

การคาดการณ์ของคลื่นการสั่นสะเทือนที่เกิดจาก  
รถไฟความเร็วสูงในพื้นที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง

PREDICTION OF VIBRATION WAVES CAUSED BY HIGH-SPEED TRAINS IN  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG AREA



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2564

KMITL-2021-EN-M-093-031

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREDICTION OF VIBRATION WAVES CAUSED BY HIGH-SPEED TRAINS IN  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG AREA



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING

SCHOOL OF ENGINEERING

2021

KMITL-2021-EN-M-093-031

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2021**

**SCHOOL OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การคาดการณ์ของคลื่นการสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟความเร็วสูง ในพื้นที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
นักศึกษา	นายบุญยกร วรवास
รหัสประจำตัว	61601012
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.อำพน จรัสจรุงเกียรติ

### บทคัดย่อ

การพัฒนาโครงการรถไฟความเร็วสูงมีการขยายตัวจากนโยบายการพัฒนาประเทศ โดย การวางแผนของเส้นทางดังกล่าว อาจมีผลกระทบต่อทางด้าน การสั่นสะเทือนอย่างมีนัยสำคัญต่อพื้นที่ ที่อยู่ ในแนวเส้นทางรถไฟความเร็วสูง งานวิจัยเล่มนี้จึงต้องการศึกษาเพื่อคาดการณ์ พฤติกรรม การสั่นสะเทือนที่อาจเกิดขึ้นจากการวิ่งผ่านของรถไฟความเร็วสูง ในพื้นที่กรณีศึกษา สจล.

การศึกษาประยุกต์โดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ในการคำนวณแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจาก น้ำหนักของรถไฟที่วิ่งผ่าน และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับค่าการสั่นสะเทือนที่วัดได้ จริง ก่อนจะทำการทำนายค่าแรงสั่นสะเทือนของรถไฟความเร็วสูงจากแบบจำลองดังกล่าว

ผลจากการศึกษาพบว่า คลื่นแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟความเร็วสูง จะมีช่วงคลื่นที่สั้น กว่าของรถไฟความเร็วต่ำ เนื่องจากการเคลื่อนตัวที่เร็วของรถไฟ โดยลักษณะการแพร่กระจายตัวของ คลื่นจากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ ภายใต้สมมติฐานที่ให้ตัวกลางการเคลื่อนที่ของ คลื่นแรงสั่นสะเทือนเป็นดินเหนียวผลการวิเคราะห์พบว่า คลื่นการสั่นสะเทือนจะมีความรุนแรงที่มาก ที่ระยะ 1-5 เมตรแรก คลื่นจะมีลดทอนความรุนแรงลงอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระยะ 5-15 เมตร ด้วย อัตราการลดทอนที่น้อยลง และคลื่นได้ถูกลดทอนจนหมดสิ้นหรือแทบไม่เห็นผลที่ระยะ 18 เมตร

**คำสำคัญ:** รถไฟความเร็วสูง, การสั่นสะเทือน, การสั่นสะเทือนของรถไฟ, การสั่นสะเทือนของ โครงสร้าง

<b>Thesis</b>	PREDICTION OF VIBRATION WAVES CAUSED BY HIGH-SPEED TRAINS IN KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG AREA
<b>Student</b>	Mr.Boonyakorm Warawas
<b>Student ID.</b>	61601012
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Civil Engineering
<b>Year</b>	2021
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Amphon Jarasjarungkiat

## ABSTRACT

The development of high-speed rail projects has been expanded from the national development policy. The project could have a significant seismic impact on the surrounding areas along the high-speed rail line. This research aims to predict the potential vibration behavior of high-speed trains. In the case study area KMITL.

An applied study using dynamic model to calculate the vibration caused by the weight of a passing train. Then compare the results obtained from the model with the actual measured vibration values. The vibration values of high-speed trains were then predicted from the model.

The results of the study showed that vibration waves caused by high-speed trains have shorter wavelength than the low-speed train. Due to the fast movement of the train. The wave propagation calculate by computer program under the assumption that the intermediary is clay. At the first 1-5 meters, the vibration waves are very violent. At 5–15 meters waves have a significant reduction in intensity with lower attenuation rates and the waves were completely reduced or almost no longer visible at 18 meters

**Keywords:** High-speed train, infrastructure, vibration, train induce vibration, structure vibration

## กิติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อำพน จรัสจรวงเกียรติ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์คณะกรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG) ที่มอบทุนสนับสนุนงานวิจัยบางส่วน จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จเป็นรูปเป็นร่างได้ในที่สุด

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่านทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

บุญยกร วรवास

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

บทคัดย่อ.....	I
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 ปัญหาของงานวิจัย .....	4
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	7
1.4 วัตถุประสงค์.....	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	9
2.1 การสั่นสะเทือนของพื้นดินเกิดจากการจราจรของรถไฟ .....	9
2.1.1 แหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือน (Vibration source).....	9
2.1.2 การแผ่กระจายตัวของคลื่นสั่นสะเทือน (Propagation).....	12
2.1.3 แหล่งรับคลื่นการสั่นสะเทือน (Receiver).....	14
2.2 ความรู้พื้นฐานของการสั่นสะเทือนภาคพื้นดิน .....	14
2.2.1 ประเภทของคลื่น (Wave types).....	14
2.2.2 ปรากฏการณ์การแพร่กระจายคลื่น(Wave propagation phenomena .....	17
2.3 ผลกระทบของแรงสั่นสะเทือน (Effects of vibration) .....	20
2.3.1 การตอบสนองของมนุษย์ (Human response) .....	20
2.3.2 ผลกระทบการสั่นสะเทือนต่ออุปกรณ์ที่ไวสัมผัส Vibration effects on sensitive equipment.....	23
2.3.3 แรงสั่นสะเทือนส่งผลกระทบต่ออาคาร (Vibration impacts on buildings) ..	25
2.4 วิธีการผ่อนบรรเทาแรงสั่นสะเทือน .....	26
2.4.1 วิธีบรรเทาผลกระทบในแหล่งกำเนิด (Mitigation methods in the source).26	
2.4.2 วิธีการผ่อนบรรเทาที่ตัวกลางการแผ่กระจายแรงสั่นสะเทือน (Mitigation methods in the path) .....	26
2.4.3 วิธีการผ่อนบรรเทาที่ตัวอาคาร (Mitigation methods in the building).....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

2.5 แบบจำลองในการทำนายค่า (PREDICTION MODELS) .....	28
2.5.1 ลักษณะของแบบจำลอง .....	29
2.5.2 แบบจำลองที่แนะนำโดย DOT-T-95-16 และ DOT-293630-1.....	30
2.5.3 แบบจำลองนอร์เวย์ .....	34
2.6 พลศาสตร์ทางโครงสร้าง (Structural dynamic) .....	34
2.6.1 การสั่นแบบอิสระ (Free Vibration).....	35
2.6.2 การสั่นพ้อง (resonance).....	41
2.7 ทางรถไฟและโครงสร้างทางรถไฟในประเทศไทย.....	42
2.7.1 ประเภทของระบบขนส่งทางรางในประเทศไทย.....	42
2.7.2 โครงสร้างทางรถไฟ.....	44
2.8 แนวความคิด และงานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง .....	47
2.8.1 การสั่นสะเทือนที่ถูกทำให้เกิดจากรถไฟ .....	50
2.8.2 การขยายคลื่นการสั่นสะเทือนของดิน .....	52
2.8.3 การวัดการสั่นสะเทือนที่อยู่ใกล้แนวรางรถไฟ.....	52
2.8.4 การวิเคราะห์สัญญาณ .....	55
2.8.5 ข้อกำหนดความปลอดภัยสำหรับการสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟ.....	56
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	57
3.1 การวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟ .....	58
3.1.1 ประเภทของระบบขนส่งทางรางบริเวณพื้นที่ สจล.....	58
3.2 การสร้างแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ .....	59
3.3 ข้อมูลจำเพาะของรถไฟ Train Configuration and Loading .....	61
3.3.1 การจำลองรถไฟความเร็วปานกลาง-ความเร็วต่ำ.....	63
3.3.2 การจำลองรถไฟความเร็วสูง .....	64
3.4 ข้อมูลลักษณะจำเพาะของรางรถไฟ.....	64
3.5 วิธีการคำนวณการสั่นสะเทือนจากโมเดลพลศาสตร์ของล้อกับราง .....	65
3.5.1 การคำนวณการสั่นสะเทือน.....	65
3.5.2 ค่าความแข็งของทางรถไฟ train track stiffness (k) .....	69
3.6 การวัดค่าแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟในพื้นที่ สจล.....	72
3.6.1 วิธีการวัดการสั่นสะเทือนที่อยู่ใกล้แนวรางรถไฟ.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

3.6.2 การวิเคราะห์สัญญาณ .....	72
3.6.3 ตารางการเดินทางไฟ .....	73
3.6.4 การวัดความเร่งเชิงพลศาสตร์ .....	74
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	75
4.1 สถานีทดสอบ .....	77
4.1.1 สถานีที่ 001(sta.001).....	77
4.1.2 สถานีที่ 002(sta.002).....	77
4.1.3 สถานีที่ 003(sta.003).....	77
4.1.4 สถานีที่ 004(sta.004).....	77
4.1.5 สถานีที่ 005(sta.005).....	77
4.1.6 สถานีที่ 006(sta.006).....	77
4.1.7 สถานีที่ 007(sta.007).....	77
4.2 ค่าความเร่งที่วัดได้ .....	78
4.2.1 ค่าความเร่งที่วัดได้บริเวณจุดวัดที่ 1 sta.001.....	79
4.2.2 ค่าความเร่งที่วัดได้บริเวณจุดวัดที่ 2 sta.002.....	82
4.2.3 ค่าความเร่งที่วัดได้บริเวณจุดวัดที่ 3 sta.003.....	85
4.2.4 ค่าความเร่งที่วัดได้บริเวณจุดวัดที่ 4 sta.004.....	88
4.2.5 ค่าความเร่งที่วัดได้บริเวณจุดวัดที่ 5 sta.005.....	91
4.2.6 ค่าความเร่งที่วัดได้บริเวณจุดวัดที่ 6 sta.006.....	94
4.2.7 ค่าความเร่งที่วัดได้บริเวณจุดวัดที่ 7 sta.007.....	97
4.3 ค่าความเร่งที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองทางพลศาสตร์.....	99
4.4 การเปรียบเทียบค่าความเร่งของการสั่นสะเทือนระหว่างแบบจำลองและค่าที่วัดได้ ..	104
4.5 การคาดการณ์คลื่นการสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟความเร็วสูง ด้วยแบบจำลองทาง พลศาสตร์ .....	106
4.6 ผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนของรถไฟความเร็วสูง ภายในบริเวณพื้นที่ สจล .....	110
4.6.1 ผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือน ที่เกิดจากรถไฟ Sta.005 ผ่านการคำนวณด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	110
4.6.2 ผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนที่คำนวณด้วยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ ที่เกิดจาก รถไฟ ความเร็ว 100 กม/ชม ผ่านการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

4.6.3 ผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนที่คำนวณด้วยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ ที่เกิดจากรถไฟ ความเร็ว 150 กม/ชม ผ่านการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	115
4.6.4 ผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนที่คำนวณด้วยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ ที่เกิดจากรถไฟ ความเร็ว 200 กม/ชม ผ่านการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	117
4.6.5 ผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนที่คำนวณด้วยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ ที่เกิดจากรถไฟ ความเร็ว 250 กม/ชม ผ่านการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	119
4.6.6 เปรียบเทียบ การสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟที่ต่างความเร็วกันที่ระยะห่างจากรางรถไฟต่างๆ.....	122
4.6.7 แผนที่ผลกระทบในพื้นที่ สจล. ....	126
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	127
5.1 ผลที่ได้จากงานวิจัย.....	127
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย .....	128
5.3 การนำไปใช้ประโยชน์ .....	128
5.4 แนวทางการพัฒนาต่อยอดผลงานในอนาคต.....	129
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ.....	130
เอกสารอ้างอิง.....	132
ภาคผนวก.....	138
ประวัติผู้เขียน.....	145

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าสัดส่วนการลดทอนพลังงานกับระยะทาง .....	18
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าสัดส่วนการลดทอนแอมพลิจูดกับระยะทาง .....	19
ตารางที่ 2.3 การสั่นสะเทือนที่เกิดจากพื้นดิน (ค่าเฉลี่ยกำลังสองความเร็วอนุภาค) เกณฑ์ผลกระทบ .....	22
ตารางที่ 2.4 เกณฑ์การสั่นสะเทือนที่เกิดจากพื้นดิน (ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความเร็วอนุภาค).....	23
ตารางที่ 2.5 เกณฑ์สำหรับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟ .....	23
ตารางที่ 2.6 รายละเอียดเส้นกราฟที่แสดงใน รูปที่ 2-11 .....	25
ตารางที่ 2.7 การคัดกรองระยะทางสำหรับการประเมินการสั่นสะเทือนดัดแปลงจาก .....	31
ตารางที่ 2.8 ปัจจัยการปรับเนื่องจากแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนที่จะใช้ร่วมกับเส้นโค้ง.....	33
ตารางที่ 2.9 ค่าจำเพาะที่แตกต่างไปตามรูปแบบของเหล็กรางรถไฟ[anderson et al][38] .....	47
ตารางที่ 2.10 ปัจจัยที่มีเกี่ยวข้องกับแหล่งที่มาของการสั่นสะเทือน .....	51
ตารางที่ 3.1 แสดงระยะห่างของล้อรถไฟและระยะห่างสะสมที่จะใช้ในการคำนวณ .....	63
ตารางที่ 3.2 เวลาล้อวิ่งถึงจุดที่สนใจเมื่อรถไฟมีความเร็ว 100 กม/ชม. (THN model).....	68
ตารางที่ 3.3 กลุ่มรถไฟเส้นทางออกจากกรุงเทพมหานคร .....	73
ตารางที่ 3.4 กลุ่มรถไฟเส้นทางเข้าสู่กรุงเทพมหานคร .....	73
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณในแบบจำลองพลศาสตร์ .....	103
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ความเร็วรถไฟ 200 กม/ชม.....	107
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ความเร็วรถไฟ 250 กม/ชม.....	108
ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ความเร็วรถไฟ 300 กม/ชม.....	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1-1 แสดงเส้นทางรถไฟฟ้าเชื่อม 3 สนามบิน.....	2
รูปที่ 1-2 แสดงแผนโครงการเชื่อมต่อเส้นทางรถไฟความเร็วสูง กรุงเทพ-หนองคาย.....	3
รูปที่ 1-3 แนวเส้นทางโครงการรถไฟความเร็วสูงเชื่อมสามสนามบิน.....	6
รูปที่ 1-4 แนวเส้นทางรถไฟความเร็วสูงในส่วนที่ผ่านกลางสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....	7
รูปที่ 2-1 การสั่นสะเทือนของพื้นดินที่เกิดจากการจราจรของรถไฟ.....	9
รูปที่ 2-2 รูปแบบโครงสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง.....	10
รูปที่ 2-3 การเคลื่อนที่ในแนวตั้งของดินสำหรับแรงที่กระทำเป็นจุด โดยมีความเร็วน้อยกว่า R-wave(รูปซ้าย) และมีความเร็วมากกว่า (รูปขวา).....	11
รูปที่ 2-4 ภาพแสดงการกระจายตัวของคลื่นสั่นสะเทือนในชั้นดิน.....	13
รูปที่ 2-5 คลื่น P wave [Michael J Lotingа] (L. Braille)2010 [9].....	15
รูปที่ 2-6 คลื่น S wave [Michael J Lotingа] (L. Braille)2010 [9].....	16
รูปที่ 2-7 L wave [Michael J Lotingа] (L. Braille)2010 [9].....	17
รูปที่ 2-8 ความผันแปรของแอมพลิจูดของแรงการสั่นสะเทือนในดิน.....	19
รูปที่ 2-9 กราฟการตอบสนองของมนุษย์.....	21
รูปที่ 2-10 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การตอบสนองของผู้คนในที่อยู่อาศัยต่อการสั่นสะเทือน.....	21
รูปที่ 2-11 เส้นโค้งเกณฑ์การสั่นสะเทือนทั่วไป ของ Amick(1997)[27].....	24
รูปที่ 2-12 การแยกอาคารเพื่อลดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากพื้นดินจากบริเวณใกล้เคียง.....	28
รูปที่ 2-13 เส้นโค้งการสั่นสะเทือนที่เกิดจากพื้นดินโดยทั่วไป.....	32
รูปที่ 2-14 แบบจำลองพลศาสตร์อย่างง่ายของระบบ.....	35
รูปที่ 2-15 การตอบสนองการกระจัดสำหรับระบบ SDOF ที่ไม่มีการหน่วง.....	37
รูปที่ 2-16 ระบบอย่างง่ายที่ประกอบด้วยมวล สปริง และตัวหน่วงการสั่นสะเทือน.....	38
รูปที่ 2-17 การสั่นสะเทือนแบบ Under damped motion.....	39
รูปที่ 2-18 การเคลื่อนที่แบบ Critically damped motion.....	40
รูปที่ 2-19 การเคลื่อนที่แบบ Over damped motion.....	40
รูปที่ 2-20 การตอบสนองการกระจัดสำหรับระบบ SDOF ที่ไม่มีการหน่วง.....	42
รูปที่ 2-21 แผนภาพโครงสร้างโดยทั่วไปของโครงสร้างทางรถไฟ.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 2-22 โครงสร้างทางรถไฟแบบมีระบบยึดเหนี่ยว .....	46
รูปที่ 2-23 ภาพแสดงการแพร่ผ่านของคลื่นการสั่นสะเทือนจากรถไฟบนดินและใต้ดินผ่านพื้นดินไปยัง โครงสร้าง ที่มา OANCEA[55].....	52
รูปที่ 2-24 ภาพตัวอย่างการวัดความเร่งของพื้นดิน และโครงสร้างกรณีของสถานี Gare do Oriente ในเมืองลิสบอน โปรตุเกส ที่มา Monteiro[54].....	54
รูปที่ 2-25 ภาพแสดงตัวอย่างการวัดความเร่งของพื้นดินในบริเวณใกล้กับแนวรางรถไฟ .....	55
รูปที่ 2-26 ภาพแสดงผลข้อมูลที่บันทึกได้บนโดเมนเวลาในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินใน แนวรางที่ตำแหน่ง ACC0 ที่มา OANCEA[55].....	55
รูปที่ 3-1 ภาพแสดงพื้นที่ทางรถไฟที่วิ่งผ่านบริเวณ สจล ในปัจจุบัน(ปี 2563).....	59
รูปที่ 3-2 ขั้นตอนการถ่ายแรงกระทำระหว่างล้อกับรางลงสู่พื้นดิน.....	60
รูปที่ 3-3 ภาพตัดขวางของโครงสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง .....	61
รูปที่ 3-4 แบบจำลองทางพลศาสตร์การกระทำระหว่างล้อกับรางและการถ่ายลงพื้นดิน .....	61
รูปที่ 3-5 ภาพแสดงระยะ ห่างระหว่างล้อแต่ละล้อของรถไฟความเร็วปกติ-ปานกลาง .....	62
รูปที่ 3-6 ค่าจำเพาะของรถไฟความเร็วปกติ - ความเร็วปานกลาง.....	63
รูปที่ 3-7 หน้าตัดรางขนาด 54 E 1.....	64
รูปที่ 3-8 หน้าตัดรางขนาด 60 E 1.....	65
รูปที่ 3-9 แบบจำลองพลศาสตร์ การกระทำระหว่างล้อกับรางของโครงสร้างทางรถไฟ สจล.....	66
รูปที่ 3-10 แบบจำลองพลศาสตร์ การกระทำระหว่างล้อกับรางของโครงสร้างทางรถไฟอย่างง่าย ...	66
รูปที่ 3-11 ตัวอย่างกราฟจากการรวมกันของสมการที่ (3.1)และ(3.2) โดยแกน x คือเวลา(วินาที) และแกน y คือค่าแอมพลิจูด .....	67
รูปที่ 3-12 ตัวอย่างกราฟการสั่นสะเทือน (จากแรงกระทำโดยล้อ 1 ล้อ) จากการคำนวณโดยสมการ (3.1)และ(3.2) โดยแกน x คือเวลา(วินาที) และแกน y คือค่าแอมพลิจูด.....	68
รูปที่ 3-13 ตัวอย่างกราฟการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการรวมกันของกราฟการสั่นสะเทือนล้อเดี่ยว จำนวน 16 ล้อ (4 ขบวนรถไฟ).....	69
รูปที่ 3-14 ตัวอย่างกราฟแสดงค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่าการสั่นสะเทือน(ความเร่ง)(เมตร/วินาทีกำลัง สอง) เมื่อกำหนดให้รถไฟมีความเร็ว 100 กม/ชม มีค่า damping ratio ที่ 1.85 เปอร์เซ็น.....	71
รูปที่ 3-15 ตัวอย่างกราฟแสดงค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่าการสั่นสะเทือน(ความเร่ง)(เมตร/วินาทีกำลัง สอง) เมื่อกำหนดให้รถไฟมีความเร็ว 300 กม/ชม มีค่า damping ratio ที่ 1.85 เปอร์เซ็น.....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 3-16 ชุดอุปกรณ์สำหรับทำการวัดการสั่นสะเทือน .....	72
รูปที่ 3-17 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงสั่นสะเทือน .....	72
รูปที่ 3-18 อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ data locker .....	74
รูปที่ 3-19 หัววัดความเร่ง (accelerometer) .....	74
รูปที่ 4-1 อุปกรณ์ภาคสนามที่ใช้ในการวัดค่าความเร่ง.....	75
รูปที่ 4-2 ภาพแสดงสถานีทดสอบแรงสั่นสะเทือนของรถไฟทั้ง 7 สถานี .....	76
รูปที่ 4-3 ภาพแสดงสถานีทดสอบที่1 sta.001บริเวณตรงข้ามตึกภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ใกล้ สถานีพระจอมเกล้า ทำการวัดโดยการติดตั้งหมุดในดินใกล้กับรางรถไฟ ระยะห่าง 4.341 เมตร....	79
รูปที่ 4-4 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่1 sta.001 (แกนX)ที่บันทึกได้บนโดเมนของ เวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนX (ตั้งฉากกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.001.....	80
รูปที่ 4-5 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่1 sta.001 (แกนY)ที่บันทึกได้บนโดเมนของ เวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนY (ขนานกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.001.....	80
รูปที่ 4-6 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่1 sta.001 (แกนZ) ที่บันทึกได้บนโดเมนของ เวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนZ (ตั้งฉากกับพื้นโลก) ที่ตำแหน่ง STA.001.....	81
รูปที่ 4-7 ภาพแสดงสถานีทดสอบที่2 sta.002 บริเวณใกล้รางรถไฟ ระหว่างสถานีบ้านทับช้าง-สถานี หัวหมาก ทำการวัดโดยการติดตั้งหมุดในดินใกล้กับรางรถไฟ ระยะห่าง 3.141 เมตร.....	82
รูปที่ 4-8 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่2 sta.002 (แกนX) ที่บันทึกได้บนโดเมนของ เวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนX (ตั้งฉากกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.002.....	83
รูปที่ 4-9 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่2 sta.002 (แกนY) ที่บันทึกได้บนโดเมนของ เวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนY(ขนานกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.002.....	83
รูปที่ 4-10 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่2 sta.002 (แกนZ)ที่บันทึกได้บนโดเมนของ เวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนZ(ตั้งฉากกับพื้นโลก) ที่ตำแหน่ง STA.002.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 4-11 ภาพแสดงสถานีทดสอบที่3 sta.003รางรถไฟหน้าหอพัก RNP ระหว่างสถานีพระจอมเกล้า-สถานีบ้านทับช้าง ทำการวัดโดยการติดตั้งหมุดในดินใกล้กับรางรถไฟ ระยะห่าง 2.778 เมตร	85
รูปที่ 4-12 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่3 sta.003 (แกนX) ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนX (ตั้งฉากกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.003	86
รูปที่ 4-13 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่3 sta.003 (แกนY)ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนY (ขนานกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.003	86
รูปที่ 4-14 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่3(ชุดที่ 1) sta.003 (แกนZ)ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนZ(ตั้งฉากกับพื้นโลก) ที่ตำแหน่ง STA.003	87
รูปที่ 4-15 ภาพแสดงสถานีทดสอบที่4 sta.004บริเวณสำนักงานเขตลาดกระบัง ทำการวัดความเร่งที่ฐานเสาของรางรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์	88
รูปที่ 4-16 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่4 sta.004 (แกนX) ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนX (ตั้งฉากกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.004	89
รูปที่ 4-17 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่4 sta.004 (แกนY) ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนY (ขนานกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.004	89
รูปที่ 4-18 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่4 sta.004 (แกนZ)ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนZ(ตั้งฉากกับพื้นโลก) ที่ตำแหน่ง STA.004	90
รูปที่ 4-19 ภาพแสดงสถานีทดสอบที่5 sta.005 บริเวณรางรถไฟระหว่างกลางสถานีคลองหลวงเพ่ง-สถานีหัวตะเข้ ทำการวัดความเร่งที่หมอนรางรถไฟโดยตรง	91
รูปที่ 4-20 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่5 sta.005 (แกนX) ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนX (ตั้งฉากกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.005	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 4-21 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่5 sta.005 (แกนY) ที่บันทึกได้บนโดเมน ของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนY (ขนานกับขบวนรถไฟ) ที่ ตำแหน่ง STA.005.....	92
รูปที่ 4-22 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่5 sta.005 (แกนZ) ที่บันทึกได้บนโดเมน ของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนZ(ตั้งฉากกับพื้นโลก) ที่ตำแหน่ง STA.005.....	93
รูปที่ 4-23 ภาพแสดงสถานีทดสอบที่6 sta.006 บริเวณระหว่างกลางสถานีวงศ์สว่าง-สถานีแยกติวา นนท์ ทำการวัดความเร่งที่ฐานเสารถไฟ.....	94
รูปที่ 4-24 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่6 sta.006 (แกนX) ที่บันทึกได้บนโดเมน ของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนX (ตั้งฉากกับขบวนรถไฟ) ที่ ตำแหน่ง STA.006.....	95
รูปที่ 4-25 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่6 sta.006 (แกนY) ที่บันทึกได้บนโดเมน ของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนY (ขนานกับขบวนรถไฟ) ที่ ตำแหน่ง STA.006.....	95
รูปที่ 4-26 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่6 sta.006 (แกนZ) ที่บันทึกได้บนโดเมน ของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนZ (ตั้งฉากกับพื้นโลก) ที่ตำแหน่ง STA.006.....	96
รูปที่ 4-27 ภาพแสดงสถานีทดสอบที่7 sta.007 บริเวณระหว่างกลางสถานีบางนา-สถานีอุดมสุข ทำ การวัดความเร่งที่ฐานเสารถไฟ.....	97
รูปที่ 4-28 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่7 sta.007 (แกนX) ที่บันทึกได้บนโดเมน ของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนX (ตั้งฉากกับขบวนรถไฟ) ที่ ตำแหน่ง STA.007.....	98
รูปที่ 4-29 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่7 sta.007 (แกนY) ที่บันทึกได้บนโดเมน ของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนY (ขนานกับขบวนรถไฟ) ที่ ตำแหน่ง STA.007.....	98
รูปที่ 4-30 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่7 sta.007 (แกนZ) ที่บันทึกได้บนโดเมน ของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนZ (ตั้งฉากกับพื้นโลก) ที่ตำแหน่ง STA.007.....	99
รูปที่ 4-31 กราฟการสั่นสะเทือน ของรถไฟเมื่อมีความเร็ว 100 กม/ชม $k = 40 \text{ kN/mm}$ .....	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 4-32 กราฟการสั่นสะเทือน ของรถไฟเมื่อมีความเร็ว 100 กม/ชม $k = 55$ kN/mm .....	101
รูปที่ 4-33 กราฟแสดงค่าความต่างของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (r.m.s. error) เมื่อเทียบค่าแรงสั่นสะเทือน จากแบบจำลองกับค่าสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จริง ที่ค่า $k$ ต่างๆ.....	102
รูปที่ 4-34 กราฟแสดงค่าความต่างของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (r.m.s. error) เมื่อเทียบค่าแรงสั่นสะเทือน จากแบบจำลองกับค่าสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จริง.....	102
รูปที่ 4-35 ค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างรางรถไฟโดยแบบจำลองทางพลศาสตร์ โดยใช้ตัวแปรตาม ตารางที่ 4.1 .....	104
รูปที่ 4-36 ค่าความเร็วการเคลื่อนตัวของโครงสร้างรางรถไฟโดยแบบจำลองทางพลศาสตร์.....	105
รูปที่ 4-37 ค่าความเร่งการเคลื่อนตัวของโครงสร้างรางรถไฟโดยแบบจำลองทางพลศาสตร์.....	105
รูปที่ 4-38 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าจากภาคสนาม .....	106
รูปที่ 4-39 กราฟแสดงค่าการสั่นสะเทือนของอนุภาครางรถไฟในแนวตั้งที่ความเร็ว 200 กม/ชม โดย แบบจำลองทางพลศาสตร์ .....	107
รูปที่ 4-40 กราฟแสดงค่าการสั่นสะเทือนของอนุภาครางรถไฟในแนวตั้งที่ความเร็ว 250 กม/ชม โดย แบบจำลองทางพลศาสตร์ .....	108
รูปที่ 4-41 กราฟแสดงค่าการสั่นสะเทือนของอนุภาครางรถไฟในแนวตั้งที่ความเร็ว 300 กม/ชม โดย แบบจำลองทางพลศาสตร์ .....	109
รูปที่ 4-42 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งของคลื่นสั่นสะเทือน ของรถไฟที่สถานีทดสอบ ที่ 5 ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟ ที่ 2 เมตร และ 6 เมตร ตามลำดับ.....	110
รูปที่ 4-43 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดขึ้นของคลื่นสั่นสะเทือน ของรถไฟที่สถานีทดสอบที่ 5 ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ.....	111
รูปที่ 4-44 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดขึ้นของคลื่นสั่นสะเทือน จากรถไฟที่สถานีทดสอบที่ 5 ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะ 2 และ 6 เมตร.....	111
รูปที่ 4-45 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดขึ้นของคลื่นสั่นสะเทือน จากรถไฟที่สถานีทดสอบที่ 5 ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ.....	112
รูปที่ 4-46 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งของคลื่นสั่นสะเทือนที่เกิดจากการคำนวณโดย แบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 100 กม/ชม ที่ระยะ 2 เมตร และ 6 เมตร ตามลำดับ .	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 4-47 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดจากการคำนวณโดย แบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 100 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ .....	113
รูปที่ 4-48 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดจากการคำนวณโดย แบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 100 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะ 2 และ 6 เมตร.....	113
รูปที่ 4-49 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดจากการคำนวณโดย แบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 100 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ .....	114
รูปที่ 4-50 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งของคลื่นสั้นสะเทือนที่เกิดจากการคำนวณโดย แบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 150 กม/ชม ที่ระยะ 2 เมตร และ 6 เมตร ตามลำดับ .	115
รูปที่ 4-51 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดจากการคำนวณโดย แบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 150 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ .....	115
รูปที่ 4-52 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดจากการคำนวณโดย แบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 150 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะ 2 และ 6 เมตร.....	116
รูปที่ 4-53 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดจากการคำนวณโดย แบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 150 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ .....	116
รูปที่ 4-54 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งของคลื่นสั้นสะเทือนที่เกิดจากการคำนวณโดย แบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 200 กม/ชม ที่ระยะ 2 เมตร และ 6 เมตร ตามลำดับ .	117
รูปที่ 4-55 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดจากการคำนวณโดย แบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 200 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ .....	118
รูปที่ 4-56 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดจากการคำนวณโดย แบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 200 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะ 2 และ 6 เมตร.....	118

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 4-57 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 200 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ.....	119
รูปที่ 4-58 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งของคลื่นสั้นสะเทือนที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 250 กม/ชม ที่ระยะ 2 เมตร และ 6 เมตร ตามลำดับ .	119
รูปที่ 4-59 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 250 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ.....	120
รูปที่ 4-60 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 250 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะ 2 และ 6 เมตร.....	120
รูปที่ 4-61 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 250 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ.....	121
รูปที่ 4-62 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ ที่แตกต่างกัน ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ.....	122
รูปที่ 4-63 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดของรถไฟต่างความเร็วเทียบกับระยะทางที่ห่างจากรางรถไฟ.....	123
รูปที่ 4-64 กราฟแสดงการวิเคราะห์ด้วยวิธี Fast Fourier Transform(FFT)ของค่าการสั่นสะเทือนที่ได้จากแบบจำลองพลศาสตร์รถไฟความเร็ว 200 กม./ชม. ....	124
รูปที่ 4-65 กราฟแสดงการวิเคราะห์ด้วยวิธี Fast Fourier Transform(FFT)ของค่าการสั่นสะเทือนที่ได้จากแบบจำลองพลศาสตร์รถไฟความเร็ว 250 กม./ชม. ....	124
รูปที่ 4-66 กราฟแสดงการวิเคราะห์ด้วยวิธี Fast Fourier Transform(FFT)ของค่าการสั่นสะเทือนที่ได้จากแบบจำลองพลศาสตร์รถไฟความเร็ว 300 กม./ชม. ....	125
รูปที่ 4-67 กราฟแสดงการวิเคราะห์ด้วยวิธี Fast Fourier Transform(FFT)ของค่าการสั่นสะเทือนที่ได้จากแบบจำลองพลศาสตร์รถไฟความเร็วต่างๆ.....	125
รูปที่ 4-68 แผนที่คาดการณ์ผลกระทบจากการเคลื่อนผ่านของรถไฟความเร็วสูง 200 กม/ชม.....	126
รูปที่ 6-1 ตัวอย่าง boring log ดินของ เขตลาดกระบัง และ จ.นครราชสีมา.....	130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 7-1 หมุดวัดแรงสั้นสะเทือน.....	138
รูปที่ 7-2 เครื่องรับสัญญาณ data locker.....	138
รูปที่ 7-3 ชุดอุปกรณ์ภาคสนาม.....	139
รูปที่ 7-4 การลงพื้นที่เก็บข้อมูล.....	139
รูปที่ 7-5 การลงพื้นที่เก็บข้อมูลในพื้นที่ตัวอย่าง.....	140
รูปที่ 7-6 การติดตั้งอุปกรณ์กับฐานเสาธงไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิง.....	140
รูปที่ 7-7 การเก็บค่าคลื่นตัวอย่างจากรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิง.....	141
รูปที่ 7-8 การติดตั้งหัววัดความเร่งเข้ากับหมุดวัดแรงสั้นสะเทือน.....	141
รูปที่ 7-9 การติดตั้งหมุดวัดแรงสั้นสะเทือน.....	142
รูปที่ 7-10 การติดตั้งหัววัดความเร่งเข้ากับหมอนรางรถไฟ.....	142
รูปที่ 7-11 การติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร่งกับเสาธงไฟฟ้า BTS.....	143
รูปที่ 7-12 การติดตั้งอุปกรณ์กับฐานเสาธงไฟฟ้า.....	143
รูปที่ 7-13 การแสดงผลค่าที่วัดได้จากหัววัดความเร่ง.....	144

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันปัญหาความสั่นสะเทือนจากจราจรส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับเส้นทางที่มีรถบรรทุกหนักผ่าน หรือในพื้นที่อยู่อาศัยริมเส้นทางรถไฟ แรงสั่นสะเทือนจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างอาคารและระบบสาธารณูปโภค ตลอดจนต่อผู้อาศัยที่อยู่ในบริเวณข้างเคียงที่มีการจราจรหรือการขนส่งระบบรางที่ผ่านในพื้นที่นั้น แม้ว่า การสั่นสะเทือนที่เกิดจากการจราจรบนรถไฟเป็นไปได้ยากมากที่จะสร้างความเสียหายให้กับอาคารและสิ่งปลูกสร้าง แต่ประเด็นด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมของปัญหาดังกล่าวควรได้รับการพิจารณาอย่างรอบคอบ นอกเหนือจากค่าบำรุงรักษาที่สูงเนื่องจากการสั่นสะเทือนที่มากเกินไปในโครงสร้างทางรถไฟแล้ว การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากรถไฟในพื้นที่ดินอาจทำให้เกิดความรำคาญต่อผู้คนที่อาศัยอยู่ใกล้ทางรถไฟหรือรบกวนการทำงานของอุปกรณ์ที่มีความละเอียดอ่อนต่อแรงสั่นสะเทือน ดังนั้นการเตรียมการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมก่อนที่จะสร้างทางรถไฟสายใหม่ผ่านพื้นที่ที่มีประชากรหนาแน่นหรือการพัฒนาเส้นทางรถไฟที่มีอยู่แล้วให้กลายเป็นเส้นทางที่มีการใช้งานหนักและเร็วมากยิ่งขึ้นจึงเป็นเรื่องที่สมควรทำในเวลาปัจจุบันที่มีการพัฒนาเส้นทางรถไฟในประเทศอย่างต่อเนื่อง

จากนโยบายการพัฒนาประเทศความมุ่งหวังที่จะสร้าง เขตระเบียบเศรษฐกิจภาคตะวันออก (EEC) โดยมุ่งพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานทางการคมนาคมขนส่ง เชื่อมโยงการเดินทางทั้งทางอากาศ ทางบก ทางราง ทางน้ำ แบบไร้รอยต่อ(Seamless Operation) โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันจากการลดเวลาการเดินทางและประหยัดค่าขนส่ง โครงการหลักอันหนึ่งในแผนการพัฒนานี้คือ การเชื่อมโยงการเดินทางของผู้โดยสารสนามบินหลัก (ดอนเมือง สุวรรณภูมิ อุตะเถา) เข้าด้วยกัน โดยใช้รถไฟความเร็วสูง เชื่อม 3 สนามบิน แบบไร้รอยต่อ โดยใช้โครงสร้างและแนวเส้นทางการเดินทางรถเดินของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแอร์พอร์ตลิงก์ (Airport Rail Link) ที่เปิดให้บริการอยู่ในปัจจุบัน โดยจะก่อสร้างทางรถไฟขนาด 1.435 เมตร (Standard Gauge) ส่วนต่อขยาย 2 จากสถานีพญาไท ไปยังสนามบินดอนเมือง และจากสถานีลาดกระบัง ไปยังสนามบินอุตะเถา พร้อมเชื่อมเข้าออกสนามบิน โดยใช้เขตทางเดิมของการรถไฟฯเป็นส่วนใหญ่ รวมระยะทาง 220 กม. มีผู้เดินรถรายเดียวกัน ซึ่งรถไฟความเร็วสูงมีความเร็วสูงสุด 250 กิโลเมตร/ชั่วโมง (สำหรับช่วงการเดินทางในเมืองคือ สถานีดอนเมืองถึง สถานีสุวรรณภูมิ สถานีฉะเชิงเทรา สถานีชลบุรี สถานีศรีราชา สถานีพัทยา และสถานีอุตะเถา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### รูปที่ 1-1 แสดงเส้นทางรถไฟฟ้าเชื่อม 3 สนามบิน

ที่มา: คณะกรรมการนโยบายเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (สกพอ.) [1]

อีกทั้งยังมีเส้นทางรถไฟความเร็วสูงเชื่อมที่ไปยังประเทศจีน หรือที่รู้จักกันในชื่อ เส้นทางรถไฟความเร็วสูงไทยจีน(สายอีสาน) รถไฟความเร็วสูงไทย-จีน สายอีสานเป็นระบบรถไฟฟ้าที่มีทั้งโครงสร้างระดับดินและยกระดับตลอดโครงการ มีแนวเส้นทางที่รองรับการเดินทางจากชานเมืองทางทิศเหนือ กรุงเทพมหานครฝั่งเหนือและจังหวัดใกล้เคียงด้านเหนือและภาคอีสาน เข้าสู่เขตใจกลางเมืองได้อย่างรวดเร็ว แนวเส้นทางเริ่มต้นจากสถานีกลางบางซื่อ วิ่งตรงไปทางทิศเหนือในเส้นทางเดียวกับรถไฟความเร็วสูงสายตะวันออกผ่านท่าอากาศยานดอนเมือง เชื่อมต่อกับรถไฟฟ้าชานเมืองสายสีแดงเข้มรถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ จากนั้นวิ่งตรงไปถึงจังหวัดนครราชสีมา รวมระยะทางในช่วงแรก 253 กิโลเมตร ใช้เวลาเดินทาง 1 ชั่วโมง 30 นาทีจากกรุงเทพมหานคร จากนั้นเส้นทางจะมุ่งขึ้นทางเหนือเพื่อไปยังประเทศลาวโดยผ่าน สถานีชุมทางบัวใหญ่ ขอนแก่น อุดรธานี สิ้นสุดที่จังหวัดหนองคาย รวมระยะทาง 617 กิโลเมตร ใช้เวลาเดินทาง 2 ชั่วโมง 15 นาที จากนครราชสีมา และ 3 ชั่วโมง 45 นาที จากกรุงเทพมหานคร โดยรวมทั้งสิ้นเส้นทางรถไฟจะเดินทางผ่านทั้งหมด 9 สถานี ได้แก่ สถานีกลางบางซื่อ, สถานีดอนเมือง, สถานีอยุธยา, สถานีสระบุรี, สถานีปากช่อง, สถานีนครราชสีมา, สถานีขอนแก่น, สถานีอุดรธานี, สถานีหนองคาย ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1-2 แสดงแผนโครงการเชื่อมต่อเส้นทางรถไฟความเร็วสูง กรุงเทพฯ-หนองคาย  
ที่มา: <http://news.ch3thailand.com>

จากรูปที่ 1-2 แนวเส้นทางต่อจากนี้จะเป็นแนวเส้นทางรถไฟความเร็วปานกลาง ลาว-จีน เพื่อเดินทางไปยังเวียงจันทน์ ประเทศลาว และต่อเนื่องไปยัง คุณหมิง ประเทศจีน ระยะทางรวมกว่า 1,011 กิโลเมตรเฉพาะในประเทศลาว 417 กิโลเมตร โดยใช้ระยะเวลาเดินทางรวมจาก กรุงเทพมหานคร ถึงคุณหมิง 13 ชั่วโมง 30 นาที โดยแนวเส้นทางในลาวจะเป็นทางเดี่ยวทั้งหมด ใช้ความเร็ว 160 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และเปลี่ยนกลับเป็นทางคู่เมื่อผ่าน บ่อเต็น ประเทศลาว

แบบจำลองการทำนายการสั่นสะเทือนภาคพื้นดินเป็นเครื่องมือที่สามารถใช้งานได้เป็นอย่างดีในการประเมินผลกระทบในขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการออกแบบทางรถไฟและการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการใช้แบบจำลองสามารถศึกษาปัญหาและเสนอวิธีบรรเทาผลกระทบหากจำเป็นในแต่ละช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากแบบจำลองเชิงตัวเลขนั้นต้องใช้เวลาานมากในการคำนวณแม้จะใช้คอมพิวเตอร์ช่วย จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาแบบจำลองเชิงประจักษ์หรือการวิเคราะห์แบบง่ายขึ้นเพื่อศึกษาการเกิดการสั้นสะเทือนในบริเวณทางรถไฟ ในทางกลับกันแบบจำลองการวิเคราะห์ส่วนใหญ่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาแบบง่าย ที่ทั้งรูปทรงและเงื่อนไขทางภูมิศาสตร์ของปัญหาไม่ซับซ้อนเกินไป ดังนั้นรูปแบบเชิงประจักษ์หรือกึ่งประจักษ์มักใช้เพื่อทำนายการสั้นสะเทือนที่เกิดจากการจราจรบนรถไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระยะเริ่มต้นของโครงการเมื่อยังไม่ต้องการความแม่นยำมากนักในการทำนาย

แบบจำลองการทำนายสามารถแบ่งได้เป็นสามชั้นตามที ISO/CD 14837-1 (2001)[6] แนะนำ โดยจะจำแนกขึ้นอยู่กับความแม่นยำของการทำนายที่ทำโดยแบบจำลองนั้นๆ ในชั้นแรก (class 1) เป็นแบบจำลองในขอบเขตที่ใช้ในระยะแรกของการพัฒนาโครงการ แบบจำลองในชั้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อระบุขอบเขตของปัญหาที่อาจเกิดขึ้นจากการสั้นสะเทือนที่เกิดจากการวิ่งผ่านของรถไฟ แบบจำลองในชั้นแรกนี้มีประโยชน์อย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องตัดสินใจเลือกตำแหน่งของเส้นทางรถไฟสายใหม่ รูปแบบมักจะง่ายและรวดเร็ว โดยตัวแบบจำลองในชั้นนี้ต้องการพารามิเตอร์น้อยมากในการวิเคราะห์ จึงเหมาะกับขั้นตอนแรกของกระบวนการพัฒนาโครงการ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ในแบบจำลองชั้นแรกนี้จะประกอบด้วย ประเภทของระบบรถไฟ, ประเภทของรถไฟที่จะวิ่งบนทางวิ่ง, สภาพพื้นดินโดยทั่วไปของพื้นดินและความไวต่อการตอบสนองต่อการสั้นสะเทือนของอาคารที่อยู่ใกล้เคียงกับการสั้นสะเทือนจากพื้นดินจากเส้นทางรถไฟ

แบบจำลองในชั้นที่สอง จะเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการวัดปริมาณความรุนแรงของปัญหาด้วยการสั้นสะเทือนที่เกิดจากพื้นดินและระบุตำแหน่งของม้นตามแนวทางรถไฟได้แม่นยำกว่าแบบจำลองในชั้นที่หนึ่ง ทั้งนี้ ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ในแบบจำลองชั้นที่ 2 ก็จะมีมากขึ้นเช่นกัน

ในแบบจำลองประเภทที่สามของแบบจำลองที่ใช้สำหรับการทำนายการสั้นสะเทือนจากพื้นดินคือแบบจำลองการออกแบบที่มีรายละเอียดที่ใช้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการออกแบบหลังจากที่มีการตัดสินใจตำแหน่งเส้นทางรางรถไฟแล้ว ประเภทของแบบจำลองนี้สามารถใช้ในการหาจำนวนปัญหาหรือผลกระทบของโครงการ รวมถึงบรรเทาผลกระทบสำหรับส่วนเฉพาะตามเส้นทางได้

## 1.2 ปัญหาของงานวิจัย

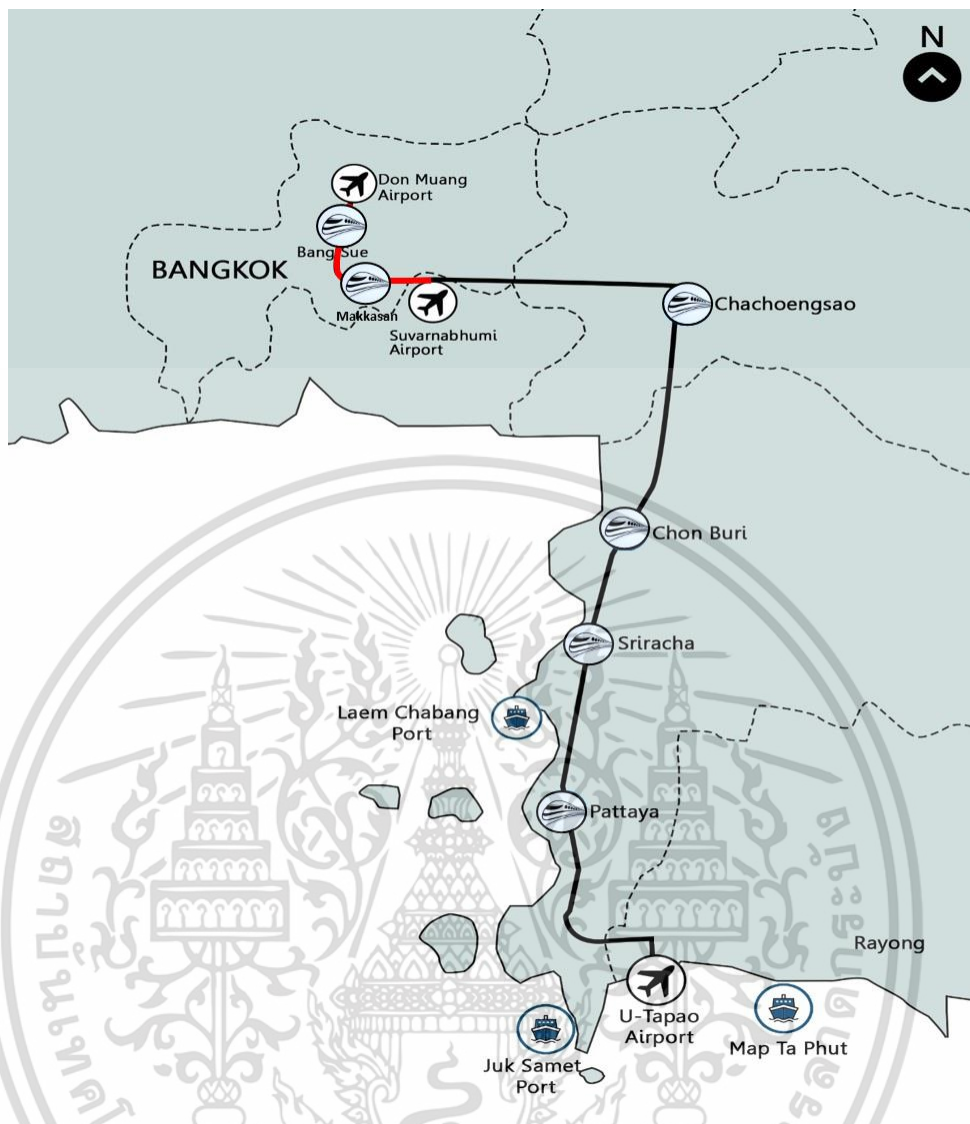
แนวเส้นทางโครงการผ่านพื้นที่ 5 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพมหานคร สมุทรปราการ ฉะเชิงเทรา ชลบุรีและระยอง ใช้แนวเส้นทางระบบขนส่งมวลชนทางรางของโครงการเดิมและมีการออกแบบใหม่

เฉพาะบริเวณเชื่อมต่อเข้าสนามบินสุวรรณภูมิ (ขาออก) และสนามบินอู่ตะเภา (ขาเข้า) โดยแนวเส้นทางโครงการประกอบไปด้วย 3 โครงการ คือ

1. โครงการระบบขนส่งทางรถไฟเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิและสถานีรับส่งผู้โดยสารอากาศยานในเมือง
2. โครงการระบบรถไฟเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิส่วนต่อขยายช่วงดอนเมือง-บางซื่อ-พญาไท
3. โครงการรถไฟความเร็วสูงสายกรุงเทพ-ระยอง

พบว่าตั้งแต่สถานีสุวรรณภูมิเป็นต้นไปรถไฟความเร็วสูงเชื่อมสนามบินจะเดินทางด้วยความเร็วสูงสุด 250 กิโลเมตรต่อชั่วโมงโดยแนวสายทางจะพาดผ่านบริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งตั้งอยู่ห่างจากสถานีสุวรรณภูมิราว 4 กิโลเมตร ซึ่งเป็นจังหวัดที่รถไฟจะเร่งความเร็วขึ้นเพื่อทำความเร็วสูงสุด จากสาเหตุดังกล่าวกลุ่มอาคารภายในสจล. ซึ่งประกอบด้วย อาคารวิจัยชั้นสูง อาคารเรียน ตลอดจน อาคารพักอาศัยและ ในอนาคตจะมีการสร้างอาคารสถานพยาบาลและอื่นๆ ซึ่งเรียงรายอยู่ตามแนวสายทางที่รถไฟจะวิ่งผ่านโดยมีระยะห่างจากทางรถไฟออกไปในรัศมีแตกต่างกันตั้งแต่ 10 เมตรขึ้นไป

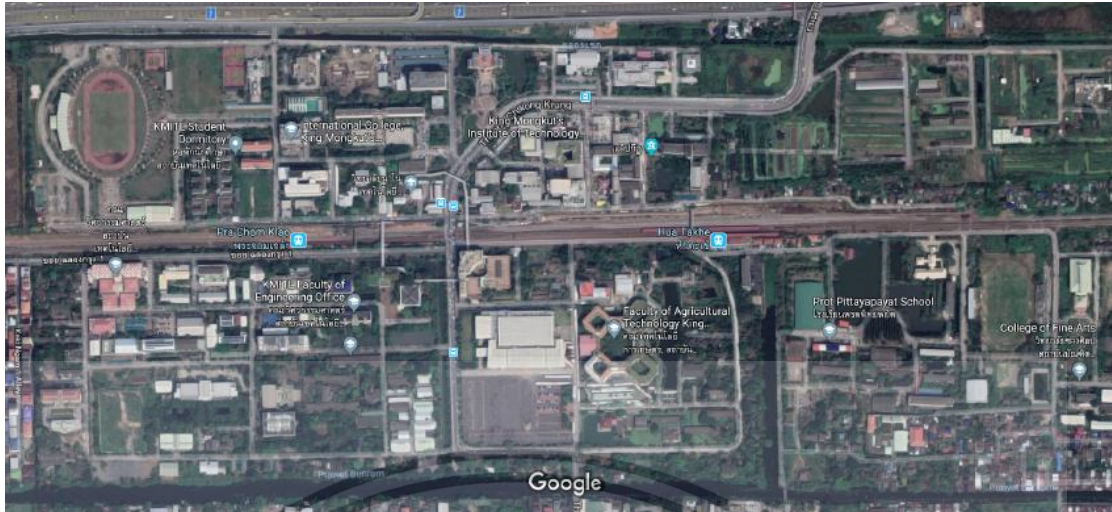
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1-3 แนวเส้นทางโครงการรถไฟความเร็วสูงเชื่อมสามสนามบิน  
ที่มา: สำนักงานคณะกรรมการนโยบายเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (สกพอ.) [1]

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลของการสั่นสะเทือนที่มีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่ของรถไฟความเร็วสูงที่วิ่งผ่านพื้นที่ศึกษาในบริเวณสกล.การวิเคราะห์ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อกลุ่มอาคารดังกล่าวซึ่งเรียงรายอยู่ตามแนวสายทางที่รถไฟวิ่งผ่านซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่อาจจะหลีกเลี่ยงได้เพื่อที่จะทราบถึงสภาพการณ์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคตหากมีการเปิดใช้รถไฟความเร็วสูง และจะได้วางแผนรับมือปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างทันท่วงที นอกเหนือจากนี้ผลจากการศึกษาในพื้นที่สกล. ยังสามารถนำไปใช้กับพื้นที่บริเวณอื่นในแนวสายทางรถไฟความเร็วสูงพาดผ่าน ที่มีสภาพปัจจัยแวดล้อมใกล้เคียงกัน อาทิเช่น พื้นที่ในเขตกรุงเทพมหานคร ที่มีสภาพชั้นดินเป็นดินเหนียวอ่อนคล้ายคลึงกับอันที่จะทำให้มีสภาวะทาง พลศาสตร์ของชั้นดินใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1-4 แนวเส้นทางรถไฟความเร็วสูงในส่วนที่ผ่านกลางสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ที่มา: <https://www.google.com/maps>

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1) วัดค่าแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟในพื้นที่สจล.และบริเวณใกล้เคียง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟความเร็วต่างๆ
- 2) สร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์อย่างง่าย เพื่อการคาดการณ์แรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นโดยสมมติฐานให้รถไฟมีน้ำหนักเท่ากันทุกขบวน ที่ความเร็วที่แตกต่างกัน
- 3) ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อวิเคราะห์หาระยะที่จะเกิดผลกระทบจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเมื่อรถไฟวิ่งผ่าน

### 1.4 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาคลื่นการสั่นสะเทือนจากรถไฟที่วิ่งผ่านในพื้นที่ศึกษาในบริเวณสจล.และระยะที่อาจได้รับผลกระทบที่ถูกส่งผ่านพื้นดินมาในรูปของคลื่นแรงสั่นสะเทือน
- 2) เพื่อคาดการณ์แรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากการวิ่งผ่านของรถไฟที่ความเร็วต่างๆ โดยใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์ที่สร้างขึ้นมาในการวิเคราะห์
- 3) สรุปเปรียบเทียบผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวผ่านของรถไฟ ที่ความเร็วต่างๆ ตั้งแต่รถไฟความเร็วต่ำ-ปกติ และรถไฟความเร็วสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถคาดการณ์แรงสั่นสะเทือนที่จะเกิดขึ้นของรถไฟฟ้ความเร็วสูงจากได้ โดยใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์ที่สร้างขึ้น
- 2) สามารถคาดการณ์ผลกระทบและระยะเสี่ยงภัยที่อาจเกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวผ่านของรถไฟความเร็วสูงได้
- 3) สามารถนำแบบจำลองทางพลศาสตร์ดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์และคาดการณ์แรงสั่นสะเทือนที่จะเกิดขึ้นในบริเวณอื่นๆได้ในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

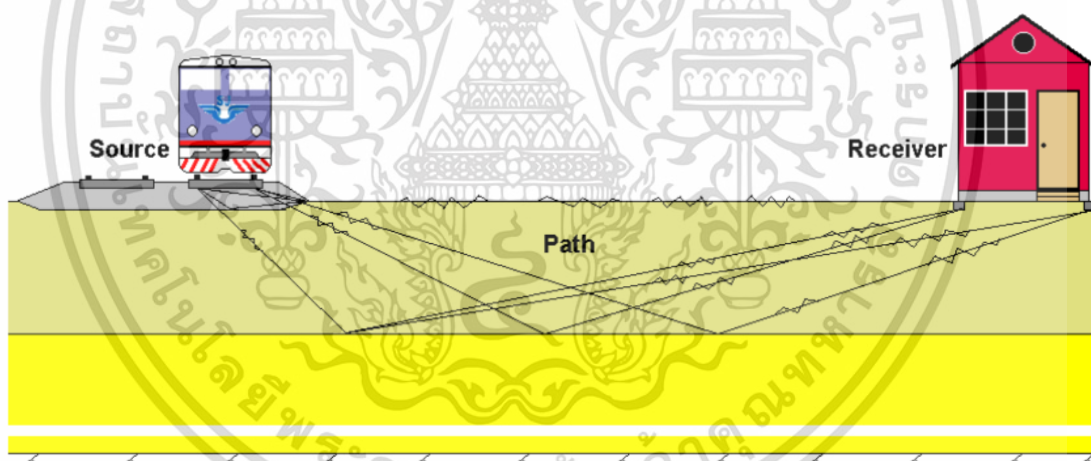
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการทำวิจัยครั้งนี้ได้อาศัยทฤษฎีแนวความคิด และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยได้ศึกษา การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากรถไฟ, การขยายคลื่นการสั่นสะเทือน, การวัดการสั่นสะเทือนที่อยู่ใกล้ รางรถไฟ, การวิเคราะห์สัญญาณที่เกิดจากแรงสั่นสะเทือนของรถไฟ, ข้อกำหนดความปลอดภัย สำหรับการสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟ

#### 2.1 การสั่นสะเทือนของพื้นดินเกิดจากการจราจรของรถไฟ

โดยทั่วไปอาจกล่าวได้ว่าปัญหาของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากพื้นดินเนื่องจากการจราจรรถไฟ มีสามการเชื่อมโยงคือ แหล่งกำเนิดแรงสั่นสะเทือน(source) เส้นทางการกระจายตัวของ แรงสั่นสะเทือน(propagation path)และตัวรับสัญญาณ(receiver)ดังแสดงในรูปที่2-1

การทำความเข้าใจว่าแต่ละขั้นตอนทั้งสามนี้มีอิทธิพลต่อสถานการณ์การสั่นสะเทือนอย่างไรนั้น มีความสำคัญในการทำนายและบรรเทาปัญหาที่เกิดจากการสั่นสะเทือน ในส่วนที่เหลือของบทนี้จะ กล่าวถึงทั้งสามการเชื่อมโยงนี้สั้นๆซึ่งเป็นการนำข้อมูลอ้างอิงจาก Bahrekazem[2]



รูปที่ 2-1 การสั่นสะเทือนของพื้นดินที่เกิดจากการจราจรของรถไฟ

ที่มา ; [Mehdi Bahrekazemi[2]

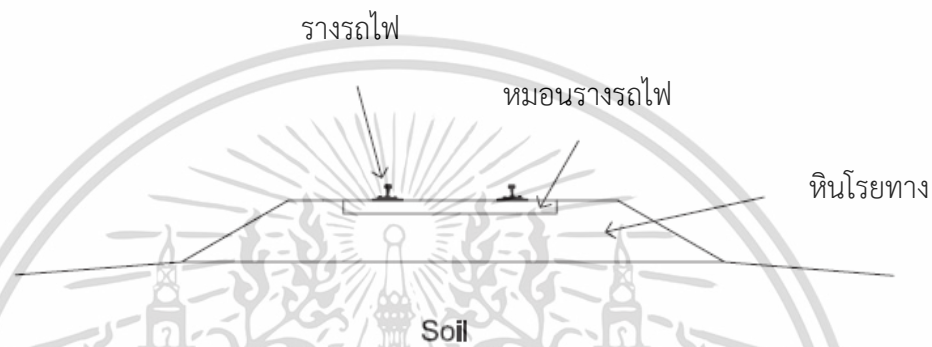
##### 2.1.1 แหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือน (Vibration source)

ขั้นตอนแรกของการส่งสัญญาณคือแหล่งที่สร้างการสั่นสะเทือน ภูมิภาคต้นทางอาจ รวมถึงรถไฟ โครงสร้างของทางรถไฟ โครงสร้างสนับสนุน และดินโดยรอบบริเวณใกล้เคียง ซึ่ง ส่วนประกอบทั้งหมดนี้ต่างก็เป็นส่วนหนึ่งของจุดเริ่มต้นของแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือน หลังจาก สัญญาณการสั่นสะเทือนถูกสร้างขึ้น การสั่นสะเทือนจะถูกโอนย้ายผ่านโครงสร้างทางรถไฟ ดังแสดง ในรูปที่ 2-1 และลงสู่พื้นดิน แหล่งที่มาอาจมีความซับซ้อนมากในการอธิบายและวัดเนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์และการมีปฏิสัมพันธ์มากมาย จากงานวิจัยของ Madshus และคณะ[3] การวัดค่าแสดงให้เห็นว่าการสั่นสะเทือนที่เกิดจากทางรถไฟนั้นเป็นค่าแบบสุ่มโดยธรรมชาติ

มีกลไกหลายอย่างที่เกี่ยวข้องในการที่จะสร้างสัญญาณการสั่นสะเทือน สาเหตุที่สำคัญคือรถไฟกำลังเคลื่อนที่โดยแต่ละล้อจะทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนในการเคลื่อนที่ การสัมผัสระหว่างล้อรถไฟและรางรวมกับความผิดปกติประเภทต่างๆในล้อและโครงสร้างรางทำให้เกิดการกระตุ้นแบบพลศาสตร์ นอกจากนี้หากความเร็วรถไฟสูงกว่าความเร็ววิกฤตที่แน่นอน จะสามารถสังเกตการสั่นสะเทือนที่เพิ่มขึ้นได้อีก



รูปที่ 2-2 รูปแบบโครงสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง

ที่มา: Nils Persson[4]

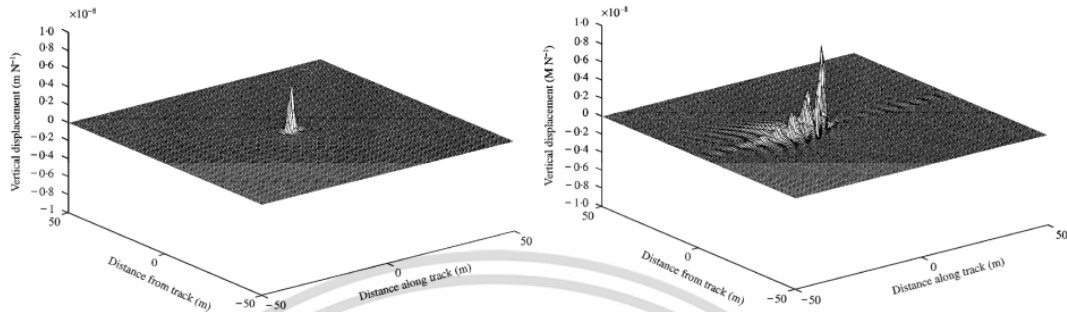
### 2.1.1.1 ผลตอบสนองของแรงเคลื่อนที่ (Moving load response)

เมื่อรถไฟแล่นไปตามทางรถไฟจะมีแรงกดดันทางรถไฟเนื่องจากน้ำหนักของรถไฟ ภาระจากเพลาล้อแต่ละล้อทำให้รางเกิดการโก่งตัวในแนวดิ่งในขณะที่รถไฟแล่นผ่าน โดยการโก่งตัวที่จุดคงที่จะแตกต่างกันไปตามเวลา นอกเหนือจากน้ำหนักเพลาและระยะห่างระหว่างเพลาแล้ว การตอบสนองในดินโดยรอบสำหรับโหลดที่เคลื่อนที่จะขึ้นอยู่กับความเร็วของรถไฟ ซึ่งในกรณีนี้รถไฟจะเดินทางโดยสัมพันธ์กับความเร็วคลื่นของดิน จากการวัดแสดงให้เห็นว่าโดยทั่วไปการสั่นสะเทือนจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรถไฟ

อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับรถไฟความเร็วสูงโดยเฉพาะ มักมีอิทธิพลอย่างมากต่อระดับการสั่นสะเทือนโดยรวม Krylov และคณะ [5]

