

การวิเคราะห์ความสั่นสะเทือนต่อการโดยสารของแบบจำลองรถจักร 5 องศาอิสระ

Analysis of Ride Comfort for 5 Degree of Freedom Locomotive

Model



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

หลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Analysis of Ride Comfort for 5 Degree of Freedom Locomotive Model



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN RAIL TRANSPORTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF THECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึ2020เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางราง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์ความสั่นสะเทือนสบายต่อการโดยสารของแบบจำลองรถจักร 5 องศาอิสระ

Analysis of Ride Comfort for 5 Degree of Freedom Locomotive Model

ผู้จัดทำ

1. นาย กิตติธัช เกิดสุวรรณ รหัสประจำตัว 60010066
2. นาย จิรายุ สมประสงค์ รหัสประจำตัว 60010153
3. นาย สรวิชัย แสงรัตน์ รหัสประจำตัว 60011027



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การวิเคราะห์ความเสถียรของสายต่อการโดยสารของแบบจำลองรถจักร 5 องศาอิสระ

นายกิตติธัช	เกิดสุวรรณ	60010066
นายจิรายุ	สมประสงค์	60010153
นายสรวิชัย	แสงรัตน์	60011027
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร	อาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา 2563		

บทคัดย่อ

รถจักรไฟฟ้าเป็นต้นกำลังที่ใช้ลากจูงรถโดยสารและรถบรรทุกสินค้า ซึ่งต้องออกแบบให้มีสมรรถนะในการลากจูงที่ดี รวมถึงต้องมีระบบรองรับที่มีสมรรถนะดี ดังนั้น วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ จึงได้มีจัดการแข่งขันการออกแบบรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กในประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2563 (Electric Locomotive Design Contest 2020) ทางหลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ทำการออกแบบรถจักรไฟฟ้าเพื่อเข้าร่วมการแข่งขัน โดยโครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการออกแบบและพัฒนาระบบรองรับกันสะเทือนของรถจักรไฟฟ้า การออกแบบระบบกันสะเทือนอ้างอิงตามข้อกำหนดดัชนีการโดยสาร (Ride Index) ตามมาตรฐาน EN12299 และ ISO2631-1 การออกแบบใช้วิธีการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบหลายองศาอิสระเพื่อหาแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนและความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองรถจักรไฟฟ้า 5 องศาอิสระ ที่เคลื่อนที่บนทางตรงและผิวรางมีความขรุขระเป็นฟังก์ชันไซน์ซอซายด์ ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของรถจักรไฟฟ้าประกอบด้วย การเคลื่อนที่ในแนวตั้งของรถจักร การเคลื่อนที่ในทิศทางตามแนวยาวของชุดล้อและเพลาน้ำ การเคลื่อนที่ในทิศทางตามแนวยาวของชุดล้อและเพลาลูก การเคลื่อนที่แบบกระดกของตัวรถจักร และการเคลื่อนที่ในทิศทางแนวตามยาวของรถจักร และค่าเหล่านี้ถูกนำมาประเมินดัชนีความนุ่มนวลของการโดยสาร จากนั้นทำการสร้างช่วงเงื่อนไขของค่าคงที่ตัวหน่วงและค่านิจสปริงที่ทำให้ดัชนีความเสถียรของการโดยสารอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดหรือมีค่าไม่เกิน 3.25 ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบค่าคงที่ตัวหน่วงและค่านิจสปริงของระบบกันสะเทือนรถจักรไฟฟ้า เพื่อใช้ในการแข่งขันต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Analysis of Ride Comfort for 5 Degree of Freedom Locomotive Model

Kittitouch	Koedsuwan	60010066
Jirayu	Somprasong	60010153
Soravit	Saengrat	60011027
Assoc.Prof. Dr. Monsak Pimsarn	Advisor	
Year 2020		

Abstract

Electric locomotive is generally used for hauling passenger coaches and freight cars and must be designed to have good tractive performance and well-performed suspension system. Therefore, the Engineering Institute of Thailand under His Majesty the King's Patronage held a miniature electric locomotive design competition 2020 in Thailand. The rail transport engineering curriculum, the Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, had designed an electric locomotive to participate in the competition. This project is a part of the design and development of suspension systems for the electric locomotive. The suspension system design for the electric locomotive is based on the ride index, complied with the EN12299 and ISO2631-1 standards. The design method was performed by using multi degree of freedom vibration analysis to evaluate the natural frequencies and vibration amplitudes of the 5 degree of freedom locomotive model, travelling on a straight track with vertical sinusoidal irregularity. The analyzed results consist of vertical motion of a carbody, longitudinal motion of leading wheelset, longitudinal motion of trailing wheelset, pitch motion of a carbody and longitudinal motion of a carbody. Additionally, these values were employed to assess the ride comfort. Later, the ranges of suspension stiffness and damping constants, leading to required ride comfort or lower than 3.25, were constructed and can be of practical use for railway challenge competition.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ด้วยความเอาใจใส่ การให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือในส่วนต่าง ๆ จาก ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา อันเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบคุณคุณ ธนัชชา ชูพจน์เจริญ ที่ให้คำปรึกษาด้านโปรแกรม MATLAB ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางรางที่ให้ความรู้ในการทำปริญญาานิพนธ์นี้ ในการสนับสนุนข้อมูลต่าง ๆ ในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ และต้องขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณเป็นอย่างสูง และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



นาย กิตติธัช

นาย จิรายุ

นาย สรวินธุ์

เกิดสุวรรณ

สมประสงค์

แสงรัตน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{III} only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของรถไฟ.....	6
2.3.1.1 ส่วนประกอบของทางรถไฟ.....	6
2.3.1.2 โครงสร้างเครื่องยึดเหนี่ยวราง.....	7
2.3.1.3 ระบบขับเคลื่อนของตัวรถโดยสาร.....	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{IV} only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3.2	ทฤษฎีพื้นฐานของรูปแบบรางรถไฟ.....	8
2.3.3	ทฤษฎีพื้นฐานของล้อรถไฟ.....	12
2.3.4	ทฤษฎีพื้นฐานของระบบกันสะเทือน	13
2.3.5	ระบบการสั่นสะเทือนหลายองศาความอิสระ: การสั่นสะเทือนที่ไม่มีตัวหน่วงอิสระ (Multiple Degree of freedom System: Undamped Free Vibration).....	19
2.3.6	ระบบการสั่นของฐานองศาอิสระเท่ากับหนึ่ง	20
	(One-degree-of-freedom base excitation).....	20
2.3.7	แบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไฟ (Dynamic Model of a Vehicle).....	23
2.3.8	การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของรถไฟ.....	23
2.3.9	ดัชนีการโดยสารรถไฟของสเปอร์ลิง (Sperling's Ride Index)	25
2.3.10	ปฏิกิริยาต่อความสั่นสะเทือนต่อสภาพแวดล้อมที่มีการสั่นสะเทือน	28
	(Comfort Reaction to Vibration Environments).....	28
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงาน.....	30
3.1	บทนำ.....	30
3.2	แบบจำลองรถจักรไฟฟ้า.....	32
3.2.1	ส่วนประกอบแบบจำลองของรถจักร.....	32
3.2.1.1	ตู้รถของแบบจำลองของรถจักร.....	32
3.2.1.2	ชุดล้อและเพลลาของแบบจำลองของรถจักร.....	32
3.2.1.3	ระบบกันสะเทือนของแบบจำลองของรถจักร.....	34
3.3	การวิเคราะห์หาผลเฉลยของสมการการสั่นสะเทือนแบบหลายองศาอิสระ	34
3.3.1	สมมติฐานในการดำเนินงาน.....	34
3.3.2	การระบุมิติและพารามิเตอร์ภายในระบบของแบบจำลอง	34

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 3.3.3 ระบบสมการการเคลื่อนที่สำหรับแบบจำลองรถไฟ 5 องศาอิสระ 36

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

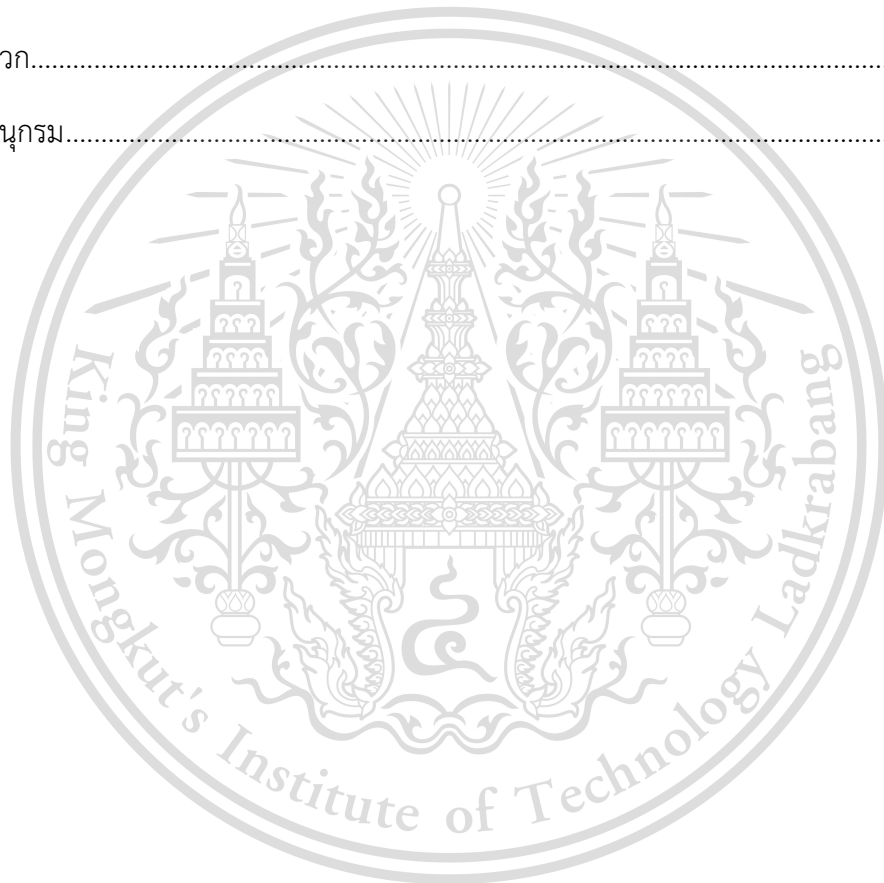
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3.4 การสร้างชุดคำสั่งสำหรับแบบจำลอง 5 องศาอิสระด้วยโปรแกรม MATLAB.....	39
3.3.4.1 กำหนดค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์.....	39
3.3.4.2 การหาช่วงสำหรับสปริงและตัวหน่วงที่เหมาะสมต่อระบบ	40
3.3.4.3 การเขียนชุดคำสั่งด้วยโปรแกรม MATLAB สำหรับการแก้หาผลเฉลยของสมการ	41
สำหรับแบบจำลองรถไฟ 5 องศาอิสระ	41
3.3.5 การประมวลผลหาค่าดัชนีการโดยสาร	42
3.3.6 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในแนวนอนเหนือจากแนวตั้ง	42
3.3.7 การแสดงผลการประมวลผล	42
3.4 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้	42
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์ผล	44
4.1 บทนำ.....	44
4.2 การวิเคราะห์หาช่วงของค่านิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วงที่เหมาะสมต่อชุดสปริงและตัวหน่วงในแนวตั้ง	44
4.3 การตรวจสอบชุดคำสั่งการประมวลผลหาผลเฉลยจากระบบ 1 องศาอิสระ	48
4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์และแนวโน้มของระบบ 1 องศาอิสระและ 5 องศาอิสระ.....	48
4.5 การวิเคราะห์ค่าดัชนีการโดยสารจากเงื่อนไขของการออกแบบชุดสปริงและตัวหน่วงสำหรับการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง	54
4.5.1 การวิเคราะห์ค่าดัชนีการโดยสารด้วยค่าขอบของค่านิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วง.....	54
4.5.2 การเลือกและวิเคราะห์สปริงและตัวหน่วงเพื่อการออกแบบชุดสปริงและตัวหน่วงของระบบจำลอง.....	56
4.6 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในแนวอื่น ๆ ของแบบจำลองรถไฟระบบ 5 องศาอิสระ.....	63
4.6.1 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของชุดล้อและเพลานำ (Leading Wheelset) และชุดล้อและเพลาลำตาม (Trailing Wheelset) ในทิศทางตามแนวยาวของรถจักร	65
4.6.2 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของตุ้รถสำหรับการกระดกของรถจักร	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.3 การวิเคราะห์การสันเสทือนของตุ้รลสำหรับในทลศทงตามแนวยวของรถจ้กร.....	73
บทที่ 5 สรุปลลการด้าเนลงาน	77
5.1 สรุปลลการด้าเนลงาน.....	77
5.2 วลจลรณัปลลการทลลล.....	78
5.3 ป้ญหจกการศลศกษา	78
5.4 ล้อเสนอแนะสำหรับแนวทงในการศลศกษาในอนาคด.....	79
ภาคผนวก.....	82
บรรณานุกรม.....	95



เอกสารน้เป็นเอกสารท้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพ้อการศลศกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้น้าไปล้ประยอชนด้าเนลการค้
ไม่ว่ากรณีใดๆท้สงล้น ล้อท้งห้ามมิให้ด้ดเปลลงเน้อหา และด้ออ้างล้ถึงเจ้าของเอกสารท้ลลคร้ท้มีการน้าไปล้

This material is reserved for educational use^{vii} only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
ตารางที่ 2.1 แสดงความหมายของตัวแปรต่าง ๆ ในระบบ	17
ตารางที่ 2.2 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ของแผนภาพแบบจำลองการกระตุ้นของส่วนฐาน	20
ตารางที่ 2.3 ค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนักของความเร่งในช่วงความถี่กระตุ้นต่าง ๆ	26
ตารางที่ 2.4 ตารางประเมินการโดยสาร – คุณภาพการเดินทาง.....	27
ตารางที่ 2.5 ตารางประเมินการโดยสาร – ความนุ่มนวลหรือความสบายในการโดยสาร	28
ตารางที่ 2.6 ตารางความเร่งการสั่นสะเทือน ที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้	29
ตารางที่ 3.1 หมายเลขพร้อมชื่อของชิ้นส่วนต่าง ๆ	33
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของระบบ.....	35
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรแรงของระบบ	36
ตารางที่ 3.4 ค่าต่าง ๆ ของแต่ละตัวแปร.....	39
ตารางที่ 4.1 ค่าต่าง ๆ ของแต่ละตัวแปรสำหรับการทดสอบการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในแนวตั้ง	49
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการปรับเปลี่ยนค่าครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างชุดล้อและเพลลาเพื่อให้ได้ค่าของแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนแต่ละค่า.....	52
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงข้อมูลจำเพาะของสปริงที่เลือกมา.....	59
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงข้อมูลจำเพาะของตัวหน่วงที่เลือกมา	60
ตารางที่ 4.5 ค่าต่าง ๆ ของแต่ละตัวแปรแบบครบทุกตัว	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป

รูปที่	หน้าที่
รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางของโครงสร้างทาง	6
รูปที่ 2.2 เครื่องยึดเหนี่ยวราง.....	7
รูปที่ 2.3 การทำงานของระบบจ่ายไฟส่งกำลัง.....	8
รูปที่ 2.4 ขนาดและมิติสำคัญของรางรถไฟมาตรฐาน BS (BS 100 Lb A) ที่ รฟท. ใช้.....	9
รูปที่ 2.5 ขนาดและมิติสำคัญของรางรถไฟมาตรฐาน UIC (UIC 54) ที่รถไฟฟ้ามหานครใช้.....	10
รูปที่ 2.6 ขนาดและมิติสำคัญของรางรถไฟมาตรฐาน UIC (UIC 60) ที่รถไฟแอร์พอร์ตลิงก์ใช้.....	10
รูปที่ 2.7 ขนาดรางที่มีใช้ในทางรถไฟของ รฟท.	11
รูปที่ 2.8 รางรถไฟที่ใช้ในปัจจุบันเป็นแบบฐานรางแผ่กว้าง	11
รูปที่ 2.9 การยึดรางรถไฟกับหมอนโดยใช้ตะปูราง.....	11
รูปที่ 2.10 ขนาดทางรถไฟมาตรฐานต่าง ๆ	12
รูปที่ 2.11 องค์ประกอบของล้อ.....	13
รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของโบกี้.....	13
รูปที่ 2.13 การสันสะท้อนของรถไฟ 8 ล้อ.....	14
รูปที่ 2.14 การวางตำแหน่งของรถไฟ 8 ล้อ.....	15
รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะอย่างง่ายของโบกี้.....	15
รูปที่ 2.16 แสดงแบบจำลองที่ใช้ศึกษาการเคลื่อนที่ของส่วนแคร่รถไฟด้านบน	15
รูปที่ 2.17 แสดงแบบจำลองที่ใช้ศึกษาการเคลื่อนที่ของส่วนแคร่รถไฟด้านหน้า	16
รูปที่ 2.18 แสดงแบบจำลองที่ใช้ศึกษาการเคลื่อนที่ของส่วนแคร่รถไฟด้านข้าง	16
รูปที่ 2.19 ตะเข้ที่ประแจซึ่งทำให้การสั่นเพิ่มมากขึ้น.....	18
รูปที่ 2.20 ระบบการรับน้ำหนักของรถไฟ	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปที่ 2.21 (a) แบบจำลองการกระตุ้นของส่วนฐาน (Base) จำลองการเคลื่อนที่ของวัตถุของมวล m ที่ถูกกระตุ้นโดยการกระตุ้นแบบฮาร์มอนิกที่จะถูกกำหนดด้วยตัวสปริงและตัวหน่วง (b) พังวัตถุอิสระของแบบจำลองการกระตุ้นของส่วนฐานของ (a).....	20
รูปที่ 2.22 ค่าการส่งผ่านการกระตุ้น (Displacement Transmissibility) ในรูปของฟังก์ชันของอัตราส่วนความถี่ แสดงให้เห็นว่ามีการกระตุ้นแบบไร้มิติ $\frac{X}{Y}$ แตกต่างกันอย่างใดตามความถี่ของการเคลื่อนที่ส่วนฐานเพิ่มขึ้นสำหรับอัตราส่วนความถี่ที่ต่างกัน	22
รูปที่ 2.23 แบบจำลองการสั่นสะเทือนของรถไฟที่มีระดับความอิสระเท่ากับ 6	24
รูปที่ 2.24 แบบจำลองการสั่นสะเทือนของรถไฟแบบครึ่งคัน ที่มีระดับความอิสระเท่ากับ 2	25
รูปที่ 3.1 แสดงแผนภูมิของวิธีการดำเนินงาน	31
รูปที่ 3.2 หมายเลขพร้อมตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นส่วนของรถไฟแบบ 2 เพลาล้อ.....	33
รูปที่ 3.3 แผนภาพของรถไฟแบบ 2 ชุดล้อและเพลลา พร้อมตัวแปรและพิกัดต่าง ๆ.....	35
รูปที่ 3.4 แสดงแผนภาพวัตถุอิสระ (Free Body Diagram) ของแบบจำลองรถไฟระบบ 5 องศาอิสระ. 36	
รูปที่ 3.5 แสดงแผนภาพจลนศาสตร์ (Kinematic Diagram) ของแบบจำลองรถไฟระบบ 5 องศาอิสระ 37	
รูปที่ 3.6 ภาพ 3 มิติของแบบจำลองตู้รถไฟเปล่าที่ใช้ในการอ้างอิง.....	40
รูปที่ 3.7 ภาพ 3 มิติของแบบจำลองชุดล้อและเพลลาที่ใช้ในการอ้างอิง	40
รูปที่ 3.8 แผนภาพของรถไฟแบบครึ่งคัน พร้อมตัวแปรและพิกัดต่าง ๆ	41
รูปที่ 4.1 การแสดงผลของกราฟการส่งผ่านการกระตุ้นจากล้อสู่ตู้รถ โดยเป็นการเปรียบเทียบกับระหว่างค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการกระตุ้นของการสั่นและอัตราส่วนความถี่สำหรับระบบ 1 และ 5 องศาอิสระ 50	
รูปที่ 4.2 การแสดงผลของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดการกระตุ้นของการสั่นสะเทือนของตู้รถที่ความเร็ว 0.1 km/hr กับค่าครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างเพลลา	53
รูปที่ 4.3 การแสดงผลของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการโดยสารกับค่าความเร็วของรถจักร มีการแสดงช่วงของค่าความสะทอนสบายการโดยสารให้เห็นภาพอย่างชัดเจน	55
รูปที่ 4.4 แผนภาพวาดของล้อรถไฟที่ออกแบบไว้สำหรับการแข่งขัน Railway Challenge.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ที่ถูกต้องและเป็นไปได้อย่างสมบูรณ์ภายใต้เงื่อนไขการใช้งาน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปที่ 4.6 แสดงถึงการระบุพิกัดต่าง ๆ สำหรับสปริง	59
รูปที่ 4.7 แสดงถึงการระบุพิกัดต่าง ๆ สำหรับตัวห่วง.....	60
รูปที่ 4.8 การแสดงผลของกราฟการส่งผ่านการกระจัดจากล้อสู่ตุ้รถ โดยเป็นการเปรียบเทียบกับระหว่าง ค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการกระจัดของการสั่นสะท้อนและความเร็วของรถจักรสำหรับค่านิจสปริงและ ค่าคงที่ความหน่วงที่เลือกเอาไว้.....	61
รูปที่ 4.9 การแสดงผลของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการโดยสารกับค่าความเร็วของรถจักร สำหรับค่านิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วงที่เลือกเอาไว้	62
รูปที่ 4.10 พฤติกรรมการสั่นสะท้อนตามยาวของชุดล้อและเพลาน้ำและชุดล้อและเพลาทามที่ความเร็ว ของรถจักร 6 km/hr	65
รูปที่ 4.11 พฤติกรรมการสั่นสะท้อนตามยาวของชุดล้อและเพลาน้ำและชุดล้อและเพลาทามที่ความเร็ว ของรถจักร 6 km/hr เฉพาะช่วงที่มีการสั่นสะท้อนแบบคงตัว.....	66
รูปที่ 4.12 พฤติกรรมการสั่นสะท้อนตามยาวของชุดล้อและเพลาน้ำและชุดล้อและเพลาทามที่ความเร็ว ของรถจักร 10 km/hr.....	66
รูปที่ 4.13 พฤติกรรมการสั่นสะท้อนตามยาวของชุดล้อและเพลาน้ำและชุดล้อและเพลาทามที่ความเร็ว ของรถจักร 10 km/hr เฉพาะช่วงการสั่นสะท้อนแบบคงตัว	67
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของการสั่นสะท้อนตามแนวยาวเทียบกับความเร็วของ รถจักรของชุดล้อและเพลาทีช่วงการสั่นสะท้อนแบบคงตัว	68
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งการสั่นสะท้อนตามแนวยาวเทียบกับความเร็วของรถจักร ของชุดล้อและเพลาทีช่วงการสั่นสะท้อนแบบคงตัว.....	68
รูปที่ 4.16 พฤติกรรมการสั่นสะท้อนแบบกระดกของตุ้รถ ที่ความเร็วของรถจักร 10 km/hr	70
รูปที่ 4.17 พฤติกรรมการสั่นสะท้อนแบบกระดกของตุ้รถ ที่ความเร็วของรถจักร 10 km/hr เฉพาะ ช่วงการสั่นสะท้อนแบบคงตัว	70
รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมการสั่นสะท้อนแบบกระดกเทียบกับความเร็วของรถจักรของตุ้ รถที่ช่วงการสั่นสะท้อนแบบคงตัว	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{XI} only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเชิงมุมของการสั่นสะเทือนแบบกระดกเทียบกับความเร็วของรถจักรของตุ้รถที่ช่วงการสั่นสะเทือนแบบคงตัว	72
รูปที่ 4.20 พฤติกรรมการสั่นสะเทือนตามยาวของตุ้รถ ที่ความเร็วของรถจักร 8 km/hr	73
รูปที่ 4.21 พฤติกรรมการสั่นสะเทือนตามยาวของตุ้รถ ที่ความเร็วของรถจักร 8 km/hr เฉพาะช่วงการสั่นสะเทือนแบบคงตัว.....	74
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการจัดของการสั่นสะเทือนตามแนวยาวเทียบกับความเร็วของรถจักรของตุ้รถที่ช่วงการสั่นสะเทือนแบบคงตัว.....	75
รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งการสั่นสะเทือนตามแนวยาวเทียบกับความเร็วของรถจักรของตุ้รถที่ช่วงการสั่นสะเทือนแบบคงตัว.....	75
รูปที่ ก.1 แผนภาพของรถไฟแบบครึ่งคัน พร้อมตัวแปรและพิกัดต่าง ๆ สำหรับการวิเคราะห์ระบบ 1 องศาอิสระ	83
รูปที่ ค.1 แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งสำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบ 1 องศาอิสระ	86
รูปที่ ง.1 แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งสำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบ 5 องศาอิสระ.....	88
รูปที่ จ.1 แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งสำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบ 5 องศาอิสระเฉพาะการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{XII} only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการใช้งานระบบขนส่งทางรางนั้น มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อความเร็วและความสะดวกสบายต่อการคมนาคมขนส่งของผู้โดยสาร ดังนั้นในปฏิญญาพันธบัตรฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการศึกษา การสั่นสะเทือนของระบบกันสั่นสะเทือนสำหรับรถจักรไฟฟ้า (Electric Locomotive Suspension) ของตู้รถไฟ (Carbody) ในขณะที่วิ่งบนรางในทางตรง โดยวิธีการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบหลายองศาอิสระ ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของการสั่นสะเทือนของตู้รถ อันเป็นผลมาจากการส่งผ่านการสั่นสะเทือนของระบบกันสะเทือนที่เกิดจากพื้นผิวทาง ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อนำค่าความถี่และแอมพลิจูดการสั่นมาประเมินการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง (Vertical Motion) และในแนวตามยาว (Longitudinal Motion) ในรูปของดัชนีการโดยสาร (Ride Index) โดยทำการสร้างแบบจำลองของรถไฟขึ้นมา ซึ่งแบบจำลองดังกล่าว เป็นแบบจำลองรถจักรที่มี 5 องศาอิสระโดยอ้างอิงจากข้อกำหนดของ IMechE Railway Challenge ซึ่งกำหนดให้มีการออกแบบที่ความเร็ว 15 km/hr และอ้างอิงค่าดัชนีความสะดวกสบายจากมาตรฐาน EN 12299:2009 และ ISO 2631-1 มาใช้ในการออกแบบ และพิจารณา ค่าดัชนีการโดยสาร จากนั้นวิเคราะห์หาปัจจัยจากผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินงานเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบกันสะเทือนของรถจักร

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อออกแบบชุดคำสั่งการประมวลผลที่ใช้ในการหาสมการหาผลเฉลยของแบบจำลองระบบ 5 องศาอิสระ

1.2.2 เพื่อศึกษาหาช่วงของค่านิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วงที่เหมาะสมต่อระบบที่พิจารณา

1.2.3 เพื่อศึกษาในกรณีที่ทางรถไฟมีลักษณะของความผิดปกติของผิวทางเป็นฟังก์ชันคลื่นไซน์ฮอยด์ (Sinusoidal Function Irregularity) ว่ามีความสัมพันธ์กับตัวโครงสร้างของแบบจำลองและส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของระบบอย่างไร

1.2.4 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบชุดคำสั่งเพื่อประเมินค่าดัชนีการโดยสารสำหรับความ

เอกสารนี้เป็นสะดวกสบายในการโดยสาร (Ride Comfort) การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.2.5 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนในแนวอื่น ๆ นอกเหนือจากการสั่นสะเทือนในแนวตั้งของแบบจำลองระบบ 5 องศาอิสระ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1.3.1. ชิ้นส่วนต่าง ๆ ของระบบกันสะเทือนของตัวรถจักรไฟฟ้า (Electric Locomotive) ประพฤติตัวเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) ยกเว้นตัวสปริงและตัวหน่วง ที่มีการยืดหยุ่น (Flexible) ได้

1.3.2 ตัวทางมีความสมบูรณ์ และประพฤติตัวเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body)

1.3.3 การสั่นสะเทือนของตัวรถจักรมาจากการความขรุขระของพื้นผิวราง (Track Irregularity) และรางทั้งสองข้างมีผิวเหมือนกัน

1.3.4 สำหรับการคำนวณค่าความเสถียรในการโดยสาร กำหนดให้ผลลัพธ์มีค่าเท่ากันในทุกบริเวณของรถโดยสาร

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 ความเร็วของรถไฟไม่เกิน 15 *km/hr* โดยอ้างอิงจากข้อกำหนดการแข่งขัน IMechE Railway Challenge

1.4.2 ทางรถไฟสำหรับการวิเคราะห์จะเป็นทางตรงเท่านั้น

1.4.3 เป็นการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม MATLAB ร่วมกับการบันทึกผลด้วยโปรแกรม Microsoft Excel

1.4.4 การวิเคราะห์นี้ไม่ได้คำนึงถึงปัจจัยด้านอากาศพลศาสตร์ และรูปทรงเรขาคณิตของตัวรถโดยสาร รวมทั้งของล้อและรางด้วยเช่นกัน

1.4.5 ไม่คำนึงถึงการยุบตัวของหมอนรองรางรถไฟ

1.4.6 ไม่คำนึงถึงความยืดหยุ่นของชั้นดินพื้นทาง

1.4.7 ขนาดความกว้างทาง 10.25 *in* โดยอ้างอิงจากระเบียบการแข่งขัน IMechE Railway Challenge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อความเข้าใจอย่างถูกต้อง

1.5.2 ตั้งสมมุติฐานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองระหว่างการเดินทางที่ผ่านบริเวณทางตรงที่มีผิวรางขรุขระ

1.5.3 ศึกษาการเขียนชุดคำสั่งในโปรแกรม MATLAB

1.5.4 ศึกษาการเปรียบเทียบการแข่งขัน เพื่อใช้ในการออกแบบคุณสมบัติของชุดสปริงและตัวหน่วงโดยกำหนดให้ค่าดัชนีการโดยสารให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมโดยอ้างอิงจากเกณฑ์ความนุ่มนวลและความสะดวกสบายในการโดยสาร (Ride Comfort)

