

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของระบบรางรถไฟชนิดมีหินโรยทางในห้องปฏิบัติการ Vibration analysis of in-situ ballasted railway system

กัจฉวนิชย์ สุขเจริญ^{1*} นิตินกร นรภัยพิพาษา² อาณัติ หาททรัพย์³
และ ชาวสวน กาญจนมัย¹

¹ศูนย์แห่งความเป็นเลิศทางวิชาการด้านวิศวกรรมและสมรรถนะของวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

²บริษัท นิตินกร รีเสิร์ช พาร์ตเนอร์ จำกัด อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี 12150

³ศูนย์ทดสอบมาตรฐานระบบขนส่งทางราง สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

*ติดต่อ: kijvanish.s@gmail.com

บทคัดย่อ

ระบบรางรถไฟชนิดมีหินโรยทางในห้องปฏิบัติการ ได้ถูกใช้เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการสั่นสะเทือน โดยระบบรางนี้ประกอบด้วย หินโรยทาง หมอนรองราง แผ่นรองราง คลิปยึดราง และ ราง การทดสอบการสั่นสะเทือนทำโดยใช้ค้อนกระทบเพื่อกระตุ้น และ วัดการตอบสนองของการสั่นสะเทือนด้วยอุปกรณ์วัดความเร่ง การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นถูกแปลงจากโดเมนของเวลา ให้อยู่ในโดเมนของความถี่ โดยใช้วิธีการแปลงฟูรีเยอย่างรวดเร็ว ผลที่ได้ถูกใช้วิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติของระบบรางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลกระทบของตำแหน่งการกระทบเพื่อกระตุ้น และ ตำแหน่งการวัดการตอบสนองของการสั่นสะเทือน ต่อความถี่ธรรมชาติของระบบรางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง การศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทาง ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการสั่นสะเทือน ของระบบรางรถไฟชนิดมีหินโรยทางระหว่างการใช้งานจริง

คำหลัก: ระบบรางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง, การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน, ความถี่ธรรมชาติ

Abstract

In-situ ballasted railway system was used for the development of experimental vibration analysis. The system composes of ballast, concrete sleeper, rail pad, rail clip, and rail. The excited impact was applied using an impact hammer. Then, the response vibration was detected using an accelerometer. The response vibration amplitude in time domain was transformed to the response vibration amplitude in frequency domain by the Fast Fourier Transform (FFT), and the series of natural frequencies were evaluated. The influences of locations of the excited impact and the detected response vibration on the natural frequencies were investigated. Finding can be applied as a guideline for the vibration analysis of ballasted railway system during service.

Keywords: ballasted railway system, vibration analysis, natural frequency

1. บทนำ

การขนส่งทางรถไฟเป็นระบบการขนส่งที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดระบบหนึ่ง เนื่องจากมีความปลอดภัย ราคาถูก และสามารถขนส่งได้เป็นจำนวนมาก ระบบรางรถไฟชนิดมีหินโรยทางเป็นโครงสร้างระบบรางที่ใช้อย่างแพร่หลายทั่วโลก เนื่องจาก สามารถก่อสร้างได้รวดเร็ว ต้นทุนการก่อสร้างต่ำ และ บำรุงรักษาง่าย

ในขณะที่รถไฟเคลื่อนที่บนรางด้วยความเร็ว ส่งผลให้เกิดภาระแบบพลวัตที่อยู่ในลักษณะของการสั่นสะเทือน ถ้าการสั่นสะเทือนนี้ สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของระบบรางรถไฟ จะทำให้ระบบรางรถไฟเกิดการสั่นอย่างรุนแรงเรียกว่า การสั่นพ้อง (resonant) อาจทำให้เกิดความเสียหายในระบบราง และ อาจเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงขึ้นได้ โดยส่วนประกอบที่

อ่อนไหวต่อความเสียหายจากการสั่นสะเทือน คือ หมอนรองรางรถไฟคอนกรีต ซึ่งเป็นวัสดุเปราะ

