

# การหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของทางรถไฟชนิดมีหินโรยทางที่เสื่อมสภาพ

## Dynamic property identification of degraded ballasted railway tracks

ธนกฤต ประสาทพิตรชัช<sup>1</sup>, ศรัณย์ วันไชยธนวงศ์<sup>2</sup> และ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชยุตม์ งามโขนนง<sup>3</sup>

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

### บทคัดย่อ

การหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของทางรถไฟชนิดมีหินโรยทางที่เสื่อมสภาพมีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ศึกษาตัวแปรเชิงพลศาสตร์ของทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง (2) เปรียบเทียบพฤติกรรมของโครงสร้างที่สมบูรณ์และโครงสร้างที่มีความเสียหาย (3) ศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างหมอนรถไฟและหินโรยทาง (4) ศึกษาผลของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของทางรถไฟ ซึ่งทดสอบโดยใช้ค้อนทดสอบเพื่อหาค่าเชิงพลศาสตร์ของหมอนรองรถไฟและหินโรยทาง จากผลการทดสอบพบว่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของหมอนรองรถไฟและหินโรยทางในโหมดที่ 1 ในกรณี Uncracked sleeper จะเห็นว่าปริมาณของหินโรยทางที่รับน้ำหนักบริเวณกึ่งกลางของหมอนรองรถไฟจะมีผลกระทบกับค่า Damping ratio มากเมื่อไม่มีชั้นหินโรยทางมารับน้ำหนักจากหมอนรองรถไฟบริเวณกึ่งกลางของหมอนรองรถไฟจะทำให้ค่า Damping ratio ลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยจะเห็นได้จาก Full Supported Sleeper มีค่า Damping ratio เท่ากับ 0.1472 Unsupported at the middle มีค่า Damping ratio เท่ากับ 0.0736 ในขณะที่ปริมาณของหินโรยทางที่รับน้ำหนักบริเวณขอบของหมอนรองรถไฟจะมีผลกระทบกับค่า Damping ratio ค่อนข้างน้อยเมื่อไม่มีชั้นหินโรยทางมารับน้ำหนักจากหมอนรองรถไฟบริเวณขอบของหมอนรองรถไฟจะทำให้ค่า Damping ratio ลดลงเพียงเล็กน้อยโดยจะเห็นได้จาก Full Supported Sleeper มีค่า Damping ratio เท่ากับ 0.1472 Middle Supported Sleeper มีค่า Damping ratio เท่ากับ 0.1286 และ Overhang 33%L มีค่า Damping ratio เท่ากับ 0.1455 และเมื่อพิจารณากรณี Overhang 20%L จะได้ค่า Damping ratio เท่ากับ 0.1939 ซึ่งมากกว่ากรณี Full Supported Sleeper

คำสำคัญ: หมอนรองรถไฟ, หินโรยทาง, คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์

### Abstract

Dynamic property identification of degraded ballasted railway tracks has the objectives to (1) study the dynamic parameters of a ballasted railway track (2) compare the behavior of intact and damaged structures (3) Study the interaction between sleepers and ballast. (4) Study the effects of variables that affect the dynamic behavior of railways. Which was tested by using an impact hammer to determine the dynamic force values of the sleepers and ballast. Based on the test results, the dynamic properties of sleepers and ballast in mode1. In the case of Uncracked sleeper, the quantity of ballast bearing weight in the middle area of the sleeper significantly affects the damping ratio. When there is no ballast layer supporting weight from the sleeper's middle area, the damping ratio decreases notably. This is evident from the following values: Full Supported Sleeper have a damping ratio value of 0.1472 Unsupported at the middle have a damping ratio value of 0.0736. Meanwhile, the quantity of ballast bearing weight at the edge of the sleeper has a relatively minor impact on the damping ratio when there is no ballast layer supporting weight from the edge of the sleeper. This is observable from the following values: Full supported having a damping ratio of 0.1472, Middle Supported Sleeper having a damping ratio of 0.1286 and Overhang 33%L having a damping ratio of 0.1455. Furthermore, considering the case of Overhang 20%L, the damping ratio is 0.1939. Which is higher compared to the Full Supported Sleeper case.

