐกิจโดยการลดต้นทุนการขนส่งสินค้า ทำให้สินค้าหลากหลายประเภทสามารถถูกขนส่งได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังช่วยลดปัญหาการจราจรติดขัดบนถนนและลดมลพิษทางอากาศ เช่นการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากการขนส่งทางรางมีการใช้พลังงานที่ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับการขนส่งทางถนนหรือทางอากาศ และมีการพัฒนาความปลอดภัยระดับสูง โดยการควบคุมการเดินทางที่เป็นระบบและมีมาตรฐาน อีกทั้งยังมีระยะเวลาเดินทางที่แน่นอน และมีความสะดวกสบายในการเข้าถึง

อย่างไรก็ตามอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นในระบบรางก็เป็นสิ่งที่ไม่สามารถเลี่ยงได้ ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากการขัดข้องของอุปกรณ์และระบบสัญญาณ หรือปัญหาในเรื่องของการบำรุงรักษา กล่าวคือ การตรวจสอบและซ่อมแซมที่ไม่สม่ำเสมอหรือไม่ครบถ้วน อาจทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของรางหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุบนรางได้ มากไปกว่านั้น ความบกพร่องของโครงสร้างราง เช่นการบิดงอของรางที่เกิดจากการขยายตัวของรางในสภาพอุณหภูมิสูง หรือการสึกหรอจากการใช้งานอย่างยาวนาน อาจทำให้รางหักหรือเกิดการเบี่ยงจากเส้นทางเดิม ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของขบวนรถไม่ปลอดภัยได้ มากไปกว่านั้น ด้วยอิทธิพลจากสภาพอากาศ เช่น ฝนตกหนักหรือน้ำท่วม รวมถึงการเกิดหิมะและน้ำแข็งในต่างประเทศ อาจทำให้รางลื่นหรือเกิดปัญหากับระบบการควบคุมขบวนรถ ทำให้รถไฟไม่สามารถควบคุมความเร็วหรือหยุดได้อย่างทันเวลา นอกจากนี้ ด้วยสภาวะโลกร้อนที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน ทำให้อุณหภูมิบนผิวโลกได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุก ๆ ปี ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางรถไฟ และมีโอกาสในการเกิดอุบัติเหตุบนรางได้

จากการศึกษาพบว่า โครงสร้างทางรถไฟในประเทศไทยจะมีลักษณะแบบมีหินโรยทาง (Ballasted track) อีกทั้งมีการเชื่อมรางแบบต่อเนื่อง (Continuous Welded Rail) ซึ่งการเชื่อมรางแบบดังกล่าวจะทำให้รถไฟมีอัตราส่วนความยาวต่อหน้าตัด (Slenderness ratio) สูง ส่งผลทางรถไฟมีแนวโน้มสูงที่จะเกิดการโก่งเดาะ (Buckling) อีกทั้งคุณสมบัติของโลหะที่ใช้ในการทำราง เช่น เหล็กกล้า จะมีการขยายตัวและหดตัวตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ทำให้เกิดแรงอัดขึ้นภายในโครงสร้างทางรถไฟ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวอาจทำให้รางเกิดการโก่งเดาะและสูญเสียรูปร่างได้ โดยหากรถไฟเคลื่อนที่บนรางผ่านบริเวณที่มีการสูญเสียรูปร่างอาจเกิดการ

พลิกคว่ำ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียด้านชีวิตและทรัพย์สินจำนวนมาก

การโก่งตัวและการสูญเสียเสถียรภาพของรางรถไฟอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เป็นปัญหาที่มีแนวโน้มทวีความรุนแรงมากขึ้นในระบบรางของประเทศไทย โดยเฉพาะในโครงสร้างรางชนิดมีหินโรยทาง (Ballast track) ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของทางรถไฟส่วนใหญ่ในประเทศไทย ปัญหาดังกล่าวไม่เพียงแต่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในการเดินทางเท่านั้น หากยังสร้างความเสียหายทางเศรษฐกิจและส่งผลต่อความเชื่อมั่นของประชาชนที่ใช้บริการระบบขนส่งทางราง

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นการประเมินความเสี่ยงเพื่อระบุพื้นที่ที่อาจเกิดความวิบัติของโครงสร้างจากการโก่งเดาะอันเนื่องมาจากแรงในแนวแกนที่สะสมภายใต้สภาพอุณหภูมิที่แปรปรวน ทั้งนี้เพื่อการวางแผนทางการเฝ้าระวังพื้นที่และสนับสนุนการจัดทำมาตรการป้องกันอุบัติเหตุบนทางรถไฟอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะนำไปสู่การยกระดับความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของระบบขนส่งทางรางอย่างเช่นรถไฟในประเทศไทย

2 ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงสำรวจ ข้อมูลจากการสำรวจจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณแรงตามแนวแกน (Axial Force) ที่เกิดขึ้นบนรางจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ต่อจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ผลลัพธ์จากการคำนวณถูกนำไปเปรียบเทียบกับแนวโน้มอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยในช่วงฤดูร้อนและใช้ในการวิเคราะห์ระดับความเสี่ยงของแต่ละช่วงทางรถไฟ โดยประเมินจากอัตราส่วนของระยะทางที่อยู่ในช่วงวิกฤตต่อระยะทางรวมของแต่ละช่วงสถานี เพื่อจำแนกพื้นที่ที่มีแนวโน้มเสี่ยงสูงต่อการเกิดการโก่งเดาะของรางในอนาคต

2.1 การสำรวจเส้นทางรถไฟที่สนใจ (Railway Surveying)

ในการศึกษาเส้นทางรถไฟ ทางผู้วิจัยได้เลือกเส้นทางรถไฟสายใต้ระหว่างสถานีชุมทางหนองปลาดุกถึงสถานีชะอำ รวมระยะทางประมาณ 123 กิโลเมตร เป็นพื้นที่ศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 เส้นทางรถไฟที่เลือกใช้สำรวจ

2.2 ขอบกำหนดและขอบเขตการวิเคราะห์ (Assumption)

2.2.1 แนวเส้นทางของรางในแนวระนาบ (Horizontal Alignment)

การวิเคราะห์แนวเส้นทางของรางในงานวิจัยนี้ มีขอบเขตการวิเคราะห์แรงตามแนวแกนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเท่านั้น มิได้วิเคราะห์ถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากแรงในแนวตั้ง (Vertical Load) หรือแรงกระทำด้านข้าง (Lateral Force)