ในอดีตได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนของระบบรางจำนวนมาก เช่น Esveld [1] ได้อธิบายว่า ระหว่างการเคลื่อนที่ของรถไฟ ถ้ารางที่ไม่เรียบ รอยเชื่อมรางที่ไม่ดี และ ล้อรถไฟที่ไม่กลม สามารถทำให้เกิดการสั่นสะเทือน 0-2000 Hz ในช่วงเวลาที่ผ่านการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนในระบบรางรถไฟด้วยวิธีโมดัล (experimental modal analysis) เป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย ถูกใช้ทดสอบพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนที่มีประสิทธิภาพ และ ใช้อย่างแพร่หลาย โดยใช้ค้อนกระทบ (impact hammer) เพื่อกระตุ้น และ วัดการตอบสนองของการสั่นสะเทือนด้วยอุปกรณ์วัดความเร่ง (accelerometer) การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นถูกแปลงจากโดเมนของเวลา ให้อยู่ในโดเมนของความถี่ โดยใช้วิธีการแปลงฟูริเยอร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) ผลที่ได้ถูกใช้วิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency), อัตราส่วนการหน่วง (damping ratio) และลักษณะการสั่นสะเทือน (mode shape) ของหินโรยทาง หมอนรองรางและ แผ่นรองรางรถไฟ [2-4]

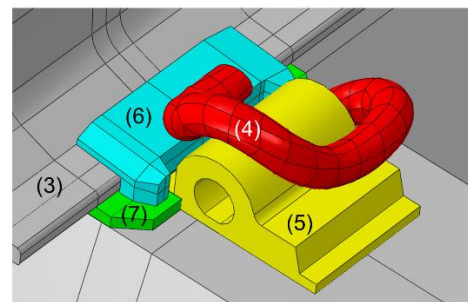
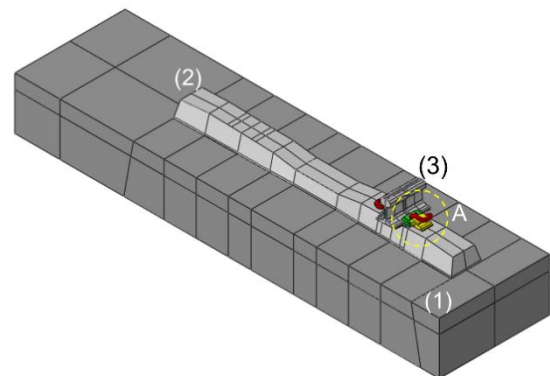
แต่การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนในระบบรางรถไฟในอดีตมีข้อจำกัดบางอย่าง เช่น จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร่งหลายตัว ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง และ ไม่สามารถติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร่งในตำแหน่งที่เกิดขบวนการเคลื่อนที่ของล้อ จากการที่ระบบรางรถไฟชนิดมีหินโรยทางประกอบด้วยชิ้นส่วนจำนวนมาก ซึ่งการกระตุ้นและวัดการตอบสนองบนชิ้นส่วน และ ตำแหน่งที่ต่างกันส่งผลต่อความชัดเจนของสัญญาณ และความถูกต้องของการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษา ผลกระทบของตำแหน่งของการกระทบเพื่อกระตุ้น และ ตำแหน่งของการวัดการตอบสนองของการสั่นสะเทือน ต่อความถี่ธรรมชาติของระบบรางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง ด้วย (1) การเปลี่ยนจุดวางตำแหน่งของอุปกรณ์วัดความเร่ง (accelerometer roving) และ (2) การเปลี่ยนจุดกระตุ้นโดยใช้ค้อนกระทบ (impact hammer roving) ความถี่ธรรมชาติของระบบรางรถไฟชนิดมีหินโรยทางจากการทดสอบทั้ง 2 วิธี

ถูกนำมาเปรียบเทียบกัน การศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทาง ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของการสั่นสะเทือนของระบบรางรถไฟชนิดมีหินโรยทางระหว่างการใช้งานจริง