มีค่าความเร็ววิกฤตที่สำคัญสองค่า ที่เกี่ยวข้องกับระบบโครงสร้างรางและดิน ความเร็ววิกฤตแรกคือความเร็วรถไฟเกินความเร็วคลื่น Rayleigh ในดิน ปรากฏการณ์นี้เปรียบได้กับเครื่องบินที่ทำลายกำแพงเสียงส่งผลให้เกิดเสียงคลื่นโซนิคและคาดว่าจะมีการสั่นสะเทือนมากขึ้น รูปที่ 2-3 แสดงการตอบสนองในดินที่มีภาระการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำกว่าและสูงกว่าความเร็วคลื่น Rayleigh ตามลำดับ

สำหรับความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วของคลื่น Rayleigh การตอบสนองจะเป็นแบบกึ่งคงที่ ในกรณีที่เกิดความเร็วคลื่น Rayleigh กระจาย Mach จะก่อตัวขึ้นรอบ ๆ โพลด์ทำให้เกิดคลื่นที่แพร่กระจาย



รูปที่ 2-3 การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของดินสำหรับแรงที่กระทำเป็นจุด โดยมีความเร็วต่ำกว่า R-wave (รูปซ้าย) และมีความเร็วมากกว่า (รูปขวา)

ที่มา: Nils Persson[4]

ตัวอย่างปรากฏการณ์ของคลื่นที่เร็วกว่า คลื่น Rayleigh ได้จากการตรวจวัดที่ Ledsgård ประเทศสวีเดน ซึ่งพื้นดินประกอบด้วยดินเหนียวอ่อนมาก ความเร็วของรถไฟมีค่ามากกว่าความเร็วคลื่น R ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเป็นการใช้รถไฟความเร็วสูงร่วมกับสภาพดินที่ไม่ดี อีกกรณีที่รุนแรง Madhus et al. [3] ดินเหนียวที่อ่อนมากบางแห่งอาจมีความเร็วของคลื่น Rayleigh ที่ต่ำมีค่าประมาณ 40-50 m / s (144-180 km / h) สามารถประมาณความเร็วของคลื่น R ได้โดยใช้สมการ 2.3

ปรากฏการณ์ความเร็วสูงที่สองคือความเร็วการแพร่กระจายต่ำสุดของคลื่นตัดในราง รถไฟที่มีความเร็วสูงกว่าความเร็วนี้ อ้างอิงโดย Krylov และคณะ [5] ในฐานะความเร็ววิกฤตของโครงสร้างราง อาจส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดความเสี่ยงตกราง Krylov et al. [5] อธิบายเพิ่มเติมเกี่ยวกับความเร็ววิกฤตของโครงสร้างรางว่า ปกติจะสูงกว่าความเร็วคลื่น Rayleigh อยู่ 10-30% ในพื้นที่เดียวกัน ดังนั้นจึงไม่ค่อยเป็นปัญหากับความเร็วคลื่นที่มากกว่าระดับความเร็วคลื่น Rayleigh ความเร็ววิกฤตของรางได้มาจากสมการของคานอนันต์ที่รองรับโดยรากฐานยึดหยุ่น ซึ่งคำนวณโดย สมการที่ 2.1

$$c_{min} = \left( \frac{4kEI}{m^2} \right)^{1/4} \quad (2.1)$$

โดยที่ k คือความแข็งของฐาน E คือโมดูลัสยืดหยุ่นของรางรถไฟ I โมเมนต์ความเฉื่อยของรางและ m มวลต่อความยาวหนึ่งหน่วยของราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1.2 การกระตุ้นแบบไดนามิก (Dynamic excitations)

หากไม่พบความไม่สมบูรณ์ภายในแหล่งกำเนิด สามารถสมมติฐานได้ว่า ผลกระทบจากแรงที่เคลื่อนที่ ที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้จะเป็นตัวสนับสนุนการสั่นสะเทือนแต่เพียงผู้เดียว อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงมีความผิดปกติหลายอย่างในการทำงานร่วมกันระหว่างรางกับรถไฟซึ่งส่งผลให้เกิดการกระตุ้นแบบไดนามิก ISO 14847 [6] และ Hall [7] สรุปกลไกหลายอย่าง ฮอลล์กล่าวเพิ่มเติมว่าเอฟเฟกต์ไดนามิกเหล่านี้มีความถี่สูงกว่าและการสั่นสะเทือนเหล่านี้มักจะไม่ได้อยู่ไกลจากเส้นทางราง

ความผิดปกติแบบสุ่มจากความไม่สม่ำเสมอหรือความขรุขระในพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างล้อกับรางทำให้เกิดการแรงกระตุ้นขึ้น ความผิดปกติต่างๆของรางสามารถเกิดขึ้นได้แล้วในขั้นตอนการผลิต แต่ยังมีการพัฒนาความผิดปกติเพิ่มในช่วงอายุการใช้งานได้ เช่นเนื่องจากการลอน ล้อเรียบ(แฟลต)ซึ่งเป็นความผิดปกติบนพื้นผิวของล้อรถไฟเป็นกลไกกระตุ้นอีกอย่างหนึ่ง ความเรียบของล้อเกิดขึ้นเมื่อล้อถูกลากไปตามรางในขณะที่หยุดหมุน อาจเป็นผลมาจากสภาพการขี้นที่ลื่น การเบรกที่ผิดปกติหรือการเบรกฉุกเฉิน ความไม่ต่อเนื่องตามรางเช่นช่องว่างที่ระหว่างรางหรือข้อต่อราง (โดยเฉพาะที่ไม่ได้เชื่อมติด) สามารถนำไปสู่แรงกระแทกได้อีกซึ่งอ้างอิงจาก Heckl et al. 1996[8] สามารถสร้างการกระตุ้นการสั่นสะเทือนที่รุนแรงได้

การกระตุ้นด้วยพารามิเตอร์(Parametric excitation) เป็นอีกหนึ่งกลไกสำคัญในการกระตุ้นแบบไดนามิกที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน เมื่อล้อรถไฟหมุนอยู่เหนือราง โพลด์จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในตามค่าความแข็งของจตุรกรรับซึ่งคือหมอนรองรางรถไฟแต่ละอัน ส่งผลให้เกิดการกระตุ้นที่ขึ้นอยู่กัเวลาตามความถี่ของหมอนรองรางรถไฟ สำหรับรถไฟความเร็วสูงความถี่นี้อยู่ในช่วงที่เกี่ยวข้องกับเสียงรบกวนจากพื้นดินและสำหรับรถไฟความเร็วจะเกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนตัวอย่างเช่นระยะทางของหมอนรองรางรถไฟ(sleeper) ทั่วไป  $d = 0.65 \text{ m}$  และความเร็วรถไฟ  $v = 300 \text{ km/h}$  ส่งผลให้ความถี่ทางเดินของ  $v = d = 139 \text{ Hz}$  สำหรับความเร็ว 100 กม. / ชม. จะเป็น 46 Hz (Heckl et al. 1996[8])

สภาพการขี้นเคลื่อนของรถไฟโดยทั่วไปอาจมีผลกระทบต่อสั่นสะเทือนเช่นการเบรกและการเร่งความเร็วของรถไฟหรือความโค้งของราง นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์ภายในตัวรถไฟเองเช่นระบบช่วงล่างที่มีผลต่อการสั่นสะเทือน

สุดท้ายแล้วสรุปได้ว่ามีหลายลักษณะจำเพาะและพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อลักษณะ การกระตุ้นแบบไดนามิกโดยเฉพาะอย่างยิ่งความซับซ้อนที่มากเกินไปที่จะทำนายได้ ที่สุ่มในธรรมชาติ

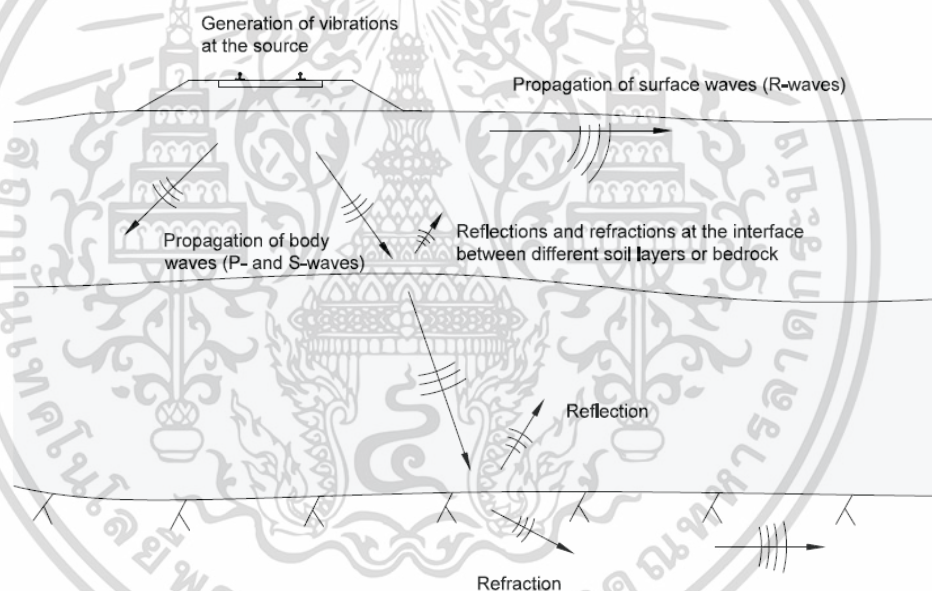
### 2.1.2 การแผ่กระจายตัวของคลื่นสั่นสะเทือน (Propagation)

ส่วนที่สองของกระบวนการส่งสัญญาณสำหรับการสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟคือส่วนของการแพร่กระจาย ภูมิภาคการแพร่กระจายประกอบด้วยรูปแบบพื้นดินคือชั้นของดินและหินที่อยู่ภายใต้และระหว่างทางรถไฟกับวัตถุที่รับแรงสั่นสะเทือน(อาคาร) หลังจากการสั่นสะเทือนถูกสร้างขึ้น พื้นดินก็เริ่มเคลื่อนไหว พลังงานสั่นสะเทือนถูกถ่ายโอนผ่านดินโดยใช้คลื่นสามประเภทหลักคือคลื่น P-waves เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S-waves และ R-waves คลื่นหลัก(body wave) (P- และ S- waves) เดินทางไปทุกทิศทางในพื้นดิน และที่พื้นผิวจะเกิดคลื่น R-waves ขึ้น คลื่น R-waves มีสำคัญในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่เกิดจากทางรถไฟเมื่อพื้นที่ของแหล่งกำเนิดคลื่นมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับภูมิภาคการแพร่กระจาย พลังงานส่วนใหญ่จะถูกถ่ายโอนโดยคลื่นเหล่านี้

ขนาดของค่าการสั่นสะเทือนโดยทั่วไปจะสลายตัวเมื่อเคลื่อนที่ออกห่างจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ นี่เป็นผลมาจากการลดทอนทางเรขาคณิต และการสูญเสียพลังงานในดิน คลื่น R จะได้รับการลดทอนทางเรขาคณิตน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ P- และ S- waves ดังที่แสดงในรูปที่ 2-4 การสั่นสะเทือนไม่จำเป็นต้องเดินทางโดยใช้ระยะทางที่สั้นที่สุด การสะท้อนและการหักเหของคลื่นที่รอยต่อระหว่างชั้นดินหรือระหว่างดินกับชั้นหินเป็นปรากฏการณ์ที่สามารถส่งผลกระทบต่อเส้นทางการแผ่กระจายของคลื่น เมื่อการสะท้อนและการหักเหของคลื่นสามารถเกิดขึ้นได้นั้นหมายความว่ามีความเป็นไปได้ที่คลื่นในตัวกลาง(body waves)จะเคลื่อนที่ไปทางอื่นและอาจเป็นไปได้ที่จะเคลื่อนตัวไปไม่ถึงผู้รับ(อาคาร)



รูปที่ 2-4 ภาพแสดงการกระจายตัวของคลื่นสั่นสะเทือนในชั้นดิน

ที่มา : Neil Perssons [4]

ความเร็วการแผ่กระจายของคลื่นแต่ละประเภทขึ้นอยู่กับสภาพดินตามสมการ 2.2 และ 2.3 ในหัวข้อ 2.2.1.3 จากสมการเหล่านี้ยังสามารถแสดงให้เห็นว่าคลื่น P เดินทางเร็วกว่าคลื่น S ในวัสดุเดียวกันเนื่องจากดินมีความแข็งแรงในการบีบอัดมากกว่าแรงเฉือน ความเร็วของคลื่น R นั้นต่ำกว่าความเร็วของคลื่น S เล็กน้อยโดยประมาณ 0.9 ขึ้นอยู่กับพื้นดิน

เมื่อเปรียบเทียบการแผ่กระจายกับแหล่งกำเนิดสัญญาณ เป็นเรื่องง่ายที่จะอธิบายกลไกที่เกี่ยวข้องกับเส้นทางการแพร่กระจาย มีการวิจัยเพิ่มเติมในพื้นที่ดิน การเปลี่ยนแปลงและโดยทั่วไปจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นกระบวนการที่ตรงไปตรงมามากกว่า อย่างไรก็ตามเนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินนั่นคือคุณสมบัติของดินอาจแตกต่างกันอย่างมากแม้จะอยู่ในพื้นที่บริเวณเดียวกัน ดังนั้นการทำการนายระดับการสั่นสะเทือนที่แน่นอนในสถานที่เฉพาะอาจเป็นเรื่องยาก

### 2.1.3 แหล่งรับคลื่นการสั่นสะเทือน (Receiver)

ส่วนที่สามและขั้นสุดท้ายของกระบวนการส่งสัญญาณสำหรับการสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟคือตัวรับสัญญาณ บริเวณที่ได้รับนั้นประกอบด้วยอาคารรากฐานและดินโดยรอบบริเวณใกล้เคียง การสั่นสะเทือนจะถูกถ่ายโอนจากดินที่ฐานและจะถูกส่งต่อไปในอาคารที่คลื่นอาจจะถูกขยายและทำให้พื้นและผนังสั่นสะเทือน การตอบสนองในอาคารจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่นคุณสมบัติของพื้นดินประเภทของฐานรากรูปทรงเรขาคณิตทั่วไปของอาคารและวัสดุในระบบโครงสร้าง แม้แต่การจัดวางเฟอร์นิเจอร์ภายในอาคารก็อาจมีผลกระทบ

ข้อสำคัญสำหรับโครงสร้างดินคือ ความยาวคลื่นของการสั่นสะเทือนจะสัมพันธ์กับขนาดของฐานรากของอาคาร หากความยาวคลื่นมีความยาวเมื่อเทียบกับความกว้างของอาคาร การสั่นสะเทือนจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่เฉพาะกับอาคาร ในทางกลับกันการสั่นสะเทือนของความยาวคลื่นที่สั้นกว่าจะทำให้เกิดการโค้งงอ อีกแง่มุมที่สำคัญคือความถี่ธรรมชาติของอาคาร ที่สามารถเป็นต้นเหตุของการสร้างแรงกระตุ้นให้กับตัวอาคารด้วยความถี่สั่นพ้อง อย่างไรก็ตามการสั่นพ้องจำเป็นต้องใช้ความถี่ที่จำเพาะกับความถี่ธรรมชาติของอาคารจึงจะเกิดขึ้นได้

## 2.2 ความรู้พื้นฐานของการสั่นสะเทือนภาคพื้นดิน

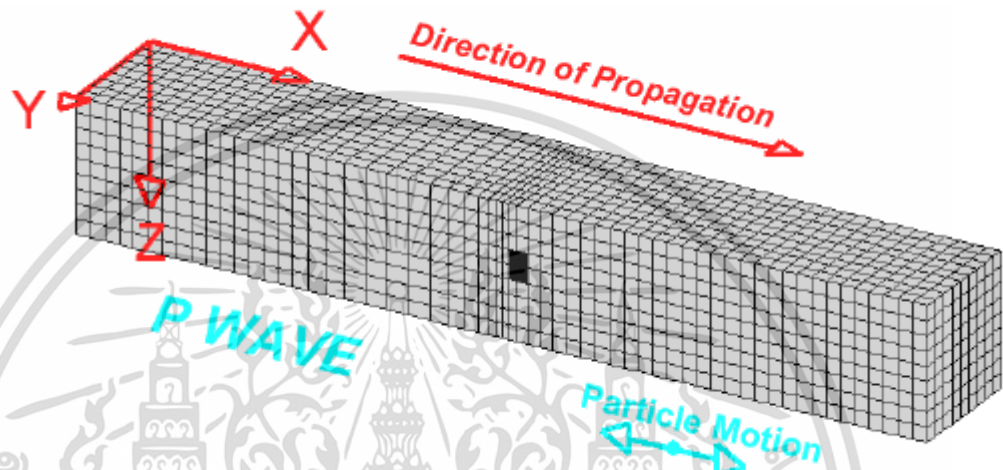
การสั่นสะเทือนในพื้นที่ดินทางโดยใช้คลื่นเชิงกลหลายประเภท ในพลศาสตร์ของดินการศึกษาการแพร่กระจายคลื่นจึงมีความสำคัญ ในส่วนนี้จะอธิบายประเภทของคลื่นต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนของพื้นพร้อมกับปรากฏการณ์ที่ส่งผลต่อการแพร่กระจายของคลื่น เนื่องจากคุณสมบัติของคลื่นที่แพร่กระจายนั้นขึ้นอยู่กับวัสดุตัวกลางเป็นอย่างมาก จึงมีความจำเป็นต้องกล่าวถึงเนื้อหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดิน

### 2.2.1 ประเภทของคลื่น (Wave types)

การเคลื่อนที่ของคลื่นแบบพื้นฐานที่สุดสองชนิดในตัวกลางที่เป็นของแข็งคือ คลื่นในตัวกลาง (body waves) ได้แก่ คลื่นความดัน (P-waves) และคลื่นเฉือน (S-waves) คลื่น P-waves ก่อให้เกิดการบีบอัดและแพร่กระจายผ่านตัวกลาง อนุภาคเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นดังแสดงในรูปที่ 2-5 คลื่น S-waves อนุภาคจะเคลื่อนที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางของการเดินทางดังแสดงในรูปที่ 2-6 คลื่น S-waves สามารถมีสององค์ประกอบคือในแนวตั้งและในแนวนอน ในทิศทางตั้งฉากกับการแพร่กระจายคลื่น

### 2.2.1.1 คลื่นแรงอัด

คลื่นแรงอัด หรือที่เรียกว่าคลื่นความดัน เรียกสั้นๆว่า 'P-wave' ซึ่งจากคำศัพท์เกี่ยวกับการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนที่เรียกว่า 'คลื่นปฐมภูมิ' เป็นคลื่นที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามยาวภายใต้หลักการเดียวกันกับของคลื่นเสียงในอากาศดังแสดงในรูปที่ 2-5 P-wave เป็นคลื่นที่เร็วที่สุดในดิน เดินทางด้วยความเร็ว  $c_p$  ซึ่งพิจารณาจากคุณสมบัติยืดหยุ่นของดิน

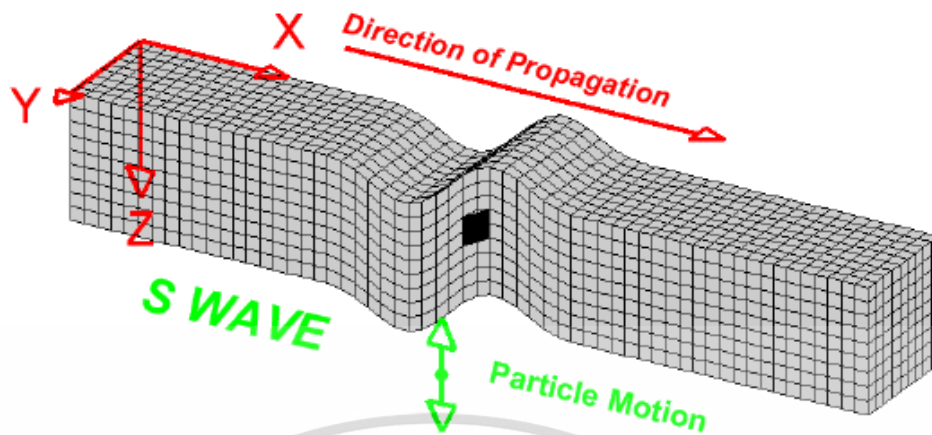


รูปที่ 2-5 คลื่น P wave

[Michael J Loting] (L. Braille)2010 [9]

### 2.2.1.2 คลื่นแรงเฉือน

คลื่นแรงเฉือน เขียนว่า 'S-wave', 'คลื่นรอง', ยังอธิบายว่าเป็นคลื่นที่บิดเบี้ยว, รูปคลื่น Equivoluminal หรือหมุน สร้างการเคลื่อนที่ของอนุภาคแนวตั้งฉากกับทิศทางของคลื่น และเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าคลื่นอัด (ด้วยความเร็ว  $c_s$ ) คลื่นเฉือนสามารถมีองค์ประกอบแนวนอนหรือแนวตั้ง องค์ประกอบคลื่นเฉือนแบบโพลาไรซ์ (บางครั้งแสดงว่า SH- หรือ SV- wave) ดังแสดงในรูป 2-6

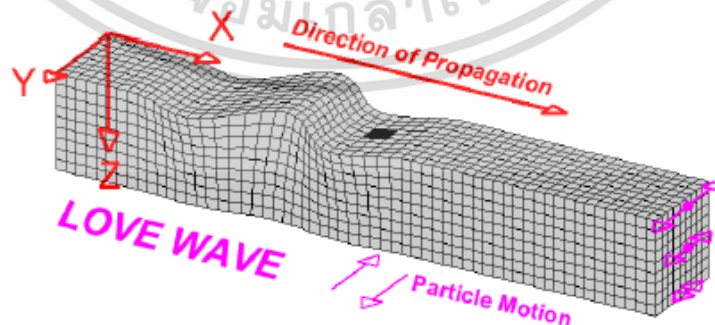


รูปที่ 2-6 คลื่น S wave

[Michael J Loting] (L. Braille)2010 [9]

### 2.2.1.3 คลื่นพื้นผิว

ในบริบทของการสั่นสะเทือนของพื้นดิน ทั้ง P-wave และ S-wave มักถูกจัดประเภทเป็น คลื่นในตัวกลาง (body waves) เนื่องจากพวกมันแพร่กระจายเป็นทรงกลมในพื้นที่ที่ไม่มีขอบเขตของพื้นที่ยืดหยุ่น คลื่นอีกประเภทคือคลื่นพื้นผิวซึ่งแพร่กระจายไปตามแนวพื้นผิวของพื้นที่ โดยคลื่นที่เดินทางห่างจากแหล่งกำเนิดอย่างรุนแรง ประเภทของคลื่นพื้นผิวที่สำคัญที่สุดต่อการสั่นสะเทือนของรถไฟคือคลื่นที่เรียกว่า 'Rayleigh' (ตั้งชื่อเพื่อเป็นเกียรติแก่ท่านลอร์ด Rayleigh และบางครั้งก็แทน 'R-wave') ในคลื่น Rayleigh ซึ่งเกิดจากการทำงานร่วมกันของ P-wave และ S-wave อัตราส่วนของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งต่อแนวนอนอยู่ที่ประมาณ  $3/2$  [Ewing et al. 1957] [10] ความเร็วคลื่น Rayleigh  $c_R$  ช้าที่สุดในสามประเภทนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รูปที่ 2-7 L wave

[Michael J Loting] (L. Braille)2010 [9]

## 2.2.2 ปรากฏการณ์การแพร่กระจายคลื่น(Wave propagation phenomena)

### 2.2.2.1 ความเร็วของคลื่น

ในการคำนวณความเร็วที่คลื่นร่างกายแพร่กระจายผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็งสามารถใช้ค่าจำเพาะของวัสดุที่เรียกว่าพารามิเตอร์ Lamé คือ  $\lambda$  และ  $\mu$  ซึ่งสามารถเรียกว่าเป็น พารามิเตอร์ Lamé ตัวแรกและตัวที่สองตามลำดับ ซึ่งสามารถหาค่าได้จาก

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (2.2)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.3)$$

โดยที่ E คือโมดูลัสของยัง และ  $\nu$  คืออัตราส่วนของปัวซอง ในบริบทของความยืดหยุ่น พารามิเตอร์ที่สอง  $\mu$  นั้นเรียกว่า โมดูลัสแรงเฉือนมักใช้แทน G ความเร็วของคลื่นสำหรับ P- waves และ S- waves คือ  $c_p$  และ  $c_s$  ตามลำดับถูกคำนวณโดยใช้

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.4)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.5)$$

โดยที่  $\rho$  คือค่าความหนาแน่นของวัสดุ

ที่พื้นผิวของตัวกลางปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นในตัวกลางทั้งสองกับพื้นผิวของมันเองอาจส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของคลื่นประเภทอื่น สิ่งสำคัญอย่างยิ่งคือ คลื่น Rayleigh (R-wave) อธิบายโดย Lord Rayleigh ในปี 1885 ในของแข็งแบบไอโซโทรปิกแต่ละอนุภาคจะเคลื่อนที่เป็นวงรีไปในทิศทางเดียวกับทิศทางของการแพร่กระจายดังแสดงในรูปที่ 2-6 คลื่น Rayleigh ทำงานคล้ายกับ (แต่ไม่เหมือนกัน) ระลอกคลื่นที่เกิดจากการกระทบบนผิวน้ำ

ความเร็วคลื่น R สามารถประมาณได้โดยใช้นิพจน์การวิเคราะห์ต่อไปนี้ตามที่เสนอโดย Bergmann [11]

$$c_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} c_s \quad (2.6)$$

โดยที่  $\mathbf{V}$  คืออัตราส่วนของปัวซองและ  $c_s$  คือความเร็วของคลื่น S ตาม สมการข้างต้นมีความถูกต้องสำหรับค่า  $0 < \mathbf{V} < 0.5$  เป็นช่วงที่ถูกต้องสำหรับดิน สมการต่อไปแสดงให้เห็นว่าความเร็วของคลื่น R นั้นใกล้เคียงแต่ต่ำกว่าความเร็วของ S-wave ในวัสดุเดียวกัน ในช่วง  $0 < \mathbf{V} < 0.5$  ความเร็ว R-wave แตกต่างกันไประหว่าง  $0.87 c_s$  และ  $0.95 c_s$

แม้ว่าจะมีความสำคัญมากขึ้นในสาขาวิชา seismology คลื่น love เป็นคลื่นพื้นผิวอีกประเภทหนึ่งที่ได้รับการตั้งชื่อตาม Augustus Edward Hough Love [12] มันมีลักษณะโดยการเคลื่อนที่ในแนวนอนที่พื้นผิว แต่เนื่องจากมีความสำคัญเพียงเล็กน้อยในแง่ของการสั่นสะเทือนที่มนุษย์สร้างขึ้นมันจะไม่ถูกกล่าวถึงต่อไป

### 2.2.2.2 การลู่ออกของคลื่น

กุญแจสำคัญของความแตกต่างอีกประการระหว่างคลื่นประเภทหลักคือการขยายตัวทางเรขาคณิต (หรือการลู่ออก) หน้าคลื่นของคลื่นร่างกายที่เปล่งออกมาจากจุดกำเนิด จะเป็นทรงกลมหรือครึ่งซีกทรงกลม ขึ้นอยู่กับว่าแหล่งกำเนิดคลื่น ตั้งอยู่ภายในพื้นหรือบนพื้นผิว ในทำนองเดียวกันสำหรับแหล่งที่มาประเภทเส้น (line-type) ซึ่ง หน้าคลื่น(wavefront) จะ เป็นทรงกระบอก คลื่นพื้นผิวจะแพร่กระจายจากจุดกำเนิดที่มี (แกนแนวตั้ง) หน้าคลื่นทรงกระบอกจากแหล่งกำเนิดสัญญาณที่มีหน้าคลื่นเชิงเส้น จะมีการลดทอนพลังงานของคลื่นในตัวกลาง(body waves)และคลื่นพื้นผิว(surface waves)ตามความสัมพันธ์ สัดส่วนผกผันกับระยะรัศมี( $r$ ) จากแหล่งกำเนิด เลขชี้กำลังของรัศมี( $r$ ) ขึ้นอยู่กับลักษณะของแหล่งกำเนิดชนิดของคลื่นและตำแหน่งของ การตรวจจับ ดังที่แสดงในตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าสัดส่วนการลดทอนพลังงานกับระยะทาง

(ดัดแปลงจาก Richart et al. 1970, Gutowski et al. 1976)

ประเภทแหล่งกำเนิด	ตำแหน่งตรวจจับ	ประเภทคลื่น	
		เนื้อดิน(body)	ผิวดิน(surface)
แหล่งกำเนิดแบบจุด	ในเนื้อดิน	$1/r^2$	N/A
	บนพื้นผิว	$1/r^4$	$1/r$
แหล่งกำเนิดแบบเส้น	ในเนื้อดิน	$1/r$	N/A
	บนพื้นผิว	$1/r^2$	$1/r^0$

ที่มา: (Richart et al. 1970[13]), (Gutowski et al. 1976[14])

ความสัมพันธ์กำลังสองกับแอมพลิจูด หมายถึงแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน (ความเร่ง ความเร็วหรือการกระจัด) จะลดลงด้วยอัตราที่แสดงในตารางที่ 2.2 (Hiller et al. 2000[15]) (Hung et al. 2001[16])

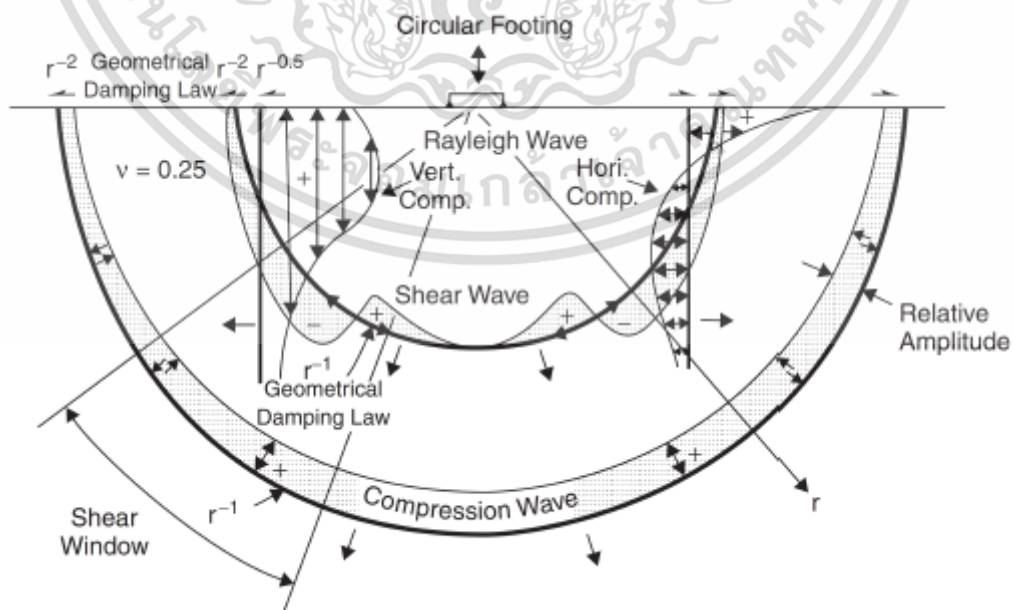
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าสัดส่วนการลดทอนแอมพลิจูดกับระยะทาง

(ดัดแปลงจาก Richart et al. 1970, Gutowski et al. 1976)

ประเภทแหล่งกำเนิด	ตำแหน่งตรวจจับ สัญญาณ	ประเภทคลื่น	
		เนื้อดิน(body)	ผิวดิน(surface)
แหล่งกำเนิดแบบจุด	ในเนื้อดิน	$1/r$	N/A
	บนพื้นผิว	$1/r^2$	$1/\sqrt{r}$
แหล่งกำเนิดแบบเส้น	ในเนื้อดิน	$1/\sqrt{r}$	N/A
	บนพื้นผิว	$1/r$	$1/r^0$

ที่มา: (Richart et al. 1970[13]), (Gutowski et al. 1976[14])

ไดอะแกรมการกระจายตัวของ wavefronts แพร่กระจายจากพื้นผิวที่ติดตั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยมีเงื่อนไขการลดทอนของแอมพลิจูดทางเรขาคณิตที่เกี่ยวข้องจะแสดงใน รูปที่. 2-8 ความแตกต่างที่สำคัญเหล่านี้ได้แก่ความเร็วของคลื่นและการลู่ออกของคลื่นในการแพร่กระจายทางเรขาคณิต สามารถช่วยอธิบายพฤติกรรมของการสั่นไหวแผ่นดินไหวจริง โดยกล่าวคือ คลื่นร่างกายที่มีความเร็วมากกว่าแต่ลดทอนก็เกิดขึ้นอย่างมาก ในส่วนของคลื่นพื้นผิวที่เดินทางได้ช้ากว่าแต่มีความเข้มข้นของพลังงานมากขึ้นเนื่องจากการลดทอนทางเรขาคณิตน้อยกว่า]



รูปที่ 2-8 ความผันแปรของแอมพลิจูดของแรงการสั่นสะเทือนในดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มา: (Richart et al. 1970[13]), (Gutowski et al. 1976[14])

รูปที่ 2-8 แสดงถึงความผันแปรของแอมพลิจูดสัมพัทธ์ในแต่ละประเภทของคลื่นที่มีความลึกเพิ่มขึ้น (คลื่น Rayleigh ถูกแยกออกเป็นองค์ประกอบแนวตั้งและแนวนอน) Graff [1991][17] แสดงให้เห็นว่าแอมพลิจูดของการเคลื่อนไหวของคลื่น Rayleigh ในทิศทางแนวตั้งจะลดลงน้อยกว่า 10%

โดยทั่วไปแล้วนิพจน์สำหรับการลดทอนสัญญาณระยะไกลทางเรขาคณิตของแอมพลิจูดการสั่นสะเทือน  $V_1$  (ความเร่ง ความเร็วหรือการกระจัด) ที่จุด  $r_1$  (อยู่ที่ระยะทาง  $r$  จากจุดอ้างอิง  $r_0$  ซึ่งอยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือน)

$$V_1 = V_0 \left( \frac{r_1}{r_0} \right)^{-\beta} \quad (2.7)$$

โดย  $V_0$  = แอมพลิจูดการสั่นสะเทือนที่จุด  $r_0$

$\beta$  = เลขชี้กำลังเรขาคณิตลดทอน (พิจารณาจากตาราง 2-2 หรืออื่น ๆ )

สามารถเห็นได้จากตาราง 2-1 และ 2-2 ที่ยิ่งระยะทางของการแพร่กระจายทางเรขาคณิตการลดทอนของคลื่น Rayleigh จากแหล่งกำเนิดที่แท้จริงนั้นในทางทฤษฎีเป็นอิสระจากระยะทางแหล่งที่มาของเส้นที่แท้จริงในบริบทนี้คือขีดจำกัด ทางคณิตศาสตร์ของเส้นอนันต์ ของแหล่งที่มาของจุด (ไม่ต่อเนื่องกัน) (แหล่งที่มาของเส้นอนันต์ infinite สามารถแสดงเป็นการรวมกันของความยาวเดียวกัน Duhamel et al. 1998[18])

## 2.3 ผลกระทบของแรงสั่นสะเทือน (Effects of vibration)

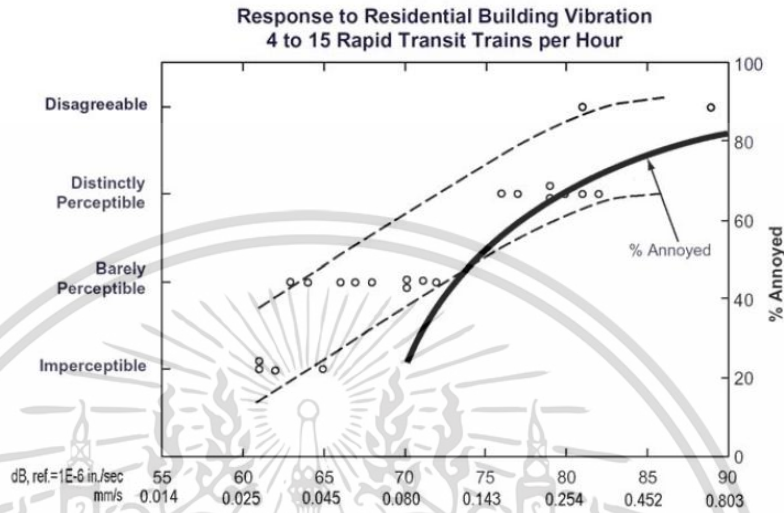
หลังจากได้รับฐานรากอาคารได้รับการสั่นสะเทือนแล้ว การสั่นสะเทือนก็จะแพร่กระจายไปยังส่วนอื่น ๆ ของอาคาร สิ่งส่งผลกระทบต่อการสั่นสะเทือนอาจ เป็นผู้อยู่อาศัยในอาคารหรือเป็นอุปกรณ์ที่ไวต่อการสั่นสะเทือน หรือแม้แต่อาจมีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายต่ออาคาร

### 2.3.1 การตอบสนองของมนุษย์ (Human response)

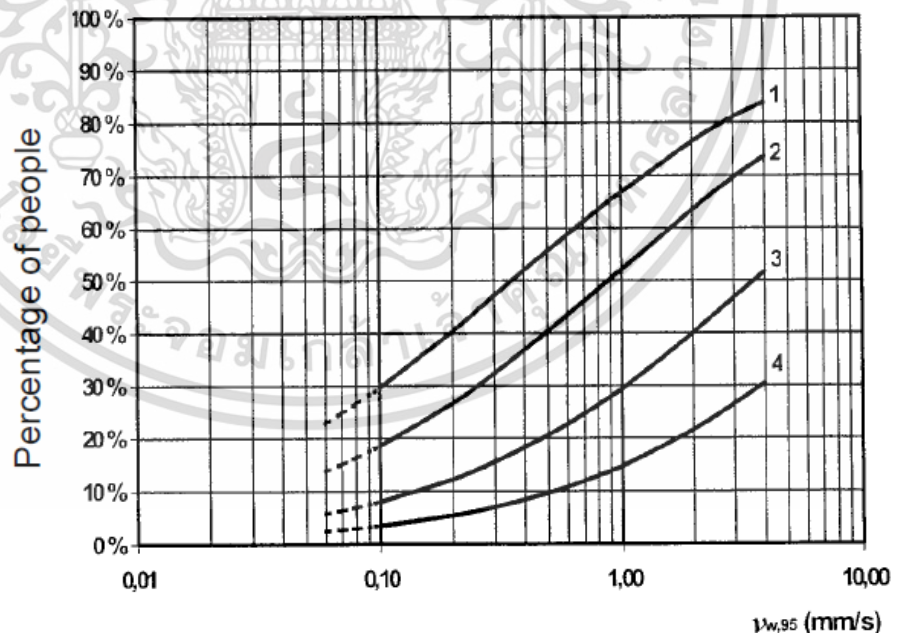
การตอบสนองของมนุษย์ต่อการสั่นสะเทือนที่เกิดจากพื้นดินเป็นผลมาจากหลายปัจจัย ปัจจัยเหล่านี้บางอย่างเป็นลักษณะทางกายภาพเช่น ขนาดของแอมพลิจูด ระยะเวลา และความถี่ของการสั่นสะเทือน ในขณะที่ปัจจัยอื่น ๆ เช่น ประเภทประชากร ,อายุ,เพศและความต้องการของแต่ละบุคคล เป็นปัจจัยเชิงจิตวิทยา (ISO 2631-2, 2003)[19] ซึ่งหมายความว่ามนุษย์มีการตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนเป็นเรื่องส่วนบุคคลและจะแตกต่างกันไป ดังนั้นในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบแรงสั่นสะเทือนกับการตอบสนองของมนุษย์ จะพิจารณาในลักษณะทางสถิติ (Klaeboe et al., 2003a)[20] อธิบายว่ามีกี่เปอร์เซ็นต์ของประชากรที่รับรู้การสั่นสะเทือนใน วิธีการบางอย่าง. ตัวอย่างของกราฟเส้นโค้งที่แสดงปัญหานี้ถูกนำเสนอโดยรูป 2-9 และรูปภาพ 2-10

เมื่อการสั่นสะเทือนมาถึง พื้นและผนังอาจมีผลให้สังเกตเห็นได้ การสั่นสะเทือนขึ้นอยู่กับความกว้างและความถี่ของการสั่นสะเทือน หน้าต่างกระจกบานและส่วนประกอบที่คล้ายกันอาจส่งผลกระทบนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เกิดเสียงที่ได้ยินซึ่งเรียกว่าเสียงจากพื้นดิน (ground-borne noise) นี่เป็นสิ่งนอกเหนือจากเสียงรบกวนทางอากาศที่ได้ยินตามปกติในระหว่างที่มีการจราจรของรถไฟผ่าน ผู้คนอาจจะเกิดความรำคาญมากยิ่งขึ้นหากพวกเขาสามารถสัมผัสได้ทั้งเสียงและการสั่นสะเทือน เมื่อเทียบกับการรับรู้เพียงการสั่นสะเทือนเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2-9 กราฟการตอบสนองของมนุษย์  
ที่มา: DOT-293630-1[22]



รูปที่ 2-10 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การตอบสนองของผู้คนในที่อยู่อาศัยต่อการสั่นสะเทือน  
ที่มา: (NSF,1999)[21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1 รับรู้ได้ถึงแรงสั่นสะเทือน
- 2 เกิดความรำคาญเล็กน้อย ปานกลาง ถึงสูง
- 3 เกิดความรำคาญ ปานกลาง ถึงสูง
- 4 เกิดความรำคาญ อย่างมาก

ในเรื่องที่เหมาะสมที่จะใช้ในการประเมินการตอบสนองของมนุษย์ต่อการสั่นสะเทือนที่พื้นดิน ISO 2631-1 (1997)[23] ได้แนะนำว่า ให้ใช้ค่าเฉลี่ยของรากที่สอง ซึ่งจะแสดงให้เห็นค่าสูงสุดของการสั่นสะเทือน

ตามที่กระทรวงคมนาคมของสหรัฐอเมริกา DOT (1998)[22] ระบุว่า เกณฑ์การตอบสนองของมนุษย์สำหรับความเร็วของอนุภาคอยู่ที่ประมาณ 0.04 mm/s (65 dB โดยอ้างอิง 1e-6 inch / วินาที) แม้จะมีขีด จำกัด การรับรู้ที่ต่ำมากคนส่วนใหญ่จะรู้สึกหงุดหงิดจากการสั่นสะเทือนที่เกิดจากพื้นดินเฉพาะในกรณีที่มีระดับที่สูงขึ้นมากดังแสดงในรูปที่ 2-9 เสียงที่เกิดจากพื้นดินในทางกลับกันอาจยังคงน่ารำคาญแม้ว่าระดับการสั่นสะเทือนจะต่ำกว่าขีดจำกัดการรับรู้

เกณฑ์ผลกระทบการสั่นสะเทือนทางพื้นดินสำหรับอาคารทั่วไปและอาคารพิเศษตาม US-DOT-293630-1 (1998) [22] แสดงในตาราง 2.3 และตาราง 2.4 ตามลำดับ

**ตารางที่ 2.3** การสั่นสะเทือนที่เกิดจากพื้นดิน (ค่าเฉลี่ยกำลังสองความเร็วอนุภาค) เกณฑ์ผลกระทบตามกระทรวงคมนาคมของสหรัฐอเมริกา(DOT)

Land Use Category	Ground-borne vibration Impact levels (dB, ref. 1 <sup>6</sup> in./sec)		Ground-borne vibration Impact levels (mm/s)	
	Frequent events <sup>a</sup>	Infrequent events <sup>b</sup>	Frequent events	Infrequent events
<b>Category 1:</b> building where vibration would interfere with interior operations.	65	65 <sup>c</sup>	0.05	0.05
<b>Category 2:</b> Residence and buildings where people normally sleep.	72	80	0.10	0.25
<b>Category 3:</b> Institutional land uses with primarily daytime use.	75	83	0.14	0.36

**Notes:**

- a) Frequent events is defined as more than 70 vibration events per day.
- b) Infrequent events is defined as fewer than 70 vibration events per day.
- c) This criterion limit is based on levels that are acceptable for most moderately sensitive equipment such as optical microscopes. Vibration-sensitive manufacturing or research will require detailed evaluation to define the acceptable vibration levels. Ensuring lower vibration levels in a building often requires special design of the HVAC systems and stiffened floors.

ที่มา: DOT-293630-1, (1998).[22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.4** เกณฑ์การสั่นสะเทือนที่เกิดจากพื้นดิน (ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความเร็วอนุภาค) สำหรับอาคารพิเศษอ้างอิงจากกระทรวงคมนาคมของสหรัฐอเมริกา (DOT-293630-1, 1998[22]) ใช้  $1e-6$  นิ้ว / วินาทีเป็นข้อมูลอ้างอิง

Type of Building or Room	Ground-borne vibration Impact levels (dB, ref. $1^{-6}$ in./sec)		Ground-borne vibration Impact levels (mm/s)	
	Frequent events <sup>a</sup>	Infrequent events <sup>b</sup>	Frequent events <sup>a</sup>	Infrequent events <sup>b</sup>
Concert Halls	65	65	0.05	0.05
TV Studios	65	65	0.05	0.05
Recording Studios	65	65	0.05	0.05
Auditoriums	72	80	0.10	0.25
Theaters	72	80	0.10	0.25

**Notes:**  
a) Frequent events is defined as more than 70 vibration events per day.  
b) Infrequent events is defined as fewer than 70 vibration events per day.

ที่มา: DOT-293630-1,1998[22]

การรถไฟแห่งสวีเดน (Banverket) และสำนักงานคุ้มครองสิ่งแวดล้อมแห่งสวีเดน (Naturvårdsverket) ได้ร่วมกันเสนอเกณฑ์สำหรับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการจราจรบนรถไฟดังแสดงในตารางที่ 2.5 (BVPO 724.001, 1997[25]) ค่าที่กำหนดโดยตารางนี้สอดคล้องกับขีดจำกัด

**ตารางที่ 2.5** เกณฑ์สำหรับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการรถไฟ

Vibration level r.m.s. (1-80 Hz)	Particle Velocity	Particle Acceleration
		0.4 mm/s

ที่มา: BVPO 724.001, 1997[24]

### 2.3.2 ผลกระทบการสั่นสะเทือนต่ออุปกรณ์ที่ไวสัมผัส Vibration effects on sensitive equipment

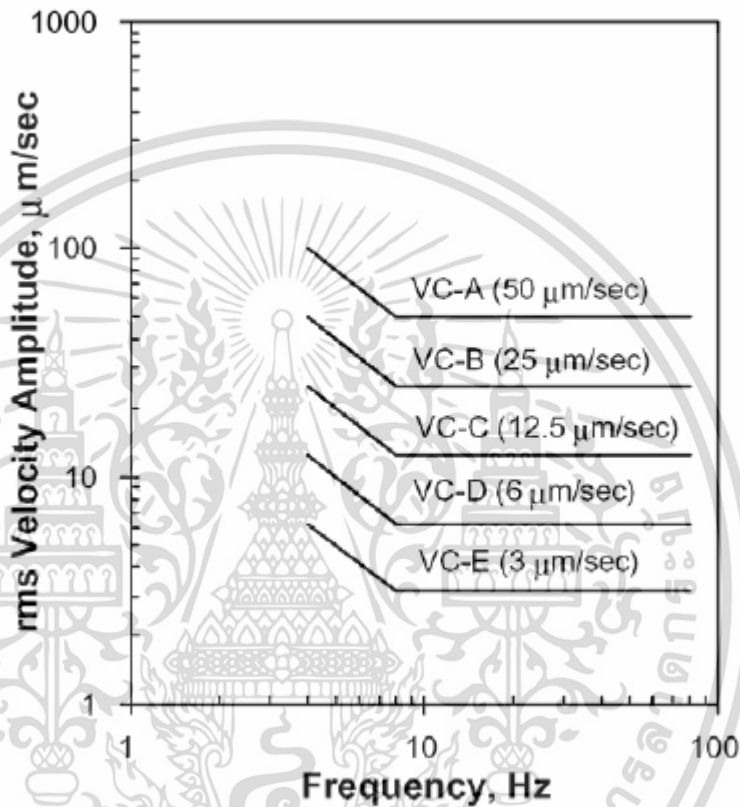
การสั่นสะเทือนภาคพื้นดินที่เกิดจากการจราจรอาจรบกวนการทำงานของอุปกรณ์ที่มีความละเอียดอ่อนเช่นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนภายในอาคาร ดังนั้นบางครั้งจึงจำเป็นต้องลดการสั่นสะเทือนทางรถไฟวิ่งผ่านใกล้กับ อาคาร. คุณลักษณะที่เหมาะสมในการตัดสินใจผลกระทบของอาคารที่เหมาะสมจะต้องตัดสินใจขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเฉพาะของทางอาคาร

ISO 10811-1 (2000) [25] และ ISO 10811-2 (2000)[26] ครอบคลุมประเด็นของการวัดการประเมินผลและการจำแนกประเภทของการสั่นสะเทือนและแรงกระแทกในอาคารด้วยอุปกรณ์ที่ละเอียดอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติหลักเกณฑ์ข้อเสนอแนะของผู้ผลิตจะให้ข้อมูลที่จำเป็นเกี่ยวกับระดับการสั่นสะเทือนสูงสุดสำหรับอุปกรณ์ที่มีความละเอียดอ่อน หากไม่มีข้อมูลที่นำเชื่อถือมากขึ้นรูปภาพ 2-11 อาจให้แนวทางทั่วไปเกี่ยวกับเกณฑ์การสั่นสะเทือนสำหรับอุปกรณ์ที่มีความละเอียดอ่อน

อุปกรณ์ห้าประเภทที่แตกต่างกันดังแสดงในโค้งใน รูปที่อธิบายไว้ในรูปที่ 2-11 เกณฑ์สำหรับระดับการสั่นสะเทือนสูงสุดที่อนุญาตสำหรับอุปกรณ์ที่สำคัญในเหตุการณ์เดียว



รูปที่ 2-11 เส้นโค้งเกณฑ์การสั่นสะเทือนทั่วไป ของ Amick(1997)[27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 รายละเอียดเส้นกราฟที่แสดงใน รูปที่ 2-11

Criterion Curve	rms Amplitude* µm/s (µin/s)	Detail size† microns	Description of Use
VC-A	50 (2000)	8	Adequate in most instances for optical microscopes to 400X, microbalances, optical balances, proximity and projection aligners, etc.
VC-B	25 (1000)	3	Appropriate for optical microscopes to 1000X, inspection and lithography equipment (including steppers) to 3 µm line widths.
VC-C	12.5 (500)	1	A good standard for most lithography and inspection equipment (including electron microscopes) to 1 µm detail size.
VC-D	6 (250)	0.3	Suitable in most instances for the most demanding equipment, including electron microscopes (TEMs and SEMs) and E-Beam systems, operating to the limits of their capability.
VC-E	3 (125)	0.1	A difficult criterion to achieve in most instances. Assumed to be adequate for the most demanding of sensitive systems, including long-path, laser-based small target systems, and other systems requiring extraordinary dynamic stability.

### 2.3.3 แรงสั่นสะเทือนส่งผลกระทบต่ออาคาร (Vibration impacts on buildings)

จากการทบทวนรายงานความเสียหายที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนต่ออาคาร (Nelson & Saurenman, 1983) แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้เพียง 5% ที่อาคารจะได้รับความเสียหายทางโครงสร้าง เนื่องจากความเร็วของอนุภาคน้อยกว่า 50 มม./วินาทีและไม่มีรายงานกรณีความเสียหายของโครงสร้างอาคารสำหรับอนุภาคความเร็วต่ำกว่า 25 มม./วินาที จากการตรวจสอบไม่มีความเสี่ยงของความเสียหายทางสถาปัตยกรรมต่ออาคารปกติเนื่องจากการสั่นสะเทือนน้อยกว่า 15 มม./วินาที

ISO 4866 (1990) [28] ให้แนวทางสำหรับการวัดการสั่นสะเทือนและผลกระทบต่ออาคาร ตามมาตรฐานนี้ระยะเวลาของแรงที่เป็นตัวกระตุ้นแบบไดนามิกเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญเช่นเดียวกับความถี่และช่วงของความถี่การสั่นสะเทือน ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอาคารที่ต้องพิจารณา ได้แก่ ประเภทและสภาพของอาคาร ความถี่ธรรมชาติและการหน่วง (damping) มิติของฐานอาคารและสภาพดินในพื้นที่

ยังสามารถจะแนะนำว่าบางอาคารที่มีความไวต่อการสั่นสะเทือนของสิ่งแวดล้อมเช่น โรงภาพยนตร์ สตูดิโอทีวี ห้องแสดงคอนเสิร์ตและห้องปฏิบัติการที่มีอุปกรณ์ที่ละเอียดอ่อนควรศึกษาแยกต่างหากและละเอียดถี่ถ้วนมากขึ้น เมื่อมีเส้นทางรถไฟสายใหม่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงอาคารดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 วิธีการผ่อนบรรเทาแรงสั่นสะเทือน

เพื่อลดแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟในระยะต่างๆที่ห่างออกมาจากรางรถไฟ มีประเด็นต่างๆกันออกไป ทั้งจากการบรรเทาที่แหล่งกำเนิด การบรรเทาที่ตัวกลางการแผ่กระจายรวมถึงรูปแบบโครงสร้างของตัวอาคารที่เป็นตัวรับสัญญาณการสั่นสะเทือน กล่าวอีกนัยหนึ่งวิธีการบรรเทาผลกระทบที่มีต่อการสั่นสะเทือนจากพื้นดินที่มากเกินไปสามารถแบ่งออกเป็นสามกลุ่มทั่วไป

กลุ่มแรกคือกลุ่มที่ลดทอนให้เกิดการสั่นสะเทือนน้อยลงในแหล่งกำเนิดของสัญญาณ กลุ่มที่สองคือการลดทอนแรงสั่นสะเทือนในระหว่างการแผ่กระจายของคลื่น หรือในตัวกลางการแผ่กระจาย และกลุ่มสุดท้ายคือการลดทอนแรงสั่นสะเทือนโครงสร้างที่รับแรงสั่นสะเทือน โดยเกณฑ์ในการพิจารณาว่าควรใช้การลดทอนในช่วงไหนจะใช้ด้านเศรษฐศาสตร์มาร่วมในการตัดสินใจ

### 2.4.1 วิธีบรรเทาผลกระทบในแหล่งกำเนิด (Mitigation methods in the source)

วิธีการบางอย่างที่ใช้เพื่อหลีกเลี่ยงการสั่นสะเทือนมากเกินไปในโครงสร้างทางรถไฟแสดงไว้ด้านล่าง (Wilson et al. 1983[29], Nelson & Saurenman, 1983[30], และ Bahrekazemi et al., 2003[2])

1. รางเชื่อม
  2. ดัดแปลงการออกแบบตัวไฟโดยเฉพาะระบบช่วงล่างหลัก
  3. ล้อที่ยืดหยุ่น (Resilient wheels)
  4. แนวโน้มของล้อ (Wheel truing)
  5. รางรถไฟ (Rail grinding)
  6. ตัวยึดรางยึดตรึงแบบยืดหยุ่นโดยตรง (Resilient direct fixation rail fasteners)
  7. ความคงตัวของดินภายใต้คันดิน (Stabilization of soil under the embankment)
  8. แผ่นพื้นลอย (Floating slabs)
  9. การลดความเร็วของรถไฟ (Reduction of train speed)
- โดยปกติแล้วจะใช้วิธีการเหล่านี้ร่วมกันสองวิธีขึ้นไป

### 2.4.2 วิธีการผ่อนบรรเทาที่ตัวกลางการแผ่กระจายแรงสั่นสะเทือน (Mitigation methods in the path)

บางครั้งอาจมีการเพิ่มอุปสรรคในทางที่คลื่นแพร่กระจายจากแหล่งกำเนิดไปยังแหล่งรับเพื่อลดการสั่นสะเทือนจากพื้นดิน วิธีการที่เรียกว่าการกระจายตัวแบบแผ่นนั้นได้ถูกทำการทดลอง (Haupt, 1978[31], Beskos, 1986[32], และ Ahmad & Al-Hussaini, 1991) [33] มีการใช้สถานที่ทดลองสำหรับที่เต็มไปด้วยสนามเพลาะ โดยใช้เป็นกำแพง ซึ่งจะแตกต่างกันด้วยร่องลึกแบบเปิดทั้งความกว้างและความลึกของร่องลึกมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการลดทอนแรงสั่นสะเทือน ยิ่งไปกว่านั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นความลึกที่เหมาะสมที่สุดของร่องลึกที่เติมเต็มด้วยดินเหนียวจะมีความยาวประมาณ 1.2 เท่าของความยาวคลื่นของคลื่น Rayleigh ในวัสดุดิน (Ahmad & Al-Hussaini) [33]

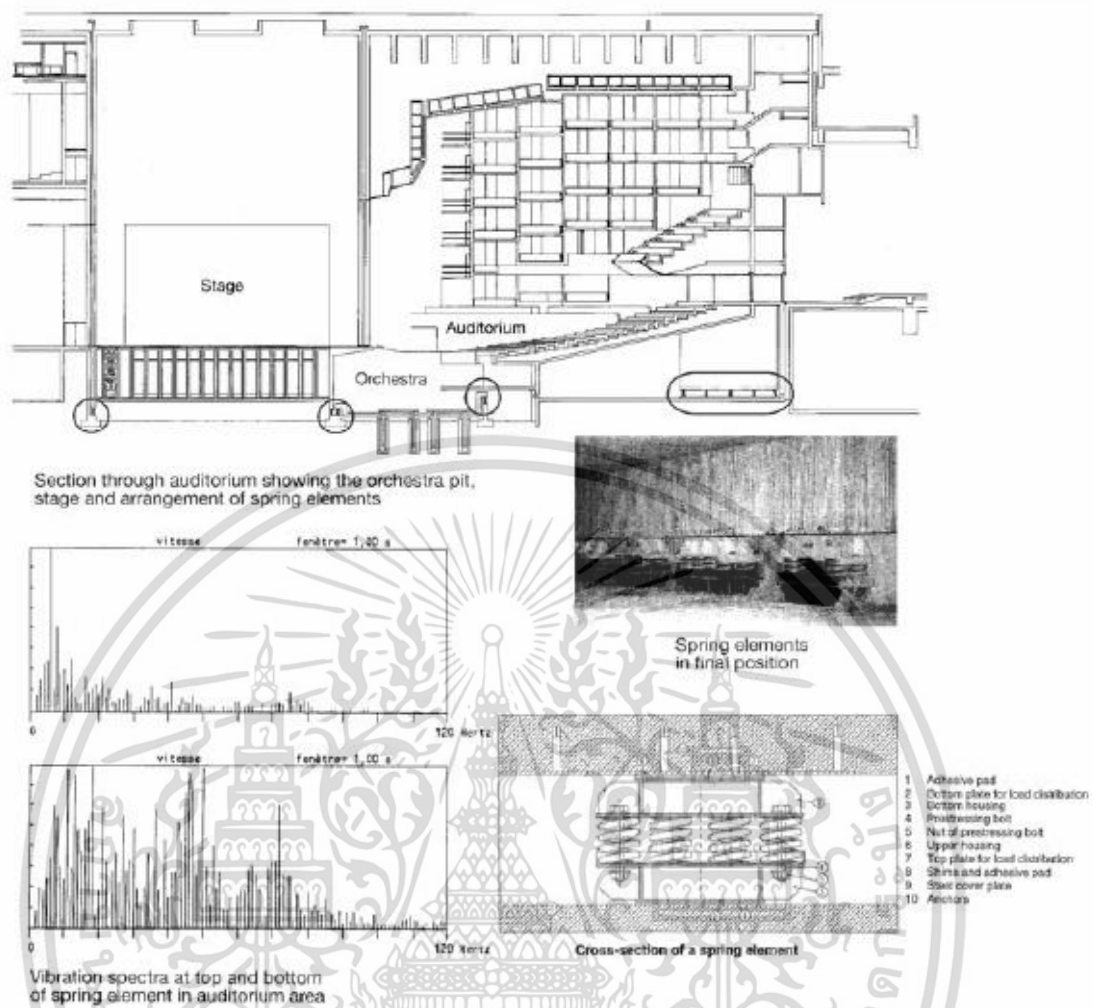
วิธีการนี้ถูกนำไปใช้กับความสำเร็จในการลดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการจราจรบนรถไฟโดยใช้ดินที่มีความเสถียรกับเสาปูนขาวในดิน ข้อเสียที่สำคัญของวิธีการในดินเหนียวอ่อนคือ เนื่องจากความถี่ต่ำของการสั่นสะเทือนในดินชนิดนี้ซึ่งสอดคล้องกับความยาวของคลื่นที่ยาวมาก ดังนั้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพพร้อมลึกของร่องดินต้องลึกมาก

### 2.4.3 วิธีการผ่อนบรรเทาที่ตัวอาคาร (Mitigation methods in the building)

หากมีอาคารเพียงไม่กี่แห่งที่ได้รับผลกระทบจากการสั่นสะเทือนที่เกิดจากพื้นดินมากเกินไป วิธีการผ่อนบรรเทาเช่น การแยกฐานรากอาคาร

การแยกฐานรากอาคารจากพื้นดินโดยใช้ระบบรองรับยืดหยุ่นดังแสดงในรูปภาพ 2-12 เป็นวิธีการที่ใช้ในบางกรณีเพื่อลดการสั่นสะเทือนจากพื้นดิน ในวิธีการนี้อาคารจะถือว่าเป็นวัตถุที่แข็งรองรับสปริงและตัวหน่วงจำนวนหนึ่ง ความถี่ธรรมชาติของระบบจะต้องได้รับการออกแบบให้ต่ำกว่าความถี่ต่ำสุดของการสั่นสะเทือนที่จะต้องลดลง ส่วนล่างซ้ายของรูปภาพ 2-12 แสดงให้เห็นว่าการสั่นสะเทือนลดลงอย่างไรที่ความถี่ต่างๆ ความถี่ธรรมชาติของระบบนี้ในทิศทางแนวตั้งจะรายงานว่าเป็น 4Hz เห็นได้จากสเปกตรัมความถี่ที่กำเนิดจากแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนที่มีความถี่สูงกว่าประมาณ 10 Hz ลดลงอย่างมีประสิทธิภาพ

ในกรณีที่อาคารอุตสาหกรรมที่มีการสั่นสะเทือนจากพื้นดินมากเกินไปอาจรบกวนการทำงานของอุปกรณ์บางอย่าง มันอาจจะเหมาะสมที่จะแยกเฉพาะบางส่วนของอาคารหรือแม้กระทั่งเพียงรากฐานของอุปกรณ์ที่มีความละเอียดอ่อนจากส่วนที่เหลือของอาคารใน โดยใช้วิธีที่คล้ายกันตามที่กล่าวไว้ข้างต้นสำหรับทั้งอาคาร



รูปที่ 2-12 การแยกอาคารเพื่อลดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากพื้นดินจากบริเวณใกล้เคียง  
 รางรถไฟโดยใช้ระบบสปริง (GERB Vibration Control Systems)  
 ที่มา: Mehdi Bahrekazemi [2]

### 2.5 แบบจำลองในการทำนายค่า (PREDICTION MODELS)

แบบจำลองที่มีความสามารถในการทำนายการสั่นสะเทือนที่เกิดจากพื้นดินเนื่องจากการจราจรบนรถไฟจะเป็นเครื่องมือที่ทรงพลังในมือของนักออกแบบทางรถไฟ นอกจากนี้แบบจำลองการทำนายอาจถูกใช้เพื่อประเมินผลของการตอบโต้ที่แตกต่างกันและนำมาใช้ที่ดีที่สุด

โดยทั่วไปมีสามแนวทางที่แตกต่างกันในการทำนายการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการจราจรบนรถไฟ ทั้งสามวิธีนี้มีทั้งทางทฤษฎีตัวเลขและการทดลอง แบบจำลองการวิเคราะห์สามารถอธิบายแง่มุมที่น่าสนใจและสำคัญของปรากฏการณ์ ในทางกลับกันโมเดลเชิงประจักษ์ที่ยึดตามการวัดภาคสนามมักใช้ในการประมาณคร่าวๆเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนที่พื้นดินในพื้นที่ที่คล้ายกับที่ตั้งการวัดด้วยความก้าวหน้าที่เกิดขึ้นในการออกแบบและการผลิตคอมพิวเตอร์ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาทำให้มีการใช้แบบจำลองตัวเลขชนิดต่าง ๆ ในการศึกษาปัญหาการสั่นสะเทือนจากพื้นดิน นอกจากเสียเวลาแล้วเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสียเปรียบหลักของการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อจำลองการสั่นสะเทือนที่เกิดจากพื้นดินอาจเกิดจากความไม่แน่นอนเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นอินพุตข้อมูลป้อนเข้าในแบบจำลอง

### 2.5.1 ลักษณะของแบบจำลอง

แบบจำลองการทำนายที่สมบูรณ์แบบที่สุทธครอบคลุมการทำนายแรงขนาดการสั่นสะเทือน ที่แหล่งกำเนิดและขนาดการสั่นสะเทือนในระยะทางที่แตกต่างจากแหล่งที่มาพิจารณา ทั้งทางเรขาคณิตและวัสดุที่ทำให้เกิดการลดทอนการสั่นสะเทือน เช่นเดียวกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้าง. ในส่วนนี้ชั้น(class)ที่แตกต่างกันของแบบจำลองแต่ละแบบจะถูกจำแนกด้วย ความแม่นยำ และความถูกต้องของการทำนาย

#### 2.5.1.1 ชั้นที่แตกต่างของโมเดล

สำหรับรถไฟรูปแบบใหม่ รูปแบบและความแม่นยำของแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายการสั่นสะเทือนจากพื้นดินจะต้องสะท้อนให้เห็นถึงขั้นตอนของกระบวนการออกแบบและ ข้อมูลที่มีอยู่ในรูปแบบข้อมูลป้อนเข้า บางครั้งแบบจำลองเดียวกัน สามารถใช้สำหรับกรณีที่แตกต่างกัน ของแต่ละการออกแบบด้วยชุดข้อมูลป้อนเข้าที่เหมาะสมซึ่งจะแตกต่างกัน แต่โดยทั่วไปแล้ว รูปแบบการจำลองการสั่นสะเทือนภาคพื้นดินสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 คลาส

