



การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะทางพลวัตของตัวหน่วงรางที่พัฒนาจาก ส่วนผสมยางธรรมชาติและตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทน

ทรงศักดิ์ สุราษฎร์ประดิษฐ์¹ ธนภฤต คำณิ¹ รัฐภูมิ ปริชาตปรีชา¹ และ เขมพัฒน์ ตันติวัฒนกุล²

¹ ศูนย์วิจัยระบบรางและโครงสร้างพื้นฐาน, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์,

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ, คณะวิศวกรรมศาสตร์,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: rattapoohm.pa@kmitl.ac.th

วันที่รับบทความ: 7 สิงหาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 2 เมษายน 2569; วันที่ตอบรับบทความ: 5 มิถุนายน 2569

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ: การสั่นสะเทือนจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อและรางเป็นแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนขณะรถไฟวิ่ง การลดเสียงที่แหล่งกำเนิดด้วยการติดตั้งตัวหน่วงรางจึงกลายเป็นวิธีแก้ปัญหาที่ได้รับความนิยมและมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยทั่วไปตัวหน่วงรางมักผลิตจากวัสดุโพลียูรีเทน (PU) อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติ (NR) ถูกมองว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจทดแทนโพลียูรีเทนได้ เนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า แต่กระนั้นยังมีการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะทางพลวัตของวัสดุทั้งสองชนิดในงานประยุกต์การหน่วงรางอยู่น้อยมาก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบอัตราการลดทอนการสั่นสะเทือนในรางของตัวหน่วงรางที่พัฒนาจากส่วนผสมยางธรรมชาติผสมในสัดส่วนเชิงมวลที่แตกต่างกันได้แก่ 0%, 30%, 50% และ 70% เปรียบเทียบตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทนที่มีจำหน่ายในท้องตลาด โดยอาศัยการตอบสนองทางพลวัตผ่านการวิเคราะห์โมดัล เพื่อประเมินคุณลักษณะการสั่นสะเทือน และการทดสอบวัดอัตราการลดทอนการสั่นสะเทือนในราง ตามมาตรฐาน BS EN 15461 และ BS EN ISO 3095 ผลการทดสอบพบว่า ตัวหน่วงรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติที่สัดส่วน 50% เชิงมวล ให้สมรรถนะการหน่วงที่ดีที่สุด โดยสามารถปรับจูนและทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงความถี่ 400–1,000 Hz และ 1,600–3,000 Hz นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มให้ผลการลดทอนที่มีเสถียรภาพและสูงกว่าชนิดโพลียูรีเทนอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในย่านความถี่สูงตั้งแต่ 2,000 ถึง 3,000 Hz การศึกษานี้เน้นย้ำถึงศักยภาพของยางธรรมชาติในฐานะทางเลือกที่ยั่งยืนและมีประสิทธิภาพสำหรับการประยุกต์ใช้ในการหน่วงรางรถไฟ

คำสำคัญ: ตัวหน่วงราง; การสั่นสะเทือนของราง; ยางธรรมชาติ; ยางสังเคราะห์; อัตราการลดทอนการสั่นสะเทือนในราง

Comparative Study on the Dynamic Performance of Natural Rubber-Based and Polyurethane Rail Dampers

Songsak Suthasupradit ¹, Thanakrit Kummanee ¹, Rattapoohm Parichatprecha ^{1*} and Khemapat Tontiwattanakul ²

¹ Rail and Infrastructure Research Center, Department of Civil Engineering, Rail and Infrastructure Research Center, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

² Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding Author, Email: rattapoohm.pa@kmitl.ac.th

Received: 7 August 2025; Revised: 2 April 2026; Accepted: 5 June 2026

Online Published: 19 August 2026

Abstract: Wheel-rail interaction is the primary source of railway rolling noise, which is commonly mitigated at the source by installing Tuned Rail Dampers (TRDs). While polyurethane (PU) is the conventional material used, natural rubber (NR) offers a more sustainable and eco-friendlier alternative; however, comparative studies on their dynamic performance remain limited. This study evaluates and compares the track vibration attenuation of NR-based dampers developed with NR mass proportions of 0%, 30%, 50%, and 70% against that of commercial PU dampers. Dynamic responses and vibration characteristics were assessed through modal analysis and Track Decay Rate (TDR) measurements in accordance with the BS EN 15461 and BS EN ISO 3095 standards. The results indicate that the 50% NR formulation achieved optimal damping performance, effectively tuning and reducing vibrations within critical frequency bands (400–1,000 Hz and 1,600–3,000 Hz). Notably, the 50% NR damper provided higher and more stable vibration attenuation than the commercial PU damper, particularly in the high-frequency range of 2,000–3,000 Hz. These findings confirm the potential of natural rubber as a viable, sustainable, and highly effective alternative for modern railway noise control.

Keywords: Rail damper; vibration; Natural rubber; Isobutylene-isoprene rubber; Track decay rate



1. บทนำ

ระบบขนส่งทางรถไฟเป็นรูปแบบการขนส่งที่สำคัญ เพราะสะดวกสบาย ประหยัดพลังงาน และปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าการขนส่งรูปแบบอื่น [1] แต่รถไฟทั่วไปที่วิ่งด้วยความเร็วปกติจะมีการสั่นสะเทือนและเสียงดังรบกวน [2] จากการศึกษาทั้งในเชิงทฤษฎีและการวัดจริง พบว่าสาเหตุหลักของเสียงรบกวนมาจาก การสั่นสะเทือนของรางบริเวณที่ล้อสัมผัสกับราง [3-5] ซึ่งเกิดจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ การสั่นสะเทือนจากพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของระบบช่วงล่างรถไฟและระบบโครงสร้างทาง [6,7] และการสั่นสะเทือนจากความไม่ราบเรียบของล้อหรือราง ซึ่งเสียงประเภทนี้จะเกิดขึ้นในช่วงย่านความถี่ตั้งแต่ 100–5,000 Hz เพื่อให้การลดเสียงมีประสิทธิภาพวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการลดการสั่นสะเทือนคือการมุ่งเน้นตรงที่แหล่งกำเนิดของการสั่นสะเทือน ดังนั้นจึงมีเลือกการใช้ตัวหน่วงราง (Tuned Rail Damper) ในการลดการสั่นสะเทือน โดยหลักการคือตัวหน่วงรางจะทำงานโดยใช้การสั่นสะเทือนทางกล การสั่นสะเทือนของรางจะถ่ายเข้าสู่ตัวหน่วงราง เกิดการสั่นพ้องที่ย่านความถี่ที่ต้องการ [8] ซึ่งหลักการดังกล่าวเรียกว่า Tuned Mass Damper, TMD [9] สำหรับการติดตั้งตัวหน่วงรางเข้ากับรางรถไฟนั้น วิธีที่นิยมจะเป็นการใช้วัสดุประสาน เพื่อยึดติดกับบริเวณผิวสัมผัสของตัวหน่วงรางและเอวรางเข้าด้วยกันรวมทั้งเพิ่มแรงกดในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสด้วยการติดตั้งคลิปสปริง จากการทดสอบภาคสนามในการติดตั้งตัวหน่วงรางพบว่าเสียงรบกวนจากรถไฟลดลง 1.5 dBA [10] หรือระดับเสียงในพื้นที่อยู่อาศัยและในห้องโดยสารรถไฟ ลดลง 5.7 dBA และ 3.4 dBA ตามลำดับ [11]