2.2.2 การเสียแนวทางรถไฟตั้งแต่เริ่มต้น (Initial Misalignment)

การเสียแนวทางรถไฟตั้งแต่เริ่มต้น หมายถึงความไม่เรียบหรือการเบี่ยงเบนที่มีอยู่ในรางรถไฟตั้งแต่การติดตั้งครั้งแรก ซึ่งเกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนในการวางรางหรือการจัดแนวในช่วงการก่อสร้างหรือซ่อมบำรุงรางรถไฟ โดยทั่วไปแล้วความคลาดเคลื่อนนี้จะถูกออกแบบให้อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ ดังนั้นการวิเคราะห์สำหรับงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาในขอบเขตที่เส้นทางรถไฟไม่มีการสูญเสียแนวทางตั้งแต่เริ่มต้น

2.2.3 ความเสียหายรางรถไฟ (Rail Damage)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่วิเคราะห์การโก่งตัวของรางอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมิได้วิเคราะห์ถึงปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อการโก่งตัวของราง เช่น การเสื่อมสภาพของรางและหมอนรองราง หรือการทรุดตัวของรอยต่อ (Dipped Joint)

2.2.4 ระยะความยาวรางส่วนที่สามารถขยายตัวได้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (Breathing length)

Breathing length คือช่วงความยาวของรางบริเวณปลายที่สามารถขยายหรือหดตัวได้ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ซึ่งจะช่วยลดแรงตามแนวรางที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของรางโดยไม่ส่งผลให้เกิดการสะสมแรงเกินขีดจำกัด ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ระยะดังกล่าวมีความยาวด้านละ 100 เมตรจากปลายราง โดยถือว่าเป็นช่วงที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวแน่นกับหมอนและสามารถเคลื่อนตัวได้อย่างอิสระภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

2.2.5 ความยาวของรางเชื่อมยาว (Continuous Welded Rail, CWR)

รางเชื่อมยาวหมายถึงรางเหล็กที่เชื่อมต่อกันเป็นแนวต่อเนื่องโดยไม่มีรอยต่อแบบดั้งเดิม ซึ่งจะช่วยลดการสั่นสะเทือนเมื่อรถไฟแล่นผ่าน สำหรับงานวิจัยนี้ กำหนดให้รางเชื่อมยาวหมายถึงรางที่มีความยาวมากกว่า 90 เมตรและอยู่ภายใต้สมมติฐานว่ามีพฤติกรรมต่อการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิเสมือนเป็นโครงสร้างต่อเนื่องตลอดทั้งชิ้นส่วนราง

2.3 การใช้เครื่องมือในการจัดเก็บข้อมูล (Data Collection tools)

2.3.1 แอปพลิเคชันที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนของรถไฟ

ในการสำรวจหาตำแหน่งรอยต่อของราง (Rail Joint) เป็นสิ่งที่ตรวจสอบได้ยาก เนื่องจากข้อจำกัดของระยะทางการสำรวจที่ไกล อีกทั้งยังเป็นจุดที่สังเกตด้วยตาได้ยาก อย่างไรก็ตาม ทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้เครื่องมือที่สามารถใช้ในการตรวจสอบตำแหน่งที่เป็นรอยต่อ

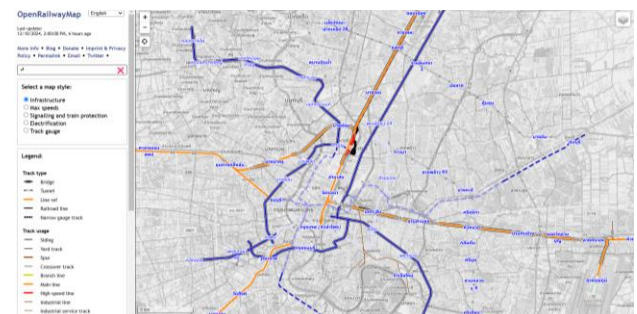
บนรางได้คือ การใช้แอปพลิเคชัน PHYPHOX ดังแสดงในรูปที่ 2-2 ซึ่งเป็นแอปพลิเคชันที่สามารถช่วยตรวจวัดการสั่นสะเทือนและระบุตำแหน่งได้แบบเรียลไทม์ กล่าวคือ เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่เป็นตำแหน่งรอยต่อบนรางจะเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น การใช้แอปพลิเคชันดังกล่าวจะสามารถตรวจวัดการสั่นสะเทือน และทำให้ทราบตำแหน่งรอยต่อในเส้นทางรถไฟ



รูปที่ 2-2 แอปพลิเคชันที่เลือกใช้ในการจัดเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนของรถไฟ

2.3.2 โปรแกรมที่ใช้สำหรับศึกษาเกี่ยวกับแนวเส้นทางรถไฟ

การเก็บข้อมูลแนวเส้นทางรถไฟควรมีเครื่องมือในการช่วย เพื่อศึกษาว่าเส้นทางที่สนใจนั้นมีลักษณะอย่างไร โดยโปรแกรมที่เลือกมาใช้ในการศึกษาคือ OpenRailwayMap ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถแสดงถึงแนวเส้นทางของรถไฟ การส่งสัญญาณและการป้องกันรถไฟ (Signaling and train protection) การใช้ไฟฟ้าของแต่ละเส้นทาง (Electrification) ความเร็วสูงสุดที่รถไฟสามารถใช้ได้ (Max Speed) รวมไปถึงขนาดความกว้างของรางรถไฟ (Track Gauge) เป็นต้น โดยลักษณะของโปรแกรม แสดงดังรูปที่ 2-3



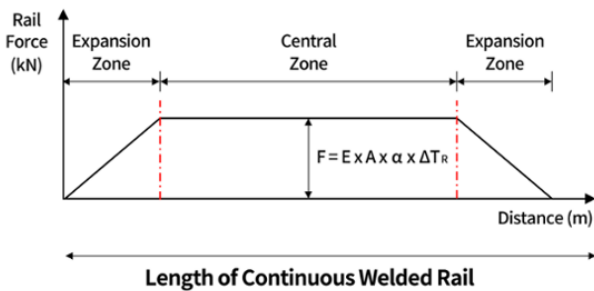
รูปที่ 2-3 ลักษณะโปรแกรมที่เลือกใช้ในการศึกษาแนวเส้นทางรถไฟ

2.4 คำนวณแรงตามแนวแกนภายในราง (Axial Force)

จากการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์แรงตามแนวแกนในโครงสร้างทางรถไฟที่เกิดจากอุณหภูมิสามารถพิจารณาได้ดังสมการที่ (2-1) (UIC-774-3R)

$$P = EA\alpha\Delta T \quad (2-1)$$

โดยที่ E คือ ค่ายังมอดูลัสของเหล็ก, A คือ พื้นที่หน้าตัดของราง, α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเหล็กเนื่องจากอุณหภูมิ (1.20×10^{-5} , $/^{\circ}\text{C}$) และ ΔT คือ ค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ($T_{\text{rail}} - T_{\text{SFT}}$) โดย T_{SFT} หรือ Stress-Free Temperature (SFT) สำหรับลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อช่วงความยาวของรางชนิดเชื่อมยาวต่อเนื่อง จะแสดงดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 แรงในแนวแกนตลอดความยาวของราง

ซึ่งลักษณะของรางรถไฟเส้นทางสายใต้ระหว่างสถานีชุมทางหนองปลาดุกถึงสถานีชะอำ เป็นรางเหล็ก BS100A ดังนั้น การวิเคราะห์แรงตามแนวแกนจึงใช้คุณสมบัติของรางดัง Error! Reference source not found.

ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติรางชนิด BS100A

Parameters	ค่าของวัสดุ	Unit
Modulus	2.10×10^5	MPa
Shear modulus	-	MPa
Density	7,850	kg/m ³
Cross-sectional area	12,900	mm ²
Poisson's Ratio	0.25	-
Torsional fastening resistance	-	kg-m/rad
Thermal expansion	1.20×10^{-5}	$1/^{\circ}\text{C}$

การคำนวณหาอุณหภูมิของรางสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2-2) (Wittingham, 1969) , (2-3) , และ (2-4) (Hunt, 1994)

$$T_{\text{rail}} = 1.228T_{\text{air}} + 9.7 \quad \text{normal conditions} \quad (2-2)$$

$$T_{\text{rail}} = 1.5T_{\text{air}} \quad \text{for sunny days} \quad (2-3)$$

$$T_{\text{rail}} = T_{\text{air}} + 17 \quad \text{for cloudy days} \quad (2-4)$$

2.5 การประเมินและวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงเกิดการโก่งตัวของราง (Risk Area Assessment of Rail Buckling)

การวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงของพื้นที่ที่ทำการสำรวจ มีขั้นตอนพิจารณาจากช่วงของรางที่ไม่สามารถขยายตัวได้ตามธรรมชาติเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงซึ่งเรียกว่า "ช่วงวิกฤต" (Critical

zone) บริเวณดังกล่าวเป็นส่วนที่เกิดแรงตามแนวแกนสูงสุดเมื่อเทียบกับความยาวทั้งหมดของราง โดยแรงในแนวแกนเป็นปัจจัยสำคัญที่อาจนำไปสู่การโก่งตัวของรางรถไฟ ดังนั้นหากรางรถไฟมีช่วงที่ไม่สามารถขยายตัวได้มาก ก็ย่อมมีความเสี่ยงต่อการเกิดการโก่งตัวได้สูง โดยการประเมินความเสี่ยงในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองแนวทาง ได้แก่

2.5.1 การประเมินโดยพิจารณาจากความยาวรวมของรางในแต่ละช่วงระหว่างสถานี

การประเมินความเสี่ยงของการเกิดแรงในแนวแกนซึ่งอาจส่งผลต่อการโก่งตัวของรางรถไฟในแต่ละช่วงระหว่างสถานีดำเนินการโดยคำนวณสัดส่วนของช่วงวิกฤตรวมที่ปรากฏภายในระยะทางระหว่างสถานี เปรียบเทียบกับระยะทางรวมของช่วงระหว่างสถานี การวิเคราะห์ในลักษณะนี้มีข้อดีคือสามารถประเมินภาพรวมของระดับความเสี่ยงในแต่ละช่วงสถานีได้อย่างชัดเจน ทำให้สามารถระบุพื้นที่ที่ควรให้ความสำคัญในการตรวจสอบหรือซ่อมบำรุงเชิงป้องกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวอาจยังไม่สามารถระบุจุดที่มีความเสี่ยงเฉพาะเจาะจงในระดับชิ้นรางได้อย่างแม่นยำ ส่งผลให้ไม่สามารถวิเคราะห์ความเสี่ยงอย่างละเอียดของแต่ละรางได้อย่างครอบคลุม

2.5.2 การประเมินโดยพิจารณาจากความยาวของรางแต่ละชิ้น

การวิเคราะห์ความเสี่ยงระดับของรางแต่ละชิ้นดำเนินการโดยการคำนวณอัตราส่วนระหว่างความยาวของช่วงวิกฤตกับความยาวรวมของแต่ละชิ้นราง อัตราส่วนนี้เรียกว่า "Critical Length Ratio" ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยค่าที่มีแนวโน้มเข้าใกล้ 1 สื่อถึงระดับความเสี่ยงที่สูง กล่าวคือรางชิ้นดังกล่าวมีความยาวของช่วงวิกฤตเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวรวมในสัดส่วนที่มากแสดงถึงโอกาสสูงในการเกิดแรงสะสมในแนวแกนที่ไม่สามารถระบายหรือกระจายได้ ส่งผลต่อความเสี่ยงในการโก่งตัวของรางภายใต้สภาพอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ในทางกลับกันหากอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ 0 หมายถึงรางชิ้นนั้นมีช่วงวิกฤตที่สั้นหรือไม่มีเลย ซึ่งแสดงถึงระดับความเสี่ยงที่ต่ำต่อการโก่งตัว

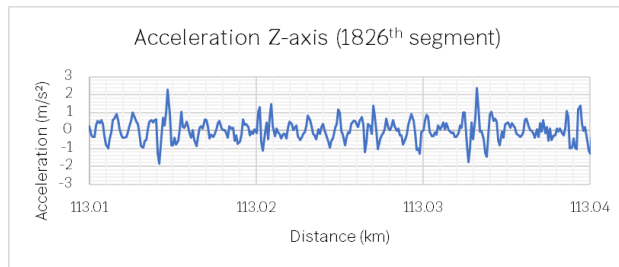
3 ผลการดำเนินงานวิจัย

3.1 Data collection and cleaning

ผลการดำเนินงานวิจัยในส่วนแรกจะนำเสนอถึงผลข้อมูลที่ได้จากการสำรวจเส้นทางรถไฟสายใต้ ช่วงสถานีชุมทางหนองปลาดุกถึงสถานีชะอำ ประกอบไปด้วยตำแหน่งรอยต่อของรางรถไฟตลอดเส้นทางที่มีการระบุค่า Latitude และ Longitude ซึ่งได้จากการวัดค่าความเร่งแนวดิ่งจากแอปพลิเคชัน PHYPHOX จากการเก็บข้อมูลตำแหน่งที่เป็นรอยต่อหรือ Jointed ทำให้ทางผู้วิจัยสามารถวิเคราะห์หาตำแหน่ง จำนวนชิ้น และความยาวของรางได้ และสามารถจำแนกรางเชื่อมยาวเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไปได้