Keywords: Sleeper, Ballast, Dynamic properties

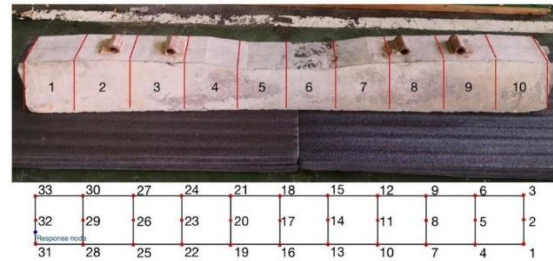
## 1. บทนำ

Ballasted Railway Tracks เป็นทางรถไฟที่ใช้กันอย่างแพร่หลายอยู่ทั่วไปในทุกๆประเทศ ซึ่ง Ballasted Railway Tracks นั้นมีข้อดีคือ ต้นทุนการก่อสร้างต่ำ ขั้นตอนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่างๆแม้กระทั่งการปรับแก้ระดับ (Level) และแนวทางวิ่ง (Alignment) สามารถทำได้ง่ายมีคุณสมบัติการระบายน้ำที่ตรงถึงการลดมลภาวะทางเสียงที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของการวิ่งของทางรถไฟกับพื้นทาง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่า Ballasted Railway Tracks จะมีต้นทุนในการบำรุงรักษาที่ถูกและบำรุงรักษาง่ายก็จริงแต่ต้องทำการบำรุงรักษาเป็นระยะๆ เมื่อพิจารณาถึงจำนวนครั้งในการบำรุงรักษาที่ระยะเวลาในการใช้พบว่า มีค่าบำรุงรักษาที่ค่อนข้างสูงทำให้ Ballasted Railway Tracks ถูกปล่อยทิ้งไว้ตามการเสื่อมสภาพไม่มีการซ่อมบำรุงซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักและความเร็วลดลงรวมถึงความปลอดภัยในการใช้งานด้วย ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการพัฒนารูปแบบของทางรถไฟสมัยใหม่ด้วยการนำระบบ Slab Track หรือ Track Concrete เข้ามาใช้เพื่อลดต้นทุนและกระบวนการในการบำรุงรักษา รวมถึงยืดอายุการใช้งานของทางรถไฟ แต่ในปัจจุบันประเทศไทยยังมีการใช้ Ballasted Railway Tracks เป็นจำนวนมากเนื่องจาก Slab Track มีต้นทุนการก่อสร้างสูงกว่า Ballasted Railway Tracks มาก ดังนั้นจึงไม่สามารถสร้างเป็นรถไฟขนส่งทางไกลได้เนื่องจากต้นทุนในการก่อสร้างสูงเกินไปและยังมีความถี่ของขบวนรถไม่มากพอ ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมของ Ballasted Railway Tracks จึงเป็นเรื่องสำคัญเพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้การออกแบบและวางแผนในการซ่อมบำรุงให้มีประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งานที่ยืนยาวยิ่งขึ้น

## 2. การเตรียมการทดลอง

### 2.1 การหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของหมอนรถไฟ

จากการวิจัยของ Remennikov และ Kaewunruen (2006) การทดสอบโดยค้อนกระทบเพื่อแสดงพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของหมอนรถไฟ โดยกำหนดให้หมอนรถไฟอยู่ในสถานะอิสระ (Free - Free) ซึ่งหมายถึงชั้นรองรับน้ำหนักของหมอนรถไฟจะต้องมีความแข็งแรงน้อยที่สุดเพื่อป้องกันการรบกวนการตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของหมอนรถไฟ โดยจะวางแผ่นโพลีไวนิลด้านข้างดังแสดงในรูปที่ 4 อุปกรณ์ทดสอบของเครื่องบันทึกข้อมูล PROSIG DATs SOLO, ค้อนกระทบ PROSIG และเครื่องวัดความเร่ง KYOWA ถูกนำมาใช้ในกระบวนการทดลอง (ดูรูปภาพ 2 ถึง รูปภาพ 3) ค้อนจะใช้เพื่อกระทบหมอนรถไฟในช่วง 0 ถึง 2000 เฮิรตซ์ โดยจะมีการทดสอบโดยเฉลี่ย 5 ครั้ง/จุดตำแหน่งการทดสอบจะมีการกระจายเท่าๆ กัน โดยมี 11 nodes ตามความยาวของหมอนรถไฟ โดยแบ่งหมอนรถไฟออกเป็น 10 ส่วนเท่าๆ กัน โดยมี 3 nodes ตามความกว้าง ดังนั้นรวมมีจุดในการทดสอบสำหรับหมอนรถไฟทั้งหมด 33 nodes โดยการกำหนดค่าจุดทดสอบจะเป็นดังรูปที่ 1 โดยมีรูปถ่ายการทดสอบแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 กำหนดจุดทดสอบ