แม้วิธีการประเมินประสิทธิภาพตัวหน่วงรางในอดีตจะให้ผลลัพธ์ที่เป็นรูปธรรม แต่การพึ่งพาการทดสอบในภาคสนาม (Field Measurements) เพียงอย่างเดียวก่อให้เกิดข้อจำกัดทั้งในแง่การควบคุมตัวแปรสภาพแวดล้อม การรบกวนระบบการเดินรถ และงบประมาณในการดำเนินงานที่สูงมาก ยิ่งไปกว่านั้น การดำเนินงานเพื่อคัดเลือกวัสดุทางเลือกใหม่อย่างยวธรรมชาติ ยังคงขาดขั้นตอนการทดสอบเชิงเปรียบเทียบอย่างเป็นระบบเพื่อระบุสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดก่อนการนำไปใช้งานจริง การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งปิดช่องว่างทางวิชาการดังกล่าว โดยให้ความสำคัญกับการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการเป็นหลัก ทั้งนี้ การปรับเปลี่ยนแนวทางมาประเมินผลในห้องปฏิบัติการเพื่อลดภาระค่าใช้จ่ายและทดแทนการขาดแคลนเกณฑ์มาตรฐานของการวัดผลหน่วยงานจริงนั้น มีความสอดคล้องอย่างยิ่งกับแนวทางของโครงการความร่วมมือระหว่างประเทศอย่าง STARDAMP ที่ริเริ่มขึ้นเพื่อพัฒนาวิธีประเมินมาตรฐานโดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งใช้งานบนรางจริงทั้งหมด [12]

ในการออกแบบตัวหน่วงราง ได้มีการเลือกใช้ส่วนผสมจากยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ประเภท Isobutylene Isoprene แทนที่วัสดุเดิมจากยางสังเคราะห์โพลียูรีเทน โดยยางธรรมชาติจะให้คุณสมบัติเด่นหลายประการเช่น มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง มีความเหนียว และยึดติดกับวัสดุอื่นได้ดี รวมถึงจะมีค่า Damping Factor ที่สูงกว่าโพลียูรีเทน ในส่วนยางไอโซพรีน-ไอโซพรีนหรือบิวไทล์ มีคุณสมบัติทนต่อการขัดถูได้ดี และให้ค่าการกระด้างกระดอน (Rebound Resilience) ต่ำที่อุณหภูมิห้องจึงทำให้ยางประเภทนี้สามารถดูดซับพลังงานกลได้ดีและการสั่นสะเทือนได้ดี

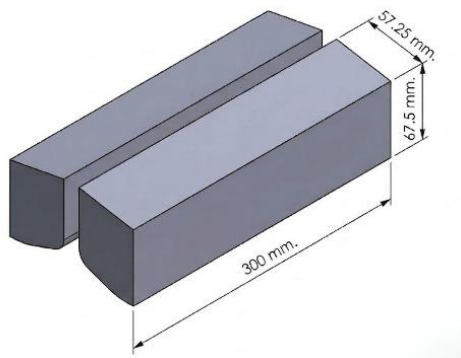


งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการสลายพลังงานของตัวหน่วงรางที่มีสัดส่วนปริมาณยางธรรมชาติสูตรส่วนผสมแตกต่างกันทั้งหมด 4 สูตร เปรียบเทียบตัวหน่วงรางที่ทำจากโพลียูรีเทน และเปรียบเทียบกรณีไม่มีการติดตั้งตัวหน่วงราง โดยอาศัยกระบวนการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ติดตั้งบนรางรถไฟรางชนิด 60E1 ความยาว 6 เมตร โดยใช้วิธีการวิเคราะห์โมดัล ตามมาตรฐาน BS EN 15461 [13] เพื่อหาฟังก์ชันตอบสนองความถี่ (Frequency Response Function) วิเคราะห์หาค่าอัตราการลดทอนการสั่นสะเทือนในราง (Track Decay Rate) ตามมาตรฐาน EN ISO 3095 [14] รวมถึงเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างทางรถไฟที่ติดตั้งตัวหน่วงรางชนิดต่างๆในงานวิจัยนี้ต่อไป

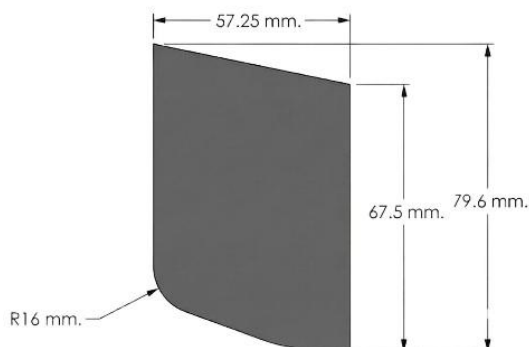
2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ตัวหน่วงราง

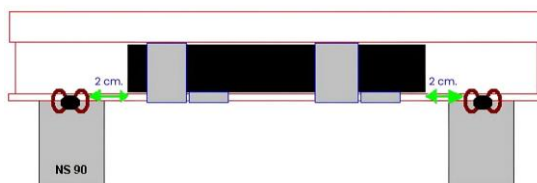
ตัวหน่วงรางได้ทำการขึ้นรูปตามรูปแบบหล่อที่ออกแบบไว้ ซึ่งประกอบด้วยแท่งเหล็กที่ถูกหุ้มด้วยโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น (Elastomeric polymer) และออกแบบให้รองรับกับรางชนิด 60E1 ดังรูปที่ 1 และ 2 ตัวหน่วงรางมีขนาดความกว้าง 57.25 มิลลิเมตร ความยาว 300 มิลลิเมตร และความสูง 67.5 มิลลิเมตร โดยจะติดตั้งตัวหน่วงราง 2 ชิ้นไว้ทั้งสองด้านของรางในตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างหมอนรองรางแต่ละตัว พร้อมติดตั้งคลิปล็อคยึดตัวหน่วงรางกับราง [15] ดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 แบบตัวอย่างของตัวหน่วงราง



รูปที่ 2 หน้าตัดของตัวหน่วงราง



รูปที่ 3 ระยะเวลายึดติดตัวหน่วงรางระหว่างหมอนรองราง



2.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปตัวหน่วงราง

กระบวนการผลิตตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทนและชนิดยางธรรมชาติร่วมกับยางบิวไทล์ มีขั้นตอนการผลิตที่แตกต่างกัน โดยการผลิตตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทน จะใช้โพลียูรีเทนในรูปแบบของเหลวฉีดเข้าไปในพิมพ์หล่อที่ได้ออกแบบตามชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4 ในขณะที่กระบวนการผลิตตัวหน่วงรางชนิดยางธรรมชาติร่วมกับยางบิวไทล์จะใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ (Compression Molding) เพื่อให้ยางคงรูปเป็นก้อนตัวหน่วงรางตามที่ออกแบบไว้ดังแสดงในรูปที่ 5