คลาสแรกตามคำแนะนำของร่างมาตรฐาน ISO / CD 14837-1 (2001) [6]

(1)แบบจำลองรูปแบบการกำหนดขอบเขตที่ควรใช้ในระยะเวลาแรกของโครงการ แบบจำลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อระบุปัญหาของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากพื้นดินและบริเวณที่มีปัญหารุนแรงที่สุด โมเดลเหล่านี้มีประโยชน์เมื่อตัดสินใจเลือกตำแหน่งของเส้นทางรถไฟใหม่ รูปแบบประเภทนี้มักจะใช้งานง่ายและรวดเร็วมากและต้องการพารามิเตอร์ข้อมูลป้อนเข้าน้อยมากที่มักจะมีอยู่ในขั้นตอนแรกของกระบวนการพัฒนาของโครงการ พารามิเตอร์เหล่านี้ได้แก่ ประเภทของระบบรางรถไฟ, รถไฟที่จะวิ่งไปตามราง, สภาพพื้นดินโดยทั่วไปของดินโดยรอบและความไวต่อการสั่นสะเทือนของอาคารที่อยู่ใกล้เคียงกับการสั่นสะเทือนของพื้นดิน แบบจำลองนี้มีประโยชน์สำหรับการศึกษาพื้นที่ขนาดใหญ่เพื่อค้นหาบริเวณที่อาจมีปัญหามาตามแนวทางรถไฟ

(2)การออกแบบเบื้องต้นและแบบจำลองการประเมินสิ่งแวดล้อมที่ใช้ในขั้นตอนการออกแบบเบื้องต้นของโครงการรถไฟเป็นคลาสที่ 2 ของรูปแบบโมเดล แบบจำลองเหล่านี้เหมาะสำหรับการวัดปริมาณความรุนแรงของปัญหาด้วยการสั่นสะเทือนที่เกิดจากพื้นดินและระบุตำแหน่งของมันตามรางรถไฟอย่างแม่นยำมากกว่าแบบจำลองการกำหนดขอบเขต ในความเป็นจริงข้อแตกต่างระหว่างรูคลาสที่ 1 และ 2 นั้นมีไม่มากนัก แบบจำลองการประเมินสิ่งแวดล้อมมีความซับซ้อนมากกว่าแบบจำลองการกำหนดขอบเขต ตรงที่ต้องการพารามิเตอร์ข้อมูลป้อนเข้าเพิ่มเติม

และคลาสของแบบจำลองแบบสุดท้าย คือ แบบที่ 3 เป็น

(3)แบบจำลองที่ใช้สำหรับการทำนายการสั่นสะเทือนจากพื้นดินคือแบบจำลองการออกแบบที่มีรายละเอียดที่ใช้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการออกแบบหลังจากที่มีการตัดสินใจตำแหน่งของเส้นทางรถไฟเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ประเภทของแบบจำลองนี้สามารถใช้ในการหาจำนวนปัญหาหรือผลลัพธ์ของการบรรเทาผลกระทบสำหรับส่วนเฉพาะตามเส้นทาง

### 2.5.1.2 โครงสร้างทั่วไปของแบบจำลอง

แบบจำลองของระบบคือคำอธิบายคุณสมบัติ (บางส่วน) ของมันซึ่งเหมาะสำหรับวัตถุประสงค์บางอย่าง แบบจำลองไม่จำเป็นต้องเป็นคำอธิบายที่ถูกต้องและแม่นยำของระบบและไม่ต้องทำให้ผู้ใช้เชื่อเช่นนั้นเพื่อที่จะให้บริการตามวัตถุประสงค์ (Ljung, 1987) [34]

ความจริงที่ว่าแรงสั่นสะเทือนจากพื้นดินเดินทางผ่านวัสดุต่าง ๆ จากแหล่งกำเนิดผ่านชั้นดินสู่อาคารและตัวรับสัญญาณทำให้การคาดการณ์ของมันเป็นปัญหาที่ซับซ้อน โดยปกติแล้วระดับการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการจราจรของรถไฟจะถูกประเมินโดยการใช้ปัจจัยการปรับต่างๆกับระดับการสั่นสะเทือนพื้นฐาน ปัจจัยเหล่านี้อธิบายถึงตัวแปรที่สำคัญต่าง ๆ ของปัญหาเช่นความเร็วรถไฟ, สภาพของเส้นทางรางรถไฟ, สภาพดิน, ชนิดของอาคารและที่ตั้งของตัวรับสัญญาณภายในอาคาร

แบบจำลองต่างๆ สำหรับการทำนายการสั่นสะเทือนที่เกิดจากพื้นดินจะต้องมีส่วนประกอบอย่างน้อยสามชิ้น ส่วนประกอบทั้งสามนี้แหล่งกำเนิดสัญญาณการสั่นสะเทือน, เส้นทางเคลื่อนตัวของแรงสั่นสะเทือน และ จุดรับสัญญาณการสั่นสะเทือน

### 2.5.2 แบบจำลองที่แนะนำโดย DOT-T-95-16 และ DOT-293630-1

US DOT-T-95-16, (1995) [35] และ US-DOT-293630-1, (1998)[22] ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในสหรัฐอเมริกาสำหรับการทำนายการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการจราจรบนรถไฟแสดงการจำแนกที่คล้ายกันของวิธีการที่เหมาะสม. การทำนายการสั่นสะเทือนสามขั้นตอนตามคู่มือมีชื่อว่า "การคัดกรอง", "การประเมินทั่วไป" และ "การวิเคราะห์โดยละเอียด"

ในขั้นตอน "การคัดกรอง" ที่เหมาะสมในระหว่างการประเมินเบื้องต้นส่วนใหญ่ใช้ตารางระยะทางเพื่อตรวจสอบว่าการใช้ที่ดินที่ไวต่อเสียงและการสั่นสะเทือนหรือไม่ (อาคารที่อยู่อาศัย สำนักงาน โรงงาน และอื่น ๆ ) อยู่ใกล้พอที่จะได้รับผลกระทบจากทางรถไฟ การวิเคราะห์รายละเอียดเพิ่มเติมจะต้องเฉพาะเมื่อมีการระบุการใช้ที่ดินที่ละเอียดอ่อน ในขั้นตอนนี้ไม่จำเป็นต้องมีความรู้เพิ่มเติมเกี่ยวกับลักษณะการสั่นสะเทือนของระบบรถไฟหรือต้องการสภาพทางธรณีเทคนิคของพื้นที่ ระยะการคัดกรองที่กำหนดโดย US DOT-293630-1 (1998)[22] แสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.7 การคัดกรองระยะทางสำหรับการประเมินการสัมผัสที่อันตราย  
กระทรวงการขนส่ง ประเทศสหรัฐอเมริกา(DOT)

รูปแบบการใช้ ที่ดิน	ความถี่การ เคลื่อนผ่านของ รถไฟ	ระยะทางในหน่วยเมตรที่เข้าข่ายในการคัดกรอง แบ่งตาม ความเร็วของรถไฟที่แล่นผ่าน		
		<160 กม./ชม.	160-320กม./ชม.	480กม./ชม.
ที่อยู่อาศัย	บ่อยครั้ง	37	67	84
	ไม่บ่อยครั้ง	18	30	43
อุตสาหกรรม	บ่อยครั้ง	30	49	67
	ไม่บ่อยครั้ง	6	21	30

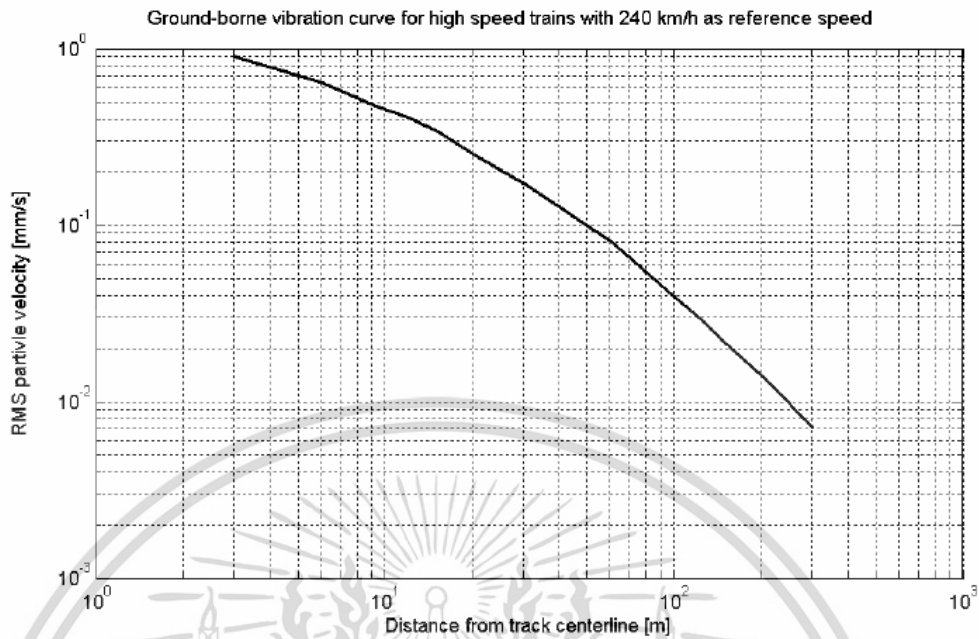
ความถี่บ่อยครั้ง คือมีการผ่านของรถไฟมากกว่า 70 ครั้งในหนึ่งวัน

ความถี่ไม่บ่อยครั้ง คือมีการผ่านของรถไฟน้อยกว่า 70 ครั้งในหนึ่งวัน

ที่มา: (DOT-293630-1, 1998)[22]

ในขั้นตอน”การประเมินทั่วไป”จะใช้เส้นโค้งทั่วไปที่อธิบายระดับการสัมผัสที่อันตรายเป็นฟังก์ชันของระยะทางจากทางวิ่งรถไฟ ระดับการสัมผัสที่อันตรายจะถูกปรับตามปัจจัยต่าง ๆ เช่นระบบราง, ความเร็วรถไฟ, สภาพรางและล้อ, ประเภทของอาคารและตำแหน่งตัวรับภายในอาคาร ในขั้นตอนนี้คลื่นความถี่ของการสัมผัสที่อันตรายจะไม่ได้รับการพิจารณา

เส้นโค้งการสัมผัสที่อันตรายทั่วไปสำหรับรถไฟความเร็วสูงล้อเหล็กที่นำเสนอโดย DOT-293630-1 (1998) แสดงในรูปที่ 2-13 เส้นโค้งนี้ให้ระดับการสัมผัสที่อันตรายทั่วไปบนพื้นดินโดยสมมติความเร็วประมาณ 270 กม./ ชม. สำหรับรถไฟระดับจะต้องมีการปรับสำหรับเงื่อนไขที่แตกต่างจากที่ระบุไว้ในรูป ตามคู่มือสำหรับโหมดการขนส่งเฉพาะประเภท ความผันผวน 5 ถึง 10 เดซิเบลในระดับการสัมผัสที่อันตรายไม่ใช่เรื่องแปลกแม้จะมีเงื่อนไขที่คล้ายคลึงกัน เส้นโค้งที่แสดงในรูปที่ 2-13 ให้ช่วงสูงสุดของข้อมูลการวัดซึ่งจะเกินกว่า 1 ถึง 2 เดซิเบลยกเว้นในกรณีที่สภาพแตกต่างจากที่สันนิษฐานไว้มาก เช่นแนวลอนจุดบนบนล้อหรือการสัมผัสที่อันตราย ที่ลดทอนน้อยกว่า "ปกติ"



รูปที่ 2-13 เส้นโค้งการสั่นสะเทือนที่เกิดจากพื้นดินโดยทั่วไป

ที่มา: (DOT-293630-1, 19989)[22]

รูปที่ 2-13 เป็นการแสดงเส้นโค้งการสั่นสะเทือนจากกระทรวงคมนาคมสหรัฐอเมริกา(DOT) โดยที่แกน x ระยะห่างจากเส้นทางรางรถไฟ และในแกน y คือค่าเฉลี่ยกำลังสองของความเร็วของอนุภาคที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญตามระยะทางที่ห่างออกจากรางรถไฟหรือแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือน ปัจจัยที่ใช้ในการปรับที่จะใช้กับเส้นโค้งทั่วไปได้รับจากตารางที่ 2.9 ปัจจัยที่ได้รับเป็นตัวเลขที่จะต้องคูณด้วยค่าการสั่นสะเทือนอ่านจากเส้นโค้งที่แสดงในรูปที่ 2-14 ในการใช้ปัจจัยการปรับสำหรับล้อและรางจะใช้เฉพาะปัจจัยการปรับที่ใหญ่ที่สุดเท่านั้นและปัจจัยทั้งสองนี้ไม่ได้ถูกนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 ปัจจัยการปรับเนื่องจากแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนที่จะใช้ร่วมกับเส้นโค้ง  
ทั่วไปแสดงในรูปที่ 2-13 ตาม DOT-293630-1, (1998)[22]

Factors Affecting Vibration Source			
Source Factor	Adjustment to Propagation curve		Comment
Speed	Vehicle Speed (km/h)	Adjust. Factor	Vibration level in dB is proportional to $20 \cdot \log(\text{speed}/\text{speed}_{ref})$ . Sometimes the vibration with speed has been observed to be as low as $10$ to $15 \cdot \log(\text{speed}/\text{speed}_{ref})$ . These adjustment factors should be multiplied by the base r.m.s. vibration read from Figure 2-13.
	480	2.00	
	320	1.33	
	240	1.00	
	180	0.67	
120	0.50		
Resilient Wheels	1.00		Resilient wheels do not generally affect ground-borne vibration except at frequencies greater than 80 Hz.
Worn Wheels or Wheels with Flats	3.16		Wheel flats or wheels that are unevenly worn can cause high vibration levels. This problem can be prevented by wheel truing and slip-slide detectors to prevent the wheels from sliding on the track.
Worn or Corrugated Crack	3.16		If both the wheels and the track are worn, only one adjustment should be used. Corrugated track is a common problem, however it is difficult to predict the conditions that corrugations to occur. Rail grinding can remove rail corrugations.
Crossovers and Other Special Track work	3.16		Wheel impacts at special track work with standard frogs will significantly increase vibration levels. This increase will be less at greater distances from the track. Moreover point frogs mitigate this problem.
Floating Slab Track bed.	0.18		The reduction achieved with a floating slab track bed is strongly dependent on the frequency characteristics of the vibration.
Ballast Mats	Select highest one that applies	0.32	Actual reduction is strongly dependent on frequency of vibration.
High Resilience Fasteners		0.56	Slab track with fasteners that are very compliant in the vertical direction can reduce vibration at frequencies greater than 40 Hz.
Resiliently Supported Ties		0.32	Resiliently supported tie system in tunnel have been found to provide very effective control of low-frequency vibration.
Type of Track Structure	Relative to at-grade tie & ballast:		The general rule is the heavier the structure, the lower the vibration levels. Putting the track in cut may reduce the vibration levels slightly. Rock-based tunnels will shift vibration to a higher frequency.
	Ariel/ Viaduct structure	0.32	
	Open Cut	1.00	
	Relative to bored tunnel in soil:		
	Station	0.56	
	Cut & Cover	0.71	
Rock-based	0.18		

ที่มา: (DOT-293630-1, 19989)[22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอน”การวิเคราะห์อย่างละเอียด”การสั่นสะเทือนที่แหล่งเฉพาะนั้นถูกคาดการณ์โดยใช้เครื่องมือที่แม่นยำที่สุดที่มีอยู่ ไม่มีวิธีการที่ได้มาตรฐานได้รับการพัฒนาสำหรับการวิเคราะห์ระดับนี้ซึ่งมักจะเป็นขั้นตอนที่ซับซ้อน ไม่มีความแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างแบบจำลองการวิเคราะห์ทั่วไปและแบบละเอียด ในขณะที่การวัดพื้นที่บางแห่งอาจใช้สำหรับการกำหนดเส้นโค้งการกระจายทั่วไป (ซึ่งอาจพิจารณาเป็นวิธีการวิเคราะห์แบบละเอียด) ส่วนโค้งการทำนายทั่วไปอาจเพียงพอสำหรับการคาดการณ์การสั่นสะเทือนภาคพื้นดินในกรณีส่วนใหญ่ยกเว้นอาคารพิเศษ การประเมินอย่างละเอียดเป็นตัวอย่างที่เหมาะสมในการตรวจสอบพื้นที่ที่ระยะการประเมินทั่วไปซึ่งว่ามีโอกาสเกิดผลกระทบการสั่นสะเทือนสูง

### 2.5.3 แบบจำลองนอร์เวย์

แบบจำลองเชิงประจักษ์สำหรับการทำนายการสั่นสะเทือนความถี่ต่ำจากการจราจรทางรถไฟบนดินอ่อนได้รับการพัฒนาโดย Norwegian Geotechnical Institute, NGI (Madhus et al., 1996[64]) ตัวแบบที่มีสูตรทางสถิติทำนายทั้งค่าที่คาดหวังและขีดจำกัด ความเชื่อมั่นที่เกี่ยวข้อง รุ่นนี้ถูกใช้ในการวางแผน Gardemobanen (รางรถไฟความเร็วสูงระหว่างออสโลและสนามบิน) แบบจำลองการทำนายการสั่นสะเทือนที่ช่วงกลางของอาคารซึ่งตั้งอยู่ห่างจากเส้นทางรถไฟ

ข้อมูลที่ใช้สำหรับแบบจำลองการทำนายนี้รวบรวมจากการตรวจวัดในพื้นที่ต่าง ๆ ที่มีสภาพดินแตกต่างกันไปตั้งแต่ดินอ่อนจนถึงดินแข็งและอาคารประเภทต่าง ๆ สถานที่ตั้งอยู่ตามเส้นทางรถไฟที่แตกต่างกันในนอร์เวย์และสวีเดน การสั่นสะเทือนถูกวัดพร้อมกันที่บริเวณผืนดิน หลายจุดบนพื้นผิวดินบนฐานรากของอาคารและบนชั้นสูงของอาคาร โดเมนความถี่สำหรับข้อมูลที่เก็บไว้จากการวัดจะครอบคลุมความถี่อย่างน้อยระหว่าง 3 ถึง 80 Hz เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการสั่นสะเทือนของการสั่นสะเทือนของพื้นดินที่เกี่ยวข้องกับทางรถไฟมักจะมีการบันทึกมากกว่า 5 ถึง 10 ทางเดินของรถไฟประเภทเดียวกัน ขึ้นอยู่กับประวัติเวลาที่บันทึกไว้ค่าอ็อกเทฟหนึ่งในสามและความถี่ถ่วงน้ำหนัก r.m.s(ค่าเฉลี่ยกำลังสอง) ค่าตามมาตรฐาน ISO 2631 [19] และ ISO 8041[36] ด้วยเวลารวมหนึ่งวินาทีสำหรับส่วนที่รุนแรงที่สุดของการบันทึกได้รับการประเมิน

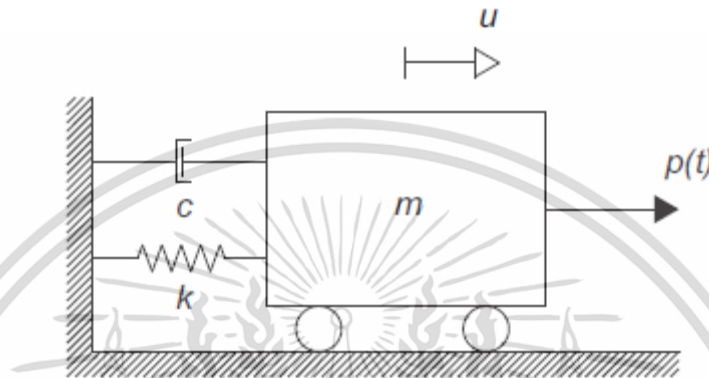
## 2.6 พลศาสตร์ทางโครงสร้าง (Structural dynamic)

พลศาสตร์โครงสร้างคือการศึกษาคอนกรีตที่มีภาระกระตุ้นแบบพลศาสตร์(ไดนามิก)เช่นแรงลม แรงแผ่นดินไหว ผลกระทบจากการเคลื่อนย้ายโหลด เมื่อพูดถึงพลศาสตร์ จะง่ายที่สุดในการศึกษาโครงสร้างที่เรียบง่าย ตัวอย่างของโครงสร้างดังกล่าวเห็นได้ในรูปที่ แบบจำลองนี้ประกอบด้วยมวล  $m$  (กก.) ซึ่งเชื่อมต่อกับสปริงด้วยความแข็ง  $k$  (กก./ชม.) และตัวหน่วงความหนืดที่มีสัมประสิทธิ์การความหนืดคือ  $c$  โครงสร้างถูกกระตุ้นด้วยแรงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา  $p(t)$  ทำให้เกิดเสียรูปของโครงสร้าง โครงสร้างที่สามารถเสียรูปได้ในทิศทางเดียว คือระบบที่มีระดับของความอิสระระดับเดียว (SDOF)(single degree of freedom)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.1 การสั่นแบบอิสระ (Free Vibration)

การสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free vibration) หมายถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีแรง หรือแรงบิดมารบกวนสถานะสมดุลในตอนแรกทำให้เริ่มสั่นสะเทือน แต่ขณะที่สั่นสะเทือนเป็นการสั่นอย่างอิสระไม่มีแรงภายนอกใดมากระทำต่อระบบเลย ตัวอย่างของการสั่นสะเทือนแบบอิสระ ได้แก่ การสั่นของลูกตุ้มนาฬิกา การแกว่งของชิงช้า เป็นต้น



รูปที่ 2-14 แบบจำลองพลศาสตร์อย่างง่ายของระบบ

สำหรับระบบยืดหยุ่นเชิงเส้น แรงในสปริง  $f_s$  เป็นสัดส่วนกับการกระจัด ตามกฎของฮุค (Hooke law)

$$f_s = ku \quad (2.8)$$

ในตัวย่อความหนืดแรงหน่วง  $f_D$  นั้นแปรผันตามความเร็วของ  $\dot{u}$

$$f_D = c\dot{u} \quad (2.9)$$

ผลรวมของแรงทั้งหมดและกฎข้อที่สองของนิวตัน แสดงถึง

$$\sum F = p(t) - f_s - f_D = m\ddot{u} \quad (2.10)$$

ซึ่งหลังจากจัดเรียงผลลัพธ์ใหม่จะได้สมการการเคลื่อนที่สำหรับระบบ SDOF

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (2.11)$$

เพื่ออธิบายการเคลื่อนไหวในโครงสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้นหลายองศาอิสระ (MDOF) รูปแบบการใช้งานจะคล้ายกับระบบ SDOF สมการการเคลื่อนที่สำหรับระบบ MDOF ในรูปแบบเมทริกซ์สามารถเขียนเป็น

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = p(t) \quad (2.12)$$

โดยที่  $M$ ,  $C$ ,  $K$  คือเมทริกซ์มวล, damping และความแข็งตามลำดับ  $p$  คือ เวกเตอร์ของแรงที่ขึ้นอยู่ กับค่าของเวลา  $t$ .  $\ddot{u}$ ,  $\dot{u}$  และ  $u$  คือเวกเตอร์การเร่งความเร็ว, ความเร็วและ การกระจัด

โดยทางด้านซ้ายมือของสมการจะเป็นส่วนที่แสดงถึงลักษณะของระบบ ซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลของ มวล ตัวย่อการสั่นสะเทือน และค่าคงที่ของสปริง ส่วนทางด้านขวามือจะแสดงถึงแรง (หรือแรงบิด) ภายนอกที่กระทำกับระบบ สำหรับการสั่นอย่างอิสระ เนื่องจากไม่มีแรงภายนอกกระทำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อระบบขณะสั้น ทางด้านขวามือจึงมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสมการ จะกลายเป็น สมการที่ 2.13

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = 0 \quad (2.13)$$

### 2.6.1.1 การสั่นแบบอิสระของระบบที่ไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน

จากรูปแบบสมการของการสั่นอย่างอิสระในสมการที่ (2.13) หากไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน จะเขียนได้เป็น

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \quad (2.14)$$

ลักษณะการสั่นสะเทือนในกรณีนี้หาได้จากการแก้สมการอนุพันธ์ (2.14) ในกรณีนี้สมการช่วยคือ

$$Mr^2 + K = 0 \quad (2.15)$$

ซึ่งจะได้คำตอบของสมการช่วยเป็น  $\pm i\sqrt{k/m}$

เนื่องจากค่าความแข็งสปริง  $k$  และมวล  $m$  เป็นจำนวนบวกเสมอ ดังนั้นคำตอบของสมการ (2.15) จึงเป็นจำนวนจินตภาพเสมอ

คำตอบของสมการอนุพันธ์ (2.14) ซึ่งแสดงถึงการเคลื่อนที่ของระบบการสั่นที่ไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน แสดงได้ดังสมการ

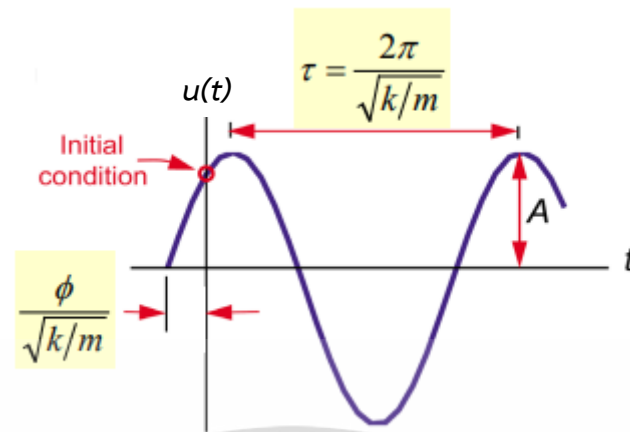
$$u = A_1 \cos\left(\sqrt{\frac{K}{M}}t\right) + A_2 \sin\left(\sqrt{\frac{K}{M}}t\right) \quad (2.16)$$

หรือ

$$u = A \sin\left(\sqrt{\frac{K}{M}}t + \phi\right) \quad (2.17)$$

โดย  $A_1$ ,  $A_2$  หรือ  $A$ ,  $\phi$  เป็นค่าคงที่ซึ่งได้จากเงื่อนไขค่าเริ่มต้น (initial condition) ของการสั่นสะเทือน เช่น ตอนเริ่มสั้น ตำแหน่งของมวล  $x$  อยู่ที่ใด หรือมวลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าใด การหาค่าคงที่เหล่านี้จะ กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป สำหรับในสมการที่ (2.17) ตัวแปร  $A$  แสดงถึงขนาดของการสั่นสะเทือน ส่วน  $\phi$  แสดงถึงเฟสของการสั่นสะเทือน

รูปที่ 2-15 แสดงกราฟการสั่นสะเทือนของระบบที่ไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน ซึ่งเขียนตามรูปแบบ สมการที่ (2.17) เนื่องจากรูปแบบของสมการเป็นฟังก์ชันไซน์ ดังนั้นการสั่นสะเทือนจะเกิดขึ้นตลอด โดยขนาดการสั่นสะเทือนจะมีค่าเท่ากับ  $A$  และจะไม่ลดลง ในทางกายภาพอาจอธิบายได้ว่าการไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือนทำให้ไม่มีการสูญเสียพลังงานออกจากระบบ พลังงานการสั่นสะเทือนในระบบจึงคงที่ ขนาดการสั่นจึงไม่ลดลง ส่วนตำแหน่งบนกราฟไซน์ที่แสดงจุดเริ่มต้นของการสั่นสะเทือนสัมพันธ์กับตัวแปร  $\phi$  นอกจากนี้ยังจะเห็นว่าคาบการสั่นสะเทือน  $T$  จะมีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งสปริงและมวลดังสมการ



รูปที่ 2-15 การตอบสนองการกระจัดสำหรับระบบ SDOF ที่ไม่มีการหน่วง

$$\tau = \frac{2\pi}{\sqrt{k/m}} \quad (2.18)$$

แต่จากที่คาบการสั่นสะเทือน  $\tau$  มีความสัมพันธ์กับความถี่การสั่นสะเทือน  $f$  (frequency) และความเร็วเชิงมุมของการสั่น  $\omega$  (angular velocity of the cyclic motion หรือ circular frequency) ดังสมการ

$$\tau = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.19)$$

จะได้ว่า

$$\omega = \sqrt{k/m} \quad (2.20)$$

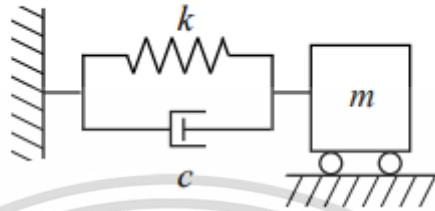
จะเห็นว่าความเร็วเชิงมุมการสั่น ความถี่การสั่น หรือคาบการสั่นสะเทือนในกรณีการสั่นอย่างอิสระ นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าความแข็งของสปริง  $k$  และมวล  $m$  ของระบบเท่านั้น ไม่ขึ้นกับสภาวะเริ่มต้นของการสั่นสะเทือนเลย พิจารณาตัวอย่างระบบที่มีมวลและสปริงเพียงสองส่วนประกอบเท่านั้น ระบบนี้ก็จะมีค่าความถี่การสั่นสะเทือนอยู่ค่าหนึ่งซึ่งสัมพันธ์กับค่าความแข็งสปริงและมวล ถึงแม้ว่าจะยึดสปริงหรือถอดสปริง ในตอนเริ่มต้นเพื่อปล่อยให้สปริงสั่นแตกต่างกันอย่างไร ระบบนี้ก็ยังคงสั่นที่ความถี่เท่าเดิมซึ่งคำนวณได้ตาม สมการที่ (2.20) เสมอไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากค่าความถี่นี้เป็นสมบัติของระบบการสั่นสะเทือน จึงเรียกความถี่นี้ว่า ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency)

$\omega_n$

### 2.6.1.2 การสั่นแบบอิสระของระบบที่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน

ในหัวข้อที่ 2.6.1.1 ได้กล่าวถึงการสั่นแบบอิสระของระบบที่ไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน ซึ่งจะพบว่าในระบบเหล่านั้นขนาดของการสั่นสะเทือนจะมีขนาดคงที่ไม่ลดลง เนื่องจากไม่มีการสูญเสียพลังงานในระบบเลย อย่างไรก็ตามในระบบจริงแล้ว จะมีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากสาเหตุต่างๆ เช่น จากแรงเสียดทานแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของของไหล การสูญเสียพลังงานในการเสียดรูปของ

วัสดุ เป็นต้น ดังนั้นการจำลองระบบการสั่นสะเทือนจึงมักจะต้องรวมตัวหน่วงการสั่นสะเทือนเข้าไปด้วย รูปที่ 2-16 แสดงระบบการสั่นสะเทือนอย่างง่าย ซึ่งประกอบด้วยมวล สปริง และตัวหน่วงการสั่นสะเทือน สมการการเคลื่อนที่ของระบบการสั่นสะเทือนนี้คือ



รูปที่ 2-16 ระบบอย่างง่ายที่ประกอบด้วยมวล สปริง และตัวหน่วงการสั่นสะเทือน

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (2.21)$$

แก้สมการ

$$mr^2 + cr + k = 0 \quad (2.22)$$

คำตอบของ 2.22 คือ

$$r_{1,2} = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m} \quad (2.23)$$

คำตอบจะเป็นไปได้ 3 กรณีคือ

1) กรณี  $c^2 - 4mk < 0$  : กรณีนี้คำตอบจะเป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งมีส่วนจริงเป็นจำนวนจริงลบ ในกรณีนี้คำตอบของสมการอนุพันธ์ คือ

$$y = Ae^{au} \sin(bu + \phi) \quad (2.24)$$

2) กรณี  $c^2 - 4mk = 0$  : กรณีนี้คำตอบของสมการช่วย  $1r$  และ  $2r$  จะเป็นจำนวนจริงลบที่มีค่าเท่ากัน โดย  $r_1 = r_2 = r = -c/2m$

ดังนั้นคำตอบของสมการอนุพันธ์ในกรณีนี้ คือ

$$y = (C_1 + C_2u)e^{r_1u} \quad (2.25)$$

3) กรณี  $c^2 - 4mk > 0$  :: กรณีนี้คำตอบของสมการช่วย  $1r$  และ  $2r$  จะเป็นจำนวนจริงลบ 2 จำนวนที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากค่า  $m$ ,  $c$  และ  $k$  มีค่าเป็นบวกเสมอ จึงทำให้ค่า  $c$  มากกว่ารากที่สองของ  $c^2 - 4mk$  เสมอดังนั้นคำตอบของสมการอนุพันธ์ในกรณีนี้ คือ

$$y = C_1e^{r_1u} + C_2e^{r_2u} \quad (2.26)$$

เมื่อพิจารณารูปแบบสมการ (2.24), (2.25) และ (2.26) ซึ่งแสดงถึงลักษณะการเคลื่อนที่  $y$  ของมวล  $m$  จะพบว่า สมการที่ (2.24) มวลจะมีการสั่นสะเทือน (มีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา) เนื่องจากในสมการมีเทอมของฟังก์ชันไซน์ประกอบอยู่ ส่วนสมการที่ (2.25) และ (2.26) จะไม่มีการสั่นสะเทือนเนื่องจากในสมการมีแต่เทอมของฟังก์ชัน exponential เท่านั้น จะเห็นว่ากรณีที่ 2 จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นกรณีที่เปลี่ยนผ่านจากระบบที่มีการสั่นไปเป็นไม่มีการสั่น พิจารณาสมการ  $c^2 - 4mk = 0$  ซึ่งเป็นเงื่อนไขของกรณีที่สอง หรืออาจเขียนได้ว่า

$$c = c_{cr} = 2\sqrt{km} = 2m\omega_n \quad (2.27)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ตัวหน่วงการสั่นสะเทือน  $c$  ในสมการ (2.27) นี้เรียกว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวหน่วง การสั่นสะเทือนวิกฤต (Critical damping coefficient,  $c_{cr}$ ) ซึ่งเป็นค่าตัวหน่วงที่ทำให้ระบบเปลี่ยนจากระบบที่มีการสั่นไปเป็นระบบที่ไม่มีการสั่น หากสัมประสิทธิ์ตัวหน่วงการสั่นสะเทือนมีค่าน้อยกว่าค่าในสมการที่ (2.27) แล้วจะพบว่าระบบจะมีการสั่นสะเทือน แต่ถ้าสัมประสิทธิ์ตัวหน่วงการสั่นสะเทือนมีค่ามากกว่าค่าใน สมการที่ (2.27) แล้ว ระบบจะไม่มีการสั่นสะเทือนอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ตัวหน่วง การสั่นสะเทือนกับค่าตัวหน่วงวิกฤต จะถูกเรียกว่าอัตราส่วนการหน่วง (Damping ratio,  $\xi$ ) ดังแสดงในสมการ

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{2}{2\sqrt{km}} 2m\omega_n \quad (2.28)$$

อัตราส่วนการหน่วงนี้จะบอกให้ทราบว่าระบบที่พิจารณาจะมีการสั่นสะเทือนหรือไม่ พิจารณาสมการการเคลื่อนที่ (2.11) เมื่อแทนค่า  $c$  ตามสมการที่ (2.29) และค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติกับมวล และค่าคงที่สปริง ในสมการที่ (2.20) ลงไปจะได้สมการการเคลื่อนที่ในอีกรูปแบบหนึ่งดังสมการ

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 u = 0 \quad (2.29)$$

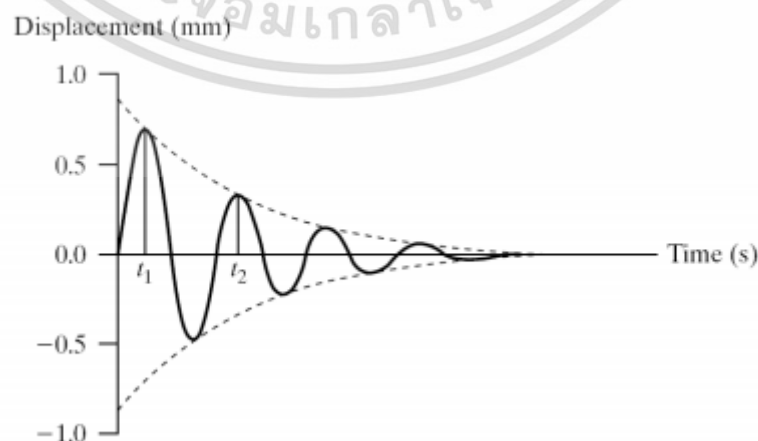
คำตอบของสมการช่วยก็สามารถเขียนได้เป็น

$$r_{1,2} = -\xi\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1} \quad (2.30)$$

และคำตอบที่เป็นไปได้สามกรณีที่กล่าวข้างต้นอาจเขียนได้ดังนี้

1) กรณี  $c^2 - 4mk < 0$  หรืออาจเขียนได้เป็น  $0 < \xi < 1$

กรณีนี้ค่าตัวหน่วงมีค่าน้อยจึงเกิดการสั่นสะเทือน เรียกกรณีนี้ว่า Under damped motion

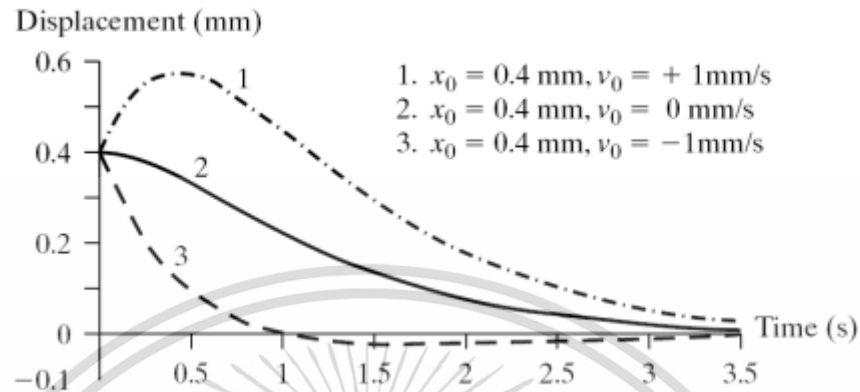


รูปที่ 2-17 การสั่นสะเทือนแบบ Under damped motion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) กรณี  $c^2 - 4mk = 0$  หรืออาจเขียนได้เป็น  $\xi = 1$

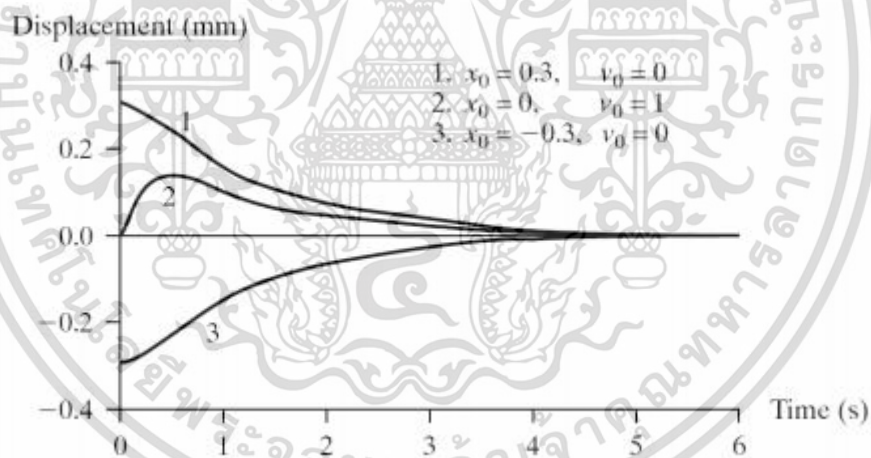
กรณีนี้ค่าตัวหน่วงมีค่าเท่ากับค่าตัวหน่วงวิกฤต ซึ่งเปลี่ยนจากระบบที่สั่นเป็นระบบที่ไม่สั่น เรียกรณีนีว่า Critically damped motion



รูปที่ 2-18 การเคลื่อนที่แบบ Critically damped motion

3) กรณี  $c^2 - 4mk > 0$  หรืออาจเขียนได้เป็น  $1 < \xi$

กรณีนี้ค่าตัวหน่วงมีค่ามากกว่าค่าวิกฤตจึงไม่เกิดการสั่นสะท้อน เรียกรณีนีว่า Over damped motion



รูปที่ 2-19 การเคลื่อนที่แบบ Over damped motion

ถึงแม้ว่าลักษณะกราฟของกรณี Over damped motion และ Critically damped motion จะมีรูปร่างคล้ายคลึงกัน แต่ทั้งสองกรณีก็เขียนมาจากสมการที่แตกต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบถึงเวลาที่มวลใช้เพื่อกลับคืนสู่ภาวะสมดุลแล้ว จะพบว่ากรณี Critically damped motion มวลจะกลับเข้าสู่ตำแหน่งสมดุลได้เร็วกว่ากรณี Over damped motion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 การสั่นพ้อง (resonance)

Resonance เป็นปรากฏการณ์ที่ระบบสั่นสะเทือนด้วยแอมพลิจูดขนาดใหญ่กว่ามากที่ความถี่เฉพาะหรือที่เรียกว่าความถี่เรโซแนนซ์ สำหรับระบบ SDOF ภายใต้การสั่นแบบอิสระสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$m\ddot{u} + ku = 0 \quad (2.31)$$

สามารถแก้สมการการเคลื่อนที่ดังกล่าวได้ด้วยสมมติฐาน

$$u = A \sin \omega t \text{ and } \dot{u} = A\omega^2 \sin \omega t \quad (2.32)$$

แทนค่าลงในสมการจะได้

$$(\omega^2 m + k)A \sin \omega t = 0 \quad (2.33)$$

สมมติให้  $A \neq 0$  จะได้

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.34)$$

ซึ่ง  $\omega$  เป็นความถี่ธรรมชาติสำหรับระบบ SDOF เพื่อแสดงการตอบสนองภายใต้การสั่นพ้องของระบบ SDOF ที่ไม่มี damping โดยมีแรงกระทำแบบฮาร์มอนิกสามารถใช้ได้ โดย

$$m\ddot{u} + ku = P_0 \sin \omega t \quad (2.35)$$

สามารถแก้สมการการเคลื่อนที่ดังกล่าวได้ด้วยสมมติฐาน

$$u = u_0 \sin \omega t \text{ และ } \dot{u} = -u_0 \omega^2 \sin \omega t \quad (2.36)$$

แทนค่าในสมการ (2.18) จะได้

$$(-\omega^2 m + k)u_0 \sin \omega t = P_0 \sin \omega t \quad (2.37)$$

โดยทำให้เกิดความถี่ธรรมชาติ

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.38)$$

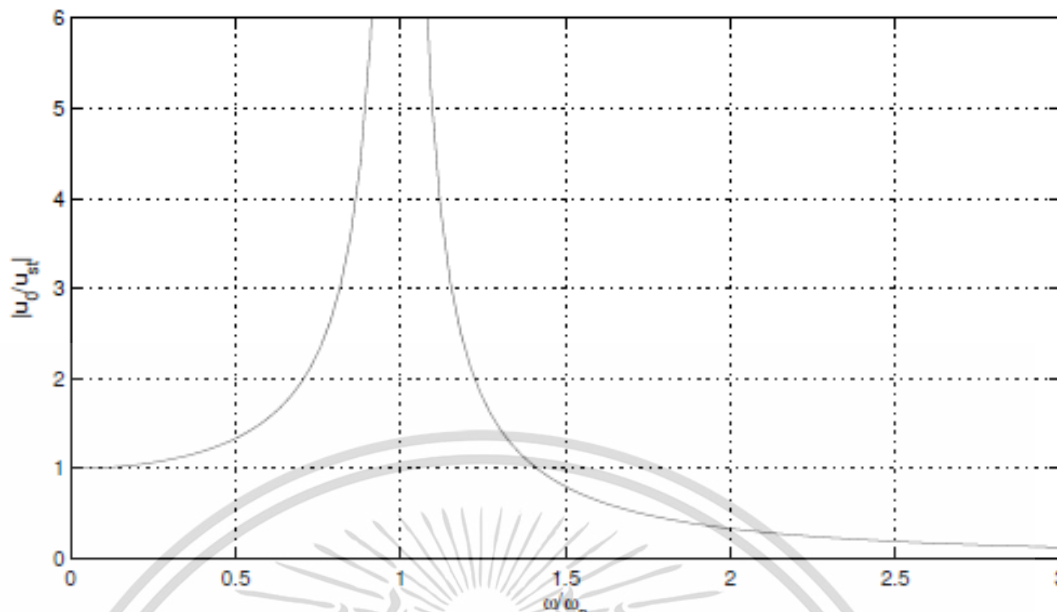
การเคลื่อนที่แบบคงที่

$$u_{st} = \frac{p_0}{k} \quad (2.39)$$

และการจัดเรียงเงื่อนไขการตอบสนองของระบบสามารถเขียนได้

$$\frac{u_0}{u_{st}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (2.40)$$

ดังที่แสดงในรูปที่ 2-16 เมื่อความถี่ของแรงที่นำกระทำอยู่ใกล้กับความถี่ธรรมชาติ ความถี่การตอบสนองจะถูกขยาย ในทางทฤษฎีการขยายนี้ถึงอนันต์ อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงการหน่วง (damping) มีอยู่ในโครงสร้าง



รูปที่ 2-20 การตอบสนองการกระจัดสำหรับระบบ SDOF ที่ไม่มีการหน่วง

## 2.7 ทางรถไฟและโครงสร้างทางรถไฟในประเทศ

### 2.7.1 ประเภทของระบบขนส่งทางรางในประเทศไทย

การแบ่งประเภทของทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งทางรางในประเทศไทยจะทำการ แบ่ง ออกเป็น 5 ประเภทหลัก คือทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งทางรางในเมือง ทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งทางรางระบบรอง ทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งทางรางชานเมือง ทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งทางรางระหว่างเมืองและชานเมืองและทางรถไฟในย่าน โดยในแต่ละระบบหลักจะทำการแบ่งเป็นระบบย่อยตามคุณลักษณะของ 1) ความเร็วสูงสุดในการให้บริการ 2) ประเภทของระบบขนส่ง 3) น้ำหนักลงเพลา และ 4) ขนาดทาง ทั้งนี้ มาตรฐานนี้จะไม่รวมถึงระบบขนส่งอื่น ๆ ที่นอกเหนือไปจากที่นิยามไว้ในมาตรฐาน ฉบับ 2561 ของสนช [37]

#### 2.7.1.1 ทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งทางรางในเมือง (Urban Passenger Rail, UPR)

ทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งทางรางหลักในเมือง (Urban Passenger Heavy Rail, UPHR) คือทางรถไฟที่รองรับระบบขนส่งทางรางที่ให้บริการผู้โดยสารในเส้นทางรถไฟฟ้ามวลชนในเมือง โดยมีคุณลักษณะสำคัญ ดังนี้

- ความเร็วสูงสุดในการให้บริการ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ประเภทของการขนส่ง รถขนส่งผู้โดยสาร
- น้ำหนักลงเพลาสูงสุดไม่เกิน 25 ตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขนาดทาง 1.435 เมตร

### 2.7.1.2 ทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งทางรางระบบรอง (Urban Passenger Feeder Rail, UPFR)

คือทางรถไฟที่รองรับระบบขนส่งทางรางที่ให้บริการผู้โดยสารในเส้นทางรถไฟขนส่งมวลชนระบบรอง เช่น รถไฟรางเบา และรถไฟรางเดี่ยว เป็นต้น โดยมีคุณลักษณะสำคัญ ดังนี้

- ความเร็วสูงสุดในการให้บริการ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ประเภทของระบบขนส่ง รถขนส่งผู้โดยสาร
- น้ำหนักลงเพลาสูงสุดไม่เกิน 12 ตัน
- ขนาดทาง เป็นไปตามคุณลักษณะของผู้ผลิต (Product Specifications)

### 2.7.1.3 ทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งทางรางชานเมือง (Commuter Passenger Rail, CPR)

ทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งทางรางชานเมือง คือ ทางรถไฟที่รองรับระบบขนส่งทางรางที่ให้บริการผู้โดยสารในแนวเส้นทางรถไฟชานเมือง โดยมีคุณลักษณะสำคัญ ดังนี้

- ความเร็วสูงสุดในการให้บริการ 160 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ประเภทของระบบขนส่ง รถขนส่งผู้โดยสาร
- น้ำหนักลงเพลาสูงสุดไม่เกิน 25 ตัน
- ขนาดทาง มีสองขนาดทางคือ 1.000 เมตร และ 1.435 เมตร

### 2.7.1.4 ทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งทางรางระหว่างเมือง (Intercity Rail, IR)

ทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งทางรางระหว่างเมือง คือทางรถไฟที่รองรับระบบขนส่งทางรางที่ให้บริการขนส่งสินค้าและผู้โดยสารในแนวเส้นทางรถไฟระหว่างเมือง โดยสามารถแบ่งประเภทของทางรถไฟย่อยลงได้อีกตามข้อกำหนดของการรถไฟแห่งประเทศไทย และแนวเส้นทางรถไฟความเร็วปานกลาง และรถไฟความเร็วสูง ดังนี้

#### 1. ทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งสินค้าระหว่างเมือง (Intercity Freight Rail, IFR)

- ความเร็วสูงสุดในการให้บริการ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ประเภทของระบบขนส่ง รถขนส่งสินค้า
- น้ำหนักลงเพลาสูงสุดไม่เกิน 25 ตัน
- ขนาดทาง 1.000 เมตร

#### 2. ทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งมวลชนระหว่างเมือง (Intercity Passenger Rail, IPR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความเร็วสูงสุดในการให้บริการ 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ประเภทของระบบขนส่ง รถขนส่งผู้โดยสาร
- น้ำหนักลงเพลาสูงสุดไม่เกิน 25 ตัน
- ขนาดทาง 1.000 เมตร

### 3. ทางรถไฟความเร็วสูงปานกลาง (Intercity Rapid-speed Passenger Rail, IRPR)

- ความเร็วสูงสุดในการให้บริการ ระหว่าง 140 ถึง 200 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ประเภทของระบบขนส่ง รถขนส่งผู้โดยสาร
- น้ำหนักลงเพลาสูงสุดไม่เกิน 25 ตัน หรือเป็นไปตามมาตรฐาน EN1991-2 Eurocode 1: actions on Structures -Part 2: Traffic Loads on Bridges (Load Model 71)

### 4. ทางรถไฟความเร็วสูง (Intercity High-speed Passenger Rail, IHPR)

- ความเร็วสูงสุดในการให้บริการ มากกว่า 200 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- ประเภทของระบบขนส่ง รถขนส่งผู้โดยสาร
- น้ำหนักลงเพลาสูงสุดไม่เกิน 25 ตัน หรือเป็นไปตามมาตรฐาน EN1991-2 Eurocode 1: Actions on Structures -Part 2: Traffic Loads on Bridges (Load Model 71)
- ขนาดทาง 1.435 เมตร

#### 2.7.1.5 ทางรถไฟสำหรับการปฏิบัติการในย่าน (Yard Operations)

ทางรถไฟสำหรับการปฏิบัติการในย่านสำหรับทางรถไฟทุกประเภทกำหนดความเร็วสูงสุด ไม่เกิน 25 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

#### 2.7.2 โคนสร้างทางรถไฟ

โครงสร้างทางรถไฟ หรือ ทางรถไฟ เป็นสิ่งปลูกสร้างถาวรที่สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ ทางรถไฟชนิดที่มีหินโรยทาง และ ทางรถไฟชนิดไม่มีหินโรยทาง

##### 2.7.2.1 ทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง

เป็นรูปแบบโครงสร้างที่ไม่ได้มีรูปแบบการพัฒนาให้ทันสมัยมากนัก ลักษณะโดดเด่นโดยทั่วไปคือ โครงสร้างทางรางที่ประกอบไปด้วย รางเหล็กแบน ด้านล่างท่อนรองรางที่ทำจากไม้หรือคอนกรีตอัดแรงรองรับตัวรางเอาไว้ โดยโครงสร้างดังกล่าววางอยู่บนชั้นหินโรยทาง(ballast)

โครงสร้างทางรถไฟชนิดมีหินโรยทางจะประกอบด้วย

##### 1. โครงสร้างส่วนบนของทางรถไฟแบบมีหินโรยทางส่วนของทางรถไฟ

ที่ประกอบไปด้วย ราง แผ่นรองราง เครื่องยึดเหนี่ยวราง และหมอนรองรางรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. โครงสร้างส่วนล่างของทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง

ส่วนประกอบของทางที่ต่ำกว่าหมอนรองรางลงมาหน้าที่หลักของโครงสร้างส่วนล่าง คือ รองรับและให้การยึดตัวโครงสร้างส่วนบนของทาง กระจายน้ำหนักจากการจราจรจากโครงสร้างส่วนบนลงไปยังชั้นดินพื้นทางระบายน้ำในชั้นโครงสร้างทาง ป้องกันชั้นดินพื้นทางจากสภาพธรรมชาติ ช่วยให้การปรับแก้ทางทำได้ง่ายโดยไม่ต้องรื้อและก่อสร้างทางใหม่

## 3. ชั้นหินโรยทางบนสุดของโครงสร้างทางส่วนล่างก่อสร้างจากหินอนุภาคบดอัด

มีช่องว่างระหว่างอนุภาคหิน ทำให้ระบายน้ำได้ดี

## 4. ชั้นหินโรยทาง ชั้นรองของโครงสร้างทางส่วนล่าง

อยู่ใต้ชั้นหินโรยทาง และบนชั้นดินพื้นทาง ก่อสร้างจากหินและดินอนุภาคบดอัด ทำหน้าที่แบ่งแยกและป้องกันไม่ให้ชั้นหินโรยทางแทรกตัวจมลงไปในพื้นทาง

## 5. พื้นทาง

เป็นส่วนล่างสุดของโครงสร้างทาง รองรับทางรถไฟ พื้นทางอาจจะเป็นดิน หรือ หินก็ได้ โดยส่วนประกอบหลักของโครงสร้างทางรถไฟจะมีดังนี้



รูปที่ 2-21 แผนภาพโครงสร้างโดยทั่วไปของโครงสร้างทางรถไฟ

ที่มา : สนข มาตรฐานโครงสร้างรถไฟไทย 2561[37]

1. ราง ประแจสับราง
2. ระบบยึดเหนี่ยวราง หรือ ในบางระบบจะเป็นระบบฝังรางเข้ากับส่วนที่ 3
3. ส่วนประกอบที่นำมารองราง เช่น หมอนคอนกรีตรองราง
4. ชั้นคั่นกลางระหว่างหมอนรองรางกับพื้น หรือ คอนกรีตรองราง
5. พื้นคอนกรีตรองรางแบบชั้นเดียวหรือหลายชั้น
6. ชั้นรองพื้นคอนกรีตรองราง
7. โครงสร้างรองรับทางรถไฟ อาจจะเป็นพื้นคอนกรีต พื้นสะพาน ชั้นรองผิวทาง หรือ คันทางแล้วแต่ลักษณะการออกแบบที่รองรับ

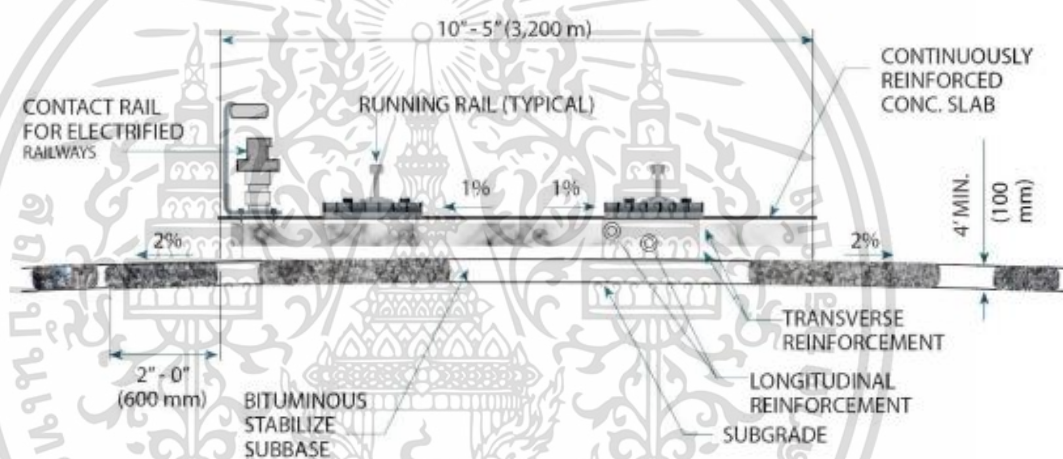
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.2.2 ทางรถไฟแบบไม่มีหินโรยทาง

รูปแบบของโครงสร้างทางแบบไม่มีหินโรยทางมีมากมายหลายรูปแบบ ซึ่งขึ้นกับเทคนิค การออกแบบการถ่ายแรงจากรถไฟไปยังโครงสร้างทางรถไฟรูปแบบโครงสร้างทางสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะการยึดรางได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ 1) โครงสร้างทางแบบไม่มีหินโรยทางแบบมีจุดรองรับต่อเนื่องหรือรางแบบฝัง (Embedded Rail System) และ 2) โครงสร้างทางแบบไม่มีหินโรยทางแบบมีระบบยึดเหนี่ยวราง (Fastening System) โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### (1) โครงสร้างทางแบบไม่มีหินโรยทางแบบมีระบบยึดเหนี่ยวราง (Fastening System)

ระบบโครงสร้างทางแบบไม่มีหินโรยทางมักจะใช้ระบบที่มีระบบยึดเหนี่ยวราง ซึ่งระบบโครงสร้างทางนี้จะมีหลายระบบ และมีชื่อเรียกหลากหลายตามแต่ละรูปแบบการออกแบบรูปแบบทั่วไปของโครงสร้างทางแบบมีระบบยึดเหนี่ยวได้แสดงใน รูปที่ 2-22



รูปที่ 2-22 โครงสร้างทางรถไฟแบบมีระบบยึดเหนี่ยว

ที่มา : สนข มาตรฐานโครงสร้างรถไฟไทย 2561[37]

#### (2) โครงสร้างทางแบบไม่มีหินโรยทางแบบมีจุดรองรับต่อเนื่องหรือรางแบบฝัง (Embedded Rail System)

เป็นโครงสร้างทางที่รางฝังอยู่ใน Elastomeric Concrete หรือ วัสดุประสานซีเมนต์ (Cement) ซึ่งอยู่ในพื้นคอนกรีต ระบบนี้มีชื่อย่อว่า Embedded Rail System (ERS) โดยใช้ ระบบรองรับแบบต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2-19 โดยโครงสร้างทางประกอบด้วยรางที่ฝังอยู่ใน พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กแบบต่อเนื่องวางอยู่บน ฐานที่ทำให้แน่นด้วยซีเมนต์และรองด้วยทราย

## 2.8 แนวความคิด และงานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

การสั่นสะเทือนที่ถูกส่งผ่านมายังโครงสร้างอาคารจากแหล่งกำเนิดต่างๆอาจก่อให้เกิดความเสียหาย เช่น กำแพงแตกร้าว ผนังร่วนหล่น ฐานรากทรุดตัว หรือกระทั่งการพังทลายของโครงสร้าง เป็นต้น ผลกระทบการสั่นสะเทือนสามารถประเมินได้โดยการใช้อุปกรณ์วัดพารามิเตอร์การสั่นสะเทือน อันได้แก่ แอมพลิจูด ความเร็ว และความเร่ง ของคลื่นการสั่นสะเทือน เพื่อนำไปหาค่าความเข้มของการสั่นสะเทือน งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของการสั่นสะเทือนที่มีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่ของรถไฟความเร็วสูงที่วิ่งผ่านพื้นที่ศึกษาในบริเวณสจล. การวิเคราะห์ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อกลุ่มอาคารตัวอย่างซึ่งเรียงรายอยู่ตามแนวสายทางที่รถไฟจะวิ่งผ่าน เพื่อว่าในอนาคตหากมีการเปิดใช้รถไฟความเร็วสูงจะได้วางแผนรับมือปัญหาได้อย่างทันท่วงที นอกเหนือจากนี้ผลจากกรณีศึกษาในพื้นที่สจล. ยังสามารถนำไปใช้กับพื้นที่ในบริเวณอื่นในแนวสายทางรถไฟความเร็วสูงพาดผ่าน ที่มีสภาพปัจจัยแวดล้อมใกล้เคียงกัน อาทิเช่น พื้นที่ในเขตกรุงเทพมหานคร ที่มีสภาพชั้นดินเป็นดินเหนียวอ่อนคล้ายคลึงกันอันที่จะทำให้มีสภาวะทางพลศาสตร์ของชั้นดินใกล้เคียงกัน

โดยทฤษฎีที่รองรับแนวคิดการดำเนินงานวิจัยแบ่งออกได้ดังนี้

จากการทบทวนวรรณกรรมโดยเนลสันและเซาเรนแมน [Nelson and Saurenman] (1983)[30], การสั่นสะเทือนภาคพื้นดินที่เกิดจากการจราจรรถไฟได้รับอิทธิพลจากปัจจัยได้แก่ล้อและความขรุขระของรางรองรับระบบลักษณะแบบไดนามิกของล้อรถไฟ, ค่าความแข็งของรางรองรับ, การออกแบบโครงสร้างทางรถไฟ, ลักษณะของดินและการออกแบบโครงสร้างอาคาร

ตารางที่ 2.9 ค่าจำเพาะที่แตกต่างไปตามรูปแบบของเหล็กรางรถไฟ[Anderson et al][38]

Track class	Rails	Fasteners	Sleeper		Ballast	Design parameters		
			Material	Distance [cm]		Stax [ton]	Sth [km/h]	Stvm [ton/m]
I	UIC60	P	Btg	60-65	M	25	50	12.0
						22.5	120	8.1
						20	160	8.1
						18	>160	8.1
II	BV50	B.H.I.P	Btg, Bok	50-65	M	25	50	12.0
						22.5	100	8.1
						20	160	8.1
						18	>160	8.1
III	BV50	F,L	Bok, Furu	65	M	22.5	90	8.1
						20	130	8.1
IV	SJ43	U	Furu	65-75	G,M	22.5	70	8.1
						20	90	8.1

P, B, L, H, I, P, F, U= type of the rail fastener according to Figure 2-5.