รูปที่ 2 ภาพการทดสอบโดยใช้ค้อนกระทบ



(i) PROSIG DATs SOLO



(ii) เครื่องวัดความเร่ง KYOWA

รูปที่ 3 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

### 2.2 การหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของหมอนรถไฟและหินโรยทาง

วิธีการทดสอบนี้เป็นการดัดแปลงจากผลงานของ (Kaewunruen & Tang, 2019). จากการแบ่งหมอนรถไฟและหินโรยทางจะเห็นว่า ค่า Degrees of freedom ของชั้นหินโรยทางจะไม่รวมอยู่ในระบบแต่จะถูกคิดเป็นสปริงและแดชพอดเท่านั้น ค่า Stiffness ของโครงสร้างจะเป็นการคิดรวมกันระหว่างหมอนรถไฟและหินโรยทางซึ่งจะบ่งบอกความถี่ธรรมชาติซึ่งขึ้นอยู่กับค่า Stiffness ของหมอนรถไฟและหินโรยทาง จากการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ใน Modal Analysis โดย Curve Fitting The Frequency Response Function (FRF) จะได้ว่าค่าความถี่ธรรมชาติของหมอนรถไฟและหินโรยทางในแต่ละโหมดและค่า Damping ในแต่ละตำแหน่งและนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อโดยเปรียบเทียบกับแบบจำลอง FEM

### 2.3 การหาข้อมูลการทดลองได้จากการประมวลผลโดยใช้ DATs built in modal identification software

ขั้นแรกหาค่าความถี่ธรรมชาติของโหมดการดัดงอที่ได้จากแบบจำลอง FEM โดยการเลือกค่า modulus of elasticity ( $E_s$ ) ที่ทำให้ความถี่ธรรมชาติของโหมดการดัดงอจากแบบจำลอง FEM ตรงกับค่าความถี่ธรรมชาติของโหมดการดัดงอที่ได้จากการทดลอง หลังจากการเลือกค่า  $E_s$  เสร็จแล้วให้นำรูปร่างโหมดการดัดงอ 4 รูปแบบแรกจากแบบจำลอง FEM ที่ตรงกันกับผลที่ได้จากการทดลองจะถูกประเมินความสอดคล้องผ่านการใช้ดัชนี Modal Assurance Criteria (MAC) ดัชนีนี้จะกำหนดค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดย

ที่ค่า MAC ที่เกิน 0.9 หมายถึงความสอดคล้องกันอย่างมาก ในทางกลับกัน ค่า MAC ที่ต่ำบ่งชี้ว่ารูปร่างทั้งสองมีความคล้ายคลึงกันน้อย ซึ่งบ่งชี้ว่า shape vector ของโหมดการค้ำตั้งที่ถูกประเมินนั้นมีความสอดคล้องกันน้อย โดยสรุป ค่า MAC ที่สูงกว่าหมายถึง shape vector ของโหมดการค้ำตั้งแสดงถึงการเคลื่อนไหวที่สอดคล้องกัน ในขณะค่า MAC ที่ต่ำกว่าแสดงการเคลื่อนไหวที่ไม่สอดคล้องกัน นอกจากนี้ Damping property จะระบุใน DATs ที่สร้างขึ้นใน modal identification software โดยจะแสดงผลเป็น damping ratio ขึ้นตอนในการหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของหมอนรองรถไฟสรุปไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของหมอนรองรถไฟและหินโรยทาง

Preparation of sleeper	
1. ติดตั้งหมอนรองรถไฟให้อยู่ในสภาวะอิสระ (Free-Free conditions)	
Testing process	
2. Impact testing (get acceleration response, impact load)	
Stiffness Determination	
3. ค่า Es	
4. ตรวจสอบค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จาก FEM model ว่าสอดคล้องกันหรือไม่ (หากไม่ ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3)	
5. เปรียบค่า shape vectors จาก MAC value, หากสอดคล้องกันค่า MAC จะสูงกว่าค่าที่ต้องการ (โดยทั่วไปคือ $MAC > 0.8$ ) (หากไม่ ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1)	
6. หาค่า damping ratio ของหมอนรองรถไฟจาก DATs built in software	
7. บันทึกข้อมูล	