ผลการสำรวจตำแหน่งรอยต่อระหว่างรางสามารถพิจารณาได้จากความเร่งแนวดิ่งของรถไฟเมื่อแล่นผ่าน อธิบายจากตัวอย่างดัง Error! Reference source not found. ซึ่งแสดงให้เห็นความเร่งแนวดิ่งของรถไฟที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในตำแหน่ง

ประมาณกิโลเมตรที่ 113.014 และ 113.034 จึงสามารถสรุปได้ว่าตำแหน่งดังกล่าวเป็นรอยต่อระหว่างราง



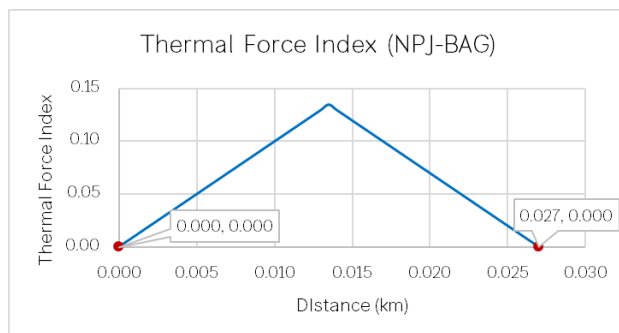
รูปที่ 3-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งในแนวตั้งและระยะทางช่วงกิโลเมตรที่ 113.00 ถึง 113.04

จากการสำรวจแนวเส้นทางรถไฟช่วงชุมทางหนองปลาดุกถึงสถานีชะอำ พบว่ามีตำแหน่งรอยต่อของรางรถไฟทั้งหมดจำนวน 2,109 ตำแหน่ง โดยสามารถระบุจำนวนรางรถไฟชนิด BS100A ได้ทั้งหมด 2,108 ชิ้น ซึ่งในจำนวนนี้เป็นรางเชื่อมยาวจำนวน 277 ชิ้น

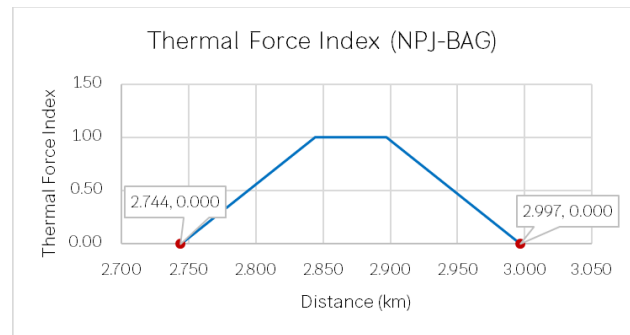
3.2 Thermal Force Index & Critical Length Ratio

3.2.1 Thermal Force Index

ทางผู้วิจัยได้พัฒนาแนวคิด “ดัชนีแรงจากอุณหภูมิ (Thermal Force Index, TFI)” ซึ่งเป็นนิยามของอัตราส่วนแรงภายในตามแนวราง (Axial force) ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของรางเมื่อเทียบกับแรงภายในที่เกิดขึ้นสูงสุด กล่าวคือแรงภายในที่เกิดขึ้นสูงสุดจะอยู่ในช่วง Critical zone และมีค่า TFI เท่ากับ 1 ส่วนในช่วงของ Breathing zone ค่า TFI ค่าลดหลั่นลงด้วยความชันคงที่ ค่า TFI จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 หาก TFI มีค่าใกล้ 1 จะแสดงถึงพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงต่อการโก่งตัว (Buckling) ของราง ในขณะที่หาก TFI มีค่าต่ำ ก็ จะแสดงถึงความเสี่ยงที่ลดลง ตามลำดับ



รูปที่ 3-2 กราฟ TFI กรณีที่บริเวณดังกล่าวไม่มีส่วนที่เป็น Critical zone



รูปที่ 3-3 กราฟ TFI กรณีที่บริเวณดังกล่าวมีส่วนที่เป็น Critical zone

จากรูปที่ 3-2 และรูปที่ 3-3 แสดงลักษณะตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Thermal Force Index (TFI) และระยะทาง (Distance) ที่ได้จากการเก็บข้อมูล ในช่วงระหว่างสถานีชุมทางหนองปลาดุก (NPJ) ถึงสถานีบ้านโป่ง (BAG) จากรูป จะเห็นได้ว่ารูปที่ 3-2 มีระยะทางประมาณ 27 เมตร ในขณะที่รูปที่ 3-3 มีระยะทางประมาณ 253 เมตร ซึ่งมีค่ามากกว่า Breathing length ทำให้มีระยะบางส่วนของรางเป็น Critical zone ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเสี่ยงในการเกิดการโก่งเดาะ โดยค่า TFI ในบริเวณนี้จะมีค่าคงที่ที่ระดับสูงสุด และจะลดลงด้วยความชันคงที่ในช่วงที่เป็น Breathing length จนมีค่าเป็นศูนย์ที่ปลายรางทั้งสองข้าง อย่างไรก็ตามรางที่มีความยาวช่วงน้อยกว่า 200 เมตร จะไม่มีส่วนที่เป็น Critical zone ส่งผลให้ค่า TFI มีค่าน้อยกว่าแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในแนวราง ทำให้กราฟที่ได้มีลักษณะที่เป็นสามเหลี่ยมหน้าจั่วและมีค่า TFI น้อยกว่า 1 แสดงดังรูปที่ 3-2