Btg = Concrete, M = Makadam; G = Gravel

Stax = Maximum load, Sth = Maximum speed

Stvm = Maximum load per meter

Notice that the rails are welded in case of class I and class II tracks.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[Dawn and Stanworth (2522)] [39] ได้ให้ความคิดเห็นเกี่ยววิวัฒนาการของโมเดลเกี่ยวกับการสร้างการแผ่และการรับความสั่นสะเทือนเนื่องจากการรถไฟ โดยมีการศึกษาทั้งการสั่นสะเทือนเสมือนคงที่และแบบไดนามิก พลังงานการสั่นสะเทือนส่วนใหญ่จะกระจายตัวไปในลักษณะของการเคลื่อนตัวแบบ คลื่น Rayleigh โดยระยะจากรางรถไฟมีผลอย่างป็นนัยสำคัญต่อคลื่นที่เคลื่อนตัวออกไป กล่าวว่าการรถไฟเดินทางเร็วกว่าความเร็วการแผ่ของคลื่นแรงสั่นสะเทือนในพื้นดิน, คลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นในพื้นดินจะส่งผลกระทบต่อตัวอาคารโดยรอบ

มีการนำเสนอผลการทดลองซึ่งแสดงจุดสูงสุดของความถี่ ที่ส่งผลกระทบในการนอนหลับของผู้นอนในอาคารใกล้เคียง มีข้อเสนอแนะโดยพวกเขาว่า การกระตุ้นของการสั่นสะเทือนภาคพื้นดินโดยเฉพาะที่ความถี่ต่ำ ขึ้นอยู่กับค่าโดยรวมทั้งหมดของมวลของยานพาหนะไม่ใช่เพียงมวลที่ไม่แน่นอนของชุดล้อ มีหลักฐานแสดงถึงค่าแรงสั่นสะเทือนที่แตกต่างกันมากระหว่างรถไฟที่มีการบรรทุกหนักและรถไฟที่ไม่มีการบรรทุกสินค้า ความแตกต่างของน้ำหนักรถไฟมีผลต่อค่าแรงสั่นสะเทือนประมาณ 12 เดซิเบลและความแตกต่างของการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากผลการทดลองจะอยู่ที่ประมาณเดียวกันจากการทดลองยังแสดงจุดสูงสุดซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าคลื่นที่เกิดจากการสร้างความสัมพันธ์โดยมีความยาวคลื่น 1.78 เมตรบน ทางรถไฟ Krylov (1995)[5], Madshus et al. (1996)[3], Bodare (1999)[40], Jones et al. (2000)[41] และ Degrande และ Lombart 2000[42] นักเขียนมากมายต่างยอมรับ ว่าความเร็วของรถไฟเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อปริมาณพลังงานการสั่นสะเทือนที่ส่งจากเส้นทางรถไฟไปยังบริเวณโดยรอบ

[Hannelius (1974)] [43] ระบุในรายงานว่าช่วงความถี่ที่สำคัญสำหรับการสั่นสะเทือนของพื้นดินอยู่ในช่วง 0-10 Hz สำหรับดินเหนียว และความถี่ที่สูงกว่าสำหรับดินที่มีค่าแรงเสียดทานสูงยิ่งขึ้น เขาสังเกตเห็นว่าการสั่นสะเทือนในพื้นดินยังเพิ่มขึ้นเมื่อค่ามวลของวัสดุเดิมนั้นมีค่าน้อยลงและค่าความลึกของพื้นดินที่มากขึ้น กลไกแหล่งที่มาที่แตกต่างกันยังทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่สร้างความถี่ที่แตกต่างกัน

[Fujikake (1986)] [44] ศึกษาการสร้างการสั่นสะเทือนเนื่องจากแรงกระแทกของล้อรถไฟ โดยสารที่จุดต่อของรางรถไฟ และการแผ่ของคลื่นดังกล่าวในพื้นดิน จากการศึกษาของเขาค่าสเปกตรัมแรงสั่นสะเทือนสูงสุดเกิดขึ้นที่ค่าความถี่ของน้ำหนักรถไฟ

[Jones (1994)] [45] ทำรายการกลไกแหล่งที่มาของการสั่นสะเทือนจากทางรถไฟเป็นค่าความหยาบที่สร้างการสั่นสะเทือนในรางรถไฟ การกระตุ้นของพารามิเตอร์ที่ผ่านหมอนรองรางรถไฟ ความถี่และการสั่นสะเทือนเสมือนคงที่เนื่องจากการแรงที่เคลื่อนที่

[Krylov and Ferguson (1994)] [46] ใช้ Green's function ทำการศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการสร้างการสั่นสะเทือนความถี่ต่ำเนื่องจากแรงดันเสมือนกึ่งคงที่จากล้อ โดยพิจารณาว่าดินเป็นรากฐานที่ยืดหยุ่นและใช้สูตร ออยเลอร์เบอร์นูลีสำหรับการคำนวณการสั่นสะเทือนในคานยืดหยุ่นบนรากฐานยืดหยุ่น โดยใช้เส้นโค้งการโก่งตัวจากแต่ละระยะหมอนรองรางรถไฟ ในส่วนของการแผ่

กระจายแรงสั่นสะเทือนของพลังงานนั้นถูกนำไปใช้โดยคลื่น Rayleigh สรุปได้ว่าสเปกตรัมการสั่นสะเทือนขึ้นอยู่กับโหลดลงเพลาของรถไฟ

[Remington (1987)] [47] นำเสนอโมเดลการสั่นสะเทือนของรางเนื่องจากความหยาบของรางและล้อ

กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม [48] ทำการศึกษาผลกระทบของความสั่นสะเทือนจากการจราจรต่อสุขภาพประชาชน และสิ่งปลูกสร้าง โดยศึกษาแหล่งกำเนิดความสั่นสะเทือนประเภทรถบรรทุกและรถไฟ และศึกษาระดับความสั่นสะเทือนที่บริเวณใกล้เคียงแหล่งกำเนิดและในอาคารที่อยู่ใกล้เคียงกับเส้นทางจราจรและทางรถไฟเทียบกับระดับความสั่นสะเทือนมาตรฐาน DIN 4150[49] และ ISO 2631-2[19] เพื่อใช้เป็นข้อมูลการออกเกณฑ์มาตรฐานความสั่นสะเทือนในประเทศไทย การศึกษาผลกระทบของความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากรถไฟประเภทต่างๆ ต่อสิ่งปลูกสร้างที่อยู่ใกล้เคียงมีการศึกษาดังนี้

- ศึกษาความสัมพันธ์ของการลดลงของระดับความสั่นสะเทือนในพื้นที่บริเวณที่ตรวจวัดความสั่นสะเทือน
- ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสั่นสะเทือนกับประเภทของรถไฟกับความเร็วของรถไฟ
- ศึกษาสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับประเภทของรถไฟ กับความเร็วของรถไฟ
- เปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่ามาตรฐานของต่างประเทศ

ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ระดับความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากรถบรรทุกและรถไฟ ไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของอาคารเนื่องจากระดับความสั่นสะเทือนที่ถูกส่งถ่ายมายังโครงสร้างของอาคารมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐาน DIN 4150 [49] อย่างไรก็ตามระดับความสั่นสะเทือนนี้อาจส่งผลกระทบต่อประชาชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณดังกล่าว หากมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐาน ISO 2631-2[19] ที่กำหนด และยังพบว่าดินที่บริเวณศึกษาจังหวัดราชบุรีที่เป็นดินทรายมีคุณสมบัติในการลดทอนความสั่นสะเทือนได้ดีกว่าดินที่บริเวณศึกษาจังหวัดพระนครศรีอยุธยาซึ่งมีสภาพเป็นดินเหนียวและตะกอนทับถมจากแม่น้ำ

Persson [50] พิจารณาความเสี่ยงของการกระจายการสั่นสะเทือน โดยมีปัจจัยต้นทางคือระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนและตำแหน่งของผู้รับการสั่นสะเทือน คุณสมบัติของพื้นดินในการขยายและกระจายการสั่นสะเทือน ประเภทและขนาดของโครงสร้างอาคารที่พิจารณา โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาผลของปัจจัยต่างๆในการออกโครงสร้างอาคาร เช่น ชนิดของวัสดุที่ใช้ประเภทของอาคาร ต่อระดับของการสั่นสะเทือนของอาคารที่มีสาเหตุมาจากต้นกำเนิดการสั่นสะเทือนที่ระดับผิวดิน เช่น การจราจร เป็นต้น ขอบเขตการศึกษาถูกจำกัดไว้ที่ผลตอบสนองของ

โครงสร้างที่มีความถี่ใกล้เคียงความถี่มูลฐานของดิน ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองกึ่งวิเคราะห์โดยพิจารณาดินฐานรากที่มีการแบ่งเป็นหลายชั้น

Podworna[51] ศึกษาการสั่นสะเทือนที่สัมพันธ์กันของสะพาน ระบบรางรถไฟ และระบบรถไฟความเร็วสูง โดยนำเสนอการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ด้วยการสั่นแบบสุ่มสำหรับสะพานวัสดุประกอบเหล็กกับคอนกรีต โดยคำนึงถึงผลของการเชื่อมราง ระบบรองรับแบบวิสโคอีลาสติกของตัวรถไฟที่ประกอบด้วยสองเพลลาต่อคู่ การสัมผัสแบบแอสทเซียนชนิดไม่เป็นเชิงเส้น ระหว่างรางและล้อรถไฟ พฤติกรรมวิสโคอีลาสติกและอินเนอร์เซียของสะพานและพื้นที่ทางช่วงที่ต่อเชื่อมกับสะพาน ทฤษฎีการสั่นแบบสุ่ม ความไม่เรียบไม่ปกติในแนวตั้งของรางรถไฟ

Kumar [52] อธิบายถึงพฤติกรรมการขยายและลดทอนของคลื่นการสั่นสะเทือนที่เคลื่อนที่ผ่านในชั้นดิน นอกจากนี้ยังได้นำเสนอรูปแบบอย่างง่ายในการสร้างแบบจำลองพฤติกรรมของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านในชั้นดินและส่งผ่านไปยังโครงสร้างที่สร้างติดกับชั้นดินที่พิจารณาในรูปของค่าสติเฟนสเพิ่มเติมในส่วนที่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้างที่สร้างในดินนั้น

Jarasjarungkiat [53] ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์สำหรับโครงสร้างเมมเบรนที่พองตัวได้ โดยอาศัยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงพลศาสตร์สำหรับศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของโครงสร้างประเภทดังกล่าว โดยศึกษารูปร่างของโหนด ความถี่ธรรมชาติ และพฤติกรรมการโก่งเดาะที่สัมพันธ์กับความดันของอากาศที่ถูกอัดเข้าไปภายในเมมเบรน

Monteiro [54] ศึกษาการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ผ่านของรถไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัจจุบันการมาถึงของรถไฟความเร็วสูงส่งผลให้การตรวจประเมินอย่างละเอียดมีความจำเป็น โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะรายงานถึงสถานการณ์ปัจจุบันของกระบวนการเก็บรวบรวมข้อมูล แลกเปลี่ยนประสบการณ์ใหม่ ในศาสตร์แขนงต่างๆ อาทิเช่น การวิเคราะห์สัญญาณ วิศวกรรมปฐพีแผ่นดินไหว และวิศวกรรมราง ในด้านการวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟมีการทดสอบจริงในสนามในเดือนกรกฎาคม ค.ศ. 2009 ที่ Gare do Oriente (สถานีรถไฟในเมืองลิสบอน โปรตุเกส) มีการคาดหวังถึงงานในอนาคตที่จะพัฒนาชุดเครื่องมือการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม Matlab เพื่อใช้ในการกรองสัญญาณดิจิทัลสำหรับกระบวนการประมวลผลสัญญาณ

OANCEA [55] ศึกษาการแพร่ผ่านของคลื่นการสั่นสะเทือนของโครงสร้างอาคารบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงรางรถไฟ ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ผ่านของรถไฟโดยมีการวัดผลที่หูกจุดทดสอบแล้วนำผลที่ได้มาแปลงด้วยเทคนิคฟาสต์ฟูเรียเพื่อให้ได้สเปกตรัมของคลื่นการสั่นสะเทือนแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน

### 2.8.1 การสั่นสะเทือนที่ถูกทำให้เกิดจากรถไฟ

ปรากฏการณ์การสั่นสะเทือนที่ถูกทำให้เกิดจากรถไฟสามารถอธิบายได้ในลักษณะการแพร่ไปของคลื่นผ่านโครงสร้างและพื้นดิน ยกตัวอย่างเช่น พลังงานที่ถูกสร้างขึ้นทำให้ผู้อาศัยในอาคารเกิด

ความรู้สึกไม่สบาย หรือการสั่นสะเทือนอาจจะไปรบกวนการทำงานของเครื่องจักรอุปกรณ์ที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง การเคลื่อนที่ของรถไฟส่งผลให้เกิดผลตอบสนองต่อบริเวณโดยรอบ ซึ่งผลตอบสนองที่เกิดขึ้นอยู่กับปัจจัยอาทิเช่น คุณภาพของรางรถไฟ ประเภทของฐานรากและชนิดของยานพาหนะ เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้เป็นตัวกำหนดระดับของการสั่นสะเทือน ดังแสดงในตารางที่ 2.10

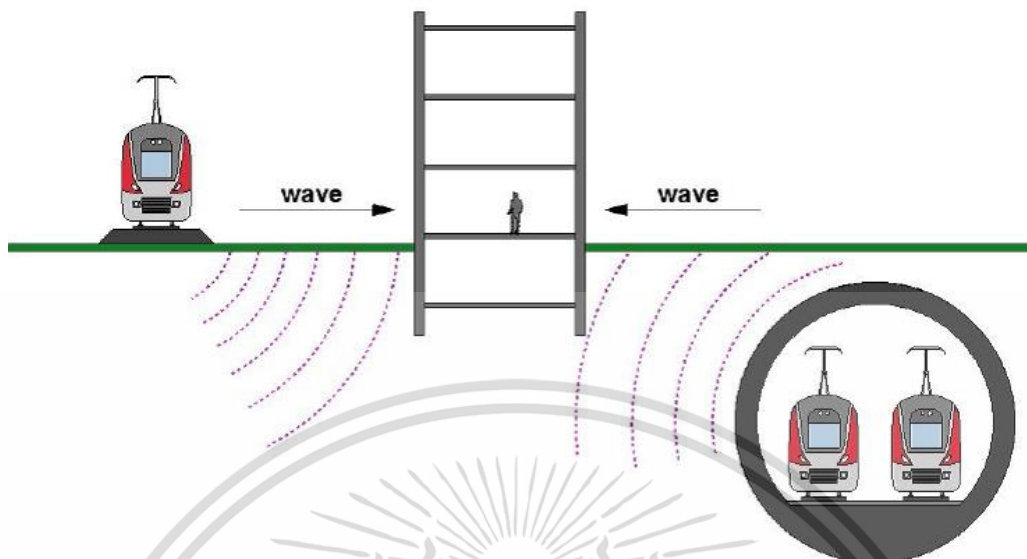
**ตารางที่ 2.10** ปัจจัยที่มีเกี่ยวข้องกับแหล่งที่มาของการสั่นสะเทือน.

ปรับปรุงจาก Harris Miller Miller & Hanson Inc (2005)[56].

ปัจจัย	ผลกระทบ
ระบบรองรับของยานพาหนะ (Vehicle suspension)	การเพิ่มขึ้นของความแข็งของระบบรองรับยานพาหนะจะมีผลต่อการเพิ่มขนาดของแรงการสั่นสะเทือนที่จะกระทำกับพื้นที่โดยรอบ
สภาพของล้อ (Wheels condition)	ความขรุขระของล้อเป็นต้นเหตุหลักของการสั่นสะเทือนที่จุดสัมผัสระหว่างล้อเหล็ก กับ รางเหล็ก ของระบบรถไฟ
ผิวของราง (track surface)	ความขรุขระของผิวรางเป็นต้นเหตุหลักของการสั่นสะเทือน
ระบบรองรับราง (track support system)	ระบบรองรับรางเป็นอุปกรณ์หลักในการพิจารณาระดับของการสั่นสะเทือนที่จะเกิดขึ้นที่ระดับผิวดินหากระบบรองรับรางถูกยึดแน่นกับฐานรองรับรางที่ทำจากคอนกรีตระบบดังกล่าวก่อให้เกิดระดับการสั่นสะเทือนสูงสุด ระดับการสั่นสะเทือนนี้สามารถถูกลดทอนได้จากการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนของระบบราง
ความเร็ว* (speed)	ความเร็วของยานพาหนะที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มระดับการสั่นสะเทือน
โครงสร้างระบบราง (Track structure)	โครงสร้างระบบรางที่หนักขึ้น จะช่วยลดระดับของการสั่นสะเทือน
ความลึกของแหล่งกำเนิดการสั่น (Depth of vibration source)	หากตำแหน่งของความลึกของแหล่งกำเนิดการสั่นแตกต่างกัน มีผลต่อลักษณะเฉพาะของการสั่นสะเทือนที่แตกต่างกันออกไปตามแหล่งกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยรูปแบบการเคลื่อนที่ของคลื่นถูกแสดงไว้ในแผนภาพในรูปที่ 2-20



รูปที่ 2-23 ภาพแสดงการแพร่ผ่านของคลื่นการสั่นสะเทือนจากรถไฟบนดินและใต้ดินผ่านพื้นดินไปยังโครงสร้าง ที่มา OANCEA[55]

### 2.8.2 การขยายคลื่นการสั่นสะเทือนของดิน

การสั่นสะเทือนในชั้นดินอ่อนเป็นที่มาของศึกษาการวิเคราะห์หาความเร็ววิกฤต เนื่องด้วยดินแต่ละชนิดจะมีค่าความเร็วคลื่นที่แพร่ผ่านดินแตกต่างกันเมื่อความเร็วของรถไฟเพิ่มสูงขึ้นจนอาจจะเทียบเท่าหรือมากกว่าความเร็ววิกฤต คลื่นที่แพร่ผ่านในชั้นดินจะถูกปรากฏการณ์ขยายการสั่นสะเทือน (the amplification of the vibration phenomenon) นั้นหมายความว่าการศึกษาการสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟวิ่งบนรางรถไฟ มีความจำเป็นต้องพิจารณาสภาพชั้นดินที่รองรับรางรถไฟในพื้นที่นั้นด้วย เพราะอาจเกิดปรากฏการณ์ขยายการสั่นสะเทือนของคลื่นที่จะถูกส่งผ่านไปยังโครงสร้างที่อยู่ข้างเคียง กรณีเช่นนี้มีความสำคัญยิ่งในกรณีของพื้นที่กรุงเทพมหานครฯ ซึ่งมีสภาพดินเป็นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมากดังนั้นจึงมีการขยายตัวของคลื่นแผ่นดินไหวของดินอ่อนกรุงเทพฯ ของ Warnitchai [57]

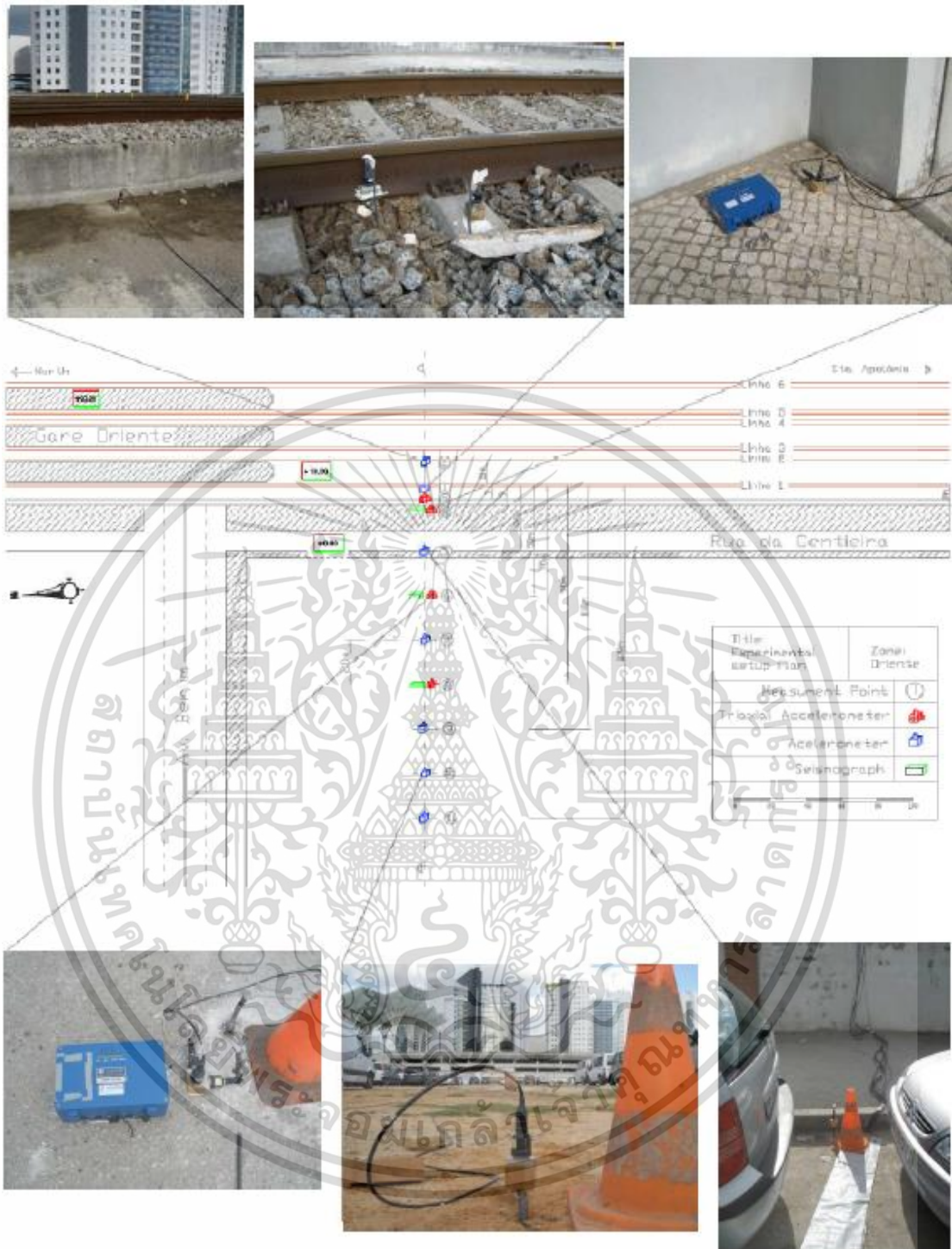
### 2.8.3 การวัดการสั่นสะเทือนที่อยู่ใกล้แนวรางรถไฟ

เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่มีคุณภาพจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับการเลือกเครื่องมือและการปรับซ่อมให้เหมาะสมกับลักษณะงาน ลักษณะพื้นที่ที่จะทำการเก็บข้อมูล ยกตัวอย่างเช่น กรณีของสถานี Gare do Oriente ในเมืองลิสบอน โปรตุเกสแสดงในรูปที่ 5 จากข้อมูลธรณีวิทยา Monteiro [54] พบว่า ในระดับดินชั้นบนเป็นตะกอนที่มีอายุไม่มากนักซึ่งเกิดจากการทับถมของดินเหนียว ทราย กรวด และตะกอนดิน ที่ถูกกระแสน้ำพัดพามาซึ่งมีธาตุอาหารในดินมาก ในขณะที่ดินในชั้นล่างมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติรับแรงอัดได้เป็นอย่างดีซึ่งประกอบด้วยหินปูน Braço de Prata Areolas และ Marvila เครื่องมือวัดถูกติดตั้งในทิศทางตั้งขวางกับรางรถไฟจำนวน 11 ตำแหน่งวัด โดยมีการกำหนดระยะห่างของแต่ละตำแหน่งให้เท่ากันดังแสดงในรูปที่ 4 โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร่งสามแกน (Triaxial accelerometer) สัญญาณสี่แฉก เครื่องวัดความเร่งแกนเดียว (Accelerometer) สัญญาณสี่น้ำเงิน และเครื่องวัดการสั่นไหว (Seismograph) สัญญาณสี่เขียว ตามลำดับ

อีกตัวอย่างการวัดการสั่นสะเทือนถูกรายงานใน OANCEA[55] ใน Iasi ที่ระดับดินบริเวณสะพาน Nicolina ใกล้กับรางรถไฟและโรงเรียนในพื้นที่ดังแสดงในรูปที่ 6ก) ด้วยการใช้เครื่องวัดความเร่งแกนเดียว (Accelerometer) จำนวน 6 ชุด โดยแบ่งจำนวนสามชุดติดตั้งไว้วัดความเร่งแนวราบที่ตั้งฉากกับแนวรางรถไฟอันได้แก่ ACC0, ACC2, ACC4 ตามลำดับ และอีกสามชุดติดตั้งไว้วัดความเร่งแนวตั้งอันได้แก่ ACC1, ACC3, ACC5 ตามลำดับ โดยมีชุดที่ใกล้รางรถไฟคือ ACC1 กับ ACC0 ชุดที่อยู่ตรงทางเดินคือ ACC3 กับ ACC2 และชุดที่อยู่ใกล้โรงเรียนคือ คือ ACC5 กับ ACC4 รูปภาพแสดงการติดตั้งเครื่องวัดความเร่งแกนเดียวที่ตำแหน่ง คือ ACC5 กับ ACC4 ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6ข) ค่าความเร่งที่วัดได้จากเครื่องวัดความเร่งจะถูกส่งเข้าคอมพิวเตอร์โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการเก็บรวบรวมข้อมูลและประมวลผล



รูปที่ 2-24 ภาพตัวอย่างการวัดความแรงของพื้นดิน และโครงสร้างกรณีของสถานี Gare do Oriente ในเมืองลิสบอน โปรตุเกส ที่มา Monteiro[54]

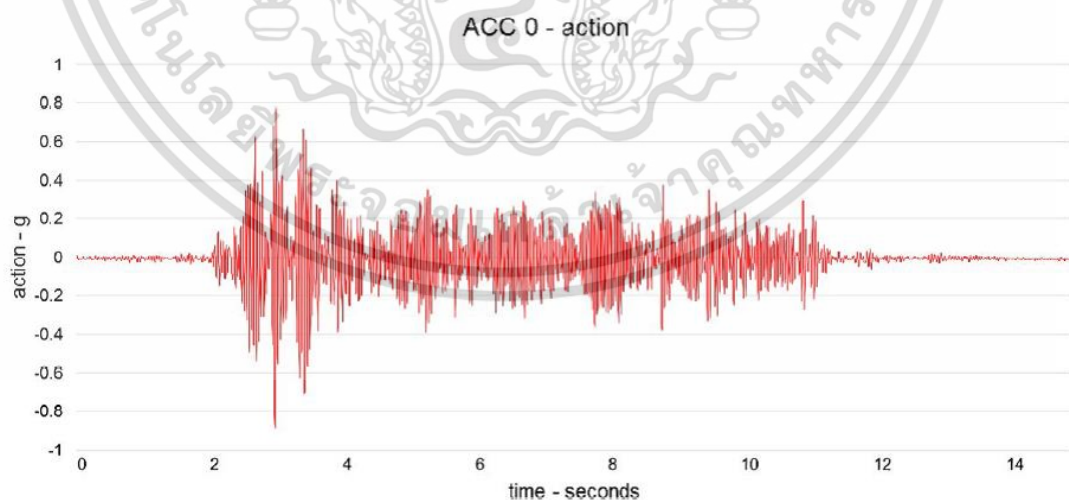
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-25 ภาพแสดงตัวอย่างการวัดความเร่งของพื้นดินในบริเวณใกล้กับแนวรางรถไฟ  
ที่มา OANCEA[55]

#### 2.8.4 การวิเคราะห์สัญญาณ

ความสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟเป็นสัญญาณแบบสุ่ม (random) ไม่คงที่ (no stationary) และมีการวิวัฒนาการ (evolutionary signal) และแปรผันตามเวลา การวิเคราะห์สัญญาณเหล่านี้สามารถอธิบายดังในรูปที่ 7 ซึ่งแสดงข้อมูลที่บันทึกได้บนโดเมนเวลาในขณะที่แกนนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบที่ตำแหน่ง ACC0 พบว่าระดับของการสั่นสะเทือนลดลงอย่างรวดเร็วจากตำแหน่งใกล้รางรถไฟ ACC0 มายังตำแหน่งใกล้โรงเรียน ACC4 ซึ่งห่างกันราว 35 เมตร สรุปได้ว่าความห่างของแหล่งกำเนิดคลื่นและจุดวัดห่างออกไปและผลมาจากคุณสมบัติของชั้นดินที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านส่งผลให้ความระดับการสั่นสะเทือนลดลงไปตามระยะทางที่ห่างออกไป ช่วงความถี่ที่คลื่นการสั่นสะเทือนมีขนาดแอมพลิจูดสูงอยู่ในระหว่าง 20 – 30 HZ โดยช่วงความถี่ที่มีผลกระทบระยะยาวต่อระบบอวัยวะภายในของผู้อาศัยในอาคารอยู่ในช่วง 15 – 35 HZ



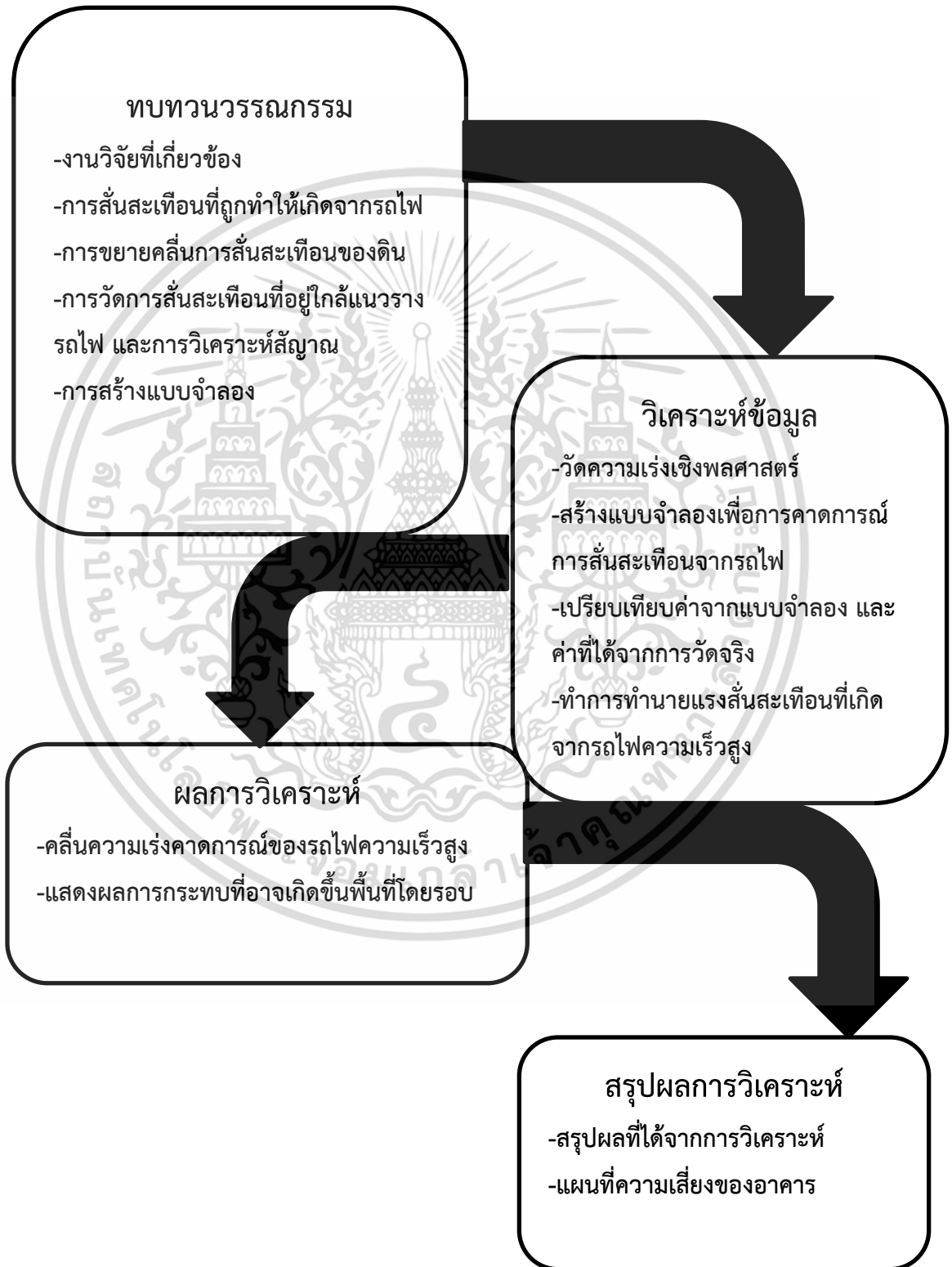
รูปที่ 2-26 ภาพแสดงผลข้อมูลที่บันทึกได้บนโดเมนเวลาในขณะที่แกนนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบที่ตำแหน่ง ACC0 ที่มา OANCEA[55].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.5 ข้อกำหนดความปลอดภัยสำหรับการสัมผัสที่เกิจากกรไฟฟ้า

เนื่องจากมีข้อกำหนดการสัมผัสที่เกิจากกรไฟฟ้า อาทิเช่น DIN 4150-3 [49] ดังนั้นผลการวัดการสัมผัสสามารถนำมาเปรียบเทียบกับข้อกำหนดเหล่านี้ได้โดยคำนึงถึงความเสี่ยงของโครงสร้างอาคาร ความรู้สึกของมนุษย์ การกระทบกระเทือนการทำงานของเครื่องจักรอุปกรณ์ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะประเมินสถานภาพของสถานการณ์จริงกับข้อกำหนดที่เป็นทางการเพื่อให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกัน นอกเหนือจากความปลอดภัยของโครงสร้างอาคารสิ่งปลูกสร้างแล้ว ยังพบว่าช่วงความถี่ที่มีผลกระทบต่อระบบอวัยวะภายในของผู้อาศัยในอาคารอยู่ในช่วง 15 – 35 HZ ซึ่งในกรณีขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้สอยของอาคาร เช่น อาคารเรียนเด็กอ่อน อาคารพักฟื้นผู้ป่วย อาคารโรงพยาบาลและอาคารวิจัยที่มีเครื่องมือและอุปกรณ์ความละเอียดสูงที่มีความอ่อนไหว ผลกระทบของคลื่นการสัมผัสต่ออาคารเหล่านี้จะมีนัยยะสำคัญที่ต้องพิจารณาอย่างละเอียดถี่ถ้วน แนวทางแก้ไขอาจจะโดยอาศัยอุปกรณ์ช่วยลดผลกระทบจากคลื่นสัมผัส อาทิเช่น ระบบป้องกันการเคลื่อนที่ของคลื่นตลอดแนวสายทางกรไฟฟ้า ระบบผนังกันเสียง หรือก่อสร้างระบบแยกความถี่การสัมผัสของฐานรากอาคารกับโครงสร้างส่วนบน หรือ ระบบตัวหน่วงการสัมผัสของโครงสร้างสิ่งปลูกสร้าง เป็นต้น

บทที่ 3  
วิธีดำเนินงานวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นการวิจัยในลักษณะการศึกษาและออกแบบจำลองประกอบกับการสำรวจภาคสนาม(Field Research) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษา เปรียบเทียบข้อมูลของคลื่นแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากรถไฟความเร็วปกติ ความเร็วปานกลาง และความเร็วสูง โดยใช้แบบจำลองทำการทำนายและจำลองคลื่นแรงสั่นสะเทือนที่เป็นไปได้ของรถไฟฟ้าความเร็วสูงที่กำลังจะถูกสร้างและใช้งานในอนาคต เพื่อที่จะหาค่าความปลอดภัยของอาคารในบริเวณพื้นที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังว่าจะได้รับผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนดังกล่าวมากน้อยเพียงใด มีอันตรายร้ายแรงหรือไม่ และจัดทำแผนที่ความเสี่ยง เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการเตรียมมาตรการป้องกันและรับมือต่อไปในอนาคต อีกทั้งยังสามารถนำผลจากการวิจัยมาสรุป และสามารถนำแบบจำลองคลื่นการสั่นสะเทือนของรถไฟความเร็วสูงมาวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อตัวอาคารภายในบริเวณพื้นที่ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังนั้นจำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลและ วิธีการดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟ
2. เปรียบเทียบแรงสั่นสะเทือนที่วิเคราะห์กับค่าแรงสั่นสะเทือนจากการวัดค่าจริง เพื่อทำการทำนายค่าที่เป็นไปได้จากรถไฟความเร็วสูง
3. จำลองการแผ่กระจายตัวของคลื่นสั่นสะเทือนในดิน
4. จัดทำแผนที่ความเสี่ยง

### 3.1 การวิเคราะห์แรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟ

เพื่อการคำนวณที่แม่นยำ จนไปถึงการจัดทำแบบจำลองที่ตรงกับสภาพแวดล้อมโดยรวมของสจล ก่อนทำการศึกษาวิจัยจึงต้องวิเคราะห์รูปแบบที่มาของการกำเนิดแรงสั่นสะเทือน โดยสามารถทำได้โดยขั้นตอนดังต่อไปนี้

#### 3.1.1 ประเภทของระบบขนส่งทางรางบริเวณพื้นที่ สจล

ระบบขนส่งทางรางในบริเวณพื้นที่ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อยู่ในรูปแบบรางรถไฟสำหรับระบบขนส่งมวลชนระหว่างเมือง (Intercity Passenger Rail, IPR) ซึ่งมีความเร็วสูงสุดในการดำเนินการอยู่ที่ 100 กม/ชม น้ำหนักลงพลาสูงสุดไม่เกิน 25 ตัน

##### 3.1.1.1 ทางรถไฟ สจล ในปัจจุบัน

จากการวิเคราะห์พบว่า บริเวณพื้นที่ที่รถไฟวิ่งผ่านที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หากอ้างอิงจาก สนข พบว่าเป็นทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งทางรางระหว่างเมือง (intercity Rail,IR) และอยู่ในประเภท ทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งมวลชนระหว่างเมือง ซึ่งมี

ข้อกำหนดให้ใช้ความเร็วในการเคลื่อนผ่านของรถไฟได้สูงสุดอยู่ที่ 100 กม./ชม. น้ำหนักงผลาสูงสุดไม่เกิน 25 ตัน และเป็นรูปแบบขนาดทาง 1.000 เมตร



รูปที่ 3-1 ภาพแสดงพื้นที่ทางรถไฟที่วิ่งผ่านบริเวณ สจล ในปัจจุบัน(ปี 2563)

### 3.1.1.2 ทางรถไฟ ที่อาจใช้ในการก่อสร้างในอนาคต

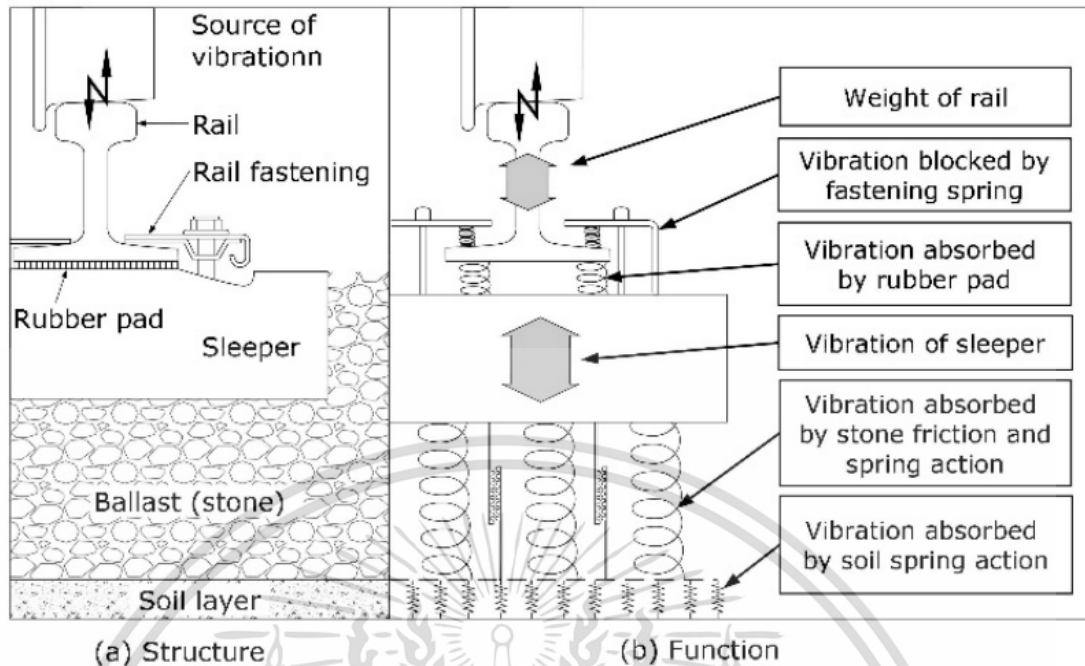
ทางรถไฟความเร็วสูงที่ พาดผ่านพื้นที่ สจล. สามารถคาดการณ์ได้ว่าจะอยู่ในทางรถไฟสำหรับระบบขนส่งทางรางระหว่างเมือง(intercity Rail,IR) และอยู่ในประเภททางรถไฟความเร็วสูงปานกลาง หรือ ทางรถไฟความเร็วสูง ซึ่งสามารถมีความเร็วในการให้บริการตั้งแต่ 100 กม./ชม. ถึงมากกว่า 200 กม./ชม. โดยมีน้ำหนักงผลาสูงสุดไม่เกิน 25 ตัน และมีขนาดทางเท่ากับ 1.435 เมตร อ้างอิงจาก สนข

ทั้งนี้ ระบบโครงสร้างทางรถไฟความเร็วสูงที่จะวิ่งผ่านบริเวณพื้นที่ สจล. อาจเป็นได้ทั้งระบบโครงสร้างชนิดมีหินโรยทาง และ แบบไม่มีหินโรยทาง(ทางยกระดับ)

ซึ่งข้อแตกต่างจะส่งผลต่อแรงสั่นสะเทือนที่ถูกส่งผ่านออกมาจากแหล่งกำเนิด และสามารถใช้ค่าจำเพาะที่แตกต่างกันในการคำนวณค่าการสั่นสะเทือนจากแบบจำลองที่ต่างกันของรูปแบบโครงสร้างทั้งสองชนิดได้

## 3.2 การสร้างแบบจำลองเชิงพลศาสตร์

ทางรถไฟประกอบด้วยองค์ประกอบหลายส่วน โดยพฤติกรรมการรับน้ำหนักจะเริ่มจากล้อรถไฟกดลงสู่ราง จากนั้นแรงจะกระจายลงหมอนแต่ละท่อนรอบ ๆ ตำแหน่งของแรงที่กระทำผ่านทางอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง หมอนจะทำหน้าที่กระจายแรงอีกชั้นผ่านทางพื้นผิวสัมผัสได้หมอนลงสู่ชั้นหินโรยทางและลงสู่พื้นดินในที่สุด



(a) Structure

(b) Function

รูปที่ 3-2 ขั้นตอนการถ่ายแรงกระทำระหว่างล้อกับรางลงสู่พื้นดิน

ที่มา : สนข มาตรฐานโครงสร้างรถไฟไทย 2561[53]

จากภาพที่ 3-2 เป็นการจำลองโครงสร้างของทางรถไฟให้เป็นแบบจำลองทางพลศาสตร์

ทั้งนี้ในการวิเคราะห์อย่างง่ายนั้น องค์ประกอบต่าง ๆ บนทางรถไฟจะสามารถจำลองให้อยู่ในรูปแบบ ของระบบมวลและสปริงได้ดังต่อไปนี้

- ราง (Rails) สามารถจำลองให้มีพฤติกรรมเป็นชิ้นส่วนคาน (beam) เพื่อรับแรงดัดในทางยาว โดยปกติสามารถใช้แบบจำลองแบบ Euler beam ซึ่งคำนึงถึงการดัดเพียงอย่างเดียว แต่ในกรณีที่ต้องการ วิเคราะห์การสั่นสะเทือนในย่านความถี่สูงๆ อาจจำเป็นต้องคำนึงถึงพฤติกรรมการเหือนบนหน้าตัดราง ซึ่ง สามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองแบบ Timoshenko beam

- อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวและแผ่นรองราง (Fastener & Rail pad) สามารถจำลองให้เป็นชิ้นส่วนสปริงและแดมเปอร์

- หมอนรองราง (Sleeper) สามารถจำลองให้เป็นมวลคั่นระหว่างรางและชั้นหินโรยทางในบาง กรณีที่ต้องคำนึงถึงการยึดหยุ่นของหมอน เช่น หมอนที่ทำจากวัสดุยึดหยุ่น อาจจำเป็นต้องจำลองถึงพฤติกรรม การดัดในแนวยาว และการยึดหยุ่นตัวในแนวตั้งด้วยเช่นกัน

- ชั้นหินโรยทาง (Ballast) สามารถจำลองให้มีพฤติกรรมเป็นระบบสปริง และแดมเปอร์ โดยใน บางกรณีอาจต้องคำนึงถึงมวลของชั้นหินโรยทางที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของระบบด้วยเช่นกัน

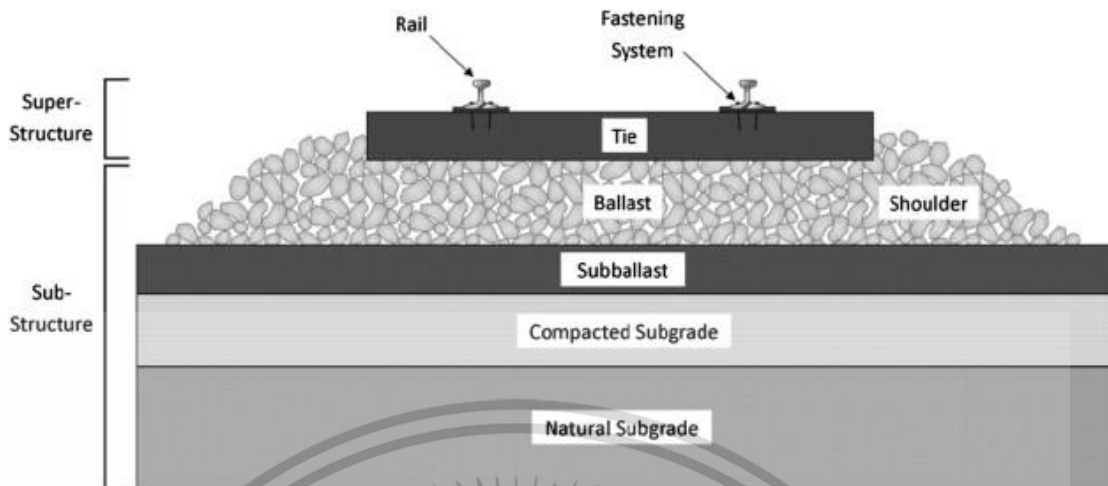
- ชั้นพื้นทาง (Formation) สามารถจำลองให้มีพฤติกรรมเป็นระบบสปริงและแดมเปอร์ โดย

ใน บางกรณีอาจต้องคำนึงถึงมวลของดินในชั้นพื้นทางที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของระบบด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

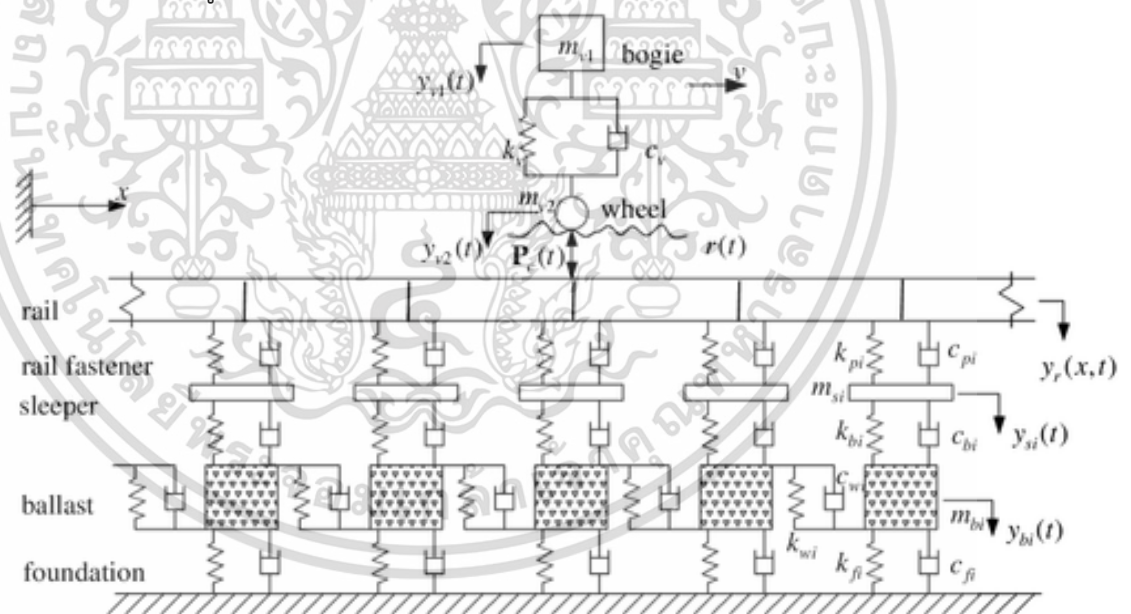
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถวาดภาพของโครงสร้างทางรถไฟตามแนวตัดขวางได้ตามรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-3 ภาพตัดขวางของโครงสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง

เมื่อพิจารณาจากหลากหลายปัจจัยทางโครงสร้างของโครงสร้างทางรถไฟที่วิ่งผ่านพื้นที่ สกล สามารถจำลองเป็นแบบจำลองพลศาสตร์ การกระทำกันระหว่างแรงจากรถไฟที่วิ่งผ่านกับตัวโครงสร้างทางรถไฟได้ตามรูปที่ 3-4

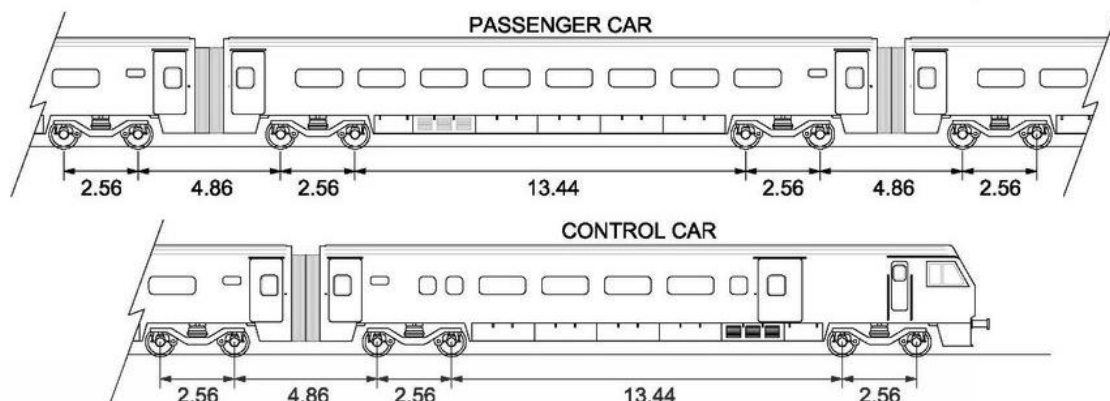


รูปที่ 3-4 แบบจำลองทางพลศาสตร์การกระทำระหว่างล้อกับรางและการถ่ายลงพื้นดิน

### 3.3 ข้อมูลจำเพาะของรถไฟ Train Configuration and Loading

ลักษณะทั่วไปของรถไฟ คือ จะมีหัวขบวนทำหน้าที่ลากจูงรถไฟโดยสาร โดยสิ่งที่จะส่งผลต่อความถี่การสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางรถไฟคือ ระยะห่าง (spacing) ของล้อ หรือคือ ระยะห่างระหว่างโหนดแรงกระทำในแนวตั้งที่กระทำต่อตัวรางและความเร็วในการเคลื่อนผ่านของแรงดังกล่าว (ความเร็วของรถไฟ) โดยระยะห่างดังกล่าวของรถไฟชนิดหัวรถจักรไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-5 ภาพแสดงระยะ ท่างระหว่างล้อแต่ละล้อของรถไฟความเร็วปกติ-ปานกลาง

รถไฟที่วิ่งผ่านบริเวณพื้นที่ สจล คือรถไฟประเภทดีเซลราง รุ่น THN

รถไฟ THN [ธรรมดา (ดีเซลราง)]

ทีเอชเอ็น (THN) เป็นรถดีเซลรางพัฒนชนิดมีห้องขับเคลื่อนของการรถไฟแห่งประเทศไทย โดยนำเข้ามาจากประเทศญี่ปุ่น มักถูกใช้ทำขบวนรถหลากหลายประเภท ตั้งแต่ รถด่วน, รถเร็ว ไปจนถึงรถธรรมดา[การรถไฟ]

- ชื่อรุ่นรถ โตคิวซาเรียว-ฮิตาชิ-นิปปอนชาเรียว
- ประเภทรถ รถดีเซลรางพัฒนชนิดมีห้องขับเคลื่อน
- เครื่องยนต์ Cummins N855-R2
- กำลังขับเคลื่อน 235 แรงม้า ที่ 2,100 รอบต่อนาที
- ความเร็วสูงสุด 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- แบบล้อ 2 - 4 Wheel Bogie
- ระบบห้ามล้อ Air Brake
- ความจุเชื้อเพลิง 300 ลิตร
- ความกว้าง 2.815 เมตร
- ความสูง 3.730 เมตร
- ความยาว 20.800 เมตร
- น้ำหนักตัวรถ 33.500 ตัน (น้ำหนักรถเปล่า), 35.322 ตัน (น้ำหนักขณะทำขบวน)
- จำนวนที่นั่ง 74 ที่นั่ง
- ขบวนรถธรรมดาที่ 279/280 กรุงเทพ-ด่านพรมแดนบ้านคลองลึก-กรุงเทพ
- ขบวนรถธรรมดาที่ 281/282 กรุงเทพ-กบินทร์บุรี-กรุงเทพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1 การจำลองรถไฟความเร็วปานกลาง-ความเร็วต่ำ

จากรูปที่ 3-5 สามารถจำลองระยะห่างของโหนดในแนวตั้งของรถไฟได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงระยะห่างของล้อรถไฟและระยะห่างสะสมที่จะใช้ในการคำนวณ

ล้อที่ xn	ระยะห่าง(m)	ระยะสะสม(m)	ล้อที่ xn	ระยะห่าง(m)	ระยะสะสม(m)
X1	0	0	X9	4.86	46.84
X2	2.56	2.56	X10	2.56	49.4
X3	13.44	16	X11	13.44	62.84
X4	2.56	18.56	X12	2.56	65.4
X5	4.86	23.42	X13	4.86	70.26
X6	2.56	25.98	X14	2.56	72.82
X7	13.44	39.42	X15	13.44	86.26
X8	2.56	41.98	X16	2.56	88.82

โดยรถไฟความเร็วปานกลางจะมีความเร็วอยู่ที่ 60-160 กมต่อชม โดยมีน้ำหนักดลงเพลาท่เท่ากับ 33.5 ตัน สามารถคำนวณเป็นแรงกระทำลงที่แต่ละล้อได้เท่ากับ 4.1875 ตัน



รูปที่ 3-6 ค่าจำเพาะของรถไฟความเร็วปกติ - ความเร็วปานกลาง

ที่มา: <https://th.wikipedia.org/wiki>

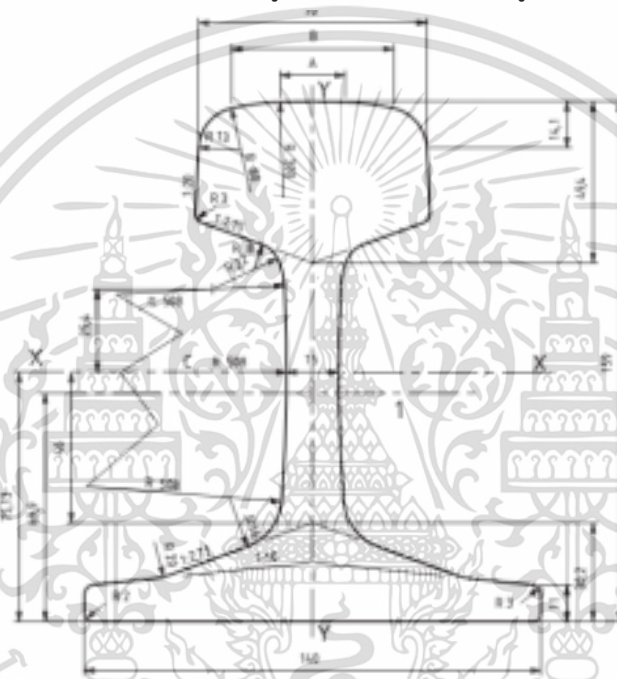
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การจำลองรถไฟความเร็วสูง

แบบจำลองรถไฟความเร็วสูง จะใช้แบบจำลองเดียวกันกับรถไฟความเร็วปกติ เพื่อง่ายแก่การคำนวณ โดยจะทำการเพิ่มความเร็วของรถไฟ เพื่อดูว่าคลื่นที่เกิดจากรถไฟขบวนเดียวกัน มีค่าการสั่นสะเทือนที่แตกต่างกันอย่างไร

### 3.4 ข้อมูลลักษณะจำเพาะของรางรถไฟ

ประเทศไทยใช้รางขนาด 54 e 1 และ 60 e 1 ตามคู่มือการออกแบบเส้นทางรถไฟของ สนข ปี 62 โดยหน้าตัดมีค่าจำเพาะต่างๆตามรูปร่างของหน้าตัดตามรูปที่ 3-7 และ 3-8



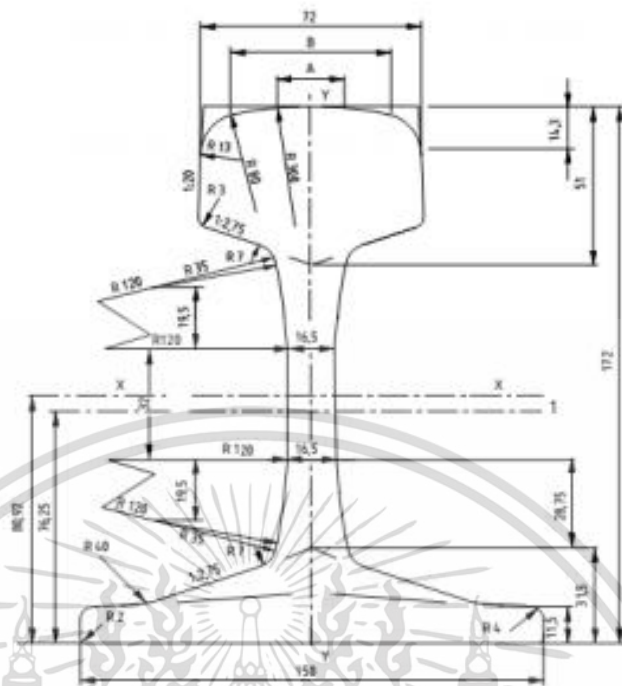
หน่วย : มิลลิเมตร

พื้นที่ตัดขวาง	:	69.77 ซม. <sup>2</sup>
น้ำหนักต่อความยาว	:	54.77 กก./เมตร
โมเมนต์ความเฉื่อยแกน x-x	:	2337.9 ซม. <sup>4</sup>
โมดูลัสหน้าตัด-ส่วนหัว	:	278.7 ซม. <sup>3</sup>
โมดูลัสหน้าตัด-ส่วนฐาน	:	311.2 ซม. <sup>3</sup>
โมเมนต์ความเฉื่อยแกน y-y	:	419.2 ซม. <sup>4</sup>
โมดูลัสหน้าตัดแกน y-y	:	59.9 ซม. <sup>3</sup>
ขนาดกว้างยาว	:	A=20.024 มิลลิเมตร B=49.727 มิลลิเมตร

รูปที่ 3-7 หน้าตัดรางขนาด 54 E 1

ที่มา : สนข มาตรฐานโครงสร้างรถไฟไทย 2561[37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หน่วย : มิลลิเมตร

พื้นที่ตัดขวาง	:	76.70 ซม. <sup>2</sup>
น้ำหนักต่อความยาว	:	60.21 กก./เมตร
โมเมนต์ความเฉื่อยแกน x-x	:	3038.3 ซม. <sup>4</sup>
โมดูลัสหน้าตัด-ส่วนหัว	:	333.6 ซม. <sup>3</sup>
โมดูลัสหน้าตัด-ส่วนฐาน	:	375.5 ซม. <sup>3</sup>
โมเมนต์ความเฉื่อยแกน y-y	:	512.3 ซม. <sup>4</sup>
โมดูลัสหน้าตัดแกน y-y	:	68.3 ซม. <sup>3</sup>
ขนาดกว้างยาว	:	A=20.456มิลลิเมตร B=52.053มิลลิเมตร

รูปที่ 3-8 หน้าตัดรางขนาด 60 E 1

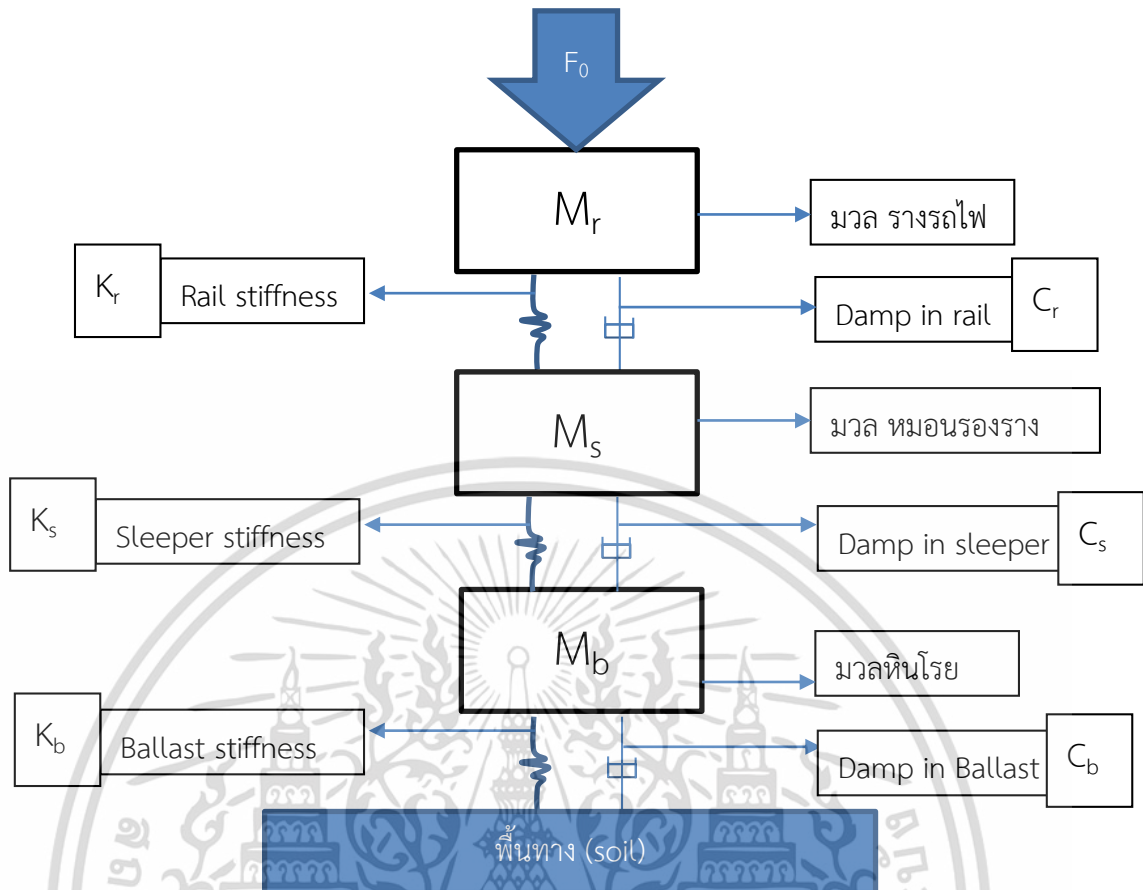
ที่มา : สนข มาตรฐานโครงสร้างรถไฟไทย 2561[37]

### 3.5 วิธีการคำนวณการสั่นสะเทือนจากโมเดลพลศาสตร์ของล้อกับราง

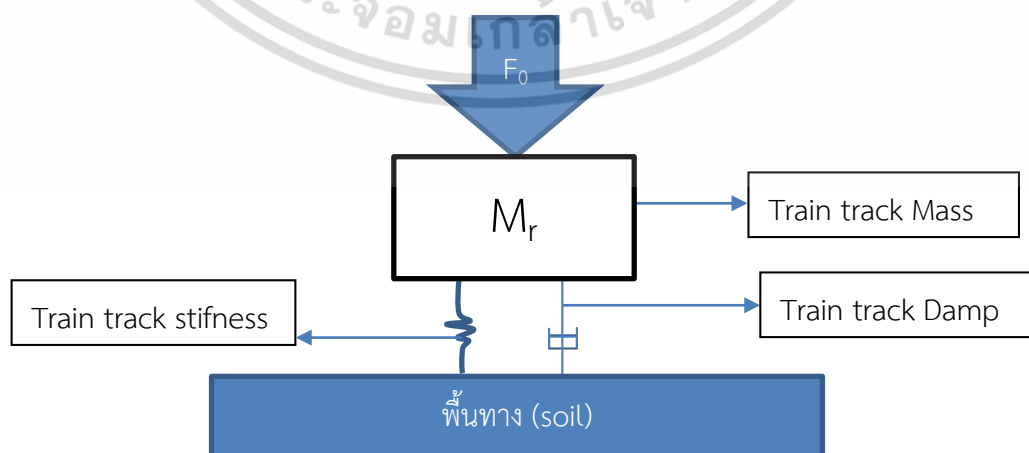
#### 3.5.1 การคำนวณการสั่นสะเทือน

โครงสร้างทางรถไฟในพื้นที่ สจล ซึ่งเป็นแบบประเภทแบบมีหินโรยทาง ให้แรงคงที่ในแนวตั้งที่เคลื่อนที่ T (โหลดแพลา) กระทำลงบนราง(M<sub>r</sub>) จากนั้นถูกลดทอนแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น โดยตัวยึดราง และ แผ่นยาง จากนั้นแรงสั่นสะเทือนที่ถูกลดทอนแล้ว ถ่ายโอนต่อไปยังหมอนรองรางรถไฟ (M<sub>s</sub>) โดยมีหินโรยทาง (M<sub>b</sub>) ทำหน้าที่ลดทอนแรงสั่นสะเทือนต่ออีกทีก่อนจะถ่ายโอนแรงลงสู่ชั้นพื้นทางหรือชั้นดิน ดังที่แสดงในรูปที่ 3-10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-9 แบบจำลองพลศาสตร์ การกระทำระหว่างล้อกับรางของโครงสร้างทางรถไฟ สดจ โดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ในรูปที่ 3-9 นั้น เป็นแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่มีความซับซ้อนสูง อีกทั้ง ค่าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่ เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง มีแนวโน้มว่าจะมีค่าที่ไม่ใช่ค่าจริง หากแต่เป็นเพียงค่าสมมุติ จึงเห็นสมควรมองทั้งโครงสร้างรางรถไฟ ให้กลายเป็นระบบขนาดใหญ่ ระบบเดียว โดยที่มีแบบจำลองอย่างง่ายดังรูปที่ 3-10



รูปที่ 3-10 แบบจำลองพลศาสตร์ การกระทำระหว่างล้อกับรางของโครงสร้างทางรถไฟอย่างง่าย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแบบจำลองข้างต้นในรูปที่ 3-10 สามารถใช้ ทฤษฎีการสั่นสะเทือนของโครงสร้างแบบไดนามิก มาช่วยในการคำนวณ โดยใช้ สมการการสั่นแบบอิสระ (free vibration) และ การสั่นภายใต้แรงกระทำ (Force vibration) ได้โดยอยู่ในรูป

$$x(t) = \frac{F_0}{k} \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n(t-t_1)} \cos[\omega_d(t-t_1) - \phi] \right\}, 0 \leq t < t_1 \quad (3.1)$$