จากผลการขึ้นรูปจะได้ตัวหน่วงรางต้นแบบเพื่อทำการติดตั้งกับรางและทำการทดสอบพบว่าตัวหน่วงรางจะมีค่าน้ำหนักโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 6.8 ถึง 7.1 กิโลกรัม ดังตารางที่ 1

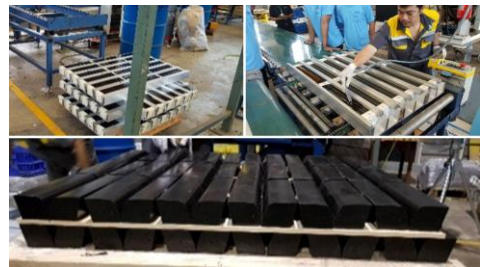
2.3 วัสดุตัวหน่วงราง

2.3.1 ตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทน

วัสดุตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการติดตั้งใช้งานมาแล้วในต่างประเทศ สามารถลดเสียงและการสั่นสะเทือนจากแหล่งกำเนิดได้ 3–7 dB โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทน Silent Track™ [16] ในการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมกับตัวหน่วงรางชนิดที่มีส่วนผสมจากยางธรรมชาติ รูปตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทนที่มีการติดตั้งใช้งานจริงแสดงดังรูปที่ 6

ตารางที่ 1 น้ำหนักโดยเฉลี่ยของตัวหน่วงราง

ชนิด	น้ำหนักโดยเฉลี่ย (กิโลกรัม)
Polyurethane (PU)	7.11
NR 0%	6.87
NR 30%	6.90
NR 50%	6.87
NR 70%	6.88



รูปที่ 4 การขึ้นรูปตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทน



รูปที่ 5 เครื่องอัดแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปตัวหน่วงรางชนิดยางธรรมชาติร่วมกับบิวไทล์



รูปที่ 6 การติดตั้งตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทน



2.3.2 ตัวหน่วงรางชนิดยางธรรมชาติร่วมกับยางบิวไทล์

วัสดุจากยางธรรมชาติเป็นโพลีเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง มีความเหนียว ความต้านทานต่อการขีดสีสูง และสามารถยึดติดกับวัสดุอื่นได้ดีจึงสามารถนำไปใช้งานทางวิศวกรรมได้หลากหลายมาก รวมถึงมีส่วนผสมยางบิวไทล์ ที่เป็นยางสังเคราะห์ให้คุณสมบัติเด่น คือ อัตราการซึมผ่านของก๊าซต่ำมาก นอกจากนี้ยังเป็นฉนวนไฟฟ้ารวมถึงการทนต่อการขูดถูได้ดี และยางบิวไทล์ มีค่าการกระด้างกระดอน (Rebound Resilience) ต่ำที่อุณหภูมิห้อง จึงทำให้สามารถดูดซับพลังงานกลและการสั่นสะเทือนได้ดี โดยได้ดำเนินการการออกแบบส่วนผสมตัวหน่วงรางที่มีปริมาณยางธรรมชาติและยางบิวไทล์ที่มีสัดส่วนตามน้ำหนักที่แตกต่างกันทั้งหมด 4 สูตร ตามตารางที่ 2 ได้แก่ NR 0%, NR 30%, NR 50% และ NR 70% ในรูปที่ 7

2.4 ขั้นตอนการทดสอบ

2.4.1 การทดสอบและวิเคราะห์โมดัล

การวิเคราะห์โมดัลเป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมพลวัตของโครงสร้างที่ทำการทดสอบ โดยการทดสอบดังกล่าวสามารถดำเนินการได้ทั้งในสถานะที่มีการกระตุ้นจากแหล่งกำเนิดแรงสั่นสะเทือนภายนอก หรือในขณะที่วัตถุอยู่ในสภาวะการทำงานจริง การทดสอบและวิเคราะห์โมดัล จะมีพารามิเตอร์พื้นฐานคือ ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequencies) ทำการหาความถี่ที่ตัวหน่วงรางแต่ละชนิดที่เกิดการสั่น รูปแบบการสั่นพ้อง (Mode Shapes) เพื่อดูรูปแบบ

ตารางที่ 2 ส่วนผสมตัวหน่วงรางที่มีปริมาณยางธรรมชาติและยางบิวไทล์สัดส่วนตามน้ำหนัก

รูปแบบ	ส่วนผสม	สัดส่วน ยางธรรมชาติ (%)	สัดส่วน ยางบิวไทล์ (%)
1	NR 0%	0	100
2	NR 30%	30	70
3	NR 50%	50	50
4	NR 70%	70	30



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 7 ตัวหน่วงรางชนิดยางธรรมชาติร่วมกับยางบิวไทล์: (ก) ตัวหน่วงรางสูตร NR 0%; (ข) ตัวหน่วงรางสูตร NR 30%; (ค) ตัวหน่วงรางสูตร NR 50% และ (ง) ตัวหน่วงรางสูตร NR 70%

การสั่นของตัวหน่วงรางว่าเป็นอย่างไรในแต่ละความถี่ธรรมชาติ และค่าการหน่วง (Damping Ratio) เป็นค่าที่แสดงระดับการลดลงของแรงสั่นสะเทือน ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการประเมินประสิทธิภาพและเพิ่มประสิทธิภาพของตัวหน่วงรางให้เหมาะสมและมีคุณสมบัติทางพลวัตตามที่ออกแบบไว้จริง ก่อน



นำไปติดตั้งบนรางจริง โดยในงานวิจัยได้ทำการวิเคราะห์โมดัลแบบเชิงทดลอง (Experimental Modal Analysis - EMA) การติดตั้งเครื่องมือการทดสอบได้ใช้งานวิจัยของ I. Haladin, S และคณะ [17] เป็นแนวทาง ในรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 10 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้การสั่นสะเทือนจะถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์วัดความเร่ง สัญญาณความเร่งและแรงกระตุ้นจะถูกแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณเพื่อหาฟังก์ชันตอบสนองต่อความถี่ (Frequency Response Function) [18] และนำไปคำนวณค่าการลดทอนการสั่นสะเทือน (TDR) ของรางต่อไป



รูปที่ 8 การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร่งในทิศทางตามแนวตั้งและแนวด้านข้างในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 9 การกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนด้วยค้อนกระตุ้นตามแนวตั้งในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 10 การกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนด้วยค้อนกระตุ้นตามแนวด้านข้าง