#### 2.4 กรณีศึกษาในการทดลอง

กรณีศึกษาในการทดลองเพื่อหาปฏิสัมพันธ์ระหว่างหมอนรองรถไฟและหินโรยทางสามารถแบ่งได้เป็น สองส่วนหลักคือ การทดสอบสภาวะอิสระ (Free-free conditions) เพื่อหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของหมอนรองรถไฟและหินโรยทางภายใต้สภาวะที่หินโรยทางเกิดความเสียหายแบบต่างๆ กรณีศึกษาในการทดสอบเชิงทดลองปฏิสัมพันธ์ระหว่างหมอนรองรถไฟและหินโรยสรุปได้ดังนี้ ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 กรณีศึกษาการทดลองหาปฏิสัมพันธ์ระหว่างหมอนรองรถไฟและหินโรยทาง

Case study	
Sleeper dynamic properties identification	
- สภาวะอิสระ (Uncracked sleeper)	
- สภาวะอิสระ (Cracked sleeper)	
Ballast dynamic properties identification	
Uncracked sleeper	
- สภาวะ Full Supported Sleeper	
- สภาวะ Middle Supported Sleeper	
- สภาวะ Unsupported at the middle	
- สภาวะ Overhang 33%	
- สภาวะ Overhang 20%	
Cracked sleeper	
- สภาวะ Middle Supported Sleeper	

### 3. ผลการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุทดสอบ

- หมอนรองคอนกรีตสภาพสมบูรณ์ความยาว 1.9 เมตร



รูปที่ 4 หมอนรองคอนกรีตสภาพสมบูรณ์

- หมอนรองคอนกรีตในสภาพมีรอยแตกกว้างความยาว 1.9 เมตร ซึ่งได้จากการนำหมอนรองคอนกรีตสภาพสมบูรณ์ไปกดทดสอบ Three point bending test ให้เกิดรอยแตก



รูปที่ 5 การทดสอบ Three point bending



รูปที่ 6 รอยแตกกว้างที่เกิด



รูปที่ 7 หมอนรองคอนกรีตสภาพมีรอยแตกกว้าง

ตารางที่ 3 ข้อมูลคุณสมบัติของหมอนรองคอนกรีตแต่ละช่วง

Element no.	Length (m)	I (m4)	rh (kg/m)
1	0.19	$1.23 \times 10^{-4}$	94.63
2	0.19	$1.25 \times 10^{-4}$	94.78
3	0.19	$1.18 \times 10^{-4}$	93.08
4	0.19	$1.03 \times 10^{-4}$	89.11
5	0.19	$7.73 \times 10^{-5}$	81.20
6	0.19	$7.73 \times 10^{-5}$	81.20
7	0.19	$1.03 \times 10^{-4}$	89.11
8	0.19	$1.18 \times 10^{-4}$	93.08
9	0.19	$1.25 \times 10^{-4}$	94.78
10	0.19	$1.23 \times 10^{-4}$	94.63

โดยที่  $E = 4.603 \times 10^{10}$  Pa

### 3.2 การทดสอบโดยใช้หมอนรองคอนกรีตสภาพสมบูรณ์

#### 3.2.1 สภาวะอิสระ

ทดสอบโดยวางหมอนรองคอนกรีตบนหินโรยทางซึ่งทำหน้าที่เสมือนไม่มีหมอนรองรับ เพื่อหาคุณสมบัติที่แท้จริงของวัสดุทดสอบ



รูปที่ 8 การทดสอบในสภาวะอิสระ

#### 3.2.2 สภาวะ Fill Supported Sleeper

ทดสอบโดยวางหมอนรองคอนกรีตบนหินโรยทางซึ่งทำหน้าที่รองรับน้ำหนัก โดยจัดให้มีพื้นที่รองรับตลอดช่วงความยาวของวัสดุทดสอบ



รูปที่ 9 การทดสอบในสภาวะ Full Supported Sleeper

#### 3.2.3 สภาวะ Middle Supported Sleeper

ทดสอบโดยวางหมอนรองคอนกรีตบนหินโรยทางซึ่งทำหน้าที่รองรับน้ำหนัก โดยจัดให้มีพื้นที่รองรับเพียงช่วงตรงกลางเป็นระยะ 1 ใน 3 ของความยาวหมอนรองคอนกรีต



รูปที่ 10 การทดสอบในสภาวะ Middle Supported Sleeper

#### 3.2.4 สภาวะ Unsupported at the middle

ทดสอบโดยวางหมอนรองคอนกรีตบนหินโรยทางซึ่งทำหน้าที่รองรับน้ำหนัก โดยจุดหินโรยทางช่วงตรงกลางเพื่อไม่ให้มีพื้นที่รองรับเป็นระยะ 1 ใน 3 ของความยาวหมอนรองคอนกรีต



