



ประสิทธิภาพของหินโรยทางที่ปรับปรุงด้วยมวลรวมจากยางรถยนต์ภายใต้แรงกระทำวัฏจักร  
PERFORMANCE OF RAILWAY BALLAST IMPROVED WITH TIRE-DERIVED AGGREGATE  
UNDER CYCLIC LOADING

อาศิส อัยรักษ์<sup>1</sup>, ทวีศักดิ์ ทองขวัญ<sup>1\*</sup>, สมมาตร สวัสดิ์<sup>2</sup>, และอรุณ ลูกจันทร์<sup>3</sup>

<sup>1,1\*</sup>อาจารย์, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

<sup>3</sup>รองศาสตราจารย์, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

\*Corresponding author, Email: thaweesak.t@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

การเสื่อมสภาพของหินโรยทางเกิดจากการขัดสีและการกดกระแทกภายใต้น้ำหนักของขบวนรถไฟจนเกิดการแตกเป็นผง ส่งผลให้ต้องทำความสะอาดหรือเปลี่ยนหินโรยทางในที่สุด งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการปรับปรุงชั้นหินโรยทางด้วยการแทนที่ด้วยมวลรวมจากยางรถยนต์ (Recycled tire-derived aggregate: TDA) เนื่องจากสมบัติการยืดหยุ่นของยางรถยนต์จึงเป็นทางเลือกในการวิจัยขั้นตอนงานวิจัยประกอบด้วย การทดสอบสมบัติพื้นฐานของหินโรยทาง ออกแบบและสร้างกล่องทดสอบหินโรยทาง ทดสอบการรับน้ำหนักของหินโรยทางผสม TDA ในปริมาณ 5%, 10% และ 15% โดยปริมาตรของหินโรยทางภายใต้การรับน้ำหนักแบบวัฏจักร จากนั้นประเมินการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง ผลการศึกษาพบว่า ค่าการแตกของหินโรยทางมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ TDA ในปริมาณ 5% และเริ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ TDA มากกว่า 5% พฤติกรรมด้านกำลังของหินโรยทางอธิบายได้จากค่าการทรุดตัวในแนวตั้ง ค่าความเครียดแนวตั้ง ค่าความแข็งแรง และค่าอัตราการหน่วง พบว่า เมื่อหินโรยทางรับน้ำหนักจะเกิดการเสีรูปร่างพลาสติกขึ้นอย่างรวดเร็วมากถึงประมาณ 1,000 รอบ หลังจากนั้นอัตราการทรุดตัวจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อน้ำหนักกระทำถึงประมาณ 10,000 รอบ จากนั้นยังคงมีเสถียรภาพโดยมีการทรุดตัวเกือบคงที่ เมื่อพิจารณาจากรูปแบบการเสื่อมสภาพและพฤติกรรมด้านกำลังของหินโรยทางพบว่า ชั้นหินโรยทางที่มี TDA ในปริมาณไม่เกิน 15% หินโรยทางสามารถเคลื่อนตัวและถูกจัดเรียงใหม่อย่างเหมาะสมสามารถช่วยลดการเสื่อมสภาพของหินโรยทางได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: หินโรยทาง; มวลรวมจากยางรถยนต์; แรงกระทำวัฏจักร; ดัชนีการแตก; อัตราการหน่วง

ABSTRACT

The deterioration of ballasts is caused by abrasion and crushing under the dynamic load of the train until they break into powder. This eventually causes the need to clean or replace the ballast. This research focuses on a study to improve the ballast layer by partially replacing the ballast with recycled tire-derived aggregate (TDA). Because of its elastic properties, tire scraps are an alternative for research. The laboratory testing series was conducted, consisting of the physical properties test of ballast,

Arsit Iyarak<sup>1</sup>, Thaweesak Thongkhwan<sup>1\*</sup>, Sommart Swasdi<sup>2</sup> and Arun Lukjan<sup>3</sup>

<sup>1,1\*</sup>Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

<sup>3</sup>Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

design, and construct the ballast box test. The ballast and TDA were prepared with different TDA as 5%, 10%, and 15% (by volume of ballast) and performed under cyclic loading. Finally, an optimum TDA content was suggested to decrease the ballast deterioration. The result found that in the case of ballast mixed with TDA, the ballast breakage values have a decrease trend with mixed TDA of 5% and an increase trend when TDA is more than 5%. The strength behavior of the ballast layer is described by the vertical settlement, vertical stress, stiffness, and damping ratio values, it was found that when the ballast layer is loaded, plastic deformation will occur rapidly up to approximately 1,000 cycles, after which the rate of settlement will gradually decrease when the load reaches approximately 10,000 cycles, and then it will remain stable with almost constant settlement. Considering the deterioration pattern and strength behavior of the ballast layer, it was found that using recycled TDA in the ballast layer in an amount not exceeding 15% by volume of ballast that can be moved and rearranged appropriately can significantly reduce the deterioration of the ballast track.

**KEYWORDS:** Ballast; Tire-derived aggregate; Cyclic loading; Breakage index; Damping ratio

## 1. บทนำ

ทางรถไฟประกอบด้วยส่วนประกอบหลายชุดที่มีความแข็งต่างกันซึ่งจะถ่ายน้ำหนักแบบสถิตย์และพลวัตไปยังชั้นฐานรากกรณีโครงสร้างทางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง (Ballast track) อาจแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ โครงสร้างทางส่วนบน (Superstructure) และโครงสร้างส่วนล่าง (Substructure) โครงสร้างทางส่วนบนประกอบด้วย ราง แผ่นรองราง เครื่องยึดเหนี่ยวรางและหมอนรองราง ขณะที่โครงสร้างส่วนล่างได้แก่ ส่วนประกอบของทางรถไฟที่อยู่ต่ำกว่าหมอนรองรางซึ่งประกอบด้วย ชั้นหินโรยทาง ชั้นรองหินโรยทาง และชั้นพื้นทาง [1] ความสมบูรณ์ของโครงสร้างทั้ง 2 ส่วนนี้ จะส่งผลต่อความปลอดภัยในการสัญจรและความสะดวกสบายของผู้โดยสาร ทั้งนี้ ความเสียหายของทางรถไฟชนิดมีหินโรยทางมักเกิดจากโครงสร้างทางส่วนล่าง ซึ่งมีความซับซ้อนในการวิเคราะห์ถึงสาเหตุและที่มาของปัญหา เนื่องจากโครงสร้างส่วนนี้ประกอบด้วยวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันหลายส่วนรวมกัน และพบว่าแรงกระทำแบบวัฏจักร (Cyclic loading) จะส่งผลโดยตรงต่อความเสียหายของชั้นหินโรยทาง [2] โดยที่ผ่านมารวมการซ่อมบำรุงรักษาทางรถไฟนั้นก็มีข้อจำกัดหลายประการ ทำให้รูปแบบการซ่อมบำรุงทางรถไฟนั้นมุ่งเน้นไปที่การเปลี่ยนชิ้นส่วนหรือวัสดุของโครงสร้างทางส่วนบน โดยไม่ได้พิจารณาในส่วนของชั้นหินโรยทาง ซึ่งเป็นวัสดุที่สำคัญต่อการรับน้ำหนักของทางรถไฟ หรืออาจจะเป็นสาเหตุโดยตรงที่ทำให้โครงสร้างทางรถไฟเกิดการชำรุดและเสียหาย [3]