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 ระบบรางรถไฟชนิดมีหินโรยทางในห้องปฏิบัติการ และ อุปกรณ์ทดสอบการสั่นสะเทือน

ระบบรางรถไฟชนิดมีหินโรยทางได้ถูกจำลอง ในห้องปฏิบัติการ โดยประกอบด้วย หินโรยทาง (ballast), หมอนรองราง (sleeper), ราง (rail), คลิปยึดราง (rail clip), แผ่นรองราง (rail pad), ป่าจากรองราง (rail shoulder) และฉนวน (insulator) ดังแสดงใน รูปที่ 1 และ อุปกรณ์ทดสอบการสั่นสะเทือนประกอบด้วย ค้อนกระทบหัวโลหะ (Kistler: 9726A20000), อุปกรณ์วัดความเร่ง (Kistler: 8640A50) และ อุปกรณ์เก็บข้อมูล (National Instrument: NI-9230) ดังแสดงในรูปที่ 2



A: rail-fastening system

รูปที่ 1 ระบบรางรถไฟชนิดมีหินโรยทางในห้องปฏิบัติการ

โดย (1) หินโรยทาง, (2) หมอนรองราง, (3) ราง, (4) คลิปยึดราง, (5) แผ่นรองราง, (6) ป่าจากรองราง และ (7) ฉนวน

2.2 การทดสอบการสั่นสะเทือน

2.2.1 วิธีการเปลี่ยนจุดวางตำแหน่งของอุปกรณ์วัดความเร่ง (accelerometer roving)

เป็นการใช้ค้อนกระตุ่นโครงสร้างที่ตำแหน่งเดียว คือ บริเวณหัวราง แต่เปลี่ยนตำแหน่งการวัดการสั่นสะเทือน ด้วยอุปกรณ์วัดความเร่ง โดยตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร่งมี 10 ตำแหน่ง บนหมอนรองราง แสดงดังรูปที่ 3

2.2.2 วิธีการเปลี่ยนจุดกระตุ้นโดยใช้ค้อน (impact hammer roving)

เป็นการกำหนดจุดวัดการสั่นสะเทือนด้วยอุปกรณ์วัดความเร่งที่ตำแหน่งเดียว คือ บริเวณหัวราง และ เปลี่ยนตำแหน่งในการกระตุ้นโครงสร้างโดยใช้ค้อน โดยตำแหน่งการกระตุ้นโครงสร้างของค้อนมี 10 ตำแหน่ง บนหมอนรองราง แสดงดังรูปที่ 3



(ก)

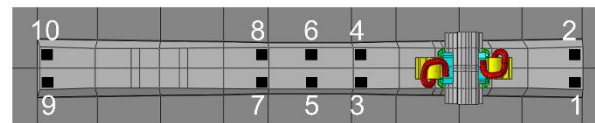


(ข)



(ค)

รูปที่ 2 อุปกรณ์ทดสอบการสั่นสะเทือน (ก) ค้อนกระแทก, (ข) อุปกรณ์วัดความเร่ง, (ค) และ อุปกรณ์เก็บข้อมูล



รูปที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร่งและตำแหน่งการกระตุ้นด้วยค้อนกระแทก

3. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

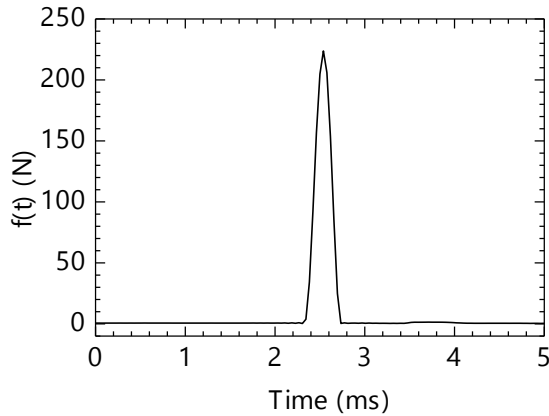
3.1 การเปลี่ยนจุดวางตำแหน่งของอุปกรณ์วัดความเร่ง (accelerometer roving)