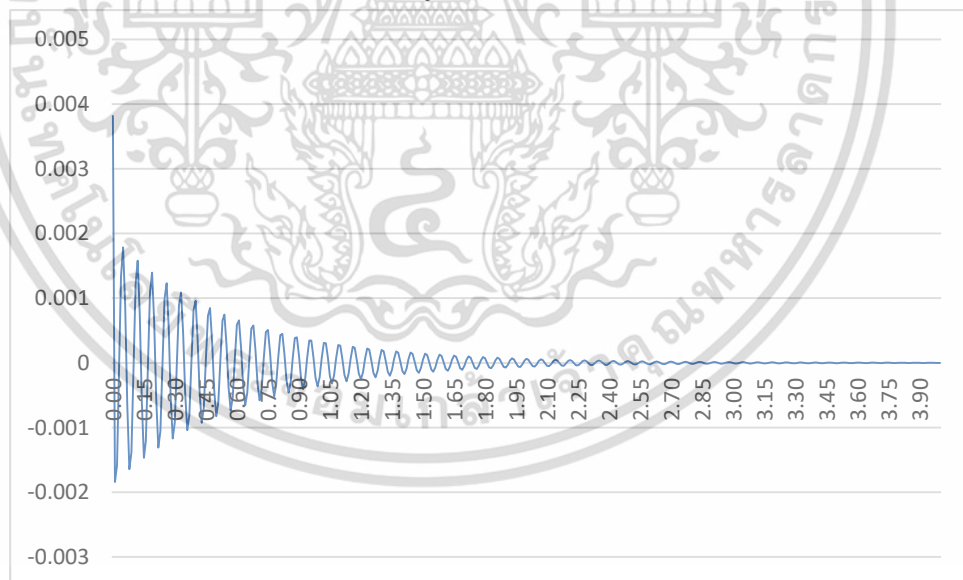
และ

$$x(t) = \frac{F_0 e^{-\xi\omega_n t}}{k\sqrt{1-\xi^2}} \{ e^{\xi\omega_n t_1} \cos[\omega_d(t-t_1) - \phi] - \cos(\omega_d t - \phi) \}, t \geq t_1 \quad (3.2)$$

สมการที่ 3.1 คือสมการการสั่นภายใต้แรงกระทำ (force vibration) โดยกำหนดให้วินาทีที่แรงกระทำต่อแบบจำลองใช้เวลาเท่ากับ  $t_1$  วินาที(ระยะเวลาในการเคลื่อนผ่านของล้อที่จุดที่สนใจ) ในลักษณะของน้ำหนักกระแทก (impulse load)

ส่วนในสมการที่ 3.2 คือสมการการสั่นแบบอิสระ (free vibration) โดยเป็นการสั่นแบบอิสระที่เกิดขึ้นหลังจากถูกน้ำหนักกระแทกในช่วงเวลา  $t_1$  ส่งผลต่อมาทำให้เกิดเป็นการสั่นแบบอิสระจนกระทั่งสิ้นการสั่นสะเทือน

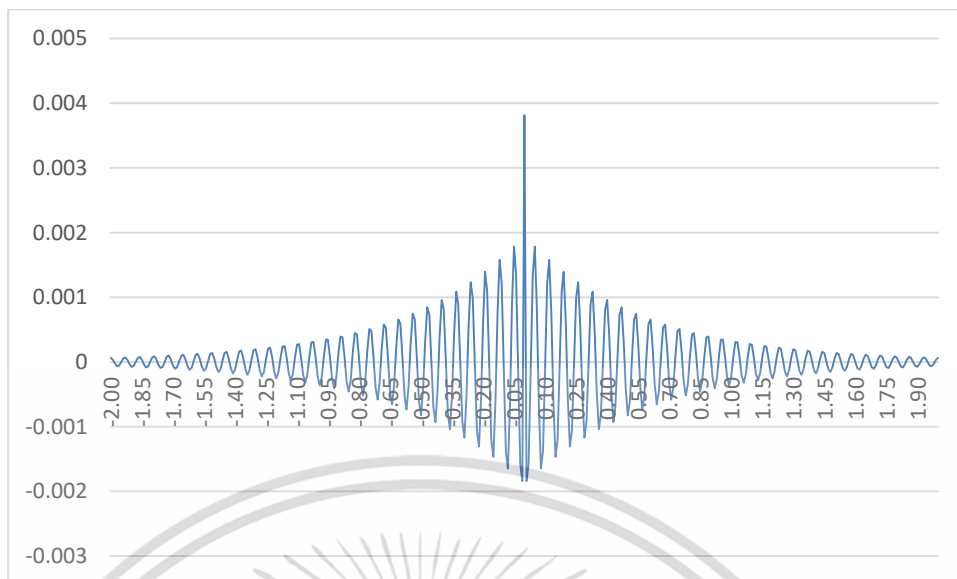
โดยที่  $F_0$  คือแรงกระทำ ในที่นี้หมายถึงน้ำหนักของรถไฟที่เคลื่อนที่ผ่านจุดที่สนใจ โดยหากนำทั้งสองสมการมารวมกัน จะได้กราฟการเคลื่อนที่ของโครงสร้างทางรถไฟ ที่เกิดจาก force vibration และ free vibration ดังตัวอย่างในรูปที่ 3-11



**รูปที่ 3-11** ตัวอย่างกราฟจากการรวมกันของสมการที่ (3.1)และ(3.2) โดยแกน x คือเวลา (วินาที) และแกน y คือค่าแอมพลิจูด

เมื่อได้กราฟ ดังรูปที่ 3-11 แล้ว จึงสันนิษฐานได้ว่า การสั่นสะเทือนก่อนหน้าที่แรงจากล้อรถไฟจะกระทำ(ก่อนวินาทีที่ 0)จะมีลักษณะที่สมมาตรกัน ทำให้รูปกราฟการสั่นสะเทือนจะสามารถทำออกมาอยู่ในรูปที่ 3-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-12 ตัวอย่างกราฟการสั่นสะเทือน (จากแรงกระทำโดยล้อ 1 ล้อ) จากการคำนวณโดยสมการ (3.1) และ (3.2) โดยแกน x คือเวลา (วินาที) และแกน y คือค่าแอมพลิจูด

โดยจากรูปที่ 3-12 เป็นตัวอย่างการสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางรถไฟที่เกิดขึ้น เมื่อมีล้อรถไฟวิ่งผ่าน 1 ล้อ ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ตัวขบวนของรถไฟมีจำนวนล้อที่มากกว่า 1 ซึ่งทำการหาเวลาที่ล้อทั้งหมดของรถไฟจะวิ่งผ่านจุดที่สนใจ เพื่อทำการหาค่าการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการผ่านของรถไฟทั้งขบวน โดยสามารถหาระยะเวลาที่ต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับความเร็วของรถไฟที่วิ่งผ่านจุดที่สนใจได้ตามตัวอย่างในตารางที่ 3.2

โดยภายใต้สมมติฐานที่ว่า แรงที่กระทำในทุกๆ ล้อของรถไฟนั้นมีค่าเท่ากัน เพื่อการง่ายแก่การคำนวณ ถึงแม้ว่าความจริงแล้ว น้ำหนักของขบวนรถไฟแต่ละขบวนจะมีความแตกต่างกันบ้าง ไม่ว่าจะเป็นเพราะจำนวนผู้โดยสาร หรือสิ่งของที่บรรทุกก็ตาม

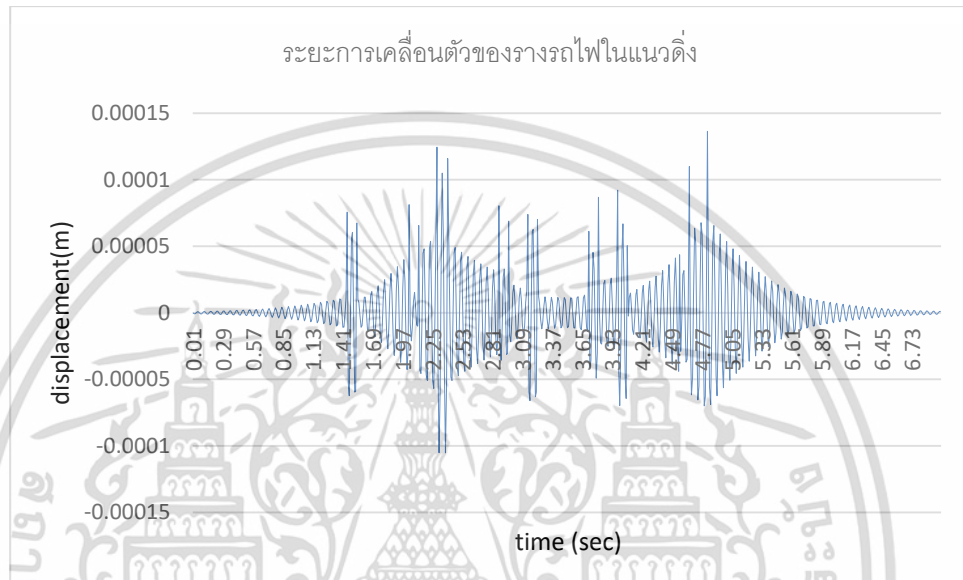
ตารางที่ 3.2 เวลาล้อวิ่งถึงจุดที่สนใจเมื่อรถไฟมีความเร็ว 100 กม/ชม. (THN model)

ล้อที่ xn	ระยะห่างของล้อสะสม(m)	ระยะเวลาที่ถึงจุดสนใจ (sec)	ล้อที่ xn	ระยะห่างของล้อสะสม(m)	ระยะเวลาที่ถึงจุดสนใจ (sec)
X1	0	0	X9	46.84	2.95128
X2	2.56	1.44	X10	49.4	3.12624
X3	16	1.53216	X11	62.84	3.2184
X4	18.56	2.016	X12	65.4	3.70224
X5	23.42	2.10816	X13	70.26	3.7944
X6	25.98	2.28312	X14	72.82	3.96936
X7	39.42	2.37528	X15	86.26	4.06152
X8	41.98	2.85912	X16	88.82	4.54536

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่า รถไฟที่ความเร็ว 100 กม/ชม หาก ใช้โมเดลของรถไฟไทย รุ่น THN ซึ่งมีจำนวนล้อเท่ากับ 8 ล้อต่อขบวน(ด้านละ 4 ล้อ) หากจำนวนขบวนรถไฟเท่ากับ 4 ขบวน จะมีล้อทั้งหมด 16 ล้อที่วิ่งผ่านจุดที่สนใจ และใช้เวลาในการเคลื่อนผ่านจุดที่สนใจทั้งสิ้นประมาณ 4-5 วินาทีเท่านั้น

และเมื่อนำผลจากการเคลื่อนผ่าน ของทุกๆล้อของรถไฟเข้ารวมกัน จะทำให้เกิดกราฟการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการเคลื่อนผ่านของรถไฟทั้งขบวนดังรูปที่ 3.-13



**รูปที่ 3-13** ตัวอย่างกราฟการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการรวมกันของกราฟการสั่นสะเทือนล้อเดียว จำนวน 16 ล้อ (4 ขบวนรถไฟ)

ทั้งนี้ รูปกราฟการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรทั้งหลายอันได้แก่

$K$  = train track stiffness (ค่าความแข็งของโครงสร้างทางรถไฟ)

$\xi$  = damping ratio (สัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างทางรถไฟ)

ซึ่งค่าทั้งสองค่า เป็นค่าที่จะแปรเปลี่ยนไปตามลักษณะของโครงสร้างทางรถไฟ

### 3.5.2 ค่าความแข็งของทางรถไฟ train track stiffness ( $k$ )

ผลของความแข็งของทางรถไฟ ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเส้นทาง เพื่อควบคุมและจัดการค่าความแข็งของเส้นทางรางอย่างมีประสิทธิภาพ ค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความแข็งของเส้นทางเป็นสิ่งสำคัญในการสนับสนุนมาตรฐานการออกแบบและการบำรุงรักษา มีความพยายามหลายครั้งก่อนหน้านี้ในการพัฒนาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความแข็งของเส้นทางราง อย่างไรก็ตาม การศึกษาล่าสุด (Puzavace et al., 2012)[65] ได้ข้อสรุปว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความแข็งของเส้นทางรางนั้นขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของสายการผลิตและไม่สามารถใช้ค่าที่ตกลงกันได้ในระดับสากล ดังนั้น จึงใช้การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับทางรถไฟของสหราชอาณาจักรเพื่ออำนวยความสะดวกในการออกแบบและคำนวณค่าความแข็งของเส้นทางรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแข็งของเส้นทางรางรางในแนวตั้งเป็นฟังก์ชันของโมดูลัสความยืดหยุ่นของชั้นและส่วนประกอบต่างๆในระบบรางรถไฟ มีหลายวิธีที่สามารถใช้เพื่อแสดงความแข็งของแทร็กในทางคณิตศาสตร์โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปความแข็งของเส้นทางรางทั่วโลกคืออัตราส่วนของโพลไดนามิกที่ใช้กับการโก่งตัวของรางด้านบน อย่างไรก็ตามเป็นการยากที่จะระบุโพลไดนามิกที่ใช้ได้ (Powrie & Le Pen, 2016)[58]

### 3.5.2.1 ความสำคัญของความแข็งของแทร็ก

ผลกระทบเมื่อค่าความแข็งของเส้นทางรางมีค่าต่ำ หนึ่งในการศึกษาในระยะแรก ๆ เกี่ยวกับผลของความแข็งของเส้นทางรางได้ดำเนินการโดย British Rail (BR) ในปี 1990 (Jenkins et al, 1990)[59] การศึกษา BR วิเคราะห์ไว้ว่าที่ประมาณ 10% ของเส้นทางที่ศึกษา ซึ่งมีความแข็งต่ำและส่วนที่เหลือมีความแข็งสูง การศึกษาสรุปได้ว่าส่วนที่มีความแข็งของเส้นทางต่ำมีการเสื่อมสภาพมากกว่า 50% เมื่อเทียบกับส่วนของเส้นทางรางที่แข็งกว่า

### 3.5.2.2 ผลของค่าความแข็งของเส้นทางรางต่อพฤติกรรมการ

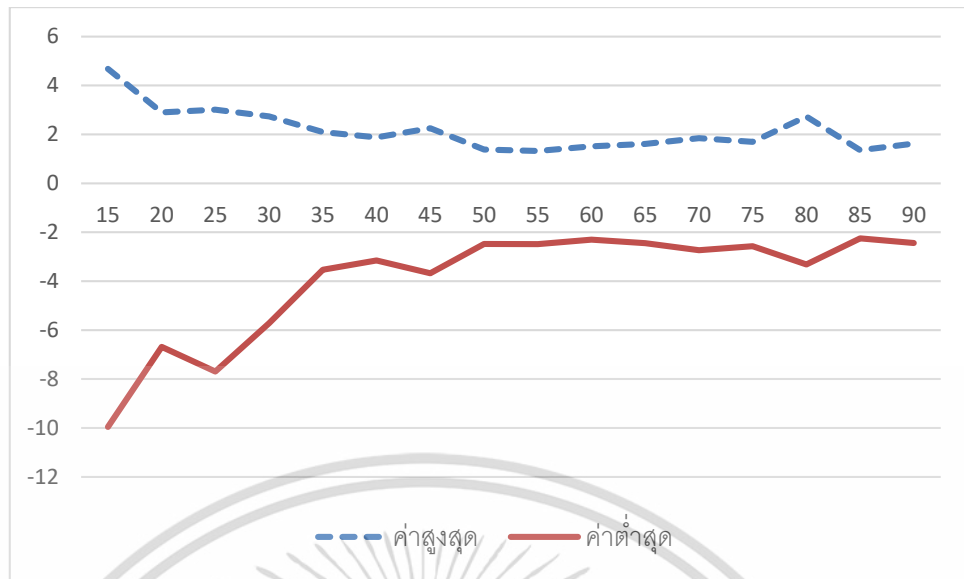
#### สั่นสะเทือนในแบบจำลองเชิงพลศาสตร์

อย่างที่กล่าวไปในข้างต้น ว่าค่า  $k$  หรือค่าความแข็งของเส้นทางรางนั้น มีผลต่อรูปแบบการสั่นสะเทือนของตัวโครงสร้าง ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว โครงสร้างรางรถไฟทั่วโลก ในแต่ละที่จะมีค่าที่แตกต่างกันไป อีกทั้ง ยังเป็นค่าที่แปรผันโดยสัมพันธ์ตามธรรมชาติไม่สามารถระบุได้แน่ชัด เนื่องมาจากปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลต่อค่า  $k$  ของระบบ ไม่ว่าจะเป็นรูปแบบของรางเหล็กของรถไฟ รูปแบบของหมอนรองราง รูปแบบของตัวยึด หรือแม้กระทั่งหินโรยทาง ทุกๆส่วนที่กล่าวมา ล้วนมีผลกระทบต่อค่าความแข็งของรางทั้งสิ้น

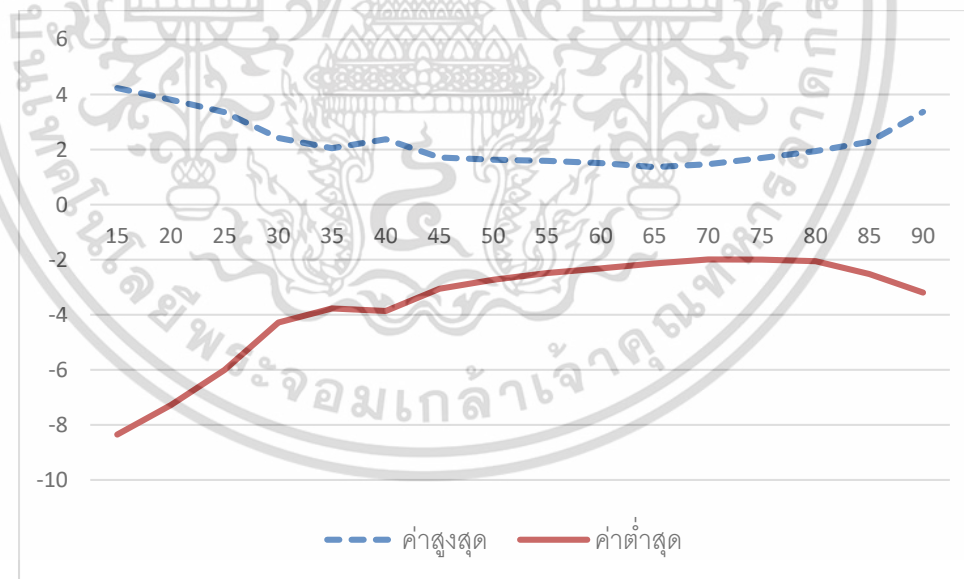
ทั้งนี้จากการศึกษาของ [João Corrêa Mendes da Silva Ribeiro 2014 [60] ทำการวัดค่าความแข็งของเส้นทางรถไฟแบบอ่อน (soft track) ทางตอนเหนือของยุโรป พบว่า ค่าเฉลี่ยของโครงสร้างทางรถไฟแบบอ่อนจะอยู่ที่ 30-40 kN/mm ทั้งยังพบด้วยว่า

ในขณะที่ Martin et al 2009[61] ได้บอกไว้ว่าโครงสร้างโดยทั่วไปของทางรถไฟจะมีอยู่สองช่วงค่าความแข็ง คือโครงสร้างทางอ่อน จะมีค่าความแข็งอยู่ที่ 30-40 kN/mm ส่วนโครงสร้างที่มีความแข็งโดยทั่วไปจะอยู่ที่ 40-70 kN/mm และยังบอกอีกด้วยว่า ส่วนมาแล้ว โครงสร้างเส้นทางรถไฟความเร็วสูง จะมีค่าความแข็งอยู่ที่ 70-80 kN/mm

หากนำค่า ความแข็งช่วงต่างๆ ใส่เข้าไปในแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่สร้างขึ้น ตามสมการที่ 3.1 และ 3.2 โดยคงค่าตัวแปรอื่นๆเอาไว้ให้คงที่ จะเห็นได้ดังรูปที่ 3-14



รูปที่ 3-14 ตัวอย่างกราฟแสดงค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่าการสั่นสะเทือน(ความเร่ง)(เมตร/วินาทีกำลังสอง) เมื่อกำหนดให้รถไฟมีความเร็ว 100 กม/ชม มีค่า damping ratio ที่ 1.85 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทำการเพิ่มความเร็วของ รถไฟขึ้นเป็น 300 กม/ชม ซึ่งถือเป็นรถไฟความเร็วสูง จะตามค่ากล่าวของ Martin Et al [2009][61] ที่บอกไว้ว่า ค่าความแข็งของเส้นทางรถไฟความเร็วสูงนั้น จะมีค่าอยู่ระหว่าง 70-80 kN/mm ก็คือช่วงที่ทำให้เกิดแรงสั่นสะเทือนน้อยที่สุด



รูปที่ 3-15 ตัวอย่างกราฟแสดงค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่าการสั่นสะเทือน(ความเร่ง)(เมตร/วินาทีกำลังสอง) เมื่อกำหนดให้รถไฟมีความเร็ว 300 กม/ชม มีค่า damping ratio ที่ 1.85 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

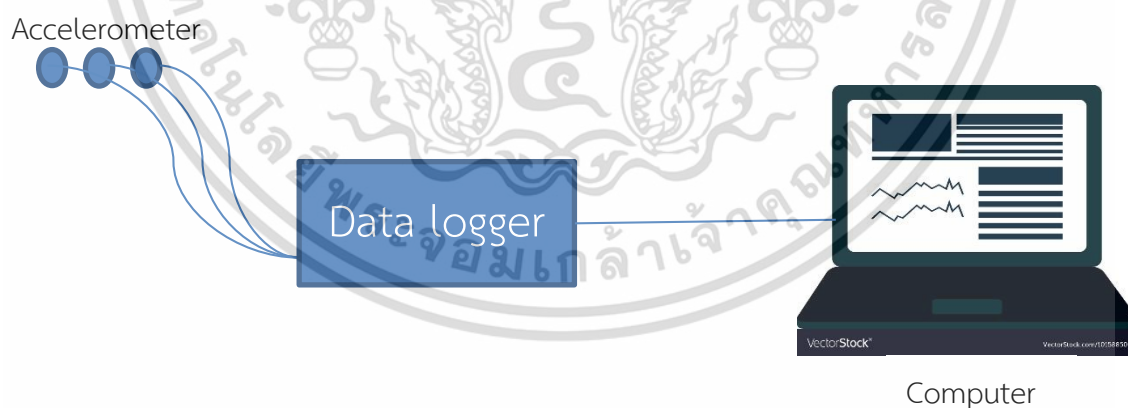
### 3.6 การวัดค่าแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟในพื้นที่ สจล

#### 3.6.1 วิธีการวัดการสั่นสะเทือนที่อยู่ใกล้แนวรางรถไฟ

การวัดการสั่นสะเทือนที่อยู่ใกล้แนวรางรถไฟทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดความเร่งแกนเดียว (Accelerometer) จำนวน 6 ชุด โดยแบ่งจำนวน 2 ชุด โดยแต่ละชุดได้ติดตั้งไว้วัดความเร่งแนวราบที่ตั้งฉากกับแนวรางรถไฟ ขนานกับแนวรางรถไฟและแนวตั้ง จากนั้นทำการติดตั้งบริเวณที่ต้องการวัดการสั่นสะเทือนจำนวน 2 จุด เมื่อได้ค่าความเร่งที่วัดได้จากเครื่องวัดความเร่งจะถูกส่งเข้าคอมพิวเตอร์โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการเก็บรวบรวมข้อมูลและประมวลผล



รูปที่ 3-16 ชุดอุปกรณ์สำหรับการวัดการสั่นสะเทือน



รูปที่ 3-17 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงสั่นสะเทือน

#### 3.6.2 การวิเคราะห์สัญญาณ

การสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟนั้นจะเป็นสัญญาณแบบสุ่ม (random) มีค่าไม่คงที่ (non-stationary) และมีการวิวัฒนาการ (evolutionary signal) และแปรผันตามเวลา ข้อมูลที่บันทึกได้บนโดเมนเวลาในขณะที่แกนนตั้งคือความเร่งของพื้นดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.3 ตารางการเดินรถไฟ

ตารางที่ 3.3 กลุ่มรถไฟเส้นทางออกจากกรุงเทพมหานคร

หมายเลขขบวน	เวลา ณ สถานีพระจอมเกล้า (นาฬิกา)
275	6:59
283	8:09
285	8:09
281	8:54
367	11:06
389	13:00
279	13:45
277	16:15
391	17:48
371	18:38
383	19:21

ตารางที่ 3.4 กลุ่มรถไฟเส้นทางเข้าสู่กรุงเทพมหานคร

หมายเลขขบวน	เวลา ณ สถานีพระจอมเกล้า (นาฬิกา)
380	6:02
384	6:28
372	7:04
388	7:37
378	8:07
278	9:14
280	11:10
368	13:18
390	14:37
282	16:12
284	17:09
286	17:09
276	18:45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.4 การวัดความเร่งเชิงพลศาสตร์

ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดความเร่ง (accelerometer) ร่วมกับอุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (Data logger) และคอมพิวเตอร์แบบพกพา ตามตำแหน่งที่จะกำหนดไว้ โดยมีการวัดทั้งสามแกน คือ แกนตั้ง แกนขนานกับแนวรางรถไฟ และแกนตั้งฉากกับแนวรางรถไฟ ในขั้นตอนนี้อาจต้องใช้ผู้ปฏิบัติจำนวนมากและใช้ระยะเวลาพอสมควร เนื่องจากต้องทำการวัดในหลายตำแหน่งและหลายช่วงเวลา

ผู้วิจัยวางแผนจะเดินทางไปติดตั้งเครื่องมือวัดในบริเวณสถานีของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ เพิ่มเติมเพื่อศึกษาปัจจัยเรื่องความเร็วของขบวนรถ ซึ่งรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์มีความเร็วเดินทางสูงกว่ารถไฟปกติที่วิ่งผ่านพื้นที่ สจล. เพื่อนำข้อมูลมาสอบเทียบเคียงกับข้อมูลที่วัดได้ที่ สจล.



รูปที่ 3-18 อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ data logger



รูปที่ 3-19 หัววัดความเร่ง (accelerometer)

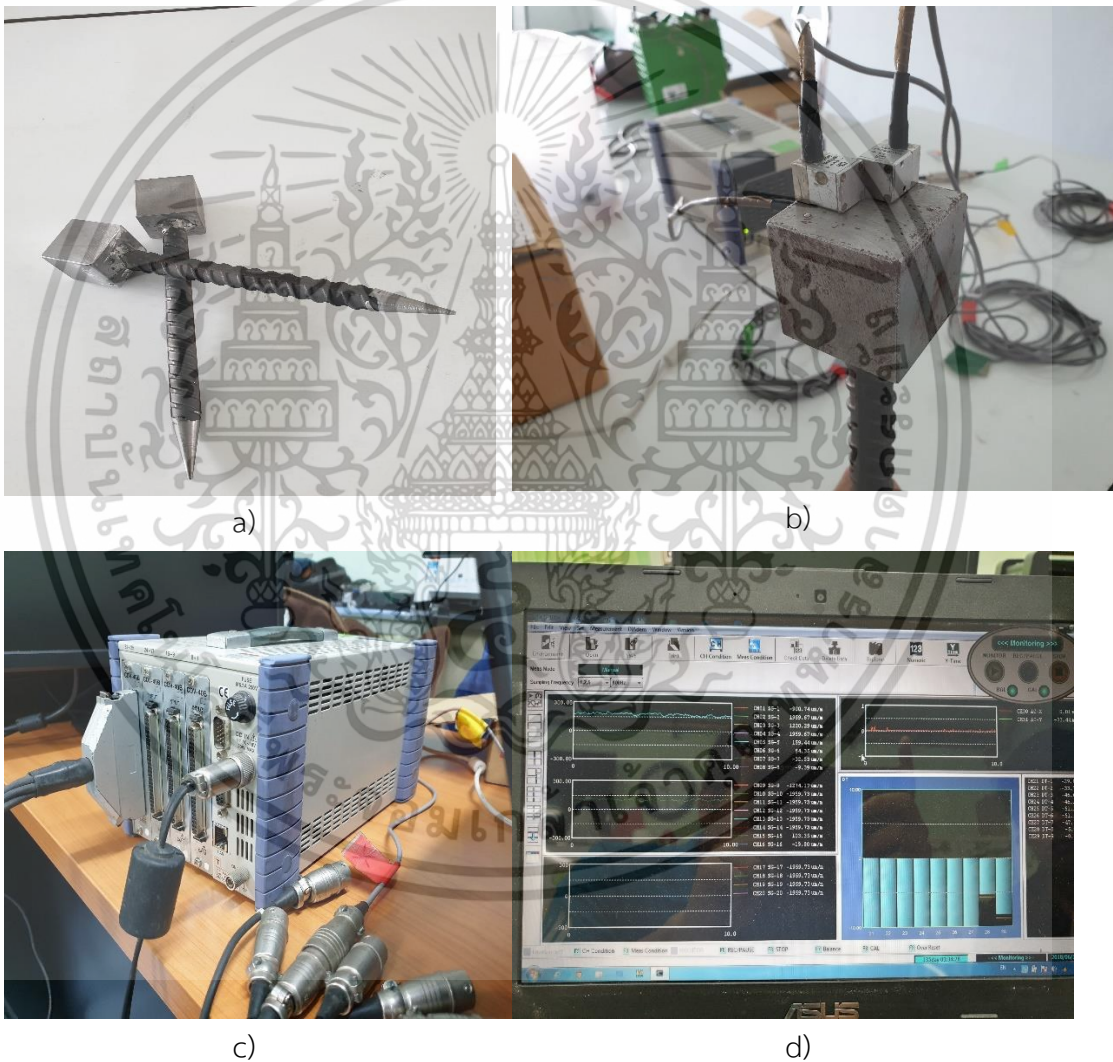
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

หลังจากที่ผู้วิจัยได้ทำการวางแผนในการเก็บข้อมูลภาคสนาม เพื่อเก็บค่าความเร่งที่ได้จากแรงสั่นสะเทือนของรถไฟ โดยผู้วิจัยได้ทำการออกไปเก็บข้อมูลภาคสนามทั้งสิ้น 7 สถานีทดสอบ โดยทั้ง 7 สถานีทดสอบแบ่งเป็นรถไฟสองประเภท ได้แก่ รถไฟธรรมดา และรถไฟฟ้า

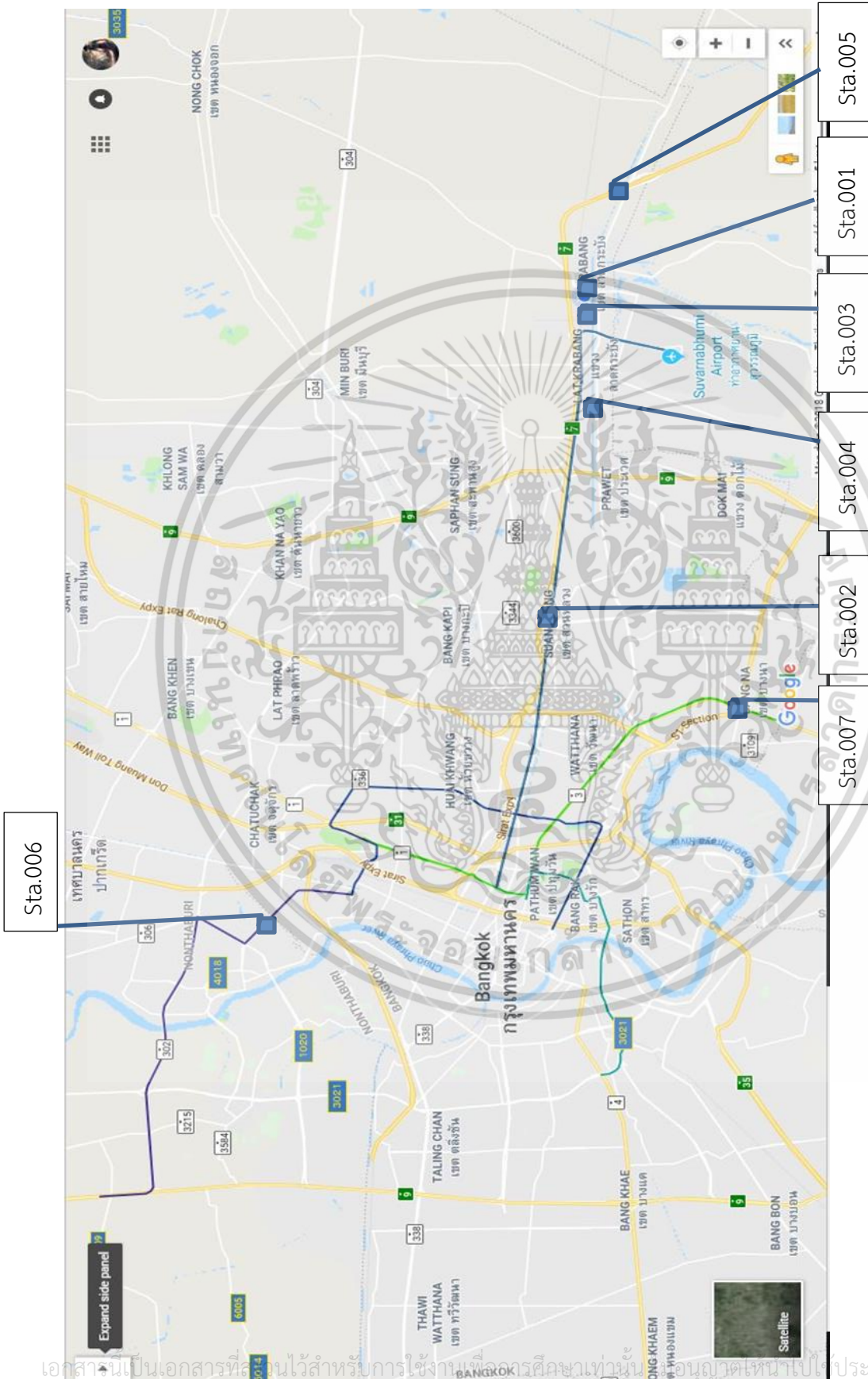
ผู้วิจัยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าหมุดวัดความเร่ง(4-1a)ฝังลงไปใต้ดิน จากนั้นจึงติดตั้งหัววัดความเร่งไว้ด้านบน(4-1b) เพื่อวัดค่าความเร่งที่วิ่งกระจายออกมาจากรถไฟในสามทิศทางดังแสดงในภาพที่ 4-1 โดยหัวหมุดจะส่งข้อมูลไปยังdata logger(4-1c) จากนั้นจึงส่งเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผล(4-1d)



รูปที่ 4-1 อุปกรณ์ภาคสนามที่ใช้ในการวัดค่าความเร่ง

a) หมุดปักดิน b) หัววัดความเร่งบนหมุด c) อุปกรณ์เก็บข้อมูล data logger d) จอแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-2 ภาพแสดงสถานีทดสอบแรงดันของไฟฟ้ 7 สถานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ผู้ออกความคิดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1 สถานีทดสอบ

ในการลงพื้นที่เพื่อทำการทดสอบ ทางผู้วิจัยได้ลงพื้นที่โดยแบ่งสถานีทดสอบออกเป็น 7 สถานี ตามที่แสดงในภาพที่ 4-2

##### 4.1.1 สถานีที่ 001(sta.001)

สถานีที่ 001 ตั้งอยู่บริเวณ ใกล้รางรถไฟ บริเวณตรงข้ามตึกภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ใกล้ สถานีพระจอมเกล้าดังที่แสดงในรูปที่ 4-2 สถานีวัดตั้งอยู่ใกล้กับรางรถไฟความเร็วต่ำที่วิ่งผ่านสถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สถานีพระจอมเกล้า

##### 4.1.2 สถานีที่ 002(sta.002)

สถานีที่ 002 ตั้งอยู่บริเวณ ใกล้รางรถไฟ ระหว่างสถานีบ้านทับช้าง-สถานีหัวหมากดังที่แสดง ในรูปที่ 4-2 โดยสถานีวัดตั้งอยู่ระหว่างสองสถานี

##### 4.1.3 สถานีที่ 003(sta.003)

สถานีที่ 003 ตั้งอยู่บริเวณ ใกล้รางรถไฟหน้าหอพัก RNP ระหว่างสถานีพระจอมเกล้า-สถานี บ้านทับช้างดังที่แสดงในรูปที่ 4-2 โดยสถานีวัดตั้งอยู่ริมใกล้กับถนนฉลองกรุง 1 หน้าโซนหอพัก RNP

##### 4.1.4 สถานีที่ 004(sta.004)

สถานีที่ 004 ตั้งอยู่บริเวณ ใต้Airport Rail Link สำนักงานเขตลาดกระบัง ดังที่แสดงในรูปที่ 4-2 โดยสถานีวัดตั้งอยู่ภายในสำนักงานเขตลาดกระบัง

##### 4.1.5 สถานีที่ 005(sta.005)

สถานีที่ 005 ตั้งอยู่บริเวณ ใกล้รางรถไฟระหว่างกลางของสถานีคลองหลวงเพ่ง-สถานีหัว ตะเข้ ดังที่แสดงในรูปที่ 4-2

##### 4.1.6 สถานีที่ 006(sta.006)

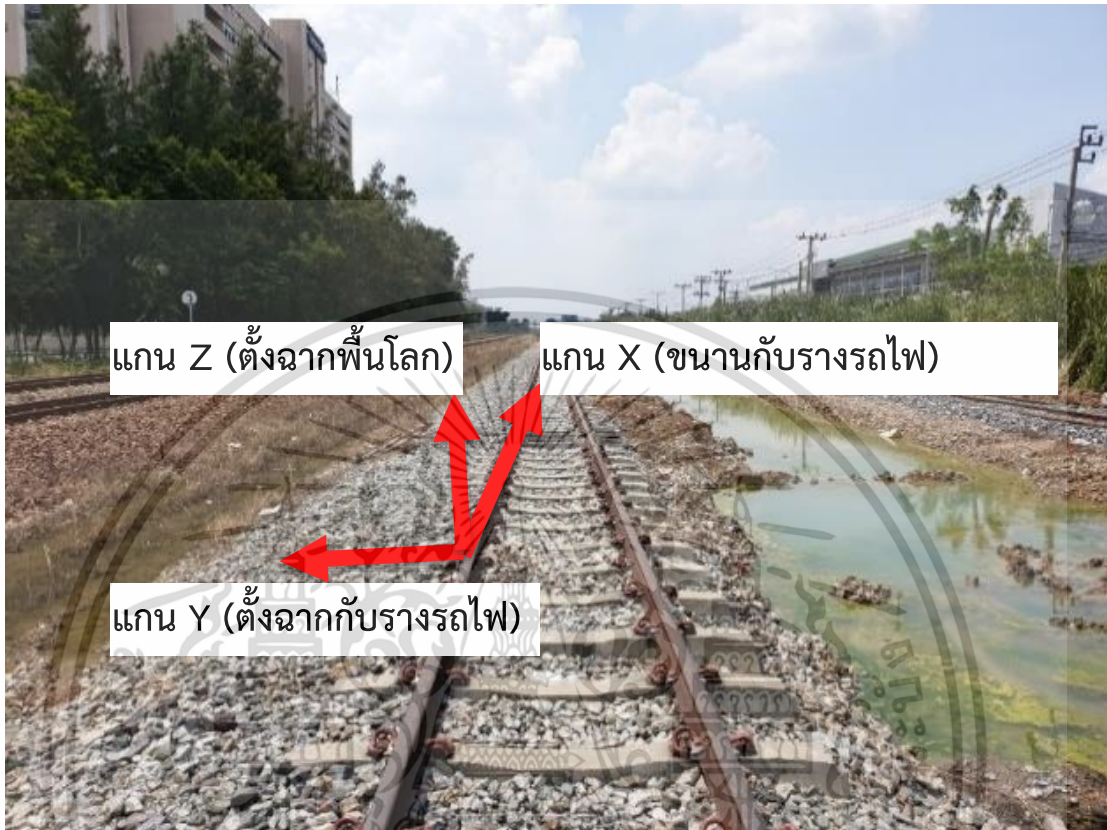
สถานีที่ 006 ตั้งอยู่บริเวณ ระหว่างกลางของสถานีรถไฟฟ้ามหานคร สถานีวงศ์สว่าง-สถานี แยกติวานนท์ ดังที่แสดงในรูปที่ 4-2 โดยสถานีวัดอยู่ระหว่างทั้งสองสถานี

##### 4.1.7 สถานีที่ 007(sta.007)

สถานีที่ 007 ตั้งอยู่บริเวณ ระหว่างกลางสถานีรถไฟฟ้ามหานคร สถานีบางนา-สถานีอุดมสุข หน้าหอประชุม BITEC ดังที่แสดงในรูปที่ 4-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ค่าความเร่งที่วัดได้



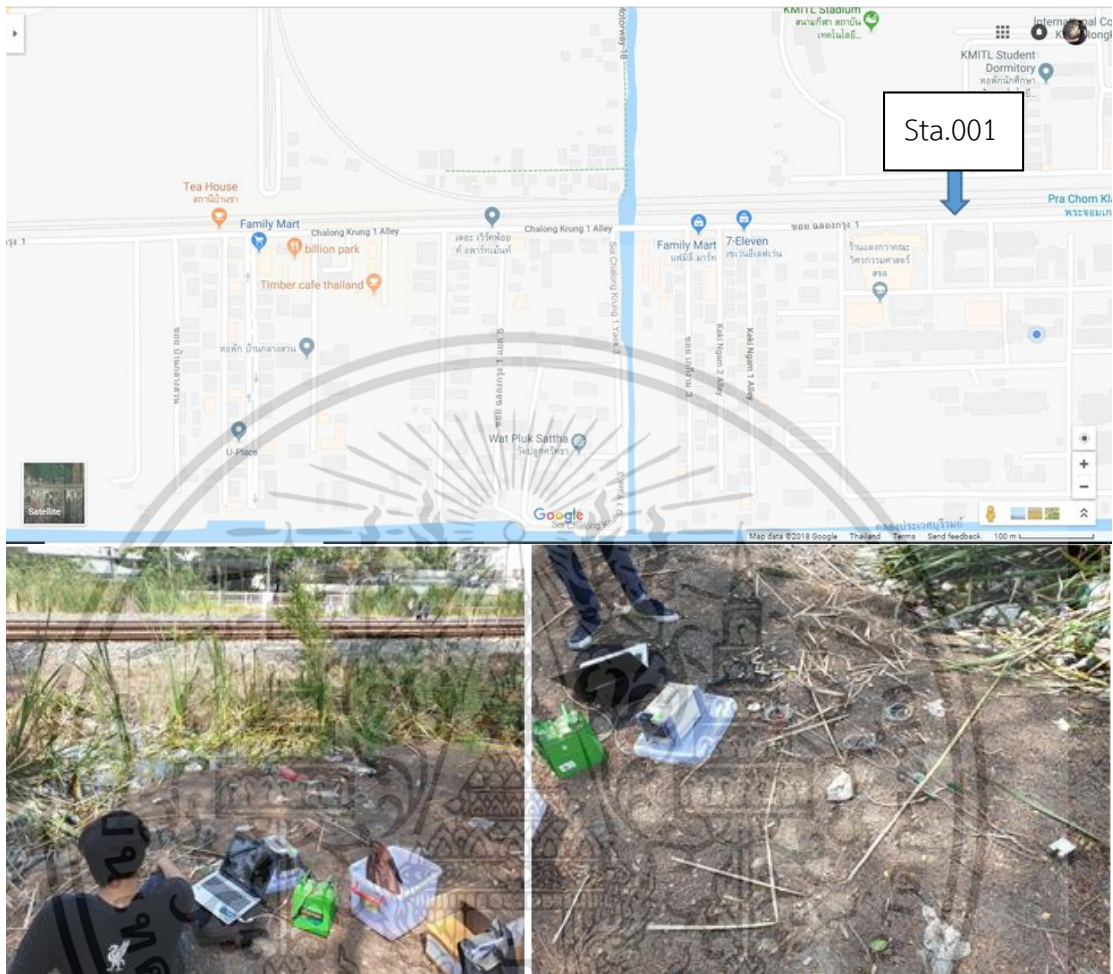
รูปที่ 4-2-1 แสดงทิศทางของการวัดข้อมูล

จากรูปที่ 4-2-1 แสดงการกำหนดทิศทางการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนผ่านของรถไฟ โดยกำหนดในแนวเส้นขนานกับรางรถไฟ เป็นแนวแกน X แนวที่ตั้งฉากกับรางรถไฟเป็นแนวแกน Y และให้แนวตั้งฉากกับพื้นโลกเป็นแนวแกน Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 ค่าความเร่งที่วัดได้บริเวณจุดวัดที่ 1 sta.001

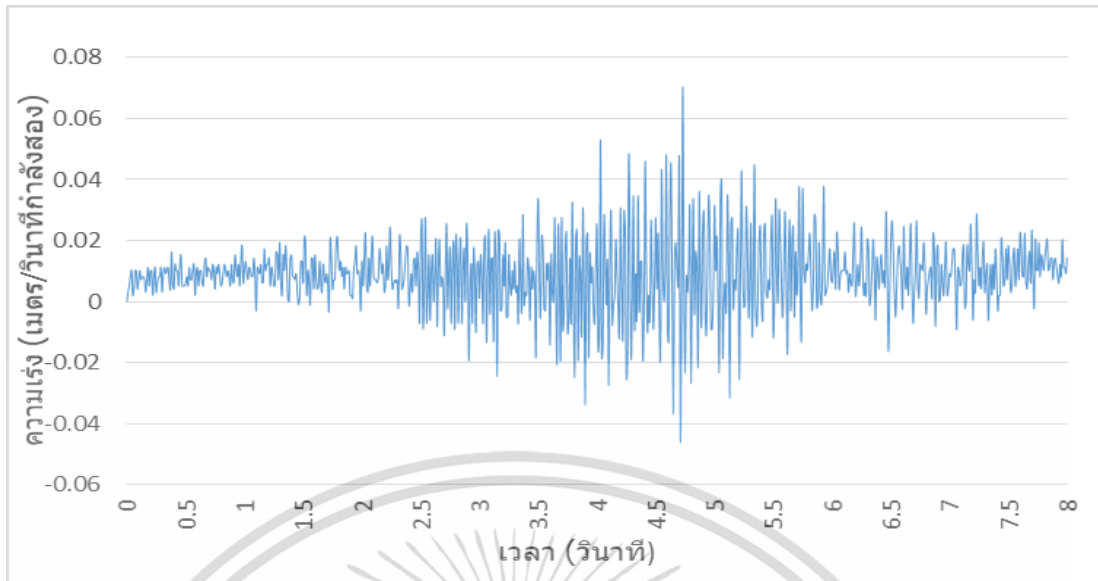
ใกล้รางรถไฟ บริเวณตรงข้ามตึกภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ใกล้สถานีพระจอมเกล้า



รูปที่ 4-3 ภาพแสดงสถานีทดสอบที่ 1 sta.001 บริเวณตรงข้ามตึกภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ใกล้สถานีพระจอมเกล้า ทำการวัดโดยการติดตั้งหมุดในดินใกล้กับรางรถไฟ ระยะห่าง 4.341 เมตร

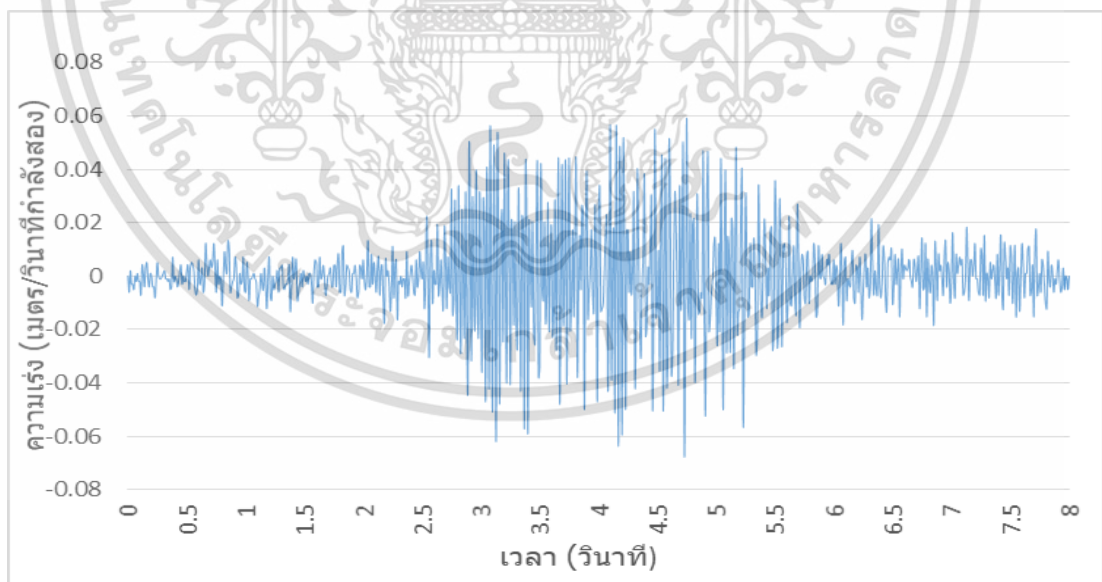
รูปที่ 4-3 แสดงถึงบริเวณสถานีทดสอบที่ 001 โดยทางผู้วิจัยได้เข้าพื้นที่ไปยังบริเวณ ริมรางรถไฟสถานีพระจอมเกล้า ซึ่งอยู่ใกล้กับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง จากภาพได้ทำการตอกหมุดที่ติดหัววัดความเร่งลงดิน และทำการวัดค่าการสั่นสะเทือนเมื่อรถไฟวิ่งผ่าน โดยหัววัดอยู่ห่างจากรางรถไฟเป็นระยะทาง 4.341 เมตร โดยขณะที่ทำการวัดค่า รถไฟที่เคลื่อนที่ผ่านเป็นรถไฟโดยสารที่กำลังเคลื่อนตัวออกจากสถานีพระจอมเกล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-4 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่1 sta.001 (แกนX)ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนX (ตั้งฉากกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.001

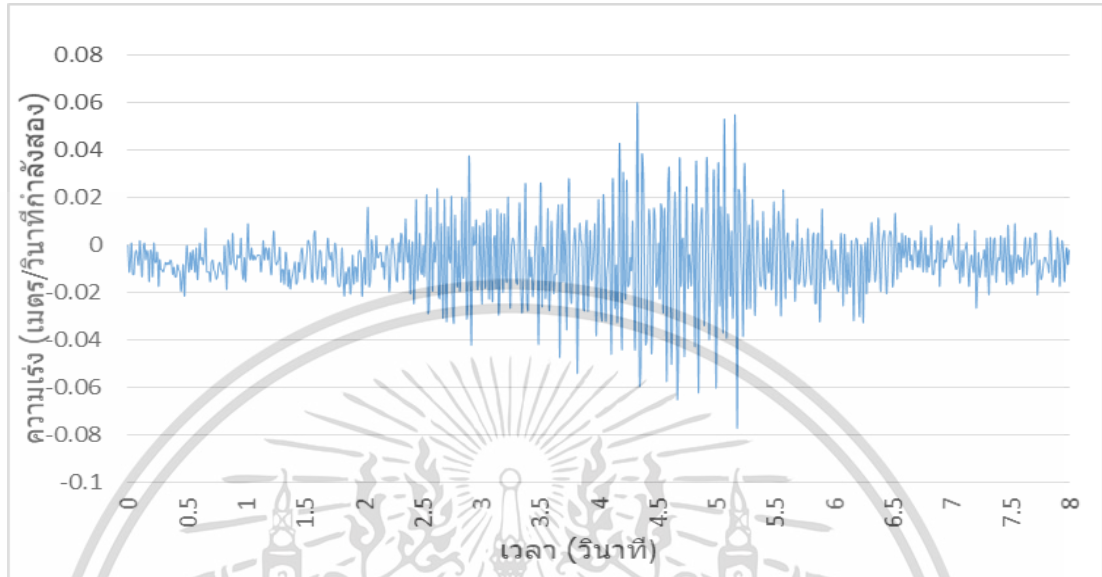
จากรูปที่ 4-4 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งในแกนแนว X ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่1(sta.001)มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือระยะเวลา (วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่หัววัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4-5 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่1 sta.001 (แกนY)ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนY (ขนานกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4-5 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งในแกนแนว Y ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่1(sta.001)มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือระยะเวลา (วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่หัววัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ

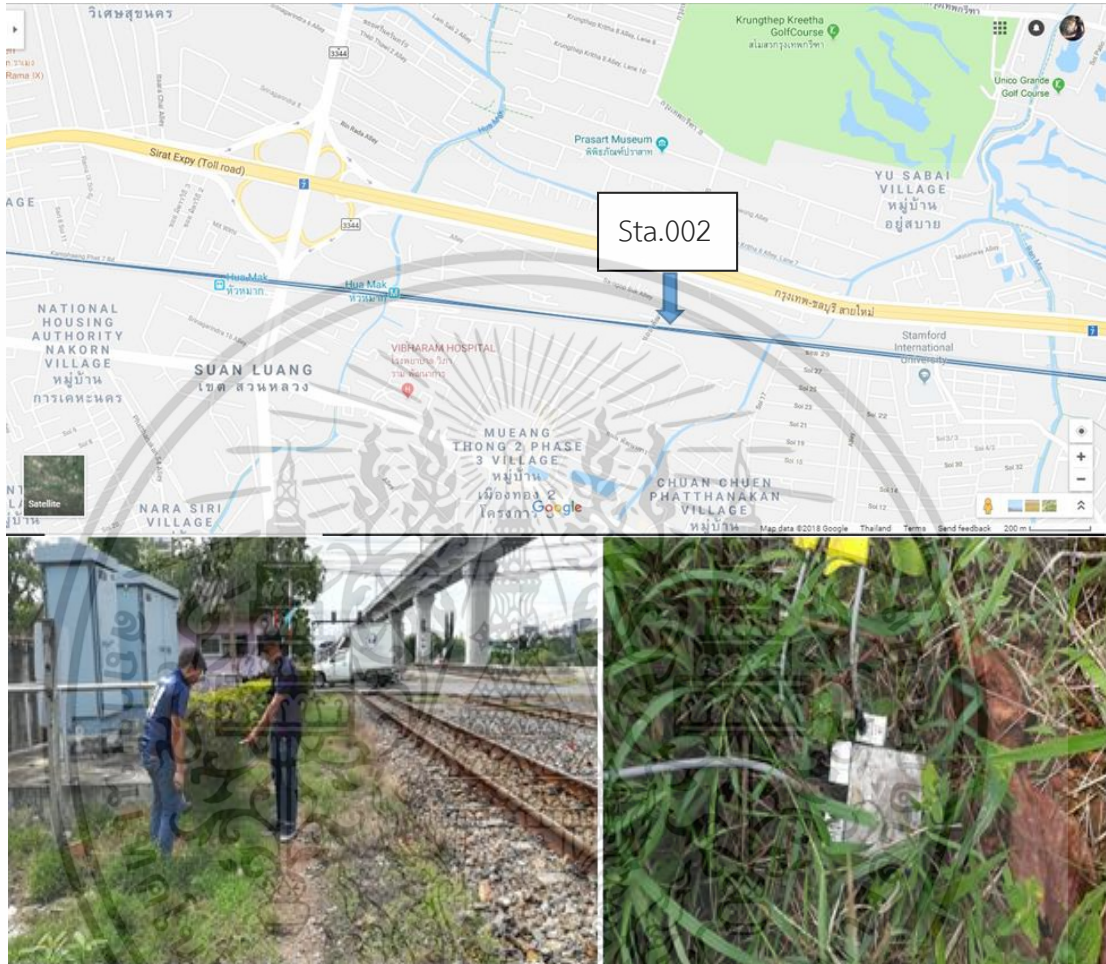


รูปที่ 4-6 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่1 sta.001 (แกนZ) ที่บันทึกได้บนโดเมนของ เวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนZ (ตั้งฉากกับพื้นโลก) ที่ตำแหน่ง STA.001

จากรูปที่ 4-6 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งในแกนแนว Z ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่1(sta.001)มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือระยะเวลา (วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่หัววัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ

#### 4.2.2 ค่าความเร่งที่วัดได้บริเวณจุดวัดที่ 2 sta.002

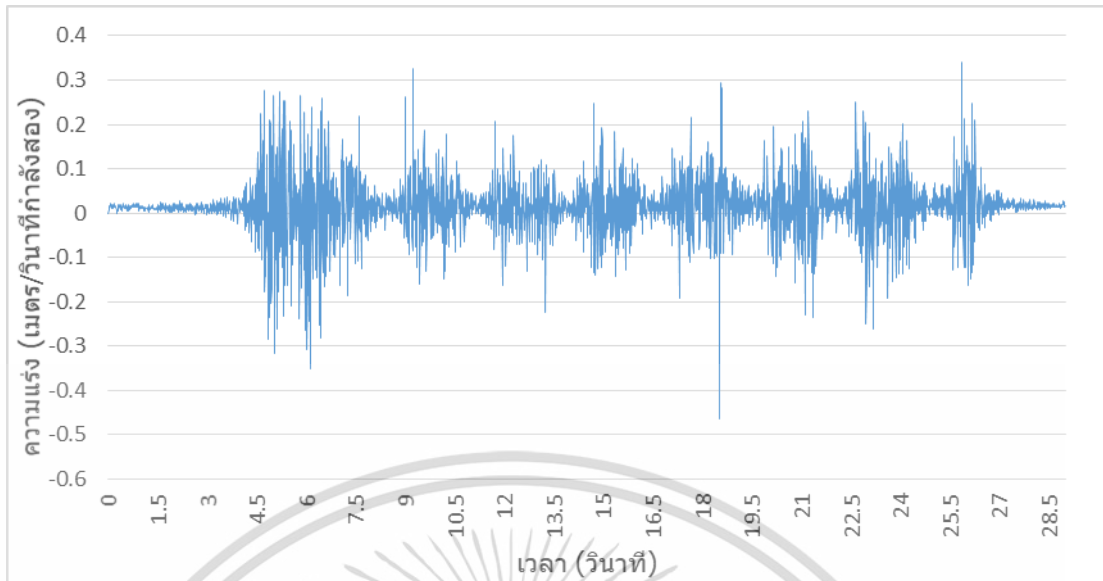
บริเวณใกล้รางรถไฟ ระหว่างสถานีบ้านทับช้าง-สถานีหัวหมาก



รูปที่ 4-7 ภาพแสดงสถานีทดสอบที่ 2 sta.002 บริเวณใกล้รางรถไฟ ระหว่างสถานีบ้านทับช้าง-สถานีหัวหมาก ทำการวัดโดยการติดตั้งหมุดในดินใกล้กับรางรถไฟ ระยะห่าง 3.141 เมตร

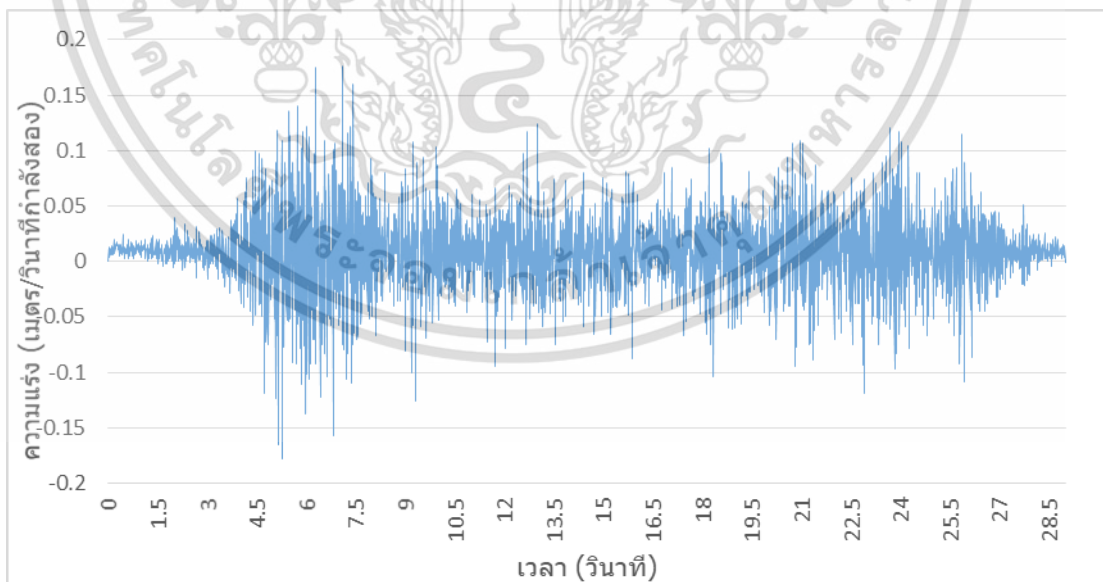
รูปที่ 4-7 แสดงถึงบริเวณสถานีทดสอบที่ 002 โดยทางทีมวิจัยได้เข้าพื้นที่ไปยังบริเวณ ริมรางรถไฟระหว่างสถานีบ้านทับช้าง-สถานีหัวหมาก จากภาพ ได้ทำการตอกหมุดที่มีหัววัดความเร่งลงดิน และทำการวัดค่าการสั่นสะเทือนเมื่อรถไฟวิ่งผ่าน โดยหัววัดความเร่งอยู่ห่างจากรางรถไฟเป็นระยะทาง 3.141 เมตร โดยขณะที่ทำการวัดค่า รถไฟที่เคลื่อนผ่านเป็นรถไฟบรรทุกสินค้า ที่มีความเร็วในกาเคลื่อนที่ต่ำ แต่มีน้ำหนักบรรทุกที่สูงกว่ารถไฟโดยสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-8 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่ 2 sta.002 (แกน X) ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกน X (ตั้งฉากกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.002

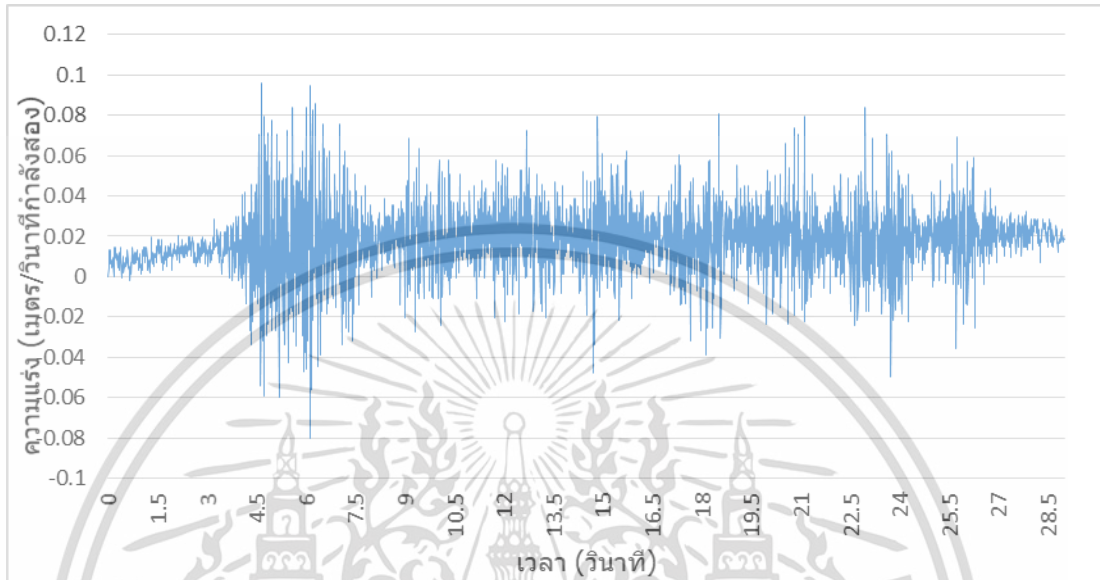
จากรูปที่ 4-8 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งในแกนแนว X ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่ 2 (sta.002) มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือระยะเวลา (วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่หัววัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4-9 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่ 2 sta.002 (แกน Y) ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกน Y (ขนานกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4-9 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งในแกนแนว Y ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่2(sta.002)มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือระยะเวลา (วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่หัววัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4-10 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่2 sta.002 (แกนZ)ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนZ(ตั้งฉากกับพื้นโลก) ที่ตำแหน่ง STA.002

จากรูปที่ 4-10 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งในแกนแนวZ ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่2(sta.002)มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือระยะเวลา(วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่หัววัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ

### 4.2.3 ค่าความเร่งที่วัดได้บริเวณจุดวัดที่ 3 sta.003

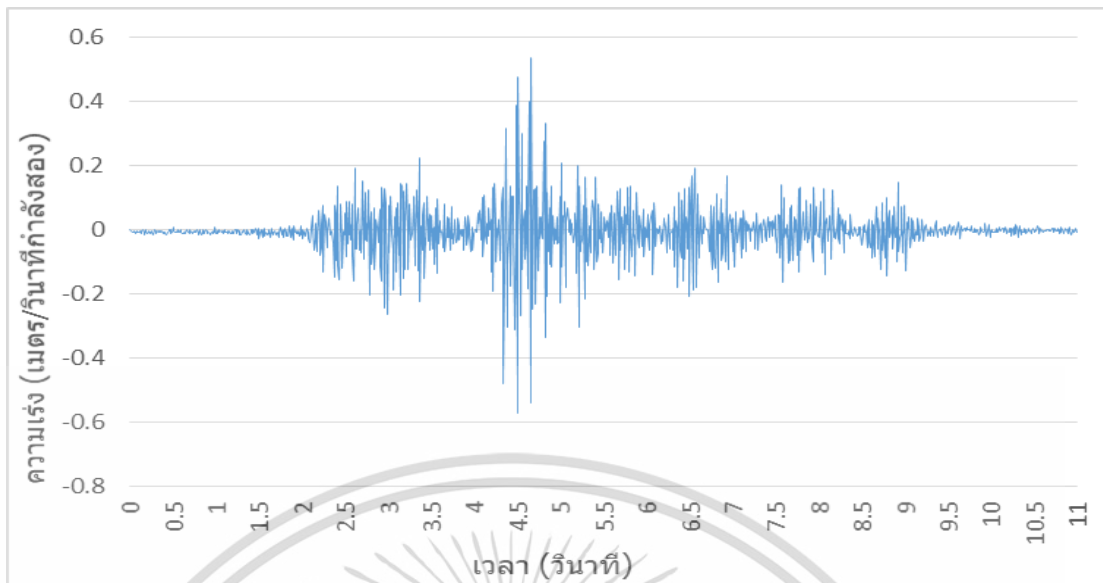
รางรถไฟหน้าหอพัก RNP ระหว่างสถานีพระจอมเกล้า-สถานีบ้านทับช้าง



รูปที่ 4-11 ภาพแสดงสถานีทดสอบที่ 3 sta.003 รางรถไฟหน้าหอพัก RNP ระหว่างสถานีพระจอมเกล้า-สถานีบ้านทับช้าง ทำการวัดโดยการติดตั้งหมุดในดินใกล้กับรางรถไฟ ระยะห่าง 2.778 เมตร