2.4.2 การทดสอบค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในราง

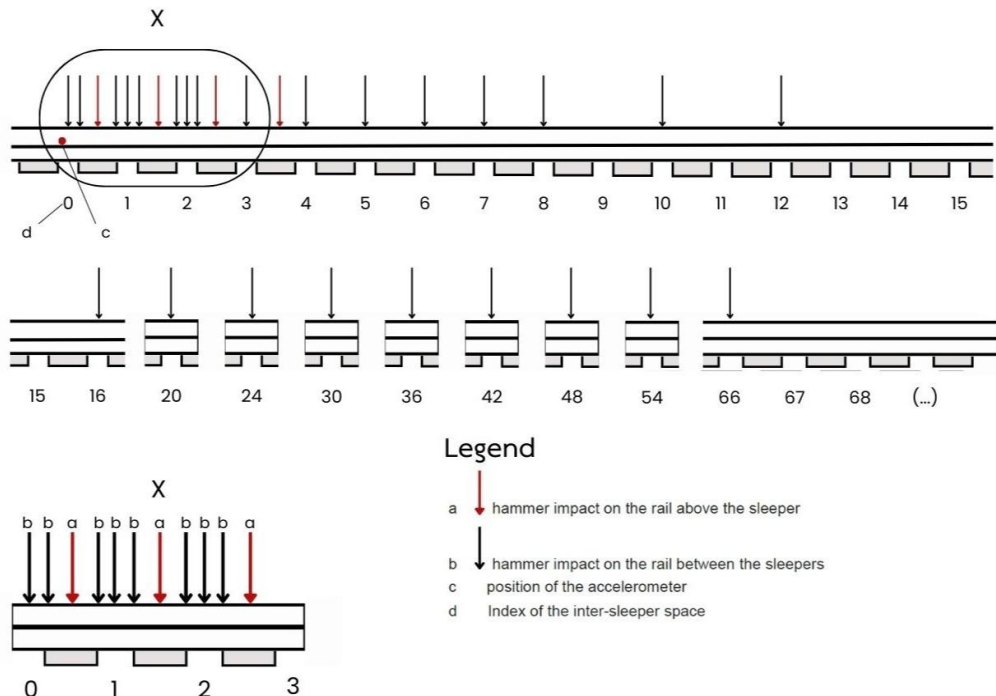
การทดสอบค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในราง (Track Decay Rate) เป็นการทดสอบอัตราการสลายพลังงานของทางวิ่งที่ติดตั้งตัวหน่วงราง ทั้งนี้การทดสอบในงานวิจัยนี้เป็นไปตามมาตรฐาน BS EN 15461 [13] ซึ่งมีการใส่แรงกระแทกเข้าไปสู่ผิวรางดังแสดงในรูปที่ 11 จากนั้นจึงทำการตรวจสอบค่าความเร่งที่แผ่ออกไปตามความยาวของราง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ห่างออกไปจากจุดที่ทำการกระแทก โดยผลลัพธ์สามารถแสดงผลได้ในรูปแบบของค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในราง (Track Decay Rate) การลดทอนการสั่นสะเทือนในรางเป็นการบ่งบอกถึงความสามารถของการสลายพลังงานเมื่อคลื่นการสั่นสะเทือนเคลื่อนที่ไปตามแนวยาวของราง โดยจะแสดงในรูปแบบของสเปกตรัมแบนด์หนึ่งในสามออกเตฟของค่าการลดทอน (1/3 Octave) การคำนวณค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนของรางในแต่ละย่านความถี่ คำนวณได้จาก สมการที่ (1)

$$DR = \frac{4.343}{\sum_{x_0}^{x_{max}} \frac{|A(x_n)|^2}{|A(x_0)|^2} \Delta x_n} \quad (1)$$

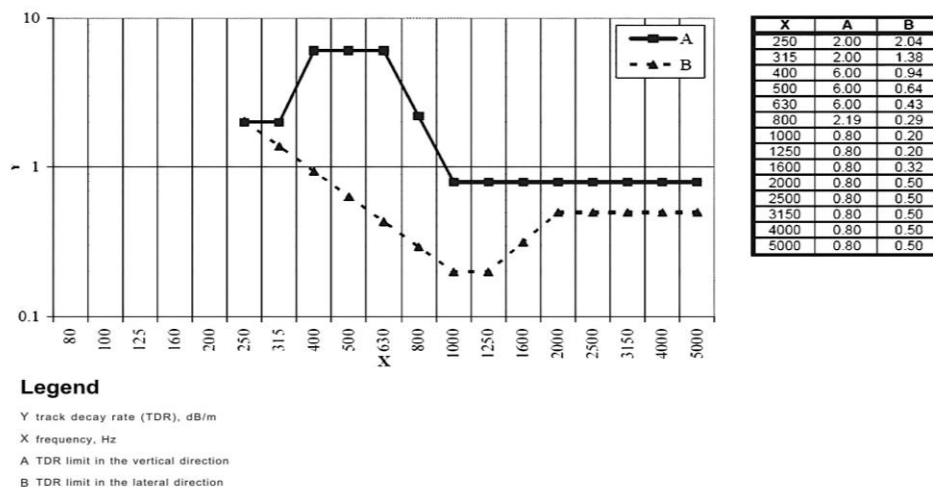
เมื่อ DR คือค่า Track Decay Rate ที่ย่านความถี่สเปกตรัมแบนด์หนึ่งในสามออกเตฟ (1/3 Octave) (เดซิเบลต่อเมตร) x_n คือตำแหน่งบนรางที่ทำการตรวจวัดค่าฟังก์ชันตอบสนองต่อความถี่ (เมตร) และ $A(x_0)$, $A(x_n)$ คือค่าฟังก์ชันการตอบสนองต่อความถี่แบบแอกเซอเรชันซ์ (Accelerance) ในรูปแบบออกเตฟหนึ่งในสาม โดยค่าคงที่ 4.343 คือตัวคูณสำหรับแปลงการลดทอนพลังงานแบบเอกซ์โพเนนเชียลให้อยู่ในหน่วยเดซิเบลต่อเมตร ที่ได้กำหนดไว้ใน

มาตรฐาน BS EN 15461 [13] ในขณะที่การวิเคราะห์ข้อมูลถูกจัดกลุ่มในย่านความถี่ 1/3 Octave Band เนื่องจากเป็นย่านความถี่ที่สอดคล้องกับการรับรู้ของมนุษย์และเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 3095 [14]

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของทางรถไฟในงานวิจัยนี้ จะถูกประเมินจากค่าอัตราการลดทอนการสั่นสะเทือน Track Decay Rate (DR) โดยจะนำมาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐาน ISO 3095 [14] โดยมาตรฐานดังกล่าวจะกำหนดคุณสมบัติที่เหมาะสมเพื่อการสลายพลังงานจากการสั่นสะเทือนไว้ในรูปแบบแผนภูมิขีดจำกัดล่างดังรูปที่ 12



รูปที่ 11 ตำแหน่งการกระตุ้นบนทางรถไฟตามมาตรฐาน BS EN 15461 [13]



รูปที่ 12 ขีดจำกัดล่างของ Track Decay Rate สำหรับทางรถไฟตามมาตรฐาน ISO 3095 [14]