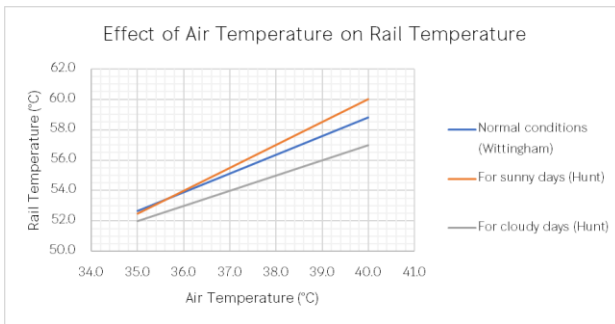
3.2.2 Critical Length Ratio

Critical Length Ratio หมายถึงอัตราส่วนระหว่างความยาวของช่วงวิกฤตต่อความยาวของชิ้นส่วนราง ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยค่าที่มีแนวโน้มเข้าใกล้ 1 สะท้อนว่าชิ้นส่วนรางนั้นมีความยาวของช่วงวิกฤตสูง และมีความเสี่ยงต่อการโก่งตัวของราง ในทางกลับกันหากค่า Critical Length Ratio เท่ากับ 0 จะสะท้อนว่าชิ้นส่วนรางดังกล่าวมีความยาวน้อยกว่าระยะ Breathing Length และสามารถขยายหรือหดตัวได้อย่างอิสระเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง รางในลักษณะนี้อาจเป็นรางชนิดมีรอยต่อ (Joint Rail) ที่มีความยาวน้อยกว่า 90 เมตร หรือรางเชื่อมยาวที่มีความยาวระหว่าง 90 ถึง 200 เมตร

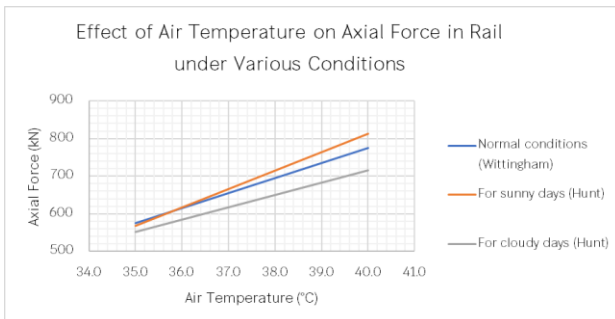
3.3 Axial Force induced by temperature

ผลการศึกษาในหัวข้อนี้จะนำเสนอการเปลี่ยนแปลงของแรงในแนวแกนของราง อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยการประมาณค่าอุณหภูมิของราง (Rail Temperature) สามารถดำเนินการได้จากอุณหภูมิอากาศ (Air Temperature) ตามสมการที่ (2-2), (2-3), และ (2-4) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 3-44 นอกจากนี้ยังสามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศ (Air Temperature) และแรงในแนวแกนที่เกิดขึ้นในรางรถไฟได้ดังรูปที่ 3-5 ความสัมพันธ์ทั้งสองลักษณะนี้ถือเป็นพื้นฐานสำคัญในการวิเคราะห์แรงในแนวแกนของรางรถไฟในพื้นที่ศึกษา โดยสามารถนำไปใช้คำนวณและประเมิน

ความเสี่ยงที่อาจเกิดจากการโก่งตัวของรางอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างเหมาะสม

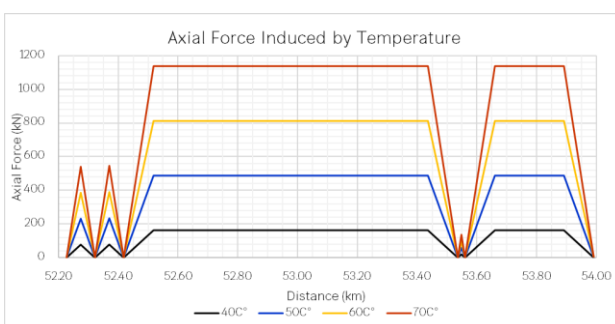


รูปที่ 3-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิราง



รูปที่ 3-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศและแรงในแนวแกนของรางรถไฟ

เพื่อความเข้าใจมากขึ้น ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้ตัวอย่างของรางรถไฟช่วงกิโลเมตรที่ 52.20 ถึง 54.00 ดังรูปที่ 3-6 ซึ่งเป็นช่วงทางที่ประกอบด้วยรางทั้งหมด 5 ชิ้น ซึ่งมีความยาวเท่ากับ 95, 96, 1,118, 24, และ 431 เมตร ตามลำดับ โดยกราฟจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิราง (Rail Temperature) มีค่าเท่ากับ 40, 50, 60, และ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ครอบคลุมสำหรับสภาพภูมิอากาศในประเทศไทย



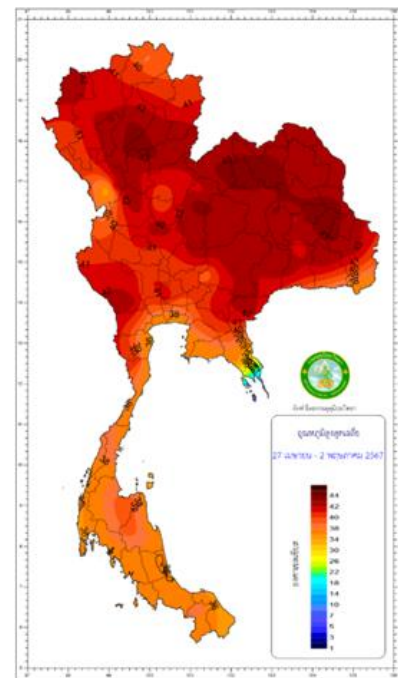
รูปที่ 3-6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของรางและแรงในแนวแกนของรางรถไฟ

จากรูปที่ 3-6 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของแรงในแนวแกน (Axial Force) เมื่ออุณหภูมิราง (Rail Temperature) เพิ่มขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่า หากอุณหภูมิของรางมีค่าสูงขึ้น ก็จะส่งผลให้แรงในแนวแกนมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย โดยในการพิจารณาจะ

แบ่งเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนแรกคือส่วนที่รางไม่สามารถยืดหรือขยายตัวได้ (Critical zone) จากรูปที่ 3-6 บริเวณดังกล่าวจะอยู่ช่วงกิโลเมตรที่ 52.50 ถึง 53.45 และ 53.65 ถึง 53.90 ซึ่งจะมีการเพิ่มขึ้นของแรงภายในสูงที่สุดดังสมการ (3-1)

$$\Delta P_{\text{critical}} = EA\alpha(T_{\text{rail2}} - T_{\text{rail1}}) \quad (3-1)$$