แรงกระแทกของค้อนอยู่ในโดเมนของเวลา และแรงกระแทกของค้อนอยู่ในโดเมนของความถี่ แสดงดังรูปที่ 4(ก) และ รูปที่ 4(ข) ตามลำดับ กำหนดให้ช่วงสัญญาณที่มีความน่าเชื่อถือ และ ใช้ในการทดสอบการสั่นสะเทือนเป็น 0 ถึง -3 dB [6] ในขณะที่ช่วงสัญญาณขนาดมากกว่า -3dB เป็นช่วงความถี่ที่ไม่ใช้ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน จากการทดสอบพบว่า ช่วงความถี่ที่มีความน่าเชื่อถือของค้อนกระแทกอยู่ในช่วง 0-1657 Hz

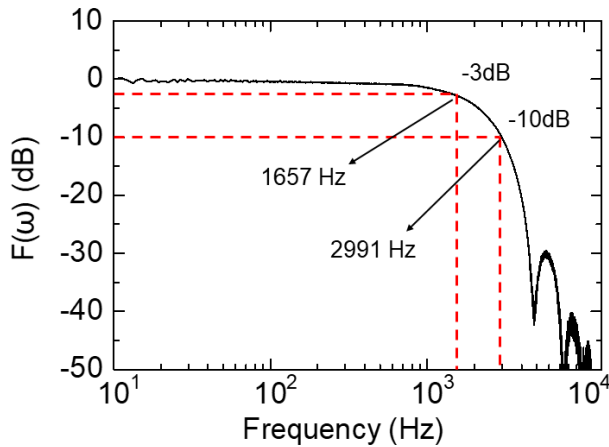
การตอบสนองต่อการสั่นสะเทือน วัดจากอุปกรณ์วัดความเร่งในโดเมนของเวลา ในตำแหน่งที่ 1, 3, 5, 7, 9 และ ตำแหน่งที่ 2, 4, 6, 8, 10 มีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นการสั่นสะเทือนในโดเมนของเวลา ของอุปกรณ์วัดความเร่ง ในตำแหน่งที่ 1, 5, 9 ถูกเปรียบเทียบในรูปที่ 5 ภายหลังวิธีการแปลงฟูรีเยอย่างรวดเร็ว การสั่นสะเทือนในโดเมนของความถี่ ของอุปกรณ์วัดความเร่ง ในตำแหน่งที่ 1, 5, 9 ถูกเปรียบเทียบในรูปที่ 6 โดยพบว่า ขนาดความเร่งขึ้นกับตำแหน่งอุปกรณ์วัดความเร่ง แต่ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร่งที่ตำแหน่งที่ 1 ให้ขนาดความเร่งสูงที่สุด

DRC – 001

ซึ่งง่ายต่อการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติของระบบราง
รถไฟชนิดมีหินโรยทาง