1.5.5 ประมวลผลสมการการสั่นสะเทือนของตัวรถจักร เพื่อหาค่าความถี่ของการสั่น ในโปรแกรม MATLAB และคำนวณค่าแอมพลิจูดจากสมการการสั่นสะเทือนในช่วงสภาวะคงตัวในแนวตั้งและแนวตามยาวของรถจักร

1.5.6 นำค่าแอมพลิจูดและความถี่ของการสั่น มาใช้ในการคำนวณหาค่าดัชนีการโดยสารเพื่อหาค่าความนุ่มนวลและความสะดวกสบายในการโดยสาร แล้วนำค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมมาทำการเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณมือเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้

1.5.7 ทำการปรับเปลี่ยนค่าความเร็วของรถจักรไฟฟ้า (Electric Locomotive) ตั้งแต่ 0 ถึง 15 *km/hr* เพื่อพิจารณาแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีการโดยสารเพื่อหาค่าความนุ่มนวลและความสะดวกสบายในการโดยสาร

1.5.8 สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use³ only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้ความรู้ และแนวคิดเกี่ยวกับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของรถไฟ โดยวิธีการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบหลายองศาอิสระ โดยใช้โปรแกรม MATLAB ร่วมกับการบันทึกผลโดยโปรแกรม Microsoft Excel มาใช้เพื่อช่วยในการคำนวณและวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของรถไฟที่ความเร็วต่าง ๆ ประกอบกับศึกษาจากแนวทางการพิจารณาเพื่อเลือกใช้สปริงและตัวหน่วงที่เหมาะสมต่อระบบรถไฟ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 2008 Oldrich Polach [1] ได้ทำการศึกษากระบวนการเชิงฟิสิกส์ของยานพาหนะที่ใช้ราง เพื่อแสดงในรูปของกระบวนการทางคณิตศาสตร์และการประเมินพฤติกรรมเชิงกล โดยความแม่นยำของแบบจำลองจะส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่ได้ออกมา ซึ่งขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการจำลอง หากต้องการผลข้อมูลที่มีความแม่นยำ จะต้องป้อนข้อมูลเข้าไปมากขึ้น โดยกระบวนการวิจัยจะต้องสอดคล้องกับวิธีการที่คำนวณ ซึ่งในมุมมองด้านความปลอดภัย จะแบ่งออกได้เป็น การตรวจ การเคลื่อนตัวของรางเนื่องมาจากแรงที่ล้อกระทำ และเสถียรภาพในการวิ่งของรถไฟ ประเด็นเหล่านี้ได้รับการเน้นย้ำในมาตรฐานการที่ได้รับการยอมรับสำหรับยานพาหนะ ซึ่งเห็นได้ชัดว่าวิธีการคำนวณที่ต้องการนั้นถูกควบคุมโดยการจำลองเชิงพลวัตในช่วงเวลาหนึ่ง

ในแบบจำลองทางพลวัต ทางเลือกของแบบจำลองจะขึ้นอยู่กับช่วงความถี่ที่สนใจ ยิ่งความถี่สูงขึ้นมากเท่าไรก็就会有ความซับซ้อนมากขึ้น โดยช่วงความถี่ที่สนใจจะอยู่ในช่วง 0 - 20 Hz ซึ่งมีประเด็นที่สำคัญได้แก่ การส่าย การสีกกร่อนและความสะอึกสะอื้น โดยจะไม่พิจารณา แรงระหว่างล้อกับราง และความถี่ที่เกิดขึ้นกับล้อและราง

โดยในการจำลองเชิงพลวัตของแบบจำลองพาหนะที่ใช้รางจะแสดงในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งรวมไปถึงความไม่เป็นเชิงเส้นโดยหลัก ๆ จะเริ่มต้นที่พื้นผิวของล้อและรางและส่วนของระบบกันสะเทือนซึ่งตัวแปรในการคำนวณหมายถึง การเลื่อน การหมุน ความเร็วที่สอดคล้องของพาหนะ โครง แคร่ และชุดล้อและเพลลา โดยสิ่งเหล่านี้หลัก ๆ แล้วเป็นคุณสมบัติความเฉื่อยของยานพาหนะ รวมถึงมวลเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของชิ้นส่วนกันสะเทือน อุปกรณ์ต่าง ๆ ไปจนถึงตัวรถ ในอีกแง่หนึ่ง การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างตัว ยานพาหนะ โดยส่วนมากแล้วจะขึ้นอยู่กับความยืดหยุ่นของชิ้นส่วนกันสะเทือน

จากบทนำด้านบนแบบจำลองกันสะเทือนของชิ้นส่วนจะเด่นชัดในด้านความแม่นยำของแบบจำลอง พาหนะและผลลัพธ์ของการคำนวณ เนื่องมาจากชิ้นส่วนกันสะเทือนมีบทบาทหลักสำหรับพฤติกรรมทาง พลศาสตร์ โดยหลัก ๆ แล้วจะเป็นการสันสะเทือนแบบแยกตัวที่แรงระหว่างล้อกับราง ส่วนชิ้นส่วนสปริง จะมีแรงสถิตที่กระทำกับแรงโน้มถ่วง และแรงกึ่งสถิตศาสตร์ ตัวอย่างเช่นในตอนที่เราเข้าโค้งจะมีแรง เหวี่ยงปรากฏขึ้นมาด้วย สำหรับบางชิ้นส่วนกันสะเทือนจะใช้งานในการลากและการเบรก โดยทั่วไปแล้ว ระบบกันสะเทือนอย่างง่ายคือสปริงชุด และพวกชิ้นส่วนที่ใช้แรงเสียดทาน เช่น สปริงแบบเชือกวาง (Leaf Spring) แบบยาง (Rubber Spring) และแบบถุงลม (Air Spring) และตัวหน่วงแบบไฮดรอลิก (Hydraulic Damper) แต่ชิ้นส่วนอื่น เช่น ระบบลากจูง (Coupler) ระบบยึดกันหมุน (Anti-rol Bar) และยางซับแรง กระแทก (Bump Stop) จะถูกกล่าวถึงดังต่อไปนี้ พวกชิ้นส่วนประกอบเหล่านี้เป็นชิ้นส่วนแบบมี คุณสมบัติเฉพาะตัว (Passive Component) ซึ่งหมายความว่าชิ้นส่วนเหล่านี้จะให้พวกคุณสมบัติของ ชิ้นส่วนและภาระปราศจากแรงภายนอก (Pre-load) ที่เป็นไปได้ รวมถึงแรงและโมเมนต์ที่ส่งต่อไปยังส่วน ต่อประสานกับตัวถังรถ ซึ่งสิ่งที่เป็นปัญหาจะขึ้นอยู่กับการจัดและความเร็วที่ส่วนต่อประสานเหล่านี้ เท่านั้น โดยสิ่งเหล่านี้จะแตกต่างจากส่วนประกอบของระบบกันสะเทือนแบบกระตุ้น (Active Component) รวมถึงชิ้นส่วนกึ่งกระตุ้น (Semi-active Component) ซึ่งปัจจัยอื่น ๆ ก็มีผลต่อแรงด้วย เช่นกัน

ในปี 2562 นายสาริษฐ์ อรุณ และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาการประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ (Permissible Speed) ของรถไฟโดยสาร โดยใช้วิธีการทางพลศาสตร์ของมัลติบอร์ดี ซึ่งหลักการที่ใช้ วิเคราะห์เป็นการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็งที่เชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อ (Joint) และชิ้นส่วนทางกล โดยในขั้น แรกจะเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความเร็วสูงสุดที่สามารถวิ่งได้ในทางโค้ง โดยไม่ทำให้ตัวรถเกิดการพลิก คว่ำ (Over - turning) ด้วยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการเคลื่อนที่บนทางโค้ง จากนั้นทำการนำ ข้อมูลของตัวรถของการรถไฟแห่งประเทศไทยมาวิเคราะห์ในโปรแกรม SIGMA SAMS 2000 เมื่อทำการ เปรียบเทียบข้อมูลทั้งจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางพลศาสตร์ของมัลติบอร์ดีและโปรแกรม SIGMA SAMS 2000 พบว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางพลศาสตร์ของมัลติบอร์ดีให้ค่าความเร็วสูงสุดที่สูงกว่าการ วิเคราะห์จากโปรแกรม SIGMA SAMS 2000 ซึ่งเป็นผลมาจากสาเหตุของความแตกต่างกันในส่วนของการ

เอกสารนี้เป็นประเภทของตัวรถ และขนาดโค้งที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของรถไฟ

2.3.1.1 ส่วนประกอบของทางรถไฟ [3]

ส่วนประกอบของทางรถไฟตามรูปที่ 2.1 ประกอบด้วย รางรถไฟ (Rails) ทำหน้าที่นำทางล้อรถไฟไปตามทาง หมอนรองราง (Sleepers/ Ties) ไว้รองรับน้ำหนักจากรถไฟถ่ายสู่รางรถไฟ เป็นตัวรองรับชั้นแรกและมีเครื่องยึดเหนี่ยวราง (Rail Fastening Devices) ทำหน้าที่ยึดรางเหล็กไว้กับหมอน ใต้หมอนลงไปคือหินโรยทาง (Ballast) ทำหน้าที่ยึดหมอนรองรางไว้กับที่และถ่ายน้ำหนักรถไฟเฉลี่ยลงบนคันทาง (Sub-Structure) ซึ่งอยู่ล่างสุดและมองเห็นไม่ชัด ส่วนที่อยู่ด้านล่างสุดจริง ๆ คือพื้นดินเดิมซึ่งจะรับน้ำหนักทั้งขบวนรถไฟไว้ นอกจากนี้บริเวณสะพาน ทางเลี้ยวประแจ หรือจุดวิกฤต ก็จะมีรางอีกคู่หนึ่งวางขนานไปกับรางรับน้ำหนักเรียกว่ารางกัน (Safety Rail) ทำหน้าที่ประคองล้อรถไฟ ที่อาจพลาดตกจากรางให้อยู่ในขอบเขตจำกัดเพื่อป้องกันไม่ให้ขบวนรถไฟหลุดออกไปทำความเสียหายกับโครงสร้างทางรถไฟหรือตกจากสะพานสูง ตรงบริเวณที่ถนนตัดผ่านทางรถไฟจะมีรางกันไว้สำหรับวัสดุสิ่งแปลกปลอมที่อาจหลุดเข้ามาแทรกอยู่ข้างทาง

ดินคันทาง (Sub Structure) ทำหน้าที่รับน้ำหนักขบวนรถไฟจากหินโรยทางแล้วถ่ายน้ำหนักขบวนรถไฟทั้งหมดลงบนพื้นดินเดิม ดินคันทางที่ได้คัดเลือกคุณสมบัติเพื่อความทนทานในการใช้งานจะถูกบดอัดขึ้นรูป มีลาดเอียงทางด้านข้าง (Slope) เพื่อให้หน้าผนที่ซึมผ่านหินโรยทางลงมาระบายออกได้สะดวก ระหว่างหินโรยทาง ก็อาจจะมียวสตุอื่นคั่นอยู่เพื่อให้ดินคันทางมีอายุการใช้งานได้นาน วัสดุเหล่านี้ได้แก่ทรายหยาบหรือแผ่นยวสตุสังเคราะห์ เพื่อป้องกันไม่ให้ดินคันทางถูกน้ำฝนกัดเซาะ



รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางของโครงสร้างทาง [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.2 โครงสร้างเครื่องยึดเหนี่ยวราง [4]



รูปที่ 2.2 เครื่องยึดเหนี่ยวราง [4]

เครื่องยึดเหนี่ยวรางตามรูปที่ 2.2 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ยึดรางกับหมอนรองราง โดยหมายเลข คือ เครื่องยึดเหนี่ยวรางสำหรับหมอนคอนกรีตจะมีลักษณะการออกแบบเป็นรูปแบบสปริง (Spring Type) เพื่อให้มีคุณสมบัติในการยึดฐานและป้องกันรางเดิน เนื่องจากหมอนคอนกรีตมีลักษณะเชื่อมยาว เครื่องยึดเหนี่ยวที่ใช้จึงเป็นแบบเหล็กประกบกับแหวน (Spring Clip) ปัจจุบันหลายบริษัทผลิตขึ้นเพื่อใช้งานหลายรูปแบบ เช่น เครื่องยึดเหนี่ยวยี่ห้อแพนดรอ (Pandrol) ของประเทศอังกฤษ ยี่ห้อวอสโลว์ (Vossloh) ของประเทศเยอรมัน และยี่ห้อสตาเดฟ (Stadef) ของประเทศฝรั่งเศส เป็นต้น ส่วนงานรองราง เป็นวัสดุทางที่ใช้วางใต้รางกับหมอนไม้ เพื่อช่วยดูดซับกระจายแรงจากฐานรางลงบนผิวหมอนไม้ให้น้อยลง ช่วยให้หมอนไม้มีอายุการใช้งานได้ยาวนานขึ้น โดยเฉพาะหากใช้หมอนไม้ชนิดแข็งปานกลาง สำหรับในทางโค้งมีความจำเป็นต้องติดตั้งงานรองรางทุกท่อนหมอน เนื่องจากในทางโค้งจะเกิดแรงเหวี่ยงด้านข้างของตัวรถสูง มีผลให้เนื้อไม้เสียหายได้มากกว่าในส่วนของทางตรง งานรองรางมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและมีช่องสำหรับจำนวนของตะปูรางที่จะใช้งาน งานรองรางที่ใช้กับทางโค้ง จะใช้จำนวนตะปูรางมากกว่าทางตรง ในทางตรงทั่วไปจะใช้ตะปูราง 2 - 3 ตัว ต่อหนึ่งฐานรางแต่สำหรับในทางโค้งจะใช้ตะปูรางมากถึง 4 ตัว ต่อฐานราง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

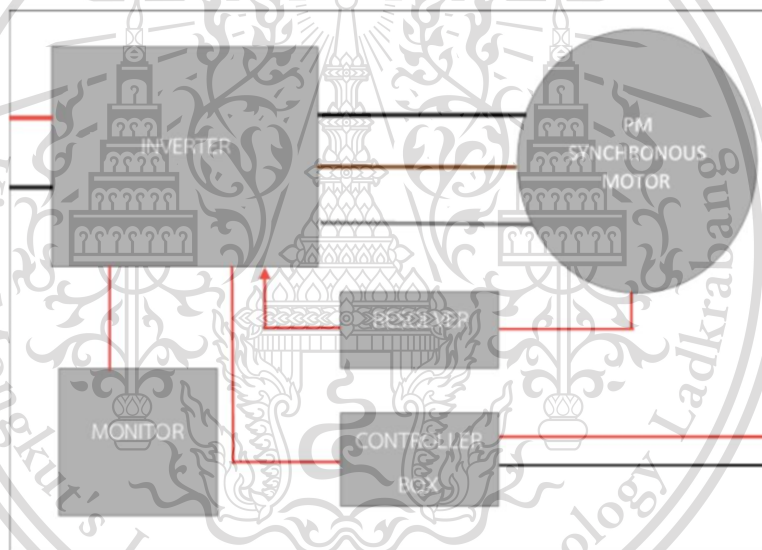
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3.1.3 ระบบขับเคลื่อนของตัวรถโดยสาร [4]

เริ่มแรกจะรับไฟจากระบบกักเก็บพลังงานจากแบตเตอรี่ชนิด ลิเทียมไอออน ฟอสเฟส (Lithium-ion Phosphate) เข้ามาที่อินเวอร์เตอร์ โดยอินเวอร์เตอร์จะมีหน้าที่แปลงแรงดันเพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PM Synchronous Motor) ซึ่งเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล และยังเป็นตัวรับคำสั่งจากตัวควบคุม โดยสามารถตั้งค่าการไดรฟ์มอเตอร์ผ่านทางคอมพิวเตอร์เพื่อปรับความเร็วมอเตอร์ โดยหลังจากที่มอเตอร์เริ่มทำงานจะมีสัญญาณป้อนกลับ (Feedback) กลับมาที่ตัวอินเวอร์เตอร์ผ่านทางอุปกรณ์วัดตำแหน่งการหมุนของเพลลา (Resolver) โดยสัญญาณที่ส่งมาจะบอกถึง ลำดับเฟส ความเร็วรอบ ความถี่ และอุณหภูมิ เพื่อตรวจสอบเช็คสถานะ การทำงานของมอเตอร์ และกล่องควบคุม (Controller Box) จะทำการสั่งการเปิดปิดมอเตอร์ควบคุมความเร็ว ลักษณะการทำงานเป็นไปตามรูปที่ 2.3

ส่วนประกอบของระบบขับเคลื่อน



รูปที่ 2.3 การทำงานของระบบจ่ายไฟส่งกำลัง [4]

2.3.2 ทฤษฎีพื้นฐานของรูปแบบรางรถไฟ [3]

รางรถไฟจะทำด้วยเหล็กเหนียวรีดร้อน มีรูปร่าง ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญคือ หัวราง (Rail Head) เอรราง (Web) และฐานราง (Foot) รางที่นิยมใช้คือแบบฐานรางกว้าง ซึ่งสามารถยึดเกาะกับหมอนรองรางได้อย่างมั่นคงด้วยเครื่องยึดเหนี่ยวราง (Rail Fastener)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

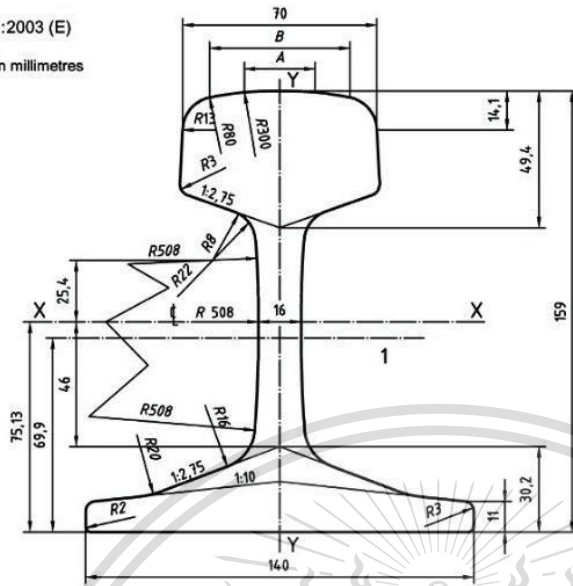
ขนาดของรางรถไฟกำหนดเป็นน้ำหนักต่อหน่วยความยาวระบบเมตริก เช่น ที่ใช้ในมาตรฐาน UIC กำหนดเป็นกิโลกรัมต่อเมตร ระบบมาตรฐานอังกฤษ (BS) กำหนดเป็นปอนด์ต่อหลา มาตรฐานของกิจการรถไฟทวีปยุโรปกำหนดขนาดของรางที่ใช้สำหรับรถไฟความเร็วสูงไว้ที่ 60 kg/m หรือประมาณ 121 lb/yd รางรถไฟขนาดใหญ่ที่สุดของการรถไฟฯ ในปัจจุบันคือ 100 lb/yd ซึ่งอยู่ในทางรถไฟที่สร้างใหม่ และทางที่ได้ปรับปรุงขนาดหนัก (Rehabilitated) แล้วแต่ราง ส่วนใหญ่ก็ยังเป็นขนาด 80 lb/yd นอกจากนี้ยังมีทางประธาน (Mainline) ที่ใช้รางขนาด 70 lb/yd ส่วนสายทางแยกรวมทั้งสายทางหลักที่ยังใช้รางขนาด 50 lb/yd ก็ยังมีอยู่ รางรถไฟขนาดเล็กเป็นอุปสรรคต่อการวิ่งขบวนรถอยู่บ้าง การหลีกเลี่ยงขบวนรถล่าช้าเพราะขบวนรถต้องวิ่งผ่านทางหลักช้ามาก ($15\text{-}30 \text{ km/hr}$) รูปที่ 2.4 ถึงรูปที่ 2.6 แสดงถึงรูปแบบของหน้าตัดรางที่นิยมใช้ในประเทศไทย ส่วนรูปที่ 2.7 ถึงรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงลักษณะทั่วไปของรางรถไฟและการติดตั้ง



รูปที่ 2.4 ขนาดและมิติสำคัญของรางรถไฟมาตรฐาน BS (BS 100 Lb A) ที่ รฟท. ใช้ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EN 13674-1:2003 (E)
Dimensions in millimetres



Key

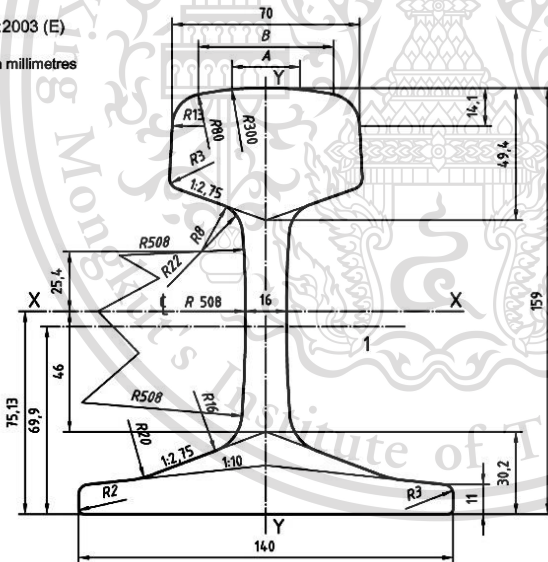
1 Centre line of branding

Cross-sectional area	: 69,77	cm ²
Mass per metre	: 54,77	kg/m
Moment of inertia x-x axis	: 2337,9	cm ⁴
Section modulus - Head	: 278,7	cm ³
Section modulus - Base	: 311,2	cm ³
Moment of inertia y-y axis	: 419,2	cm ⁴
Section modulus y-y axis	: 59,9	cm ³

Indicative dimensions : A = 20,024 mm
B = 49,727 mm

รูปที่ 2.5 ขนาดและมิติสำคัญของรางรถไฟมาตรฐาน UIC (UIC 54) ที่รถไฟฟ้ามหานคร [3]

EN 13674-1:2003 (E)
Dimensions in millimetres



Key

1 Centre line of branding

Cross-sectional area	: 69,77	cm ²
Mass per metre	: 54,77	kg/m
Moment of inertia x-x axis	: 2337,9	cm ⁴
Section modulus - Head	: 278,7	cm ³
Section modulus - Base	: 311,2	cm ³
Moment of inertia y-y axis	: 419,2	cm ⁴
Section modulus y-y axis	: 59,9	cm ³

Indicative dimensions : A = 20,024 mm
B = 49,727 mm

รูปที่ 2.6 ขนาดและมิติสำคัญของรางรถไฟมาตรฐาน UIC (UIC 60) ที่รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงก์ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

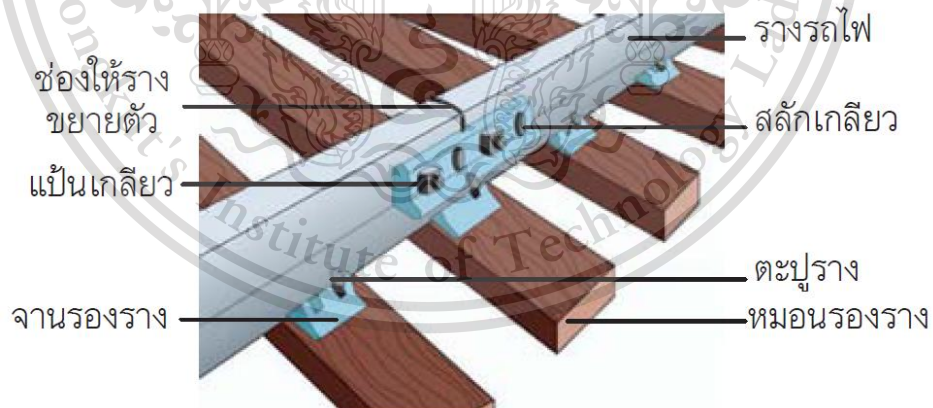
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.7 ขนาดรางที่มีใช้ในทางรถไฟของ รฟท. [3]



รูปที่ 2.8 รางรถไฟที่ใช้ในปัจจุบันเป็นแบบลู่วางแผ่กว้าง [3]



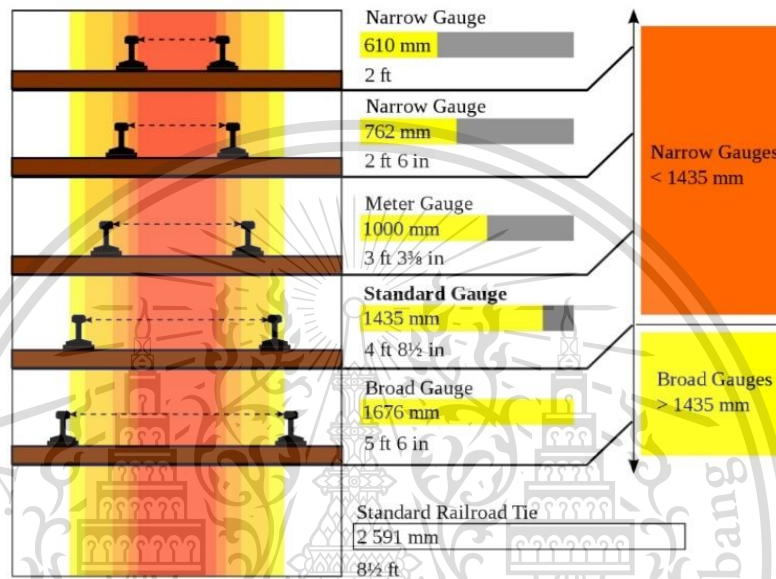
รูปที่ 2.9 การยึดรางรถไฟกับหมอนโดยใช้ตะปูราง [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use¹¹ only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ขนาดของทางรถไฟ (Track Gauge) คือ ระยะห่างระหว่างสันหัวรางด้านในทั้งสองด้าน มีหลากหลาย แบบขึ้นอยู่กับขนาดที่ไปใช้งานดังรูปที่ 2.7 เช่น ขนาดความกว้าง 1,676 mm เรียกว่า บอร์ดเกจ (Broad Gauge) ขนาดความกว้าง 1,435 mm เรียกว่า สแตนดาร์ดเกจ (Standard Gauge) ขนาดความกว้าง 1,000 mm เรียกว่า มิเตอร์เกจ (Meter Gauge) ขนาดความกว้าง 762 mm เรียกว่า แนโรเกจ (Narrow Gauge) แต่ละรูปแบบเป็นไปตามรูปที่ 2.10

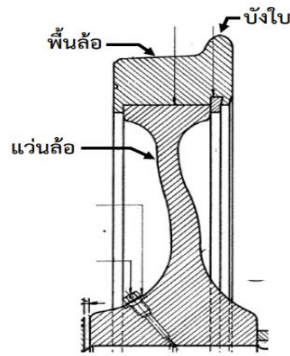


รูปที่ 2.10 ขนาดทางรถไฟมาตรฐานต่าง ๆ [3]

2.3.3 ทฤษฎีพื้นฐานของล้อรถไฟ [5]

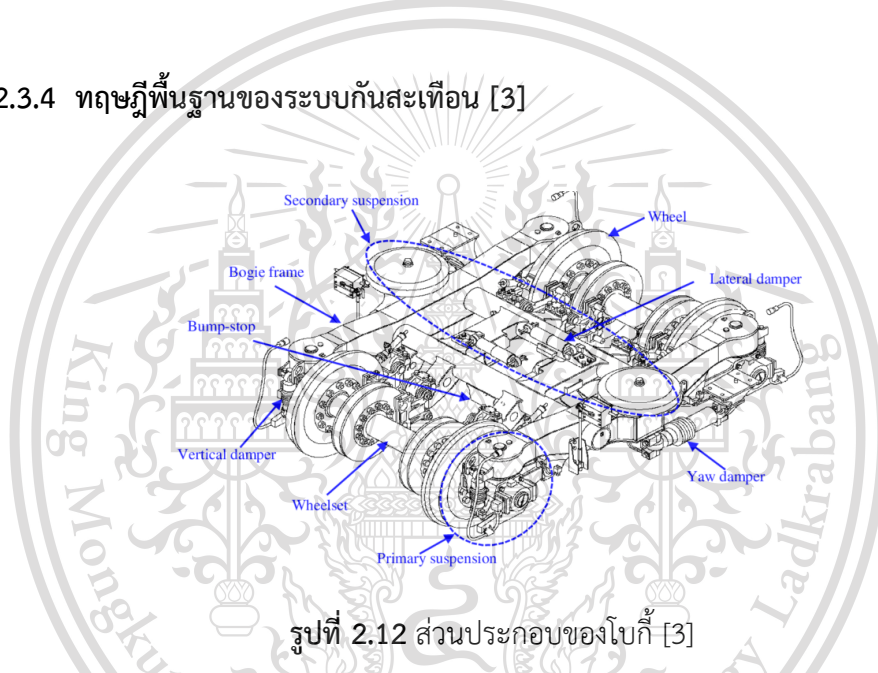
การเคลื่อนที่ของรถไฟเกิดขึ้นจากการที่ล้อของรถไฟนั้นวิ่งไปตามราง ลักษณะของล้อรถไฟ และการสัมผัสกันระหว่างล้อและราง รวมไปถึงพฤติกรรมของเพลาล้อรถไฟขณะวิ่งในทางตรง และการเลี้ยวโค้งของรถไฟ จึงมีความสำคัญ ล้อของรถไฟ มีทั้งชนิดล้อรีดทึบ (Solid Wheel) และล้อปลอก (Tire Wheel) ซึ่งสามารถถอดปลอกที่สึกออกเพื่อเปลี่ยนเฉพาะปลอกได้ องค์ประกอบของล้อประกอบไปด้วย พื้นล้อ (Wheel Tread) ทำหน้าที่รับน้ำหนักของรถไฟและกลิ้งไปตามราง บังใบล้อ (Wheel Flange) ทำหน้าที่บังคับให้ล้อวิ่งไปตามราง และ แวนล้อ (Wheel Disk) ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของล้อเพื่อส่งผ่านแรงระหว่างล้อและเพลาล้อ (Axle) โดยรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นถึงลักษณะตามที่กล่าวมาของล้อรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 องค์ประกอบของล้อ [5]