ในรอบ 10 กว่าปีที่ผ่านมา มีการวิจัยที่หลากหลายเพื่อพัฒนาวัสดุรีไซเคิลมาใช้เป็นวัสดุชั้นหินโรยทาง ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อลดการเสื่อมสภาพและเพิ่มอายุการใช้งานของทางรถไฟ เช่น การใช้เศษคอนกรีตย่อย วัสดุสังเคราะห์ หรือแม้แต่การใช้ตะกรันจากเตาถลุงเหล็ก [4] ซึ่งทั้งหมดยังไม่สามารถลดการเสื่อมสภาพของวัสดุโรยทางได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าที่ควร แต่พบว่าการใช้ยางที่มีสมบัติในการยึดหยุ่นสูง มีความเหนียว และทนต่อแรงดึงได้ดี แม้มีอุณหภูมิที่สูงขึ้นสามารถลดการเสื่อมสภาพ และเพิ่มอายุการใช้งานของทางรถไฟได้ อย่างเช่น Sol-Sánchez et al. (2015) [5] ศึกษาการใช้ยางรถยนต์ย่อยรีไซเคิลผสมหินโรยทางในปริมาณ 5%, 10%, 20%, และ 30% ที่ประเทศสเปน ทำการทดสอบการรับน้ำหนักแบบกระทำซ้ำจำนวน 100,000 รอบ ที่ความถี่ 4 Hz พบว่า การใช้ยางรถยนต์ย่อยรีไซเคิลประมาณ 10% (โดยปริมาตร) สามารถลดการทรุดตัวของหินโรยทางได้ และในขณะเดียวกันความสามารถของชั้นหินโรยทางในการกระจายพลังงานก็เพิ่มขึ้นและความฝืดของยางก็ลดลง การทรุดตัวของคันทางอาจลดลงด้วยส่งผลให้เพิ่มอายุการใช้งานของโครงสร้างทางรถไฟ นอกจากนี้ ผลการศึกษายังพบว่า การใช้ยางรถยนต์ย่อยรีไซเคิลช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาทางรถไฟได้ด้วยเช่นกัน ขณะที่ Hussaini et al. (2016) [6] ศึกษาพฤติกรรมของหินโรย

ทางที่มีการวางจีโอกริด (Geogrid) รูปร่างต่างกันผ่านการทดสอบกล่องหิน โยธทางขนาดใหญ่ภายใต้แรงกระทำวัฏจักร โดยแนะนำว่าควรวางจีโอกริดในชั้นหิน โยธทางมากกว่าชั้นใต้หิน โยธทาง และพบว่าการเสริมวัสดุจีโอกริดในชั้นหิน โยธทางช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดรั้งด้านข้างของหิน โยธทาง ด้วยเหตุนี้จึงช่วยลดขอบเขตของการทรุดตัวในแนวดิ่งลงอย่างมาก ในทางกลับกันการเสริมแรงด้วยจีโอกริดนั้นส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อการลดการทรุดตัวในชั้นใต้หิน โยธทาง นอกจากนี้ จีโอกริดยังช่วยลดปริมาณการแตกหักของอนุภาคให้เหลือน้อยที่สุด และพบว่าประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งการวาง โดยที่การแตกหักต่ำสุดจะเกิดขึ้นเมื่อวางจีโอกริดไว้ที่ตำแหน่งเหนือชั้นใต้หิน โยธทางประมาณ 130 มม.

Esmaeili et al. (2017) [7] ศึกษาพฤติกรรมของหิน โยธทางที่ปนเปื้อนทรายผสมกับมวลรวมที่ได้จากยางรถยนต์ย่อยที่ปริมาณ 5%, 10%, และ 15% ภายใต้การทดสอบการรับน้ำหนักแบบกระทำซ้ำในประเทศอิหร่าน ผลการศึกษาชี้ว่า การใช้ยางรถยนต์ย่อย 5% นั้น มีความเหมาะสมที่สุดในแง่การแตกและความแข็งของหิน โยธทาง ในขณะที่ยังมียางรถยนต์ย่อยมากขึ้น อัตราส่วนการหน่วงของตัวอย่างก็จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง Navaratnarajah and Indraratna (2017) [8] ศึกษาการใช้แผ่นยาง (Rubber mats) เพื่อปรับปรุงพฤติกรรมการเสีรูปร่างและการเสื่อมสภาพของหิน โยธทางรถไฟภายใต้แรงกระทำซ้ำผ่านกล่องทดสอบ พบว่าคุณลักษณะการดูดซับพลังงานของแผ่นยางช่วยลดปริมาณการเสีรูปร่างและการเสื่อมสภาพของหิน โยธทางภายใต้สภาวะทางที่แท้จริง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแผ่นยางกระจายความเค้นที่เกิดจากรถไฟขณะกำลังเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอมากขึ้น โดยการเพิ่มพื้นที่สัมผัสที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งจะช่วยลดการขยายแบบพลวัตของความเค้นแนวตั้งที่ใช้ และนำไปสู่การเสื่อมสภาพของหิน โยธทางน้อยลงมาก กล่าวคือ การเสีรูปร่างพลาสติกในแนวดิ่งและด้านข้าง และการแตกหักของหิน โยธทางเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักบรรทุกของเพลลาและความเร็วของขบวน (ความถี่ในการบรรทุก) การเสีรูปร่างพลาสติกอย่างรวดเร็วเกิดขึ้นได้ถึงประมาณ 10,000 รอบ จากนั้นอัตราการเปลี่ยนรูปจะค่อย ๆ ลดลง และความเครียดที่เกี่ยวข้องจะน้อยลงที่ประมาณ 100,000 รอบ เมื่อวางแผ่นยางไว้ใต้ชั้นหิน โยธทางรถไฟ (เช่น ด้านบนของฐานคอนกรีต) พบว่าความเครียดพลาสติกแนวตั้งลดลงประมาณ 10-20% และความเครียดพลาสติกด้านข้างลดลงประมาณ 5-10% ขณะที่ Indraratna et al. (2018) [9] ศึกษาประสิทธิภาพของชั้นหิน โยธทางโดยการใช้ล้อยางรถยนต์เป็นชั้นรองหิน โยธทาง ผลการศึกษานี้ยืนยันว่าชั้นรองหิน โยธทางที่ถูกจำกัดขอบเขตด้วยเซลล์ล้อยางยางรีไซเคิลสามารถลดการเสื่อมสภาพของหิน โยธทางและการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในโครงสร้างพื้นฐานของคันทาง

ต่อมา Indraratna et al. (2019) [10] ศึกษาประสิทธิภาพของชั้นหิน โยธทางโดยการใช้ยางรถยนต์รีไซเคิลร่วมกับจีโอกริดทดสอบผ่านกล่องทดสอบ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มวัสดุยางสามารถปรับปรุงการดูดซับพลังงานของชั้นโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังช่วยลดการแตกของหิน โยธทางได้อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ Song et al. (2019) [11] ศึกษาพฤติกรรมเชิงกลและประสิทธิภาพในการหน่วงของหิน โยธทางที่มียางรถยนต์เป็นส่วนผสมผ่านการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยกล่องทดสอบแรงเฉือนโดยตรงขนาดใหญ่ พบว่าการใช้ยางรถยนต์รีไซเคิลในชั้นหิน โยธทางช่วยเพิ่มอัตราส่วนการหน่วงได้ดี รวมถึงช่วยลดค่าความแข็งแกร่งเฉือนคืบตัว ค่าแรงยึดเหนี่ยวและมุมเสียดทานภายในของหิน โยธทาง นอกจากนี้ Esmaeili and Askari (2023) [12] ศึกษาพฤติกรรมของชั้นหิน โยธทางผสมกับมวลรวมที่ได้จากตะกรัน พบว่าการใช้ตะกรันหิน โยธทางช่วยเพิ่มความแข็งแกร่งและอัตราการหน่วงได้ประมาณ 35% และ 75% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับหิน โยธทางทั่วไป และได้แนะนำให้ใช้ตะกรัน 75%

การนำยางรถยนต์รีไซเคิลมาใช้เป็นวัสดุในงานวิศวกรรมโยธานั้นพบว่า มีการวิจัยและประยุกต์ใช้จริงมากขึ้นในปัจจุบัน เช่น นำมาผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์เพื่อใช้เป็นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต เป็นต้น ส่วนในงานทางรถไฟก็มีงานวิจัยเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในต่างประเทศ (เช่น จีน ออสเตรเลีย สเปน และอิหร่าน เป็นต้น) ขณะที่ในประเทศไทยยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะในอดีตงานวิจัยทางรางยังไม่เปิดกว้างเท่าที่ควร การปรับปรุงแก้ไขปัญหาคือการเสื่อมสภาพของหิน โยธทางในประเทศไทยนิยมใช้วิธีการเปลี่ยนหิน โยธทางใหม่เนื่องจากการออกแบบทางรถไฟโดยทั่วไปจะมีอายุใช้งานประมาณ 20 ปี อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่เกิดความ