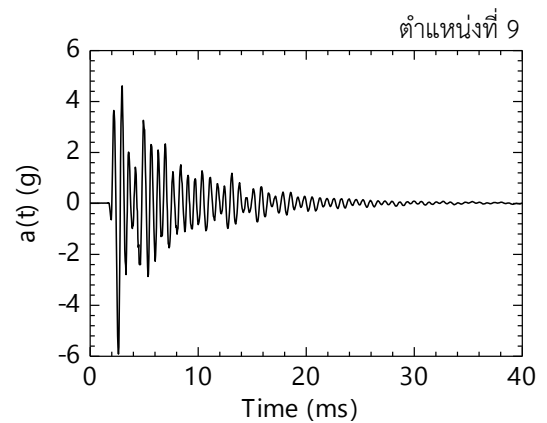
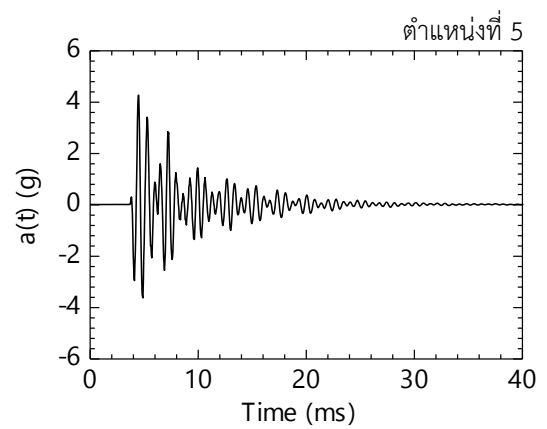
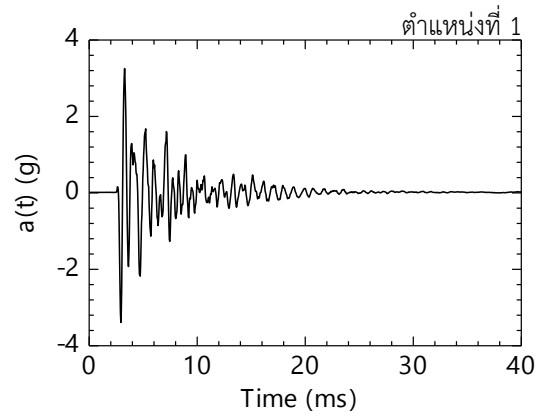


(ก)



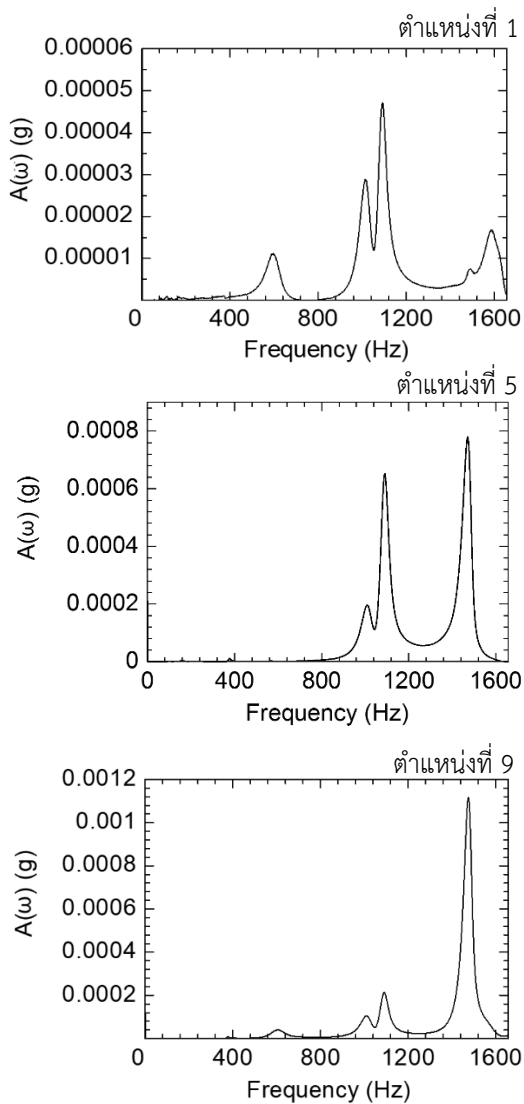
(ข)

รูปที่ 4 การเปลี่ยนจุดวางตำแหน่งของอุปกรณ์วัด
ความเร่ง (ก) แรงกระทำของค้อนอยู่ในโดเมนของเวลา
และ (ข) แรงกระทำของค้อนอยู่ในโดเมนของความถี่



รูปที่ 5 การสั่นสะเทือนในโดเมนของเวลา
ของการเปลี่ยนจุดวางตำแหน่งของอุปกรณ์วัดความเร่ง
ในตำแหน่งที่ 1, 5, 9