2.4.3 รูปแบบการทดสอบ

โดยดำเนินการทดสอบทั้งหมด 6 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ดำเนินการติดตั้งตัวหน่วงรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 0%, 30%, 50% และ 70% เชิงมวล และรูปแบบที่ดำเนินการติดตั้งตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทน และไม่ได้ติดตั้งตัวหน่วงราง [19] ดังตารางที่ 3 ในระหว่างการทดสอบโมดัลแต่ละรูปแบบได้ทำการเคาะซ้ำ 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยในแต่ละจุด

3. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

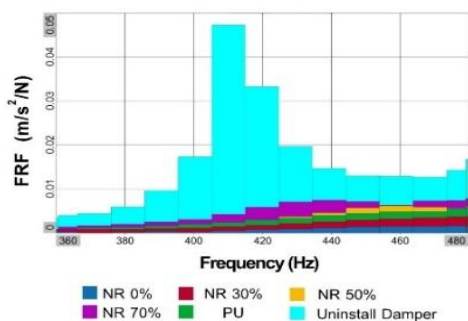
3.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าฟังก์ชันตอบสนองต่อความถี่ในราง

ค่าฟังก์ชันตอบสนองต่อความถี่ เป็นผลจากการวิเคราะห์โมดัลเชิงทดลอง (EMA) ตามหัวข้อ 2.4.1 โดยจุดพิกัดของกราฟแสดงถึงค่าความถี่ธรรมชาติที่นำมาใช้จำแนกรูปแบบการสั่นพ้อง (Resonance Modes) ของระบบรางในแต่ละย่านความถี่ได้อย่าง

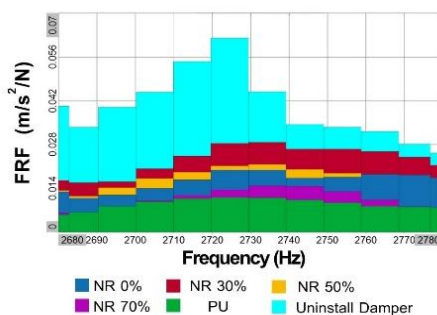
ตารางที่ 3 รูปแบบทดสอบการวิเคราะห์โมดัล

รูปแบบ	การดำเนินการทดสอบ
1	ทดสอบบนรางที่ติดตั้งตัวหน่วงรางสูตร NR 0%
2	ทดสอบบนรางที่ติดตั้งตัวหน่วงรางสูตร NR 30%
3	ทดสอบบนรางที่ติดตั้งตัวหน่วงรางสูตร NR 50%
4	ทดสอบบนรางที่ติดตั้งตัวหน่วงรางสูตร NR 70%
5	ทดสอบบนรางที่ติดตั้งตัวหน่วงรางชนิด PU
6	ทดสอบบนรางที่ไม่ได้ติดตั้งตัวหน่วงราง

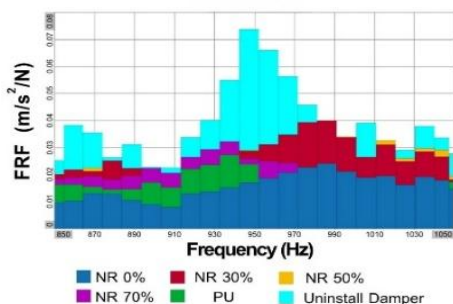
ชัดเจน โดยได้ทำการเลือกช่วงย่านความถี่ทั้งหมด 4 โหมด คือความถี่ 410 Hz, 950 Hz, 2,725 Hz และ 3,400 Hz สามารถนำมาแสดงในรูปแบบแผนภูมิในรูปที่ 13 ถึงรูปที่ 16 สามารถสรุปเปรียบเทียบรูปแบบการสั่นพ้องและความถี่ธรรมชาติระหว่างกรณีติดตั้งและไม่ติดตั้งตัวหน่วงรางแต่ละชนิด ได้ดังตารางที่ 4



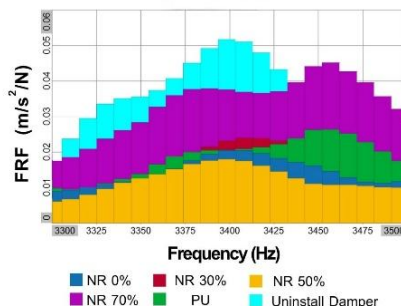
รูปที่ 13 ค่าฟังก์ชันตอบสนองความถี่ในราง
ในย่านความถี่ 410 Hz



รูปที่ 15 ค่าฟังก์ชันตอบสนองความถี่ในราง
ในย่านความถี่ 2,725 Hz



รูปที่ 14 ค่าฟังก์ชันตอบสนองความถี่ในราง
ในย่านความถี่ 950 Hz



รูปที่ 16 ค่าฟังก์ชันตอบสนองความถี่ในราง
ในย่านความถี่ 3,400 Hz

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ตัวหน่วงราง
สูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 0% ไม่สามารถทำงานได้
อย่างมีประสิทธิภาพในย่านความถี่ต่ำที่ 350–450 Hz
อย่างไรก็ตาม ตัวหน่วงรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ
0%, 30% และ 50% มีรูปแบบการสั่นพ้องที่ใกล้เคียง
หรือสอดคล้องกับกรณีไม่ได้ติดตั้งตัวหน่วงราง
โดยเฉพาะสูตร 50% ที่ให้รูปแบบการสั่นพ้องตรงกัน
ในย่านความถี่กลางถึงสูงตั้งแต่ 950–3,400 Hz หาก

พิจารณาการสั่นพ้องรูปแบบ Pin-Pin resonance
ในช่วงย่านความถี่ 800–1,000 Hz [20,21] จะพบว่า
ตัวหน่วงรางทุกสูตรจะมีประสิทธิภาพในย่านความถี่ที่
940 และ 980 Hz กล่าวคือตัวหน่วงรางสามารถช่วย
ลดการสั่นสะเทือนและช่วยสลายพลังงานในย่าน
ความถี่ของการสั่นสะเทือนของรางในรูปแบบ
Pin-Pin Resonance ได้ และหากพิจารณาการสั่นพ้อง
รูปแบบ Railhead Corrugation ในย่านความถี่สูงที่



3,000 Hz ขึ้นไป จะพบว่า ตัวหน่วงรางทุกสูตรยกเว้น สูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 70% และชนิดโพลียูรีเทน จะมีประสิทธิภาพในย่านความถี่ประมาณ 3,400 Hz กล่าวคือ ตัวหน่วงรางเหล่านี้สามารถช่วยลดการสั่นสะเทือนและช่วยสลายพลังงานในย่านความถี่ของการสั่นสะเทือนของรางในรูปแบบ Railhead Corrugation ได้เช่นกัน แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ตัวหน่วงรางสูตรยางธรรมชาติ 50% ให้สมรรถนะในการลดทอนแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนได้ดีที่สุด และมีความเสถียรในทุกย่านความถี่ พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการโหมดการสั่น (Modal Coupling) ทำให้ความถี่ธรรมชาติของตัวหน่วงถูกปรับจน เข้ากับโหมดการสั่นวิกฤตของรางได้อย่างแม่นยำ(เช่น โหมด Pin-Pin Resonance ที่ 950