2.3.4 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบกันสะเทือน [3]



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของโบกี้ [3]

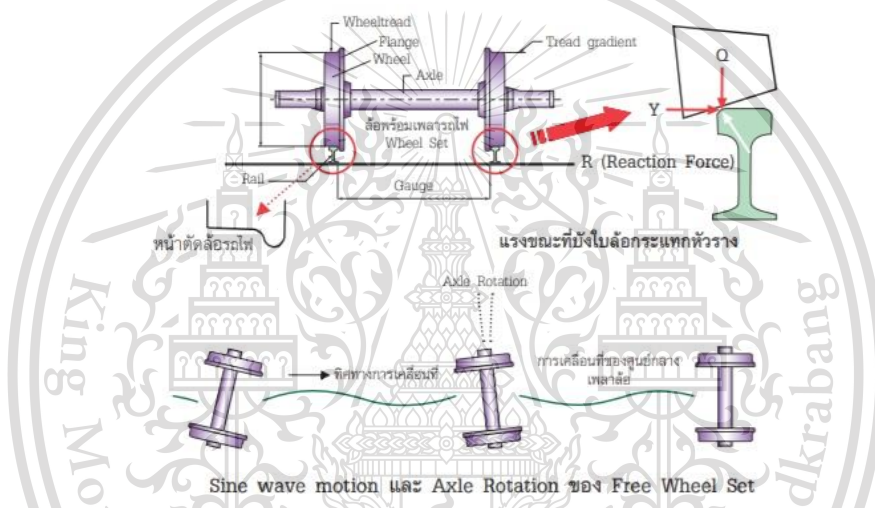
แคร่ หรือ โบกี้ (Bogie) ตามรูปที่ 2.12 เป็นส่วนที่รองรับการสั่นสะเทือนของตัวตู้รถโดยสาร (Carbody) โดยโบกี้จะรองรับการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการยุบตัวหรือการไม่สม่ำเสมอของทางรถไฟทำให้ผู้โดยสารรู้สึกสบาย นอกจากนี้ยังลดผลที่ผิดที่เกิดจากการการยุบตัวของรางรถไฟที่ส่งผลถึงคุณภาพการนั่งโดยสารอีกด้วย ชนิดของโบกี้มีหลายแบบตั้งแต่ โบกี้แบบ 1 เพลา มี 2 ล้อ โบกี้แบบ 2 เพลา มี 4 ล้อ (ซึ่งเป็นที่มาของคำว่า “โบกี้”) หรือโบกี้แบบอื่น ขึ้นอยู่กับการออกแบบเพื่อการรับน้ำหนัก

โดยการศึกษาและปรับปรุงล้อรถไฟได้กระทำมาโดยลำดับล้อรถไฟในปัจจุบันมีรูปร่างเป็นรูปกรวยตัด (Truncated-cone Shape) พื้นล้อเป็นระนาบเอียงตามรูปที่ 2.13 เนื่องจากต้องการให้ล้อพร้อมเพลาเคลื่อนที่ไปบนราง ล้อด้านที่วิ่งด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่าจะวิ่งออกหน้าล้อที่วิ่งด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า เพลาล้อก็จะเอียงไปในทางที่จะค้ำยให้ล้อพร้อมเพลาเคลื่อนที่กลับไปในทางตรงกันข้าม ซึ่งล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ผู้สอนเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านที่เคยวิ่งด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าจะเปลี่ยนเป็นวิ่งด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางโตกว่า และวิ่งออกหน้าล้อ ด้านตรงข้ามเป็นการคัดท้ายให้เกิดการส่ายตัวกลับ สลับกันไปมา ดังนั้น หากเป็นการเคลื่อนที่ในสภาพปกติแล้วแรงกระทะระหว่างบังใบล้อกับหัวรางก็จะมี ความรุนแรงน้อยกว่าล้อรถไฟที่พื้นเป็นรูปทรงกระบอก

ล้อรถไฟที่ลาดเอียงจะทำให้เพลาล้อส่ายตัวไปมารอบศูนย์กลาง (Axle Hunting) ในขณะเดียวกันศูนย์กลางของเพลาล้อจะเคลื่อนที่ออกทางด้านข้างซ้ายขวาสลับกันศูนย์กลางของเพลาล้อในขณะที่ล้อเคลื่อนที่ไปตามทางจึงส่ายเป็นลักษณะไซน์ซอซด์ (Sinusoidal Motion) การเคลื่อนที่ของล้อพร้อมเพลาดังนี้ ก่อให้เกิดการสั่นของตู้รถไฟที่นำมาวางลงบนล้อพร้อมเพลาล้อ



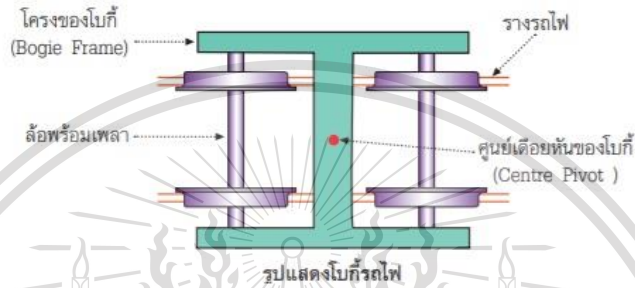
รูปที่ 2.13 การสั่นสะเทือนของรถไฟ 8 ล้อ [3]

รถไฟ 4 ล้อเป็นรถไฟที่วิศวกรรมรถไฟประดิษฐ์ขึ้นใช้งานในระยะแรก แต่ไม่สามารถวิ่งด้วยความเร็วสูงได้เนื่องจากคาบในการส่ายตัวของล้อมีระยะสั้นทำให้ตัวรถมีการสั่นสะเทือนที่เกินมาตรฐานความปลอดภัยในทุกทิศทาง เมื่อวิ่งด้วยความเร็วสูง ในระยะต่อมาจึงมีผู้คิดประดิษฐ์รถ 8 ล้อขึ้นตามรูปที่ 2.14 โดยการนำเอารถ 4 ล้อ มาทำให้สั้นลงเรียกว่าโครงแคร่หรือ “โบกี้” แล้วเอาตัวรถวางทับลงอีกชั้นหนึ่งตามรูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

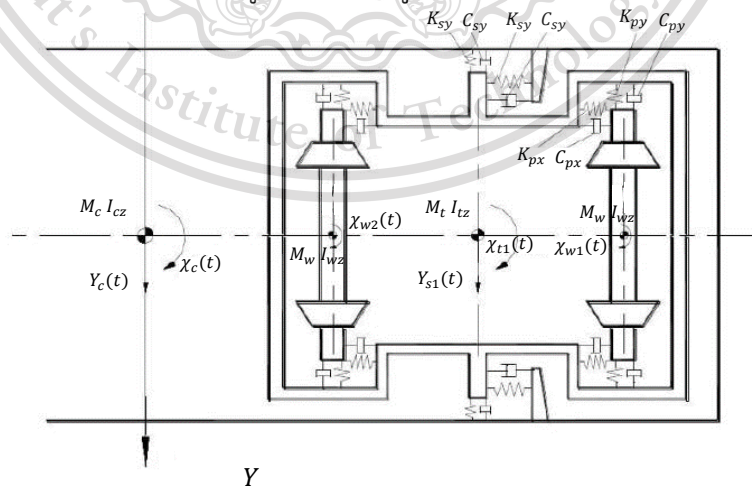


รูปที่ 2.14 การวางตำแหน่งของรถไฟ 8 ล้อ [3]



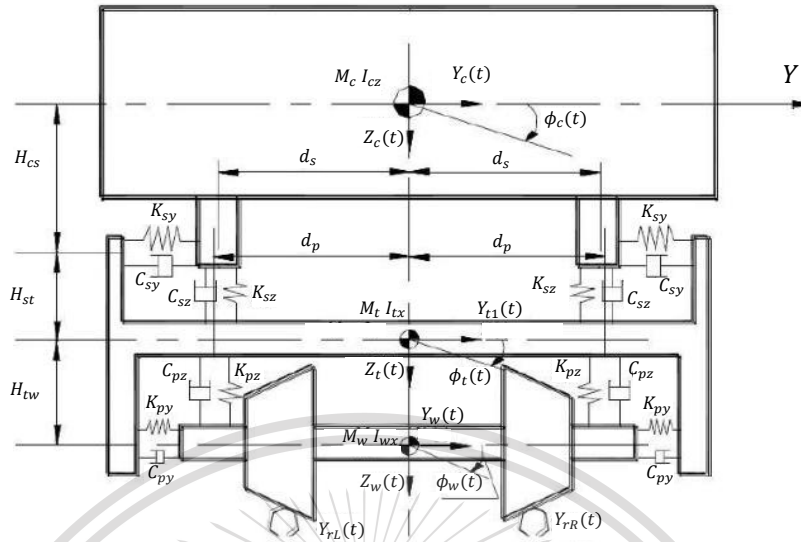
รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะอย่างง่ายของโบกี้ [3]

อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะแก้ไขให้การสั่นสะเทือนที่ไม่พึงประสงค์ลดลงโดยการใส่โบกี้เข้าไปเพื่อให้การสั่นสะเทือนพื้นฐานของรถ 4 ล้อ ก็จะไปปรากฏอยู่ที่ตัวโบกี้ แต่การสั่นสะเทือนที่ไม่ทับรอยกัน (Out of Phase) ของโบกี้หน้าและหลัง ก็ยังเป็นเหตุให้ตัวรถยังเกิดการส่ายรอบจุดศูนย์ถ่วง (Center of Gravity: CG) อยู่ เพียงแต่มีระดับความรุนแรงลดลง ในทำนองเดียวกัน การสั่นสะเทือนในแนวแกนอื่นยังคงมีอยู่ ซึ่งสามารถวาดรูปเพื่อการวิเคราะห์ที่ได้ดังรูปที่ 2.16 ถึงรูปที่ 2.18

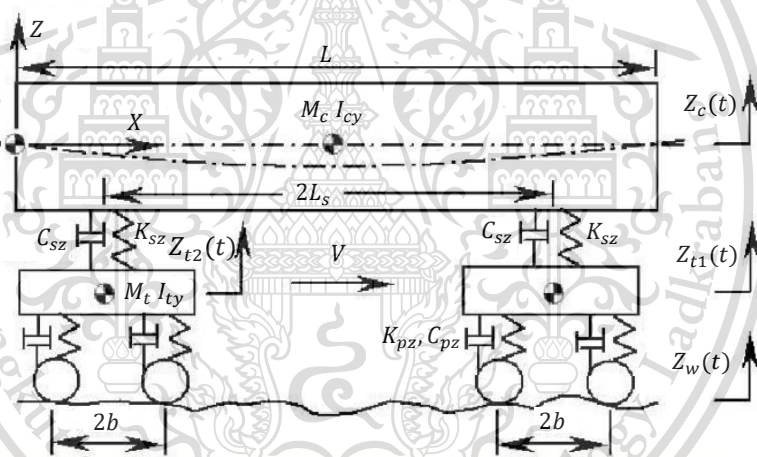


รูปที่ 2.16 แสดงแบบจำลองที่ใช้ศึกษาการเคลื่อนที่ของส่วนแคร่รถไฟด้านบน [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แสดงแบบจำลองที่ใช้ศึกษาการเคลื่อนที่ของส่วนแคร่รถไฟด้านหน้า [6]



รูปที่ 2.18 แสดงแบบจำลองที่ใช้ศึกษาการเคลื่อนที่ของส่วนแคร่รถไฟด้านข้าง [6]

จากรูปที่ 2.16 ถึงรูปที่ 2.18 เป็นการวิเคราะห์รหัสไฟด้วยระบบ 26 องศาอิสระ แบ่งเป็นชุดล้อและเพลลาอย่างละ 4 องศาอิสระ โครงคร่อมอย่างละ 4 องศาอิสระและตุ้รถไฟ 4 องศาอิสระโดยมีตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบเป็นดังตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงความหมายของตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบ

ตัวแปร	คำอธิบายตัวแปรและพารามิเตอร์
$M_c (kg)$	มวลของตู้รถไฟ
$M_t (kg)$	มวลของโครงแคร่
$M_w (kg)$	มวลของชุดล้อและเพลลา
$I_{c(x,y,z)} (kg \cdot m^2)$	โมเมนต์ความเฉื่อยของตู้รถไฟรอบแกน X Y และ Z
$I_{t(x,y,z)} (kg \cdot m^2)$	โมเมนต์ความเฉื่อยของโครงแคร่รอบแกน X Y และ Z
$I_{w(x,y,z)} (kg \cdot m^2)$	โมเมนต์ความเฉื่อยของชุดล้อและเพลลารอบแกน X Y และ Z
$K_{p(x,y,z)} (N/m)$	ค่านิจสปริงของระบบกันสะเทือนชั้นที่ 1 ในแนวแกน X Y และ Z
$C_{p(x,y,z)} (N \cdot s/m)$	ค่าความหน่วงของระบบกันสะเทือนชั้นที่ 1 ในแนวแกน X Y และ Z
$K_{s(x,y,z)} (N/m)$	ค่านิจสปริงของระบบกันสะเทือนชั้นที่ 2 ในแนวแกน X Y และ Z
$C_{s(x,y,z)} (N \cdot s/m)$	ค่าความหน่วงของระบบกันสะเทือนชั้นที่ 2 ในแนวแกน X Y และ Z
$L (m)$	ความยาวของตู้รถไฟ
$2L_s (m)$	ระยะห่างระหว่างระบบกันสะเทือนชั้นที่ 2 ตามแนวยาว
$d_p (m)$	ระยะห่างครึ่งหนึ่งระหว่างระบบกันสะเทือนชั้นที่ 1 ตามแนวขวาง
$d_s (m)$	ระยะห่างครึ่งหนึ่งระหว่างระบบกันสะเทือนชั้นที่ 2 ตามแนวขวาง
$2b (m)$	ระยะห่างระหว่างชุดล้อและเพลลา (Wheelbase)
$H_{tw} (m)$	ความสูงระหว่างจุดศูนย์กลางมวลของชุดล้อและเพลลากับโครงแคร่
$H_{st} (m)$	ความสูงจากจุดศูนย์กลางมวลของโครงแคร่ถึงระบบกันสะเทือนชั้นที่ 2
$H_{cs} (m)$	ความสูงจากระบบกันสะเทือนชั้นที่ 2 ถึงจุดศูนย์กลางมวลของตู้รถไฟ
$V (m/s)$	ความเร็วของรถไฟ
$Y_c (t)$	ฟังก์ชันการเคลื่อนตามแนวขวางของตู้รถไฟ
$Y_{t(1,2)} (t)$	ฟังก์ชันการเคลื่อนตามแนวขวางของโครงแคร่ตัวที่ 1 และตัวที่ 2
$Y_{w(1,2,3,4)} (t)$	ฟังก์ชันการเคลื่อนตามแนวขวางของชุดล้อและเพลลาตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 4
$Z_c (t)$	ฟังก์ชันการเคลื่อนตามแนวตั้งของตู้รถไฟ
$Z_{t(1,2)} (t)$	ฟังก์ชันการเคลื่อนตามแนวตั้งของโครงแคร่ตัวที่ 1 และตัวที่ 2
$Z_{w(1,2,3,4)} (t)$	ฟังก์ชันการเคลื่อนตามแนวตั้งของชุดล้อและเพลลาตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 4
$\phi_c (t)$	ฟังก์ชันการโคลงของตู้รถไฟ
$\phi_{t(1,2)} (t)$	ฟังก์ชันการโคลงของโครงแคร่ตัวที่ 1 และตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ $\phi_{t(1,2)} (t)$ สำหรับการใช้งานเพื่อฟังก์ชันการโคลงของโครงแคร่ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 โยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

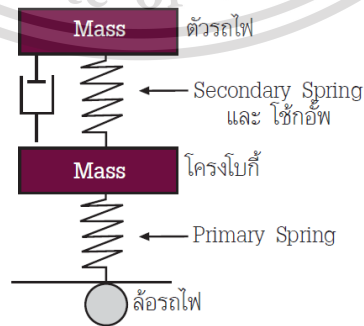
ตารางที่ 2.1 (ต่อ) แสดงความหมายของตัวแปรต่าง ๆ ในระบบ

ตัวแปร	คำอธิบายตัวแปร
$\phi_{w(1,2,3,4)}(t)$	ฟังก์ชันการโคลงของโครงชุดล้อและเพลาดำที่ 1 ถึงตัวที่ 4
$\chi_c(t)$	ฟังก์ชันการส่ายของตุ้รถไฟ
$\chi_{t(1,2)}(t)$	ฟังก์ชันการส่ายของโครงแคร่ตัวที่ 1 และตัวที่ 2
$\chi_{w(1,2,3,4)}(t)$	ฟังก์ชันการส่ายของโครงชุดล้อและเพลาดำที่ 1 ถึงตัวที่ 4

ความผิดปกติของทางรถไฟจะกระตุ้นให้การสั่นสะเทือนที่มีอยู่แล้วตามธรรมชาติมีความรุนแรงมากขึ้น ดังนั้นในเบื้องต้นจึงต้องออกแบบเพื่อสร้างและบำรุงรักษาทางรถไฟให้มั่นคง แต่สภาพที่เป็นจริง ก็คงหลีกเลี่ยงแรงกระทำภายนอกเหล่านั้นไม่ได้ อย่างน้อยเมื่อรถไฟวิ่งผ่านประแจซึ่งเนื้อรางโหว่เป็นช่องดังรูปที่ 2.19 ก็กระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนในแนวตั้งที่ผิดปกติขึ้น



รูปที่ 2.19 ตะเข็บที่ประแจซึ่งทำให้การสั่นเพิ่มมากขึ้น [3]



รูปที่ 2.20 ระบบรองรับกันสะเทือนของรถไฟ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ส่วนตัวเท่านั้นเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่ให้ผู้ใดได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบโบกี้ นั้น วิศวกรจะพยายามลดการสั่นสะเทือนจากล้อให้ขึ้นมาถึงตัวรถน้อยลง โดยจากรูปที่ 2.20 จะจัดให้มีระบบรองรับกันสะเทือนปฐมภูมิ (Primary Suspension) อยู่ระหว่างเพลาล้อกับโบกี้ และระบบรองรับกันสะเทือนทุติยภูมิ (Secondary Suspension) อยู่ระหว่างโบกี้กับตัวรถไฟ นอกจากออกแบบการรับน้ำหนักเป็นสองชั้นแล้ว ยังต้องติดตั้งโช้กอัพ (Shock Absorber) เพื่อระงับการสั่นสะเทือนที่ผิดปกติให้จางหายไปโดยเร็ว ส่วนการออกแบบโบกี้สำหรับรถไฟที่วิ่งด้วยความเร็วต่ำก็อาจจะเป็นโช้กอัพแบบง่าย ๆ เช่น รถสินค้า 4 ล้อ หรือรถโบกี้โดยสารในสมัยแรกๆ ซึ่งใช้สปริงแบบเหล็กแผ่น (Leaf Spring) ไม่ติดตั้งโช้กอัพ อาศัยแรงเสียดสีระหว่างแผ่นเหล็กสปริงเมื่อเกิดการสั่นในแนวตั้งช่วยระงับการสั่นสะเทือนไปพร้อมกับการทำหน้าที่เป็นระบบรับน้ำหนักชั้นแรกรถเหล่านี้สามารถวิ่งได้ด้วยความเร็ว 50 - 70 km/hr เท่านั้น เพราะแรงเสียดทานระหว่างแผ่นแหนบมีค่าไม่แน่นอน ควบคุมการสั่นได้ไม่ดี

สำหรับรถโดยสารสมัยใหม่ซึ่งต้องการออกแบบให้สามารถวิ่งด้วยความเร็วสูงจะต้องมีวิธีการควบคุมการสั่นสะเทือนที่รัดกุมกว่า ได้แก่การออกแบบโบกี้โดยใช้สปริงขด (Coil Spring) และโช้กอัพที่มีคุณภาพสูงเป็นระบบรองรับกันสะเทือนปฐมภูมิ และใช้สปริงขด หรือถุงลม (Air Spring) หรือแผ่นยางสลัโลหะในรองรับกันสะเทือนทุติยภูมิ

2.3.5 ระบบการสั่นสะเทือนหลายองศาความอิสระ: การสั่นสะเทือนที่ไม่มีตัวหน่วงอิสระ (Multiple Degree of freedom System: Undamped Free Vibration) [7]

สำหรับระบบการสั่นสะเทือนที่มีองศาความอิสระมากกว่าหนึ่งขึ้นไป สามารถใช้พีชคณิตทางเมทริกซ์มาช่วยในการวิเคราะห์การแก้ปัญหา ระบบการสั่นอย่างอิสระที่ไม่มีตัวหน่วงสามารถถูกเขียนอยู่ในรูปของสมการเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ 2.1

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \tag{2.1}$$

Eigenvalue Problem ถูกนำมาใช้เพื่อหาความถี่ธรรมชาติของระบบการสั่นโดยการเปลี่ยนรูปของสมการที่ 2.1 โดยการเปลี่ยนรูปเวกเตอร์เมทริกซ์ $x = M^{-\frac{1}{2}}q$ และคูณด้วยเมทริกซ์ $M^{-\frac{1}{2}}$ ทั้งสมการทำการสมมติคำตอบให้ $q = ve^{-j\omega t}$ สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

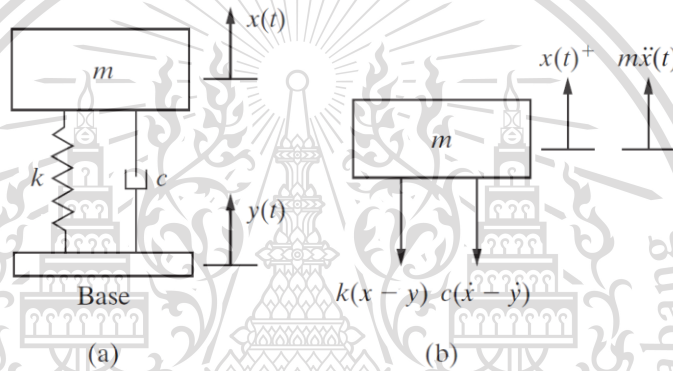
$$\tilde{K}v = \omega^2 v = \lambda v \quad (2.2)$$

โดย \tilde{K} คือ เมทริกซ์ค่าความแข็งของสปริงบรรทัดฐานมวล (Mass-Normalized Stiffness Matrix) λ คือ ค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalue) และ v คือ เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ (Eigenvector)

2.3.6 ระบบการสั่นของฐานองศาอิสระเท่ากับหนึ่ง

(One-degree-of-freedom base excitation) [8]

การสั่นในแนวตั้งที่เกิดจากการกระตุ้นการสั่นที่ฐานโดยไม่มีตัวหน่วงที่องศาอิสระเท่ากับหนึ่ง สามารถเขียนในแบบจำลองการสั่นได้ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 (a) แบบจำลองการกระตุ้นของส่วนฐาน (Base) จำลองการเคลื่อนที่ของวัตถุของมวล m ที่ถูกกระตุ้นโดยการกระจัดแบบฮาร์โมนิกที่จะถูกกำหนดด้วยตัวสปริงและตัวหน่วง (b) พังวัตถุอิสระของแบบจำลองการกระตุ้นของส่วนฐานของ (a) [8]

ตารางที่ 2.2 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ของแผนภาพแบบจำลองการกระตุ้นของส่วนฐาน

ตัวแปร	คำอธิบายตัวแปรและพารามิเตอร์
m (kg)	มวลของวัตถุเหนือสปริง (Unsprung Mass)
k (N/m)	ค่านิจสปริงของระบบ
c (N · s/m)	ค่าคงที่ความหน่วงของระบบ
$x(t)$	ฟังก์ชันการเคลื่อนที่ของมวลเหนือสปริง
$y(t)$	ฟังก์ชันการเคลื่อนที่ของฐานกระตุ้น

จากการเขียนผังวัตถุอิสระในรูปที่ 2.21 การเคลื่อนที่ของระบบการสั่นดังกล่าวสามารถอธิบายได้

โดยสมการทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = 2\zeta\omega_n\omega_b Y \cos\omega_b t + \omega_n^2 Y \sin\omega_b t \quad (2.3)$$

เมื่อ	ω_n	คือ	ความถี่ธรรมชาติเชิงมุมของระบบ (rad/s)
	ω_b	คือ	ความถี่จากการกระตุ้นเชิงมุม (rad/s)
	ζ	คือ	อัตราส่วนความหน่วง หาได้จาก $\frac{c}{2\sqrt{km}}$ หรือ $\frac{c}{2m\omega_n}$
	Y	คือ	แอมพลิจูดของระยะการสั่นของฐาน (m)

จากนั้นทำการหาผลเฉลยจากสมการ (2.3) โดยจะเลือกพิจารณาเพียงแค่ส่วนของสภาวะคงตัว (Steady State) เท่านั้น นั่นคือ

$$x_{ss}(t) = X \cos(\omega_b t - \theta_1 - \theta_2) \quad (2.4)$$

โดยที่ X คือ แอมพลิจูดของระยะการสั่นของมวลติดสปริง (Output Displacement) เขียนได้ว่า

$$X = Y \sqrt{\frac{1+(2\zeta r)^2}{(1-r^2)^2+(2\zeta r)^2}} \quad (2.5)$$

โดยที่ r คืออัตราส่วนความถี่ (Frequency Ratio) เขียนได้ว่า $r = \frac{\omega_b}{\omega_n}$ จากนั้นทำการหารสมการ (2.5) ด้วย Y ตลอดสมการ จะได้

$$\frac{X}{Y} = \sqrt{\frac{1+(2\zeta r)^2}{(1-r^2)^2+(2\zeta r)^2}} \quad (2.6)$$

ในขณะเดียวกัน

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{2\zeta\omega_n\omega_b}{\omega_n^2 - \omega_b^2} \right) \quad (2.7)$$

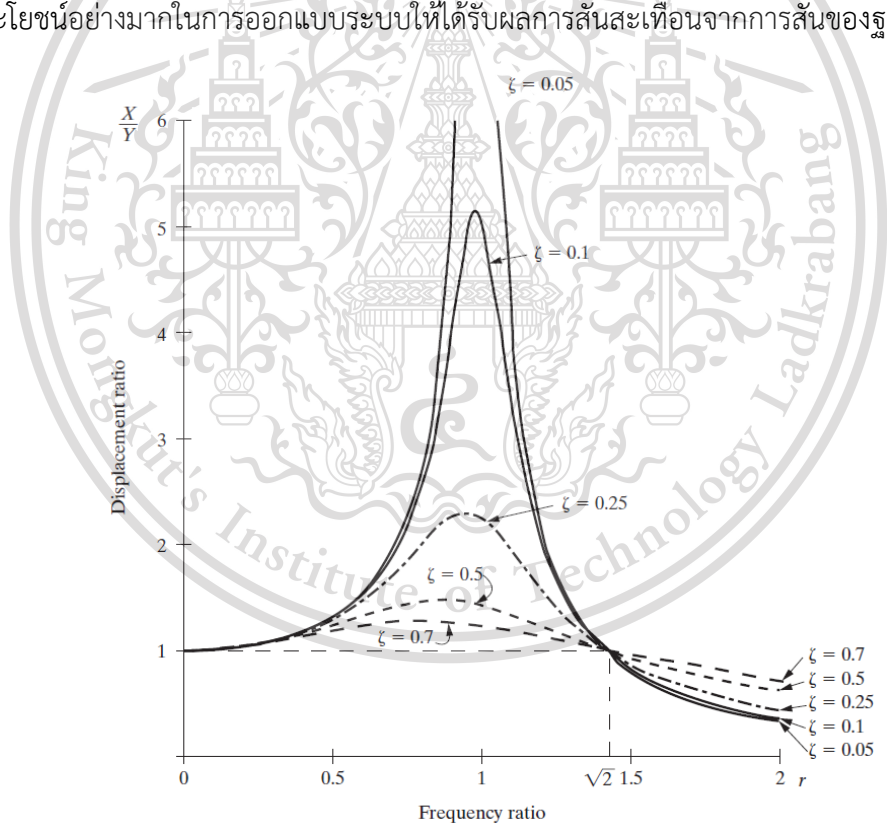
และ

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\omega_n}{2\zeta\omega_b} \right) \quad (2.8)$$

อัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดของระยะการสั่นของมวลติดสปริง X กับแอมพลิจูดของระยะการสั่นของฐาน Y (Input Displacement) ดังที่แสดงในสมการ (2.6) มีชื่อเรียกโดยเฉพาะว่าค่าการส่งผ่านการเอกสารนี้เป็น **กระจัด (Displacement Transmissibility)** การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าวัตถุจะเคลื่อนที่ไปเท่าไรเมื่อให้การกระตุ้นโดยการสั่นของพื้นที่ความถี่ต่างๆ รูปที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านการกระจัด ที่ความถี่ต่างๆ จะเห็นว่าถ้าฐานสั่นกระตุ้นด้วยความถี่ต่ำ ๆ การสั่นของมวลจะมีขนาดเท่ากับการสั่นของพื้น และเมื่อความถี่ของการสั่นสะท้อนของพื้นเพิ่มขึ้นจนเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติแล้ว ขนาดของการสั่นสะท้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่เมื่อความถี่การสั่นของพื้นเพิ่มขึ้นอีก จน $r > \sqrt{2}$ แล้ว การสั่นสะท้อนของมวลที่สนใจจะมีขนาดลดลง

สำหรับผลของอัตราส่วนการหน่วงจะพบว่า เมื่ออัตราส่วนการหน่วงเพิ่มจะทำให้ขนาดการสั่นสะท้อนลดลง หากการสั่นเกิดที่ความถี่ต่ำ ($r < \sqrt{2}$) และการเพิ่มอัตราส่วนการหน่วงจะส่งผลให้ขนาดลดลงอย่างมากหากการสั่นของฐานเกิดใกล้กับช่วงความถี่ธรรมชาติ แต่หากการสั่นของฐานเกิดที่ความถี่สูง ($r > \sqrt{2}$) แล้ว การเพิ่มอัตราส่วนการหน่วงจะทำให้ขนาดของการสั่นสะท้อนเพิ่มขึ้น ถือว่าเป็นประโยชน์อย่างมากในการออกแบบระบบให้ได้รับผลการสั่นสะท้อนจากการสั่นของฐานน้อย ๆ