DRC – 001

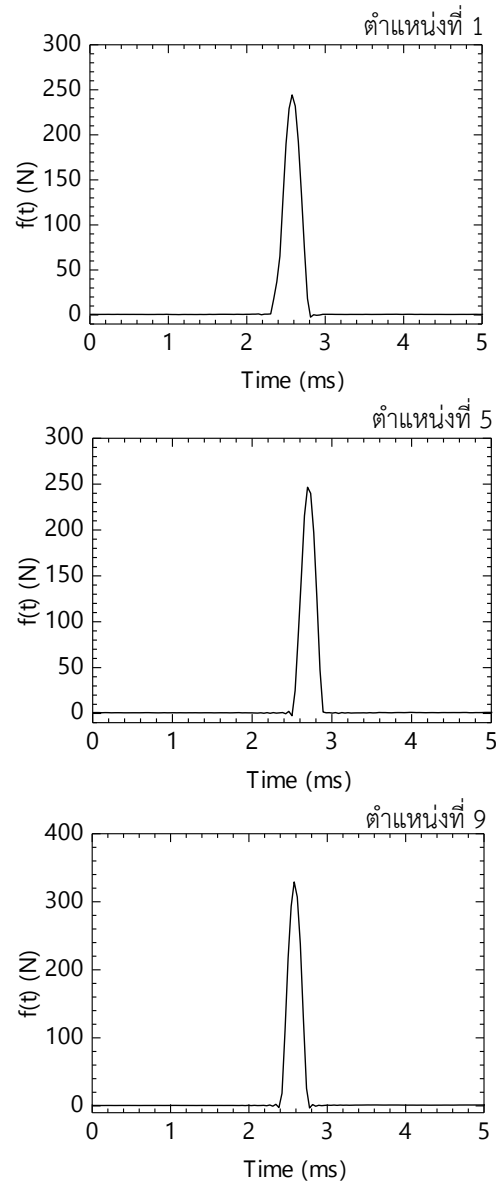


รูปที่ 6 การสั่นสะเทือนในโดเมนของความถี่ ของการเปลี่ยนจุดวางตำแหน่งของอุปกรณ์วัดความเร่ง ในตำแหน่งที่ 1, 5, 9

3.2 การเปลี่ยนจุดกระตุ้นโดยใช้ค้อน (impact hammer roving)

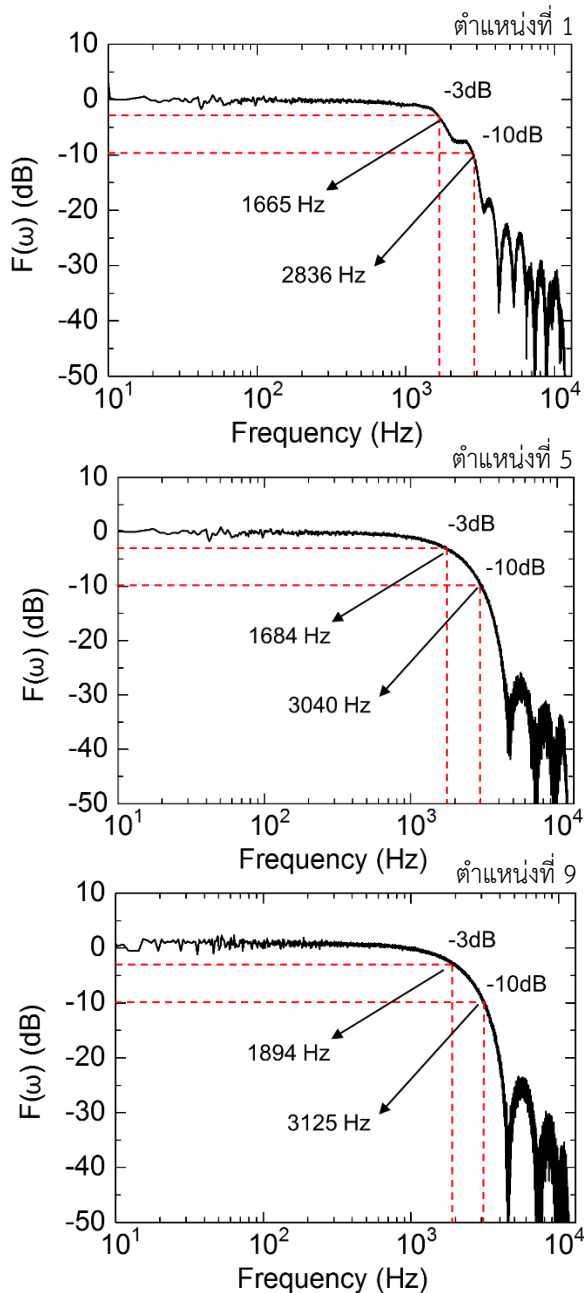
แรงกระทกของค้อนอยู่ในโดเมนของเวลา ในตำแหน่งที่ 1, 3, 5, 7, 9 และ ตำแหน่งที่ 2, 4, 6, 8, 10 มีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นแรงกระทกของค้อนอยู่ในโดเมนของเวลา ในตำแหน่งที่ 1, 5, 9 ถูกเปรียบเทียบในรูปที่ 7 ภายหลังจากวิธีการแปลงฟูรีเยอย่างรวดเร็ว แรงกระทกของค้อนในโดเมนของความถี่ ในตำแหน่ง