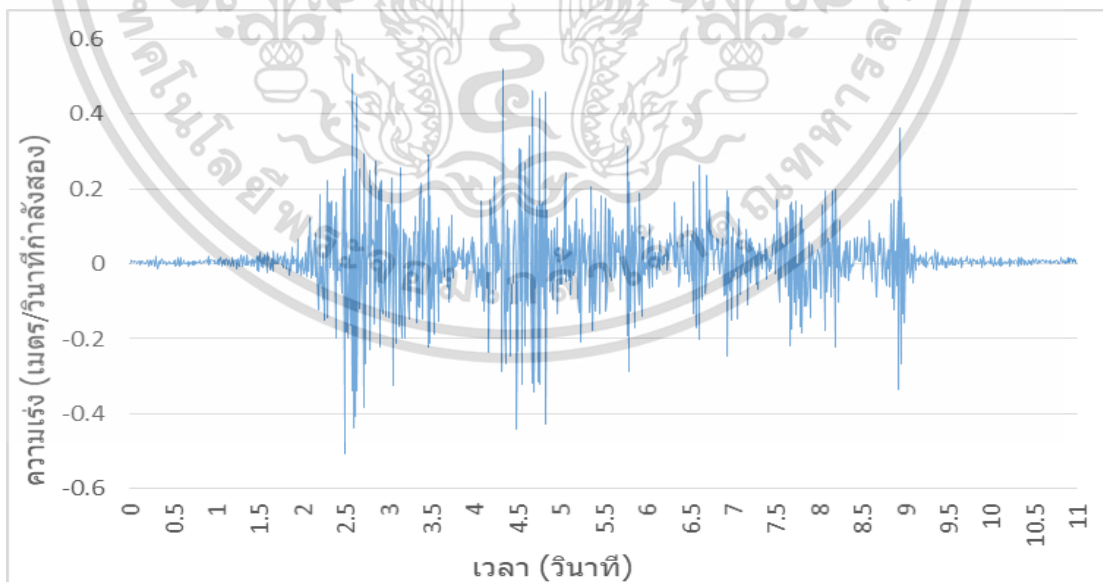
รูปที่ 4-11 แสดงถึงบริเวณสถานีทดสอบที่ 003 โดยทางทีมวิจัยได้เข้าพื้นที่ไปยังบริเวณ รางรถไฟหน้าหอพัก RNP ระหว่างสถานีพระจอมเกล้า-สถานีบ้านทับช้าง จากภาพ ได้ทำการตอกหมุดที่มีหัววัดความเร่งลงดิน และทำการวัดค่าการสั่นสะเทือนเมื่อรถไฟวิ่งผ่าน โดยหัววัดความเร่งอยู่ห่างจากรางรถไฟเป็นระยะทาง 2.778 เมตร โดยขณะที่ทำการวัดค่า รถไฟที่เคลื่อนที่ผ่านเป็นรถไฟโดยสารที่กำลังลดความเร็วลงเล็กน้อยเพื่อเคลื่อนที่เข้าสู่ชานชลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-12 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่3 sta.003 (แกนX) ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนX (ตั้งฉากกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.003

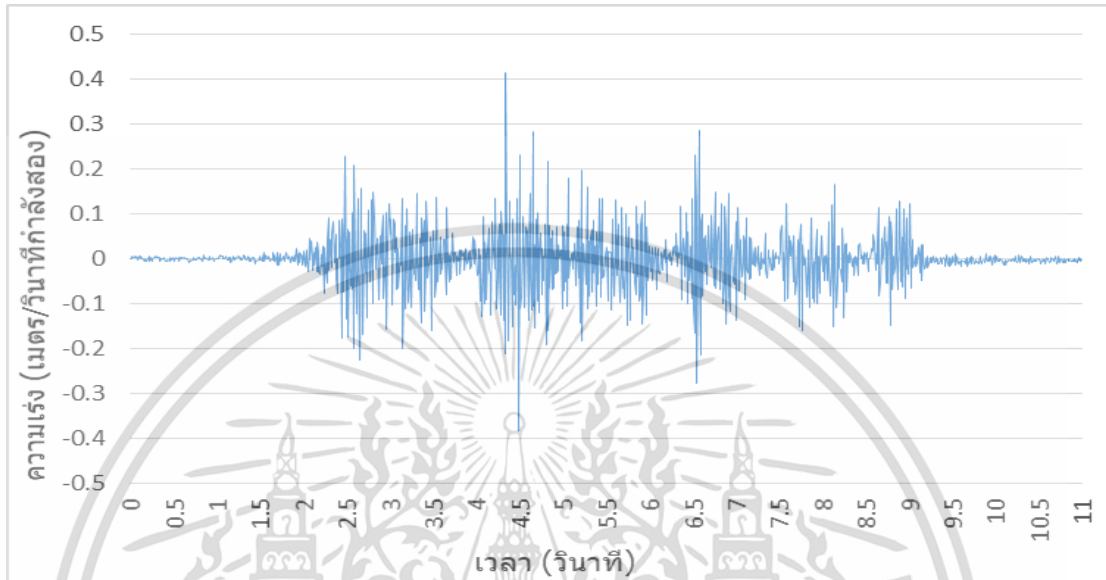
จากรูปที่ 4-12 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากห้วงวัดความเร่งในแกนแนวX ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่3(sta.003)มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือระยะเวลา(วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่ห้วงวัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4-13 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่3 sta.003 (แกนY)ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนY (ขนานกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4-13 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งในแกนแนว Y ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่ 3 (sta.003) มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือระยะเวลา (วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่หัววัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ

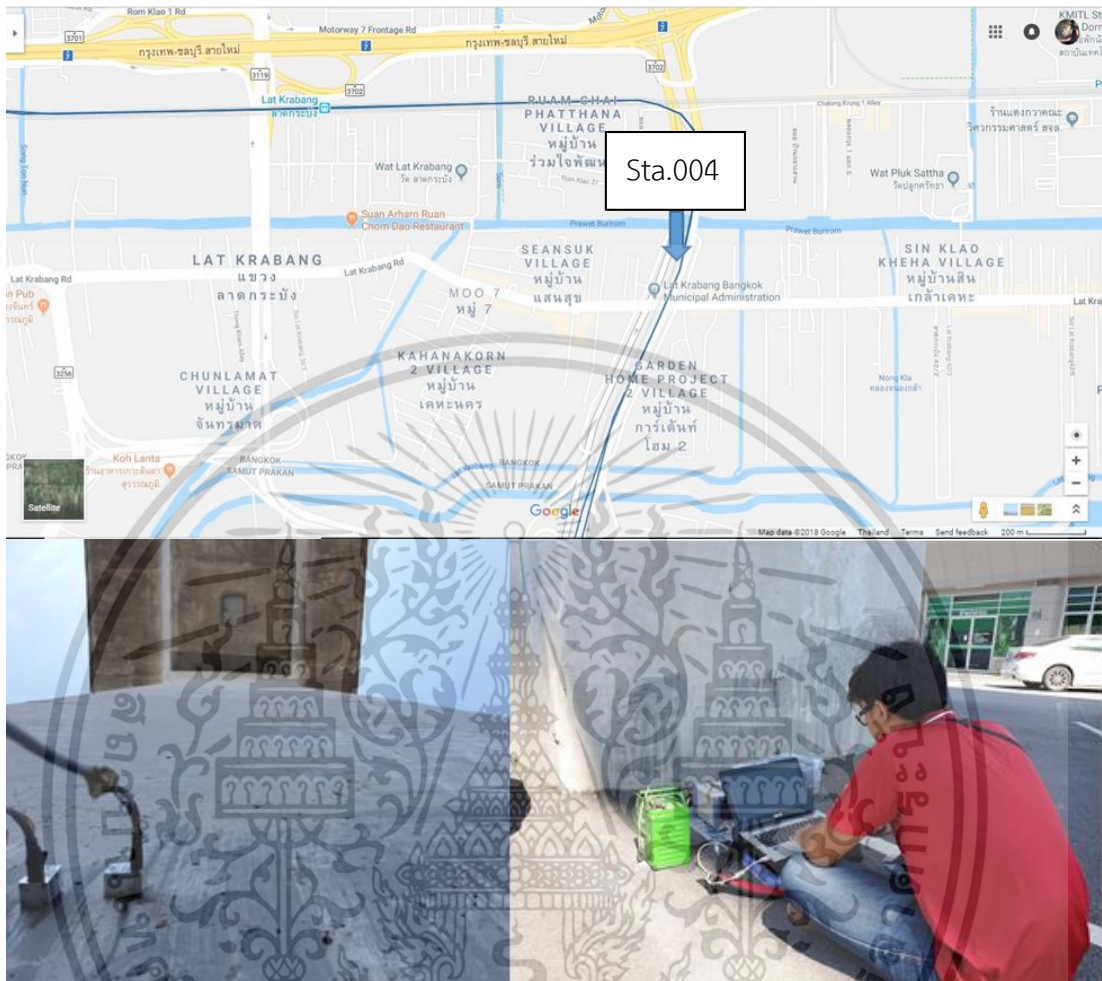


รูปที่ 4-14 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่ 3 (จุดที่ 1) sta.003 (แกน Z) ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกน Z (ตั้งฉากกับพื้นโลก) ที่ตำแหน่ง STA.003

จากรูปที่ 4-14 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งในแกนแนว Z ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่ 3 (sta.003) มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือระยะเวลา (วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่หัววัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ

#### 4.2.4 ค่าความเร่งที่วัดได้บริเวณจุดวัดที่ 4 sta.004

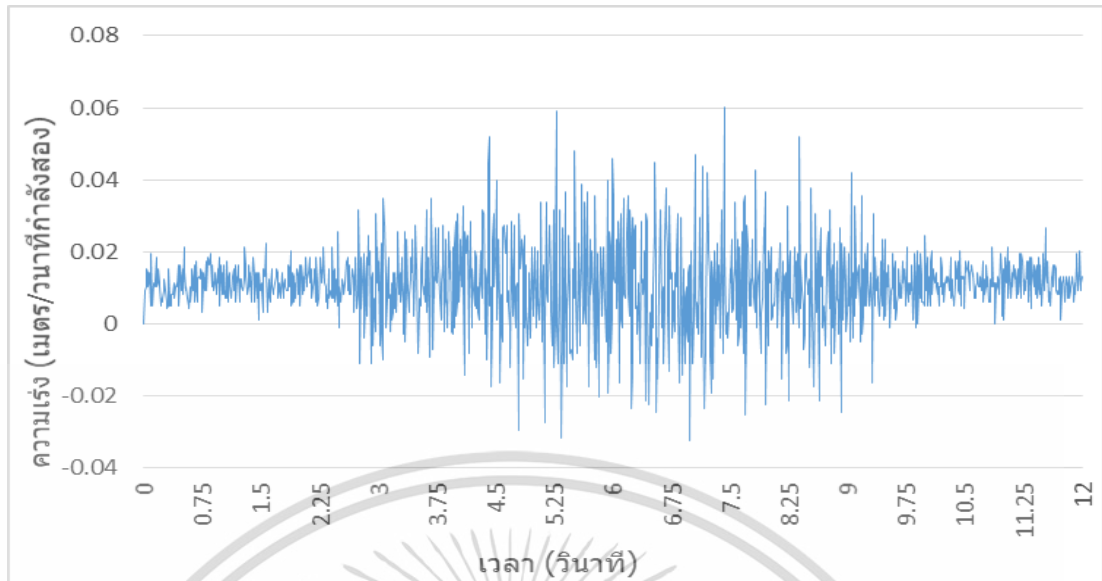
Airport Rail Link สำนักงานเขตลาดกระบัง



รูปที่ 4-15 ภาพแสดงสถานีทดสอบที่ 4 sta.004 บริเวณสำนักงานเขตลาดกระบัง ทำการวัดความเร่งที่ฐานเสาของรางรถไฟแอร์พอร์ตลิงค์

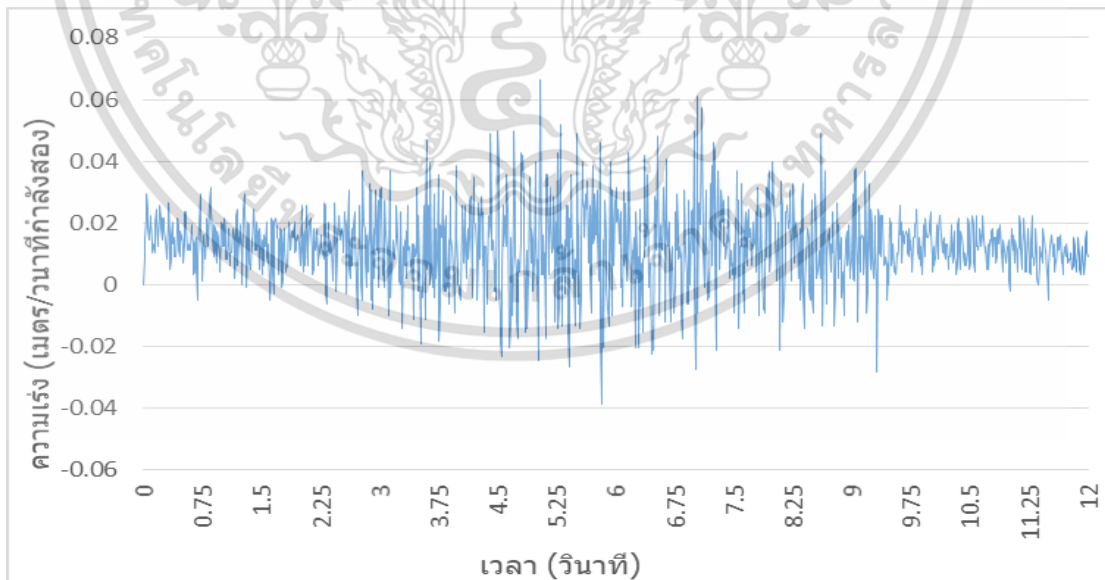
รูปที่ 4-15 แสดงถึงบริเวณสถานีทดสอบที่ 004 โดยทางทีมวิจัยได้เข้าพื้นที่ไปยังบริเวณ รางรถไฟบริเวณสำนักงานเขตลาดกระบัง ทำการวัดความเร่งที่ฐานเสาของรางรถไฟแอร์พอร์ตลิงค์ จากภาพ ได้ทำการติดตั้งหัววัดความเร่งเข้ากับฐานเสาของรางรถไฟแอร์พอร์ตลิงค์โดยตรง โดยขณะที่ทำการวัดค่า รถไฟที่เคลื่อนที่ผ่านเป็นรถไฟโดยสารที่กำลังลดความเร็วลงเล็กน้อยเพื่อเคลื่อนที่ผ่านเส้นทางโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-16 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่4 sta.004 (แกนX) ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนX (ตั้งฉากกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.004

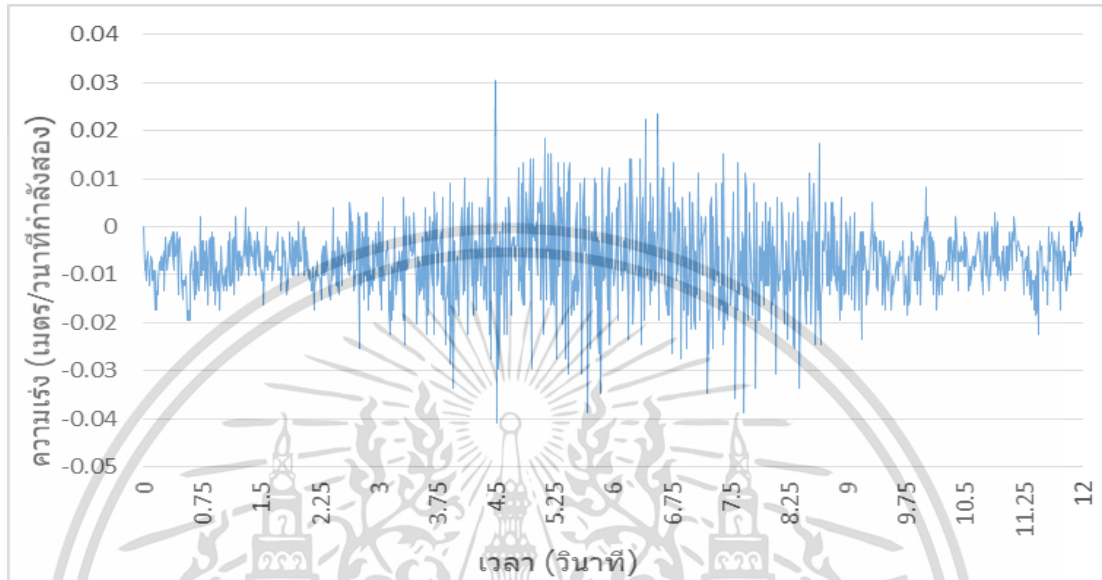
จากรูปที่ 4-16 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งในแกนแนวX ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่4(sta.004)มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือระยะเวลา(วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่หัววัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4-17 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่4 sta.004 (แกนY) ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนY (ขนานกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4-17 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งในแกนแนว Y ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่ 4 (sta.004) มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือระยะเวลา (วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่หัววัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ

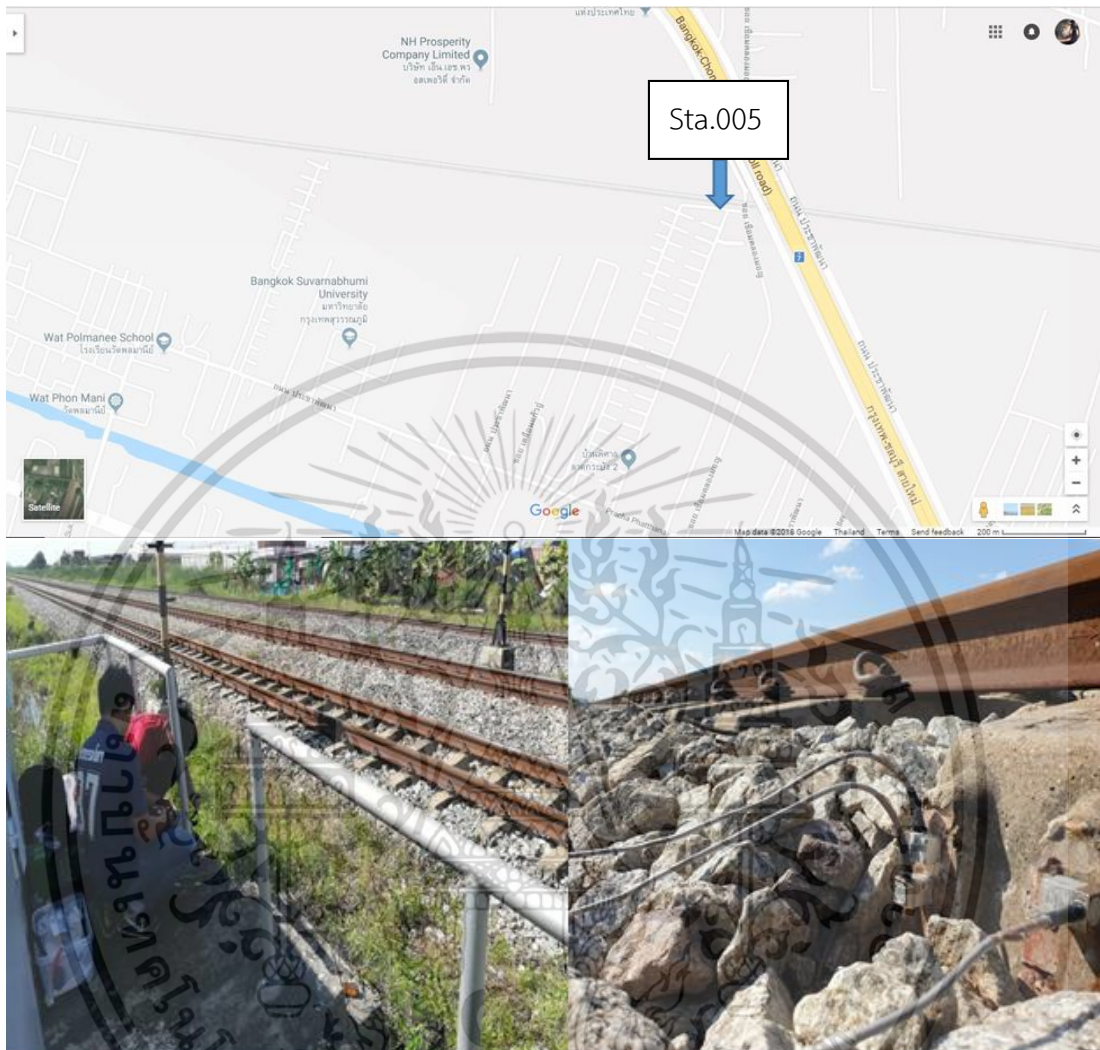


รูปที่ 4-18 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่ 4 sta.004 (แกน Z) ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกน Z (ตั้งฉากกับพื้นโลก) ที่ตำแหน่ง STA.004

จากรูปที่ 4-18 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งในแกนแนว Z ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่ 4 (sta.004) มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือระยะเวลา (วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่หัววัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ

## 4.2.5 ค่าความเร่งที่วัดได้บริเวณจุดวัดที่ 5 sta.005

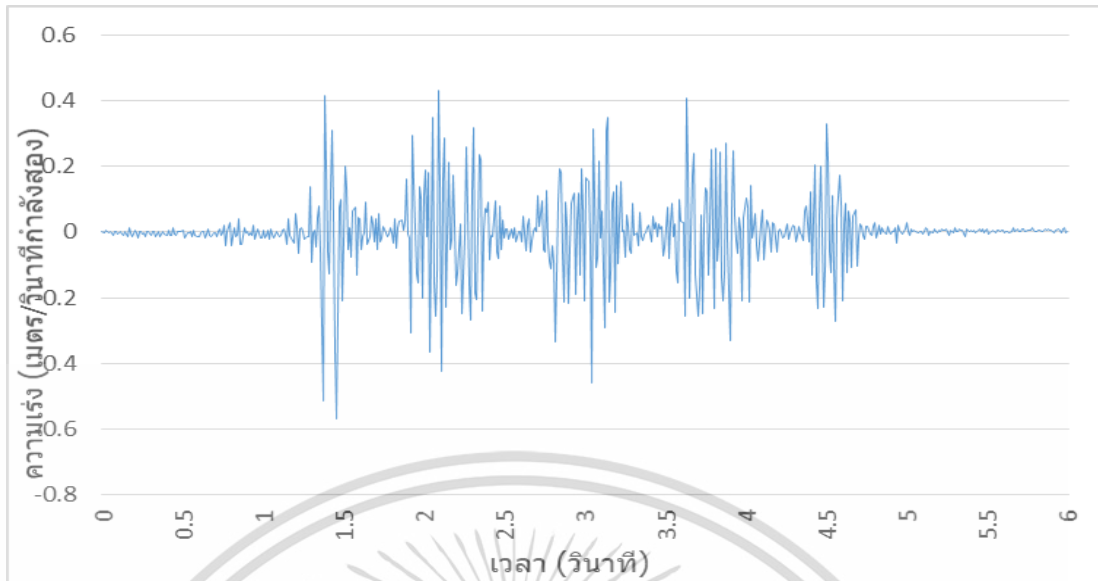
บริเวณรางรถไฟระหว่างกลางสถานีคลองหลวงเฟ่ง-สถานีหัวตะเข้



รูปที่ 4-19 ภาพแสดงสถานีทดสอบที่ 5 sta.005 บริเวณรางรถไฟระหว่างกลางสถานีคลองหลวงเฟ่ง-สถานีหัวตะเข้ ทำการวัดความเร่งที่หมอนรางรถไฟโดยตรง

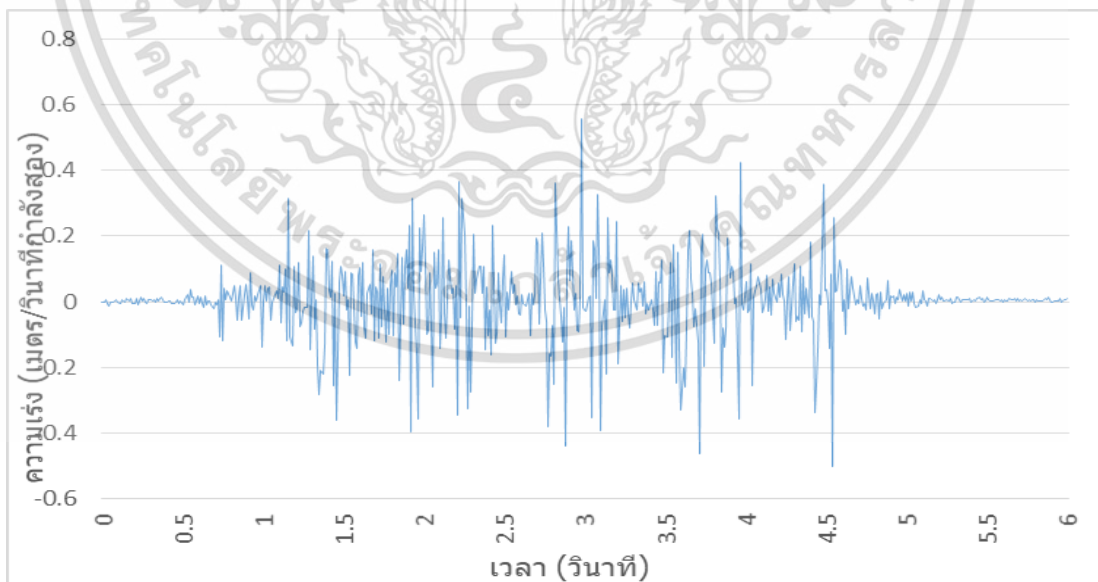
รูปที่ 4-22 แสดงถึงบริเวณสถานีทดสอบที่ 005 โดยทางทีมวิจัยได้เข้าพื้นที่ไปยังบริเวณ รางรถไฟระหว่างกลางสถานีคลองหลวงเฟ่ง-สถานีหัวตะเข้ ทำการวัดความเร่งที่หมอนรางรถไฟโดยตรง โดยขณะที่ทำการวัดค่า รถไฟที่เคลื่อนที่ผ่านเป็นรถไฟโดยสารที่กำลังทำความเร็วสูงเต็มที่ เนื่องจากอยู่ในช่วงกลางเส้นทางระหว่างสองขานชลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-20 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่5 sta.005 (แกนX) ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนX (ตั้งฉากกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.005

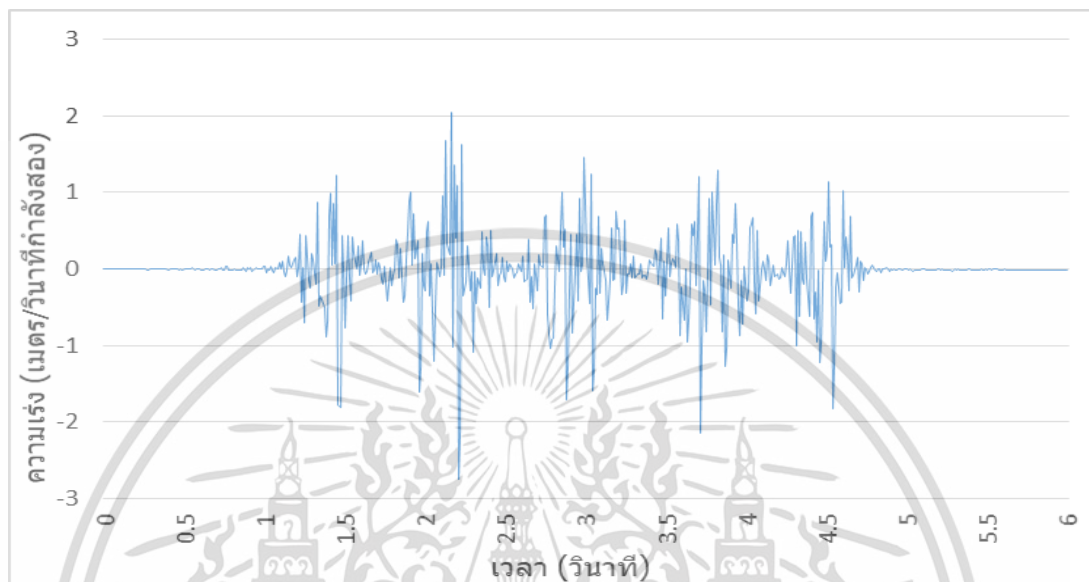
จากรูปที่ 4-20 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งในแกนแนวX ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่5(sta.005)มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือระยะเวลา(วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่หัววัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4-21 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่5 sta.005 (แกนY) ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนY (ขนานกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4-21 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งในแกนแนว Y ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่ 5 (sta.005) มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือ ระยะเวลา (วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่หัววัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ

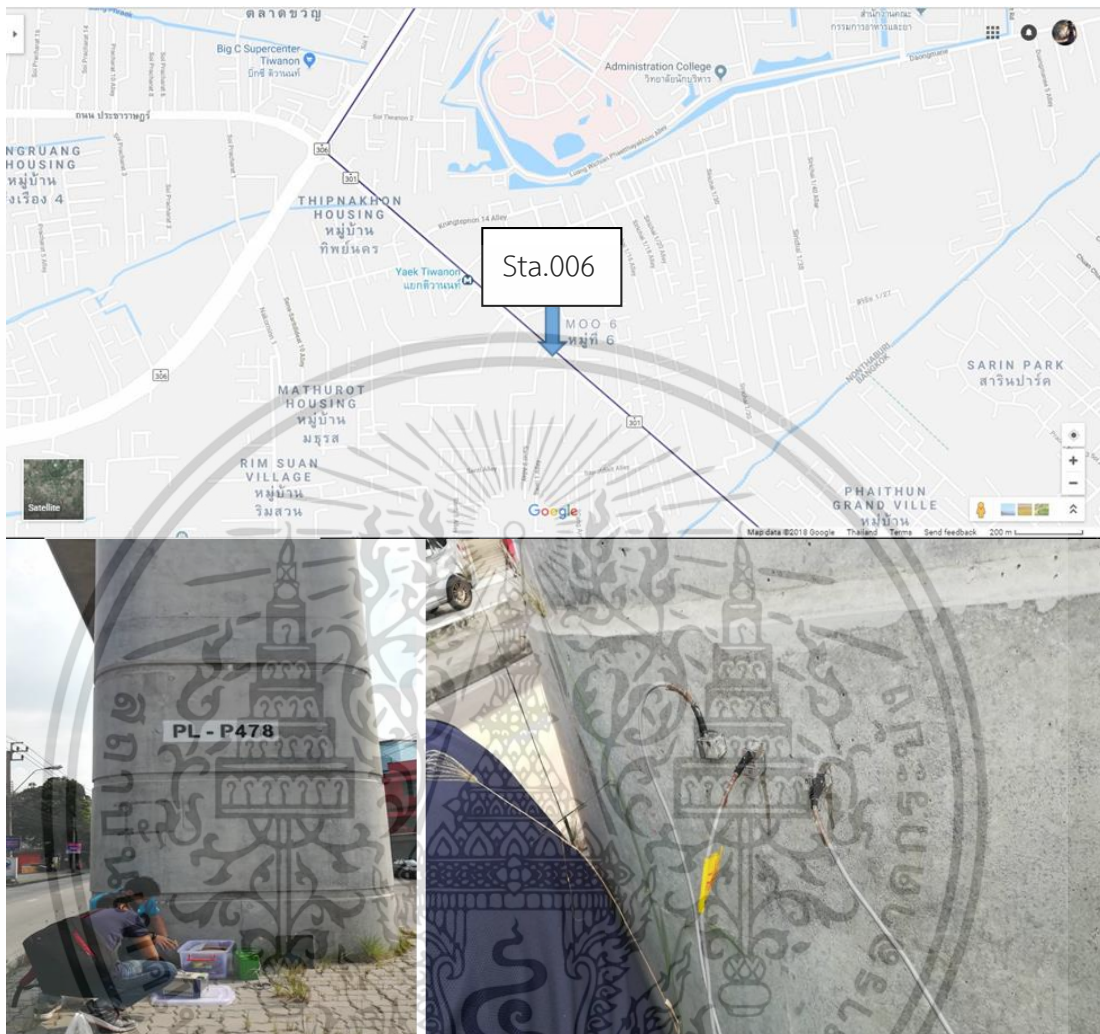


รูปที่ 4-22 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่ 5 sta.005 (แกน Z) ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกน Z (ตั้งฉากกับพื้นโลก) ที่ตำแหน่ง STA.005

จากรูปที่ 4-22 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งในแกนแนว Z ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่ 5 (sta.005) มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือ ระยะเวลา (วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่หัววัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ

## 4.2.6 ค่าความเร่งที่วัดได้บริเวณจุดวัดที่ 6 sta.006

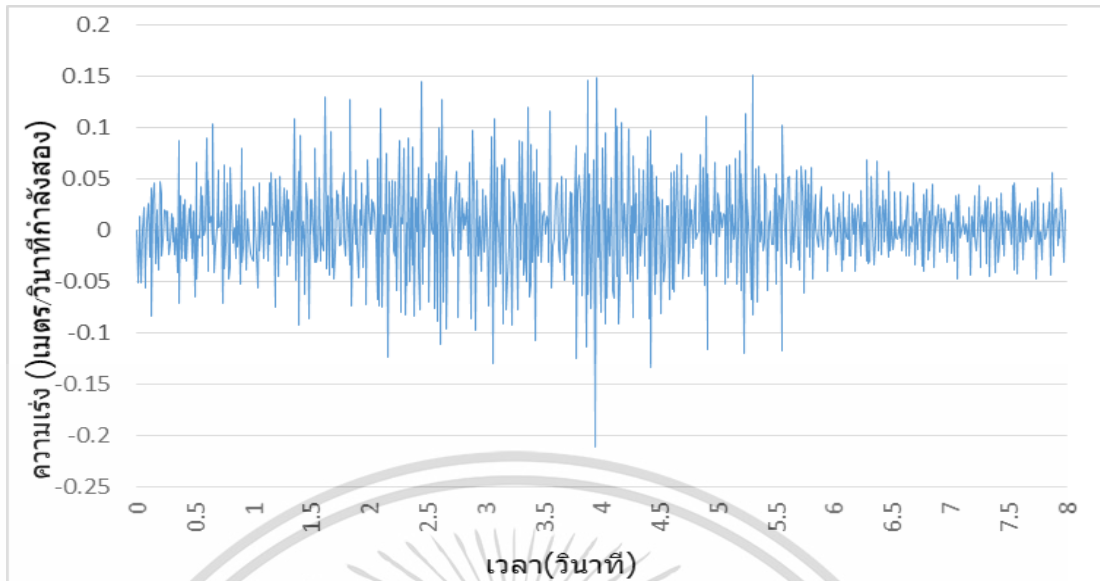
ระหว่างกลางสถานีวงศ์สว่าง-สถานีแยกติวานนท์



รูปที่ 4-23 ภาพแสดงสถานีทดสอบที่ 6 sta.006 บริเวณระหว่างกลางสถานีวงศ์สว่าง-สถานีแยกติวานนท์ ทำการวัดความเร่งที่ฐานเสารถไฟ

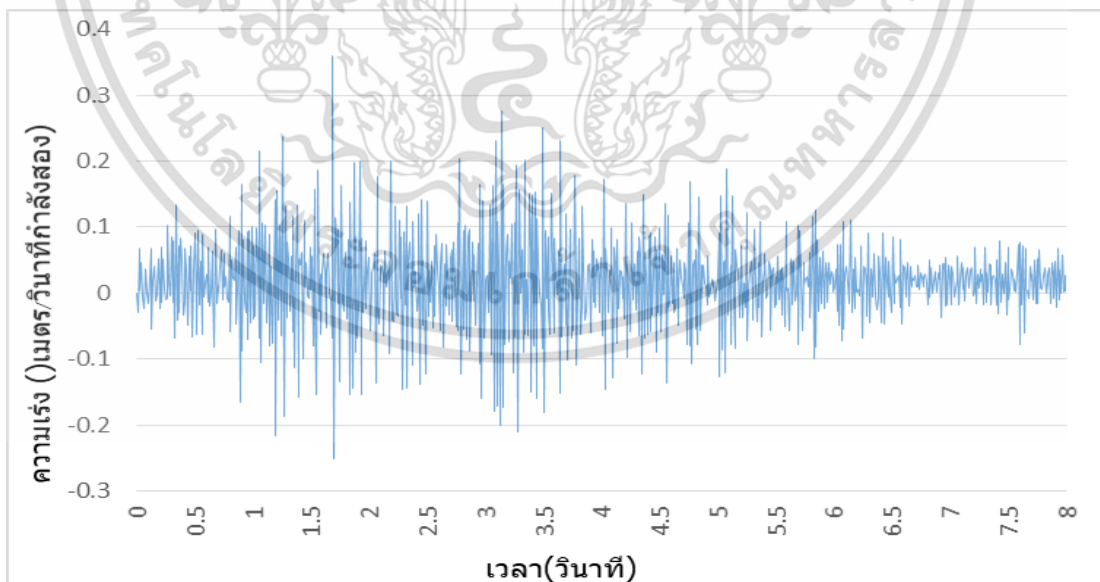
รูปที่ 4-23 แสดงถึงบริเวณสถานีทดสอบที่ 006 โดยทางทีมวิจัยได้เข้าพื้นที่ไปยังระหว่างกลางสถานีวงศ์สว่าง-สถานีแยกติวานนท์ จากภาพ ได้ทำการเข้าติดตั้งหัววัดความเร่งที่บริเวณฐานเสาของรถไฟฟ้ามหานคร และทำการวัดค่าการสั่นสะเทือนเมื่อรถไฟวิ่งผ่าน โดยขณะที่ทำการวัดค่า รถไฟที่เคลื่อนที่ผ่านเป็นรถไฟโดยสารที่กำลังทำความเร็วเพิ่มขึ้น เนื่องจากอยู่ในช่วงกลางเส้นทางระหว่างสองสถานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-24 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่ 6 sta.006 (แกน X) ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกน X (ตั้งฉากกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.006

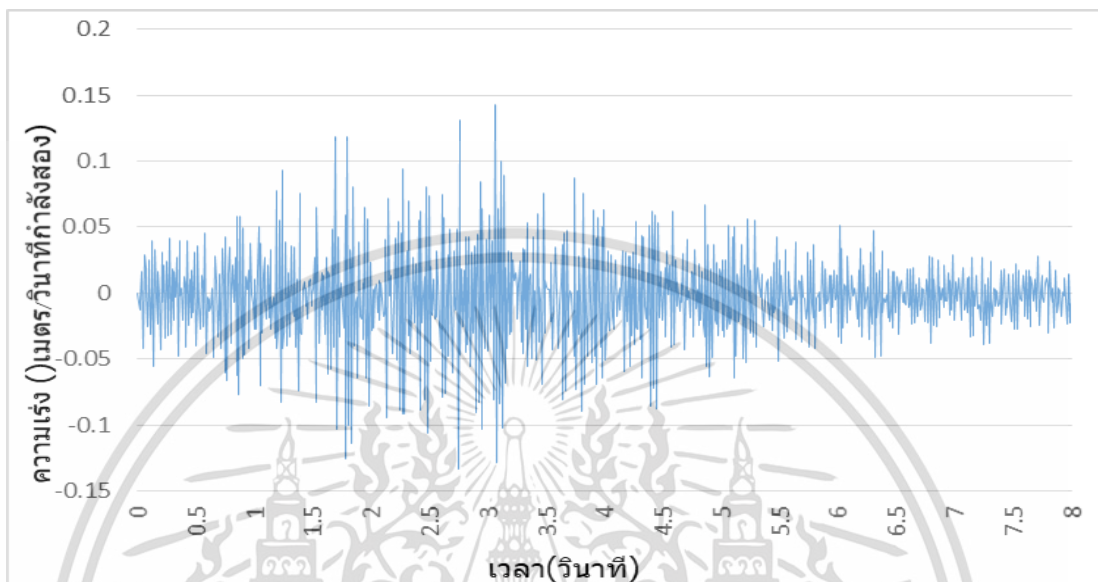
จากรูปที่ 4-24 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งในแกนแนว X ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่ 6 (sta.006) มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือระยะเวลา (วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่หัววัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4-25 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่ 6 sta.006 (แกน Y) ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกน Y (ขนานกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4-25 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งในแกนแนว Y ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่ 6 (sta.006) มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือระยะเวลา (วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่หัววัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ

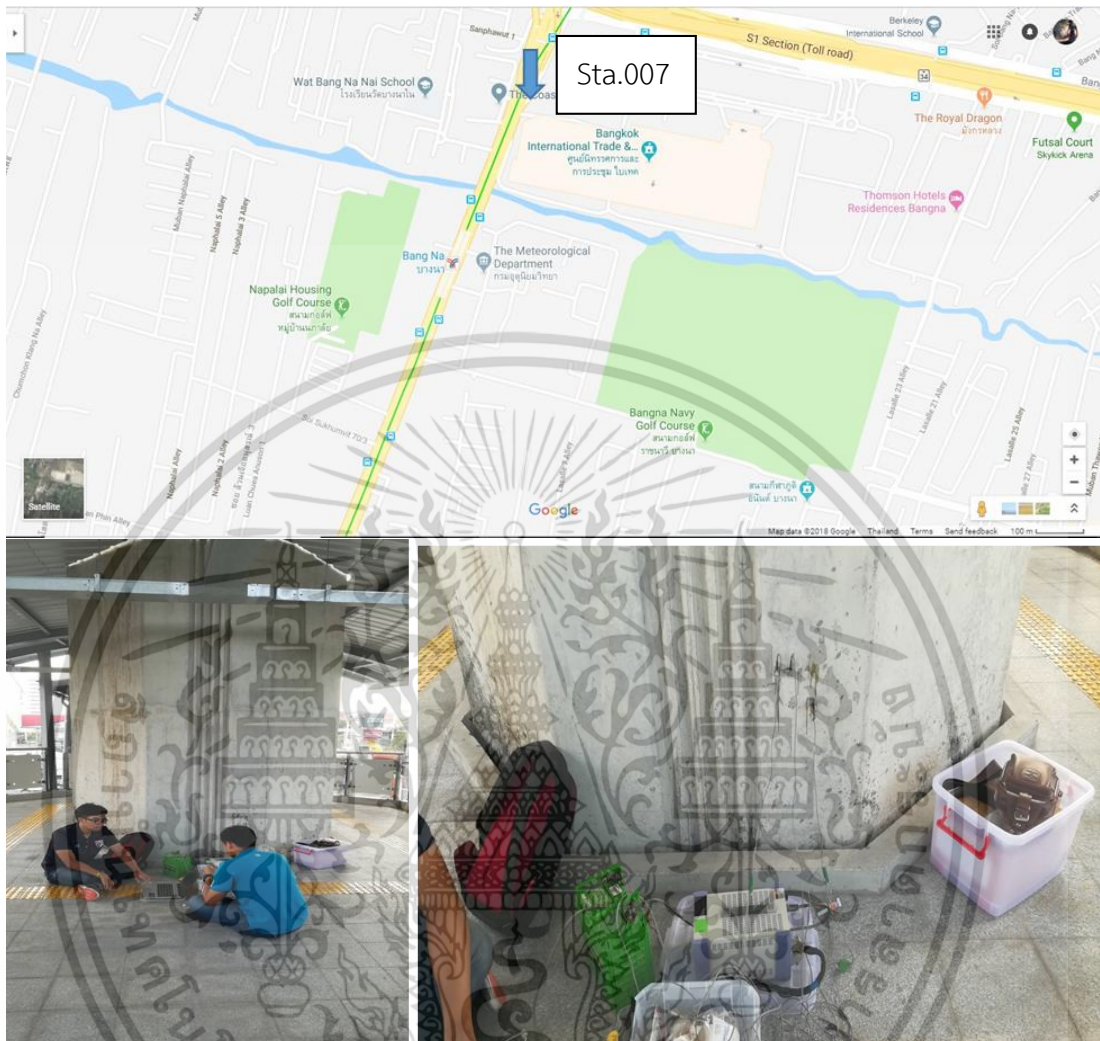


รูปที่ 4-26 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่ 6 sta.006 (แกน Z) ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกน Z (ตั้งฉากกับพื้นโลก) ที่ตำแหน่ง STA.006

จากรูปที่ 4-26 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งในแกนแนว Z ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่ 6 (sta.006) มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือระยะเวลา (วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่หัววัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ

## 4.2.7 ค่าความเร่งที่วัดได้บริเวณจุดวัดที่ 7 sta.007

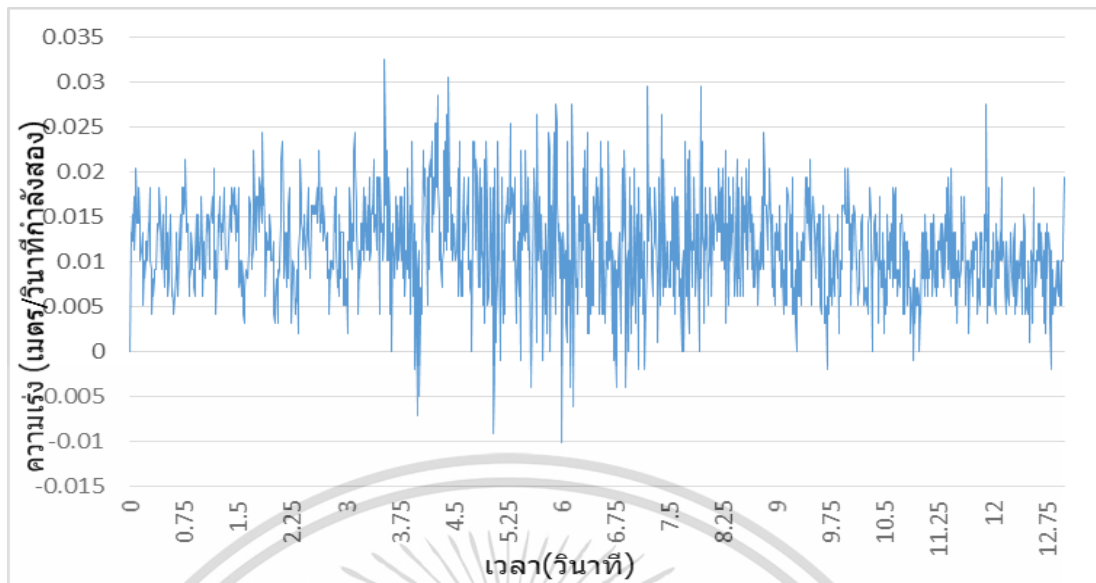
ระหว่างกลางสถานีบางนา-สถานีอุดมสุข



รูปที่ 4-27 ภาพแสดงสถานีทดสอบที่ 7 sta.007 บริเวณระหว่างกลางสถานีบางนา-สถานีอุดมสุข ทำการวัดความเร่งที่ฐานเสารถไฟฟ้า

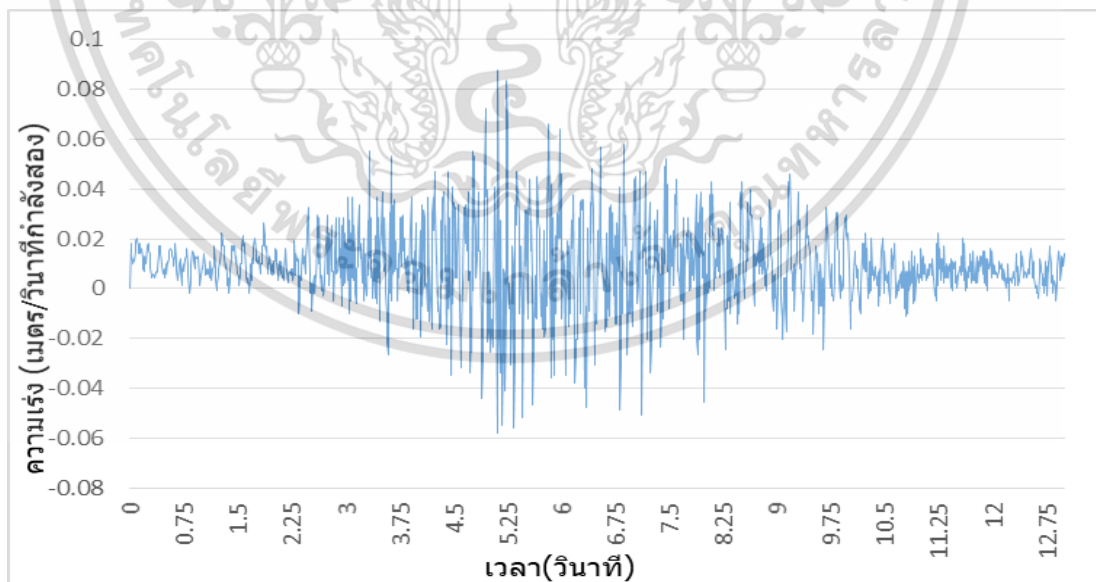
รูปที่ 4-27 แสดงถึงบริเวณสถานีทดสอบที่ 007 โดยทางทีมวิจัยได้เข้าพื้นที่ไปบริเวณระหว่างกลางสถานีบางนา-สถานีอุดมสุข จากภาพ ทำการวัดความเร่งที่เสารถไฟฟ้าบีทีเอส และทำการวัดค่าการสั่นสะเทือนเมื่อรถไฟวิ่งผ่าน โดยขณะที่ทำการวัดค่า รถไฟที่เคลื่อนที่ผ่านเป็นรถไฟโดยสารที่กำลังทำความเร็วเพิ่มขึ้น เนื่องจากกำลังเคลื่อนที่ออกจากสถานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-28 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่7 sta.007 (แกนX) ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนX (ตั้งฉากกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.007

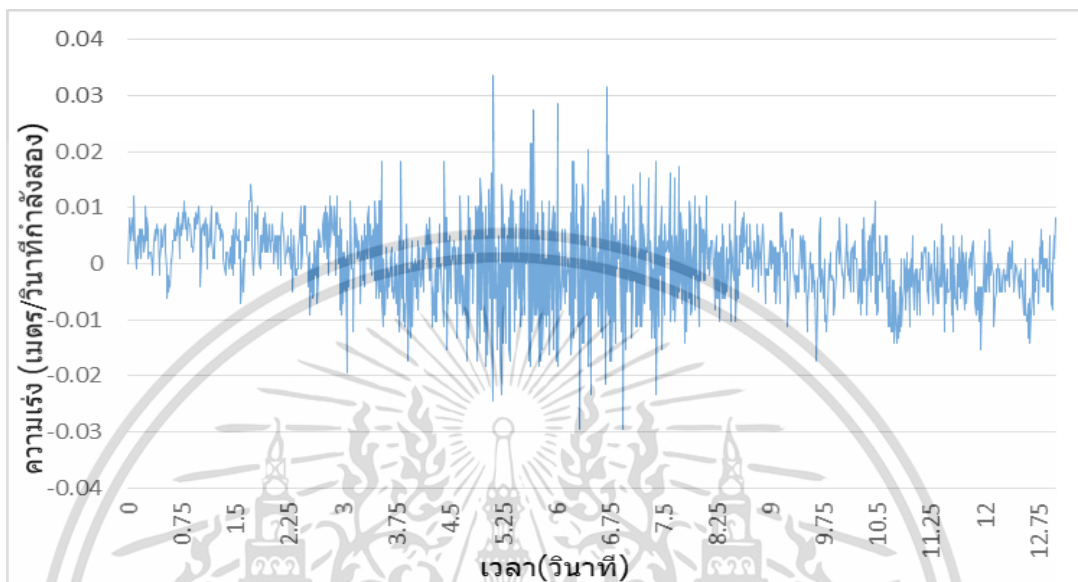
จากรูปที่ 4-28 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งในแกนแนวX ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่7(sta.007)มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือระยะเวลา(วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่หัววัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4-29 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่7 sta.007 (แกนY) ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกนY (ขนานกับขบวนรถไฟ) ที่ตำแหน่ง STA.007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4-29 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งในแกนแนว Y ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่ 7 (sta.007) มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือระยะเวลา(วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่หัววัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4-30 ภาพแสดงกราฟที่บันทึกได้จากสถานีทดสอบที่ 7 sta.007 (แกน Z) ที่บันทึกได้บนโดเมนของเวลา ในขณะที่แกนตั้งคือความเร่งของพื้นดินในแนวราบ ในแกน Z (ตั้งฉากกับพื้นโลก) ที่ตำแหน่ง STA.007

จากรูปที่ 4-30 เป็นภาพกราฟที่เกิดจากการนำค่าความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่งในแกนแนว Z ที่สามารถวัดค่าได้จากสถานีทดสอบที่ 4 (sta.004) มาพล็อตกราฟ โดยในกราฟในแกน x คือระยะเวลา(วินาที) และ ในแกน y คือค่าความเร่งที่หัววัด วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ

#### 4.3 ค่าความเร่งที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองทางพลศาสตร์

จากแบบจำลองทางพลศาสตร์ในหัวข้อที่ 3.5 จะทำให้เราสามารถทราบค่าการสั่นสะเทือนได้จากการคำนวณ โดยอาศัยค่าจำเพาะของวัสดุต่างๆของตัวโครงสร้างรางรถไฟ รวมไปถึงค่าจำเพาะของตัวโมเดลรถไฟที่วิ่งผ่าน โดยจะทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณคู่ไปกับค่าที่บันทึกได้จากภาคสนาม โดยยึดเอาค่าจาก Sta.05 ซึ่งมีความชัดของสัญญาณการสั่นสะเทือนมากที่สุดในบรรดาค่าคลื่นทั้งหมดที่วัดค่ามา

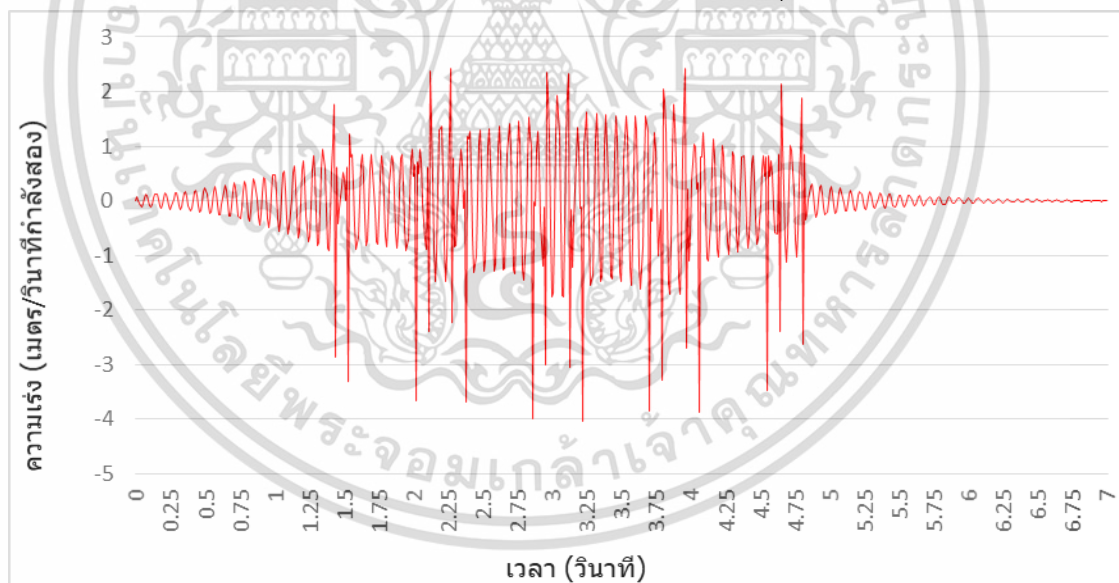
โดย แบบจำลองเชิงพลศาสตร์นี้ จะใช้รถไฟความเร็ว 100 กม/ชม โดยสมมติให้รถไฟขบวนดังกล่าว เป็นรถไฟรุ่น THN ที่ใช้วิ่งในบริเวณพื้นที่ที่ผ่าน สจล. ซึ่งน้ำหนักของรถไฟรุ่นดังกล่าวมีค่าประมาณ 33 ตัน เมื่อนำมาคำนวณเพื่อนหาน้ำหนักที่ลงที่ล้อแต่ละจุดของรถไฟแล้ว จะพบว่า

น้ำหนักกดลงที่แต่ละล้อโดยประมาณ เท่ากับ 4000 กิโลกรัม โดยให้จำนวนขบวนของรถไฟเท่ากับ 4 ตู้โดยสาร ซึ่งมีจำนวนเท่ากับจำนวนจริงที่ทำการวัดค่าจากภาคพื้นสนาม ใน Sta.05

ในส่วนของค่าความแข็งของเส้นทางราง(track stiffness) คือค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำและการตอบสนองของราง ค่าความแข็งของเส้นทางรางจะแตกต่างกันไปในแต่ละตำแหน่งของเส้นทางราง ความแข็งของรางเป็นค่าตัวแปรปฏิสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างรางกับล้อ โดยค่าความแข็งของรางจะแปรเปลี่ยนตามรูปแบบโครงสร้างของรางรถไฟ, ประเภทตัวยึดเหนี่ยวของราง, หน้าตัดของราง, ชนิดของหมอนรองรางรถไฟ ตลอดจนประเภทของดินที่อยู่ใต้ทางราง ค่าที่แตกต่างกันของความแข็งของเส้นทางราง จะส่งผลถึงการเสียรูปและการเคลื่อนตัวของรางเมื่อถูกแรงกระทำ

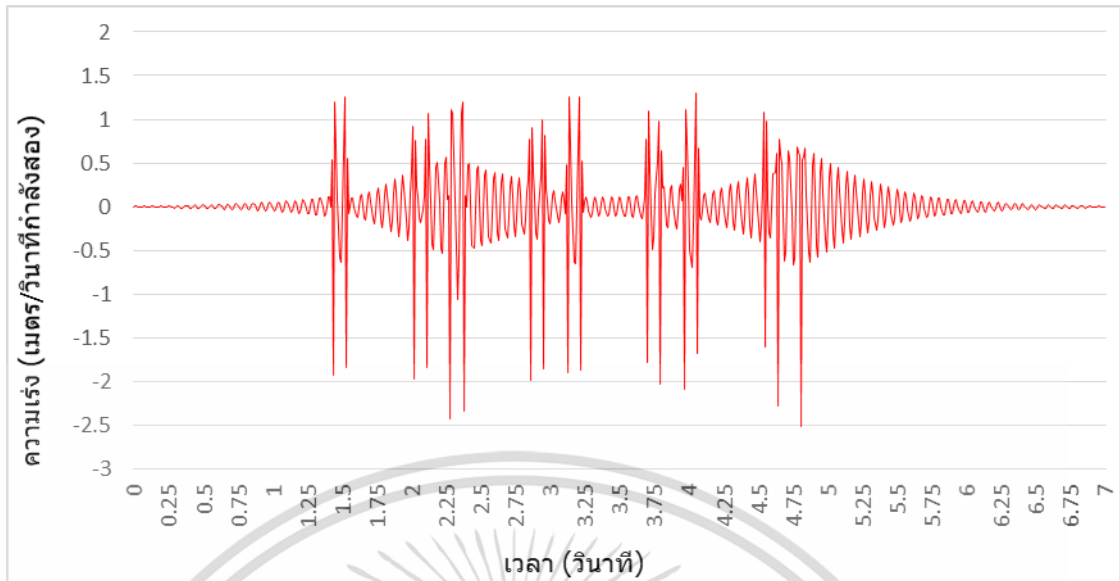
จากที่ Martin et al [2009] ได้ทำการทดลองและวัดค่าเพื่อหาค่าความแข็งของเส้นทางราง ทำให้สามารถสรุปได้ว่าค่าความแข็งของเส้นทางรางของรถไฟความเร็วปานกลางโดยทั่วไปจะอยู่ที่ 40-70 kN/mm

โดยเมื่อทำการทดลองใส่ค่าความแข็งของเส้นทางรางที่ค่าต่างๆในช่วงดังกล่าวลงในแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ จะได้ค่าการสั่นสะเทือนรูปแบบต่างๆออกมาดังแสดงในรูปที่ 4-31 4-32 4-33 โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆคงที่ และเปลี่ยนค่าความแข็งของเส้นทางราง(ค่า k) ของโครงสร้างราง เพื่อหาค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริงจากภาคสนามมากที่สุด



รูปที่ 4-31 กราฟการสั่นสะเทือน ของรถไฟเมื่อมีความเร็ว 100 กม/ชม k = 40 kN/mm

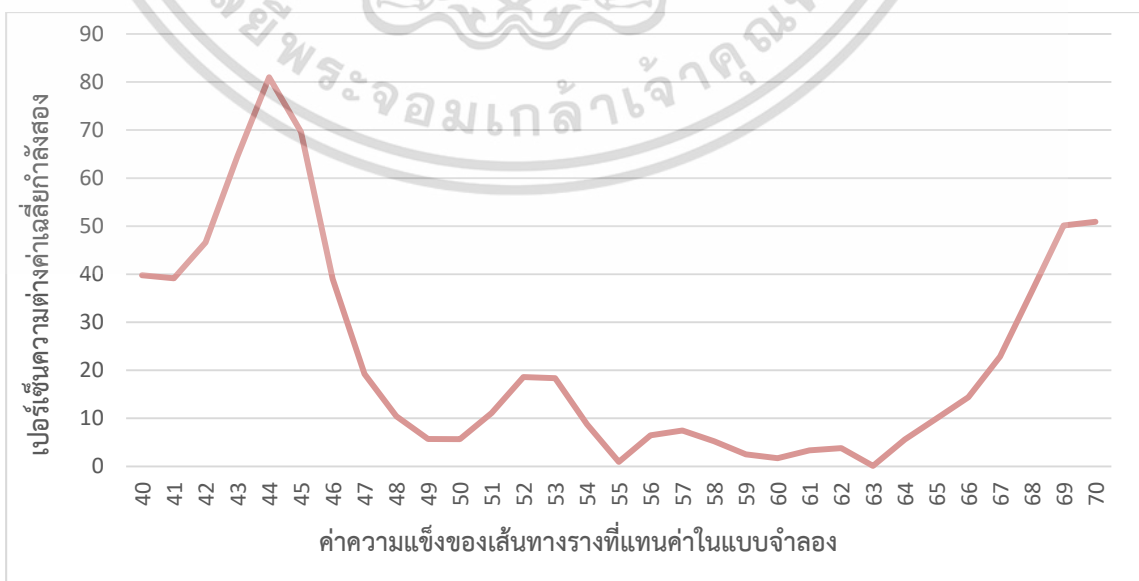
จากรูปที่ 4-31 เป็นการนำค่าจากการคำนวณในแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ โดยใช้สมการที่ 3.1 และ 3.2 เป็นหลักในการคำนวณ โดยให้ค่าความแข็งของเส้นทางรางเท่ากับ 40 kN/mm หรืออยู่ในรูปแบบของโครงสร้างอ่อน



รูปที่ 4-32 กราฟการสั่นสะเทือน ของรถไฟเมื่อมีความเร็ว 100 กม/ชม  $k = 55 \text{ kN/mm}$

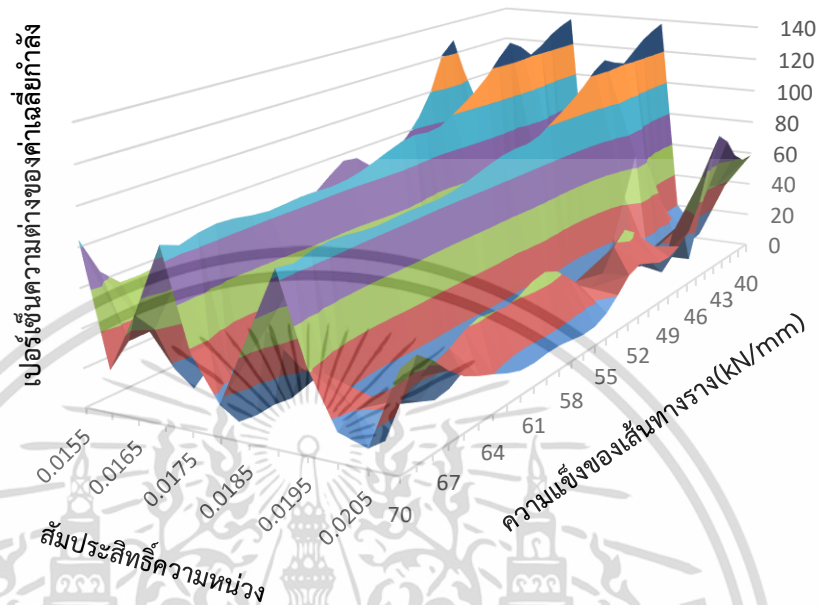
เมื่อลองทำการเพิ่มค่าความแข็งแรงของค่าความแข็งของโครงสร้างขึ้น เป็น  $55 \text{ kN/mm}$  ทำให้พฤติกรรมของการสั่นสะเทือนของตัวรางรถไฟเปลี่ยนไป โดยมีแนวโน้มที่ค่าแอมพลิจูดลดลง ประกอบกับการซ้อนทับของคลื่นการสั่นสะเทือน มีการเปลี่ยนแปลง และอาจเกิดการลดทอนกันเองในตัวสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 4-32

เมื่อนำค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณที่ค่า  $k$  ที่แตกต่างกัน มาเทียบกับค่าที่วัดจริงในสนาม ที่สถานีทดสอบที่ 5 ซึ่งมีความชัดเจนของสัญญาณมากที่สุด พบว่าที่ค่า  $k = 55 \text{ kN/mm}$  มีค่าความต่างของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (r.m.s error) น้อยที่สุดที่ 0.62 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4-34 โดยที่แบบจำลองอยู่บนสมมติฐานที่ว่า รถไฟมีความเร็ว 100 กม/ชม และมีน้ำหนักล้อเท่ากับทุกล้อตลอดขบวน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่ 4-33** กราฟแสดงค่าความต่างของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (r.m.s. error) เมื่อเทียบค่าแรงสั่นสะเทือนจากแบบจำลองกับค่าสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จริง ที่ค่า  $k$  ต่างๆ



**รูปที่ 4-34** กราฟแสดงค่าความต่างของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (r.m.s. error) เมื่อเทียบค่าแรงสั่นสะเทือนจากแบบจำลองกับค่าสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จริง

จากรูปที่ 4-34 เป็นการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับ 2 ตัวแปร พบว่า ค่าที่ทำให้แรงสั่นสะเทือนจากแบบจำลองทางพลศาสตร์มีค่าความแตกต่างกำลังสองเข้าใกล้ศูนย์ที่สุด คือเมื่อ แบบจำลองมีค่า  $k = 54.991806$  kN/mm และค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงอยู่ที่ 1.850313 เปอร์เซ็น ซึ่งจะก่อให้เกิดค่าความต่างกำลังสองเท่ากับ 0.000327 เปอร์เซ็น จึงเลือกใช้ค่า  $k = 55$  kN/mm และค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 1.85 เปอร์เซ็น

รูปที่ 4-33 และ 4-34 แสดงให้เห็นว่า ค่าความแข็งของเส้นทางรางที่นำมาใช้ในแบบจำลองมีค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยกำลังสองเข้าใกล้ศูนย์ที่ค่า  $k$  ช่วงประมาณ 55 kN/mm

จึงสมมติฐานว่าให้โครงสร้างของรางรถไฟลาดกระบังที่มีค่าความแข็งของเส้นทางรางอยู่ที่ 55 kN/mm ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้ค่าจากแบบจำลอง มีความใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริงมากที่สุด

ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง(damping ratio) เป็นค่าที่ต้องได้มากจากการทดลอง Sungil Kim [2014] ได้ทำการทดลองในห้องแล็บ เพื่อจะหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว เขาได้ทำการทดลองหาค่าของสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างทางรถไฟ ทั้งแบบมีหินโรยทางและไม่มีหินโรยทาง โดยได้ระบุไว้ว่า โครงสร้างทางรถไฟแบบมีหินโรยทาง ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างเดียวกันกับในบริเวณพื้นที่ ส.จ.ล.

มักจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง(damping ratio) อยู่ในขอบเขต 1.45-2.5 เปอร์เซ็น โดยค่าที่ทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองสามารถคำนวณค่าการสั่นสะเทือนออกมาได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริงมากที่สุด คือ 1.85 เปอร์เซ็นต์ ดังที่กล่าวไปข้างต้น

ทั้งนี้ ทั้งค่าความแข็งของเส้นทางรถไฟ และสัมประสิทธิ์ความหน่วง เป็นค่าที่เกิดขึ้นภายใต้ตัวแปรทางธรรมชาติหลายตัวแปร ทำให้ค่าจริงไม่สามารถระบุได้แน่ชัด เพราะสภาพภูมิประเทศและตัวระบบโครงสร้างราง สามารถเปลี่ยนได้ตลอดเวลา แม้จะอยู่ในบริเวณพื้นที่เดียวกัน

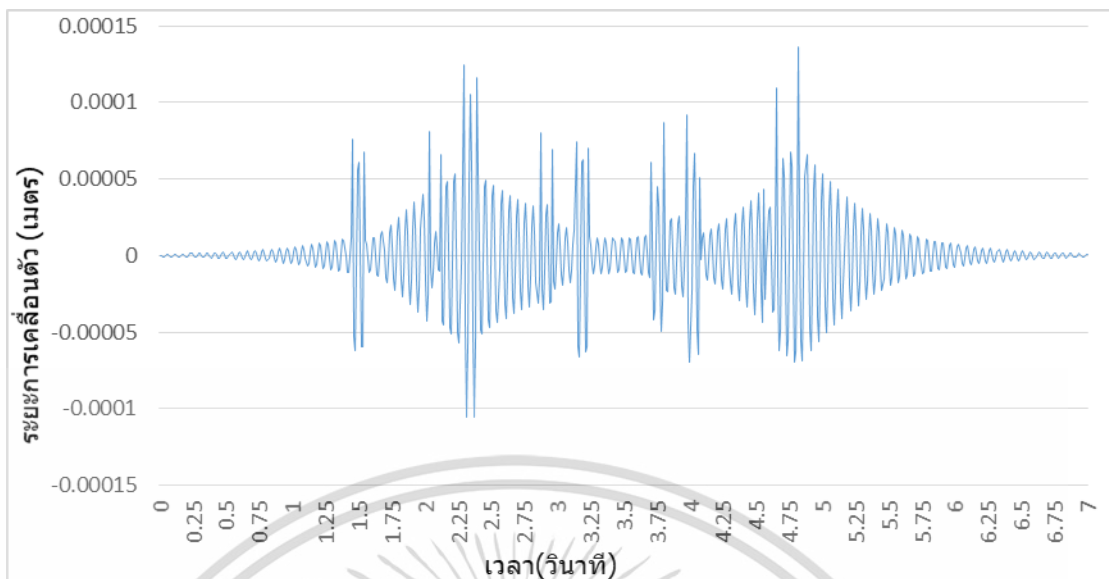
น้ำหนักโดยรวมของโครงสร้างรางรถไฟที่อยู่ในบริเวณพื้นที่ สจล สามารถอ้างอิงได้จาก [คู่มือการก่อสร้างทางรถไฟของ สทช] โดยสามารถระบุได้ว่า ตัวเหล็กรางรถไฟ เป็นเหล็กรางรถไฟ ชนิด 60E1 มีน้ำหนักอยู่ที่ 60.21 กิโลกรัม/เมตร ยังมีหมอนรองรางรถไฟ ชนิด B70 ที่มีน้ำหนักอยู่ที่ท่อนละ 260 กิโลกรัม โดยจะห่างห่างกันทุกๆระยะห่าง 0.65 เมตร

โดยค่าที่ใช้ในแบบจำลอง สามารถดูได้จากตารางที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1** ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณในแบบจำลองพลศาสตร์

ความเร็วรถไฟ (Train speed)	100 km/hr	ค่าความแข็งของทางราง (Train track stiffness)	≈ 55 kN/mm
น้ำหนักกระทำที่ล้อรถไฟ (Train wheel load)	4000 kg	สัมประสิทธิ์ความหน่วง (System Damping ratio)	≈ 1.85%
ประเภทเหล็กรางรถไฟ (Rail type)	60E1	มวลรวม (System Mass)	520 kg
น้ำหนักเหล็กรางรถไฟ (Rail weight)	60.21 kg/m	จำนวนโบกี้รถไฟ (Train Bogies)	4 โบกี้
ประเภทหมอนรองรางรถไฟ (Sleeper type)	B70	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง(คำนวณ) (RMS calculation)	0.455837156
ระยะห่างระหว่างหมอนรอง (Sleeper spacing)	0.65 m	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง(วัดค่า) (RMS Measure)	0.460140935
น้ำหนักของหมอนรอง (Sleeper weight)	260 kg	ความต่างค่าเฉลี่ย (RMS Error)	0.935317442

จากค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1 สามารถคำนวณตามสมการที่ 3.1 และ 3.2 จะได้ค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาค รางรถไฟในระยะเวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4-35



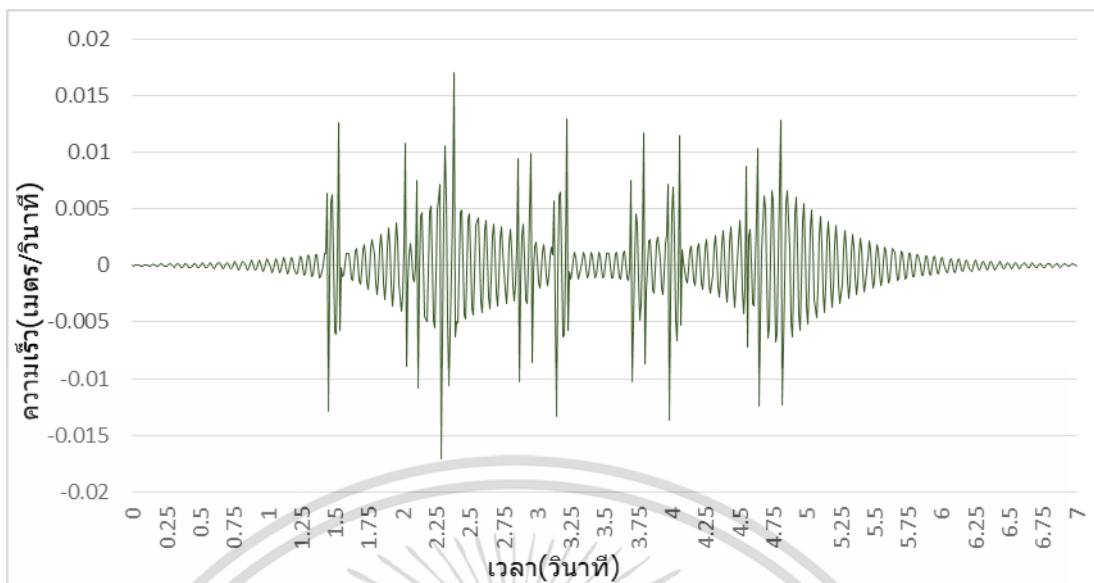
รูปที่ 4-35 ค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างรางรถไฟโดยแบบจำลองทางพลศาสตร์ โดยใช้ตัวแปรตามตารางที่ 4.1

รูปที่ 4-35 เกิดจากการแทนค่าตัวแปรจากตารางที่ 4.1 ลงในแบบจำลอง โดยการใช้การคำนวณจากสมการที่ 3.1 และ 3.2 เป็นหลัก ได้ออกมาเป็นการเคลื่อนตัวของโครงสร้างทางรถไฟที่เวลาต่างๆ เมื่อมีการเคลื่อนผ่านของรถไฟ

#### 4.4 การเปรียบเทียบค่าความเร่งของการสั่นสะเทือนระหว่างแบบจำลองและค่าที่วัดได้

เพื่อเป็นการพิสูจน์ ว่าแบบจำลองพลศาสตร์ที่สร้างขึ้น มีความน่าเชื่อถือ จะต้องนำค่าจากการวัดค่าจริงจากภาคสนาม มาทำการเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ โดยใช้วิธีเชิงตัวเลข numerical method ในการแปลงค่า จาก ระยะทาง เป็นความเร็ว และความเร่ง ตามลำดับ

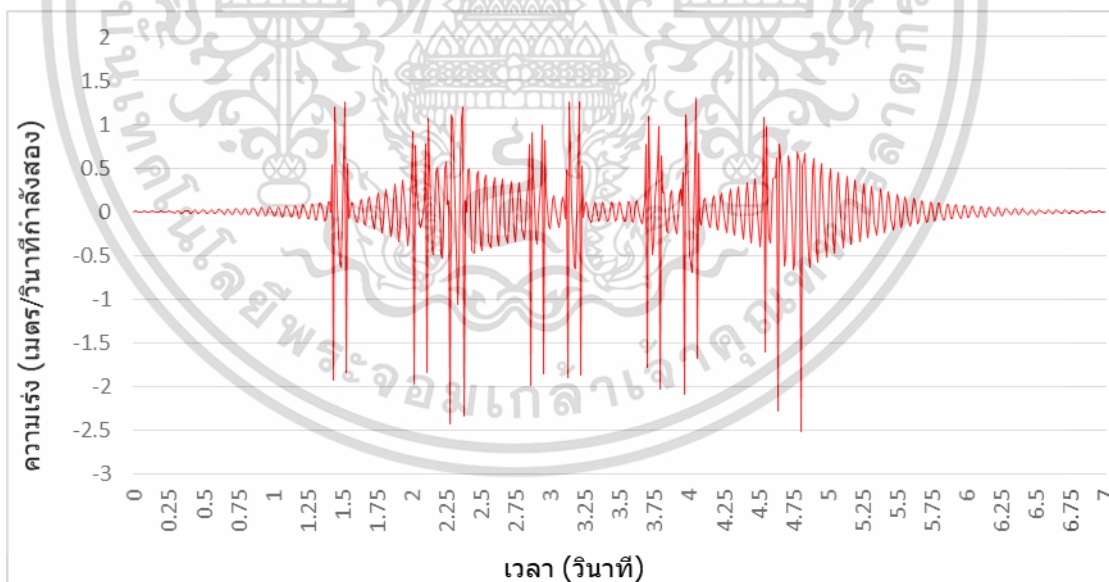
จากรูปที่ 4-35 สามารถแปลงค่าจากระยะทางเป็นความเร็ว ได้เป็นรูปที่ 4-36



รูปที่ 4-36 ค่าความเร็วการเคลื่อนตัวของโครงสร้างรางรถไฟโดยแบบจำลองทางพลศาสตร์

รูปที่ 4-36 เป็นผลจากการใช้ numerical method ในการแปลงค่าระยะการเคลื่อนตัวของรางที่เกิดจากแรงกระทำของรถไฟ(รูปที่ 4-35) เป็นความเร็วที่เวลาใดๆ

จากรูปที่ 4-36 สามารถแปลงค่าจากความเร็วเป็นความเร่ง ได้เป็นรูปที่ 4-37

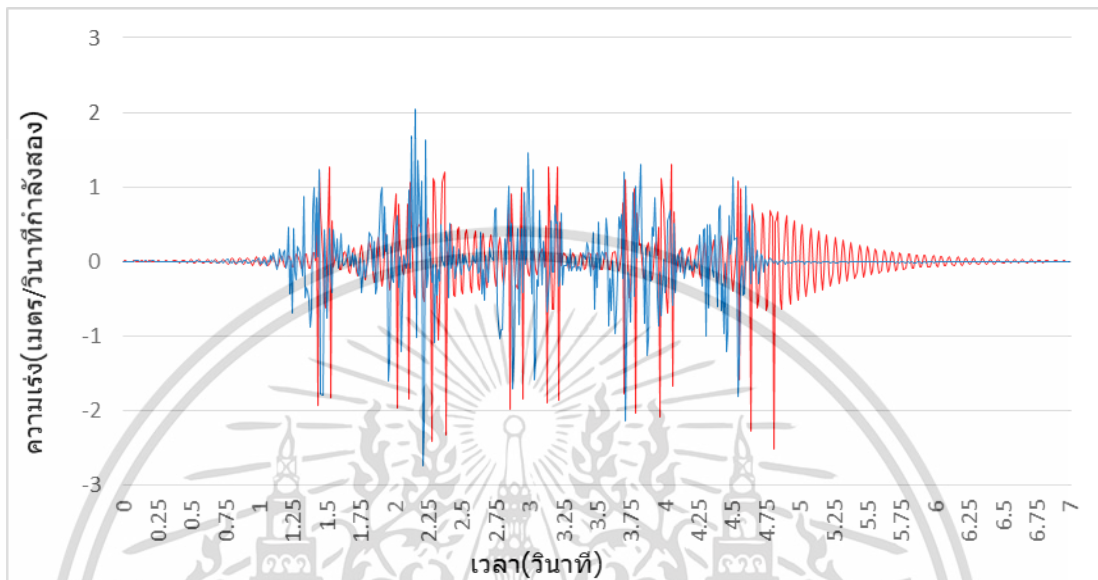


รูปที่ 4-37 ค่าความเร่งการเคลื่อนตัวของโครงสร้างรางรถไฟโดยแบบจำลองทางพลศาสตร์

รูปที่ 4-37 เป็นผลจากการใช้ numerical method ในการแปลงค่าความเร็วการเคลื่อนตัวของรางที่เกิดจากแรงกระทำของรถไฟ(รูปที่ 4-36) เป็นความเร่งที่เวลาใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำรูปที่ 4-37 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยแบบจำลอง ไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดจริงจากภาคสนาม โดยยึดเอาค่าจาก sta.005 ซึ่งเป็นสถานีวัดค่าที่มีค่าแรงและชัดที่สุด จะได้ผลออกมาเป็นดังรูปที่ 4-38



รูปที่ 4-38 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าจากภาคสนาม

รูปที่ 4-38 แสดงการเปรียบเทียบค่าการสั่นสะเทือนในหน่วยของความเร่ง ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดค่าจริงในภาคสนาม(สีน้ำเงิน)และค่าที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองพลศาสตร์(สีแดง) จะเห็นได้ว่ากราฟทั้งสองมีความใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก

โดยค่าเฉลี่ยกำลังสอง(RMS) ของค่าที่ได้จากการวัดค่าจริงภาคสนามนั้นอยู่ที่ 0.4601 ส่วนค่าเฉลี่ยกำลังสอง(RMS) ของค่าที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลองทางพลศาสตร์มีค่าอยู่ที่ 0.460140935

ค่าของกราฟทั้ง 2 มีค่าแตกต่างกันอยู่ที่ 0.935 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เห็นว่า แบบจำลองทางพลศาสตร์ที่สร้างขึ้น มีแนวโน้มว่าจะสามารถคาดการณ์แรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟได้ในระดับที่น่าพอใจ

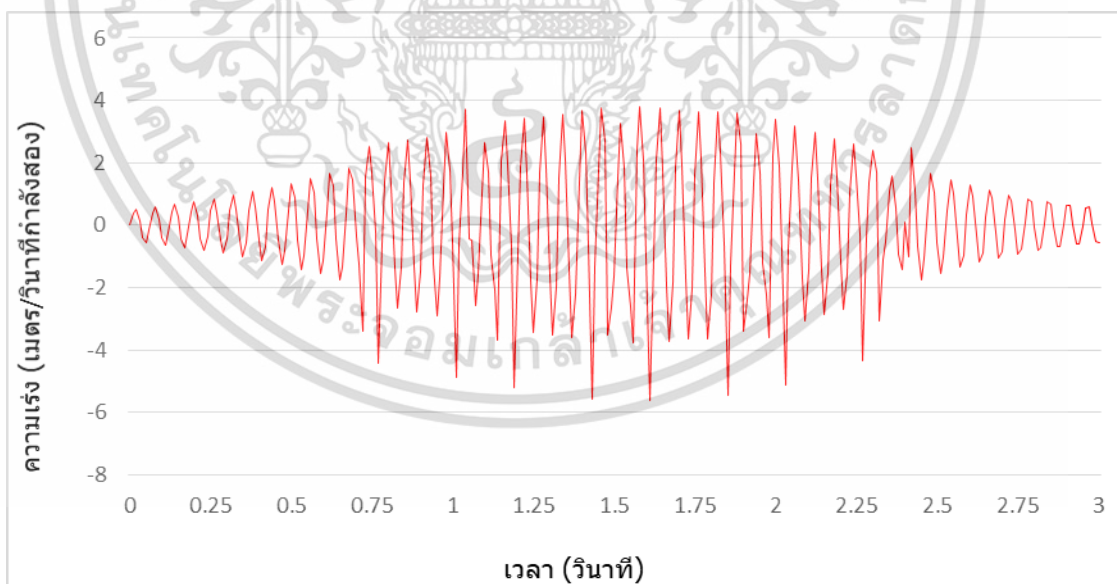
#### 4.5 การคาดการณ์คลื่นการสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟความเร็วสูง ด้วยแบบจำลองทางพลศาสตร์

จากหัวข้อที่ 4.4 ทำให้เห็นว่าแบบจำลองทางพลศาสตร์สามารถคาดการณ์การสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟได้ โดยมีค่าความคาดเคลื่อนของค่า RMS อยู่ที่ ประมาณ 0.9 เปอร์เซ็นต์

ด้วยเหตุนี้ เราสามารถเลือกใช้แบบจำลองดังกล่าวในการคาดการณ์แรงสั่นสะเทือนของรถไฟ ความเร็วสูงได้ โดยสมมติฐานว่า ใช้รถไฟขบวนเดียวกันคือ THN และทำการเพิ่มความเร็วของรถไฟดังกล่าว จะได้ค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 4.2

**ตารางที่ 4.2** ค่าพารามิเตอร์ที่ความเร็วรถไฟ 200 กม/ชม

ความเร็วรถไฟ (Train speed)	200 km/hr	ค่าความแข็งของทางราง (Train track stiffness)	$\approx 55$ kN/mm
น้ำหนักกระทำที่ล้อรถไฟ (Train wheel load)	4000 kg	สัมประสิทธิ์ความหน่วง (System Damping ratio)	$\approx 1.85\%$
ประเภทเหล็กรางรถไฟ (Rail type)	60E1	มวลรวม (System Mass)	520 kg
น้ำหนักเหล็กรางรถไฟ (Rail weight)	60.21 kg/m	จำนวนโบกี้รถไฟ (Train Bogies)	4
ประเภทหมอนรองรางรถไฟ (Sleeper type)	B70	ระยะห่างระหว่างหมอนรอง (Sleeper spacing)	0.65 m
น้ำหนักของหมอนรอง (Sleeper weight)	260 kg		



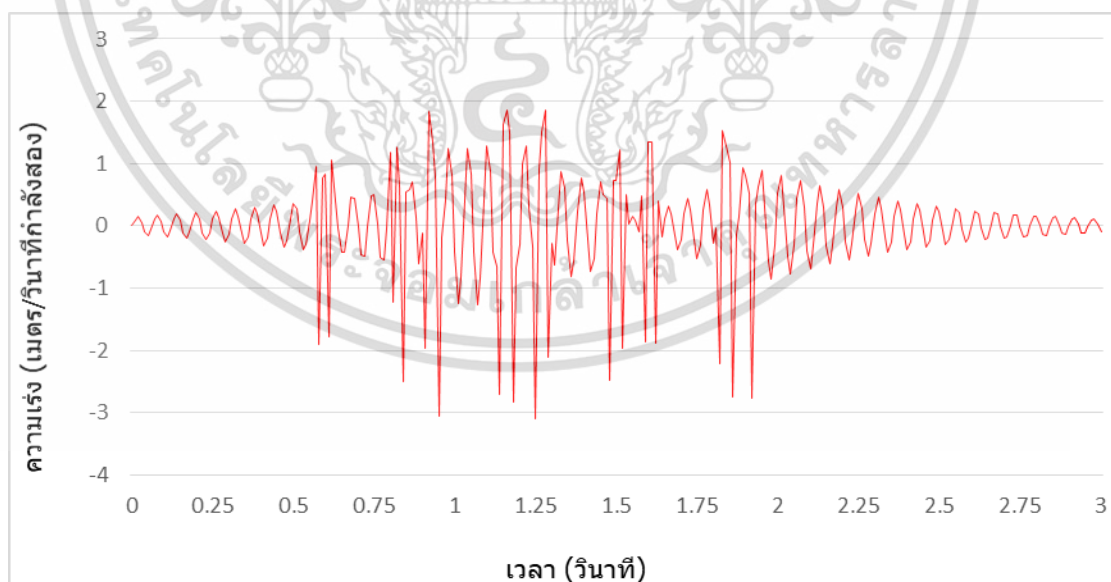
**รูปที่ 4-39** กราฟแสดงค่าการสั่นสะเทือนของอนุภาครางรถไฟในแนวตั้งที่ความเร็ว 200 กม/ชม โดยแบบจำลองทางพลศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-39 คือค่าความเร่งของการเคลื่อนตัวของรางรถไฟเมื่อรถไฟวิ่งผ่านด้วยความเร็ว 200 กม/ชม โดยใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์ในการคำนวณ มีการใช้ตัวแปรต่างๆตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ความเร็วรถไฟ 250 กม/ชม

ความเร็วรถไฟ (Train speed)	250 km/hr	ค่าความแข็งของทางราง (Train track stiffness)	$\approx 55$ kN/mm
น้ำหนักกระทำที่ล้อรถไฟ (Train wheel load)	4000 kg	สัมประสิทธิ์ความหน่วง (System Damping ratio)	$\approx 1.85\%$
ประเภทเหล็กรางรถไฟ (Rail type)	60E1	มวลรวม (System Mass)	520 kg
น้ำหนักเหล็กรางรถไฟ (Rail weight)	60.21 kg/m	จำนวนโบกี้รถไฟ (Train Bogies)	4
ประเภทหมอนรองรางรถไฟ (Sleeper type)	B70	ระยะห่างระหว่างหมอนรอง (Sleeper spacing)	0.65 m
น้ำหนักของหมอนรอง (Sleeper weight)	260 kg		



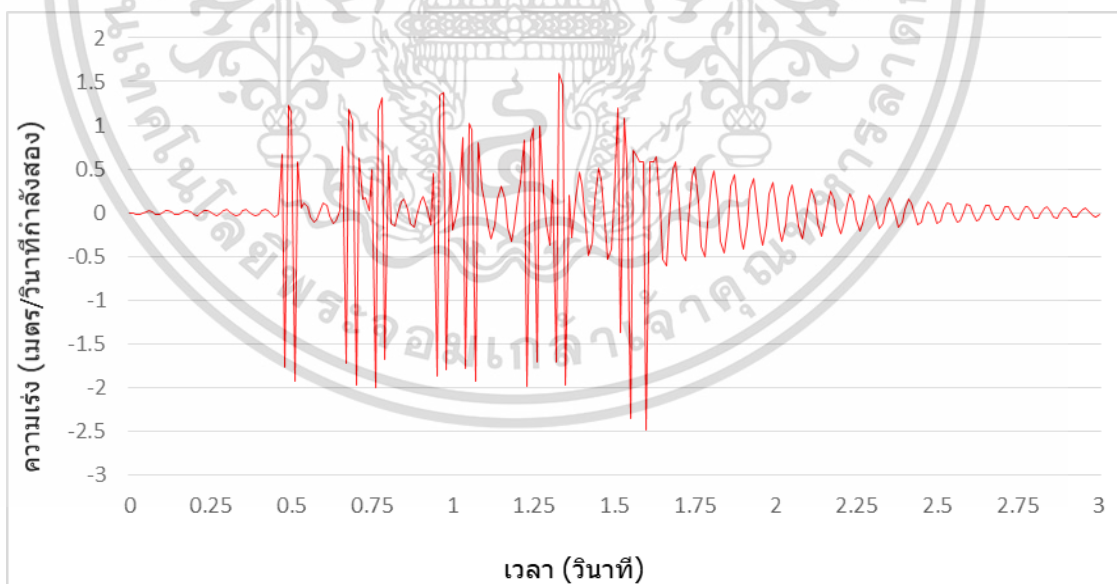
รูปที่ 4-40 กราฟแสดงค่าการสั่นสะเทือนของอนุภาครางรถไฟในแนวตั้งที่ความเร็ว 250 กม/ชม โดยใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-40 คือค่าความเร่งของการเคลื่อนตัวของรางรถไฟเมื่อรถไฟวิ่งผ่านด้วยความเร็ว 250 กม/ชม โดยใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์ในการคำนวณ มีการใช้ตัวแปรต่างๆตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ความเร็วรถไฟ 300 กม/ชม

ความเร็วรถไฟ (Train speed)	300 km/hr	ค่าความแข็งของทางราง (Train track stiffness)	$\approx 55$ kN/mm
น้ำหนักกระทำที่ล้อรถไฟ (Train wheel load)	4000 kg	สัมประสิทธิ์ความหน่วง (System Damping ratio)	$\approx 1.85\%$
ประเภทเหล็กรางรถไฟ (Rail type)	60E1	มวลรวม (System Mass)	520 kg
น้ำหนักเหล็กรางรถไฟ (Rail weight)	60.21 kg/m	จำนวนโบกี้รถไฟ (Train Bogies)	4
ประเภทหมอนรองรางรถไฟ (Sleeper type)	B70	ระยะห่างระหว่างหมอนรอง (Sleeper spacing)	0.65 m
น้ำหนักของหมอนรอง (Sleeper weight)	260 kg		



รูปที่ 4-41 กราฟแสดงค่าการสั่นสะเทือนของอนุภาครางรถไฟในแนวตั้งที่ความเร็ว 300 กม/ชม โดยใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-41 คือค่าความเร่งของการเคลื่อนตัวของรางรถไฟเมื่อรถไฟวิ่งผ่านด้วยความเร็ว 300 กม/ชม โดยใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์ในการคำนวณ มีการใช้ตัวแปรต่างๆตามตารางที่ 4.4

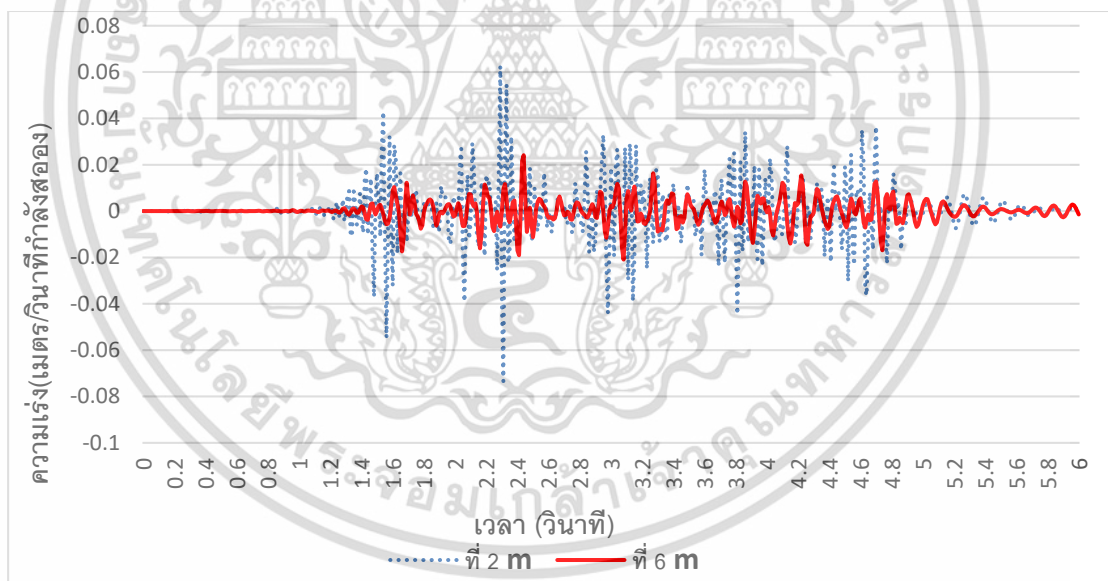
#### 4.6 ผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนของรถไฟความเร็วสูง ภายในบริเวณพื้นที่ สจล

การเคลื่อนตัวของคลื่นแรงสั่นสะเทือน สามารถคำนวณหาได้ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม ANSYS โดยทำการสร้างแบบจำลองให้มีลักษณะเป็นวัสดุจากดินเหนียวทั้งแห่งตลอดทั้งเนื้อวัสดุ เพื่อการง่ายแก่การคำนวณ

จากนั้นใส่คลื่นการสั่นสะเทือนเข้าไปที่จุดกึ่งกลาง เพื่อดูพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของคลื่นที่เกิดขึ้นในเนื้อดิน

##### 4.6.1 ผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือน ที่เกิดจากรถไฟ Sta.005 ผ่านการคำนวณ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

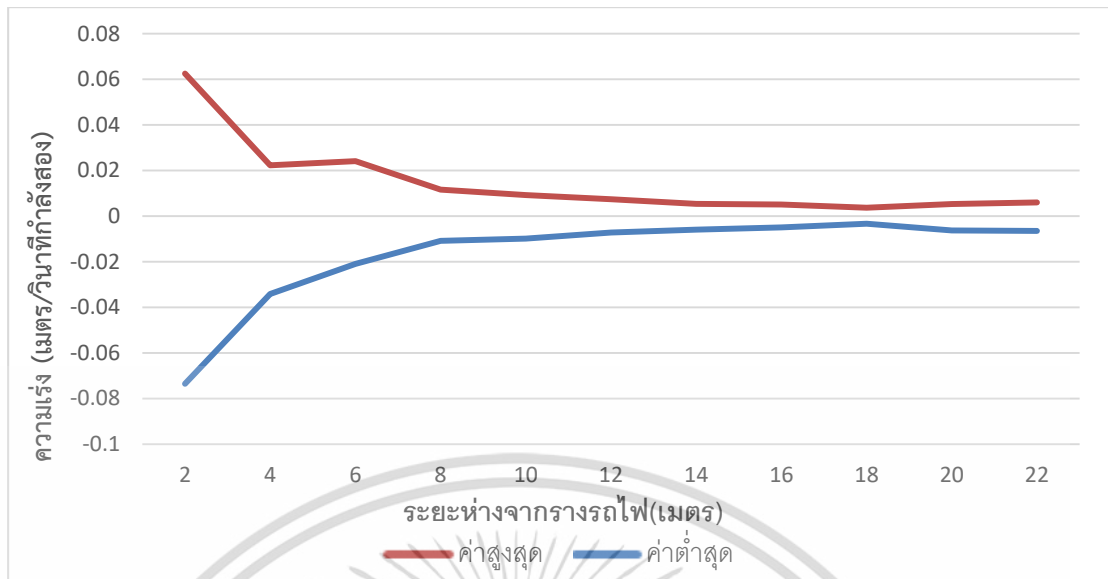
เนื่องจาก ข้อมูลสัญญาณทั้งหมดที่ได้ไปลงทำการวัดค่าจริงมานั้น ที่สถานีทดสอบที่ 5 มีความชัดเจนของคลื่นมากที่สุดจึงเลือกใช้คลื่นสัญญาณตัวดังกล่าวในการเปรียบเทียบ



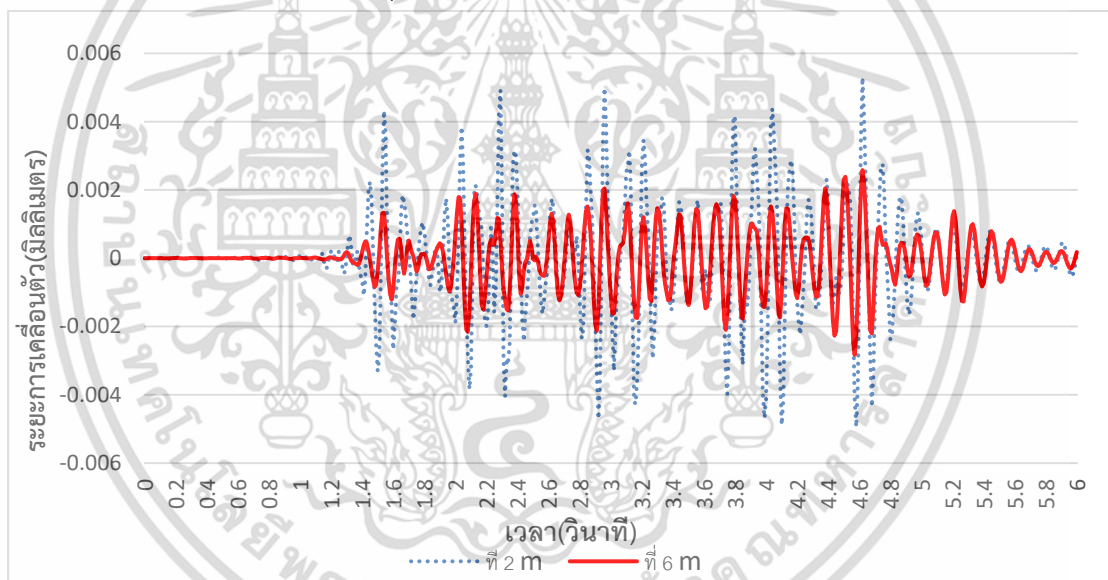
รูปที่ 4-42 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งของคลื่นสั่นสะเทือน ของรถไฟที่สถานีทดสอบที่ 5 ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟ ที่ 2 เมตร และ 6 เมตร ตามลำดับ

จากรูปที่ 4-42 เป็นการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาค่าคลื่นแรงสั่นสะเทือนที่แพร่กระจายออกจากรางรถไฟในแนวแกน Y (ตั้งฉากกับรางรถไฟ) ที่ระยะ 2 และ 6 เมตร โดยที่ระยะ 2 เมตรนั้น มีค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ที่  $0.0625 \text{ m/s}^2$  และต่ำสุดที่  $-0.074 \text{ m/s}^2$  ในขณะที่ระยะ 6 เมตร จะนั้น มีค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ที่  $0.0241 \text{ m/s}^2$  และต่ำสุดที่  $-0.020 \text{ m/s}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

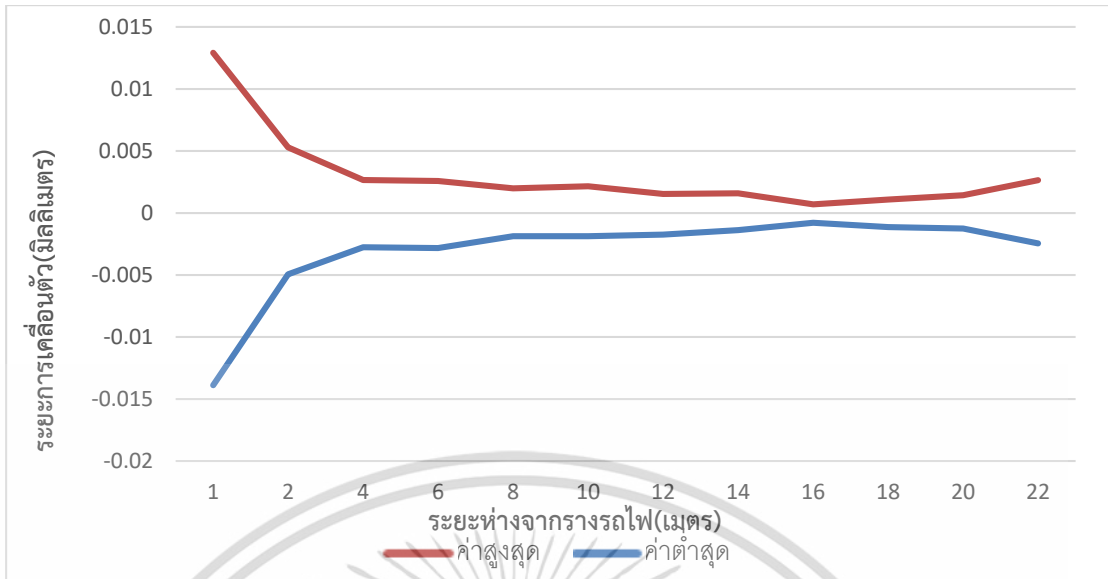


รูปที่ 4-43 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดขึ้นของคลื่นสั่นสะเทือนของรถไฟที่สถานีทดสอบที่ 5 ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ



รูปที่ 4-44 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดขึ้นของคลื่นสั่นสะเทือนจากรถไฟที่สถานีทดสอบที่ 5 ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะ 2 และ 6 เมตร

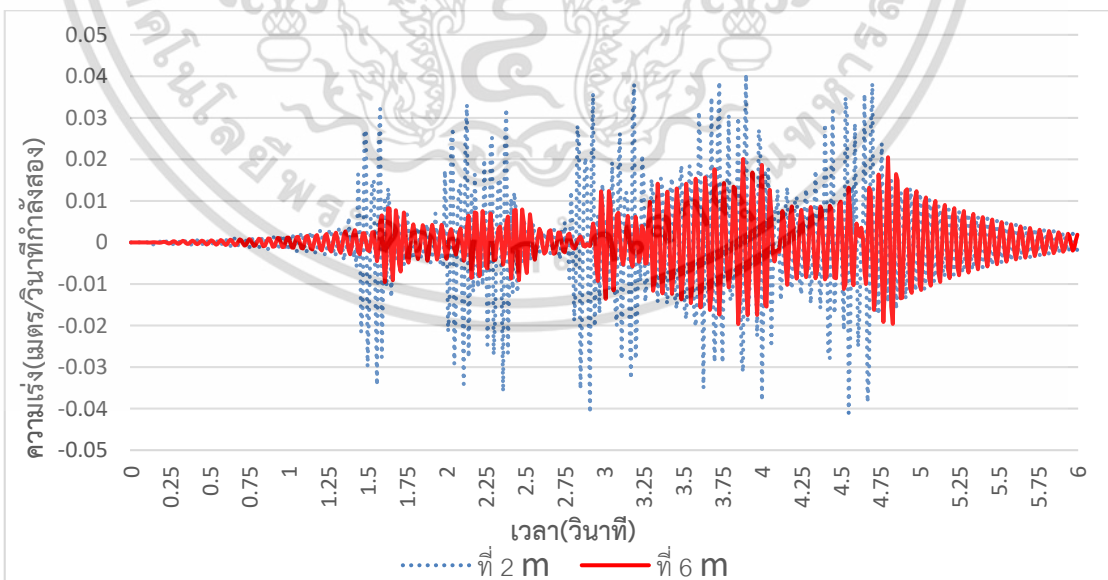
จากรูปที่ 4-44 เป็นการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาค่าคลื่นแรงสั่นสะเทือนที่แพร่กระจายออกจากรางรถไฟในรูปแบบของการเคลื่อนตัว ที่ระยะ 2 และ 6 เมตร โดยที่ระยะ 2 เมตรนั้น มีค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ที่ 0.005 mm และต่ำสุดที่ -0.004 mm ในขณะที่ระยะ 6 เมตรจะนั้น มีค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ที่ 0.002 mm และต่ำสุดที่ -0.002 mm



รูปที่ 4-45 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดขึ้นของคลื่นสั่นสะเทือนจากรถไฟที่สถานีทดสอบที่ 5 ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ

จากรูปที่ 4-45 เป็นการนำค่าสูงสุดและต่ำสุดของคลื่นการสั่นสะเทือน ในรูปของการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่จุดต่างๆตามระยะห่างจากรางรถไฟมาแสดงเป็นกราฟ โดยค่าแอมพลิจูดจะลดลง 30 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะ 2 เมตร ลดลง 85 เปอร์เซ็นต์ ที่ 6 เมตร และ ลดลง 99.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ 18 เมตร

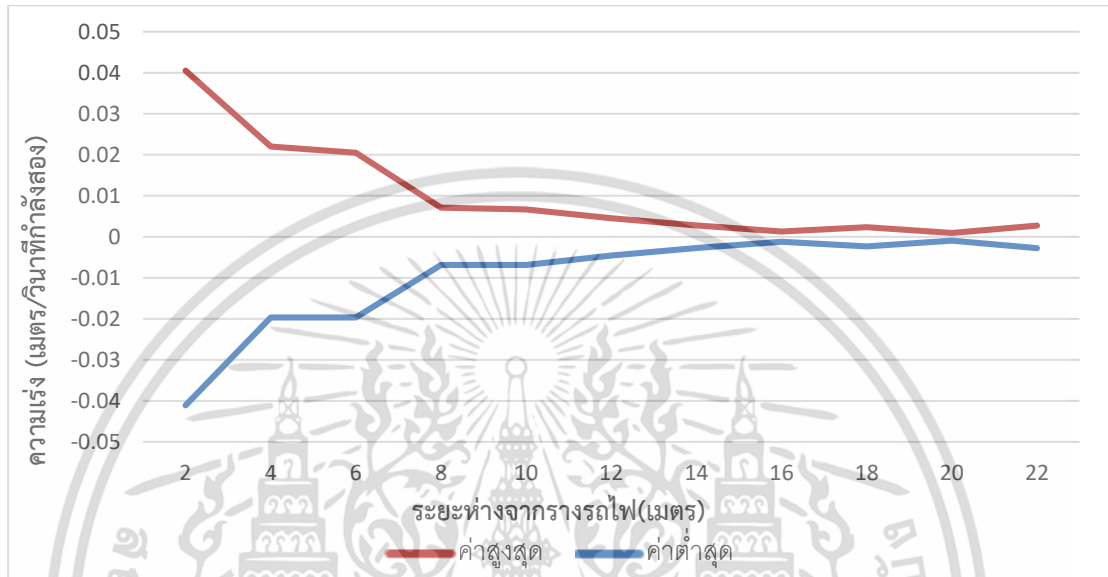
**4.6.2 ผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนที่คำนวณด้วยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่เกิดจากรถไฟ ความเร็ว 100 กม/ชม ผ่านการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์**



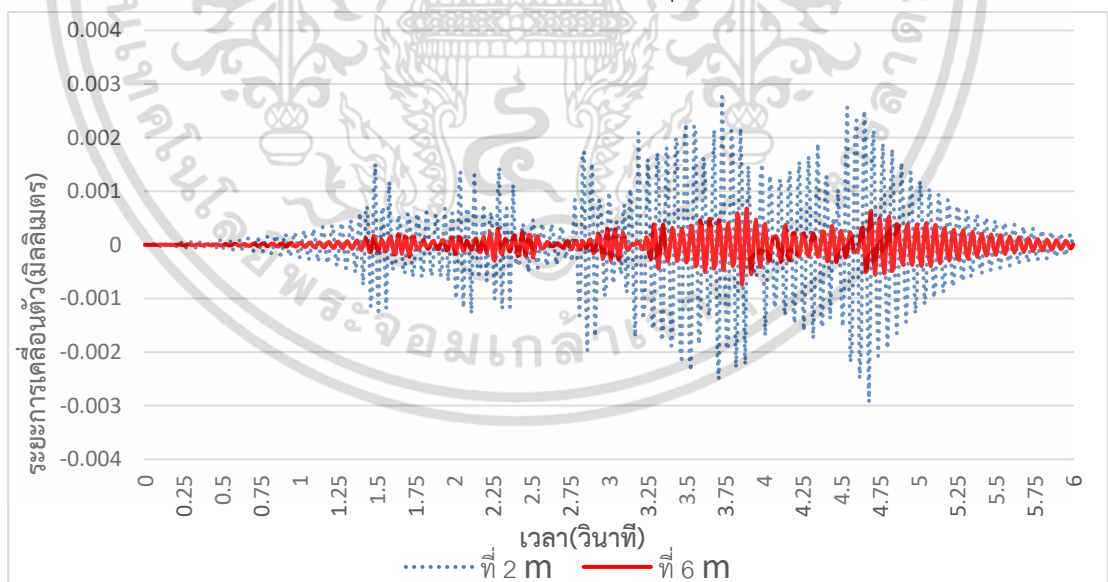
รูปที่ 4-46 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งของคลื่นสั่นสะเทือนที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 100 กม/ชม ที่ระยะ 2 เมตร และ 6 เมตร ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4-46 เป็นการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาค่าคลื่นแรงสั่นสะเทือนที่แพร่กระจายออกจากรางรถไฟ ที่ระยะ 2 และ 6 เมตร โดยที่ระยะ 2 เมตรนั้น มีค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ที่  $0.040 \text{ m/s}^2$  และต่ำสุดที่  $-0.041 \text{ m/s}^2$  ในขณะที่ระยะ 6 เมตร จะนั้น มีค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ที่  $0.020 \text{ m/s}^2$  และต่ำสุดที่  $-0.019 \text{ m/s}^2$

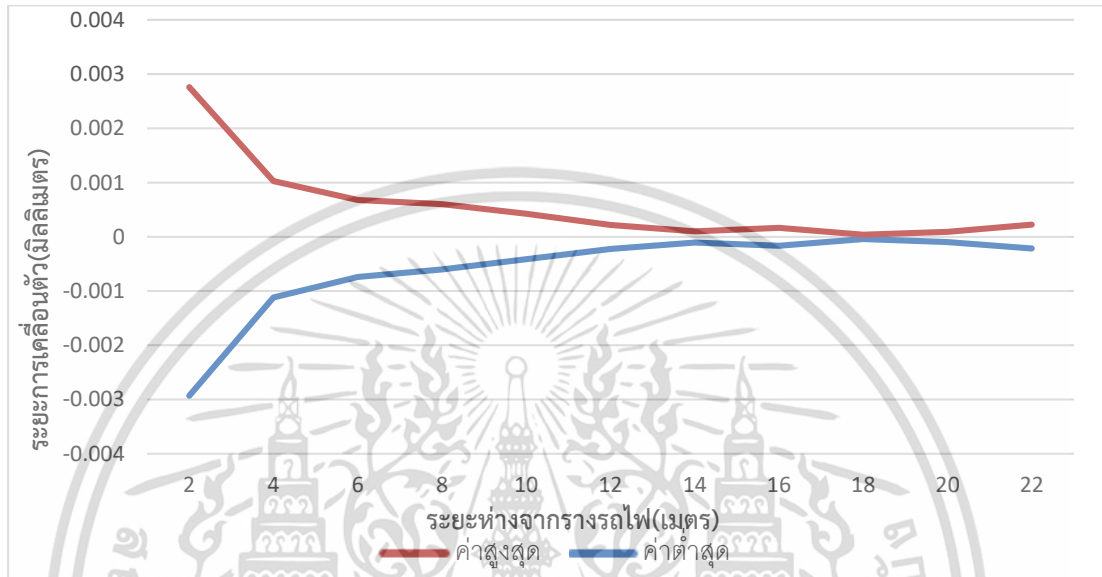


รูปที่ 4-47 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 100 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ



รูปที่ 4-48 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 100 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะ 2 และ 6 เมตร

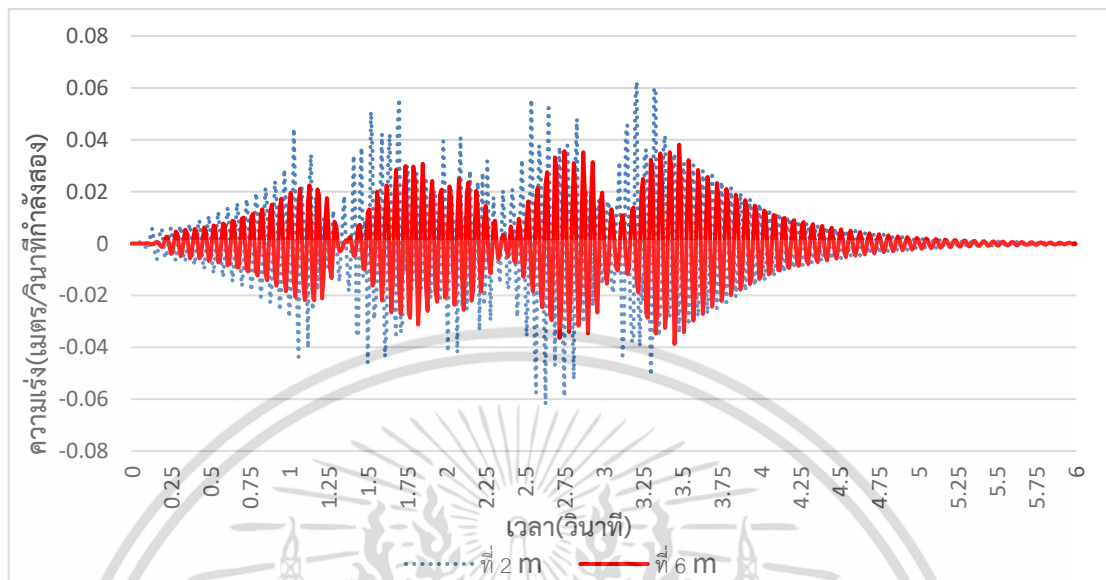
จากรูปที่ 4-48 เป็นการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาค่าคลื่นแรงสั่นสะเทือนที่แพร่กระจายออกจากรางรถไฟในรูปแบบของการเคลื่อนตัว ที่ระยะ 2 และ 6 เมตร โดยที่ระยะ 2 เมตรนั้น มีค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ที่ 0.0027 mm และต่ำสุดที่ -0.003 mm ในขณะที่ระยะ 6 เมตร จะนั้น มีค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ที่ 0.0006 mm และต่ำสุดที่ -0.007 mm



รูปที่ 4-49 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 100 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ

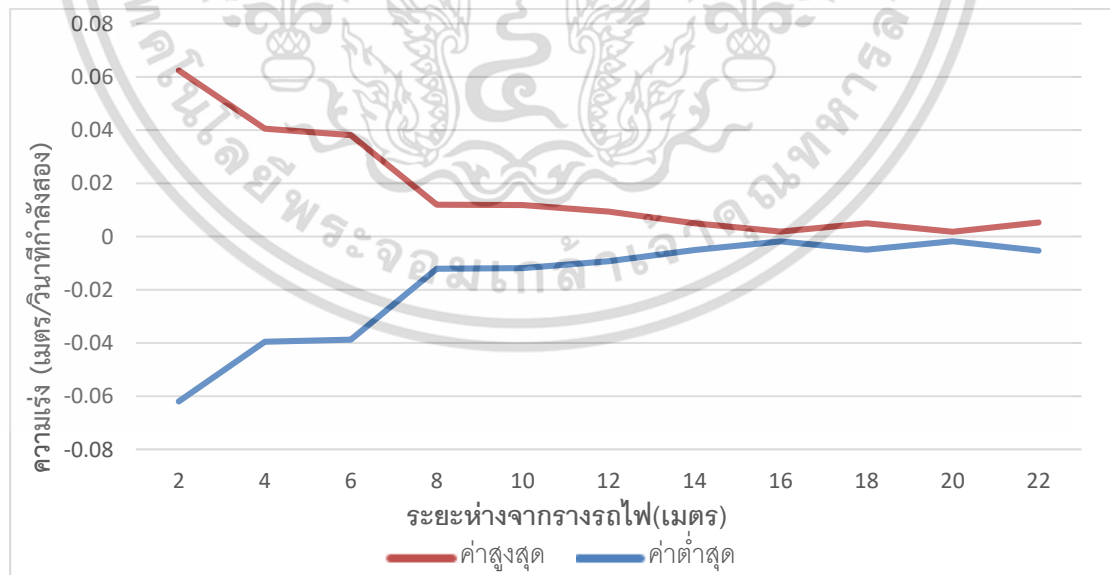
จากรูปที่ 4-49 เป็นการนำค่าสูงสุดและต่ำสุดของคลื่นการสั่นสะเทือน ในรูปของการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่จุดต่างๆตามระยะห่างจากรางรถไฟมาแสดงเป็นกราฟ โดยค่าแอมพลิจูดจะลดลง 80 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะ 2 เมตร ลดลง 95 เปอร์เซ็นต์ ที่ 6 เมตร และ ลดลง 99.7 เปอร์เซ็นต์ ที่ 18 เมตร

#### 4.6.3 ผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนที่คำนวณด้วยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่เกิดจากรถไฟ ความเร็ว 150 กม/ชม ผ่านการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

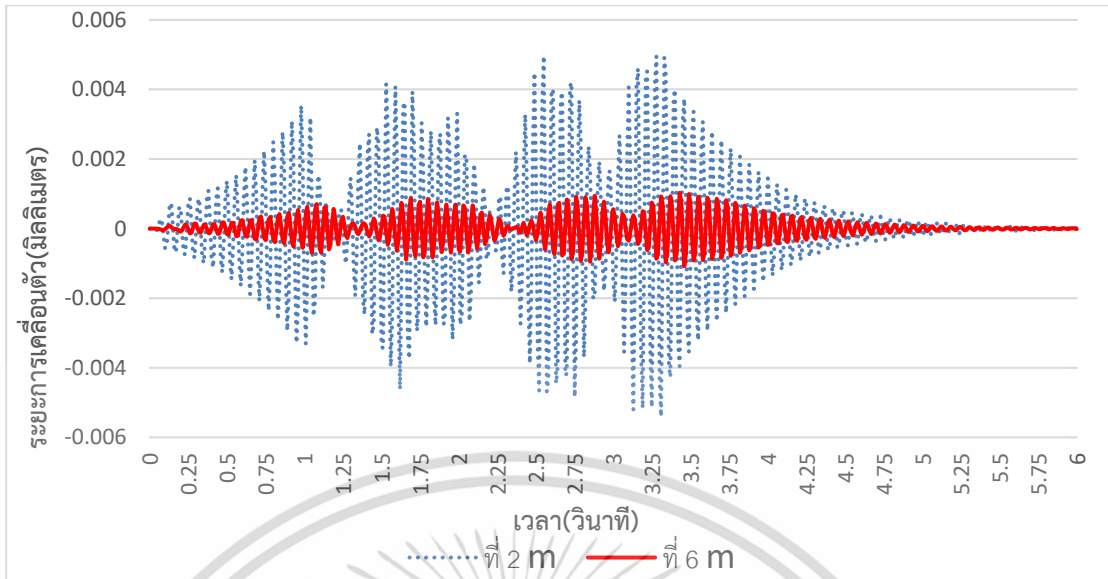


รูปที่ 4-50 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งของคลื่นสั่นสะเทือนที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 150 กม/ชม ที่ระยะ 2 เมตร และ 6 เมตร ตามลำดับ

จากรูปที่ 4-50 เป็นการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาค่าคลื่นแรงสั่นสะเทือนที่แพร่กระจายออกจากรางรถไฟ ที่ระยะ 2 และ 6 เมตร โดยที่ระยะ 2 เมตรนั้น มีค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ที่  $0.062 \text{ m/s}^2$  และต่ำสุดที่  $-0.061 \text{ m/s}^2$  ในขณะที่ระยะ 6 เมตร จะนั้น มีค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ที่  $0.038 \text{ m/s}^2$  และต่ำสุดที่  $-0.039 \text{ m/s}^2$

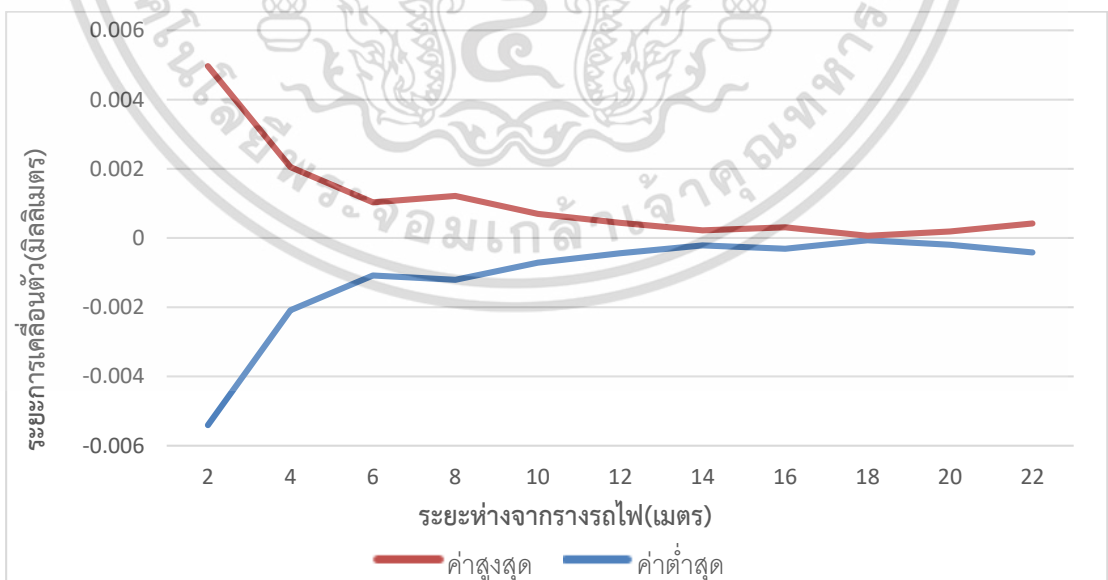


รูปที่ 4-51 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 150 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ



รูปที่ 4-52 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 150 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะ 2 และ 6 เมตร

จากรูปที่ 4-52 เป็นการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาค่าการสั่นสะเทือนที่แพร่กระจายออกจากรางรถไฟในรูปแบบของการเคลื่อนตัว ที่ระยะ 2 และ 6 เมตร โดยที่ระยะ 2 เมตรนั้น มีค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ที่ 0.0049 mm และต่ำสุดที่ -0.0054 mm ในขณะที่ระยะ 6 เมตร จะนั้น มีค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ที่ 0.001 mm และต่ำสุดที่ -0.001 mm

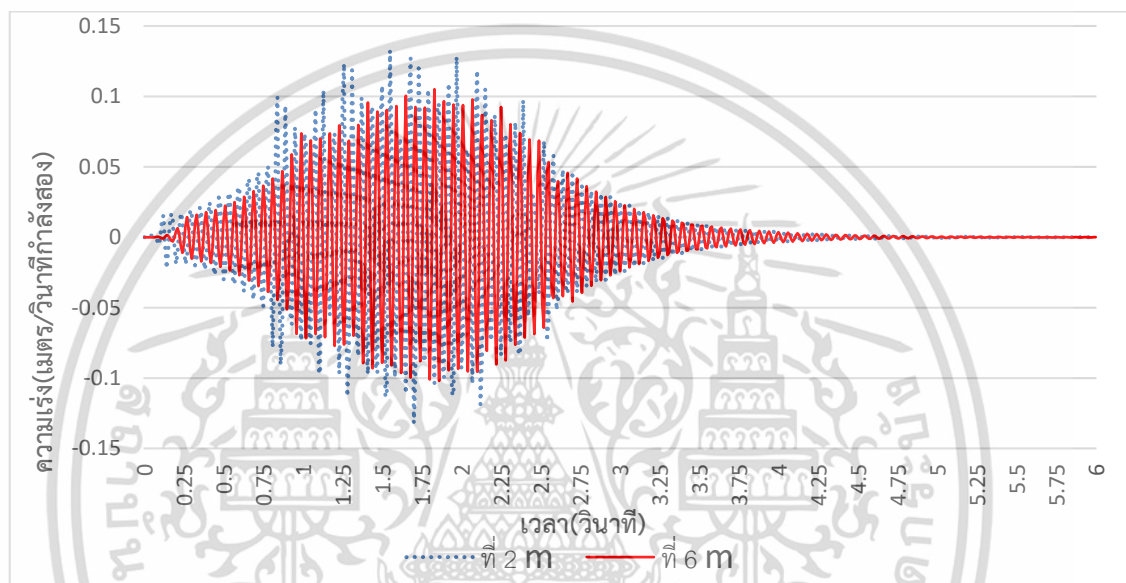


รูปที่ 4-53 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 150 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

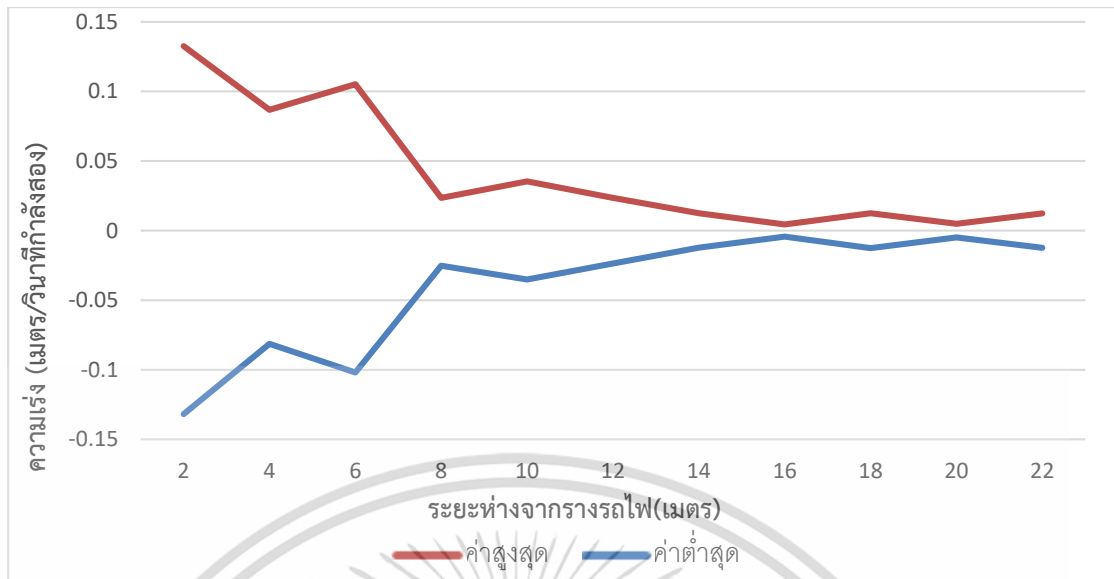
จากรูปที่ 4-53 เป็นการนำค่าสูงสุดและต่ำสุดของคลื่นการสั่นสะเทือน ในรูปของการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่จุดต่างๆตามระยะห่างจากรางรถไฟมาแสดงเป็นกราฟ โดยค่าแอมพลิจูดจะลดลง 57.3 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะ 2 เมตร ลดลง 82.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ 6 เมตร และ ลดลง 99.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ 18 เมตร

#### 4.6.4 ผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนที่คำนวณด้วยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่เกิดจากรถไฟ ความเร็ว 200 กม/ชม ผ่านการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

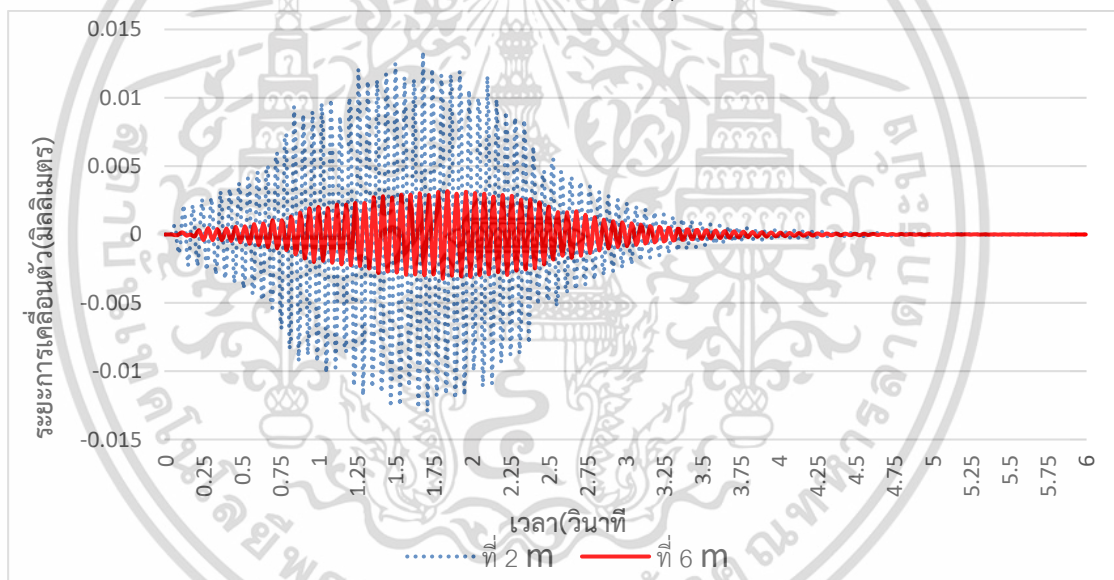


รูปที่ 4-54 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งของคลื่นสั่นสะเทือนที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 200 กม/ชม ที่ระยะ 2 เมตร และ 6 เมตร ตามลำดับ