รูปที่ 2.22 ค่าการส่งผ่านการกระจัด (Displacement Transmissibility) ในรูปของฟังก์ชันของอัตราส่วนความถี่ แสดงให้เห็นว่ามีการกระจัดแบบไร้มิติ $\frac{X}{Y}$ แตกต่างกันอย่างไรรวมตามความถี่ของการเอกสาร์นี้ เป็นเอกสารที่สงวนเคลื่อนที่ส่วนฐานเพิ่มขึ้นสำหรับอัตราส่วนความถี่ที่แตกต่างกัน [8] ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.7 แบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไฟ (Dynamic Model of a Vehicle) [6]

สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนตัวของระบบรางรถไฟ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้:

$$[M][\ddot{q}] + \left\{ [C] + \frac{[C_{\omega R}]}{V} \right\} \{\dot{q}\} + \{ [K] + [K_{\omega R}] \} \{q\} = \{Q\} \quad (2.9)$$

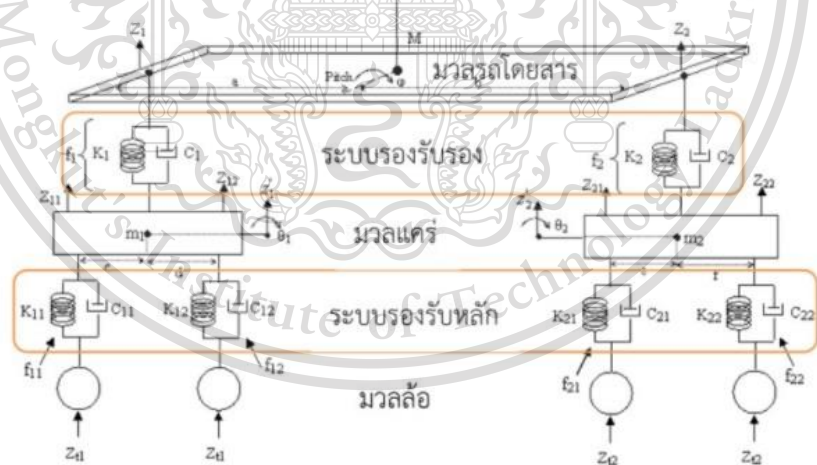
เมื่อ	$[M]$	คือ เมทริกซ์ความเฉื่อย (Inertia Matrix)
	$[C]$	คือ เมทริกซ์ความหน่วง (Viscous Damping Matrix)
	$[C_{\omega R}]$	คือ เมทริกซ์ความหน่วงจากการคืบ (Creepage Damping Matrix)
	$[K]$	คือ เมทริกซ์ความแข็งของสปริง (Stiffness Matrix)
	$[K_{\omega R}]$	คือ เมทริกซ์ความแข็งแรงแรงของการคืบและความแข็งแรงแรงของการสัมผัส (Creepage rigidity and contact rigidity matrix)
	$[q]$	คือ เวกเตอร์การกระจัด (Displacement Vector)
	$[V]$	คือ ความเร็วให้บริการของยานพาหนะ (Vehicle's Operation Speed)
	$[Q]$	คือ การกระตุ้น (Excitation)

2.3.8 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของรถไฟ [9]

ในการวิเคราะห์พลศาสตร์ของยานพาหนะไม่ว่าจะวิ่งบนถนนหรือบนราง สิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงคือความนุ่มนวลหรือความสบายในการโดยสาร (Ride Comfort) ของผู้โดยสาร และคุณภาพในการโดยสาร (Ride Quality) ซึ่งความนุ่มนวลที่จะกล่าวถึงจะพิจารณาความนุ่มนวลที่มีสาเหตุจากการสั่นสะเทือน (Vibration) ที่เกิดจากตัวกระตุ้นที่มาจากความขรุขระของรางและล้อหรือรางมีการบิดเบี้ยว โดยถือว่าเป็นสิ่งที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือน การสั่นสะเทือนจะเกิดขึ้นที่ล้อส่งผ่านการสั่นสะเทือนไปที่ช่วงล่างของล้อเลื่อน จากนั้นขึ้นไปยังตู้รถโดยสารและสุดท้ายไปที่นั่งโดยสารและเสียงรบกวน (Noise) ดังนั้น ในการออกแบบรถโดยสารต้องคำนึงถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับผู้โดยสารและเสียงรบกวนหรือเสียงที่ไม่พึงประสงค์นี้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยรถไฟที่วิ่งอยู่บนรางโดยปกติก็จะมี การสั่นสะเทือนมาจากหลายปัจจัยเช่นจากความขรุขระของผิวราง รางมีการโค้งงอ (Corrugated Track) โครงสร้างรองรับรางที่มีความแข็งแรงไม่เท่ากัน การเคลื่อนที่สายของตัวรถ เป็นต้น ดังนั้นในการออกแบบระบบรองรับต้องทำการออกแบบให้ตัวรถโดยสารมีการสั่นสะเทือนน้อยที่สุดเพื่อความสบายของรถโดยสาร (Ride Comfort) การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของรถโดยสารจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ซึ่งการวิเคราะห์จะให้ผลลัพธ์ได้ถูกต้องตามความเป็นจริงนั้นก็ ต้องทำการจำลองแบบให้เหมือนจริงมากที่สุด อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนโดยส่วนใหญ่จะคำนึงถึงการสั่นสะเทือนของตัวรถโดยสารในแนวตั้ง ดังนั้นแบบจำลองการสั่นสะเทือนที่นำมาวิเคราะห์ที่สามารถทำนายผลได้ดีเป็นที่ยอมรับจะใช้แบบจำลองดังรูปที่ 2.23 ซึ่งเป็นแบบจำลองของการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของรถไฟ เมื่อรถไฟวิ่งอยู่บนรางที่มีความขรุขระ แบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบจำลองการสั่นสะเทือนที่มีความอิสระเท่ากับ 6 โดยส่วนประกอบจะประกอบด้วยมวลตัวรถ มวลของแคร่และมวลของล้อ ส่วนประกอบเหล่านี้เชื่อมต่อกันด้วยสปริงและตัวหน่วง ซึ่งมีทั้งระบบรองรับกันสะเทือนปฐมภูมิ (Primary Suspension) และระบบรองรับกันสะเทือนทุติยภูมิ (Secondary Suspension) แต่ละล้อจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและสัมผัสกับรางตลอดเวลา ดังนั้นตัวล้อจะเคลื่อนที่ขึ้นลงตามโปรไฟล์ของฟังก์ชันความขรุขระ ดังแสดงในรูปคือ ฟังก์ชัน Z_{t1} และ Z_{t2} ที่แต่ละล้อของแคร่ด้านหน้าและด้านหลัง

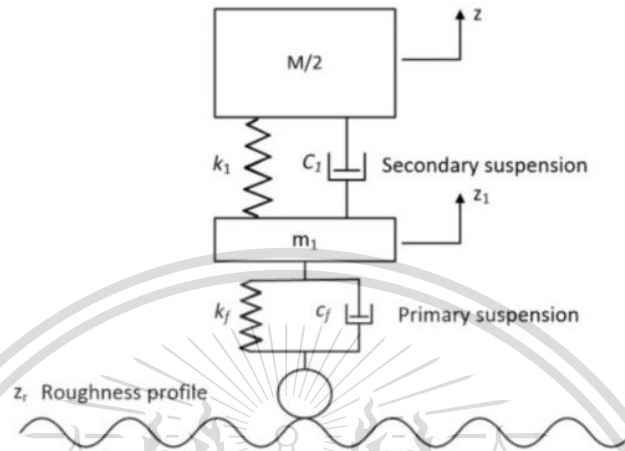


รูปที่ 2.23 แบบจำลองการสั่นสะเทือนของรถไฟที่มีระดับความอิสระเท่ากับ 6 [9]

แบบจำลองการสั่นสะเทือนในรูปที่ 2.23 พิกัดทั่วไปของมวลรถคือ (Z, φ) พิกัดทั่วไปของมวลแคร่ด้านหน้าคือ (Z_1, θ_1) และพิกัดทั่วไปของมวลแคร่ด้านหลังคือ (Z_2, θ_2) ซึ่งหากวิเคราะห์ แบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียงครึ่งหนึ่งของรถไฟ โดยสมมติมวลด้านหน้าและด้านหลังมีค่าเท่ากัน คุณสมบัติของระบบรองรับหลักและรองของด้านหน้าและด้านหลังมีค่าเท่ากัน จะได้แบบจำลองใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แบบจำลองการสั่นสะเทือนของรถไฟแบบครึ่งคัน ที่มีระดับความอิสระเท่ากับ 2 [9]

ซึ่งการคำนวณจะกำหนดให้ฟังก์ชันของความขรุขระเป็นแบบฮาร์โมนิกส์และมีค่าดังนี้

$$z_r = z_0 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi x}{L} \right) \right) \quad (2.10)$$

เมื่อ	z_0	คือ	แอมพลิจูดของลูกคลื่นของราง ให้มีค่า 1 mm
	L	คือ	ความยาวคลื่นของลูกคลื่นราง ให้มีค่า 1.5 m
	x	คือ	พิกัดตามแนวราง vt
	v	คือ	อัตราเร็วของรถไฟ (m/s)
	t	คือ	เวลา (s)

2.3.9 ดัชนีการโดยสารรถไฟของสเปอร์ลิง (Spurling's Ride Index) [10]

ในการประเมินคุณภาพในการเดินทาง (Ride Quality) จะสามารถหาค่าดัชนีการโดยสาร หรือ W_z ด้วยวิธีของสเปอร์ลิง (Spurling's Method) ได้จากสมการดังนี้

$$W_z = 0.896^{10} \sqrt{\frac{a^3}{f}} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ a = แอมพลิจูดความเร่งของการเคลื่อนที่ของตู้รถไฟ (cm/s)
 f = ค่าความถี่จากการกระตุ้น (Hz)

ในขณะเดียวกัน สำหรับการประเมินความนุ่มนวลหรือความสบายในการโดยสาร (Ride Comfort) จะสามารถทำได้จาก

$$W_z = 0.896 \sqrt[10]{\frac{a^3}{f} F(f)} \quad (2.12)$$

เมื่อ $F(f)$ = ค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนัก (Weighting Factor)

ค่า $F(f)$ ถูกนำมาใช้ เพื่อแก้ไขค่าของความเร่งที่ขึ้นอยู่กับความถี่กระตุ้น เพื่อเป็นการคำนึงถึงความไวของร่างกายมนุษย์ต่อการรับรู้ถึงความสั่นสะเทือนได้ โดยดูเทียบได้จากตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนักของความเร่งที่ช่วงความถี่กระตุ้นต่าง ๆ

ทิศทางที่พิจารณา	ความสัมพันธ์สำหรับการคำนวณ	ช่วงความถี่ที่ใช้งานได้
แนวตั้ง	$F(f) = 0.325f$	$0.5 < f < 5.9 \text{ Hz}$
	$F(f) = 400/f$	$5.9 < f < 20 \text{ Hz}$
	$F(f) = 1$	$f > 20 \text{ Hz}$
แนวนอน	$F(f) = 0.8f$	$0.5 < f < 5.9 \text{ Hz}$
	$F(f) = 650/f$	$5.9 < f < 26 \text{ Hz}$
	$F(f) = 1$	$f > 26 \text{ Hz}$

โดยปกติฟังก์ชันการถ่วงน้ำหนักความถี่ $F(f)$ จะถูกแทนที่ด้วยฟังก์ชันการถ่วงน้ำหนัก $B(f)$ ที่สามารถนำไปใช้กับค่าแอมพลิจูดความเร่งได้โดยตรง สามารถเขียนได้ว่า

$$W_z = \sqrt[10]{B(f)^3 a^3} \quad (2.13)$$

สำหรับการประเมินคุณภาพในการเดินทาง

$$B(f) = 1.14 \sqrt{\frac{[(1-0.056f^2)^2 + (0.645f)^2](3.55f^2)}{(1-0.252f^2)^2 + (1.547f - 0.00444f^3)^2}(1+3.55f^2)}} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการประเมินความนุ่มนวลหรือความสบายในการโดยสารจากการสั่นสะเทือนในแนวตั้งและแนวนอน เป็นไปตามสมการ (2.13) และ (2.14)

$$B_{vert}(f) = 0.588 \sqrt{\frac{1.911f^2 + (0.25f^2)^2}{(1 - 0.277f^2)^2 + (1.563f - 0.0368f^3)^2}} \quad (2.15)$$

$$B_{lat}(f) = 0.737 \sqrt{\frac{1.911f^2 + (0.25f^2)^2}{(1 - 0.277f^2)^2 + (1.563f - 0.0368f^3)^2}} \quad (2.16)$$

หรืออาจเขียนได้ว่า

$$B_{lat}(f) = 1.25B_{vert}(f) \quad (2.17)$$

ความสำคัญของดัชนีการโดยสาร สำหรับการประเมินคุณภาพการเดินรถได้ระบุไว้ในตารางที่ 2.4 สำหรับตารางที่ 2.5 อธิบายถึงเกณฑ์ของความนุ่มนวลหรือความสบายในการโดยสารสำหรับทิศทางแนวตั้งและแนวนอน

ตารางที่ 2.4 ตารางประเมินการโดยสาร – คุณภาพการโดยสาร

ดัชนีการโดยสาร W_z	คุณภาพการเดินรถ
1.0	Very good
2.0	Good
3.0	Satisfactory
4.0	Acceptable for running
4.5	Not acceptable for running
5.0	Dangerous

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use²⁷ only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 2.5 ตารางประเมินการโดยสาร – ความนุ่มนวลหรือความสบายในการโดยสาร

ดัชนีการโดยสาร W_z	ความนุ่มนวลหรือความสบายในการโดยสาร
1.0	Just noticeable
2.0	Clearly noticeable
2.5	More pronounced but not unpleasant
3.0	Strong, irregular, but still tolerable
3.25	Very irregular
3.5	Extremely irregular, unpleasant, annoying; prolonged exposure intolerable
4.0	Extremely unpleasant; prolonged exposure harmful

2.3.10 ปฏิกริยาต่อความสะอวสบายต่อสภาพแวดล้อมที่มีการสั่นสะเทือน [11]

(Comfort Reaction to Vibration Environments)

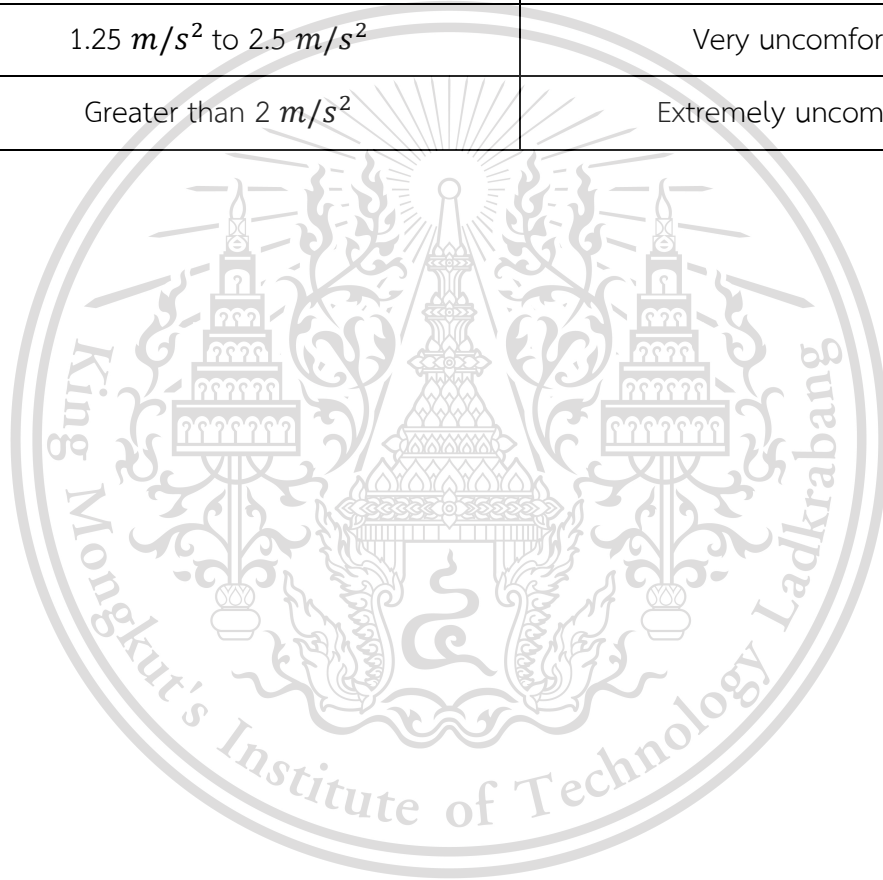
อ้างอิงจากเอกสารมาตรฐาน ISO 2631-1 “Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements” ได้กล่าวไว้ว่า ค่าขนาดการสั่นสะเทือนที่ยอมรับได้เพื่อความสะอวสบายตาม ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการที่แตกต่างกันไปในแต่ละรูปแบบการใช้งาน ดังนั้นจึงไม่มีการกำหนดขีดจำกัดในส่วนนี้ ค่าต่อไปนี้เป็นตัวบ่งชี้โดยประมาณของปฏิกริยาที่น่าจะเป็นไปได้ต่อขนาดการสั่นสะเทือนต่าง ๆ โดยรวมในระบบขนส่งสาธารณะ

อย่างไรก็ตาม ปฏิกริยาที่ระดับต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับความคาดหวังของผู้โดยสารโดยคำนึงถึงระยะเวลาการเดินทางและประเภทของกิจกรรมที่ผู้โดยสารคาดว่าจะทำให้สำเร็จ เช่น การอ่าน การรับประทานอาหาร การเขียน ฯลฯ และปัจจัยอื่น ๆ เช่น เสียง อุณหภูมิ เป็นต้น ขนาดที่ระดับต่าง ๆ คือขนาดความเร่งในช่วง ๆ หนึ่ง เป็นไปตามตารางที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 ตารางความเร่งการสั่นสะเทือน ที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้

Vibration Acceleration	Comfort Grade
Less than 0.315 m/s^2	Not uncomfortable
0.315 m/s^2 to 0.63 m/s^2	A little uncomfortable
0.5 m/s^2 to 1 m/s^2	Fairly uncomfortable
0.8 m/s^2 to 1.6 m/s^2	Uncomfortable
1.25 m/s^2 to 2.5 m/s^2	Very uncomfortable
Greater than 2 m/s^2	Extremely uncomfortable



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use²⁹ only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

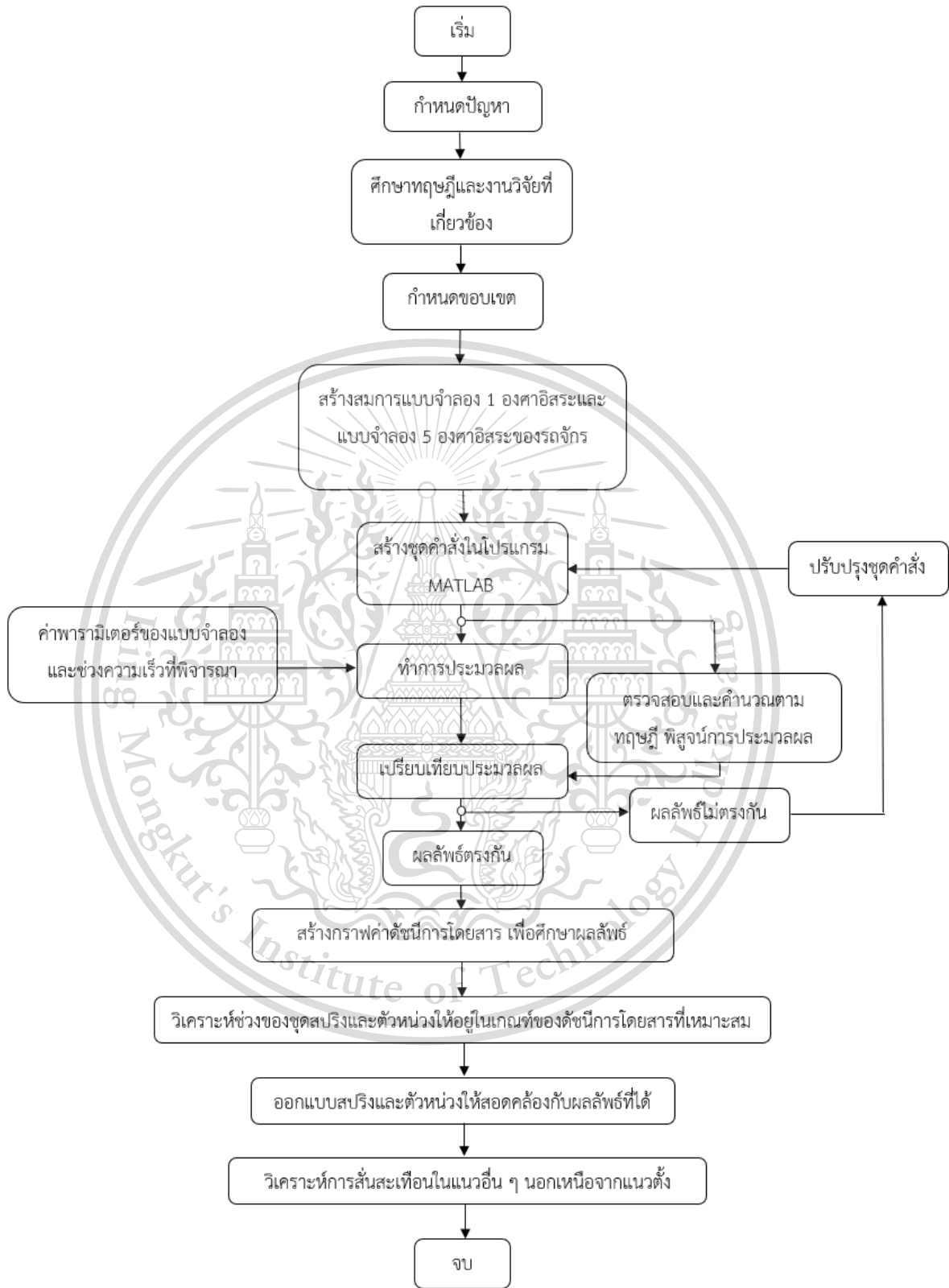
3.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับวิธีการสันสะเทือนแบบหลายองศาอิสระในการประเมินหาค่าของแอมพลิจูดความเร่งและความถี่ในการสันสะเทือนของตัวรถจักรไฟฟ้า (Electric Locomotive) โดยหลังจากได้กำหนดขอบเขตและสมมุติฐานในการศึกษาแล้ว เริ่มด้วยการนำเสนอผลการสันสะเทือนแบบหลายองศาอิสระ และค่าคุณสมบัติทางกลของตัวรถจักร มาวิเคราะห์แนวทางการแก้สมการเพื่อหาผลเฉลยออกเป็นสมการของการเคลื่อนที่ จากนั้นนำชุดสมการการเคลื่อนที่มาทำการประมวลผลจำลองด้วยชุดคำสั่งที่สร้างไว้ในโปรแกรม MATLAB เพื่อตรวจสอบและหาค่าแอมพลิจูดความเร่งและความถี่ในการสันสะเทือนเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าดัชนีการโดยสาร (Ride Index) ผ่านโปรแกรม MATLAB แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎี เพื่อวิเคราะห์และประเมินพฤติกรรมของแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของดัชนีการโดยสาร ณ ความเร็วค่าต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ โดยรูปที่ 3.1 จะแสดงถึงแผนงานในการดำเนินการวิเคราะห์ของคณะผู้จัดทำในครั้งนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use³⁰only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **รูปที่ 3.1** แสดงแผนภูมิของวิธีการดำเนินงานให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 แบบจำลองรถจักรไฟฟ้า

ข้อมูลชิ้นส่วนและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบของรถจักร จะทำการศึกษาโดยสร้างแบบจำลองของรถไฟ ที่มีลักษณะเป็นรถไฟที่ไร้โครงแคร์ (Bogie-less) และมี 5 องศาอิสระภายในระบบ ซึ่งถึงเป็นแบบจำลองสำหรับรถไฟที่เรียบง่ายต่อการวิเคราะห์หามากที่สุด[12] โดยทั้ง 5 แนวการเคลื่อนที่ในแบบจำลองนี้ได้แก่

1. การเคลื่อนที่ในทิศทางแนวตั้งของรถจักร (Vertical Motion of Carbody) หรือ Z_{CB}
2. การเคลื่อนที่ในทิศทางตามแนวยาวของชุดล้อและเพลานำ (Longitudinal Motion of Leading Wheelset) หรือ x_{wl}
3. การเคลื่อนที่ในทิศทางตามแนวยาวของชุดล้อและเพลาลำตาม (Longitudinal Motion of Trailing Wheelset) หรือ x_{wt}
4. การเคลื่อนที่แบบกระดกของตู้ (Pitch Motion of Carbody) หรือ φ_{CB}
5. การเคลื่อนที่ในทิศทางแนวตามยาวของรถจักร (Longitudinal Motion of Carbody) หรือ x_{CB}

3.2.1 ส่วนประกอบแบบจำลองของรถจักร

รถจักรจำลองที่เลือกใช้ จะประกอบไปด้วยโครงสร้างได้แก่ ตู้รถ (Carbody) และ ชุดล้อและเพลานำ (Wheelsets) โดยชุดล้อและเพลานำแต่ละส่วนจะถูกรองรับด้วยระบบกันสะเทือน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างตัวตู้รถและชุดล้อและเพลานำ โดยค่าพารามิเตอร์ของแต่ละชิ้นส่วนก็จะมีค่าแตกต่างกันไป ทั้งนี้ เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าดัชนีการโดยสารของรถจักรต่อไป

3.2.1.1 ตู้รถของแบบจำลองของรถจักร

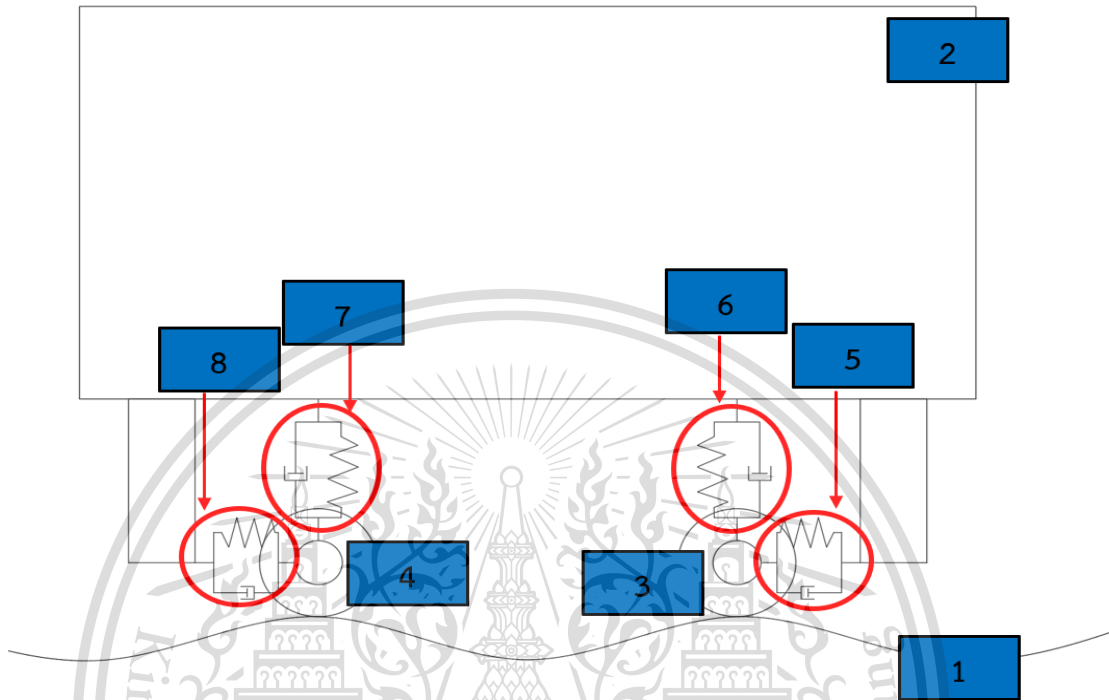
ตู้รถ (Carbody) เป็นโครงสร้างส่วนบน เป็นที่ติดตั้งของเครื่องยนต์ ระบบควบคุม อุปกรณ์ของระบบรถไฟ และห้องคนขับรถไฟ เพื่อลากจูงตู้รถโดยสารหรือตู้ขนส่งสินค้าคอนเทนเนอร์บนทางรถไฟที่เปิดให้บริการ

3.2.1.2 ชุดล้อและเพลานำของแบบจำลองของรถจักร

ชุดล้อและเพลานำ (Wheelsets) เป็นส่วนล่างของระบบ มีจุดสัมผัสกับรางรถไฟและจะหมุนเคลื่อนที่ไปบนทาง เป็นส่วนที่จะต้องรองรับและถ่ายน้ำหนักจากตัวรถลงไปสู่รางรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ ได้ทำการแจกแจง และแสดงให้เห็นเรียบร้อยแล้วไว้ดังรูปที่ 3.2 และตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 หมายเลขพร้อมตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นส่วนของรถไฟแบบ 2 เพลาล้อ

ตารางที่ 3.1 หมายเลขพร้อมชื่อของชิ้นส่วนต่าง ๆ

หมายเลขชิ้นส่วน	ชื่อเรียกชิ้นส่วน
1	รางรถไฟ
2	ตู้รถ
3	ชุดล้อและเพลาน้ำ
4	ชุดล้อและเพลาทาม
5	ชุดสปริงและตัวหน่วงในแนวตามยาวส่วนหน้า
6	ชุดสปริงและตัวหน่วงในแนวตั้งส่วนหน้า
7	ชุดสปริงและตัวหน่วงในแนวตั้งส่วนหลัง
8	ชุดสปริงและตัวหน่วงในแนวตามยาวส่วนหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.3 ระบบกันสะเทือนของแบบจำลองของรถจักร