ที่ 1, 5, 9 ถูกเปรียบเทียบในรูปที่ 8 จากช่วงสัญญาณที่มีความน่าเชื่อถือ และ ใช้ในการทดสอบการสั่นสะเทือนเป็น 0 ถึง -3 dB [6] พบว่า ช่วงความถี่ที่มีความน่าเชื่อถือของค้อนกระทกอยู่ในช่วง 0-1665 Hz โดยพบว่า ขนาดความเร่งขึ้นกับตำแหน่งอุปกรณ์วัดความเร่ง แต่ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน และ พบว่าการกระตุ้นโดยใช้ค้อนที่ตำแหน่งที่ 1 ให้ขนาดความเร่งสูงที่สุด ซึ่งง่ายต่อการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติของระบบรางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง



รูปที่ 7 แรงกระทกของค้อนในโดเมนของเวลา ของการเปลี่ยนจุดกระตุ้นโดยใช้ค้อน ในตำแหน่งที่ 1, 5, 9

DRC – 001



รูปที่ 8 แรงกระทำแก่ของค้อนในโดเมนของความถี่ ของ การเปลี่ยนจุดกระตุ้นโดยใช้ค้อน ในตำแหน่งที่ 1, 5, 9

3.3 ความถี่ธรรมชาติของระบบรางรถไฟชนิดมีหินโรยทางในห้องปฏิบัติการ

ผลกระทบของ ตำแหน่งของการกระทำเพื่อ กระตุ้น และ ตำแหน่งของการวัดการตอบสนองของการ สั่นสะเทือน ต่อความถี่ธรรมชาติของระบบรางรถไฟชนิด มีหินโรยทาง ถูกศึกษาด้วยวิธี (1) การเปลี่ยนจุดวาง

ตำแหน่งของอุปกรณ์วัดความเร่ง (accelerometer roving) และ (2) การเปลี่ยนจุดกระตุ้นโดยใช้ค้อน (impact hammer roving) ความถี่ธรรมชาติของระบบ รางรถไฟชนิดมีหินโรยทางจากการทดสอบทั้ง 2 วิธี ถูก เฉลี่ยจาก 10 ตำแหน่ง และ นำมาเปรียบเทียบกับกัน ดัง ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความถี่ธรรมชาติของระบบรางรถไฟชนิดมีหิน โรยทางในห้องปฏิบัติการ

Mode	Natural frequency (Hz)		
	Accelerometer roving	Hammer roving	Difference (%)
1	604.16	602.45	0.28
2	1011.20	1017.52	0.63
3	1085.78	1087.74	0.18
4	1478.32	1485.48	0.48