เสียหายมากอาจจะต้องแก้ไขโดยวิธีอื่น เช่น การปรับปรุงโครงสร้างทางรถไฟด้วยวัสดุวัสดุสังเคราะห์ที่เพิ่มเสริมกำลังดินในเส้นทางรถไฟสายใต้ระหว่างจังหวัดชุมพรถึงนครศรีธรรมราช [3] เป็นต้น แม้ว่าวิธีเสริมกำลังดินจะมีประสิทธิภาพที่ดีแต่ก็มีข้อเสียคือ ราคาในการก่อสร้างค่อนข้างสูง ในทางกลับกันการใช้วัสดุรีไซเคิลนั้นจะมีจุดเด่นในเรื่องค่าใช้จ่ายวัสดุที่ลดลง ดังนั้น การปรับปรุงชั้นหินโรยทางในประเทศไทยด้วยการแทนที่หินโรยทางบางส่วนด้วยมวลรวมจากยางรถยนต์รีไซเคิล (Recycled tire-derived aggregate, TDA) จึงเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจประสิทธิภาพทั้งในด้านกำลังและด้านเศรษฐศาสตร์ นอกจากนี้ สมบัติของวัสดุหินโรยทางนั้นขึ้นอยู่กับสภาพธรณีวิทยาและภูมิอากาศในพื้นที่ของหินต้นกำเนิด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ อาจทำให้การเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับงานทางรถไฟยังคงเป็นเรื่องท้าทาย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงชั้นหินโรยทาง หินแกรนิต ในพื้นที่จังหวัดสงขลา ประเทศไทย ด้วยการแทนที่ด้วยมวลรวมจากยางรถยนต์ (TDA) กับการใช้งานระบบขนส่งทางรางในประเทศไทย ที่แตกต่างกับงานวิจัยอื่น ซึ่งต้องอาศัยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นรูปแบบในการศึกษาครั้งนี้ โดยกรอบแนวความคิดประกอบด้วย การทดสอบสมบัติพื้นฐานของหินโรยทางและยางรถยนต์ย่อยรีไซเคิล ออกแบบและประกอบกล่องทดสอบหินโรยทาง (Ballast box test) ทำการทดสอบหินโรยทางผสมยางรถยนต์รีไซเคิลภายใต้การรับน้ำหนักแบบวัฏจักร พร้อมทั้งวิเคราะห์และประเมินพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เป็นตัวบ่งชี้การลดการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง ผลที่ได้จากการศึกษาจะเป็นแนวทางสำหรับการเพิ่มอายุการใช้งานของทางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง และลดปริมาณการใช้มวลรวมตามธรรมชาติ ในขณะที่เดียวกันแหล่งของเสียจากยางรถยนต์จะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งอาจช่วยลดต้นทุนของงานได้

## 2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

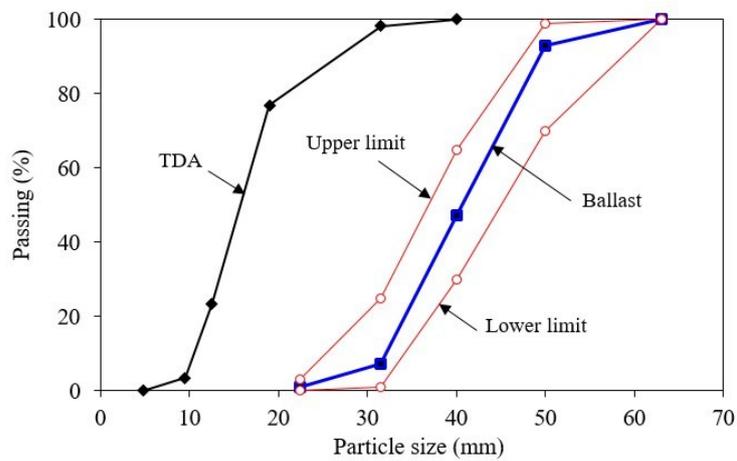
### 2.1 วัสดุที่ใช้ทดสอบ

วัสดุที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย หินแกรนิตจากแหล่งหินวังไผ่ อำเภोजังหวัดสงขลา และยางรถยนต์รีไซเคิล (รูปที่ 1) โดยผลทดสอบสมบัติพื้นฐานของหินโรยทางได้ผลดังตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาจากผลการกระจายตัวของหินโรยทาง ค่าการซัดสีทดสอบเองเจลิส ความหนาแน่น ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ ดัชนีความยาว ดัชนีความแบน และการต้านทานซัลเฟตนั้นพบว่าเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมการขนส่งทางราง [1] ส่วนรูปที่ 2 แสดงการกระจายอนุภาคของหินโรยทางและยางรถยนต์ย่อย โดยอนุภาคของหินโรยทางเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมการขนส่งทางราง [1] ส่วนยางรถยนต์ผ่านการย่อย ใช้ขนาดอนุภาคที่ศึกษาดียวกับ [5] อยู่ในช่วง 8-22.4 mm ซึ่งสามารถเติมเต็มช่องว่างระหว่างมวลของหินโรยทางได้ดี ด้านปริมาณการใช้ยางรถยนต์ ผู้วิจัยได้ทดสอบเบื้องต้นล่วงหน้า และพบว่าปริมาณยางรถยนต์ร้อยละ 20 ทำให้อัตราการหน่วงเนื่องจากแรงกระทำซ้ำสูง ทำให้ผู้วิจัยกำหนดการใช้ที่สัดส่วนร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยปริมาตรของหินโรยทางที่รวมช่องว่างระหว่างมวล ในขอบเขตวิจัยครั้งนี้

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในรูปออกไซด์ของโลหะในหินโรยทางด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) พบว่าองค์ประกอบหลักของหินโรยทาง ประกอบด้วยซิลิกอนออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) มีค่าเท่ากับ 63.55%, อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เท่ากับ 13.17% เฟอริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เท่ากับ 4.52% แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) เท่ากับ 6.23% แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) เท่ากับ 0.48% โพแทสเซียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ ) เท่ากับ 5.13% ส่วนค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผา (LOI) เท่ากับ 3.48% ดังแสดงในตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของหินโรยทางที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้วิเคราะห์ได้ว่า ประกอบด้วยออกไซด์หลักได้แก่ซิลิกอนออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ เฟอริกออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ รวมกันประมาณ 81.72% ซึ่งสามารถใช้เป็นดัชนีการต้านทานการซัดสีได้ดีเป็นไปในทิศทางเดียวกัน [12]



รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ทดสอบ (ก) หินโรยทาง (ข) หินโรยทาง+TDA



รูปที่ 2 กราฟการกระจายตัวของหินโรยทาง (Ballast) และมวลรวมจากขยารถยนต์ (TDA)

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของหินโรยทาง

สมบัติหินโรยทาง	ผลการทดสอบ	ข้อกำหนด [1]
การซัดสีลอสแอนเจลิส (%)	22.87	< 24
ความถ่วงจำเพาะ	2.62	> 2.60
การดูดซึมน้ำ (%)	0.44	< 2
ดัชนีความยาว (%)	18.67	< 30
ดัชนีความแบน (%)	23.32	< 30
การต้านทานซัลเฟต (%)	0.64	< 5
ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	1,485	>1,200
สปส.ความสม่ำเสมอ (C <sub>u</sub> )	1.34	-
สปส.ความโค้ง (C <sub>c</sub> )	0.94	-