ระบบกันสะเทือน (Suspension System) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยงโครงสร้างระหว่างตู้รถและชุดล้อและเพลลาเพื่อรองรับและผ่อนการสั่นสะเทือนของตัวตู้รถ ไม่ให้มีการสั่นสะเทือนมากเกินไป และระบบกันสะเทือนภายในแบบจำลองจะประกอบไปด้วยสปริงและตัวหน่วงในแนวตั้งและแนวตามยาวในแต่ละ 1 ชุดล้อและเพลลา

3.3 การวิเคราะห์หาผลเฉลยของสมการการสั่นสะเทือนแบบหลายองศาอิสระ

ในการวิเคราะห์หาผลเฉลยของสมการการสั่นสะเทือนแบบหลายองศาอิสระ สำหรับการสั่นสะเทือนของตัวรถจักรนั้น จะใช้โปรแกรม MATLAB ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ของสมการพลศาสตร์การสั่นสะเทือนแบบหลายองศาอิสระ เพื่อนำผลลัพธ์ของค่าแอมพลิจูดความเร่งและความถี่ในการสั่นสะเทือนสำหรับช่วงสภาวะคงตัวในสมการผลเฉลย ไปใช้ในการคำนวณหาค่าดัชนีการโดยสารต่อไป

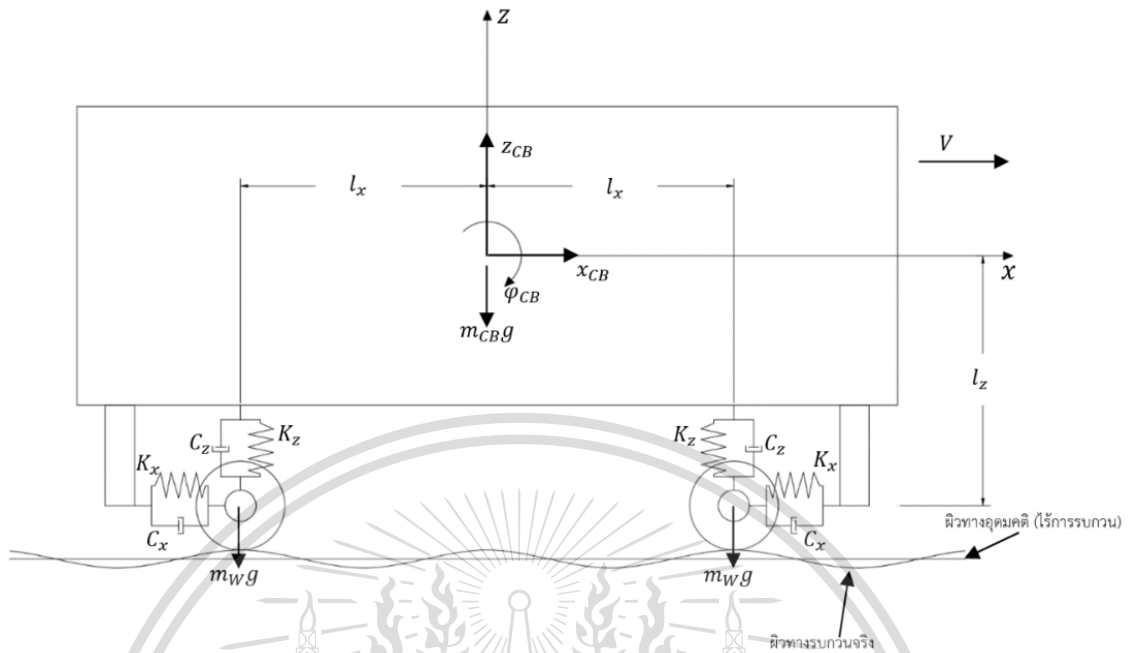
3.3.1 สมมติฐานในการดำเนินงาน

ก่อนเริ่มการวิเคราะห์ระบบ จะทำการตั้งสมมติฐานสำหรับการดำเนินงานไว้ดังนี้

1. รถไฟจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ V บนทางรถไฟตรงโดยมีลักษณะผิวทางเป็นฟังก์ชันไซน์ซอซด์ ทำให้มีการเคลื่อนที่ที่สม่ำเสมอโดยจะมีความเร็วสูงสุดที่ 15 km/hr [13]
2. ความสัมพันธ์ทางจลนศาสตร์ รวมทั้งค่าของสปริงและตัวหน่วงทั้งหมด จะมองเป็นระบบเชิงเส้นภายในระบบรถไฟ
3. ให้ตู้รถ ชุดล้อและเพลลา และทางรถไฟเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Bodies) โดยทางรถไฟจะถูกยึดติดอยู่กับพื้น
4. ในทิศทางแนวตั้งจะมีการสัมผัสกันระหว่างล้อและรางรถไฟเสมอ ซึ่งเป็นเงื่อนไขทางเรขาคณิต (Geometric Constraint)
5. สำหรับการเคลื่อนที่ทั้งแบบมีแรงภายนอกและแบบไม่มีแรงภายนอกกระทำ จะไม่มีความคืบเกิดขึ้นระหว่างล้อรถไฟกับรางรถไฟ
6. ค่าของดัชนีการโดยสารจะต้องมีค่าไม่เกิน 3.25 ในทุก ๆ กรณี เมื่ออ้างอิงจากตารางที่ 2.5
7. ไม่มีการคำนึงถึงการเคลื่อนที่ตามแนวขวางของรถจักร (Lateral Motion)

3.3.2 การระบุมิติและพารามิเตอร์ภายในระบบของแบบจำลอง

ทำการกำหนดมิติและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในระบบดังรูปที่ 3.3 โดยที่แต่ละค่ามีชื่อเรียกตามเอกสารนี้เป็นตารางที่ 3.2 ดังนี้ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แผนภาพของรถไฟแบบ 2 ชุดล้อและเพลลา พร้อมตัวแปรและพิกัดต่าง ๆ

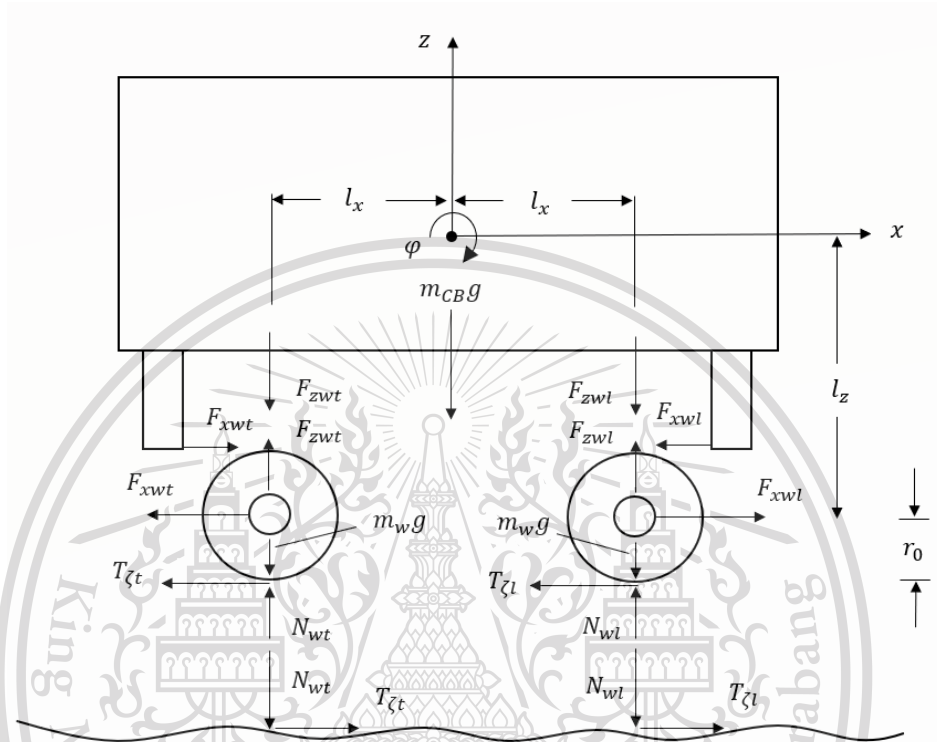
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของระบบ

ตัวแปร	คำอธิบายตัวแปร
$m_{CB} (kg)$	มวลของตู้รถไฟ
$m_w (kg)$	มวลของล้อรถไฟ
$K_z (N/m)$	ค่านิจสปริงในแนวตั้ง
$K_x (N/m)$	ค่านิจสปริงในแนวราบ
$C_z (N \cdot s/m)$	ค่าความหน่วงในแนวตั้ง
$C_x (N \cdot s/m)$	ค่าความหน่วงในแนวราบ
$l_x (m)$	ระยะจากกึ่งกลางตู้รถถึงกึ่งกลางเพลาล้อในแนวราบ
$l_z (m)$	ระยะจากกึ่งกลางตู้รถถึงกึ่งกลางเพลาล้อในแนวตั้ง
$L (m)$	ความยาวคลื่นของลูกคลื่นราง
$z_0 (m)$	แอมพลิจูดของลูกคลื่นของราง
$r_0 (m)$	รัศมีของล้อ
$r_a (m)$	รัศมีของเพลลา
$I_{CB} (kg \cdot m^2)$	โมเมนต์ความเฉื่อยของตู้รถในแนวตามขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ระบบสมการการเคลื่อนที่สำหรับแบบจำลองรถไฟ 5 องศาอิสระ

เนื่องจากเป็นรถไฟระบบ 5 องศาอิสระ ได้แก่ $z_{CB}(t)$ $x_{CB}(t)$ $\varphi_{CB}(t)$ $x_{wl}(t)$ และ $x_{wt}(t)$ จึงสามารถวิเคราะห์หาสมการการเคลื่อนที่ของระบบ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ออกมาได้ทั้งหมด 5 สมการ ดังนี้



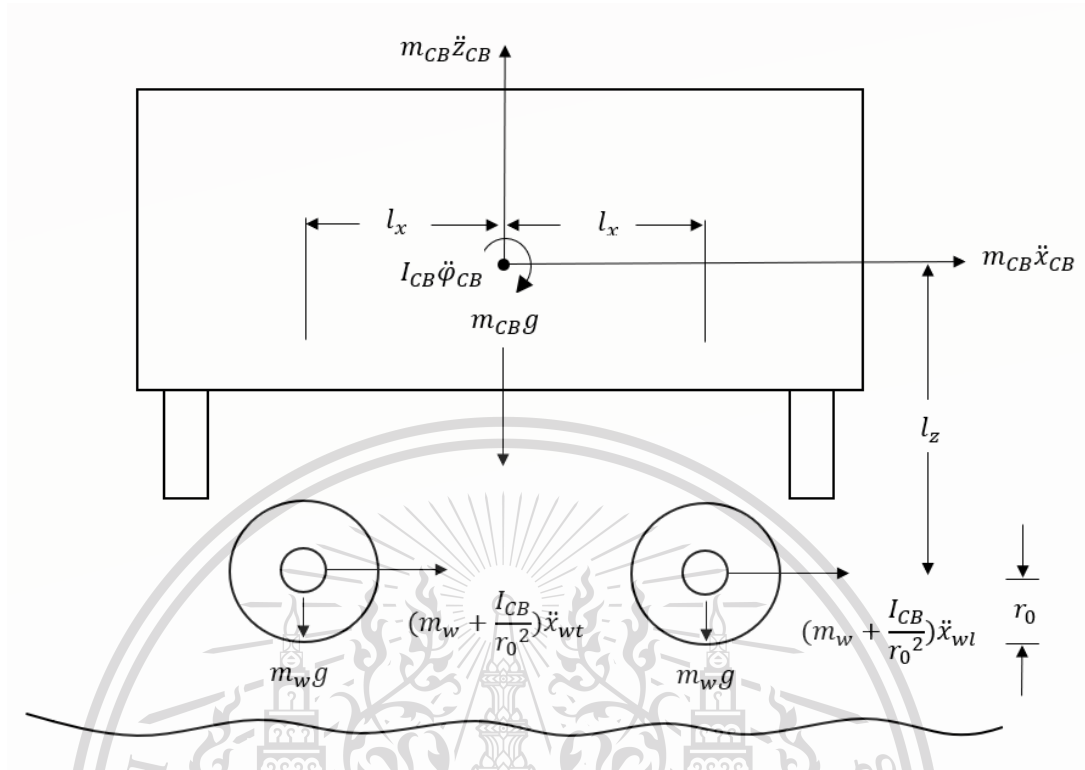
รูปที่ 3.4 แสดงแผนภาพวัตถุอิสระ (Free Body Diagram) ของแบบจำลองรถไฟระบบ 5 องศาอิสระ

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรแรงของระบบ

ตัวแปร	คำอธิบายตัวแปร
$F_{zwl}(N)$	แรงที่ตู้รถกระทำต่อเพลาล้อหน้าในแนวตั้ง
$F_{zwt}(N)$	แรงที่ตู้รถกระทำต่อเพลาล้อหลังในแนวตั้ง
$F_{xwl}(N)$	แรงที่ตู้รถกระทำต่อเพลาล้อหน้าในแนวราบ
$F_{xwt}(N)$	แรงที่ตู้รถกระทำต่อเพลาล้อหลังในแนวราบ
$N_{wl}(N)$	แรงที่รางกระทำต่อชุดล้อและเพลาล้อหน้า
$N_{wt}(N)$	แรงที่รางกระทำต่อเพลาล้อหลัง
$T_{zt}(N)$	แรงคืบตามแนวยาวที่กระทำต่อเพลาล้อหน้า
$T_{zl}(N)$	แรงคืบตามแนวยาวที่กระทำต่อเพลาล้อหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรรณเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงแผนภาพจลนศาสตร์ (Kinematic Diagram) ของแบบจำลองรถไฟระบบ 5 องศาอิสระ

สมการการเคลื่อนที่สำหรับตุ้รถ

$$m_{CB}\ddot{x}_{CB} = -2K_x x_{CB} - 2C_x \dot{x}_{CB} + 2K_x l_z \phi_{CB} + 2C_x l_z \dot{\phi}_{CB} + K_x x_{wl} + K_x x_{wt} + C_x \dot{x}_{wl} + C_x \dot{x}_{wt} \quad (3.1)$$

$$m_{CB}\ddot{z}_{CB} = -2K_x z_{CB} - 2C_z \dot{z}_{CB} + K_z z_{wl} + K_z z_{wt} + C_z \dot{z}_{wl} + C_z \dot{z}_{wt} - m_{CB}g \quad (3.2)$$

$$I_{CB}\ddot{\phi}_{CB} = -2K_x l_z^2 \phi_{CB} - 2K_z l_x^2 \phi_{CB} - 2C_x l_z^2 \dot{\phi}_{CB} - 2C_z l_x^2 \dot{\phi}_{CB} + 2K_x l_z x_{CB} + 2C_x l_z \dot{x}_{CB} - K_x l_z x_{wl} - C_x l_z \dot{x}_{wl} - K_z l_x z_{wl} - C_z l_x \dot{z}_{wl} - K_x l_z x_{wt} - C_x l_z \dot{x}_{wt} + K_z l_x z_{wt} + C_z l_x \dot{z}_{wt} \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการการเคลื่อนที่สำหรับชุดล้อและเพลลา

ชุดล้อและเพลลานำ (Leading Wheelset)

$$\begin{aligned} \left(m_w + \frac{I_{CB}}{r^2}\right) \ddot{x}_{wl} = & K_x(x_{CB} - x_{wl}) - K_x l_z \phi_{CB} + C_x \dot{x}_{CB} \\ & - C_x l_z \dot{\phi}_{CB} - C_x \dot{x}_{wl} \end{aligned} \quad (3.4)$$

ชุดล้อและเพลลาตาม (Trailing Wheelset)

$$\begin{aligned} \left(m_w + \frac{I_{CB}}{r^2}\right) \ddot{x}_{wt} = & K_x(x_{CB} - x_{wt}) - K_x l_z \phi_{CB} + C_x \dot{x}_{CB} \\ & - C_x l_z \dot{\phi}_{CB} - C_x \dot{x}_{wt} \end{aligned} \quad (3.5)$$

สมการกระตุ้นจากผิวทางรบกวนจริงต่อชุดล้อและเพลลา

ชุดล้อและเพลลานำ (Leading Wheelset)

$$z_{wl} = z_0 \left\{ 1 - \cos \left[\left(\frac{2\pi V}{L} \right) \left(t + \frac{l_x}{V} \right) \right] \right\} \quad (3.6)$$

ชุดล้อและเพลลาตาม (Trailing Wheelset)

$$z_{wt} = z_0 \left\{ 1 - \cos \left[\left(\frac{2\pi V}{L} \right) \left(t - \frac{l_x}{V} \right) \right] \right\} \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การสร้างชุดคำสั่งสำหรับแบบจำลอง 5 องศาอิสระด้วยโปรแกรม MATLAB

เพื่อที่จะสามารถประเมินหาค่าของดัชนีการโดยสาร จะต้องทำการสร้างชุดคำสั่งในโปรแกรม MATLAB เพื่อทำการหาผลลัพธ์ในการนำมาวิเคราะห์ผลต่อไป ทั้งนี้ในแต่ละส่วนของแบบจำลองจะต้องมีการกำหนดค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์แต่ละตัวที่ใช้ออกแบบโดยอ้างอิงจากระเบียบการแข่งขัน IMechE Railway Challenge [13] เพื่อทำการวิเคราะห์และประเมินข้อมูลที่ได้รับจากการทำแบบจำลองและประมวลผล

3.3.4.1 กำหนดค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์

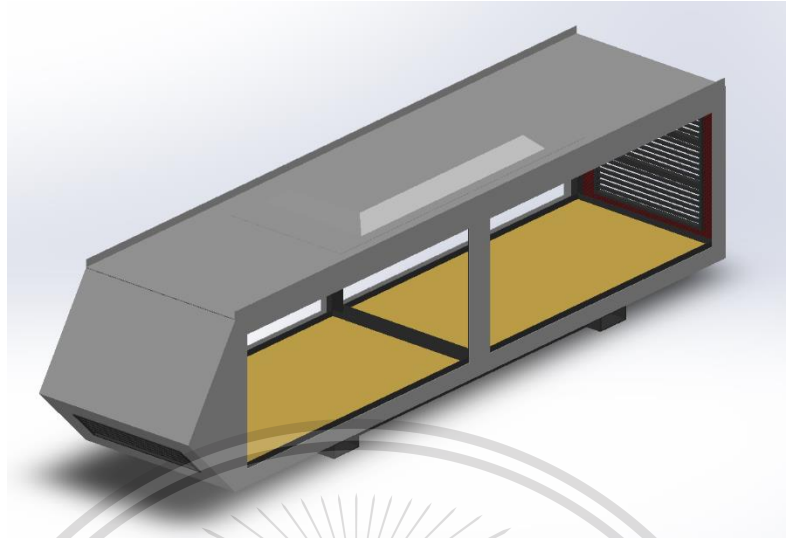
ทำการกำหนดค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ภายในแบบจำลอง ชุดข้อมูลที่จะกำหนดในต่อไปนี้จะมีการกำหนดค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นจะต้องใช้ภายในแบบจำลอง ชุดข้อมูลที่จะกำหนดในต่อไปนี้จะมีการกำหนดค่าต่าง ๆ ในตารางได้ทำการอ้างอิงมาจากกรกฎจักรไฟฟ้าที่เคยออกแบบไว้สำหรับการแข่งขัน STI Railway Challenge: Electric Locomotive Design Contest 2020 โดยจะนำคุณสมบัติของตู้รถเปล่า (Tare) และของชุดล้อและเพลามาใช้งาน ในเบื้องต้นจะได้ค่าออกมาดังนี้

ตารางที่ 3.4 ค่าต่าง ๆ ของแต่ละตัวแปร

ตัวแปร	ค่าของตัวแปรต่างๆ
$m_{CB} (kg)$	141.997
$l_x (m)$	0.6525
$L (m)$	1.5
$z_0 (m)$	0.001
$m_w (kg)$	23.977
$r_0 (m)$	0.25
$r_a (m)$	0.0125
$I_{CB} (kg \cdot m^2)$	97.038

สำหรับค่าของ K_z C_z K_x C_x และ I_z จะทำการวิเคราะห์หาช่วงที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ภาพ 3 มิติของแบบจำลองตู้รถไฟเปล่าที่ใช้ในการอ้างอิง



รูปที่ 3.7 ภาพ 3 มิติของแบบจำลองชุดล้อและเพล่าที่ใช้ในการอ้างอิง

3.3.4.2 การหาช่วงสำหรับสปริงและตัวหน่วงที่เหมาะสมต่อระบบ

ทำการวิเคราะห์หาช่วงของสปริงที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน โดยจะใช้ทฤษฎีระบบการสั่นสะเทือนของฐานองศาอิสระเท่ากับหนึ่งมาวิเคราะห์ และทำการอ้างอิงกราฟการส่งผ่านการกระจัด (รูปที่ 2.22) เมื่อหาได้แล้วจะนำไปวิเคราะห์หาชุดค่าสั่งที่เหมาะสมเพื่อการหาค่าดัชนีการโดยสารต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.3 การเขียนชุดคำสั่งด้วยโปรแกรม MATLAB สำหรับการแก้หาผลเฉลยของสมการ สำหรับแบบจำลองรถไฟ 5 องศาอิสระ

หลังจากสามารถระบุค่าต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้เพื่อการวิเคราะห์ในเบื้องต้นแล้ว จึงทำการเขียนชุดคำสั่งขึ้นมา 1 ชุดสำหรับการแก้ปัญหาระบบสมการจากหัวข้อ 3.3.3 ผลเฉลยที่ได้รับออกมา จะมีทั้งหมด 5 สมการ คือ $z_{CB}(t)$ $x_{CB}(t)$ $\varphi_{CB}(t)$ $x_{wl}(t)$ และ $x_{wt}(t)$

ทั้งนี้ เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของชุดคำสั่งดังกล่าว จะทำการทดสอบด้วยการหาผลเฉลยสำหรับระบบ 1 องศาอิสระด้วยเช่นกัน ซึ่งถือเป็นแบบจำลองในรูปแบบรถครึ่งคัน ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แผนภาพของรถไฟแบบครึ่งคัน พร้อมตัวแปรและพิกัดต่าง ๆ

รูปแบบของสมการและเงื่อนไขต่าง ๆ จะเป็นไปตามหัวข้อ 2.3.6 โดยจะทำการใช้ชุดคำสั่งที่ออกแบบไว้แล้ว มาคิดหาผลเฉลยสำหรับระบบ 1 องศาอิสระด้วยค่าของตัวแปรเช่นเดียวกับของระบบจำลองแบบ 5 องศาอิสระ หากการประมวลผลจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ตรงกับการคิดคำนวณหาผลเฉลยด้วยการเขียนกระดาษโดยอ้างอิงจากหัวข้อ 2.3.6 นั้นหมายความว่าชุดคำสั่งดังกล่าวจะสามารถใช้แก้หาผลเฉลยสำหรับแบบจำลอง 5 องศาอิสระได้นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 การประมวลผลหาค่าดัชนีการโดยสาร

หลังจากได้แนวทางการเขียนชุดคำสั่งใน MATLAB ที่ถูกต้องแล้ว ต่อไปจะเป็นการดำเนินการหาค่าดัชนีการโดยสารเพื่อเป็นการวิเคราะห์ว่า ด้วยลักษณะโครงสร้างของระบบ จะมีค่าของดัชนีอยู่ในเกณฑ์ไหน และมีค่าที่เหมาะสมหรือไม่ หลังจากหาค่าได้แล้วจะทำการเปรียบเทียบกับตารางที่ 2.5 ซึ่งเป็นตารางสำหรับการดูค่าความเหมาะสมของดัชนีการโดยสาร-ความนุ่มนวลหรือความสะดวกสบายในการโดยสาร เพื่อที่เราจะสามารถเปรียบเทียบได้ว่า หากได้ค่าของดัชนีออกมาค่าหนึ่ง จะสามารถบ่งบอกอะไรให้เราเมื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 2.5 ได้บ้าง

3.3.6 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในแนวออกเหนือจากแนวตั้ง

เมื่อเสร็จสิ้นการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในแนวตั้งแล้ว จะทำการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในแนวอื่น ๆ ภายในระบบเพื่อเป็นการสังเกตว่า ในแนวการสั่นสะเทือนที่เหลือนี้อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบในภาพรวมอย่างไร รวมทั้งการประเมินความแรงจากการสั่นสะเทือนในแนวตามยาวของตุ้รถ ว่าอยู่ในระดับที่รับได้หรือไม่

3.3.7 การแสดงผลการประมวลผล

สำหรับการแสดงผลลัพธ์ของค่าดัชนีการโดยสาร จะทำการประมวลผลภายในโปรแกรม MATLAB ให้เรียบร้อยก่อน จากนั้นจึงเก็บผลลัพธ์ที่ได้ไปกรอกลงในตารางของ Microsoft Excel เพื่อทำการแสดงผลเป็นกราฟเพื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลต่อไป สำหรับการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง ผลลัพธ์ดังกล่าวได้แก่ ค่าแอมพลิจูดการกระจัดการสั่นของตุ้รถ ค่าความถี่จากการกระตุ้นของทาง ส่วนในแนวการสั่นสะเทือนอื่น ๆ จะสนใจที่ค่าแอมพลิจูดการกระจัดของการสั่น และค่าแอมพลิจูดความแรงของการสั่น ซึ่งทั้งหมดจะเปลี่ยนไปตามความเร็วของรถไฟที่กำหนดไว้ (ชุดคำสั่งที่ใช้อ้างอิงจากภาคผนวก ค ถึงภาคผนวก จ)

3.4 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้

หลังจากที่ดำเนินการหาช่วงที่เหมาะสมสำหรับชุดสปริงและตัวหน่วง โดยเปรียบเทียบค่าความสะดวกสบายในการเดินทางโดยสารจากตารางที่ 2.5 ซึ่งเป็นตารางประเมินการเดินทาง-ความนุ่มนวลหรือความสะดวกสบายในการโดยสาร เพื่อพิจารณาค่าที่เหมาะสมของชุดสปริงและตัวหน่วงในแนวตั้งและแนวตามยาว ว่ามีค่าที่เหมาะสมตามเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้เพื่อใช้ออกแบบในการแข่งขันอย่างที่ควรจะเป็นหรือไม่

หากอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดจึงจะทำการเลือกชิ้นส่วนของชุดสปริงและตัวหน่วงที่มีอยู่จริง โดยใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ค่าคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้ และนำผลลัพธ์จากการใช้ค่าคุณสมบัติของชุดสปริงและตัวหน่วงที่ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้เลือก นำกลับไปคำนวณอีกครั้งเพื่อดูถึงความเหมาะสมและสรุปผลลัพธ์ที่ได้ออกมา จากนั้นจึงทำการ
ประเมินว่าการสั้นสะท้อนในแนวอื่น ๆ มีผลต่อความสะดวกสบายโดยรวมหรือไม่ โดยจะใช้ตารางที่ 2.6
สำหรับการดูความเหมาะสมของการสั้นสะท้อนในแนวตามยาวของตุ้รถ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use⁴³ only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงการประเมินค่าพารามิเตอร์ที่ยอมรับได้ในการวิเคราะห์ดัชนีการโดยสาร-ความนุ่มนวลและความสะดวกสบายในการโดยสาร (Ride Comfort) ของรถจักรต้นกำลัง ซึ่งวิ่งบนทางตรงที่อัตราเร็วที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาจากค่าดัชนีการโดยสาร (W_z) ซึ่งใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาถึงค่าคุณภาพการเดินรถ โดยการทดลองจะใช้โปรแกรม MATLAB และ Microsoft Excel ในการพิจารณาเพื่อสรุปผล จากวิธีการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบหลายองศาอิสระ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองจะเป็นระยะการกระจัดที่เกิดขึ้นในแนวการสั่นสะเทือน และค่าความถี่กับแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนของตู้รถ เพื่อที่จะนำไปหาค่าดัชนีการโดยสาร และทำการเปรียบเทียบโดยการปรับเปลี่ยนค่าของค่านิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วง เพื่อให้เห็นความแตกต่างและผลกระทบต่อค่าดัชนีการโดยสาร เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่า ๆ หนึ่งภายในระบบ

4.2 การวิเคราะห์หาช่วงของค่านิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วงที่เหมาะสมต่อชุดสปริงและตัวหน่วงในแนวตั้ง

ในการเริ่มต้นก่อนทำการวิเคราะห์ด้วยชุดคำสั่ง จะทำการคำนวณหาช่วงที่เหมาะสมต่อการใช้งานของชุดสปริงและตัวหน่วงเพื่อความสะดวกต่อการเลือกใช้ได้ดังนี้

เริ่มต้นจากการหาค่าของความถี่ธรรมชาติเชิงมุมของการสั่นกระตุ้น (Excitation Angular Frequency) หรือค่า ω_b ก่อน ซึ่งหาได้จาก

$$\omega_b = \frac{2\pi V}{L} \quad (4.1)$$

โดยอ้างอิงจากกฎระเบียบของการแข่งขัน IMechE Railway Challenge ได้ระบุไว้ว่า ความเร็วสูงสุดสำหรับรถจักร จะต้องวิ่งด้วยความเร็วสูงที่สุดไม่เกิน 15 km/hr โดยที่กำหนดว่า $L = 1.5 \text{ m}$ จะได้ค่าของความถี่การสั่นกระตุ้นเชิงมุมได้ 17.453 rad/s