เมื่อพิจารณาความแตกต่างของความถี่ธรรมชาติ โดยใช้ค่าจากการเปลี่ยนจุดวางตำแหน่งของอุปกรณ์วัด ความเร่ง (accelerometer roving) เป็นค่าอ้างอิง พบว่า ความแตกต่างของความถี่ธรรมชาติของทั้ง 2 วิธีมีค่าสูงสุด เป็น 0.63% ที่ความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 2 จากการที่ ความแตกต่างของความถี่ธรรมชาติที่วัดได้จาก 2 วิธี เกิดขึ้นเล็กน้อย ($< 1\%$) ดังนั้นการวิเคราะห์การ สั่นสะเทือน ของระบบรางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง ด้วย วิธีเปลี่ยนจุดวางตำแหน่งของอุปกรณ์วัดความเร่งบน หมอนรองรางจึงมีความเหมาะสม เมื่อต้องการลดจำนวน อุปกรณ์วัดความเร่ง ลดค่าใช้จ่าย และ หลีกเลี่ยงการ เคลื่อนที่ของล้อรถไฟ

นอกจากนี้ข้อมูลจากอุปกรณ์วัดความเร่งบน หมอนรองราง สามารถใช้ใน (1) การวิเคราะห์รูปแบบการ สั่นสะเทือน (mode shape) ที่ความถี่ธรรมชาติต่าง ๆ ของหมอนรองรางได้ ซึ่งทำจากคอนกรีต และ มีความ เสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายจากการสั่นสะเทือน และ (2) การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เชิง

DRC – 001

ตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element analysis) ซึ่งสามารถลดเวลา และ ค่าใช้จ่ายจากการทดสอบการสั่นสะเทือนได้ ซึ่งเป็นงานวิจัยที่จะทำต่อไปในอนาคต

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษา ผลกระทบของ ตำแหน่งของการกระแทกเพื่อกระตุ้น และ ตำแหน่งของการวัดการตอบสนองของการสั่นสะเทือน ต่อความถี่ธรรมชาติของระบบรางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง ด้วยวิธี (1) การเปลี่ยนจุดวางตำแหน่งของอุปกรณ์วัดความเร่ง (accelerometer roving) และ (2) การเปลี่ยนจุดกระตุ้นโดยใช้ค้อน (impact hammer roving) ความถี่ธรรมชาติจากการทดสอบทั้ง 2 วิธี ถูกนำมาเปรียบเทียบกัน พบว่าความแตกต่างของความถี่ธรรมชาติที่วัดได้จาก 2 วิธี เกิดขึ้นเล็กน้อย ($< 1\%$) ดังนั้นการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน ของระบบรางรถไฟชนิดมีหินโรยทาง ด้วยวิธีการเปลี่ยนจุดวางตำแหน่งของอุปกรณ์วัดความเร่งบนหมอนรองรางจึงมีความเหมาะสม เมื่อต้องการลดจำนวนอุปกรณ์วัดความเร่ง ลดค่าใช้จ่าย และ หลีกเลี่ยงการเคลื่อนที่ของล้อรถไฟ ผลจากการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทาง ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการสั่นสะเทือน ของระบบรางรถไฟชนิดมีหินโรยทางระหว่างการใช้งานจริง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยความเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และ ทุนจาก (1) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และ (2) คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

6. เอกสารอ้างอิง

[1] C. Esvelde. Modern Railway Track. 2nd ed. MRT-Productions, 2001.

[2] H.F.Lam, M.T.Wong. Railway Ballast Diagnose through Impact Hammer Test. Procedia Engineering 2011; 14: 185-194

[3] S. Kaewunruen, A. Remennikov. Sensitivity analysis of free vibration characteristics of an in-situ railway concrete sleeper to variations of rail pad parameters 2006; 298(1-2): 453-461

[4] S. Kaewunruen, A. Remennikov. An Alternative Rail Pad Tester for Measuring Dynamic Properties of Rail Pads Under Large Preloads 2008; 48(1): 55-64

[5] D. J. Ewins. Modal Testing: Theory, Practice and Application, 2nd ed. Research Studies Press, 2000.

[6] A.P. De Man. Dynatrack: A survey of dynamic railway track properties and their quality. Delft University Press, 2002.