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของหินโรยทาง

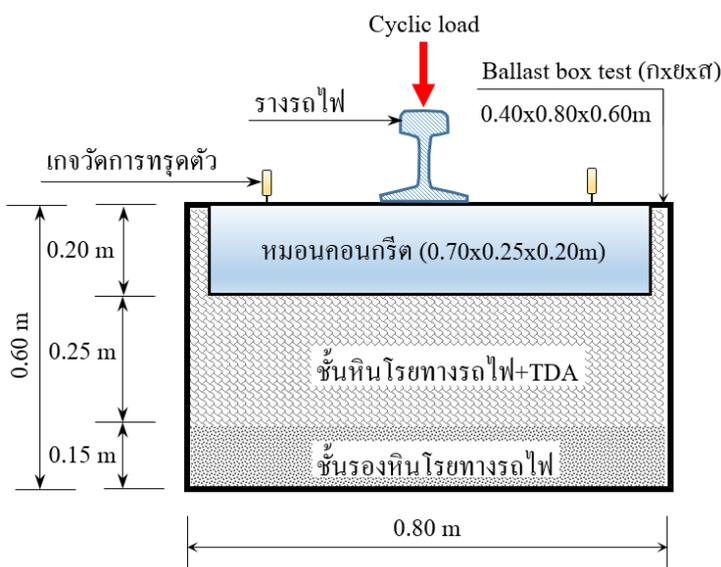
Chemical composition (%)															
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	ZnO	F	Other	LOI	
63.55	13.17	4.52	6.23	0.48	5.13	0.30	0.16	1.70	0.21	0.07	0.51	0.21	0.28	3.48	

## 2.2 การสร้างกล่องทดสอบและเตรียมส่วนผสม

การออกแบบกล่องทดสอบหินโรยทาง (Ballast box test: BBT) ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 0.40×0.80×0.60 m (กว้าง×ยาว×สูง) ดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) พร้อมดำเนินการสร้าง BBT ตามที่ออกแบบไว้ จากนั้นนำ BBT มาติดตั้งบนแท่นทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) จากนั้นเตรียมหินโรยทางให้มีขนาดละเอียดตามข้อกำหนด การเตรียมวัสดุเพื่อบรรจุใน BBT ประกอบด้วย ชั้นรองหินโรยทางและชั้นหินโรยทาง (รูปที่ 3 (ก)) โดยชั้นรองหินโรยทางหนา 0.15 m เป็นวัสดุหินคลุกที่มีสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของการรถไฟแห่งประเทศไทย โดยทำการบดอัดให้มีความแน่นร้อยละ 95 ของความหนาแน่นสูงสุด ในขณะที่ชั้นหินโรยทางมีความหนา 0.25 m โดยแบ่งบรรจุ 2 ชั้นเท่า ๆ กัน แต่ละชั้นบดอัดแน่นโดยใช้ Vibratory hammer ส่วนการออกแบบส่วนผสมหินโรยทางประกอบด้วย (1) หินโรยทางล้วน (B100-T0) และ (2) หินโรยทาง+TDA ที่สัดส่วนร้อยละ 5 (B95-T5), 10 (B90-T10), 15 (B85-T15) โดยปริมาตรของหินโรยทางที่รวมช่องว่างระหว่างมวล ดังสรุปในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณวัสดุที่ใช้ทดสอบและสัญลักษณ์ส่วนผสมที่ทดสอบ

Mixtures	B100-T0	B95-T5	B90-T10	B85-T15
TDA (% by volume)	0	5	10	15



(ก) รายละเอียดวัสดุและอุปกรณ์



(ข) การติดตั้งเกจวัดการทรุดตัว

รูปที่ 3 การเตรียมตัวอย่างและติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ

### 2.3 การกำหนดน้ำหนักบรรทุก

น้ำหนักบรรทุกแบ่งเป็นน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) และน้ำหนักเพลา (Axle load) เป็นการจำลองรับน้ำหนักของหินโรยทางรับน้ำหนักอย่างซ้ำ ๆ โดยการสั่น (Pulse) งานวิจัยนี้ออกแบบเพื่อใช้เป็นทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งมวลชนระหว่างเมือง (Intercity Passenger Rail, IPR) สำหรับขนส่งผู้โดยสารที่ใช้ความเร็วสูงสุดในการให้บริการ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และน้ำหนักเพลาสูงสุดไม่เกิน 25 ตัน อย่างไรก็ตาม ภายใต้น้ำหนักบรรทุกของรถไฟที่วิ่งผ่านรางส่งผลให้เกิดแรงดันใต้หมอนรถไฟและกระทำต่อหินโรยทาง เมื่อออกแบบขนาดทาง 1.00 m (Meter gauge) บนทางวิ่งปกติที่ใช้หมอนคอนกรีตอัดแรงสำหรับรางขนาด EN54-E1 กำหนดให้รับน้ำหนัก 20 ตัน ทั้งนี้ อ้างอิงตามคู่มือการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างทางรถไฟ ได้แนะนำว่าในการออกแบบควรพิจารณาให้ความเค้นที่ผิวสัมผัสกับหมอนรองรางไม่ควรเกินค่า 450 kPa เพื่อป้องกันการแตกหักหรือสึกของหินโรยทางที่มากเกินไป [13]



(ก) ชุดทดสอบแรงกระทำแบบวัฏจักร



(ข) ชุดคอมพิวเตอร์และบันทึกข้อมูล



(ค) ชุดควบคุมน้ำหนัก

รูปที่ 4 ชุดทดสอบการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

การคำนวณความเค้นที่เกิดขึ้นใต้หมอนรองรางรถไฟสามารถคำนวณตามมาตรฐานสมาคมวิศวกรรถไฟแห่งสหรัฐอเมริกา และการบำรุงรักษา [14] ดังสมการที่ 1

$$P_{avg} = \frac{Q(1+IF)xD_f}{A} \quad (1)$$

เมื่อ  $P_{avg}$  คือความเค้นเฉลี่ยแนวตั้งที่แบกรับระหว่างหน้าสัมผัสของหินโรยทางกับหมอนรองราง (Average ballast pressure, kPa);  $Q$  คือ น้ำหนักเพลา (200 kN);  $IF$  คือ ตัวประกอบแรงกระทำ;  $D_f$  คือ ตัวประกอบการกระจายแรง;  $A$  คือ พื้นที่ผิวสัมผัสของฐานหมอนรองราง ( $m^2$ ) ขนาดหมอนรองรางมีความยาว 2 m คิดเป็นพื้นที่ประมาณ  $0.474 m^2$  และค่า  $DF$  เท่ากับ 50% สำหรับระยะห่างหมอนรองรางเท่ากับ 0.60 m ส่วนค่า  $IF$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 [14]

$$IF = \frac{33V}{100D} \tag{2}$$

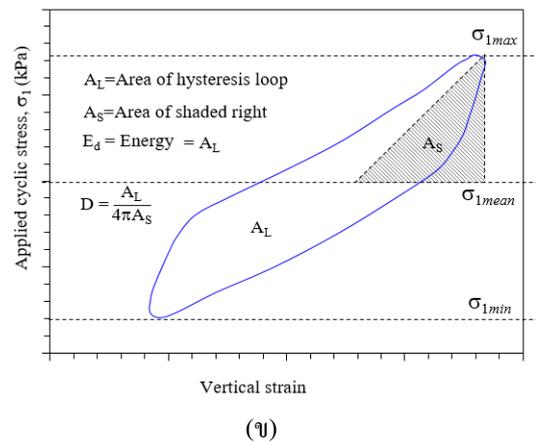
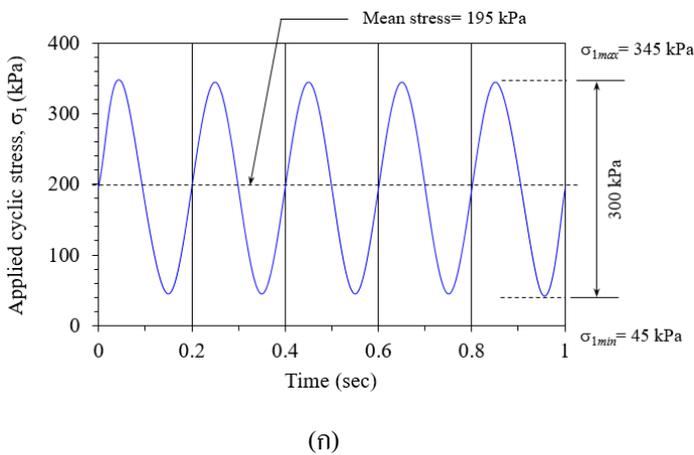
เมื่อ V คือ ความเร็ว (ไมล์/ชม.) และ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อ (นิ้ว) กำหนดให้ใช้ความเร็วออกแบบ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (62.13 ไมล์/ชม.) และ D = 33 นิ้ว (840 mm) เมื่อแทนค่าในสมการที่ 2 ได้ค่า IF = 0.62 และเมื่อแทนค่าในสมการที่ 1 จะได้ค่า  $P_{avg} = 345 \text{ kPa}$  (< 450 kPa) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ใช้ค่าความเค้นสูงสุด 345 kPa ซึ่งคิดเป็นน้ำหนักกระทำสูงสุดได้หอนร่องราง ระหว่างทดสอบ =  $345 \times (0.7 \times 0.25) = 60 \text{ kN}$  (6 ตัน)