จากกราฟในรูปที่ 2.22 จะเห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนเทียบกับค่าอัตราส่วนความถี่ หรือ r จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง $r = \sqrt{2}$ กราฟในแต่ละกรณีที่มีค่าอัตราส่วนความหน่วงต่างกันจะตัดกันที่ตำแหน่งนี้เสมอ ซึ่งเมื่อค่า $r > \sqrt{2}$ อัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนจะ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดตัวลงเมื่อค่าอัตราส่วนความถี่ลดลง หมายความว่าเมื่อชุดล้อและเพลลา มีแอมพลิจูดระยะการสั่นสะเทือน 0.001 m คงที่ตลอดการวิ่ง ระยะการสั่นสะเทือนของตู้รถจะลดต่ำลง การสั่นที่น้อย เบบางจนอาจไม่สามารถสัมผัสถึงแรงจากการสั่นสะเทือนได้ จากเงื่อนไขดังกล่าว จึงนำมาเป็นเงื่อนไขสำคัญในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่ควรเกิดขึ้นกับรถจักรชวงบน กล่าวคือ

$$r = \frac{\omega_b}{\omega_n} > \sqrt{2} \quad (4.2)$$

สามารถวิเคราะห์เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติเชิงมุม (Natural Angular Frequency) หรือค่า ω_n ได้ออกมาดังนี้

$$\frac{17.453}{\omega_n} > \sqrt{2}$$

$$\omega_n < 12.34 \text{ rad/s} \quad (4.3)$$

เนื่องจาก $\omega_n = \sqrt{\frac{K_z}{m_{CB}}}$ โดย $m_{CB} = 141.967 \text{ kg}$

จะได้ค่าขอบบนของค่านิจสปริงซึ่งมีค่าไม่เกิน

$$K_z < 21,622.62 \text{ N/m} \quad (4.4)$$

จากนั้นทำการกำหนดช่วงสำหรับการหาค่าคงที่ความหน่วงในแนวตั้ง กำหนดให้ค่าอัตราส่วนความหน่วงที่จะพิจารณามีค่าอยู่ในช่วง $0.1 \leq \zeta \leq 0.3$ [12]

จาก $\zeta = \frac{C_z}{2m_{CB}\omega_n}$ ให้ $\omega_n = 12.34 \text{ rad/s}$

ถ้า $\zeta = 0.1$ จะได้ว่า

$$0.1 \leq \frac{C_z}{2(141.997)(12.34)}$$

$$C_z \geq 350.45 \text{ N} \cdot \text{s/m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้า $\zeta = 0.3$ จะได้ว่า

$$\frac{C_z}{2(141.997)(12.34)} \leq 0.3$$

$$C_z \leq 1,051.34 \text{ N} \cdot \text{s/m}$$

นั่นคือ ถ้าต้องการให้มี ค่าอัตราส่วนความถี่อยู่ระหว่าง 0.1 – 0.3 สรุปได้ว่าค่าคงที่ความหน่วงต้องอยู่ในช่วงดังนี้

$$350.45 \leq C_z \leq 1,051.34 \text{ N} \cdot \text{s/m} \quad (4.5)$$

ดำเนินการหาค่าขอบล่างของค่านิจสปริงโดยจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1 เลือกใช้ค่าคงที่ความหน่วง $350.45 \text{ N} \cdot \text{s/m}$

จาก $\zeta = \frac{C_z}{2m_{CB}\omega_n}$ กำหนดให้ค่าอัตราส่วนความหน่วงที่จะพิจารณามีค่าอยู่ในช่วง $0.1 \leq \zeta \leq 0.3$

ถ้า $\zeta = 0.1$ จะได้ว่า

$$0.1 \leq \frac{350.45}{2(141.997)(\omega_n)}$$

$$\omega_n \leq 12.34 \text{ N/m}$$

$$K_z \leq 21622.62 \text{ N/m}$$

ถ้า $\zeta = 0.3$ จะได้ว่า

$$\frac{350.45}{2(141.997)(\omega_n)} \leq 0.3$$

$$\omega_n \geq 4.11 \text{ N/m}$$

$$K_z \geq 2402.55 \text{ N/m}$$

ได้ช่วงของค่านิจสปริงเป็น

$$2402.55 \leq K_z \leq 21622.62 \text{ N/m} \quad (4.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use⁴⁶ only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กรณีที่ 2 เลือกใช้ค่าคงที่ความหน่วง $1,051.34 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$

จาก $\zeta = \frac{c_z}{2m_{CB}\omega_n}$ กำหนดให้ค่าอัตราส่วนความหน่วงที่จะพิจารณามีค่าอยู่ในช่วง $0.1 \leq \zeta \leq 0.3$
ถ้า $\zeta = 0.1$ จะได้ว่า

$$0.1 \leq \frac{1,051.34}{2(141.997)(\omega_n)}$$

$$\omega_n \leq 37.02 \text{ N}/\text{m}$$

$$K_z \leq 194,602.51 \text{ N}/\text{m}$$

ถ้า $\zeta = 0.3$ จะได้ว่า

$$\frac{1,051.34}{2(141.997)(\omega_n)} \leq 0.3$$

$$\omega_n \geq 12.34 \text{ N}/\text{m}$$

$$K_z \geq 21,622.62 \text{ N}/\text{m}$$

ได้ช่วงของค่านิจสปริงเป็น

$$21,622.62 \leq K_z \leq 194,602.51 \text{ N}/\text{m} \quad (4.7)$$

จากทั้งสองกรณีจะระบุช่วงของค่านิจสปริงได้ว่า

$$2,402.55 \leq K_z \leq 194,602.51 \text{ N}/\text{m} \quad (4.8)$$

แต่เนื่องจากว่า ต้องคำนึงถึงเงื่อนไขของอัตราส่วนความถี่ต้องมีค่ามากกว่า $\sqrt{2}$ จึงสรุปช่วงของค่านิจสปริงใหม่ได้ว่า

$$2,402.55 \leq K_z < 21,622.62 \text{ N}/\text{m} \quad (4.9)$$

และเนื่องจากในแบบจำลอง มีสปริงในแนวตั้งและตัวหน่วงอย่างละ 2 ชั้น ดังนั้นจะได้ช่วงออกมา

ใหม่เป็น
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$1,201.28 \leq K_z < 10,811.31 \text{ N/m} \quad (4.10)$$

$$175.23 \leq C_z \leq 525.67 \text{ N} \cdot \text{s/m} \quad (4.11)$$

4.3 การตรวจสอบชุดคำสั่งการประมวลผลหาผลเฉลยจากระบบ 1 องศาอิสระ

จากการดำเนินการเขียนชุดคำสั่งสำหรับ MATLAB เพื่อการแก้หาผลเฉลยของชุดสมการของระบบ 5 องศาอิสระ จะเริ่มจากการใช้ชุดคำสั่งดังกล่าว (ภาคผนวก ค.) ในการแก้สมการหาผลเฉลยของสมการการสั่นสะเทือนในแนวตั้งของ 1 องศาอิสระ โดยจะทำการเปรียบเทียบกับความคิดในภาคผนวก ก. ด้วยเช่นกันเพื่อระบุว่า ชุดคำสั่งนี้สามารถใช้ได้จริง ให้ความเร็ววิเคราะห์เป็น 10 km/hr และทดสอบด้วยการเลือกใช้ค่าขอบบนของค่านิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วงที่เหมาะสมคือ $K_z = 21,622.62 \text{ N/m}$ และ $C_z = 1,051.34 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ มาใช้งาน จากภาคผนวก ก. จะหาสมการช่วงสภาวะคงตัวได้ว่า

$$X_{ss}(t) = 0.00199 \cos(11.636t - 2.433) \quad (4.12)$$

ในขณะเดียวกัน ผลลัพธ์จาก MATLAB ได้ออกมาดังนี้ (เลือกเฉพาะส่วนที่เป็นสภาวะคงตัวเท่านั้น และปรับจำนวนตัวเลขในการแสดงผลให้เรียบร้อย)

$$X_{ss}(t) = 1.297 \times 10^{-3} \sin(11.636t) - 1.513 \times 10^{-3} \cos(11.636t) \quad (4.13)$$

เมื่อจัดรูปสมการใหม่ พบว่า สมการ (4.13) จะมีค่าเท่ากับสมการที่ (4.12) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าชุดคำสั่งดังกล่าว สามารถใช้งานได้จริง (ภาคผนวก ข.)

4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์และแนวโน้มของระบบ 1 องศาอิสระและ 5 องศาอิสระ

จะทำการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในแนวตั้งให้ตรงตามทฤษฎีในหัวข้อ 2.3.6 โดยจะทำการเลือกค่านิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วงจากช่วงที่คำนวณออกมาได้อย่างละ 1 ค่า เพื่อเป็นการทดสอบ ชุดข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์จึงมีค่าเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

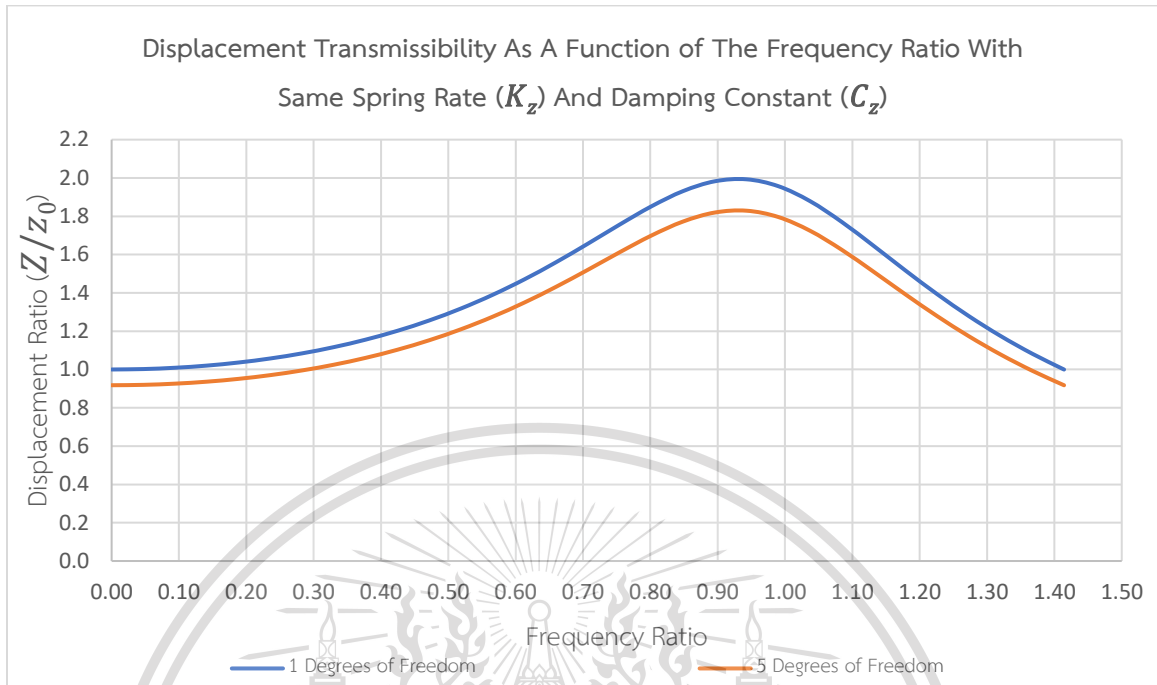
ตารางที่ 4.1 ค่าต่าง ๆ ของแต่ละตัวแปรสำหรับการทดสอบการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในแนวตั้ง

ตัวแปร	ค่าของตัวแปรต่างๆ
$m_{CB} (kg)$	141.997
$K_z (N/m)$	10,811.31
$C_z (N \cdot s/m)$	525.67
$l_x (m)$	0.6525
$L (m)$	1.5
$z_0 (m)$	0.001

จากนั้น จะเริ่มทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ขึ้นมาหนึ่งชุด เป็นกราฟของการส่งผ่านการกระจัด (Displacement Transmissibility) ซึ่งเป็นการเทียบกันระหว่างอัตราส่วนแอมพลิจูดการกระจัดของการสั่นสะเทือน (Displacement Amplitude: $\frac{Z}{z_0}$) กับอัตราส่วนความถี่ (Frequency Ratio: r) (หัวข้อ 2.3.6)

ทำการเก็บข้อมูลสำหรับระบบ 1 องศาอิสระและ 5 องศาอิสระ โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าความเร็วตามแนวยาวของรถไฟ โดยเริ่มจากความเร็ว 0 km/hr ไปจนถึง 15 km/hr แล้วบันทึกผลเป็นตารางลงใน Excel จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกันโดยจะอ้างอิงกราฟที่ได้จากการประมวลผล 1 องศาอิสระเป็นหลักก่อน ได้ออกมาคล้ายรูปที่ 2.22 ให้ค่านิจสปริงเท่ากับ 10,811.31 N/m และค่าคงที่ความหน่วงเท่ากับ 525.67 $N \cdot s/m$ ซึ่งนำไปสู่ค่าของอัตราส่วนความถี่ $\zeta = \frac{C_z}{2\sqrt{K_z m_{CB}}} = \frac{2C_z}{2\sqrt{2K_z m_{CB}}} = \frac{C_z}{\sqrt{2K_z m_{CB}}} = \frac{525.67}{\sqrt{2(10,811.3)(141.997)}} = 0.3$ มาเปรียบเทียบกันในเรื่องรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 การแสดงผลของกราฟการส่งผ่านการกระจัดจากการกระตุ้นด้วยแรง โดยเป็นการเปรียบเทียบกับระหว่างค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการกระจัดของการสั่นและอัตราส่วนความถี่สำหรับระบบ 1 และ 5 องศาอิสระ

ในรูปที่ 4.1 จะสังเกตเห็นว่าทั้งคู่มีค่านิจสปริงและค่าอัตราส่วนความถี่เหมือนกัน มีแนวโน้มของค่าอัตราส่วนวิกฤต (Critical Displacement Ratio) บริเวณจุดกำทอน (resonance) ในช่วงอัตราส่วนความถี่ 0.9 ถึง 1 เช่นเดียวกันทั้งคู่ แต่สำหรับระบบ 5 องศาอิสระกลับมีขนาดที่น้อยกว่าแบบระบบ 1 องศาอิสระ

อีกทั้งที่ความเร็วเป็น 0 สำหรับระบบ 5 องศาอิสระกลับมีอัตราส่วนเริ่มต้นที่ราว ๆ 0.9 ซึ่งน้อยกว่าแบบ 1 องศาอิสระอย่างชัดเจน สำหรับสาเหตุดังกล่าว ได้ทำการตั้งข้อสังเกตและวิเคราะห์ออกมาได้ดังนี้

1. เมื่อสังเกตสมการการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของทั้งสองระบบจะพบว่า

- สมการการเคลื่อนที่สำหรับระบบ 1 องศาอิสระมีดังนี้

$$\ddot{z}_{CB} + 2\zeta\omega_n\dot{z}_{CB} + \omega_n^2 z_{CB} = 2\zeta\omega_n\omega_b z_0 \cos\omega_b t + \omega_n^2 z_0 \sin\omega_b t$$

หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำมาเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สมการการเคลื่อนที่สำหรับระบบ 5 องศาอิสระมีดังนี้

$$m_{CB}\ddot{z}_{CB} + 2C_z\dot{z}_{CB} + 2K_z z_{CB} = C_z(z_l + z_t) + C_z(\dot{z}_l + \dot{z}_t) - m_{CB}g$$

$$\text{โดยที่ } z_l = z_0\{1 - \cos[\omega_b(t + \varphi)]\} \text{ และ } z_t = z_0\{1 - \cos[\omega_b(t - \varphi)]\}$$

$$\text{และ } \omega_{nz} = \sqrt{\frac{2c_z}{m_{CB}}}, \omega_b = \frac{2\pi V}{L}, \varphi = \frac{l_x}{V}$$

สำหรับทั้งสองสมการ หากสังเกตดี ๆ แล้ว จะพบว่า หากไม่มองที่พจน์ของ $m_{CB}g$ แล้วนั้น สมการของทั้งสองระบบจะมีความคล้ายคลึงกันมาก ต่างกันตรงที่ระบบ 5 องศาอิสระมีค่าของเฟสอยู่ภายในฟังก์ชันของล้อยด้วย ในขณะที่ระบบ 1 องศาอิสระจะไม่มีเฟสอยู่ภายในฟังก์ชันของล้อย นี่จึงเป็นจุดสังเกตแรกสำหรับความแตกต่างของทั้งสองระบบ

2. เมื่อเจาะลึกไปที่ตัวแปรของเฟส φ ค่าของมันจะหาได้จาก $\frac{l_x}{V}$ ซึ่ง l_x เป็นค่าของระยะห่างจากกึ่งกลางตุ้รถไปยังล้อยในแนวราบ และ V เป็นค่าคงที่ของความเร็ว ทำการเลือกพิจารณาที่ความเร็ว 0.1 km/hr โดยจะทำการทดลองปรับค่าของ l_x ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.75 ถึง 1.5 m แล้วสร้างกราฟขึ้นมาได้ออกดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

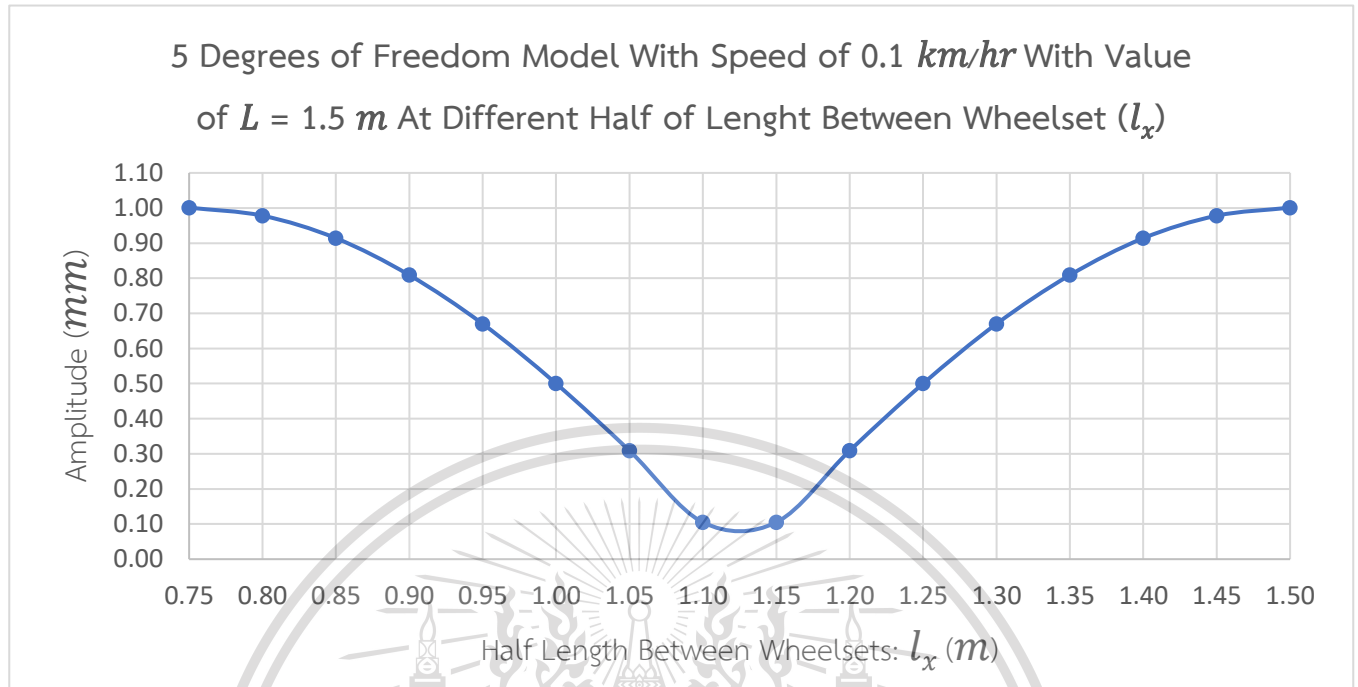
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการปรับเปลี่ยนค่าครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างชุดล้อและเพลลาเพื่อให้ได้ค่าของแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนแต่ละค่า

5 DOF, $V = 0.1 \text{ km/hr}$, $L = 1.5 \text{ m}$, Vary l_x	
$l_x \text{ (m)}$	แอมพลิจูด (mm)
0.75	1.001
0.8	0.978
0.85	0.914
0.9	0.809
0.95	0.670
1	0.500
1.05	0.309
1.1	0.105
1.15	0.105
1.2	0.309
1.25	0.500
1.3	0.670
1.35	0.809
1.4	0.914
1.45	0.978
1.5	1.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use⁵² only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.2 การแสดงผลของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดการกระจัดของการสั่นสะเทือนของตู้รถ ที่ความเร็ว 0.1 km/hr กับค่าครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างเพลลา

จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อเราปรับเปลี่ยนค่าครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างเพลลาไปเรื่อยๆ จะทำให้ผลลัพธ์เกิดเป็นวัฏจักรของคลื่นรูปแบบหนึ่ง ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าที่ค่าเข้าใกล้ 0.001 m หรือเข้าใกล้อัตราส่วนแอมพลิจูดการกระจัดของการสั่น ที่ 1 จะเกิดขึ้นที่ $L_x = 0.75, 1.50$ ซึ่งเลขเหล่านี้มีความสัมพันธ์บางอย่างรวมกันคือ เมื่อนำค่า L_x มาคูณ 2 จะสามารถหารด้วยค่าของความยาวคลื่นของลูกคลื่นราง (L) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.5 m ได้ลงตัวนั่นคือ

$$\frac{2(0.75)}{1.5} = 1, \quad \frac{2(1.50)}{1.5} = 2$$

จากเหตุผลที่กล่าวมาเป็นการสรุปได้ว่าทำไมค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการกระจัดของการสั่นสะเทือนของระบบ 5 องศาอิสระจึงไม่เริ่มต้นที่ 1 เหมือนกับแบบระบบ 1 องศาอิสระ นั่นเป็นเพราะโครงสร้างของรถที่จะส่งผลต่อการกระจัดของการสั่นสะเทือนของรถไฟได้ในขณะที่ระบบ 1 องศาอิสระไม่ได้มีพารามิเตอร์ของโครงสร้างรถประกอบอยู่ในระดับแต่อย่างใด โดยที่ระบบ 5 องศาอิสระเมื่อมีระยะห่างระหว่างชุดล้อและเพลลา เป็นพหุคูณของความยาวคลื่นบนทาง จะทำให้อัตราส่วนแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนมีค่าเข้าใกล้ 1 เสมอ เพราะมีความยาวเท่ากับคลื่นบนทาง 1 ลูก 2 ลูกไปเรื่อย ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การวิเคราะห์ค่าดัชนีการโดยสารจากเงื่อนไขของการออกแบบชุดสปริงและตัวหน่วง สำหรับการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง

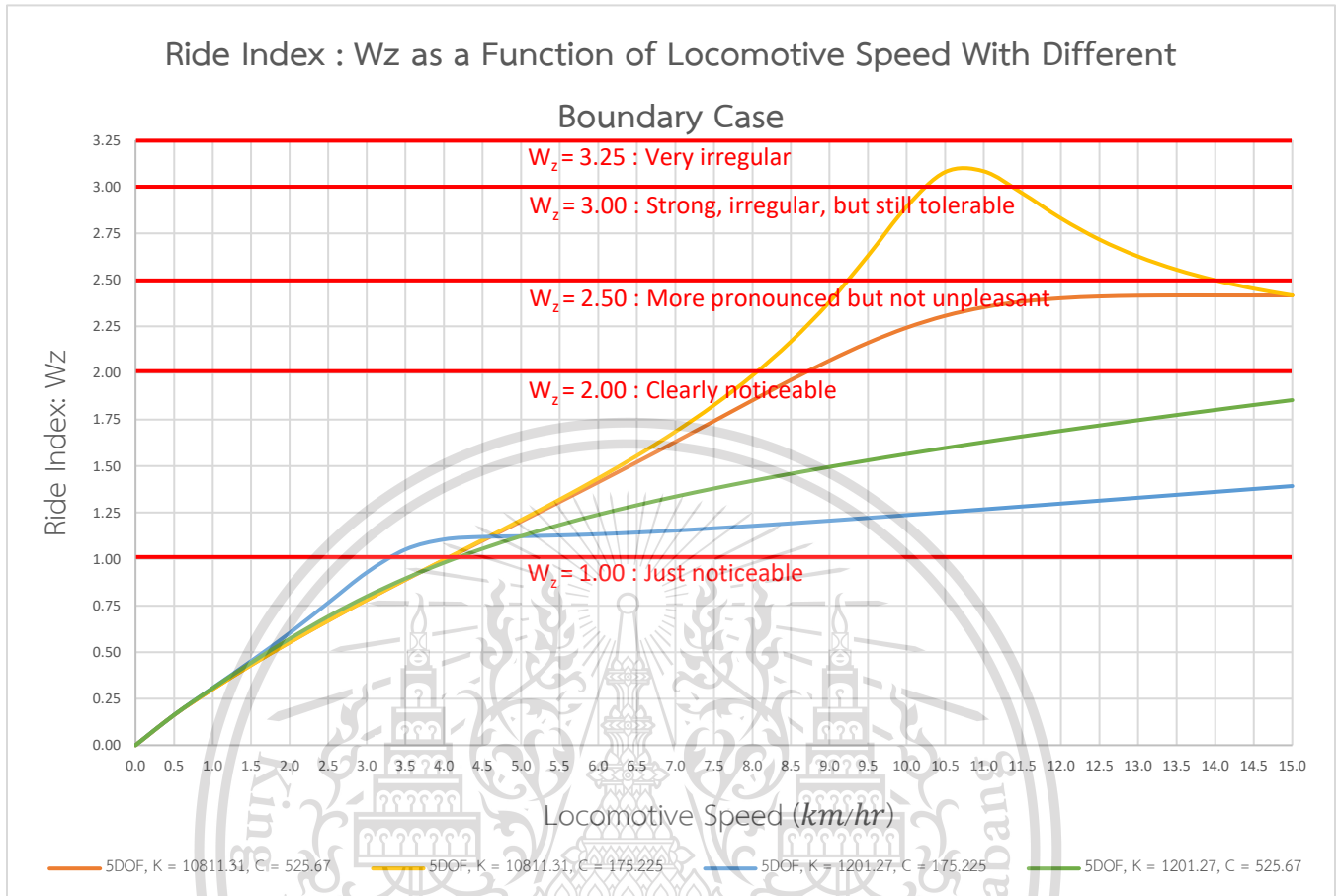
4.5.1 การวิเคราะห์ค่าดัชนีการโดยสารด้วยค่าขอบของค่านิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วง

หลังจากได้ทำการพิสูจน์ความน่าเชื่อถือของชุดคำสั่งการประมวลผลได้แล้ว ต่อไปเป็นการนำชุดคำสั่งดังกล่าวมาประมวลผลเพื่อวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในแนวตั้งก่อนเป็นอย่างแรก ในขั้นต้น จะทำการตรวจสอบช่วงที่คำนวณออกมาได้ว่ามีค่าของดัชนีการโดยสารเกิน 3.25 ตามที่ได้ตั้งเป้าไว้หรือไม่ แบ่งกรณีออกเป็น 4 กรณีได้ดังนี้

- กรณีที่ 1 ค่านิจสปริง $1,201.28 \text{ N/m}$ ค่าคงที่ความหน่วง $175.23 \text{ N} \cdot \text{s/m}$
- กรณีที่ 2 ค่านิจสปริง $1,201.28 \text{ N/m}$ ค่าคงที่ความหน่วง $525.67 \text{ N} \cdot \text{s/m}$
- กรณีที่ 3 ค่านิจสปริง $10,811.31 \text{ N/m}$ ค่าคงที่ความหน่วง $175.23 \text{ N} \cdot \text{s/m}$
- กรณีที่ 4 ค่านิจสปริง $10,811.31 \text{ N/m}$ ค่าคงที่ความหน่วง $525.67 \text{ N} \cdot \text{s/m}$

กรณีทั้ง 4 เป็นกรณีสำหรับการเลือกใช้ชุดสปริงและตัวหน่วงที่ค่าขอบบนและขอบล่าง เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรม ให้เริ่มทำการประมวลผลด้วย MATLAB และเก็บค่าด้วย Microsoft Excel จะสามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



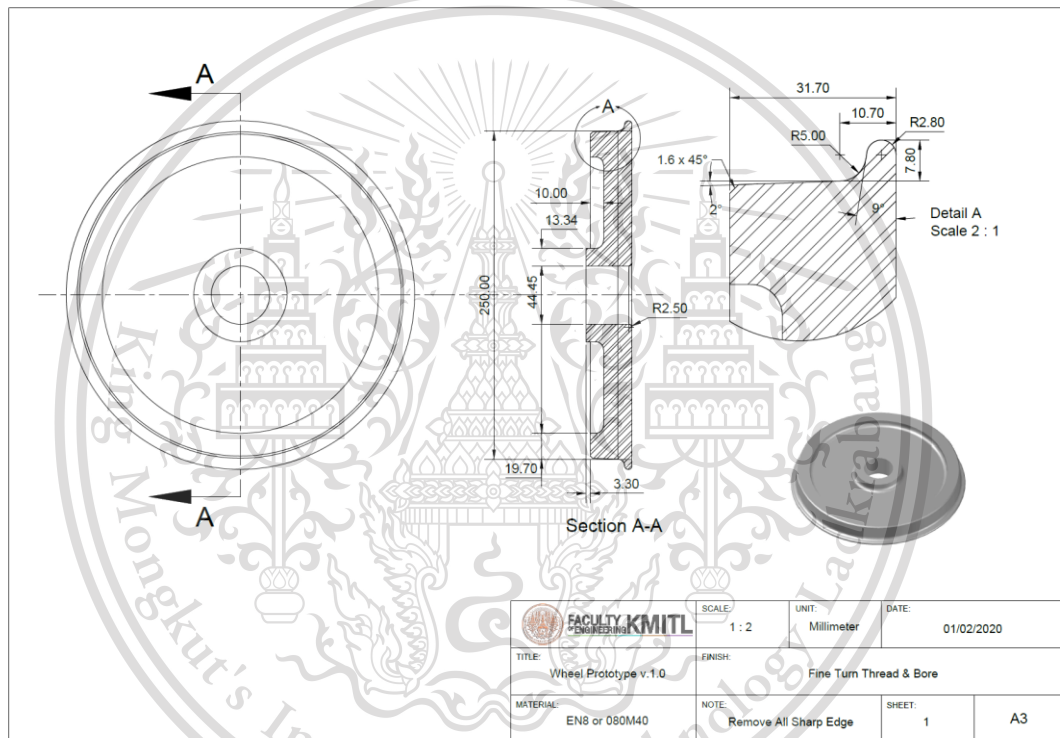
รูปที่ 4.3 การแสดงผลของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการโดยสารกับค่าความเร็วของรถจักร มี การแสดงช่วงของค่าความสะดวกสบายการโดยสารให้เห็นภาพอย่างชัดเจน