ในส่วนที่สอง คือส่วนที่รางสามารถยืดขยายตัวได้ (Breathing zone) เนื่องจากรางส่วนนี้มีการยืดขยายตัวได้ ทำให้การเพิ่มขึ้นของแรงภายในลดลงไปตามความยาวของราง กล่าวคือ หากรางมีความยาวมากกว่าจะส่งผลให้แรงภายในเพิ่มขึ้นมากกว่ารางที่มีความยาวน้อยกว่า สังเกตได้จากตัวอย่างดังรูปที่ 3-6 เนื่องจากรางช่วงกิโลเมตรที่ 52.25 ถึง 52.40 มีความยาวมากกว่ารางช่วงกิโลเมตรที่ 53.55 จึงมีการเพิ่มขึ้นของแรงในแนวแกนมากกว่า



รูปที่ 3-7 อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยของประเทศไทยในช่วงวันที่ 27 เม.ย. - 2 พ.ค. 2567

จากรูปที่ 3-7 เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นทางรถไฟที่สำรวจ จะพบว่าเส้นทางที่สำรวจผ่านพื้นที่จังหวัดราชบุรีและเพชรบุรี ซึ่งมีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยประมาณ 38 - 40 และ 36 - 38 องศาเซลเซียสตามลำดับ ดังนั้นรางรถไฟที่อยู่ในพื้นที่จังหวัดราชบุรี ได้แก่ ช่วงสถานีชุมทางหนองปลาดุกถึงสถานีห้วยโรงจะมีแรงตามแนวแกนสูงสุดมากกว่ารางรถไฟที่อยู่ในพื้นที่จังหวัดราชบุรี ได้แก่ ช่วงสถานีห้วยโรงถึงสถานีชะอำอยู่เล็กน้อยซึ่งจะมีค่าประมาณ 80 - 100 กิโลนิวตัน

3.4 Identification of the risk zone to buckling

การประเมินความเสี่ยงสำหรับงานวิจัยนี้ จะแบ่งออกเป็นสองแนวทาง ได้แก่ การประเมินโดยพิจารณาความยาวรวมของรางในแต่ละช่วงระหว่างสถานี และการประเมินจากความยาวของรางแต่ละชิ้น

สำหรับการประเมินความเสี่ยงโดยพิจารณาความยาวรวมของรางในแต่ละช่วงระหว่างสถานี จะดำเนินการโดยการคำนวณสัดส่วนของช่วงวิกฤตที่ปรากฏภายในระยะทางระหว่างสถานี เปรียบเทียบกับระยะทางรวมของช่วงระหว่างสถานี

ตารางที่ 3-1 สัดส่วนของช่วงวิกฤตเปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างสถานี

สถานี	รวมความยาวพื้นที่เสี่ยง (เมตร)	ระยะทางระหว่างสถานี (เมตร)	พื้นที่เสี่ยง (%)
NPJ - BAG	53	4,030	132
BAG - NCH	942	5,470	17.2
NCH - KTK	0	3,600	0.00
KTK - PTR	1,265	4,510	28.0
PTR - CSM	1,317	7,070	18.6
CSM - BKI	1,909	5,770	33.1
BKI - CLB	101	5,650	179
CLB - RBR	972	1,020	95.3
RBR - BKB	1,430	4,150	34.5
BKB - BOT	2,024	5,740	35.3
BOT - BPK	984	3,300	29.8
BPK - PTO	2,062	4,120	50.0
PTO - HRO	0	4,150	0.00
HRO - BGK	970	4,410	22.0
BGK - KYO	1,084	6,590	16.4
KYO - NPL	0	5,670	0.00
NPL - BGC	2,186	4,460	49.0
BGC - PBR	522	6,590	7.92
PBR - KTM	2,196	9,830	22.3
KTM - NML	940	3,890	24.2
NML - NNC	1,332	5,690	23.4

สถานี	รวมความยาวพื้นที่เสี่ยง (เมตร)	ระยะทางระหว่างสถานี (เมตร)	พื้นที่เสี่ยง (%)
NNC - NOS	1,411	5,500	25.6
NOS - CHA	1,278	11,660	11.0

จากตารางที่ 3-1 พบว่าการกระจายของพื้นที่เสี่ยงไม่ได้เป็นแบบสม่ำเสมอตลอดเส้นทาง แต่กลับมีลักษณะกระจุกตัวในบางช่วงสถานี ซึ่งสะท้อนถึงความแตกต่างในลักษณะการติดตั้งที่อาจเกิดจากข้อจำกัดด้านโครงสร้าง หรือรูปแบบการซ่อมบำรุงในอดีต

จากตารางที่ 3-1 พบว่า ช่วงที่มีสัดส่วนของพื้นที่วิกฤตสูง กว่า 30% ได้แก่ CSM – BKI (33.1%), CLB – RBR (95.3%), RBR – BKB (34.5%), BKB – BOT (35.3%), BPK – PTO (50.0%), และ NPL – BGC (49.0%) ถือเป็นช่วงที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดการโก่งตัวของรางสูง เนื่องจากมีความยาวของรางอยู่ในสภาวะที่ไม่สามารถขยายตัวได้ตามธรรมชาติมากกว่าช่วงอื่น ซึ่งสะสมแรงภายในแนวแกนได้สูง เมื่ออุณหภูมิในสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้น ความเสี่ยงนี้อาจยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้นหากพื้นที่ดังกล่าวตั้งอยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานาน

ในทางตรงกันข้าม ช่วงสถานีที่มีค่าเปอร์เซ็นต์พื้นที่วิกฤตเท่ากับ 0% เช่น NCH – KTK, PTO – HRO และ KYO – NPL แสดงถึงการติดตั้งรางที่มีลักษณะความยาวเกินกว่า 200 เมตร ทำให้ไม่มีการสะสมแรงภายในจากอุณหภูมิในระดับที่เป็นอันตราย

อย่างไรก็ตาม พบว่าบางช่วงสถานีที่มีระยะทางค่อนข้างสั้นคือ ช่วง CLB – RBR ที่มีระยะทางเท่ากับ 1,020 เมตร แต่กลับมีความยาวช่วงวิกฤตสูงถึง 972 เมตร ซึ่งคิดเป็น 95.29% ของระยะทางทั้งหมด ซึ่งสะท้อนถึงการจั่ววางรางแบบเชื่อมยาวโดยไม่มียอยต่อเพื่อระบายแรงเลย เป็นพื้นที่ควรเฝ้าระวังอย่างเข้มงวดเนื่องจากรางในลักษณะดังกล่าวมีความเสี่ยงต่อการเกิดการโก่งตัวได้สูงมาก เมื่ออุณหภูมิในสภาพแวดล้อมมีค่าสูงเกินระดับปกติ