รูปที่ 11 การทดสอบในสภาวะ Unsupported at the middle

#### 3.2.5 สภาวะ Overhang 33%

ทดสอบโดยวางหมอนรองคอนกรีตบนหินโรยทางซึ่งทำหน้าที่รองรับน้ำหนัก โดยจุดหินโรยทางช่วงปลายด้านหนึ่งเพื่อไม่ให้มีพื้นที่รองรับเป็นระยะ 1 ใน 3 ของความยาวหมอนรองคอนกรีต



รูปที่ 12 การทดสอบในสภาวะ Overhang 33%

#### 3.2.6 สภาวะ Overhang 20%

ทดสอบโดยวางหมอนรองคอนกรีตบนหินโรยทางซึ่งทำหน้าที่รองรับน้ำหนัก โดยจุดหินโรยทางช่วงปลายด้านหนึ่งเพื่อไม่ให้มีพื้นที่รองรับเป็นระยะ 1 ใน 5 ของความยาวหมอนรองคอนกรีต



รูปที่ 13 การทดสอบในสภาวะ Overhang 20%

### 3.3 การทดสอบโดยใช้หมอนรองคอนกรีตในสภาพมีรอยแตกแล้ว

#### 3.3.1 สภาวะอิสระ



รูปที่ 14 การทดสอบในสภาวะอิสระ

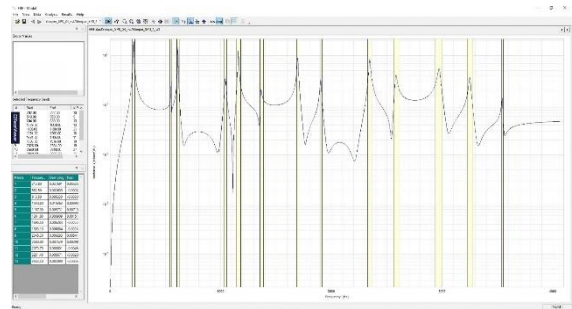
#### 3.3.2 สภาวะ Middle Supported Sleeper



รูปที่ 15 การทดสอบในสภาวะ Middle Supported Sleeper

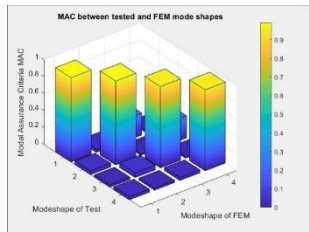
### 3.4 ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบ สามารถหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ได้จาก DATs modal identification software โดยเลือกช่วงจุดสูงสุดซึ่งเป็นช่วงความถี่ในการเกิดโหมด

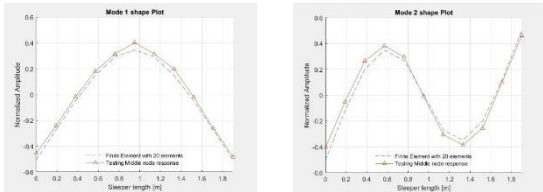


รูปที่ 16 การเลือกโหมดจาก DATs software

เนื่องจากแบบจำลองสำหรับงานวิจัยนี้เป็นแบบ 2 มิติ ดังนั้นจึงต้องเลือกโหมดที่เกิดจากการดัดงอ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับวิธีการที่สุด ซึ่งได้โหมดออกมาทั้งหมด 4 โหมดสำหรับแต่ละกรณีการทดสอบ โดยเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างโหมดที่ได้จากการทดสอบและโหมดที่ได้จากการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์

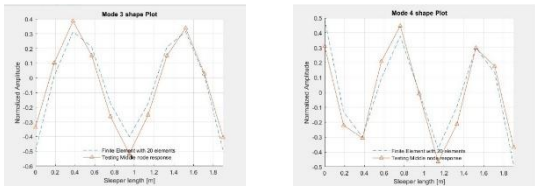


(i) แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างโหมดจาก 2 วิธี



(ii) Mode 1

(iii) Mode 2



(iv) Mode 3

(v) Mode 4

รูปที่ 17 ตัวอย่างโหมดที่ได้จากการทดสอบ

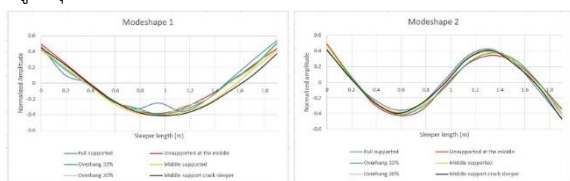
เมื่อนำโหมดในแต่ละกรณีมาเปรียบเทียบกันจะพบว่า รูปร่างของโหมดในแต่ละกรณีมีความคล้ายกัน โดย