จะเห็นว่าค่าขอบของกรณีทั้ง 4 จะทำให้เกิดแนวโน้มของค่าดัชนีการโดยสารเป็นดังรูปที่ 4.3 โดย ในกรณีที่ 3 ที่ค่านิจสปริง $10,811.31 \text{ N/m}$ และค่าคงที่ความหน่วง $175.23 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ จะเกิดค่าของ ดัชนีการโดยสารสูงที่สุดมีค่าระหว่าง 3.00-3.25 ซึ่งเกิดในช่วงของความเร็ว $10.5 - 11.0 \text{ km/hr}$ ในขณะที่กรณีที่ 1 ที่ค่านิจสปริง $1,201.28 \text{ N/m}$ และเลือกใช้ค่าคงที่ความหน่วง $175.23 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ จะมีแนวโน้มของค่าดัชนีการโดยสารที่ต่ำที่สุดตลอดช่วงความเร็วของรถจักรที่เพิ่มขึ้น สรุปได้ว่าช่วงของค่า นิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วงที่คำนวณมาได้ สามารถใช้งานได้จริง โดยไม่ว่าจะเลือกค่าใด ๆ ในช่วง จะ ไม่มีทางที่ค่าของดัชนีการโดยสารมากกว่า 3.25 ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 การเลือกและวิเคราะห์สปริงและตัวหน่วงเพื่อการออกแบบชุดสปริงและตัวหน่วงของระบบจำลอง

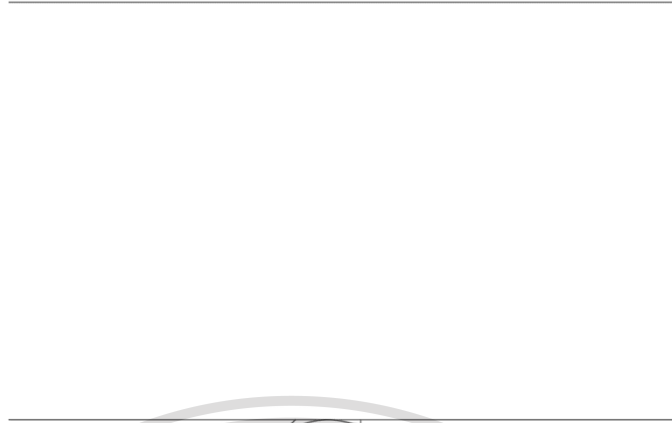
หลังจากได้ช่วงที่เหมาะสมต่อการออกแบบแล้ว ต่อมาทำการเลือกใช้สปริงและตัวหน่วงที่มีความเหมาะสมต่อระบบมา 1 ชุดด้วยกัน แต่ก่อนหน้าที่จะเลือกสปริงและตัวหน่วงที่เหมาะสมได้นั้น จำเป็นต้องวิเคราะห์พิกัดโครงสร้างของตัวรถเสียก่อนว่า สปริงและตัวหน่วงที่จะนำมาใช้มีข้อมูลจำเพาะต่าง ๆ โดยเฉพาะความยาวของมันว่าเป็นอย่างไรบ้าง สิ่งที่ต้องสังเกตเป็นอย่างแรกคือขนาดของล้อที่ได้ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนภาพวาดของล้อรถไฟที่ออกแบบไว้สำหรับการแข่งขัน Electric Locomotive Design Contest 2020

สิ่งที่ต้องสังเกตคือขนาดของล้อที่นำมาใช้งาน ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยรวม 250 mm นั่นคือมีรัศมีเป็น 125 mm และจะเห็นว่าล้อที่ได้ออกแบบไว้แล้วมีความยาวในส่วนของบังใบล้อ 7.8 mm เมื่อทำการติดตั้งชุดสปริงและตัวหน่วงจะทำการติดตั้งสปริงโดยเริ่มต้นการติดที่บริเวณจุดศูนย์กลางของเพลาล้อ แล้วไปติดที่บริเวณใต้ท้องรถ แสดงภาพจำลองการติดตั้งตามรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงถึงขอบเขตที่เล็กที่สุดที่เป็นไปได้สำหรับการติดตั้งสปริงภายในระบบ

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าถ้าต้องการจะติดตั้งสปริง ระยะที่สั้นที่สุดที่เป็นไปได้สำหรับการติดตั้งคือการพิจารณาว่าล้อจะติดอยู่กับตัวตุ้รถพืด ซึ่งจะติดกันในส่วนของบังใบล้อ หมายความว่าความยาวของสปริงที่ติดตั้งจะต้องมีค่ามากกว่า 132.8 mm ขึ้นไปจึงจะถือว่าเหมาะสม ส่วนสำหรับการเลือกขนาดของตัวห่วงนั้น ไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ เทียบเท่ากับการเลือกสปริงเพียงแต่ไม่ควรมีขนาดที่ใหญ่เกินไป ซึ่งสามารถอ้างอิงขนาดของสปริงที่เลือกมาแล้วได้

ทำการเลือกสปริงและตัวห่วง โดยพิจารณาข้อมูลจำเพาะของแต่ละชิ้น สามารถเลือกชิ้นงานออกมาได้ดังนี้

1. การเลือกสปริง ทำการทดสอบเลือกสปริงจากบริษัทมิซูมิ (MISUMI) [14] กำหนดให้
 - ทำการจะแบ่งสปริงที่ใช้ในระบบออกเป็น 4 ตัว แบ่งเป็นชุดล้อและเพลลา ชุดละ 2 ตัว แบ่งไปตามล้อ ล้อละ 1 ตัว
 - ค่านิจสปริงจะต้องอยู่ในช่วง $600.64 \leq K_z < 5405.66 \text{ N/m}$
 - ความยาวของสปริงในสภาวะสมดุลจะต้องมากกว่า 132.8 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเลือกตัวหน่วง ทำการทดสอบเลือกตัวหน่วงจากบริษัทเลคัฟพอช (Lesjöfors) [15] กำหนดให้
- ทำการจะแบ่งตัวหน่วงที่ใช้ในระบบออกเป็น 4 ตัว แบ่งเป็นชุดล้อและเพลลา ชุดละ 2 ตัว แบ่งไปตามล้อ ล้อละ 1 ตัว
 - ค่าคงที่ความหน่วงจะต้องอยู่ในช่วง $87.61 \leq C_z \leq 262.835 \text{ N} \cdot \text{s/m}$
 - ความยาวของตัวหน่วงในสภาวะสมดุลควรจะต้องสอดคล้องกับขนาดของสปริง และมีระยะชัก (Stroke) ที่สามารถรองรับการสั่นสะเทือนที่ความเร็วต่าง ๆ ได้

จากช่วงของสปริงที่ต้องพิจารณา เมื่อเลือกจำนวนสปริง 4 ตัวโดยอ้างอิงจากช่วงดังกล่าวจะต้องทำการพิจารณาในเบื้องต้นว่า สปริงจะยุบตัวลงมากที่สุดเท่าใดในขณะที่ยานจอดนิ่งอยู่กับที่ สำหรับระยะการยุบตัวของสปริงที่สภาวะสมดุลขณะรถหยุดนิ่ง จะหาได้จาก

$$F = K_{z,indi}z \quad (4.14)$$

โดยที่ F คือแรงกระทำต่อสปริง ในที่นี้คือน้ำหนักจากตุ้มน้ำหนักซึ่งถูกแบ่งน้ำหนักไปหาสปริงและตัวหน่วงรวม 8 ตัว มีค่าของแรงที่กระทำต่อแต่ละชิ้นดังนี้

$$F = \frac{1}{8}mg = \frac{141.997(9.81)}{8} = 174.12 \text{ N}$$

$K_{z,indi}$ คือนิจสปริงของแต่ละตัวภายในระบบ โดยจะทำการพิจารณาจากค่าขอบบนของช่วงค่านิจสปริงที่เหมาะสม มีค่า 5405.66 N/m

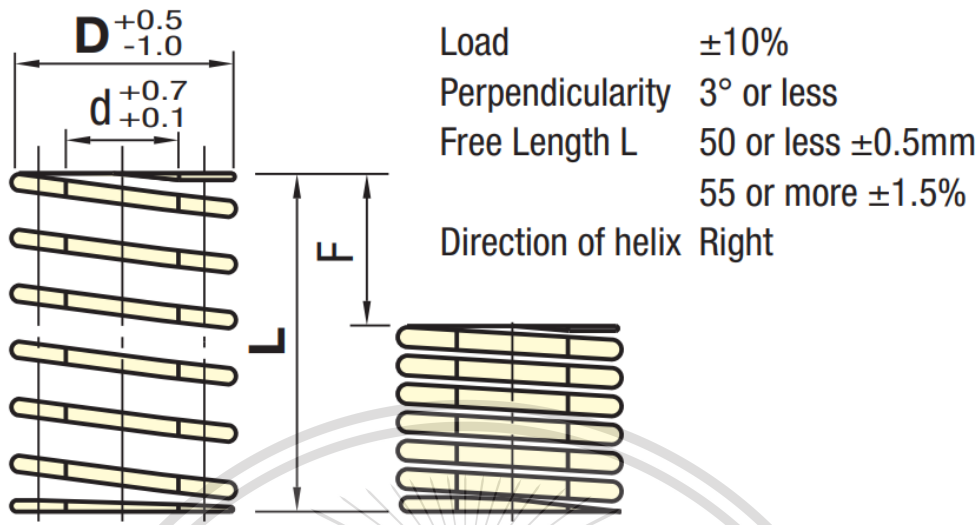
และ z คือระยะที่สปริงยุบตัวสถานะสมดุลในแต่ละตัว หาได้จาก

$$z = \frac{F}{K_{z,indi}} = \frac{174.12}{5,405.66} = 0.0322 \text{ m}$$

นั่นคือตุ้มน้ำหนักจะยุบตัวลงเป็นระยะ 0.0322 m หรือ 3.22 cm ที่สภาวะหยุดนิ่งสมดุล

ทำการเลือกสปริงและตัวหน่วง โดยพิจารณาข้อมูลจำเพาะของแต่ละชิ้น สามารถเลือกชิ้นงานออกมาได้ดังนี้ โดยข้อมูลจำเพาะของสปริงจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงถึงการระบุพิกัดต่าง ๆ สำหรับสปริง [14]

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงข้อมูลจำเพาะของสปริงที่เลือกมา

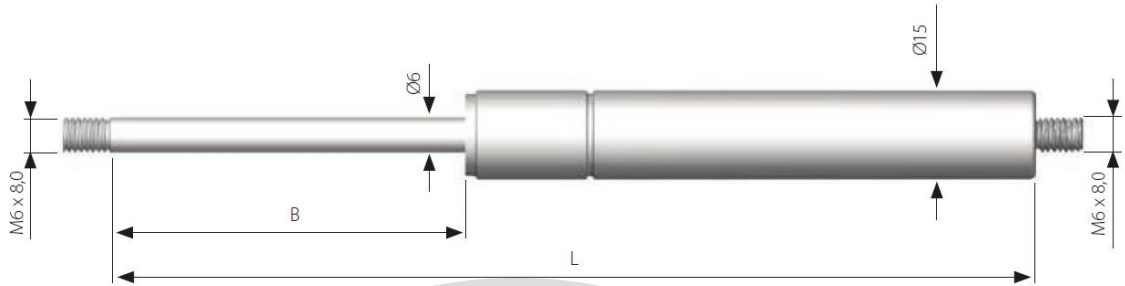
SWR31-190	
ส่วนประกอบ	ค่า/ลักษณะ
วัสดุ	ขดลวดชุบน้ำมัน
โหลดสูงสุดที่รับได้ (N)	490.3
ความยาวขณะไม่มีโหลด: L (mm)	190
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก: D (mm)	31
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน: d (mm)	21
ค่านิจสปริง (N/m)	5,160
ความยาวของสปริงที่หดมากที่สุดเท่าที่อนุญาตให้หดได้ (mm)	95
ราคา (บาท/ชิ้น)	212.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use⁵⁹ only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ข้อมูลจำเพาะของตัวหน่วงจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.7 แสดงถึงการระบุพิภักต์ต่าง ๆ สำหรับตัวหน่วง [15]

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงข้อมูลจำเพาะของตัวหน่วงที่เลือกมา

S1184	
ส่วนประกอบ	คา
ความยาว : L (mm) (+/- 2)	278
ระยะการเคลื่อนที่ : B (mm)	120
แรง (N)	50
ความเร็วกระบอกสูบ (m/s)	0.3
ค่าคงที่ความหน่วง (N · s/m)	166.67
ชนิดเกลียวปลาย	M6x8.0
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของกระบอก	15
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของลูกสูบ	6
ราคา (บาท/ชิ้น)	1,050.00

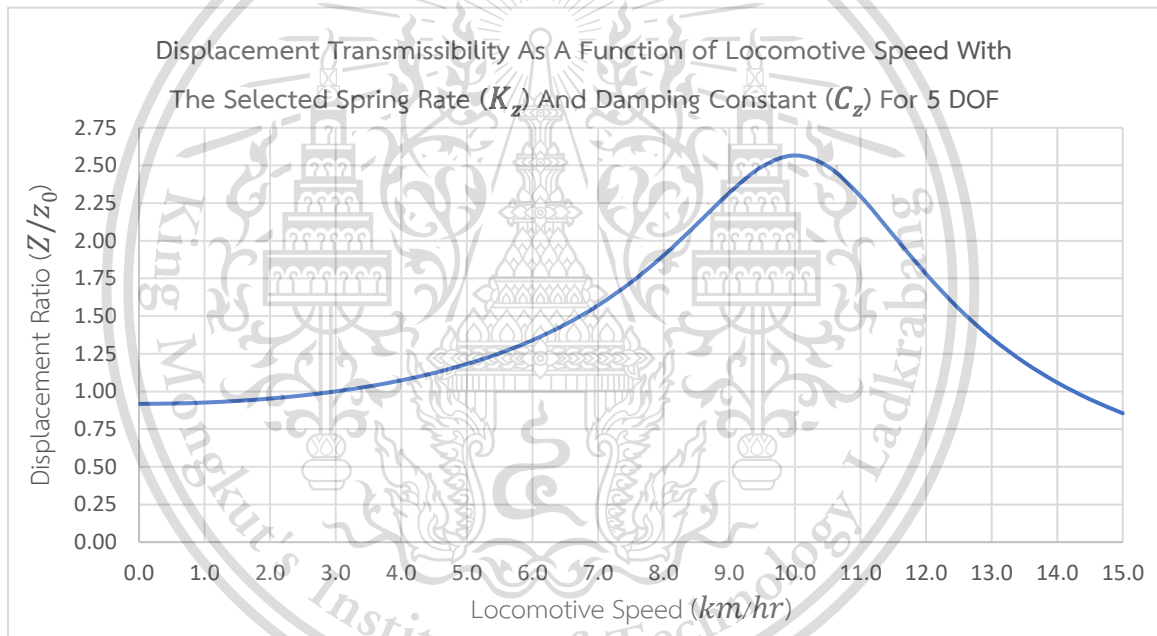
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use⁶⁰only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

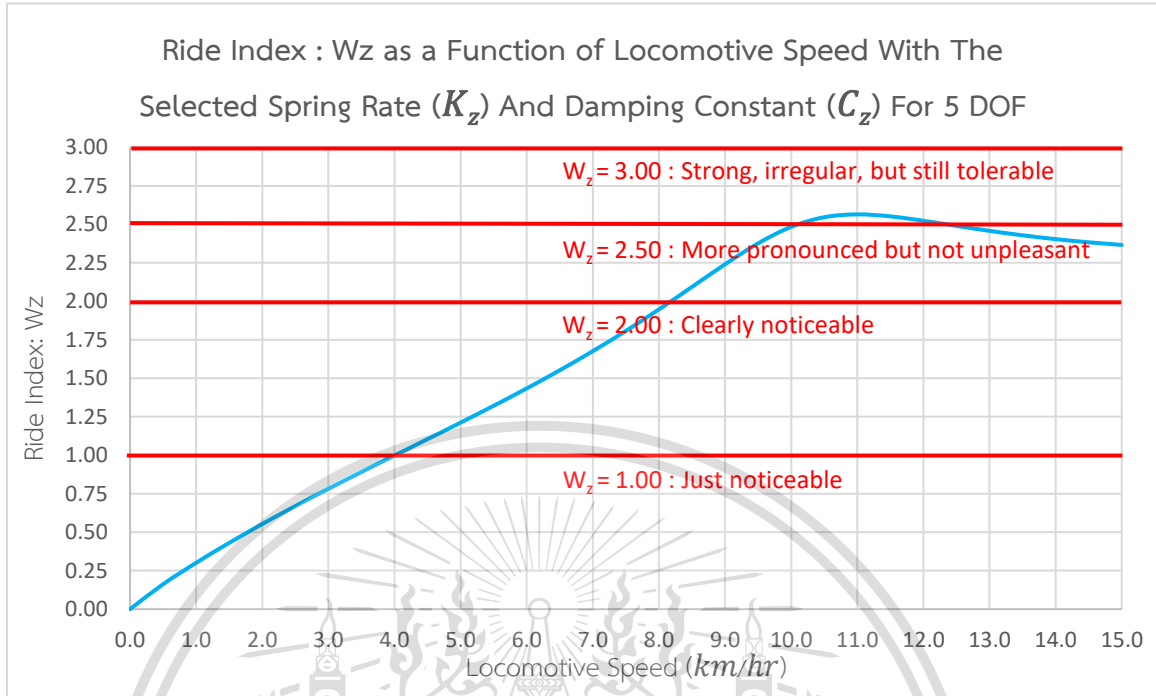
4.5.3 การวิเคราะห์ค่าดัชนีการโดยสารด้วยค่านิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วงที่เลือกจากช่วงที่จะพิจารณา

เมื่อเราสามารถเลือกสปริงและตัวหน่วงพร้อมกับวิเคราะห์คุณสมบัติได้แล้วนั้น ต่อมาคือการนำมาวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในแนวตั้งของระบบ โดยจะทำการวิเคราะห์การกระจัดของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นและค่าของดัชนีการโดยสารพร้อมกับดูว่าค่าของดัชนีการโดยสารอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ความสะดวกสบายของการโดยสารหรือไม่ ทำการประมวลผลด้วยชุดคำสั่งในโปรแกรม MATLAB เพื่อการแทนค่าในชุดคำสั่ง จะใช้ค่านิจสปริงเป็น $10,320 \text{ N/m}$ และค่าคงที่ความหน่วงที่ $333.34 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ แล้วเก็บข้อมูลลงในโปรแกรม Microsoft Excel แล้วสร้างกราฟขึ้นมาได้ดังรูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 การแสดงผลของกราฟการส่งผ่านการกระจัดจากล้อสู่ตู้รถ โดยเป็นการเปรียบเทียบกับระหว่างค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการกระจัดของการสั่นสะเทือนและความเร็วของรถจักรสำหรับค่านิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วงที่เลือกเอาไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 การแสดงผลของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการโดยสารกับค่าความเร็วของรถจักร สำหรับค่านิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วงที่เลือกเอาไว้

จากกราฟในรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดการกระจัดของการสั่นสะเทือนจะมีค่าสูงที่สุดอยู่ราว ๆ 2.6 หรือหากมองเพียงแค่ตัวตุ้รถอย่างเดียว ตัวตุ้รถจะมีแอมพลิจูดการกระจัดของการสั่นสะเทือน 2.6 mm จากเลขที่ได้ออกมาทำการตรวจสอบว่า ค่าระยะการชักของตัวหน่วงที่เลือกมานั้นสามารถรองรับแอมพลิจูดการกระจัดของการสั่นสะเทือนที่สูงที่สุดที่เกิดขึ้นในระบบได้หรือไม่

จากตารางที่ 4.4 จะทราบว่าตัวหน่วงมีระยะการชัก 120 mm และมีระยะยืดยาวที่สุดที่ 278 mm หมายความว่าเพื่อการติดตั้งจะต้องปรับความยาวของตัวหน่วงให้อยู่ที่ระยะ $278 - \frac{120}{2} = 218 \text{ mm}$ เป็นระยะการติดตั้งของตัวหน่วงและสามารถขยับขึ้นได้ 60 mm และขยับลงได้ 60 mm ในเมื่อตัวหน่วงมีช่วงการขยับตัวที่กว้างมากพอที่จะรองรับแอมพลิจูดการกระจัดของการสั่นสะเทือนที่สูงที่สุดที่เกิดขึ้นในระบบ ดังนั้นตัวหน่วงที่เลือกมานี้จึงสามารถใช้งานกับรถจักรต้นแบบได้

จากกราฟในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า ค่าของดัชนีการโดยสารรถตลอดทุกช่วงความเร็วที่พิจารณาจะมีค่าไม่เกิน 3.00 โดยที่ในช่วงความเร็ว 0 ถึงราว ๆ 10 km/hr จะมีค่าดัชนีการโดยสารต่ำกว่า 2.50 และจะไม่เกินค่าดังกล่าวในช่วงความเร็วสั้น ๆ ที่ 10 ถึง 12 km/hr จากกราฟนี้สรุปได้ว่า สปริงและตัวหน่วงที่

ได้ทำการเลือกมาเพื่อทำการพิจารณา สามารถนำมาเป็นส่วนหนึ่งของชุดสปริงและตัวหน่วงของระบบได้ดีมาก ๆ เพราะสามารถลดการสั่นสะเทือนของตัวรถที่เกิดขึ้นในแนวตั้งรวมทั้งประเมินได้ว่า รถจะมีความนุ่มสบายต่อการนั่งโดยสารเป็นอย่างมากและมีค่าไม่เกิน 3.25 ตามที่ได้ตั้งเกณฑ์เอาไว้ในขั้นต้น

จากชิ้นงานที่ได้เลือกมาเพื่อการพิจารณา สำหรับสปริง จะทำให้มีค่านิจสปริงสำหรับชุดล้อและเพลลาเป็น $10,320 \text{ N/m}$ สำหรับระยะการยุบตัวของสปริงที่สภาวะสมดุลขณะรถหยุดนิ่ง จะหาได้จาก สมการที่ 4.14

โดย $K_{z,indi}$ คือนิจสปริงของแต่ละตัวภายในระบบ มีค่า $5,160 \text{ N/m}$

และ z คือระยะที่สปริงยุบตัวสถานะสมดุลในแต่ละตัว หาได้จาก

$$z = \frac{F}{K_{z,indi}} = \frac{174.12}{5,160} = 0.0337 \text{ m}$$

นั่นคือตุ้รถจะยุบตัวลงเป็นระยะ 0.0337 m หรือ 3.37 cm ที่สภาวะหยุดนิ่งสมดุล

4.6 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในแนวอื่น ๆ ของแบบจำลองรถไฟระบบ 5 องศาอิสระ

หลังจากได้ทำการวิเคราะห์ค่าดัชนีการโดยสารในแนวตั้งแล้ว ต่อไปเป็นการนำชุดคำสั่งจาก MATLAB มาประมวลผลหาผลเฉลยของชุดสมการระบบ 5 องศาอิสระ ในอีก 4 แนวที่เหลือ เพื่อให้ได้ผลเฉลยในแต่ละแนวการเคลื่อนที่ของระบบ นั่นคือ การสั่นสะเทือนในแนวยาวของตุ้รถ (Longitudinal Vibration of Carbody) หรือ $x_{CB}(t)$ การสั่นกระดกของตุ้รถ (Pitch Motion of Carbody) หรือ $\varphi_{CB}(t)$ การสั่นสะเทือนในแนวยาวของชุดล้อและเพลลานำ (Longitudinal Vibration of Leading Wheelset) หรือ $x_{wl}(t)$ และการสั่นสะเทือนในแนวยาวของชุดล้อและเพลลาตาม (Longitudinal Vibration of Trailing Wheelset) หรือ $x_{wt}(t)$ ด้วย เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ในแต่ละมิติของระบบ ในเบื้องต้น จะต้องทราบความยาวของสปริงแนวตั้งในสภาวะสมดุลเสียก่อน เพื่อที่จะสามารถกำหนดค่าของระยะจากกึ่งกลางตุ้รถถึงกึ่งกลางเพลลาล้อในแนวตั้ง (L_z) ได้ ซึ่งเป็นค่าที่วัดตอนที่รถจักรอยู่สภาวะหยุดนิ่งสมดุล การหาระยะจากกึ่งกลางตุ้รถถึงกึ่งกลางเพลลาล้อในแนวตั้งสามารถหาได้จาก

ระยะจากกึ่งกลางตุ้รถถึงกึ่งกลางเพลลาล้อในแนวตั้ง (L_z) = ระยะจากจุดศูนย์กลางมวลของตุ้รถถึงส่วนขอบล่างสุดของตุ้รถ+ความยาวของสปริงที่ถูกกดอัดตอนที่รถจักรอยู่สภาวะหยุดนิ่งสมดุล+รัศมีเพลลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือ

$$l_z = 0.005 + (0.2000 - 0.0337) + 0.0125 = 0.1838 \text{ m}$$

ต่อมา เพื่อการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ในแนวอื่น ๆ ของตัวรถ จะต้องมีการกำหนดชุดสปริงและตัวหน่วงตามแนวยาวขึ้นมาด้วยเช่นเดียวกัน และเพื่อความสะดวกต่อการวิเคราะห์ จะเลือกใช้ชุดสปริงและตัวหน่วงตามแนวยาวชุดเดียวกันกับชุดสปริงและตัวหน่วงในแนวตั้ง มีการแบ่งเป็น 1 ชุดล้อและเพลามีสปริงและตัวหน่วงอย่างละ 2 ตัว และที่แต่ละล้อจะมีสปริงและตัวหน่วงอย่างละ 1 ตัวและเลือกใช้สปริงและตัวหน่วงตัวเดียวกันกับที่เลือกมาใช้สำหรับในแนวตั้ง (หัวข้อ 4.5.2) จากทุกข้อมูลที่ได้รับมาจนครบ สามารถเรียบเรียงตารางข้อมูลของพารามิเตอร์ที่จะใช้งานได้ใหม่ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าต่าง ๆ ของแต่ละตัวแปรแบบครบทุกตัว

ตัวแปร	ค่าของตัวแปรต่างๆ
$m_{CB} \text{ (kg)}$	141.997
$m_w \text{ (kg)}$	23.977
$I_{CB} \text{ (kg} \cdot \text{m}^2)$	97.038
$l_x \text{ (m)}$	0.6525
$l_z \text{ (m)}$	0.1838
$K_z \text{ (N/m)}$	10,320
$C_z \text{ (N} \cdot \text{s/m)}$	333.34
$K_x \text{ (N/m)}$	10,320
$C_x \text{ (N} \cdot \text{s/m)}$	333.34
$r_0 \text{ (m)}$	0.125
$r_a \text{ (m)}$	0.0125
$L \text{ (m)}$	1.5
$z_0 \text{ (m)}$	0.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

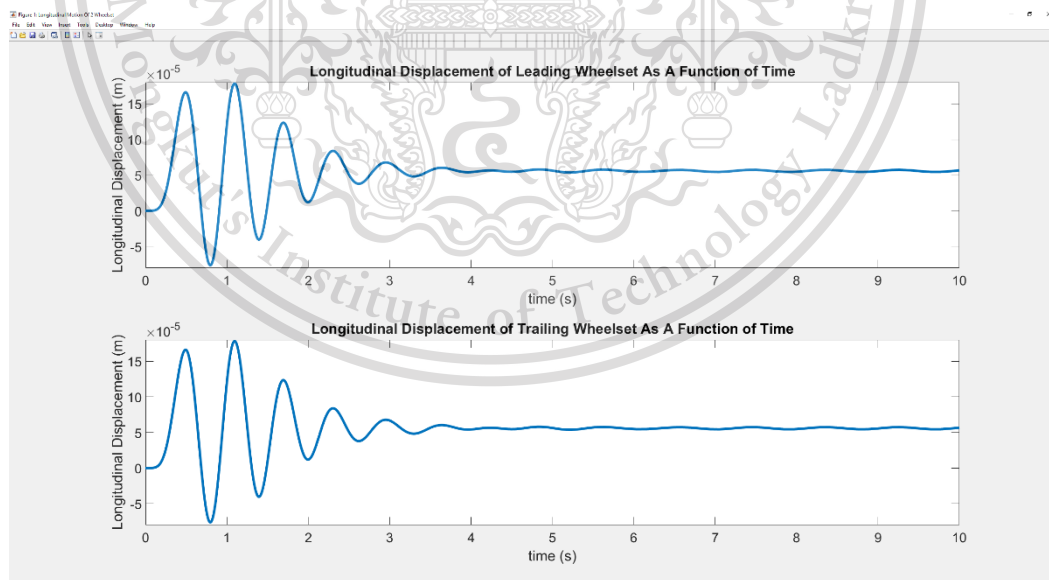
4.6.1 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของชุดล้อและเพลานำ (Leading Wheelset) และชุดล้อและเพลาลำตาม (Trailing Wheelset) ในทิศทางตามแนวยาวของรถจักร

ในการวิเคราะห์แนวแรก จะเลือกวิเคราะห์การสั่นสะเทือนตามยาวของชุดล้อและเพลาก่อนเป็นอย่างแรก โดยในระบบจำลองประกอบไปด้วยชุดเหลาล้อ 2 ชุดคือ ชุดล้อและเพลานำ และชุดล้อและเพลาลำตาม แต่ละชุดติดตั้งอยู่กับส่วนตู้รถด้วยชุดสปริงและตัวหน่วง 2 ชุด คือชุดในแนวตั้งและชุดในแนวตามยาว เมื่อเป็นเช่นนั้นจะทำให้ชุดล้อและเพลามีการสั่นสะเทือนในสองแนวแกนคือแนวแกนตั้งและแนวตามยาว