#### 2.4 การทดสอบการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง

การเสื่อมสภาพของหินโรยทางถูกทดสอบภายใต้แรงกระทำวัฏจักรรูปแบบคลื่นไซน์เวฟที่ระดับความถี่เท่ากับ 5 Hz กำหนดให้ทดสอบด้วยวิธีควบคุมความเค้น (Stress-controlled) นั่นคือ ความเค้นต่ำสุดเท่ากับ 45 kPa ซึ่งคิดเป็นน้ำหนักบรรทุกคงที่จากหอนรถไฟกับรางรถไฟประมาณ 8 kN [15] ในขณะที่ความเค้นสูงสุด ( $P_{max}$ ) เท่ากับ 345 kPa ซึ่งคิดเป็นน้ำหนักบรรทุกคงที่รถไฟวิ่งผ่าน 60 kN (6 ตัน) และจำนวนรอบเท่ากับ 100,000 รอบ ดังรายละเอียดในตารางที่ 4 ระหว่างทดสอบจะทำการวัดรอบน้ำหนักที่กระทำทั้งหมดและการทรุดตัวจะถูกบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่องโดยการติดตั้งเกจวัดการทรุดตัวบนหอนร่องรางจำนวน 4 จุด หลังจากทดสอบเสร็จจึงนำตัวอย่างหินโรยทางร้อนผ่านตะแกรงแต่ละขนาดพร้อมชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่ล้าง เพื่อคำนวณการเสื่อมสภาพของหินโรยทาง รูปที่ 5 (ก) แสดงรูปแบบของความเค้นภายใต้แรงกระทำวัฏจักรสำหรับความถี่ 5 Hz

ตารางที่ 4 เงื่อนไขการทดสอบ

ความถี่ (Hz)	Max. Stress (kPa)	Max. Load (kN)	Min. Stress (kPa)	Min. Load (kN)	N (cycle)
5	345	60	45	8	100,000



รูปที่ 5 (ก) ความเค้นภายใต้แรงกระทำวัฏจักรสำหรับความถี่ 5 Hz (ข) การหาค่าการดูดซับพลังงานและอัตราการหน่วง [15]

#### 3.1 ผลการทดสอบและอภิปรายผล

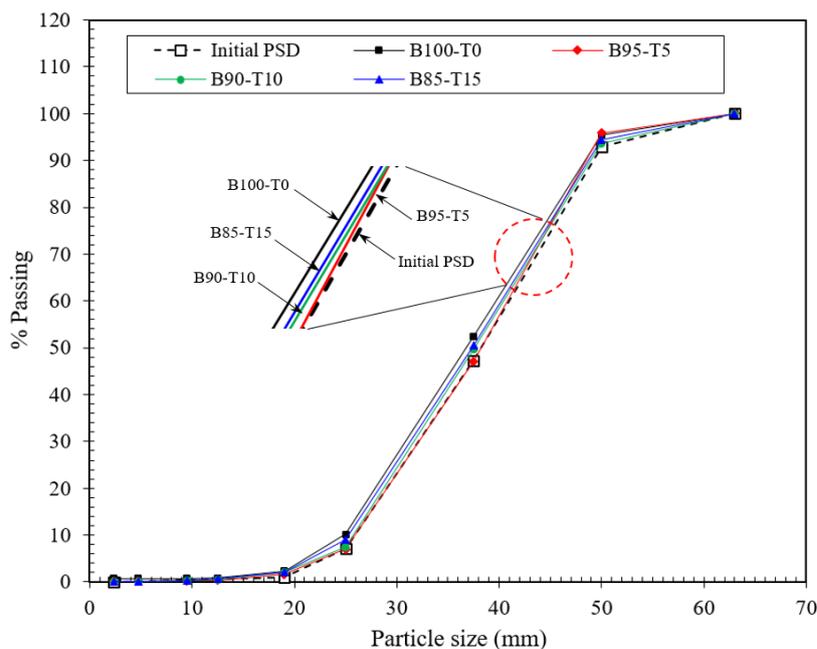
การวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของหินโรยทางประกอบด้วย (1) การแตกของหินโรยทาง (Ballast breakage) (2) การเสียรูป (Ballast layer deformation) (3) ค่าความแข็งเกร็ง (Ballast layer stiffness) และ (4) อัตราการหน่วง (Damping ratio) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 3.1 การแตกของหินโรยทาง

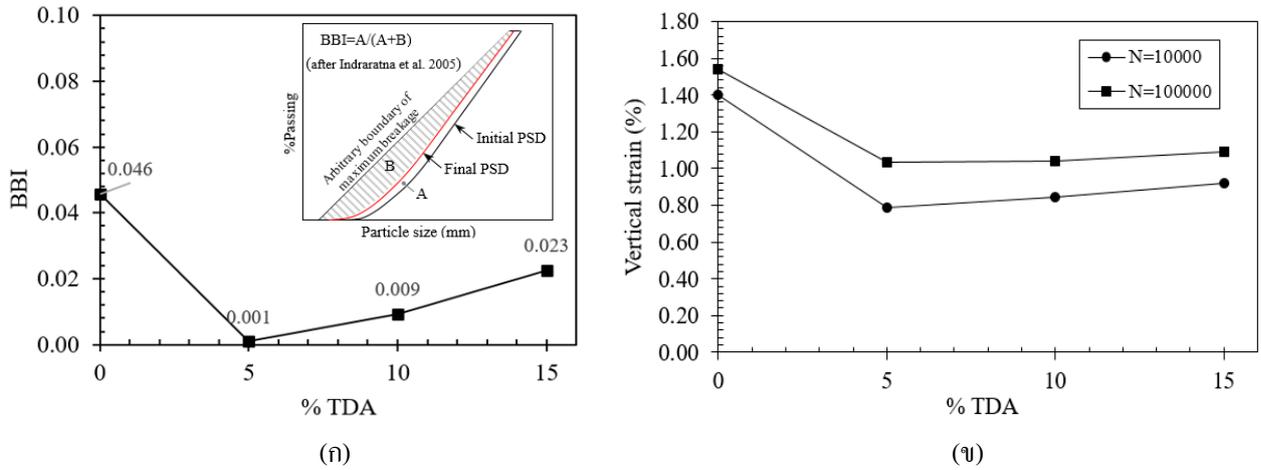
การแตกของหินโรยทางเป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพในทางรถไฟ นักวิจัยหลายคนได้กำหนดดัชนีการแตกของหินโรยทางเพื่อประมาณปริมาณการแตกหักของอนุภาคหินโรยทาง [5-11] โดยพิจารณาจากการกระจายขนาดอนุภาคของตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบ งานวิจัยนี้ประเมินการแตกของหินโรยทางจากค่าดัชนีการแตกของหินโรยทาง (Ballast breakage index, BBI) [16] โดยค่า BBI นั้นจะขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงของการกระจายขนาดคละ (Particle size distribution, PSD) ของหินโรยทางก่อนและหลังจากทดสอบ (ดูรูปที่ 7 (ก)) โดยค่า BBI สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$BBI = \frac{A}{A+B} \tag{3}$$