Hz) ตัวหน่วงจึงทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับทางพลวัต ที่รับและสลายพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงที่สุด นอกจากนี้ ความสมดุลงดกล่าวยังช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดโหมดการสั่นพ้องใหม่ในย่านความถี่สูง ซึ่งแตกต่างจากสูตร NR 70% ที่เนื้อยางมีความอ่อนเกินไปจนเกิดรูปแบบการสั่นพ้องใหม่ที่ความถี่ 3,450 Hz ส่งผลให้ประสิทธิภาพการหน่วงลดลง

นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ฟังก์ชันตอบสนองต่อความถี่ในราง จะถูกนำไปคำนวณหาค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในรางซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการสลายพลังงานการสั่นสะเทือนของรางในแต่ละย่านความถี่ และผลการวิเคราะห์ดังกล่าว จะถูกนำเสนอในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบรูปแบบการสั่นพ้องและความถี่ธรรมชาติของรางในแต่ละย่านความถี่

ช่วงความถี่	รูปแบบการสั่นพ้อง	ความถี่ที่เกิด (Hz) กรณีไม่ได้ติดตั้งตัวหน่วงราง	ความถี่ที่เกิด (Hz) กรณีติดตั้งตัวหน่วงรางแต่ละสูตร	พฤติกรรมที่สังเกตได้
350–400 Hz	Rail-sleepers resonance [20]	410	460 (NR 50%) 440 (NR 70%)	สูตร NR 0%, 30% และ PU ไม่พบรูปแบบการสั่นพ้องชัดเจน
800–1,000 Hz	Pin-Pin resonance [20,21]	950	980 (NR 0%, 30% และ 50%) 940 (NR 70% และ PU)	NR 50% สามารถลดทอนแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนได้ดีที่สุด
2,725 Hz	Rail Corrugation	2,725	2,735	ทุกสูตรให้รูปแบบการสั่นพ้องใกล้เคียงกับกรณีไม่ได้ติดตั้ง
มากกว่า 3,000 Hz	Railhead corrugation	3,400	3,400 (NR 0% และ 50%) 3,410 (NR 30%) 3,460 (NR 70% และ PU)	-



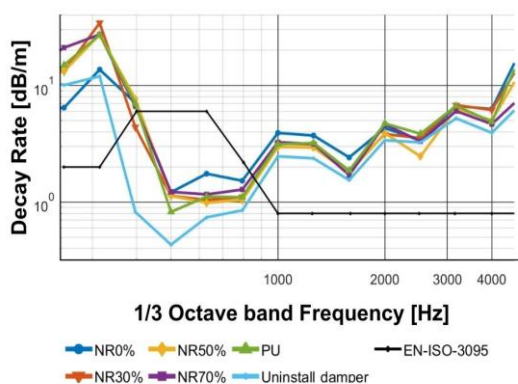
3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในราง

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนต่อความถี่ของผลิตภัณฑ์ตัวหน่วงรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติตั้งแต่ 0%, 30%, 50%, และ 70% ทั้ง 4 สูตรและตัวหน่วงรางชนิด

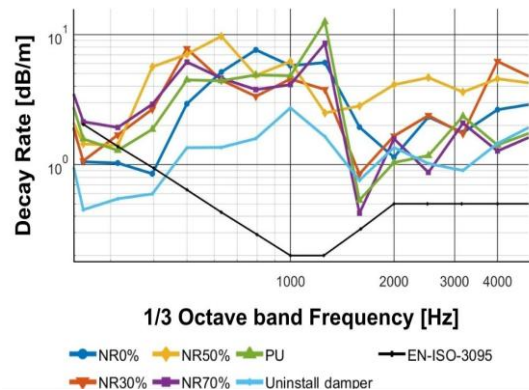
Polyurethane (PU) ในแนวดิ่งและแนวด้านข้าง ในรูปที่ 17 และ 18 แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งตัวหน่วงรางทุกชนิดช่วยเพิ่มค่า TDR ได้ดีกว่ากรณีไม่ติดตั้ง ในช่วงความถี่ย่านกลางถึงสูง (1,000–4,000 Hz) โดยสามารถสรุปเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวหน่วงรางแต่ละสูตรได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในรางในแนวดิ่งและแนวด้านข้าง

ช่วงความถี่	ค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนแนวดิ่ง (Vertical)	ค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนแนวด้านข้าง (Lateral)	หมายเหตุ
ความถี่ต่ำ 250–800 Hz	ให้ค่าสูงกว่ามาตรฐาน โดยเฉพาะ NR 30% มีค่าสูงสุดที่ 315 Hz	ทุกสูตรให้ค่าสูงกว่ากรณีไม่ติดตั้งอย่างชัดเจน	ช่วงความถี่ที่เกิดเสียงรบกวนหลัก
ความถี่กลาง 800–2,000 Hz	ทุกสูตรให้ค่าการลดทอนต่ำกว่าเส้นมาตรฐาน	NR 50% มีความเสถียรสูงที่สุด	สูตร PU ให้ค่าการลดทอนที่สูงกว่าที่ความถี่ 1,260 Hz
ความถี่สูง 2,000–4,000 Hz	PU ให้ค่าสูงกว่า NR 50% ในบางจุด (2,000 และ 3,000 Hz)	NR 50% ให้ประสิทธิภาพสูงกว่า PU อย่างมีนัยสำคัญ	NR 50% คุมการสั่นสะเทือนแนวด้านข้างได้ดีกว่า



รูปที่ 17 ค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในรางในแนวดิ่ง



รูปที่ 18 ค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในรางในแนวด้านข้าง



ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งตัวหน่วงรานั้นสามารถยกระดับการสลายพลังงานของทางวิ่ง ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยเฉพาะช่วงความถี่ที่ 250 ถึง 2,000 Hz ซึ่งเป็นช่วงที่เสี่ยงจากการสั่นของล้อรถไฟเกิดขึ้นมากที่สุด จากการภาพจะเห็นว่า ตัวหน่วงรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% มีสมรรถนะโดยรวมสูงสุด

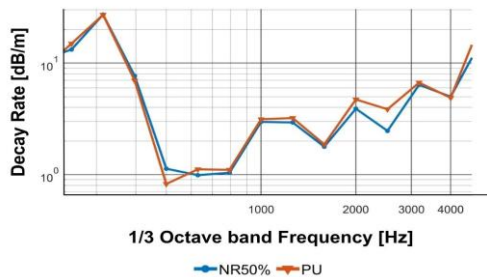
การศึกษาประสิทธิภาพค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนของตัวหน่วงรานั้นได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทนกับชนิดชนิดยางธรรมชาติร่วมกับยางบิวไทล์ โดยทำการเลือกตัวหน่วงรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% กับตัวหน่วงรางชนิดโพลียูรีเทน มาทำการวิเคราะห์ในแนวดิ่งและแนวด้านข้างดังรูปที่ 19 และ 20 ตามลำดับ พบว่าตัวหน่วงรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% มีความโดดเด่นด้านเสถียรภาพของค่าการลดทอนพลังงานสั่นสะเทือน โดยเฉพาะในแนวด้านข้างซึ่งเป็นทิศทางหลักของการเกิดเสียงรบกวนขณะรถไฟวิ่ง แม้ในแนวดิ่ง ตัวหน่วงรางชนิด PU จะให้ค่าที่สูงกว่าในบางความถี่ แต่ในแนวด้านข้าง PU กลับมีประสิทธิภาพลดลงอย่างมากในช่วงความถี่ 1,600 Hz