- โหมดที่ 1 จะมีจุดดัดกลับหนึ่งจุด โดยแอมพลิจูดที่ได้จากการทดสอบในสภาพ Unsupported at the middle และ Full Supported Sleeper จะมีค่าที่สูงที่สุดที่ฝั่งซ้ายและฝั่งขวา ตามลำดับ

- โหมดที่ 2 จะมีจุดดัดกลับสองจุด โดยแอมพลิจูดที่ได้จากการทดสอบในสภาพ Middle Supported Sleeper, Overhang33% และ Unsupported at the middle จะมีค่าที่สูงที่สุดที่ปลายด้านซ้าย ส่วนแอมพลิจูดที่ได้จากการทดสอบในสภาพ Full Supported Sleeper และ Middle Support of Crack Sleeper จะมีค่าที่สูงที่สุดที่ปลายฝั่งขวาของหมอนรองคอนกรีต

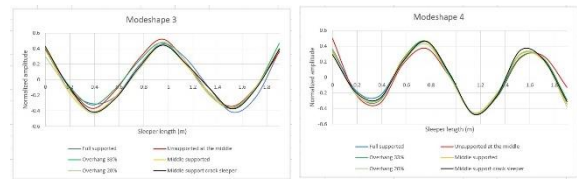
- โหมดที่ 3 จะมีจุดดัดกลับสามจุด โดยแอมพลิจูดที่ได้จากการทดสอบในสภาพ Unsupported at the middle จะมีค่าที่สูงที่สุดที่ช่วงกลางของหมอนรองคอนกรีต

- โหมดที่ 4 จะมีจุดดัดกลับสี่จุด โดยแอมพลิจูดที่ได้จากการทดสอบในสภาพ Unsupported at the middle จะมีค่าที่สูงที่สุดที่ฝั่งซ้ายของหมอนรองคอนกรีต ส่วนแอมพลิจูดที่ได้จากการทดสอบในสภาพ Overhang20% จะมีค่าที่สูงที่สุดที่ปลายฝั่งขวาของหมอนรองคอนกรีต



(i) Mode 1

(ii) Mode 2



(iii) Mode 3

(iv) Mode 4

รูปที่ 18 กราฟการเปรียบเทียบโหมดแต่ละกรณี

ได้ค่าอัตราส่วนความหน่วงและความถี่ธรรมชาติในแต่ละกรณีตามตาราง ดังนี้

ตารางที่ 4 ค่าอัตราส่วนความหน่วงโดยเฉลี่ย

Damping ratio				
Study case	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
<b>Uncracked sleeper</b>				
Free-Free condition	0.0249	0.0054	0.0058	0.0064
Full Supported Sleeper	0.1472	0.0230	0.0165	0.0167
Middle Supported Sleeper	0.1286	0.0136	0.0098	0.0085
Unsupported at the middle	0.0736	0.0276	0.0151	0.0166
Overhang 33%L	0.1455	0.0346	0.0201	0.0184
Overhang 20%L	0.1939	0.0102	0.0088	0.0108
<b>Cracked sleeper</b>				
Free-Free condition	0.01068	0.0060	0.0063	0.0071
Middle Supported Sleeper	0.1762	0.00252	0.0017	0.0017

ตารางที่ 5 ค่าความถี่ธรรมชาติ

Natural frequency (Hz)				
Study case	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
<b>Uncracked sleeper</b>				
Free-Free condition	212	614	1158	1694
Full Supported Sleeper	236	624	1042	1702
Middle Supported Sleeper	232	616	1042	1698
Unsupported at the middle	218	618	1158	1696
Overhang 33%L	248	620	1162	1702
Overhang 20%L	240	616	1042	1696
<b>Cracked sleeper</b>				
Free-Free condition	212	612	1036	1684
Middle Supported Sleeper	236	614	1034	1692