เมื่อตัวแปร A คือพื้นที่การเปลี่ยนแปลงในเส้นโค้งการกระจายขนาดคละ (PSD) หลังการทดสอบ และ B คือ พื้นที่ที่อาจเกิดการแตกหัก หากค่า BBI เท่ากับศูนย์ อธิบายได้ว่าไม่มีการแตกเกิดขึ้น ถ้า BBI มากกว่าศูนย์ อธิบายได้ว่ามีการแตกเกิดขึ้น ซึ่งการประเมินประสิทธิภาพของหินโรยทางในที่นี้จะเปรียบเทียบกับกรณีใช้หินโรยทางล้วน (B100-T0) ผลการคำนวณค่า BBI ของหินโรยทางแสดงไว้ในรูปที่ 6 พบว่า ส่วนผสม B100-T0 มีค่า BBI เท่ากับ 0.046 เมื่อผสม TDA ในปริมาณ 5%, 10%, 15% พบว่า ค่า BBI เท่ากับ 0.001, 0.009, และ 0.023 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่า BBI กรณีที่ผสม TDA มีค่าน้อยกว่ากรณีใช้หินโรยทางล้วนทั้งหมด เมื่อนำค่า BBI มาพล็อตความสัมพันธ์กับปริมาณ TDA ดังแสดงในรูปที่ 7(ก) พบว่า ค่า BBI มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ TDA ในปริมาณ 5% และเริ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ TDA มากกว่า 5% นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาจาก %Passing ขนาด 4.75 mm (ตารางที่ 5) เทียบกับส่วนผสม B100-T0 พบว่า ส่วนละเอียดมีค่า %Passing ลดลงประมาณ 78%, 86% และ 90% สำหรับส่วนผสม B95-T5, B90-T10 และ B85-T15 ตามลำดับ ซึ่งอธิบายได้ว่าการใช้ TDA ในปริมาณไม่เกิน 15% โดยปริมาตรหินโรยทางสามารถช่วยลดการแตกหักของหินโรยทางได้



รูปที่ 6 การกระจายตัวของหินโรยทางก่อนและหลังทดสอบ



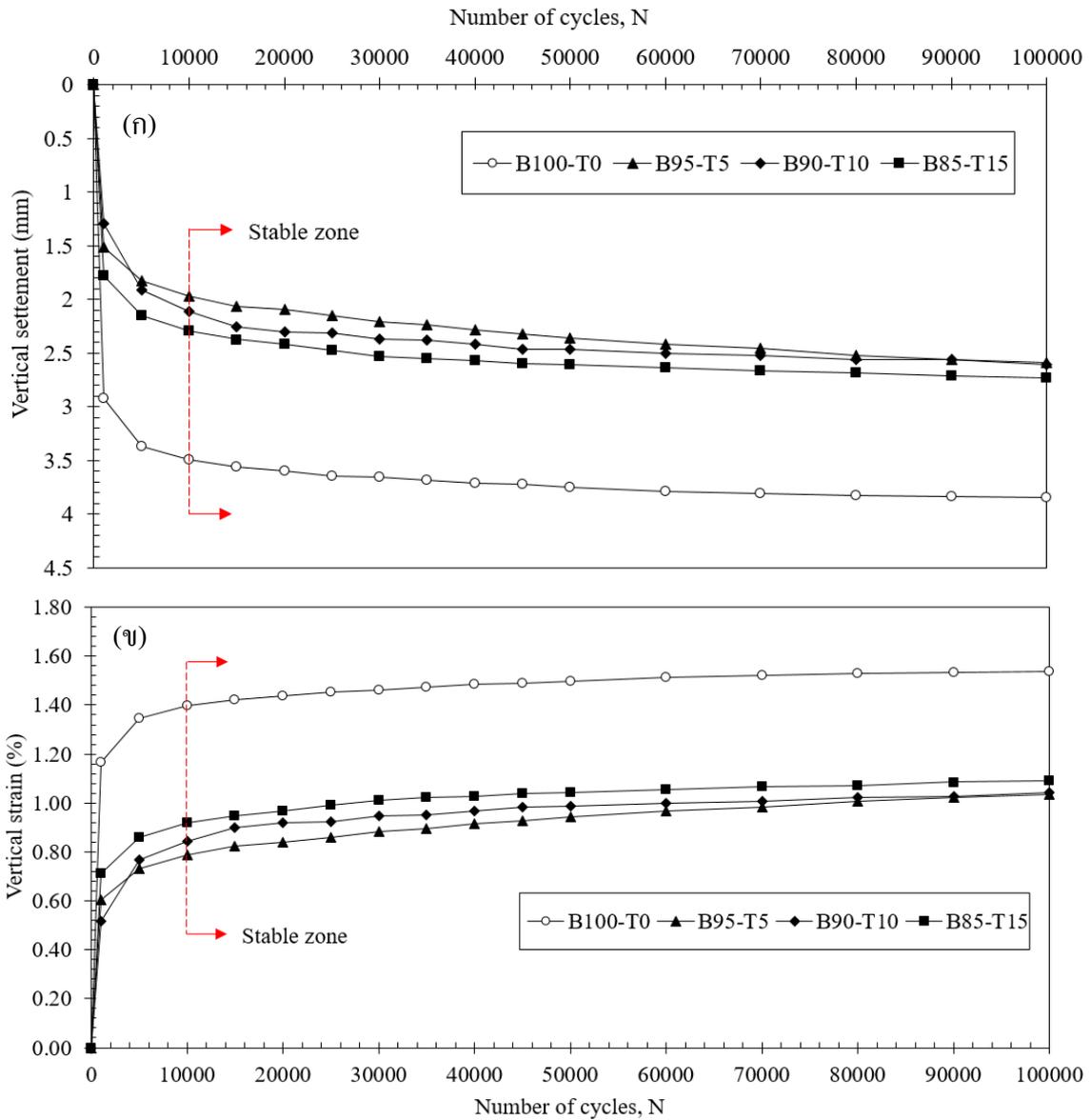
รูปที่ 7 (ก) ค่าดัชนีการแตกและ (ข) ความเครียดในแนวตั้งของหินโรยทางเปรียบเทียบปริมาณ TDA ในสัดส่วนที่ต่างกัน

ตารางที่ 5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอนุภาคของหินโรยทาง

Mixtures	%Passing		± Change (%)	
	31.5 mm	#4 (4.75 mm)	31.5 mm	#4 (4.75 mm)
Ballast-before test	29.0	0.00	-	-
B100-T0	32.1	0.73	-	-
B95-T5	28.0	0.16	-3.45	-78.08
B90-T10	29.8	0.10	+2.76	-86.30
B85-T15	30.4	0.07	+4.83	-90.41