จากรูปที่ 4-54 เป็นการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาค่าคลื่นแรงสั่นสะเทือนที่แพร่กระจายออกจากรางรถไฟ ที่ระยะ 2 และ 6 เมตร โดยที่ระยะ 2 เมตรนั้น มีค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ที่  $0.133 \text{ m/s}^2$  และต่ำสุดที่  $-0.131 \text{ m/s}^2$  ในขณะที่ระยะ 6 เมตร จะนั้น มีค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ที่  $0.105 \text{ m/s}^2$  และต่ำสุดที่  $-0.101 \text{ m/s}^2$

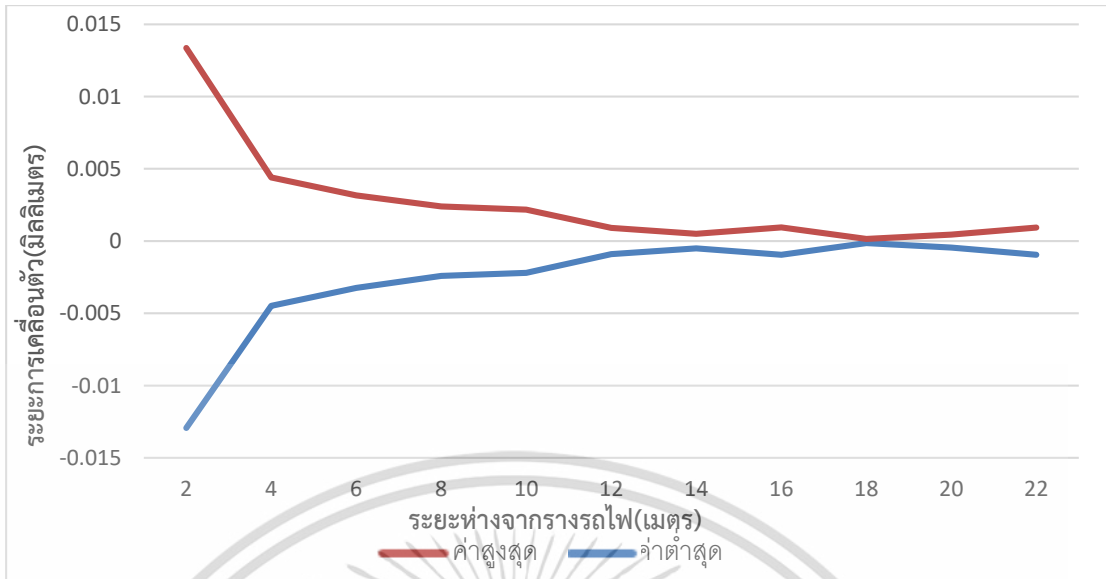


รูปที่ 4-55 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 200 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ



รูปที่ 4-56 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 200 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะ 2 และ 6 เมตร

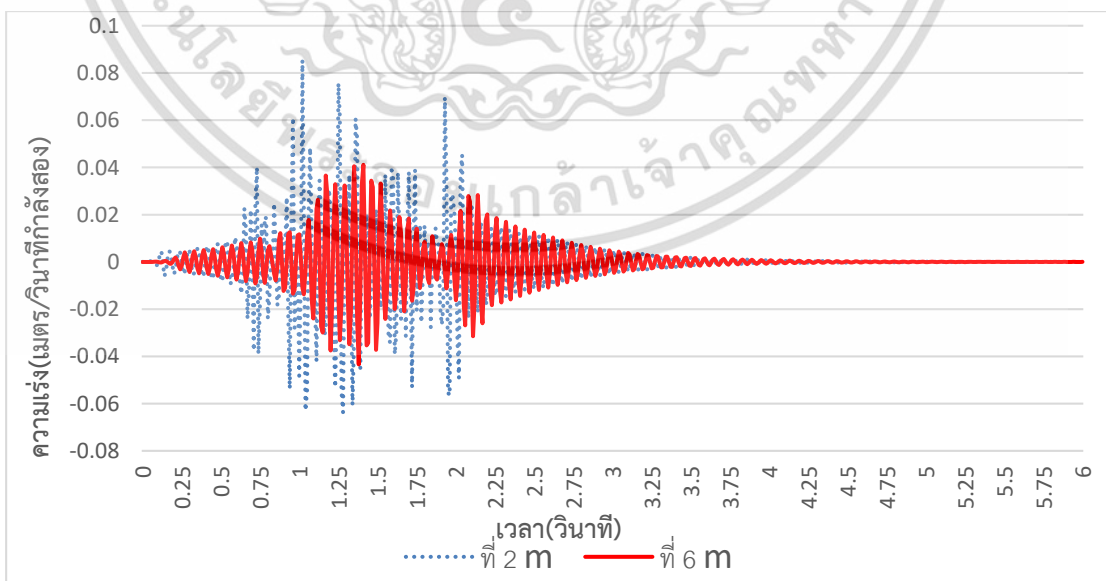
จากรูปที่ 4-56 เป็นการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาค่าการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่แพร่ออกจากรางรถไฟในรูปแบบของการเคลื่อนตัว ที่ระยะ 2 และ 6 เมตร โดยที่ระยะ 2 เมตรนั้น มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดอยู่ที่ 0.013 mm และต่ำสุดที่ -0.012 mm ในขณะที่ระยะ 6 เมตรจะนั้น มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดอยู่ที่ 0.003 mm และต่ำสุดที่ -0.003 mm



รูปที่ 4-57 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 200 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ

จากรูปที่ 4-57 เป็นการนำค่าสูงสุดและต่ำสุดของคลื่นการสั่นสะเทือน ในรูปของการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่จุดต่างๆตามระยะห่างจากรางรถไฟมาแสดงเป็นกราฟ โดยค่าแอมพลิจูดจะลดลง 41.6 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะ 2 เมตร ลดลง 86.1 เปอร์เซ็นต์ ที่ 6 เมตร และ ลดลง 99.3 เปอร์เซ็นต์ ที่ 18 เมตร

#### 4.6.5 ผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนที่คำนวณด้วยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ ที่เกิดจากรถไฟ ความเร็ว 250 กม/ชม ผ่านการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



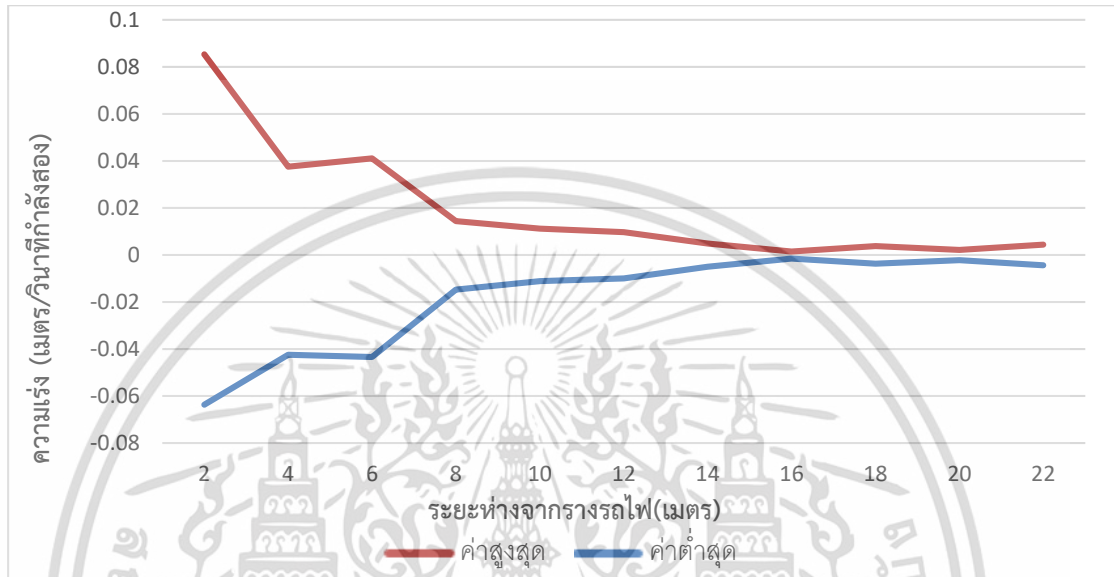
รูปที่ 4-58 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งของคลื่นสั่นสะเทือนที่เกิดจากการคำนวณโดย

แบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 250 กม/ชม ที่ระยะ 2 เมตร และ 6 เมตร ตามลำดับ

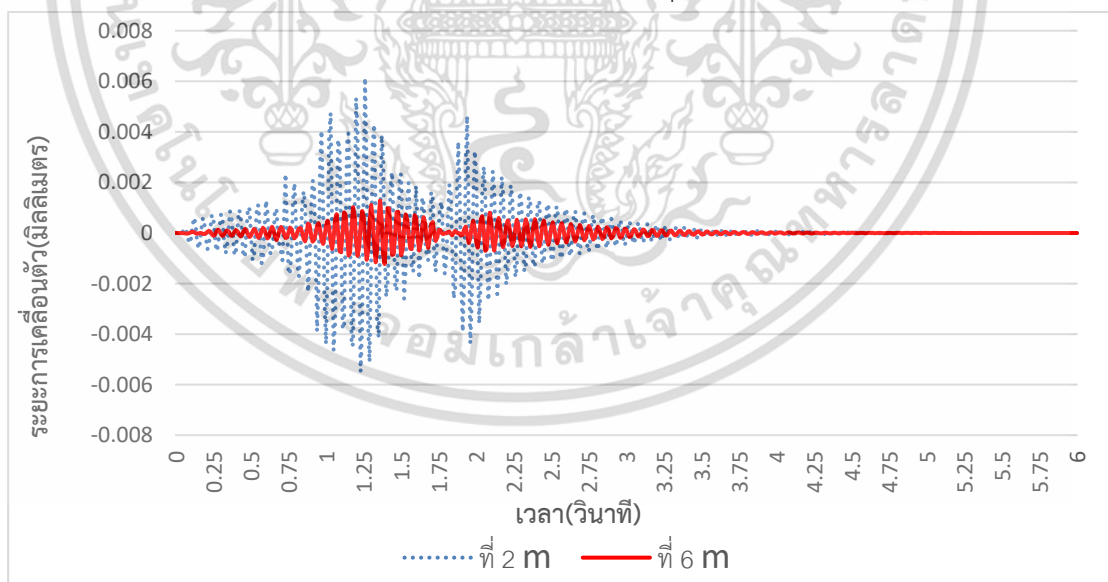
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4-58 เป็นการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาค่าคลื่นแรงสั่นสะเทือนที่แพร่กระจายออกจากรางรถไฟ ที่ระยะ 2 และ 6 เมตร โดยที่ระยะ 2 เมตรนั้น มีค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ที่  $0.085 \text{ m/s}^2$  และต่ำสุดที่  $-0.063 \text{ m/s}^2$  ในขณะที่ระยะ 6 เมตร จะมีค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ที่  $0.041 \text{ m/s}^2$  และต่ำสุดที่  $-0.043 \text{ m/s}^2$



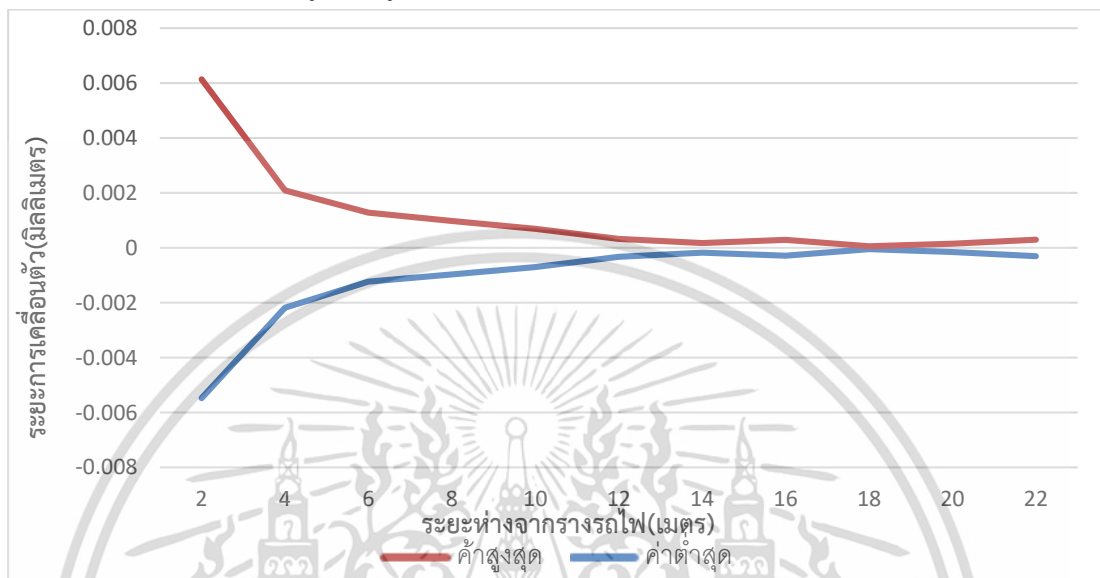
รูปที่ 4-59 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร่งสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 250 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ



รูปที่ 4-60 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 250 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะ 2 และ 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4-60 เป็นการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาค่าคลื่นแรงสั่นสะเทือนที่แพร่กระจายออกจากรางรถไฟในรูปแบบของการเคลื่อนตัว ที่ระยะ 2 และ 6 เมตร โดยที่ระยะ 2 เมตรนั้น มีค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ที่ 0.006 mm และต่ำสุดที่ -0.005 mm ในขณะที่ระยะ 6 เมตร จะนั้นมีค่าการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ที่ 0.001 mm และต่ำสุดที่ -0.001 mm

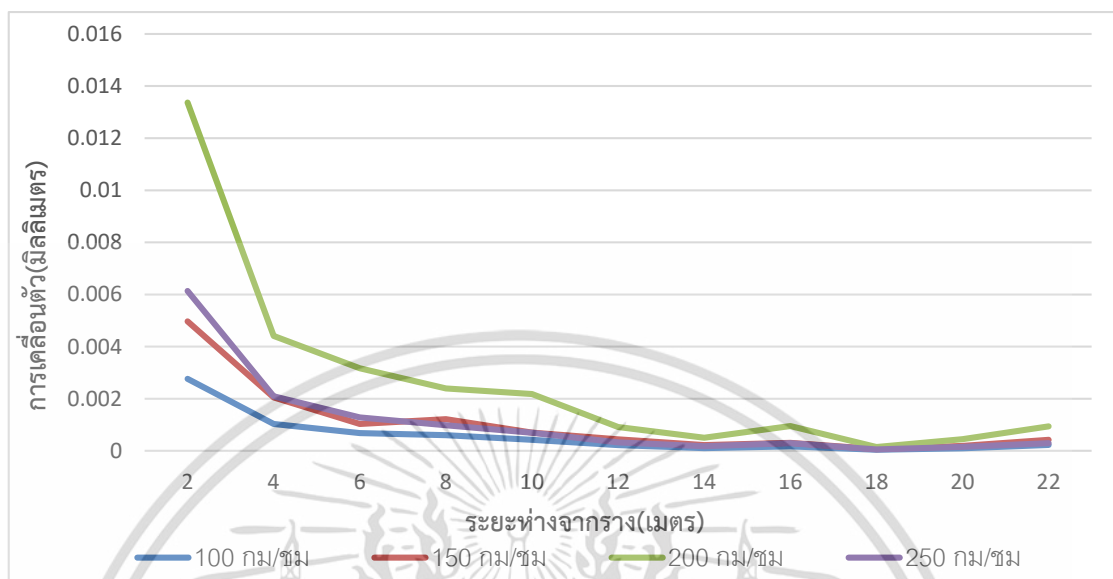


รูปที่ 4-61 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ 250 กม/ชม ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ

จากรูปที่ 4-61 เป็นการนำค่าสูงสุดและต่ำสุดของคลื่นการสั่นสะเทือน ในรูปของการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่จุดต่างๆตามระยะห่างจากรางรถไฟมาแสดงเป็นกราฟ โดยค่าแอมพลิจูดจะลดลง 45.6 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะ 2 เมตร ลดลง 89.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ 6 เมตร และ ลดลง 99.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ 18 เมตร

#### 4.6.6 เปรียบเทียบ การสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟที่ต่างความเร็วกันที่

ระยะห่างจากรางรถไฟต่างๆ



รูปที่ 4-62 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของอนุภาคที่เกิดจากการคำนวณโดยแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่ความเร็วรถไฟ ที่แตกต่างกัน ผ่านจุดที่ระยะห่างจากรางรถไฟที่ระยะต่างๆ

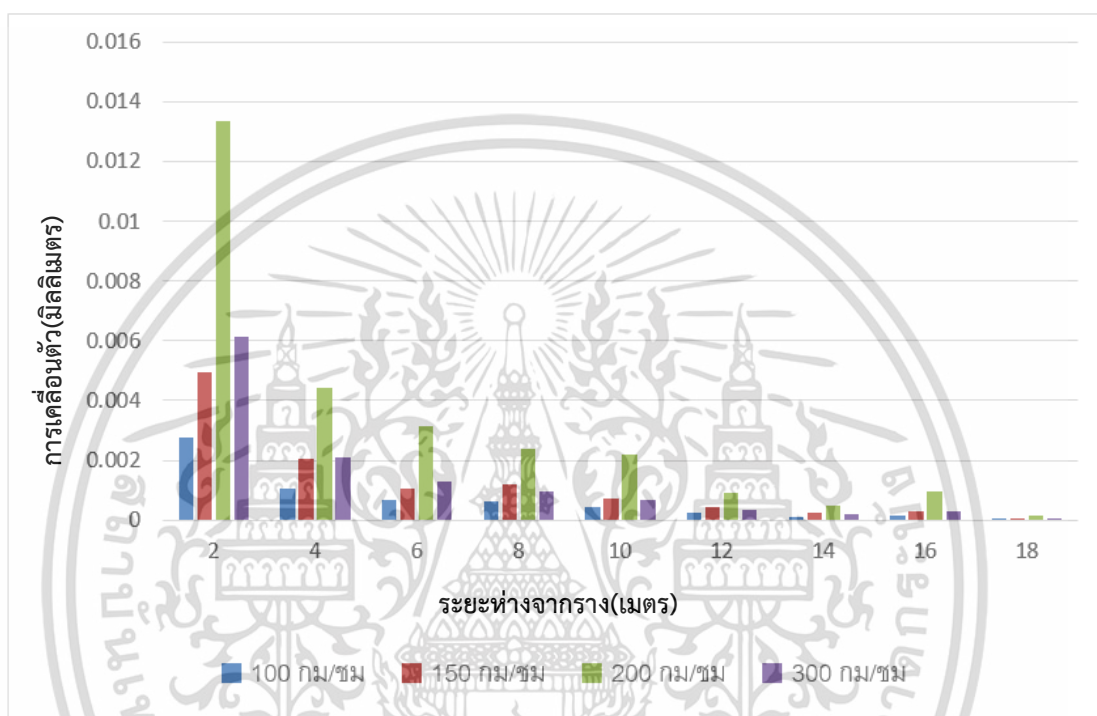
จากรูปที่ 4-62 สามารถบอกได้ว่า การเพิ่มขึ้นของความเร็วของรถไฟ มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการสั่นสะเทือนที่อาจเกิดขึ้น ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า รถไฟที่เพิ่มความเร็ว คือขบวนเดียวกัน มีลักษณะทางกายภาพโดยรวมเป็นลักษณะเดียวกัน แตกต่างที่ความเร็วในการเคลื่อนผ่านเท่านั้นและวิ่งบนโครงสร้างทางรถไฟที่มีรูปแบบและโครงสร้างแบบเดียวกัน

โดย จากการคำนวณโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่า ที่ระยะ 8-10 เมตรห่างจากรางรถไฟ หากคลื่นแรงสั่นสะเทือนวิ่งผ่านตัวกลางชนิดเนื้อเดียว(ในที่นี้คือดินเหนียว) จะมีการลดทอนลงของคลื่นลงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ของแอมพลิจูดตั้งต้นที่แหล่งกำเนิดคลื่น และจะลดลงกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะ 18 เมตร

ทั้งนี้ ความรุนแรงของการสั่นสะเทือนจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของรถไฟ, ความเร็ว, และตัวแปรทางโครงสร้างของรางรถไฟ

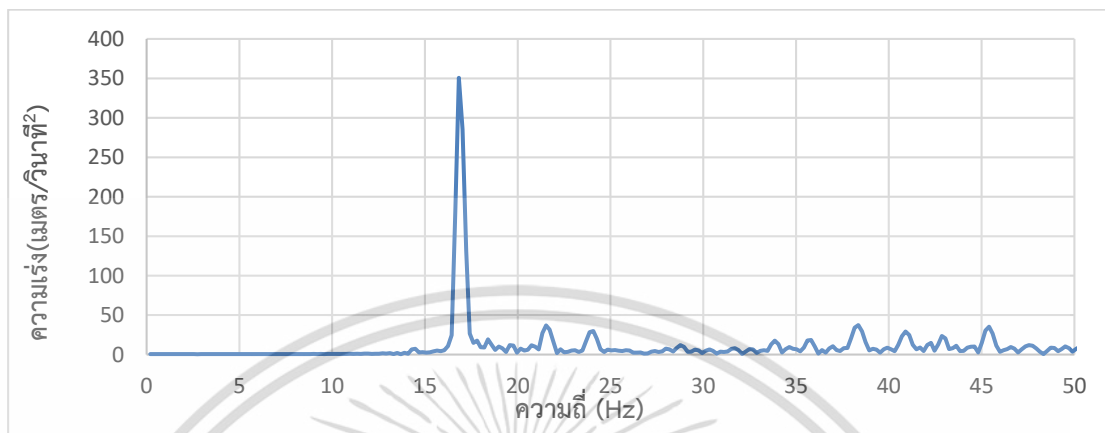
จากรูปที่ 4-63 จะเห็นได้ว่า ที่ความเร็วรถไฟ เท่ากับ 200 กม/ชม จะมีความรุนแรงของการสั่นสะเทือนมากที่สุด โดยที่ แม้ว่าที่ระยะ 10 เมตร คลื่นของรถไฟความเร็ว 200 กม/ชม จะถูกลดทอนลงไปกว่า 90 เปอร์เซ็นต์จากค่าแอมพลิจูดของการเคลื่อนตัวของรางรถไฟที่แหล่งกำเนิด แต่ทว่าก็ยังมีค่าความรุนแรงมากถึง 0.002 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับการเคลื่อนตัวสูงสุดของรถไฟความเร็ว 100 กม/ชม ที่ระยะ เพียง 2 เมตร เท่านั้น

ที่ความเร็วรถไฟ 200 กม/ชม มีขนาดของแอมพลิจูดที่มากกว่า 300 กม/ชม สามารถอธิบายได้ด้วยปรากฏการณ์ความถี่ธรรมชาติของตัวโครงสร้างของรางรถไฟ ซึ่งที่ความเร็วของรถไฟ 200 กม/ชม ความถี่ในการกระทำระหว่างรางกับล้อรถไฟที่เคลื่อนที่ผ่านจุดที่สนใจมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง จนทำให้เกิดการสั่นพ้องขึ้น ส่งผลให้ค่าแอมพลิจูดที่ความเร็วดังกล่าวสูงกว่าปกติ



รูปที่ 4-63 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดของรถไฟต่างความเร็วเทียบกับระยะทางที่ห่างจากรางรถไฟ

การวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติทำได้โดยการนำข้อมูลการสั่นไหวที่ได้ มาวิเคราะห์ด้วยวิธี Fast Fourier Transform(FFT) โดยเมื่อนำคลื่นสั่นสะเทือนจากรถไฟความเร็วสูงมาทำการวิเคราะห์ สามารถแสดงออกมาได้ดังภาพที่ 4-64 ถึง 4-67 ตามลำดับ



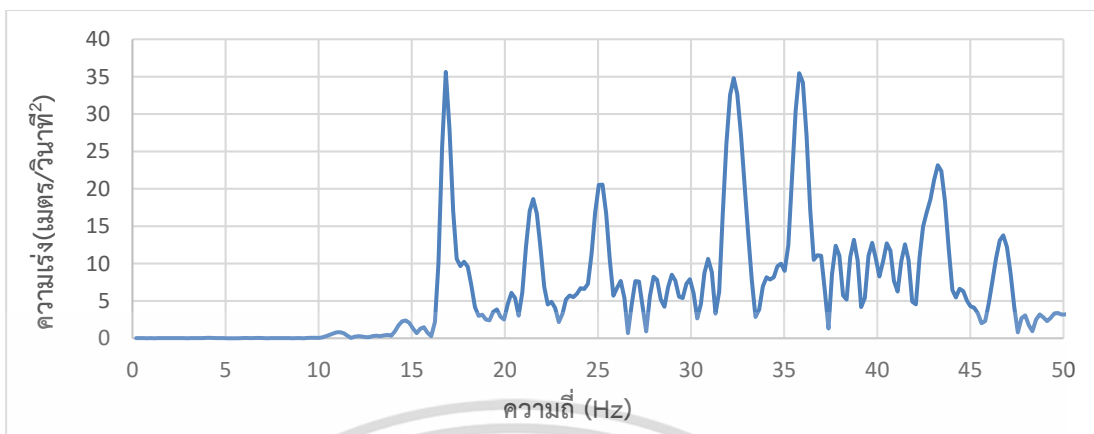
รูปที่ 4-64 กราฟแสดงการวิเคราะห์ด้วยวิธี Fast Fourier Transform(FFT)ของค่าการสั่นสะเทือนที่ได้จากแบบจำลองพลศาสตร์รถไฟความเร็ว 200 กม./ชม.

จากรูปที่ 4-64 เป็นภาพการวิเคราะห์ด้วยวิธี FFT ของสัญญาณการสั่นสะเทือนของคลื่นที่ได้จากแบบจำลองพลศาสตร์ของรถไฟความเร็ว 200 กม./ชม. โดยผลที่ได้ออกมา พบว่ามีค่าแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นอยู่ที่ความถี่ 16.8 Hz โดยมีค่าแอมพลิจูดประมาณ 350



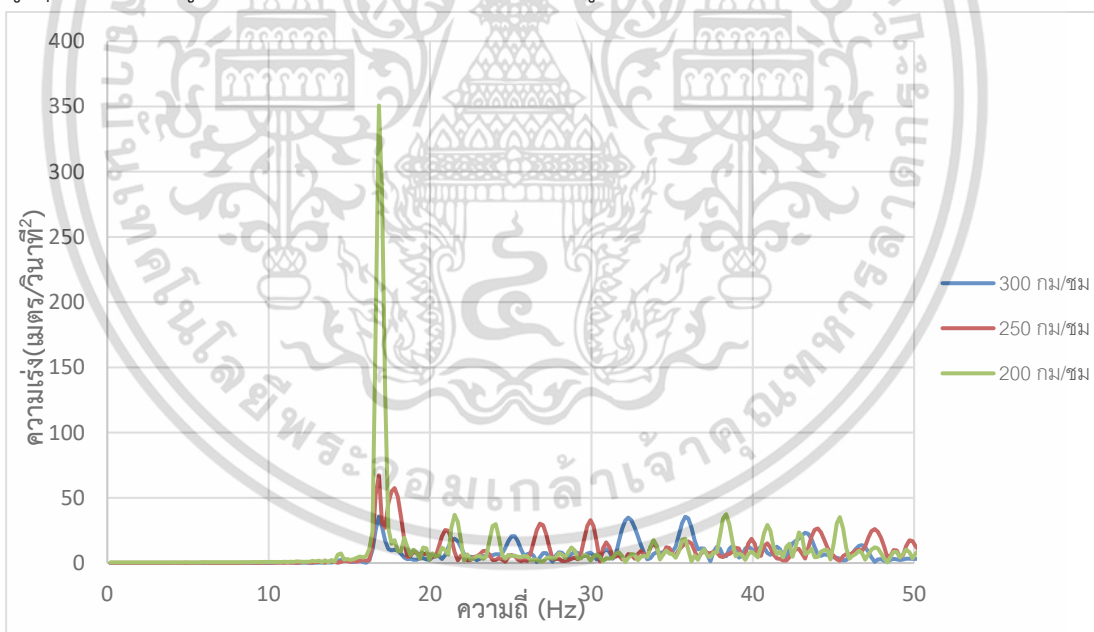
รูปที่ 4-65 กราฟแสดงการวิเคราะห์ด้วยวิธี Fast Fourier Transform(FFT)ของค่าการสั่นสะเทือนที่ได้จากแบบจำลองพลศาสตร์รถไฟความเร็ว 250 กม./ชม.

จากรูปที่ 4-65 เป็นภาพการวิเคราะห์ด้วยวิธี FFT ของสัญญาณการสั่นสะเทือนของคลื่นที่ได้จากแบบจำลองพลศาสตร์ของรถไฟความเร็ว 250 กม./ชม. โดยผลที่ได้ออกมา พบว่ามีค่าแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นอยู่ที่ความถี่ 16.8 Hz โดยมีค่าแอมพลิจูดประมาณ 67



รูปที่ 4-66 กราฟแสดงการวิเคราะห์ด้วยวิธี Fast Fourier Transform(FFT)ของค่าการสั่นสะเทือนที่ได้จากแบบจำลองพลศาสตร์รถไฟความเร็ว 300 กม./ชม.

จากรูปที่ 4-65 เป็นภาพการวิเคราะห์ด้วยวิธี FFT ของสัญญาณการสั่นสะเทือนของคลื่นที่ได้จากแบบจำลองพลศาสตร์ของรถไฟความเร็ว 300 กม./ชม. โดยผลที่ได้ออกมา พบว่ามีค่าแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นอยู่ที่ความถี่ 16.8 Hz โดยมีค่าแอมพลิจูดประมาณ 35

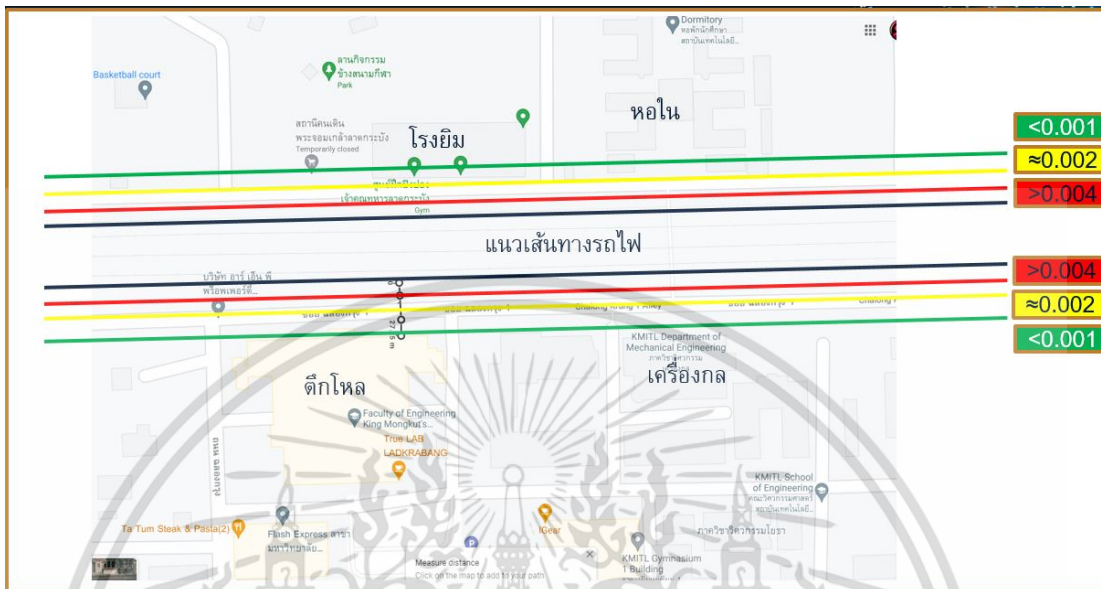


รูปที่ 4-67 กราฟแสดงการวิเคราะห์ด้วยวิธี Fast Fourier Transform(FFT)ของค่าการสั่นสะเทือนที่ได้จากแบบจำลองพลศาสตร์รถไฟความเร็วต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.6.7 แผนที่ผลกระทบในพื้นที่ สจล.

จากการค่าที่ได้จากการวิจัยข้างต้น สามารถนำค่าผลกระทบการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นมาวาด ออกเป็นแผนที่ผลกระทบได้ดังรูปที่ 4-68



รูปที่ 4-68 แผนที่คาดการณ์ผลกระทบจากการเคลื่อนผ่านของรถไฟความเร็วสูง 200 กม/ชม.

จากรูปที่ 4-68 เส้นสีแดงคือ ระยะห่างจากรางรถไฟประมาณ 0-5 ม. มีการเคลื่อนตัวของพื้นดินประมาณ 0.004 มิลลิเมตร เส้นสีเหลืองคือที่ระยะห่างจากรถไฟประมาณ 5-10 ม. มีการเคลื่อนตัวของพื้นดินที่ประมาณ 0.002 มิลลิเมตร และที่เส้นสีเขียว คือระยะ มากกว่า 20 ม. มีการเคลื่อนตัวของผิวดิน น้อยกว่า 0.001 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการศึกษาและพัฒนาทำแบบจำลองทางพลศาสตร์ เพื่อการคาดการณ์ค่าการสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟความเร็วสูงสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

#### 5.1 ผลที่ได้จากงานวิจัย

จากการเก็บข้อมูลภาคสนามของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถไฟจากอุปกรณ์เครื่องวัดความเร่ง ซึ่งจะได้ข้อมูลในรูปของเวลา (time domain) โดยมีการวัดค่าจากหลากหลายสถานีทดสอบ จากนั้นจึงเลือกสถานีทดสอบที่ 5 เป็นตัวอ้างอิงหลักในการสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบค่าการสั่นสะเทือน เนื่องจากเป็นจุดที่มีความชัดของคลื่นการสั่นสะเทือนมากที่สุด โดยสามารถสรุปผลที่ได้จากการวิจัยและพัฒนาแบบจำลองเป็นประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1. ค่าแอมพลิจูดของคลื่นการสั่นสะเทือนจะถูกลดทอนลงอย่างมีนัยสำคัญตามระยะห่างที่เพิ่มขึ้นจากรางรถไฟ
2. ที่ระยะ 10 เมตร ความเข้มข้นของคลื่นจะถูกลดทอนลงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และเข้าใกล้ 0 เมื่ออยู่ที่ระยะห่าง 18 เมตร จากรางรถไฟเป็นอย่างน้อย
3. เมื่อความเร็วของรถไฟเพิ่มขึ้น ทำให้คลื่นการสั่นสะเทือนมีค่าแอมพลิจูดที่มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดย จากการคำนวณ พบว่า ที่โครงสร้างทางรถไฟรูปแบบเดียวกันกับที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างรางรถไฟในพื้นที่ สจล. รถไฟที่ช่วงความเร็วประมาณ 200 กม/ชม จะสร้างแรงสั่นสะเทือนได้มากที่สุด
4. นอกจากปัจจัยทางด้านความเร็วของรถไฟที่จะส่งผลต่อผลกระทบที่ทำให้เกิดคลื่นการสั่นสะเทือนแล้ว ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างของเส้นทางราง ก็มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการสั่นสะเทือนด้วย

โดยผลสรุปดังกล่าวอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ใช้ คือ รถไฟที่วิ่งผ่าน มีรูปแบบภายนอก เป็นรุ่น THN ซึ่งเป็นรถไฟโดยสารชนิดเดียวกันกับที่วิ่งผ่านในพื้นที่ สจล. โดยสมมติฐานที่ว่า ให้นำหนักที่กดลงที่แต่ละล้อของรถไฟนั้นมีค่าที่เท่ากันตลอดทั้งขบวน สามารถใช้แบบจำลองเชิงพลศาสตร์ในการคาดการณ์พฤติกรรมการสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางรถไฟได้ โดยมีค่าความแม่นยำที่เชื่อถือได้ คือน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ค่าความต่างขอค่าเฉลี่ยกำลังสอง ทั้งนี้ค่าที่ได้จากการคำนวณ เป็นค่าที่ตั้งอยู่บนสมมติฐานทางอุดมคติหลายข้อ

จากการใช้แบบจำลองเชิงพลศาสตร์ในการคำนวณหาค่าการสั่นสะเทือนที่อาจเกิดขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วยาน จะพบว่า ค่าแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า การเพิ่มความเร็วดังกล่าว เป็นการเพิ่มเพียงความเร็วอย่างเดียว ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ขบวนรถไฟ หรือแม้แต่โครงสร้างทางรถไฟ โดยค่าแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วของรถไฟนั้น เป็นผลมาจากการแทรกสอดกันของคลื่นการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการกระทำของแต่ละล้อรถไฟต่อราง ที่ระยะเวลาที่แตกต่างกัน

โดยระยะที่คลื่นแรงสั่นสะเทือนจะส่งผลกระทบออกไปได้นั้น คลื่นจะถูกลดทอนลงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะ 10 เมตรจากรางรถไฟ และเข้าใกล้ 0 ที่ระยะ 18 เมตร ทั้งนี้ ค่าระยะการลดทอนดังกล่าว ถูกคำนวณภายใต้สมมติฐานที่ว่า คลื่นการสั่นสะเทือนวิ่งผ่านเนื้อดินที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวตลอดเส้นทาง โดยสมมุติให้พื้นที่ดังกล่าวเป็นดินเหนียว

## 5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

แบบจำลองเชิงพลศาสตร์ สามารถใช้ในการคาดการณ์พฤติกรรมการสั่นสะเทือนขั้นต้นของการวิ่งผ่านของรถไฟได้ โดยสามารถใช้ในการคำนวณค่าแอมพลิจูด ทั้งที่เป็นค่าความเร่ง และเป็นค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง ซึ่งสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ความเร็วของรถไฟมีผลอย่างมากต่อรูปคลื่นการสั่นสะเทือน

สามารถคาดการณ์ระยะผลกระทบจากการเคลื่อนผ่านของรถไฟความเร็วสูงขั้นต้นได้ โดยงานวิจัยนี้ ยังสามารถนำไปปรับปรุงเพิ่มเติม เพื่อการวิเคราะห์และคาดการณ์ผลที่อาจเกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวผ่านของรถไฟประเภทต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นรถไฟบรรทุกสินค้า หรือ รถไฟโดยสารที่มีรูปร่างลักษณะแตกต่างออกไปในแต่ละพื้นที่

## 5.3 การนำไปใช้ประโยชน์

พื้นที่ส่วนมากที่รถไฟที่วิ่งผ่านพื้นที่ชนบท อาทิเช่น เส้นทางรถไฟ กรุงเทพ หนองคายนั้น รางรถไฟส่วนมากจะวิ่งผ่าน เนื่องด้วยพื้นที่ในชนบทยังมีความเป็นเมืองอยู่เพียงเล็กน้อย มีโครงสร้างที่เป็นอาคารชัชซ้อนอยู่ไม่มาก แต่ในอนาคต เมื่อโครงการรถไฟฟ้าความเร็วสูงมีการก่อสร้างแล้วเสร็จ ความเจริญก็จะเติบโตขึ้นและทำให้เกิดเมืองใหม่ขึ้นตามสายทางของรางรถไฟ ทั้งนี้ รูปแบบการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนผ่านของรางรถไฟนั้นสามารถใช้แบบจำลองจากงานวิจัยนี้ ในการนำไปใช้ในการศึกษาเบื้องต้นถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับบริเวณดังกล่าว รวมไปถึงสามารถใช้ในการประกอบการตัดสินใจในการออกแบบอาคารโครงสร้างต่างๆที่จะเกิดขึ้นบริเวณโดยรอบสายทาง ไม่ว่าจะเป็นอาคารพาณิชย์หรือแม้แต่อาคารที่อยู่อาศัยของผู้คน ผลการวิจัยนี้ จะช่วยให้ผู้อยู่อาศัยและผู้ออกแบบ มีความมั่นใจในการอาศัยหรือเข้ามาทำกิจการในบริเวณโดยรอบสายทางได้อย่างปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

#### 5.4 แนวทางการพัฒนาต่อยอดผลงานในอนาคต

งานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองภายใต้สมมติฐานในอุดมคติหลายข้อ ไม่ว่าจะเป็น น้ำหนักที่ตกลง ล้อของรถไฟทั้งขบวนมีค่าเท่ากันตลอด ซึ่งในความเป็นจริง ตัวรถไฟจะมีน้ำหนักที่แตกต่างกันออกไป ในแต่ละตู้โดยสาร นอกจากนี้ ค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างทางรถไฟ ยังสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะภูมิประเทศ และรูปแบบของโครงสร้างทางรถไฟ ในอนาคต อาจนำงานวิจัยนี้ไปศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ รูปแบบโครงสร้างทางรถไฟที่แตกต่างออกไป ซึ่งมีหลายหลาย

นอกจากนั้น รูปแบบโมเดลของรถไฟเองก็มีส่วนอย่างมาก ต่อพฤติกรรมการณ์การสิ้นเปลืองของ โครงสร้างทางรถไฟ โดยในงานวิจัยนี้ ได้ใช้รูปแบบรถไฟในรุ่น THN ในอนาคตยังสามารถนำรูปแบบ โมเดลของรถไฟประเภทต่างๆมาดัดแปลงเพื่อศึกษา และพัฒนาแบบจำลองให้ทรงประสิทธิภาพมากขึ้นอีกในอนาคต



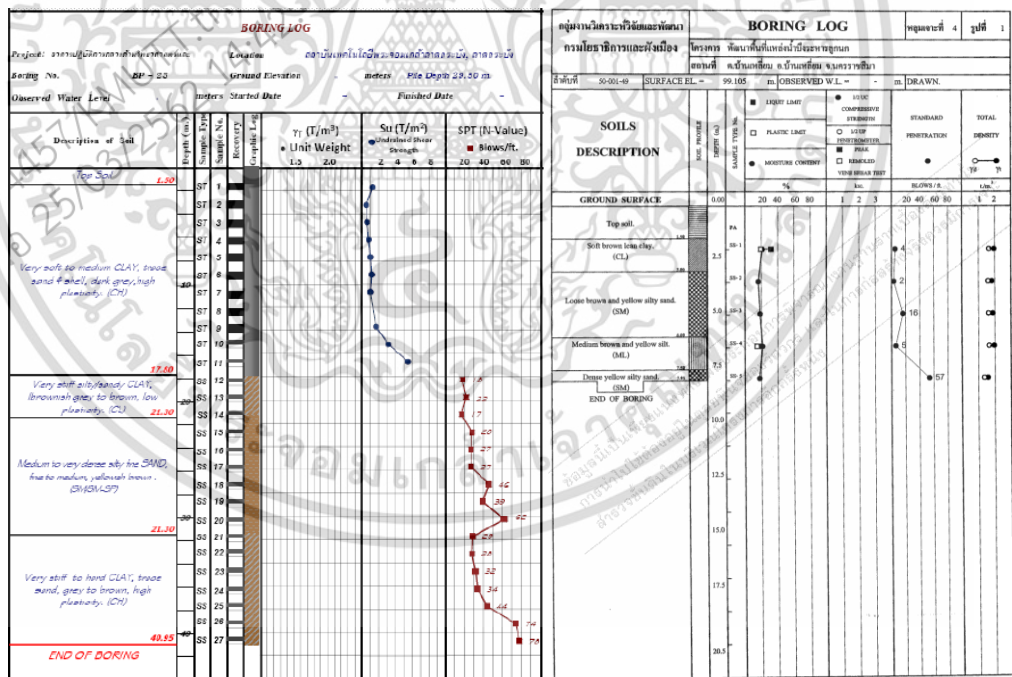
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### ข้อเสนอนแนะ

ในการวิจัยครั้งนี้ยังไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบที่อาจเปลี่ยนแปลงไป หากตัวของคลื่นการสั่นสะเทือนนั้นมีการเคลื่อนที่วกลงที่มีลักษณะแตกต่างกัน(ถนน, ดิน, ภูเขา, คลอง ฯ) อีกทั้งลักษณะของดินในแต่ละพื้นที่ก็มีความแตกต่างกัน ทั้งนี้งานวิจัยสามารถทำการต่อยอดต่อไปได้ในหลายทิศทาง ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาพฤติกรรมของตัวคลื่นความเร่ง ที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของตัวกลาง หรืออาจมีการลดทอนลงของตัวคลื่น เมื่อวิ่งผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นที่ต่างกัน

นอกจากนี้การศึกษาวิเคราะห์และคาดการณ์แรงสั่นสะเทือนของรถไฟฟ้าความเร็วสูงที่อาจส่งผลในอนาคตก็เป็นเรื่องที่มีความสำคัญ การต่อยอดงานวิจัยสมควรเป็นไปในลักษณะของการศึกษาระยะผลกระทบโดยรอบของเส้นทางรถไฟ ควรมีการจัดทำแผนที่ความเสี่ยงภัยรอบบริเวณเส้นทาง เพื่อเป็นการมอบความมั่นใจให้แก่ผู้อยู่อาศัยโดยรอบ หรือให้แก่ผู้ประกอบการที่ต้องการจะวางแผนก่อสร้างอาคารในรูปแบบต่างๆในอนาคต



รูปที่ 6-1 ตัวอย่าง boring log ดินของ เขตลาดกระบัง และ จ.นครราชสีมา

ที่มา : KMUTT, <http://www.dpt.go.th>

จากรูปที่ 7-1 แสดงลักษณะดินที่แตกต่างกันของชั้นดินสองบริเวณ ทางด้านซ้ายคือผลการทดสอบดินบริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในขณะที่ทางด้านขวาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือผลการทดสอบดินที่จังหวัดนครราชสีมา ผลที่แสดงให้เห็นแตกต่างกันอย่างชัดเจนคือลักษณะการเรียงตัวของชั้นดินของทั้งสองบริเวณ ในส่วนของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังนั้น ดินจะมีลักษณะที่อ่อนและเป็นดินเหนียว ในขณะที่ดินในจังหวัดนครราชสีมา นั้นจะแข็งและเป็นทราย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (สกพอ.) ภาพรวมโครงสร้างพื้นฐาน (2561) Retrieved July 19, 2018, from <https://www.eeco.or.th/โครงสร้างพื้นฐาน/ภาพรวมโครงสร้างพื้นฐาน>
- [2] M. Bahrekazemi (2006), “Train-induced ground vibration and its prediction”, Division of Soil and Rock Mechanics Dept. of Civil and Architectural Engineering Royal Institute of Technology, Stockholm
- [3] Madshus et al. (2000), “High-speed railway lines on soft ground: Dynamic behavior at critical train speed”, Journal of Sound and Vibration , March 2000
- [4] N. Persson (2016), “ Predicting railway-induced ground vibrations” , Department of construction sciences division of structural mechanics, Lund University, Sweden, June 2016
- [5] V. Krylov (2001), “Noise and Vibration from High-Speed Trains”, Department of Civil and Structural Engineering Nottingham Trent University
- [6] ISO 14847-International Organization for Standardization (2001), ISO/CD 14837-1, Mechanical vibration – Prediction of groundborne vibration arising from rail systems in tunnels – Part1: General guidelines.
- [7] L. Hall. (2000), “Simulations and Analyses of Train-induced Ground Vibrations”. PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2000.
- [8] M. Heckl, G. Hauck, and R. Wettschureck. (1996), “ Structure-borne Sound and Vibration from Rail Traffic” . Journal of Sound and Vibration, 193(1):175–184
- [9] M. J Lotinga (2014), “Investigating the Accuracy of a Semi-empirical Model for Rail-induced Ground/Structure-borne Noise and Vibration” , Master of Science Environmental Acoustics, University of Salford MANCHESTER, March 2014
- [10] W.M. Ewing, W.S. Jardetzky, F. Press, (1957), “Elastic Waves in Layered Media”, McGraw-Hill, New York.
- [11] L. Bergmann and H. Hatfield. (1938), “Ultrasonics and Their Scientific and Technical Applications”. G. Bell and Sons Limited
- [12] A. E. H. Love. (2015), “ Some Problems of Geodynamics” . Cambridge University Press

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Jr. F. E. Richart, Jr. J. R. Hall, et al. (1970). “Vibrations of Soils and Foundations” . Englewood Cliffs, USA: Prentice-Hall
- [14] T.G.Gutowski, C.L.Dym, (1976). “Propagation of Ground Vibration: a review”.In: Journal of Sound and Vibration 49 (2), pp. 179–193.
- [15] D.M. Hiller and G.I. Crabb, (2000). TRL Report 429: Groundborne Vibration Caused by Mechanised Construction Works. Crowthorne: Transport Research Laboratory /Highways Agency (cit. on pp. 12,17, 19, 159).,
- [16] H.-H. Hung and Y.-B. Yang, (2001). “A Review of Researches on Ground-borne Vibrations with Emphasis on Those Induced by Trains”. In: Proceedings of the National Science Council, Republic of China. Part A: Physical Science and Engineering 25, pp. 1–16
- [17] K.F. Graff, (1991). “Wave Motion in Elastic Solids” . 2nd ed. New York, USA: Dover Publications (cit. on pp. 11, 13, 160).
- [18] D. Duhamel and P. Sergent, (1998). “Active Noise Control of an Incoherent Line Source”. In: Journal of Sound and Vibration 212 (1), pp. 141–164.
- [19] International Organization for Standardization (2003), ISO 2631-2, Mechanical Vibration and Shock – Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration-Part 2: Vibration in Buildings (1 Hz-80 Hz).
- [20] R. Klæboe, I. H. Turunen-Rise, L. Hårvik and C. Madshus, (2003b) Vibrations in Dwellings from Road and Rail Traffic – Part II: Exposure-effect Relationships Based on Ordinal Logit and Logistic Regression Models, Journal of Applied Acoustics Vol. 64 pp. 89-109.
- [21] NSF, Norges Standardiseringsforbund (1999) NS 8176E, Vibration and Shock, Measurement of Vibration in Buildings from Land Based Transport and Guidance to Evaluation of its Effects on Human Beings.
- [22] U.S. Department of Transportation, (1998) High-Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment, Office of Railroad Development, report 293630-1, Washington, DC 20590, USA.
- [23] International Organization for Standardization (1997), ISO 2631-1, Vibration and Shock- Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration-Part 1: General requirements.

- [24] BVPO 724.001 (1997), Noise and Vibration from Railway Traffic (Buller och Vibrationer från spårburen linjetrafik), guidelines and practice by Banverket and Naturvårdsverket in Sweden (in Swedish).
- [25] International Organization for Standardization (2000), ISO/TS 10811-1, Mechanical Vibration and Shock-Vibration and Shock in Buildings with Sensitive Equipment- Part 1: Measurement and Evaluation.
- [26] International Organization for Standardization (2000), ISO/TS 10811-2, Mechanical Vibration and Shock-Vibration and Shock in Buildings with Sensitive Equipment- Part 2: Classification
- [27] H. Amick, (1997), “On Generic Vibration Criteria for Advanced Technology Facilities: with a Tutorial on Vibration Data Representation” , Journal of Institute of Environmental Sciences, (XL), No. 5, pp. 35-44
- [28] International Organization for Standardization (1990), ISO 4866, Mechanical Vibration and Shock – Guidelines for the Measurement of Vibrations and Evaluation of their Effects on Buildings.
- [29] G.P. Wilson, H.J. Saurenman and J.T. Nelson, (1983), “Control of Ground-Borne Noise and Vibration”, Journal of sound and vibration, 87(2), pp. 339-350.
- [30] J. T. Nelson and H.J. Saurenman, (1983) State-of-the-Art Review: Prediction and Control of Groundborne Noise and Vibration from Rail Transit, U.S. department of transportation report DOT-TSC-UMTA-83-3.
- [31] W.A. Haupt, (1978) “Isolation of vibration by Concrete Core Walls” , Proc 9th Int. Conf. Soil Mech. Found Engrg , pp. 251-256, 2, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering
- [32] D.E. Beskos, B. Dasgupta and I.G. Vardoulakis, (1986), “Vibration Isolation Using Open or Filled Trenches”, Computational Mechanics 1, pp. 43-63.
- [33] S. Ahmad and T.M. Al-Hussaini, (1991), “Simplified Design for Vibration Screening by Open and In-Filled Trenches” , Journal of Geotechnical Engineering 117(1), pp. 67-88.
- [34] L. Ljung, (1987) System Identification Theory for the User, Prentice Hall.
- [35] US Department of Transportation report (1995), Transit Noise and Vibration Impact Assessment, report DOT-T-95-16, Washington, DC 20590, USA.

- [36] International Organization for Standardization (1990), ISO 8041, Human Response to Vibration- Measuring Instrumentation
- [37] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.), มาตรฐานโครงสร้างทางรถไฟ, มกราคม 2561
- [38] L. Andersen, (2002). “Wave Propagation in Infinite Structures and Media”. PhD thesis. Aalborg University.
- [39] T.M. Dawn and C.G. Stanworth, (1979), “ Ground Vibrations from Passing Trains” , Journal of sound and vibration, 66(3), pp. 355-362.
- [40] A. Bodare, (1999), “ A simplified Model for Train Induced Ground Vibrations” , Report, Div. of Soil and Rock Mechanics, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [41] C.J.C. Jones, X. Sheng and D.J. Thompson, (2000), “Ground Vibration from Dynamic and Quasi-static Loads Moving Along a Railway Track on Layered Ground” , proceedings of the international workshop Wave 2000, Bochum, Germany, 13-15 December 2000.
- [42] G. Degrande and G. Lombart, (2000), “ High Speed Train Induced Free Field Vibrations: In situ Measurements and Numerical Modelling” , proceedings of the international workshop Wave 2000, Bochum, Germany, 13-15 December 2000.
- [43] L. Hannelius, (1974), “Svängningsrörelser i jord genom tågtrafik. Förnimmelser och effekter i byggnader” SGI (Statens Geotekniska Institut) rapport #56, 1974 Skadlig Inverkan av Vibrationer (in Swedish).
- [44] T. Fujikake, (1986), “ A Prediction Method for the Propagation of Ground Vibration from Railway Trains” , Journal of sound and vibration, 111(2), pp. 357-360.
- [45] C.J.C. Jones, (1994), “ Use of Numerical Models to Determine the Effectiveness of Anti-Vibration Systems for Railways” , Proc. Instn Civ. Engrs Transp. 105, Feb., pp. 43-51.
- [46] V. Krylov and C. Ferguson, (1994), “ Calculation of Low-Frequency Ground Vibrations from Railway Trains” , Applied Acoustics vol. 42, 199-213
- Remington, P. J. (1987), “ Wheel / rail rolling noise I: theoretical analysis” , Journal of Acoustical Society of America, 81(6), 1805-1823. .

- [47] กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม(2547), “รายงานการวิจัย เรื่อง การศึกษาผลกระทบของความสัมพันธ์จากการจราจรต่อสุขภาพประชาชนและสิ่งปลูกสร้าง”, ตีพิมพ์ ตุลาคม 2547 จำนวน 34 หน้า
- [48] DIN 4150-3 (1999), Effect of Vibration on Structures.
- [49] P. Persson, L.V. Andersen, K. Persson, P. Bucinskas, (2017), “Effect of Structural Design on Traffic-induced Building Vibrations”, Procedia Engineering, Volume 199, Pages 2711-2716.
- [50] M. Podworna, (2014), “Vibrations of Bridge / Track Structure / High-speed Train System with Vertical Irregularities of the Railway Track”, Procedia Engineering, Volume 91,2014, Pages 148-153
- [51] K. Kumar, (2018), “Basic Geotechnical Engineering”, New Age International (P) Ltd., Publishers, Dehli, India, 142 p.
- [52] A. Jarasjarungkiat, R. Wüchner and K.-U. Bletzinger, (2008), “Dynamic Analysis of Inflatable Membranes Coupled with Enclosed Fluid”, 8th.World Congress on Computational Mechanics (WCCM8) and the 5th. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008), Lido Island in Venice , Italy, 30 June - 4 July 2008;
- [53] M. Monteiro, (2009), “Vibrations Induced by Trains”. Case Study: Extension of Track Platform of Gare do Oriente.
- [54] I. Stefan, M. Budescu, M. Movilă, (2017), “Vibration Propagation in Adjacent Areas of Railways, Bulletin of the Polytechnic Institute of Lasi” - Construction & Architecture Section”, Vol. 67 Issue 4, p129-142. 14p.
- [55] H.M. Miller, I. Hanson, (2005), “High Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment”, U.S. Department of Transportation Federal Transit Administration; October 2005
- [56] P. Warnitchai, (2018). “Development of Seismic Design Requirements for Buildings in Bangkok against the Effects of Distant Large Earthquakes.”
- [57] W. Powrie, L. Le Pen, (2016), “A Guide to Track Stiffness, Milton Keynes”, The Permanent Way Institution.
- [58] K. Jenkins, P. Wiseman, (1990), “A Statistical Investigation of the Effect of Subgrade Stiffness on Rate of Track”, Derby: British Rail.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [59] João Corrêa Mendes da Silva Ribeiro (2014), “Impact of Vertical Track Stiffness Variations in Railway Infrastructure Maintenance”, TECNICO LISBOA
- [60] X.D.Li Martin and E.G. Berggren (2009), “A Study of the Effect of Global Track Stiffness and its Variations on Track Performance: Simulation and Measurement”, Banverket, Operations Division, Infrastructure, Track & Civil Engineering SE-781 85 Borlange, Sweden, 9th International Heavy Haul Conference
- [61] S. Kim (2011), “Experimental Evaluations of Track Structure Effects on Dynamic Properties of Railway Bridges”, Journal of Vibration and Control, October 2011
- [62] M. Wehbi (2017), “Optimisation of Track Stiffness on the UK Railways”, University of Birmingham & Network Rail
- [63] C. Madshus, B. Bessason and L. Hårvik, (1996), “Prediction Model for Low Frequency Vibration from High Speed Railways on Soft Ground”, Journal of sound and vibration, 193 (1), pp 195-203.
- [64] L. Puzavac, Z. Popović, L. Lazarević, (2012), “Influence of Track Stiffness on Track Behaviour Under Vertical Load”. Promet – Traffic&Transportation, 24(5), pp. 405-412.

## ภาคผนวก



รูปที่ 7-1 หมุดวัดแรงสั่นสะเทือน



รูปที่ 7-2 เครื่องรับสัญญาณ data logger

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7-3 ชุดอุปกรณ์ภาคสนาม



รูปที่ 7-4 การลงพื้นที่เก็บข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

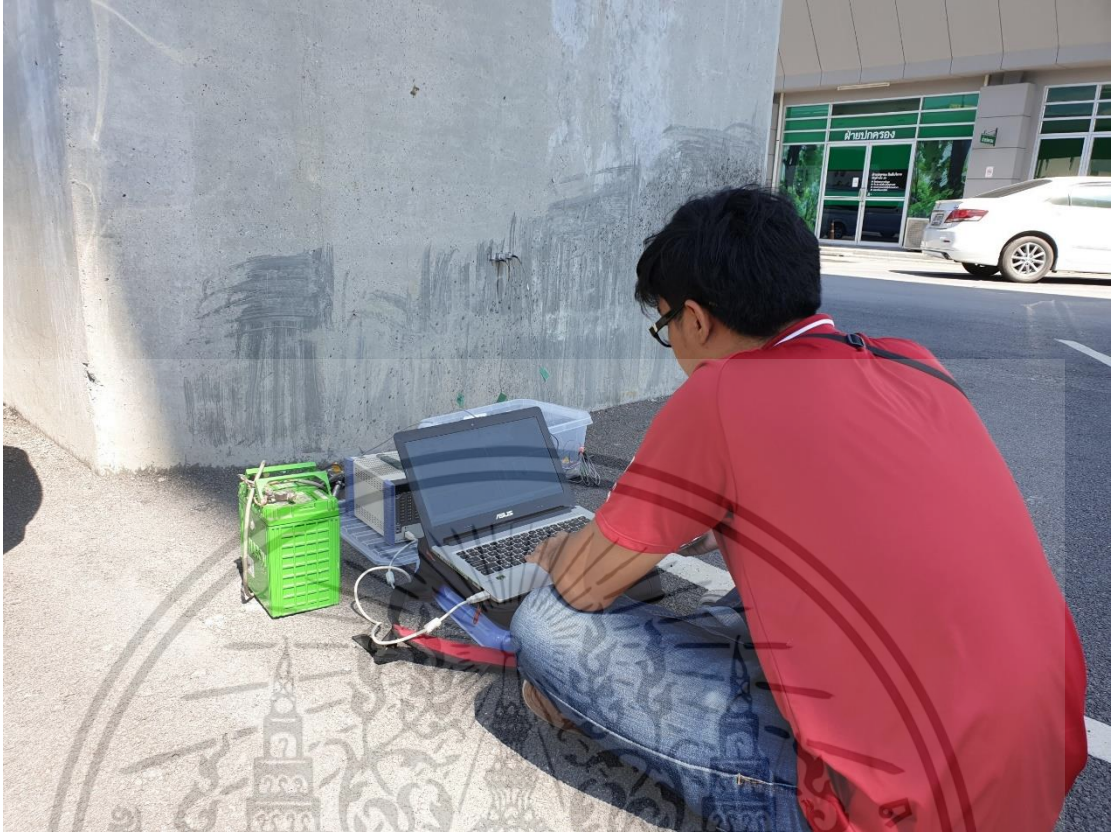


รูปที่ 7-5 การลงพื้นที่เก็บข้อมูลในพื้นที่ตัวอย่าง



รูปที่ 7-6 การติดตั้งอุปกรณ์กับฐานเสาไฟฟ้าแอร์พอร์ทลิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7-7 การเก็บค่าคลื่นตัวอย่างจากรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์



รูปที่ 7-8 การติดตั้งหัววัดความเร่งเข้ากับหมุดวัดแรงสั่นสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7-9 การติดตั้งหมุดวัดแรงสั่นสะเทือน



รูปที่ 7-10 การติดตั้งหัววัดความเร่งเข้ากับหมอนรางรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

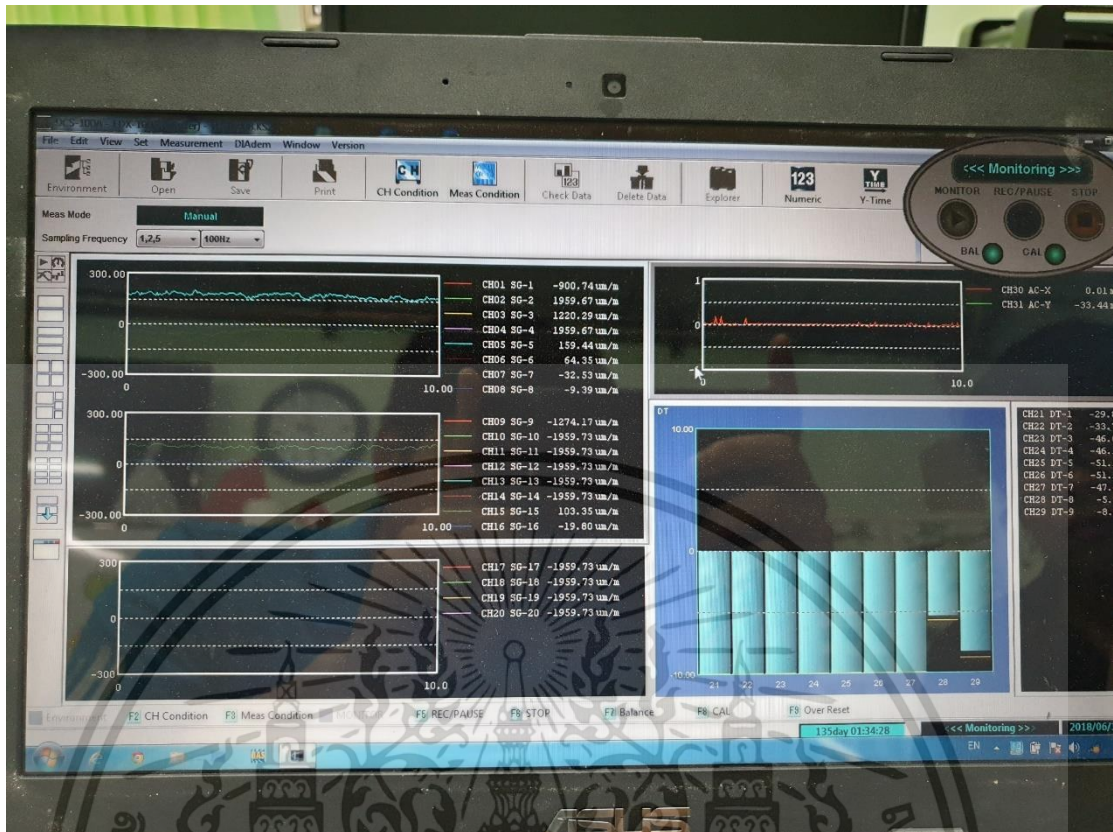


รูปที่ 7-11 การติดตั้งอุปกรณ์วัดความแรงกับเสาธงไฟฟ้า BTS



รูปที่ 7-12 การติดตั้งอุปกรณ์กับฐานเสาธงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7-13 การแสดงผลค่าที่วัดได้จากหัววัดความเร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นาย บุญยกร วรवास  
วัน เดือน ปีเกิด 13 กันยายน 2538 ที่ กรุงเทพมหานคร  
ที่อยู่ 125/25 หมู่บ้านภัสสร9ซอย9 ถ.วิภาวดีรังสิต ซอยวิภาวดี 60 แยก12  
แขวงตลาดบางเขน เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ 10210 โทร.095-246-0555  
ประวัติการศึกษา 2561 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย  
พ.ศ.2562 งานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของโครงสร้างที่มีสาเหตุจากรถไฟ (การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้