#### 4. บทสรุป

จากการทดลองหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของหมอนรองรถไฟและหินโรยทางโดยค้อนกระแทกในช่วงความถี่ 0-2000 เฮิรตซ์ โดยผลลัพธ์ที่ได้จะเป็น Damping property ซึ่งจะแสดงผลในรูปของ Damping ratio โดยจากการทดลองจะสามารถหาค่าเฉลี่ยของ Damping ratio ของแต่ละกรณีศึกษาได้ตามตารางที่ 4.11 ที่ได้แสดงไว้ โดยเมื่อพิจารณาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของหมอนรองรถไฟและหินโรยทางในโหมดที่ 1 ในกรณี Uncracked sleeper จะเห็นว่าปริมาณของหินโรยทางที่รับน้ำหนักบริเวณกึ่งกลางของหมอนรองรถไฟจะมีผลกระทบบกับค่า Damping ratio มากเมื่อไม่มีชั้นหินโรยทางมารับน้ำหนักจากหมอนรองรถไฟบริเวณกึ่งกลางของหมอนรองรถไฟจะทำให้ค่า Damping ratio ลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยจะเห็นได้จาก Full Supported Sleeper มีค่า Damping ratio เท่ากับ 0.1472 Unsupported at the middle มีค่า Damping ratio เท่ากับ 0.0736 ในขณะที่ปริมาณของหินโรยทางที่รับน้ำหนักบริเวณขอบของหมอนรองรถไฟจะมีผลกระทบบกับค่า Damping ratio ค่อนข้างน้อยเมื่อไม่มีชั้นหินโรยทางมารับน้ำหนักจากหมอนรองรถไฟบริเวณขอบของหมอนรองรถไฟจะทำให้ค่า Damping ratio ลดลงเพียงเล็กน้อยโดยจะเห็นได้จาก Full Supported Sleeper มีค่า Damping ratio เท่ากับ 0.1472 Middle Supported Sleeper มีค่า Damping ratio เท่ากับ 0.1286 และ Overhang 33%L มีค่า Damping ratio เท่ากับ 0.1455 และเมื่อพิจารณากรณี Overhang 20%L จะได้ว่าค่า Damping ratio เท่ากับ 0.1939 ซึ่งมากกว่ากรณี Full Supported Sleeper จะเห็นว่าจากกรณี Overhang 33%L ซึ่งมีค่า Damping ratio น้อยกว่ากรณี Full Supported Sleeper เพียง 1% เท่านั้นแสดงให้เห็นว่าการสูญเสียชั้นหินโรยทางที่รับน้ำหนักบริเวณขอบของหมอนรองรถไฟมีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับชั้นหินโรยทางที่รับน้ำหนักบริเวณกึ่งกลางของหมอนรองรถไฟโดยการที่กรณี Overhang 20%L มีค่า Damping ratio มากกว่ากรณี Full Supported Sleeper นั้นอาจเกิดจากชั้นหินโรยทางรับน้ำหนักบริเวณกึ่งกลางของหมอนรองรถไฟถูกกดอัดให้แน่นขึ้นในขณะที่ทำการทดลองซึ่งมีการขูดและถมชั้นหินโรยทางเพื่อศึกษาในแต่ละกรณี ในส่วนของ cracked sleeper เมื่อเปรียบเทียบกับ Uncracked sleeper จะเห็นว่าในกรณี Free-Free condition ซึ่งแสดงถึง Damping property ของหมอนรองรถไฟเพียงอย่างเดียว ค่า Damping ratio ของ cracked sleeper เท่ากับ 0.01068 มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ Uncracked sleeper ซึ่งมีค่า Damping ratio เท่ากับ 0.0249 ในส่วนของกรณี Middle Supported Sleeper มีค่า Damping ratio เท่ากับ 0.1762 มากกว่า Middle supported ของ uncracked sleeper อาจเกิดจากชั้นหินโรยทางรับน้ำหนักบริเวณกึ่งกลางของหมอนรองรถไฟถูกกดอัดให้แน่นขึ้นโดยที่การแตกของหมอนรองรถไฟมีผลต่อ Damping property น้อยเมื่อเทียบกับชั้นหินโรยทางเนื่องจากขนาดของรอยแตกร้าวของหมอนรองรถไฟมีขนาดเล็กโดยจากผลการทดลองที่ได้สามารถเปรียบเทียบพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ที่เปลี่ยนไปเมื่อหมอนรองคอนกรีตถูกใช้งานจนเกิดความเสียหายและนำความรู้มาประยุกต์ในการประเมินพฤติกรรมในการรับแรงของโครงสร้างจากความเสียหายของทางรถไฟได้เพื่อใช้ในการออกแบบและวางแผนในการซ่อมบำรุงทางรถไฟชนิดมี