### 3.2 การเสีรูปร่างของหินโรยทาง

การเสีรูปร่างประกอบด้วย การทรุดตัวในแนวตั้ง (Vertical settlement,  $\delta_v$ ) และค่าความเครียดแนวตั้ง (Vertical strain,  $\epsilon_v$ ) ของหินโรยทางที่เกิดขึ้นภายใต้น้ำหนักกระทำวัฏจักรแสดงไว้ในรูปที่ 8 โดยค่าความเครียดแนวตั้งสามารถคำนวณได้จากค่าการทรุดตัวในแนวตั้งหารด้วยความหนาของชั้นหินโรยทาง ( $\epsilon_v = \delta_v / 250$ ) [8] จากรูปที่ 8(ก) จะเห็นได้ว่าการเสีรูปร่างพลาสติกของหินโรยทางเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากถึงประมาณ 1,000 รอบ หลังจากนั้นอัตราการทรุดตัวจะค่อยๆ ลดลงเมื่อน้ำหนักกระทำถึงประมาณ 10,000 รอบ จากนั้นยังคงมีเสีรูปร่าง (Stable) โดยมีการทรุดตัวเกือบคงที่ การเสีรูปร่างแบบพลาสติกอย่างรวดเร็วนี้เกิดจากการที่หินโรยทางที่มีขนาดแตกต่างกันเคลื่อนตัวและถูกจัดเรียงใหม่ รวมถึงเกิดจากการเสียดสีและการขัดสีของหินโรยทางที่มีมุมแหลมคม [17] ในช่วงที่มีการเสีรูปร่างอย่างรวดเร็วนี้หินโรยทางจะถูกอัดแน่นมากขึ้นและจากนั้นความเป็นไปได้ในการจัดเรียงอนุภาคใหม่จะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งถึงสภาวะที่มีเสีรูปร่าง ถ้าพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความเครียดแนวตั้งที่เกิดขึ้นก็พบว่า มีรูปแบบเดียวกับค่าการทรุดตัว



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของค่าการทรุดตัว (ก) และความเครียดในแนวตั้ง (ข) กับจำนวนรอบที่น้ำหนักกระทำ

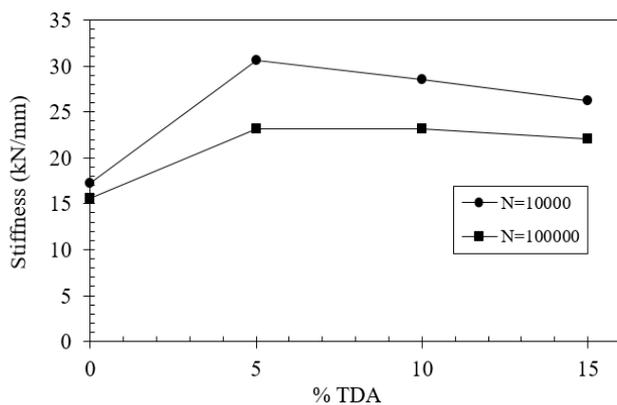
รูปที่ 8(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในแนวตั้งเปรียบเทียบปริมาณ TDA ที่สัดส่วนต่างกันกับจำนวนรอบน้ำหนักกระทำ (N) เท่ากับ 10,000 รอบ และ 100,000 รอบ พบว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความเครียดเป็นไปในรูปแบบเดียวกัน นั่นคือ ค่าความเครียดแนวตั้งกรณีผสม TDA มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีหินโรยทางล้วน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า TDA มีผลทำให้ค่าการเสีรูปร่างและความเครียดมีค่าลดลงประมาณ 33%, 32% และ 29% เมื่อใช้ TDA ในสัดส่วนโดยปริมาตรหินโรยทาง 5%, 10% และ 15% ตามลำดับ ค่าการเสีรูปร่างที่มีค่าลดลงในชั้นหินโรยทางนี้วิเคราะห์ได้ว่าเป็นผลจาก TDA มาช่วยลดการแตกหัก ดังนั้นกล่าวได้ว่าการใช้ TDA สามารถช่วยลดการเสีรูปร่างรวมถึงความเครียดที่เกิดขึ้นในชั้นหินโรยทางได้อย่างมีนัยสำคัญ

### 3.3 ค่าความแข็งแรงแรง

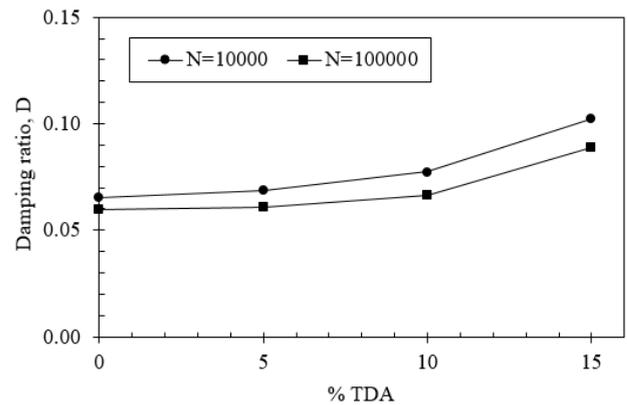
ค่าความแข็งแรงแรง (Stiffness) เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักกระทำต่อการเสียรูปของชิ้นหินโรยทาง เมื่อนำค่าความแข็งแรงแรงที่จำนวนรอบน้ำหนักกระทำเท่ากับ 10,000 รอบ และ 100,000 รอบ มาแสดงความสัมพันธ์กับปริมาณ TDA ดังแสดงในรูปที่ 9(ก) พบว่า ค่าความแข็งแรงแรงของชิ้นหินโรยทางกรณีผสม TDA มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีหินโรยทางล้วน โดยพบว่า การใช้ TDA ในปริมาณ 5% ส่งผลให้เกิดค่าความแข็งแรงแรงสูงสุด และมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสม TDA มากกว่า 5% วิเคราะห์ได้ว่า TDA ถึงแม้จะเป็นวัสดุยืดหยุ่น แต่เมื่อใช้ในปริมาณที่เหมาะสม ก็สามารถทำให้ชิ้นหินโรยทางมีค่าความแข็งแรงแรงเพิ่มขึ้นได้

### 3.4 อัตราการหน่วง

หินโรยทางจัดเป็นวัสดุยืดหยุ่นหนืด (Viscoelastic) ชนิดหนึ่ง que แสดงพฤติกรรมฮิสเทรีซิส (Hysteresis) ภายใต้การรับน้ำหนักวัฏจักร ส่งผลให้เกิดการกระจายพลังงานความเครียดเชิงกล โดยพลังงานความเครียดที่สะสมและกระจายไปนี้จะสัมพันธ์กับการหน่วงเชิงกล (Mechanical damping) ของวัสดุยืดหยุ่นหนืด [8] ค่าอัตราการหน่วง (Damping ratio, D) และค่าการดูดซับพลังงาน ( $E_d$ ) ใช้เป็นค่าอธิบายการเพิ่ม-ลดของพลังงานที่เกิดจากแรงกระทำซ้ำที่เกิดขึ้นกรณีใช้ TDA เปรียบเทียบกับกรณีที่มีเฉพาะหินโรยทางล้วน รูปที่ 5(ข) แสดงการหาค่าอัตราการหน่วงและค่าการดูดซับพลังงาน ผลการศึกษาพบว่า ในช่วงเริ่มต้นค่าอัตราการหน่วงจะสูงและลดลงเมื่อจำนวนรอบของน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้น เนื่องจากการกระจายพลังงานสูงจากการเคลื่อนตัวและการแตกหักของหินโรยทาง จากนั้นจะค่อย ๆ คงที่เมื่อมวลหินโรยทางมีความหนาแน่นขึ้นและพบว่า ชิ้นหินโรยทางมีเสถียรภาพมากขึ้นหลังจากผ่านไปประมาณ 10,000 รอบ เมื่อนำค่าอัตราการหน่วงที่จำนวนรอบน้ำหนักกระทำเท่ากับ 10,000 รอบ และ 100,000 รอบ มาแสดงความสัมพันธ์กับปริมาณ TDA ดังแสดงในรูปที่ 9(ข) อธิบายได้ว่า ค่าอัตราการหน่วงกรณีผสม TDA มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีหินโรยทางล้วน การเพิ่มนี้คิดเป็นประมาณ 2%, 12% และ 49% เมื่อใช้ TDA ในสัดส่วนโดยปริมาตรหินโรยทาง 5%, 10% และ 15% ตามลำดับ วิเคราะห์ได้ว่าค่าอัตราการหน่วงที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดจากการผสม TDA ซึ่งเป็นวัสดุยืดหยุ่น



(ก)



(ข)

รูปที่ 9 (ก) ค่าความแข็งแรงแรงและ (ข) อัตราการหน่วงของหินโรยทางเปรียบเทียบปริมาณ TDA ในสัดส่วนที่ต่างกัน