พฤติกรรมนี้ยืนยันว่า ตัวหน่วงรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% มีแนวโน้มให้ผลการลดทอนที่มีเสถียรภาพและสูงกว่าชนิด PU โดยเฉพาะในย่านความถี่สูงที่ตั้งแต่ 2,000–3,000 Hz ในขณะที่ตัวหน่วงรางชนิด PU มีค่าการลดทอนต่ำกว่า ซึ่งสะท้อนถึงข้อจำกัดในการใช้งานเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% ทั้งนี้พฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายใต้ผลการทดสอบน่าจะมาจากปัจจัยหลัก 4 ด้านคือ 1) การปรับจูนมวลและความถี่ธรรมชาติ ตัวหน่วงรางจะ

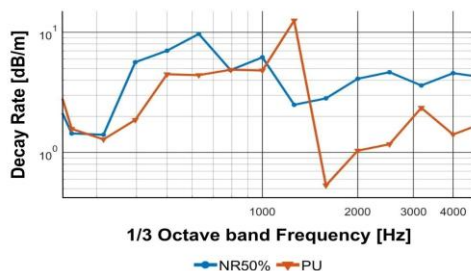
ทำงานตามหลักการของตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือนทางพลวัต ซึ่งประสิทธิภาพสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อความถี่ธรรมชาติของตัวหน่วงราง ถูกปรับจูนให้ตรงกับโหมดการสั่นสะเทือนวิกฤตของราง ในสูตร NR 50% สัดส่วนระหว่างมวลและความแข็งเกร็งของวัสดุโพลีเมอร์มีความเหมาะสมที่สุด ทำให้ความถี่ธรรมชาติของตัวหน่วงสอดคล้องกับโหมดการสั่นที่สำคัญ เช่น Pin-Pin Resonance 1,600–3,000 Hz ซึ่งเป็นย่านที่เสียงรบกวนจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อและรางมีความเข้มข้นสูงที่สุด 2) คุณสมบัติการหน่วงเชิงหนืดและแรงเสียดทานภายในโมเลกุลของยางธรรมชาติ เมื่อนำมาผสมกับยางบิวไทล์ ในสัดส่วน 50:50 จะสร้างสมดุลระหว่างความยืดหยุ่นและการสลายพลังงาน โดยโครงสร้างโมเลกุลของยางบิวไทล์ที่มีกลุ่มเมทิลหนาแน่น จะสร้างแรงเสียดทานภายในที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับโพลียูรีเทน ทำให้ค่าตัวประกอบการสูญเสีย (Loss factor) สูงขึ้น ส่งผลให้พลังงานจลน์จากการสั่นสะเทือนของรางถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพและเสถียร โดยเฉพาะในย่านความถี่สูงตั้งแต่ 2,000 Hz ขึ้นไป ซึ่งสูตร NR 50% แสดงค่าการลดทอนที่สูงกว่าวัสดุ PU 3) โหมดการสั่นและการถ่ายโอนพลังงาน ในเชิงกลศาสตร์สัดส่วนสูตร NR 50% ทำให้เกิดโหมดการสั่นระหว่างรางและตัวหน่วงที่สมบูรณ์ พลังงานสั่นสะเทือนจากรางจะถูกถ่ายโอนไปยังตัวหน่วงราง และสลายทั้งได้ทันทีในขณะที่สูตรที่มีปริมาณยางสูงเกินไป (เช่น สูตร NR 70%) วัสดุจะมีความแข็งเกร็งต่ำเกินไป จนสูญเสียความสามารถในการควบคุมรูปแบบการสั่น และอาจทำให้เกิดโหมดการสั่นพ้องใหม่ในย่านความถี่สูงที่ 3,450 Hz ซึ่งส่งผลการลดทอนสมรรถนะโดยรวมของระบบ



และ 4) อัตราการลดทอนที่มีเสถียรภาพ สูตร NR 50% ให้ค่าอัตราการลดทอนการสั่นสะเทือน(TDR) ที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ISO 3095 และมีความเสถียรทั้งในแนวตั้งและแนวด้านข้าง ความสมดุลของพารามิเตอร์ทางกลศาสตร์ในสูตรนี้ช่วยป้องกันพฤติกรรมความแข็งแรงส่วนเกิน ที่มักพบในสูตรที่มีปริมาณยางน้อย (เช่น NR 0% หรือ 30%) ซึ่งทำให้ตัวหนังสือไม่สามารถทำงานได้ดีในย่านความถี่ต่ำ ดังนั้น สูตร NR 50% จึงเป็น "จุดเหมาะสมที่สุด" ที่ทำให้พารามิเตอร์เชิงกลศาสตร์ทำงานสอดคล้องกันเพื่อสลายพลังงานสั่นสะเทือนได้สูงสุดในทุกย่านความถี่วิกฤต



รูปที่ 19 ค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในรางในแนวตั้งเปรียบเทียบระหว่างตัวหนังสือสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% กับ PU



รูปที่ 20 ค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในรางในแนว

ด้านข้างเปรียบเทียบระหว่างตัวหนังสือสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% กับ PU

4. สรุปผล

ตัวหนังสือรางทุกส่วนผสมจากยางธรรมชาติให้ค่าประสิทธิภาพฟังก์ชันการตอบสนองต่อความถี่ของรางที่แตกต่างกันตามย่านความถี่ โดยตัวหนังสือรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 0% ไม่สามารถทำงานได้ดีในย่านความถี่ต่ำ ช่วงย่านความถี่ 350–450 Hz ขณะที่ตัวหนังสือรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 0%, 30% และ 50% มีรูปแบบการสั่นที่ใกล้เคียงหรือสอดคล้องกับการสั่นไม่ได้ติดตั้งตัวหนังสือราง โดยเฉพาะสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% ที่มีรูปแบบการสั่นพ้องตรงกับกรณีไม่ได้ติดตั้งตัวหนังสือรางในย่านความถี่ 980 Hz ซึ่งเป็นย่านความถี่ของการสั่นพ้องในโหมด Pin-Pin และย่านความถี่สูง 3,400 Hz ซึ่งเป็นย่านความถี่ของการสั่นพ้องในโหมด Railhead corrugation สะท้อนให้เห็นว่าประสิทธิภาพของวัสดุตัวหนังสือรางขึ้นกับสัดส่วนการผสมและคุณสมบัติเชิงกลของตัวหนังสือ ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการควบคุมรูปแบบการสั่นสะเทือนของราง

ตัวหนังสือรางทุกสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติให้ค่าการลดทอนการสั่นสะเทือนในรางที่ดีกว่าในย่านความถี่ 1,000 ถึง 4,000 Hz โดยเฉพาะตัวหนังสือรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% ให้ค่าการลดทอนแรงสั่นสะเทือนสูงสุดในช่วงความถี่ในย่าน 400 ถึง 3,150 Hz ในแนวด้านข้าง ในขณะที่ค่าการลดทอนในแนวตั้งที่ความถี่ 315 Hz สูงถึง 30 dB/m และลดลงเหลือ 1 dB/m ในช่วง 500 ถึง 800 Hz ก่อนเพิ่มขึ้นอีกครั้งในย่านความถี่สูง



การติดตั้งตัวหน่วงตัวรางบนรางรถไฟ ช่วยเพิ่มค่าลดทอนของการสั่นสะเทือนของรางทั้งในแนวดิ่งและแนวด้านข้างได้ในช่วงความถี่ต่าง ๆ อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในย่านความถี่ 200 ถึง 4,000 Hz ซึ่งเป็นช่วงที่เสี่ยงจากการสั่นของล้อรถไฟเกิดขึ้นมากที่สุด และผลการทดสอบบ่งชี้ว่า ตัวหน่วงรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดการสั่นสะเทือน

จากผลการทดสอบเปรียบเทียบยังพบอีกว่าตัวหน่วงรางสูตรส่วนผสมยางธรรมชาติ 50% ให้ประสิทธิภาพในสลายพลังงานในแนวด้านข้างได้ดีกว่าตัวหน่วงรางชนิด PU ในขณะที่ประสิทธิภาพในการสลายพลังงานในแนวดิ่งมีค่าใกล้เคียงกับตัวหน่วงรางชนิด PU ซึ่งจากผลดังกล่าวสามารถนำตัวหน่วงรางที่พัฒนาจากส่วนผสมยางธรรมชาติมาใช้ทดแทนตัวหน่วงรางชนิด PU ได้

จากผลการศึกษาที่มีการควบคุมตัวแปรในห้องปฏิบัติการ สามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกสูตรวัสดุตัวหน่วงรางให้เหมาะสมกับช่วงความถี่เป้าหมายของปัญหาเสียงรบกวน โดยจากผลงานวิจัยยังพบอีกว่าตัวหน่วงรางที่พัฒนาจากยางธรรมชาติมีสมรรถนะเทียบเคียงได้กับวัสดุโพลียูรีเทน สนับสนุนการส่งเสริมการสร้างมูลค่าเพิ่มของสินค้าเกษตรในประเทศ ทั้งนี้การติดตั้งและทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานภายใต้สภาวะการใช้งานจริงผ่านการทดสอบภาคสนามจะเป็นทิศทางการวิจัยในขั้นต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากกองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรมและหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (บพข.)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Thompson, Railway noise and vibration: Mechanisms, modelling and means of control, 2nd Ed., Elsevier, London, UK, 2024.
- [2] T. Xin, S. Wang, L. Gao, H. Huo, Y. Ding, P. Wang, P. Chen and P. Liu, Field measurement of rail corrugation influence on environmental noise and vibration: A case study in China, Measurement, 2020, 164, 108084.
- [3] P.J. Remington, Wheel/rail rolling noise, I: Theoretical analysis, The Journal of the Acoustical Society of America, 1987, 81(6), 1805 – 1823.
- [4] P.J. Remington, Wheel/rail rolling noise, II: Validation of the theory, The Journal of the Acoustical Society of America, 1987, 81(6), 1824 – 1832.



- [5] D.J. Thompson, Wheel-rail noise generation, part I: Introduction and interaction model, *Journal of Sound and Vibration*, 1993, 161(3), 387 – 400.
- [6] T. Srisawat, R. Parichatprecha and S. Suthasupradit, Analysis of train-bridge dynamic interaction by using finite element method and multibody co-simulation model: Case study of Thailand Airport Rail Link project, *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 2023, 33(1), 69 – 80. (in Thai)
- [7] S. Suthasupradit, T. Petcharat, K.-D. Kim and R. Parichatprecha, Application of multibody dynamics simulation in approximation of rail vehicle dynamic envelope, *Journal of the Korean Society for Railway*, 2023, 26(12), 843 – 855.
- [8] D.J. Thompson, B. Hemsworth and N. Vincent, Experimental validation of the TWINS prediction program for rolling noise, part 1: Description of the model and method, *Journal of Sound and Vibration*, 1996, 193(1), 123 – 135.
- [9] W. Li, A. Wang, X. Gao, L. Ju and L. Liu, Development of multi-band tuned rail damper for rail vibration control, *Applied Acoustics*, 2021, 184, 108370.
- [10] A. Parker and C. Weber, Rail dampers-the first Australian field trial, *The 20th International Congress on Acoustics 2010 (ICA-Australia 2010)*, Proceeding, 2010, 2243 – 2248.
- [11] J. Jin, H. Kim, H.-I Koh and J. Park, Railway noise reduction by periodic tuned particle impact damper with bounce and pitch-coupled vibration modes, *Composite Structures*, 2022, 284, 115230.
- [12] H. Venghaus, D. Thompson, M. Toward, D. Bumke, P. Kiston, B. Asmussen and M. Stranberg, Assessment of the efficiency of rail dampers using laboratory methods within the STARDAMP project, *The 38th German Annual Conference on Acoustics (DAGA-Germany 2012)*, Online Proceeding, 2012, 671 – 672.
- [13] BS EN 15461:2008+A1:2010, Railway applications-Noise emission-Characterization of the dynamic properties of track selections for pass by noise measurements, 2010.
- [14] BS EN ISO 3095:2013, Acoustics-Railway applications-Measurement of noise emitted by rail bound vehicles (ISO 3095:2013), 2013.
- [15] M. Dumitriu and I.C. Cruceanu, On the rolling noise reduction by using the rail damper, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2017, 10(6), 87 – 95.



- [16] https://uic.org/IMG/pdf/2012_dampers_grinding_lowbarriers.pdf. (Accessed on 19 October 2025)
- [17] I. Haladin, S. Lakušić and J. Koščak, Measuring vibration damping level on conventional rail track structures, *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, 2016, 68(6), 461 – 476.
- [18] H. Zhang, W. Liu, W. Liu and Z. Wu, Study on the cause and treatment of rail corrugation for Beijing metro, *An International Journal on the Science and Technology of Wear*, 2014, 317(1-2), 120 – 128.
- [19] G. Csontos, F. Augusztinovicz and L. Kazinczy, Examination of rail dampers with respect to noise and vibration mitigation, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2020, 64(3), 658 – 667.
- [20] J. Morais, E. Fortunato, D. Ribeiro, R. Calçada and J. Mendes, Railway track support condition assessment-Methodology validation using numerical simulations, *Engineering Failure Analysis*, 2023, 152, 107483.
- [21] W. Ho, D. Tse, P. Wong, W. Wong and G. Soltanieh, Suppression of corrugation growth by rail damper, *The 27th International Congress on Sound and Vibration 2021 (ICSV-USA 2021)*, Online Proceeding, 2021, 4098 – 4105.