หินโรยทางให้มีประสิทธิภาพและมีอายุในการใช้งานที่ยืนยาวยิ่งขึ้นและยังสามารถนำความรู้ที่ได้ไปใช้ในการออกแบบและพัฒนาทางรถไฟชนิดมีหินโรยทางใหม่ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่น การออกแบบการวางตัวของหินโรยทางให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เป็นต้น

#### ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในวัสดุทดสอบนั้นเป็นการจำลองขึ้นมาโดยการนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามความเป็นจริงและแม่นยำมากขึ้นจึงควรเลือกใช้หมอนรองคอนกรีตที่มีสภาพความเสียหายที่เกิดจากการใช้งานจริง และแบบจำลองที่ใช้สำหรับการศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองแบบสองมิติซึ่งไม่สามารถจำลองโหมดที่เกิดจากการบิดได้ หากต้องการศึกษาโหมดการบิดจึงควรเลือกใช้แบบจำลองแบบสามมิติเพื่อให้เห็นโหมดของโครงสร้างที่ชัดเจนและมีความเหมาะสมในการใช้ศึกษามากกว่า นอกจากนี้เพื่อให้ได้ผลการวิจัยตรงตามความเป็นจริงควรศึกษากรณีที่หมอนรองรถไฟมีความเสียหายมากขึ้นและเสียหายในรูปแบบต่างๆมากยิ่งขึ้นควบคู่ไปกับกรณีที่หินโรยทางเกิดความเสียหาย

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จร่วรงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ ชยตม์ งามโขนง อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำ แนวคิด ความรู้ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆมาโดยตลอด งานวิจัยเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ ผู้ศึกษาจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอกราบขอบพระคุณพ่อ คุณแม่ และผู้ปกครอง ที่ได้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ และคอยให้กำลังใจที่ตีเสมอมา ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์สาขาวิชาโยธา ที่ช่วยสละเวลาคอยช่วยเหลือในการทำงานวิจัยชิ้นนี้ ขอขอบคุณพี่และเพื่อนๆ ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และปรึกษา จนทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Aktaş, B., Çeçen, F., Öztürk, H., Navdar, M.B., Öztürk, İ.Ş., 2022. Comparison of prestressed concrete railway sleepers and new LCR concrete sleepers with experimental modal analysis. *Engineering Failure Analysis* 131, 105821. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105821>
- [2] Choi, J.-Y., Shin, T.-H., Kim, S.-H., Chung, J.-S., 2023. Structural Integrity Assessment of Concrete Sleepers by Modal Test Technique. *Materials* 16, 5614. <https://doi.org/10.3390/ma16165614>
- [3] Kodai, M., Tsutomu, W., Masamichi, S., 2015. Damage detection method for sleepers based on vibration properties. *MATEC Web of Conferences* 24. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20152405005>

- [4] Liu, G., Cong, J., Wang, P., Du, S., Wang, L., Chen, R., 2022. Study on vertical vibration and transmission characteristics of railway ballast using impact hammer test. *Construction and Building Materials* 316, 125898. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125898>
- [5] Ngamkhanong, C., Kaewunruen, S., 2020. Effects of under sleeper pads on dynamic responses of railway prestressed concrete sleepers subjected to high intensity impact loads. *Engineering Structures* 214, 110604. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110604>
- [6] Remennikov, A., Kaewunruen, S., 2006. Experimental Investigation on Dynamic Railway Sleeper/Ballast Interaction. *Experimental Mechanics* 46, 57–66. <https://doi.org/10.1007/s11340-006-5868-z>
- [7] Sinha, A. (Ed.), 2010. Vibration of Two-Degree-of-Freedom-Systems, in: *Vibration of Mechanical Systems*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 186–236. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511778087.005>
- [8] Kaewunruen, S., Tang, T., 2018. Dynamic behavior of railway ballast exposed to flooding condition: 8th International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment.
- [9] มาตรฐานการออกแบบทางรถไฟชนิดไม่มีหินโรยทาง สำหรับทางขนาด 1,435 มิลลิเมตร (BALLASTLESS TRACK DESIGN) มขร.-C-002-2564, 2021. . กรมการขนส่งทางราง กระทรวงคมนาคม. URL <https://www.drt.go.th/library/ballastlesstrack> (accessed 3.29.24).
- [10] มาตรฐานโครงสร้างทางรถไฟ [WWW Document], n.d. . YOTATHAI. URL <http://www.yotathai.com/2/post/2019/02/railway-structure-standards.html> (accessed 3.29.24).