#### 4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

บทความนี้ศึกษาประสิทธิภาพของหินโรยทางรถไฟที่ปรับปรุงด้วยมวลรวมจากยางรถยนต์ภายใต้แรงกระทำวัฏจักร ผลการศึกษาสามารถสรุปในประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1. รูปแบบการเสื่อมสภาพของหินโรยทางอธิบายได้จากค่าดัชนีการแตกของหินโรยทาง (BBI) พบว่า กรณีที่ผสมยางรถยนต์ ย่อยรีไซเคิล (TDA) มีค่า BBI น้อยกว่ากรณีใช้หินโรยทางล้วนทั้งหมด โดยค่า BBI มีแนวโน้มลดลง (การแตกลดลง) เมื่อใช้ TDA ในปริมาณ 5% และเริ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ TDA มากกว่า 5% ซึ่งอธิบายได้ว่าการใช้ TDA เป็นชั้นหินโรยทางในปริมาณไม่เกิน 15% โดยปริมาตร สามารถช่วยลดการแตกหักและลดการเสื่อมสภาพของหินโรยทางได้

2. พฤติกรรมด้านกำลังของหินโรยทางภายใต้การรับน้ำหนักวัฏจักรอธิบายได้จากค่าการทรุดตัวในแนวตั้ง ค่าความเครียด แนวตั้ง ค่าความแข็งแรง และค่าอัตราการหน่วง พบว่า เมื่อหินโรยทางรับน้ำหนักจะเกิดการเสียดรูปพลาสติกขึ้นอย่างรวดเร็วมากถึง ประมาณ 1,000 รอบ หลังจากนั้นอัตราการทรุดตัวจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อน้ำหนักกระทำถึงประมาณ 10,000 รอบ จากนั้นยังคงมีเสถียรภาพ โดยมีการทรุดตัวเกือบคงที่ การเสียดรูปแบบพลาสติกอย่างรวดเร็วนี้เกิดจากการที่หินโรยทางที่มีขนาดแตกต่างกันเคลื่อนตัวและถูกจัดเรียงใหม่ ส่วนค่าความแข็งแรงของชั้นหินโรยทางกรณีที่ผสม TDA มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีหินโรยทางล้วน โดยพบว่า การใช้ TDA ในปริมาณ 5% ส่งผลให้เกิดค่าความแข็งแรงสูงสุด และมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสม TDA มากกว่า 5% ในขณะที่การใช้ TDA ส่งผลให้ค่าอัตราการหน่วงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีหินโรยทางล้วน การเพิ่มนี้คิดเป็นประมาณ 2%, 12% และ 49% เมื่อใช้ TDA ในสัดส่วนโดยปริมาตรหินโรยทาง 5%, 10% และ 15% ตามลำดับ

3. การออกแบบขนาดคละที่เหมาะสมของหินโรยทางผสม TDA ที่ช่วยลดการสึกกร่อนและยืดอายุการใช้งานของหินโรยทาง สามารถทำได้โดยการพิจารณาจากรูปแบบการเสื่อมสภาพและพฤติกรรมด้านกำลังของหินโรยทางภายใต้การรับน้ำหนักวัฏจักรซึ่งพบว่า การใช้ TDA ในปริมาณไม่เกิน 15% (โดยปริมาตร) มีผลทำให้ประสิทธิภาพของชั้นหินโรยทางดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม การศึกษาการเสื่อมสภาพของหินโรยทางที่ได้จากการวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดหลายประการ ดังนั้น ควรศึกษาในประเด็นต่าง ๆ เพิ่มเติม เช่น พิจารณาแรงกระทำด้านข้าง น้ำหนักกระทำที่มากขึ้น ระดับความถี่ที่เพิ่มขึ้น รวมถึงทดสอบภายใต้สภาวะที่หินโรยทางมีความชื้นเข้ามาเกี่ยวข้อง เป็นต้น

#### ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยประจำปีงบประมาณ 2566 ผู้เขียนขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัยทุกท่านสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ รวมถึงสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่อำนวยความสะดวกให้การดำเนินงานเป็นไปอย่างเรียบร้อย

เอกสารอ้างอิง

- [1] มาตรฐานการขนส่งทางราง. มขร. C-007-2566. *มาตรฐานการออกแบบทางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง*. กรุงเทพฯ: กรมการขนส่งทางราง, 2566.
- [2] Indraratna, B. Salim, W. and Rujikiatkamjorn, C. *Advanced rail geotechnolgy ballasted track*, London: CRC Press, 2011.
- [3] ชวัช จีวบุญชู และ พิษณุ พลกายนุวัตร. กรณีศึกษาปรับปรุงโครงสร้างทางรถไฟส่วนล่างด้วยวัสดุเสริมกำลังทางปฐพี. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 26*. วันที่ 23-25 มิถุนายน 2564, หน้า INF-12-1 ถึง INF-12-8.
- [4] Indraratna, B. Qi, Y. Malisetty, R. S. Navaratnarajah, S. K. Mehmood, F. and Tawk, M. Recycled materials in railroad substructure: an energy perspective. *Railway Engineering Science*, 2022, 30, 304–322. <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00267-6>.
- [5] Sol-Sánchez, M. Thom, N.H. Moreno-Navarro, F. Rubio-Gámez, M.C. and Airey, G.D. A study into the use of crumb rubber in railway ballast. *Construction and Building Materials*, 2015, 75, pp.19–24. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.045>.
- [6] Hussaini, S. K. K. Indraratna, B. amd Vinod, J. S. A laboratory investigation to assess the functioning of railway ballast with and without geogrids. *Transportation Geotechnics*, 2016, 6, pp. 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.02.001>.
- [7] Esmaili, M. Aela, P. and Hosseini, A. Experimental assessment of cyclic behavior of sand-fouled ballast mixed with tire derived aggregates. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 98, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.03.033>.
- [8] Navaratnarajah, S. K. and Indraratna, B. Use of rubber mats to improve the deformation and degradation behavior of rail ballast under cyclic loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001669](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001669).
- [9] Indraratna, B. Sun, Q. Heitor, A. and Grant, J. Performance of rubber tire-confined capping layer under cyclic loading for railroad conditions. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002199](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002199).
- [10] Indraratna, B. Qi, Y. Ngo, T.N. Rujikiatkamjorn, C. Neville, T. Ferreira, F.B. and Shahkolahi, A. (2019). Use of geogrids and recycled rubber in railroad infrastructure for enhanced performance. *Geosciences*, 9(30). doi: 10.3390/geosciences9010030.
- [11] Song, W. Huang, B. Shu, X. Wu, H. Gong, H. Han, B. and Zou, J. Improving damping properties of railway ballast by addition of tire-derived aggregate. *Transportation Research Record*, 2019, 2673(5), DOI: 10.1177/0361198119839345.
- [12] Esmaili, M. and Askari, A. Laboratory investigation of the cyclic behavior of rock ballast mixed with slag ballast for use in railway tracks. *Construction and Building Materials*, 2023, 365, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130136>.
- [13] สำนักงานโยธาและแผนการขนส่งและจราจร. *คู่มือการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างทางรถไฟ*. กรุงเทพฯ, 2561.
- [14] American Railway Engineering and Maintenance of Way Association. AREMA: 2012. *Manual for railway engineering*. Lanham, MD, 2012.
- [15] Lackenby, J. Indraratna, B. McDowell, G. and Christie, D. Effect of confining pressure on ballast degradation and deformation under cyclic triaxial loading. *Geotechnique*, 2007, 57(6), 527–536. <https://doi.org/10.1680/geot.2007.57.6.527>.
- [16] Indraratna, B. Lackenby, J. and Christie, D. Effect of confining pressure on the degradation of ballast under cyclic loading. *Géotechnique*, 2005, 55(4), pp. 325–328. <https://doi.org/10.1680/geot.2005.55.4.325>.
- [17] Indraratna, B. and Nimbalkar, S. Stress-strain degradation response of railway ballast stabilized with geosynthetics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(5), pp. 684–700. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000758](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000758).