นอกจากนี้ ช่วงระยะทางระหว่างสถานีที่มีความยาวมาก เช่น ช่วงระหว่างสถานี PBR – KTM (9,830 เมตร) และ PTR – CSM (7,070 เมตร) พบว่ามีการสะสมของช่วงวิกฤตในระดับปานกลางถึงสูง แม้จะไม่ได้อยู่ในระดับที่รุนแรงเท่ากับบางช่วงที่มีความยาวสั้นแต่มีสัดส่วนพื้นที่เสี่ยงสูง แต่ผลการวิเคราะห์ยังคงสะท้อนให้เห็นถึงแนวโน้มในการสะสมของแรงภายในแนวแกนอย่างต่อเนื่อง

แนวทางการประเมินความเสี่ยงอีกแนวทางหนึ่งสำหรับงานวิจัยนี้คือ การวิเคราะห์จากความยาวของรางแต่ละชิ้น โดยพิจารณาสัดส่วนของความยาวช่วงวิกฤตเทียบกับความยาวรวมของรางแต่ละชิ้น อัตราส่วนนี้จะถูกเรียกว่า “Critical Length Ratio” ซึ่งจะช่วยในการวิเคราะห์และระบุตำแหน่งของรางที่มีความเสี่ยงสูงได้อย่างชัดเจนในระดับพื้นที่เฉพาะ จากการวิเคราะห์ระดับความเสี่ยงของรางแต่ละชิ้นได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้ยังพบข้อสังเกตในพื้นที่ที่มีความสัมพันธ์กับระดับความเสี่ยงดังนี้

ช่วงที่มีสัดส่วนความเสี่ยงสูงอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ ช่วง BOT – BPK, BPK – PTO, และ PBR – KTM ซึ่งรางในช่วงเหล่านี้มีรางหลายชิ้นที่มี Critical Length Ratio สูงกว่า 0.70 สะท้อนถึงโอกาสเกิดแรง

สะสมในแนวแกนสูงและเสี่ยงต่อการเกิดการโก่งตัวในสถานะอุณหภูมิสูงได้ชัดเจน

ช่วงสถานี CLB - RBR และ RBR - BKB เป็นรางที่มี Critical Length Ratio ใกล้เคียงกับค่าสูงสุดหรือประมาณ 0.85 หลายชิ้นในระยะใกล้กัน เป็นจุดสะสมความเสี่ยงอย่างมีนัยสำคัญ จึงควรได้รับการติดตามและเฝ้าระวังอย่างใกล้ชิด

ในทางกลับกันช่วง NCH - KTK และ PTO - HRO พบว่ารางส่วนใหญ่มีค่า Critical Length Ratio ใกล้ศูนย์ สะท้อนให้เห็นว่าชิ้นรางสามารถยึดหดตามอุณหภูมิได้ดี และมีแนวโน้มเกิดความเสี่ยงจากแรงในแนวแกนน้อย

นอกจากนี้ยังพบว่าแนวโน้มของค่า Critical Length Ratio มี การกระจุกตัวสูงในบางจุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการวางแผนการจัดวางรางหรือการซ่อมบำรุงในอดีตอาจไม่ได้กระจายความเสี่ยงอย่างทั่วถึง โดยเฉพาะในบริเวณใกล้ทางโค้ง สะพาน หรือช่วงที่มีการเชื่อมรางหลายชิ้นติดต่อกันเป็นระยะยาว

4 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักในการวิเคราะห์และระบุพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการเกิดการโก่งตัวของรางรถไฟ ซึ่งมีสาเหตุจากแรงในแนวแกนที่เกิดจากการขยายตัวจากความร้อนของเหล็กราง ภายใต้บริบทของสภาพภูมิอากาศในประเทศไทย โดยมุ่งพัฒนาแนวทางเชิงปริมาณในการประเมินความเสี่ยงผ่านตัวชี้วัด Thermal Force Index (TFI) และการวิเคราะห์ความยาวช่วงรางวิกฤตผ่านค่า Critical Length Ratio ซึ่งเป็นเกณฑ์ใหม่ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นเพื่อประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบเชิงพื้นที่

จากการวิเคราะห์ข้อมูลสำรวจร่วมกับข้อมูลพยากรณ์ภูมิอากาศในประเทศไทย พบว่าในช่วงฤดูร้อน ซึ่งอุณหภูมิอากาศสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ค่า TFI มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสู่ระดับใกล้ 1 โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีรางเชื่อมยาว ซึ่งไม่สามารถระบายแรงดึงออกได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้ในจังหวัดราชบุรีและจังหวัดเพชรบุรีเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิรางเฉลี่ยสูงกว่า 55 ถึง 60 °C ส่งผลเกิดแรงภายในตามแนวแกนสูงสุด (Thermal axial force) ที่ระดับ 650 ถึง 800 กิโลนิวตัน

ผลการวิเคราะห์ Critical Length Ratio ซึ่งสะท้อนสัดส่วนของช่วงรางที่ไม่สามารถระบายแรงได้ เทียบกับความยาวรางทั้งหมด พบว่ามีหลายช่วงที่มีค่าสูงเกิน 0.50 ซึ่งบ่งชี้ถึงระดับความเสี่ยงที่ควรเฝ้าระวังอย่างใกล้ชิด ตัวอย่างเช่น ในช่วงสถานี CLB - RBR มีค่า Critical Length Ratio สูงถึง 95.3% จากความยาวราง 1,020 เมตร โดยช่วงที่วิกฤตจะครอบคลุมระยะทาง 972 เมตรของความยาวทั้งหมด สะท้อนถึงการการจัดวางรางแบบเชื่อมยาวโดยไม่ได้นิ่งถึงรอยต่อเพื่อระบายแรง ในทำนองเดียวกัน ช่วงสถานี NPL - BGC (49.0%) และ BPK - PTO (50.0%) ก็มีความเสี่ยงเช่นเดียวกันถึงแม้จะไม่สูงเท่าในช่วงสถานี CLB - RBR แต่ก็สะท้อนความเสี่ยงที่ระดับปานกลางถึงสูง นอกจากนี้ยังพบว่าแนวโน้มของค่า Critical Length Ratio มีการกระจุกตัวสูงในบางจุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการวางแผนการจัดวางรางหรือการซ่อมบำรุงในอดีตอาจไม่ได้กระจายความเสี่ยงอย่างทั่วถึง โดยเฉพาะในบริเวณใกล้ทางโค้ง สะพาน หรือช่วงที่มีการเชื่อมรางหลายชิ้นติดต่อกันเป็นระยะยาว

จากผลการดำเนินงานวิจัยที่ได้กล่าวในข้างต้น ผู้วิจัยสามารถวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อคาดการณ์พื้นที่ที่มีโอกาสเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างรางรถไฟ โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงขึ้นในบางฤดูกาล พร้อมทั้งสามารถแปรผลความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในแนวแกนกับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยที่เปลี่ยนแปลงได้ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ทำให้สามารถระบุตำแหน่งของแนวรางที่มีความเสี่ยงในการเกิดการโก่งเดาะ (Buckling) ได้ โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยของแต่ละพื้นที่จากข้อมูลสถิติของกรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงวางแผนบำรุงรักษาและสนับสนุนการตัดสินใจด้านความปลอดภัยในการติดตั้งรางไฟในพื้นที่ที่มีสภาพอากาศร้อนได้

เพื่อพัฒนาแนวทางการจัดการความเสี่ยงจากการโก่งตัวของรางรถไฟในประเทศไทยให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ทางผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะให้หน่วยงานที่รับผิดชอบด้านการบำรุงรักษารางอาจนางาเกมท Thermal Force Index (TFI) และ Critical Length Ratio ไปใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจในการจัดลำดับความสำคัญของพื้นที่ที่ควรตรวจสอบและซ่อมบำรุง ทั้งนี้ ควรจัดให้มีระบบตรวจวัดอุณหภูมิราง ณ ตำแหน่งที่ถูกจัดประเภทว่าเป็นพื้นที่เสี่ยงสูงในช่วงฤดูร้อนอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้สามารถเฝ้าระวังและตอบสนองต่อภาวะวิกฤตได้อย่างรวดเร็ว

ในด้านการออกแบบและวางแผนติดตั้งรางควรมีการกำหนดความยาวสูงสุดของรางเชื่อมยาวที่จะสามารถติดตั้งได้โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความโค้งรัศมีแคบและอุณหภูมิสูงกว่าค่าเฉลี่ยประจำปี เช่นเดียวกับระยะของช่วงที่สามารถยืดขยายความยาวตามอุณหภูมิได้ (Breathing length) และจุดต่อรางก็ควรได้รับการออกแบบให้เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศเพื่อให้สามารถระบายแรงที่เกิดจากการขยายตัวเชิงความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ควรมีการจัดเก็บข้อมูลหรือประวัติการบำรุงรักษาราง เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบสำหรับการตัดสินใจของผู้ที่เกี่ยวข้องด้วยเช่นกัน

แม้งานวิจัยนี้จะสามารถระบุพื้นที่เสี่ยงต่อการโก่งตัวของรางได้อย่างมีประสิทธิภาพในเบื้องต้น แต่อย่างไรก็ตาม ยังคงมีข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณา โดยเฉพาะในด้านความละเอียดของข้อมูลพิกัด GPS ของรางบางส่วนอาจมีความคลาดเคลื่อน หรือไม่ครอบคลุมทุกช่วงรางที่มีความสำคัญ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์แรงและการโก่งตัวของรางในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะแรงตามแนวแกน (Axial Force) ที่เกิดจากอุณหภูมิเท่านั้น มิได้วิเคราะห์ถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากแรงในแนวตั้ง (Vertical Load) หรือแรงกระทำด้านข้าง (Lateral Force)

นอกจากนี้ทางผู้วิจัยยังตั้งสมมติฐานว่าแนวรางเริ่มต้นมีความตรง กล่าวคือ ไม่มี Initial Misalignment และไม่มีการสูญเสียแนวรางในระหว่างการใช้งาน เนื่องจากขอบเขตของการวิจัยมุ่งเน้นศึกษาเฉพาะการโก่งตัวของรางที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเท่านั้น จึงไม่ครอบคลุมถึงปัจจัยอื่นที่มีผลต่อพฤติกรรมของราง เช่น การเสื่อมสภาพของวัสดุรางและหมอนรองราง การทรุดตัวของรอยต่อราง (Dipped Joint) หรือความไม่สมบูรณ์ของชิ้นโครงสร้างทาง ข้อจำกัดเหล่านี้อาจส่งผลให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำจำกัดในบางบริบทเท่านั้น ดังนั้นควรมีการปรับปรุงรูปแบบการศึกษาให้

ครอบคลุมปัจจัยเชิงโครงสร้างและสิ่งแวดล้อมที่หลากหลาย เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำและครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้และความเอาใจใส่ของ ผศ. ดร. ชยุตม์ งามโชนง อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการเสนอแนะแนวทางการดำเนินงาน พร้อมทั้งให้คำปรึกษาในการเลือกใช้เครื่องมือที่เหมาะสม การวิเคราะห์ข้อมูลอย่างมืออาชีพ และให้คำแนะนำอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการจัดทำปริญญานิพนธ์ ซึ่งล้วนเป็นประโยชน์ต่อความสมบูรณ์ของงานชิ้นนี้

คณะผู้จัดทำขอแสดงความขอบคุณอย่างจริงใจต่อคณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความรู้ ความเมตตา และประสบการณ์อันทรงคุณค่า ที่ได้มอบให้แก่ผู้จัดทำตลอดระยะเวลาการศึกษาและการดำเนินการปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chayut Ng., Sakdarat K., & Charalampos B. (2021). Influences of ballast degradation on railway track buckling.
- [2] Chayut Ng. (2020). RESILIENCE OF BALLASTED RAILWAY TRACKS EXPOSED TO EXTREME TEMPERATURE.
- [3] Shingo TAMAGAWA. (2023). Rail Fastening Systems and Buckling of Continuous Welded Rails.
- [4] Tumcivil. (n.d.). (2011). Train Eng: Track Components.
- [5] กรมการขนส่งทางราง. (2023). มขร.-C-007-2566 มาตรฐานการออกแบบทางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง (Ballasted Track Design).
- [6] กรมการขนส่งทางราง. (2023). มขร.-C-005-2566 มาตรฐานองค์ประกอบทางรถไฟ (TRACK COMPONENTS).
- [7] กรมอุตุนิยมวิทยา. (2567). สรุปสภาวะอากาศประจำปี พ.ศ. 2567.
- [8] กรองจิต กิตติภาศ และผกามาศ ถิ่นพั่งงา. (2560). งานวิจัยด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย.
- [9] พิธีรัฐ และชยุตม์. (2564). การวิเคราะห์การโก่งเดาะของโครงสร้างทางรถไฟขนาด 1 เมตร.
- [10] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร. (2567). คู่มือการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างทางรถไฟ.