สำหรับการสั่นสะเทือนในแนวตั้งของชุดล้อและเพลามีลักษณะที่เป็นไปตามคลื่นบนทาง ซึ่งสมมติว่าเป็นทางที่มีฟังก์ชันเป็นคลื่น (Wave Function Track) เมื่อเป็นเช่นนั้นจะทำให้ชุดล้อและเพลามีฟังก์ชันการสั่นในแนวตั้งเช่นเดียวกันกับฟังก์ชันคลื่นบนทางรถไฟนั่นเอง

นั่นจึงทำให้ต้องมาพิจารณาในอีกแนวแกนหนึ่ง คือในแกนตามยาวที่ซึ่งมีปรากฏอยู่ภายในตัวแบบจำลองด้วย เมื่อเป็นเช่นนั้นจึงจะทำการวิเคราะห์ต่อไปว่า การสั่นสะเทือนตามแนวยาวของชุดล้อและเพลาลำตามจะส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของระบบและค่าของค่าดัชนีการโดยสารได้มากขนาดไหน

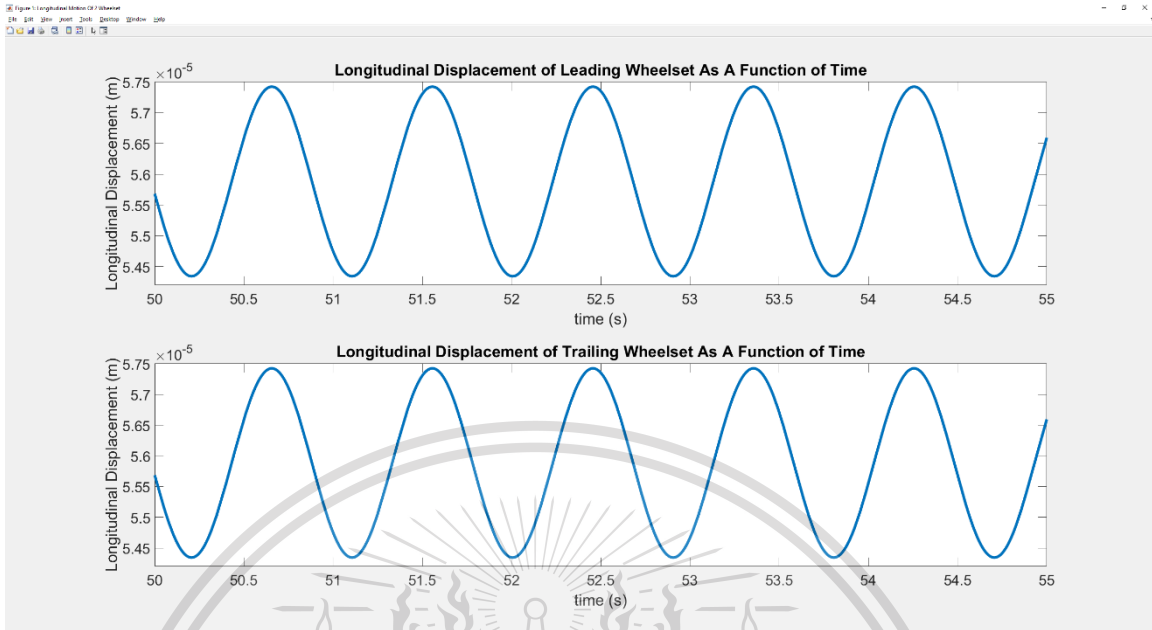
จากข้อมูลตารางที่ 4.5 ทำการพิจารณาลักษณะและพฤติกรรมการณ์การสั่นของชุดล้อและเพลาลำทั้งสองแบบ โดยเลือกทดสอบที่ความเร็ว 6 และ 10 km/hr ในโปรแกรม MATLAB จะได้กราฟการสั่นสะเทือนตามยาวของชุดล้อและเพลานำและชุดล้อและเพลาลำตามออกมาได้ดังรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.13



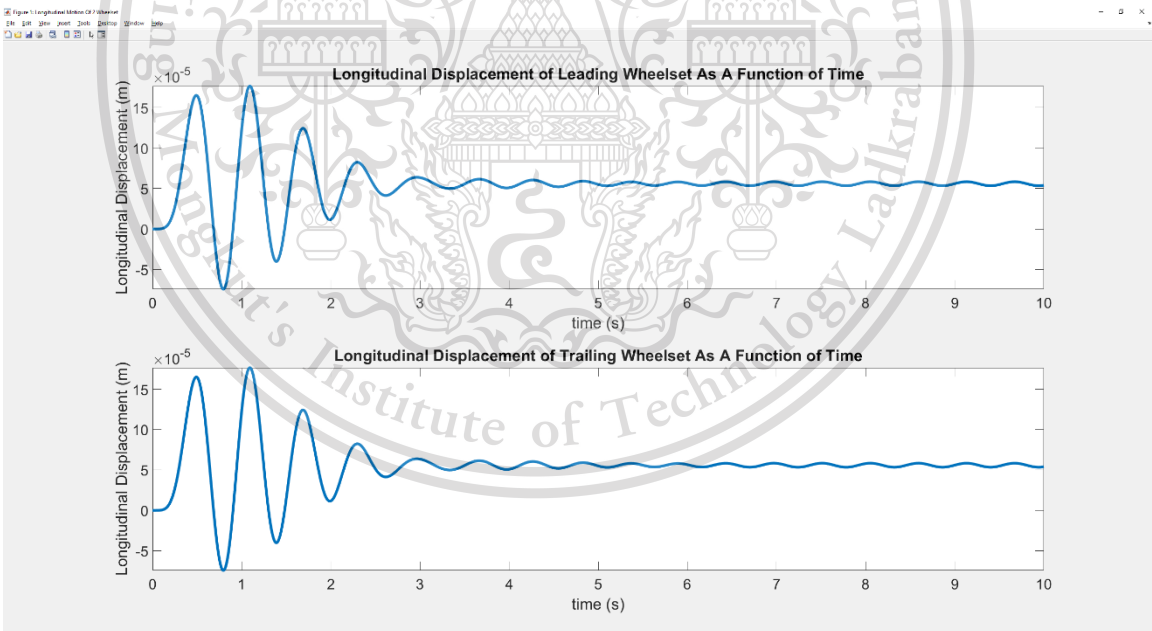
รูปที่ 4.10 พฤติกรรมการณ์การสั่นสะเทือนตามยาวของชุดล้อและเพลานำและชุดล้อและเพลาลำตามที่ความเร็ว

ของรถจักร 6 km/hr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

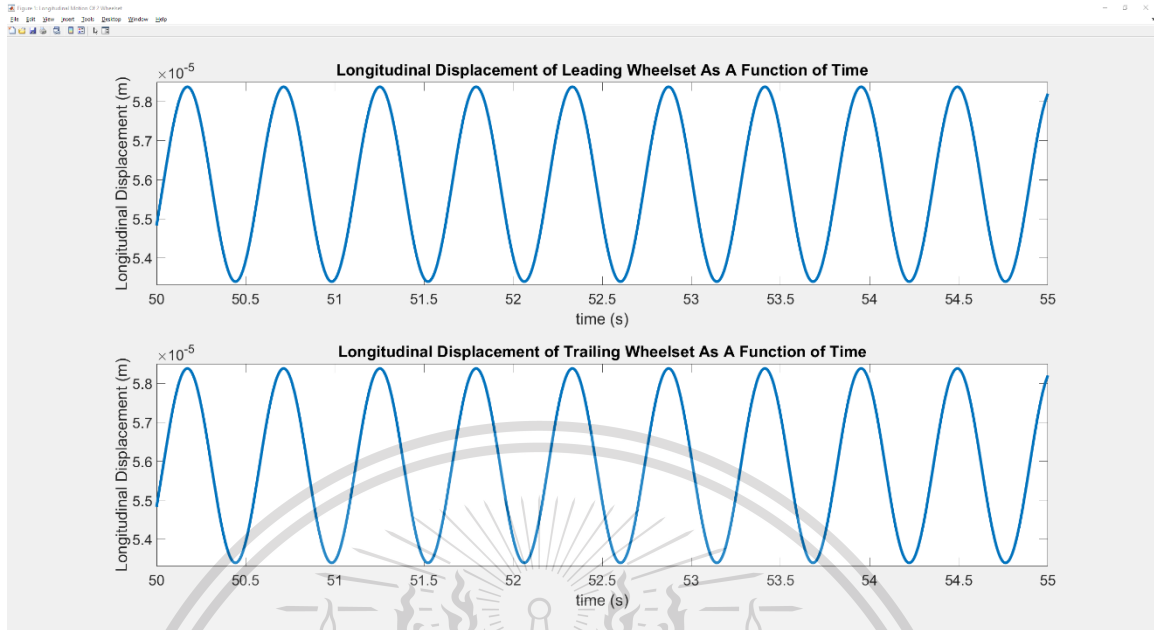


รูปที่ 4.11 พฤติกรรมการสั่นสะเทือนตามยาวของชุดล้อและเพลานำและชุดล้อและเพลาลำตามที่มีความเร็วของรถจักร 6 km/hr เฉพาะช่วงที่มีการสั่นสะเทือนแบบคงตัว



รูปที่ 4.12 พฤติกรรมการสั่นสะเทือนตามยาวของชุดล้อและเพลานำและชุดล้อและเพลาลำตามที่มีความเร็วของรถจักร 10 km/hr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

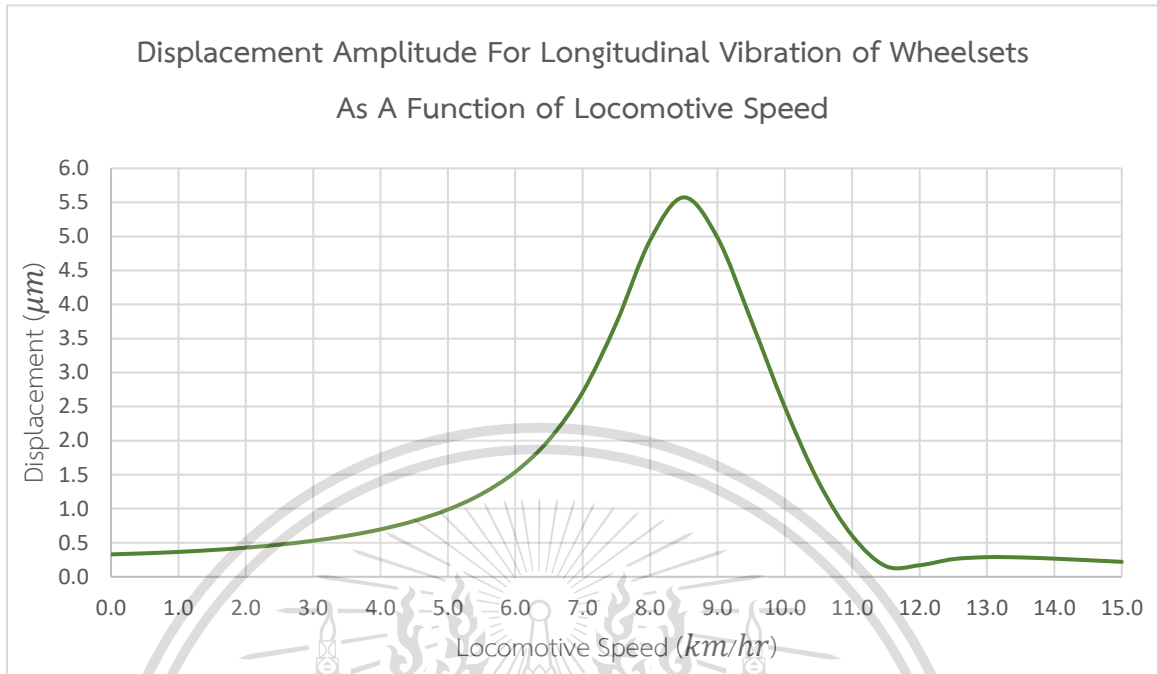


รูปที่ 4.13 พฤติกรรมการสั่นสะเทือนตามยาวของชุดล้อและเพลานำและชุดล้อและเพลาลำตามที่มีความเร็วของรถจักร 10 km/hr เฉพาะช่วงการสั่นสะเทือนแบบคงตัว

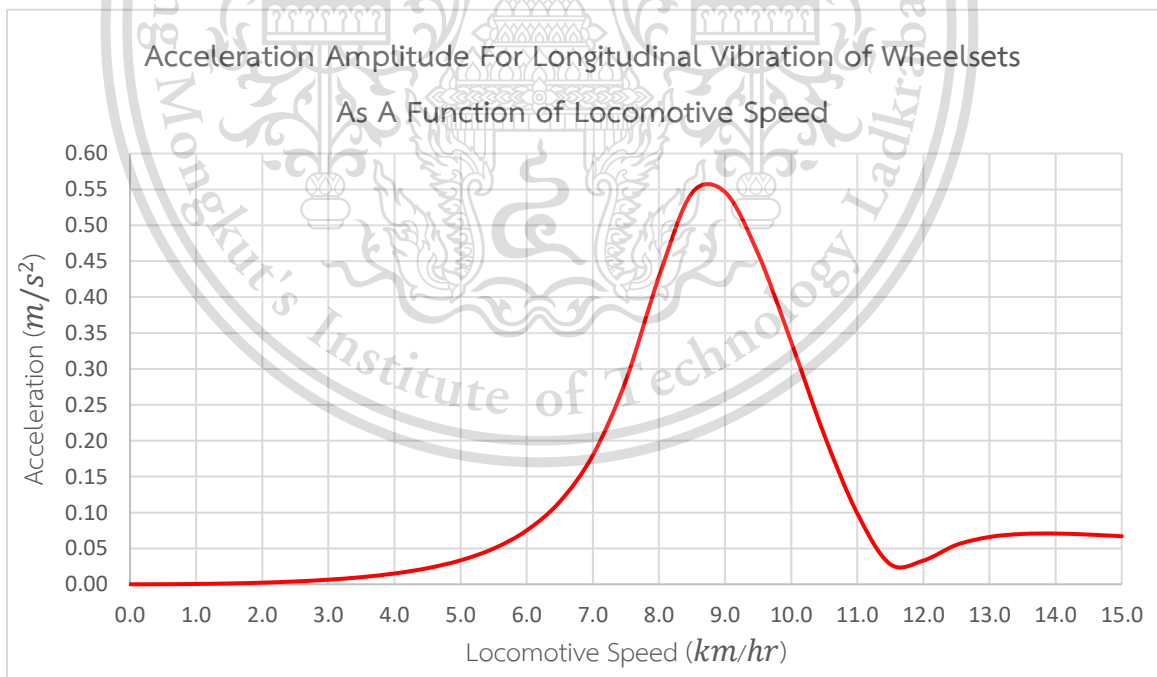
จะสังเกตได้ว่า ไม่ว่าจะใช้ความเร็วของรถจักรเป็นเท่าใด พฤติกรรมการสั่นสะเทือนในแนวตามยาวของชุดล้อและเพลาทรงสองแบบ มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันทุกประการ โดยที่มีลักษณะของการสั่นในรูปของฟังก์ชันการสั่นแบบบังคับ (Force Vibration) คือมีทั้งการสั่นในส่วนของการสั่นแบบชั่วคราว (Transient Vibration) และการสั่นแบบคงตัว (Steady State Vibration) โดยในช่วงการสั่นแบบชั่วคราวจะใช้เวลา 8.2 วินาทีสำหรับความเร็ว 6 km/hr และใช้เวลา 6.8 s สำหรับความเร็ว 10 km/hr จึงจะหายไปเหลือเพียงแค่การสั่นแบบคงตัวเท่านั้น ดังนั้นในการวิเคราะห์จะถือว่าทั้งชุดล้อและเพลานำและชุดล้อและเพลาลำคือขึ้นเดียวกัน เพื่อความสะดวกต่อการวิเคราะห์ในขั้นต่อไป

จากตารางที่ 4.5 ทำการประมวลผลผลลัพธ์หาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนตามแนวยาวของ ชุดล้อและเพลาลำที่ความเร็วของรถจักรตั้งแต่ 0 ถึง 15 km/hr แล้วบันทึกผลลงใน Microsoft Excel แล้วทำการสร้างกราฟออกมา ได้ออกมาดังรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของการสั่นสะเทือนตามแนวยาวเทียบกับความเร็วของรถจักรของชุดล้อและเพลลาที่ช่วงการสั่นสะเทือนแบบคงตัว



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งการสั่นสะเทือนตามแนวยาวเทียบกับความเร็วของรถจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับของชุดล้อและเพลลาที่ช่วงการสั่นสะเทือนแบบคงตัว
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14 จะสังเกตได้ว่า โดยรวมแล้วแอมพลิจูดของการกระจัดของการสั่นสะเทือนจะมีค่าน้อยมาก ๆ น้อยในระดับหน่วยไมโครเมตร (μm) แต่ถึงจะเป็นแบบนั้นจะเห็นได้ว่า ตั้งแต่ความเร็ว 2 km/hr จะเริ่มมีการเพิ่มขึ้นของการกระจัดของการสั่นสะเทือนที่เห็นได้ชัด และเกิดการกระจัดของการสั่นที่มากที่สุดในช่วงความเร็ว 8 ถึง 9 km/hr เนื่องจากความเร็วช่วงนั้นทำให้เกิดการกำทอนทำให้เกิดค่าวิกฤติที่บริเวณดังกล่าว หลังจากนั้นจึงลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งที่ความเร็วรถ 13 km/hr ค่าจะติดเพิ่มขึ้นมาเล็กน้อยแล้วค่อย ๆ ลดลงไปอย่างช้า ๆ จนกระทั่งถึงความเร็วสูงสุดคือ 15 km/hr ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะตรงกันกับกราฟของความเร่งในรูปที่ 4.15 เพียงแต่สำหรับกราฟความเร่ง จะสามารถวิเคราะห์และพิจารณาขนาดในระดับของหน่วยมิลลิเมตรได้

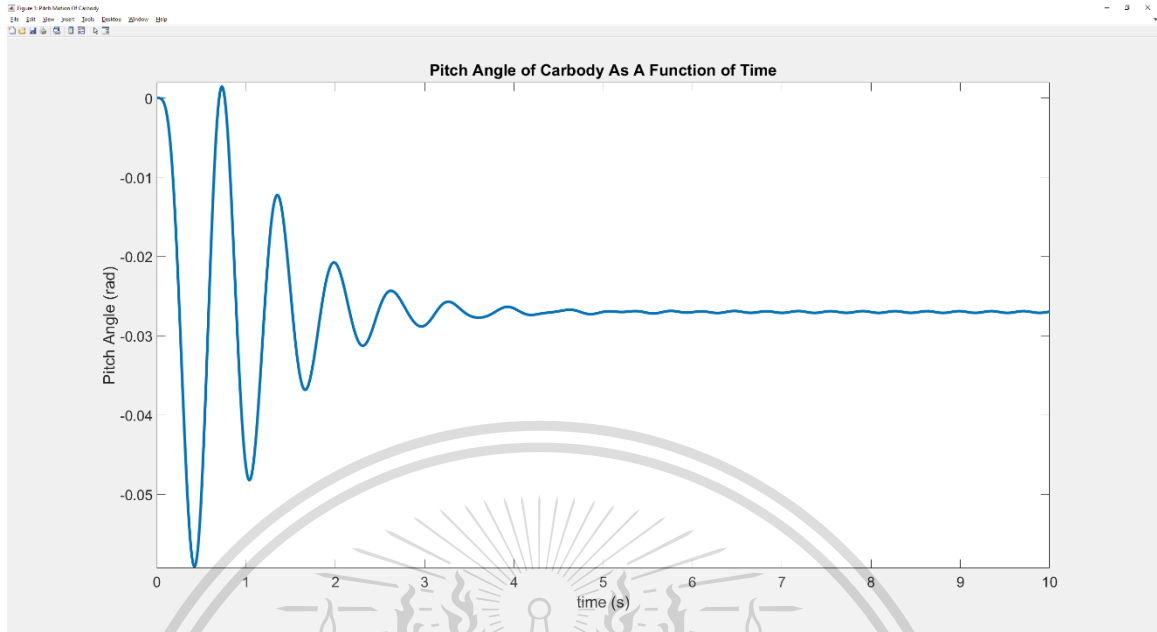
จากรูปที่ได้ออกมาตามรูปที่ 4.14 และ 4.15 สรุปได้ว่า การสั่นสะเทือนตามยาวของชุดล้อและเพลามีค่าที่เล็กมาก ๆ จนไม่มีความจำเป็นใด ๆ ที่จะต้องวิเคราะห์ถึงผลกระทบต่อค่าดัชนีการโดยสารโดยตรงเป็นเช่นไร แต่ผลเฉลยของการสั่นสะเทือนในแนวตามยาวของชุดล้อจะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของการกระดกของรถ (Pitch Motion of Carbody) และการสั่นสะเทือนตามยาวของรถ (Longitudinal Motion of Carbody)

4.6.2 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของตู้รถสำหรับการกระดกของรถจักร

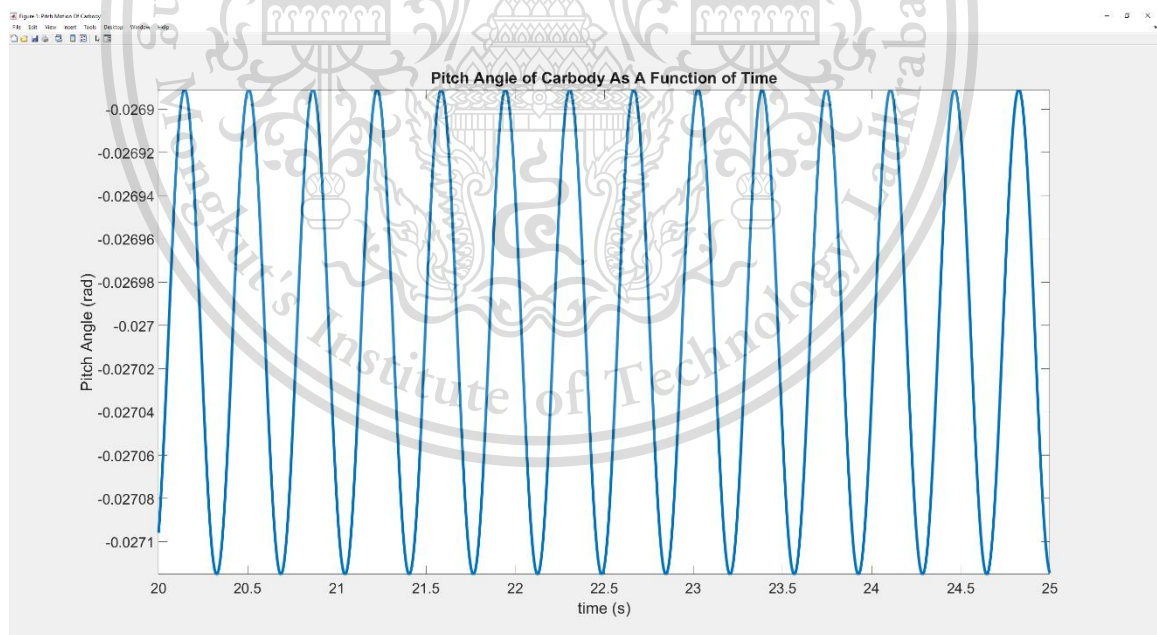
หลังจากทำการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของชุดล้อและเพลานในแนวตามยาว จะทำการพิจารณาการกระดกของรถจักรเป็นลำดับต่อมา การกระดกของตัวรถเกิดจากเฟสที่แตกต่างกันของชุดล้อและเพลานในการวิ่งไปบนทางรถไฟ เฟสที่แตกต่างจะส่งการสั่นสะเทือนไปที่ส่วนหน้าและส่วนหลังของรถไม่ตรงกัน ทำให้ตู้รถมีพฤติกรรมกระดกไปมา ซึ่งถึงจะเป็นการสั่นในแบบเชิงมุม ซึ่งสามารถพิจารณามุมการสั่นสะเทือนในช่วงความเร็วใด ๆ ได้เช่นกัน

จากข้อมูลตารางที่ 4.5 ทำการพิจารณาลักษณะและพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนแบบกระดกของตู้รถ โดยเลือกทดสอบที่ความเร็ว 15 km/hr ในโปรแกรม MATLAB จะได้กราฟการสั่นสะเทือนแบบกระดกของตู้รถออกมาได้ดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 พฤติกรรมการสั่นสะเทือนแบบกระดกของตู้รถ ที่ความเร็วของรถจักร 10 *km/hr*



รูปที่ 4.17 พฤติกรรมการสั่นสะเทือนแบบกระดกของตู้รถ ที่ความเร็วของรถจักร 10 *km/hr* เฉพาะช่วง
การสั่นสะเทือนแบบคงตัว

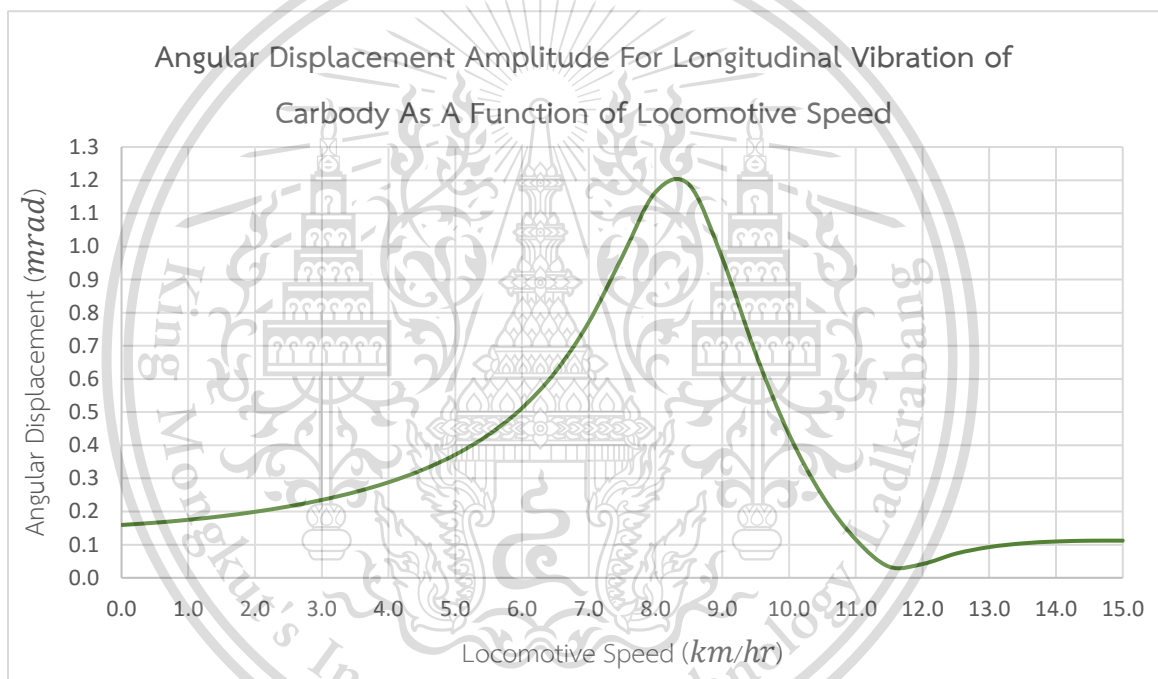
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use⁷⁰ only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

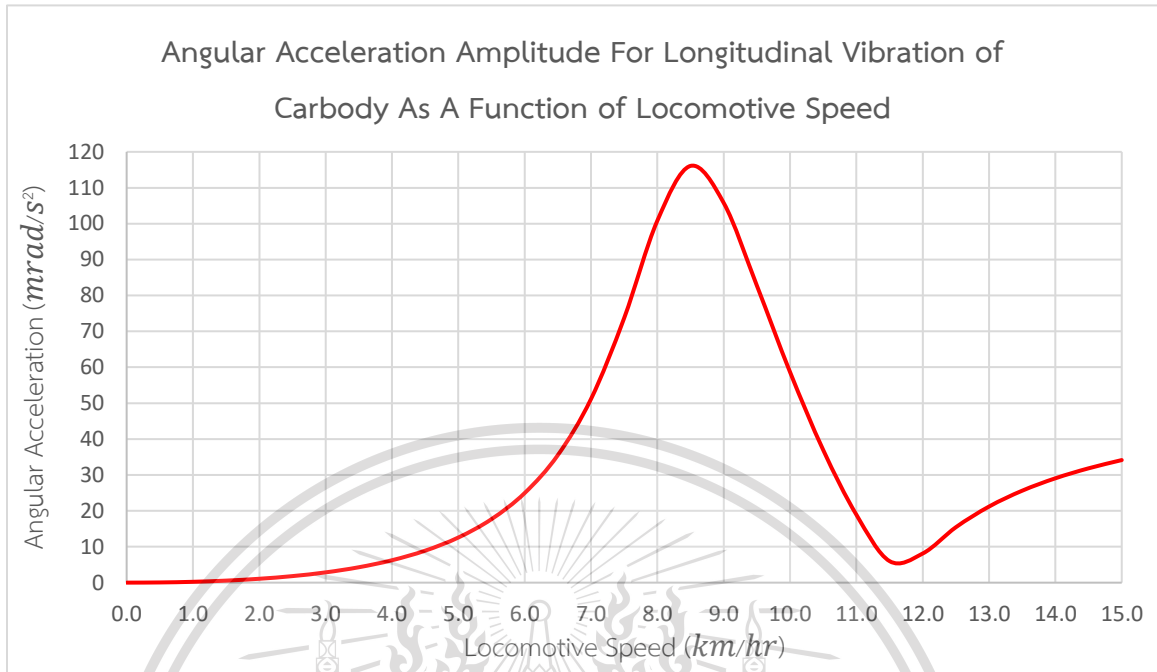
จากรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 จะสังเกตได้ว่า ลักษณะการสั่นสะเทือนของการกระดก จะมีลักษณะของการสั่นในรูปของฟังก์ชันการสั่นแบบบังคับ มีทั้งการสั่นในส่วนของการสั่นแบบชั่วคราว และการสั่นแบบคงตัว โดยในช่วงการสั่นแบบชั่วคราวจะใช้เวลาประมาณ 7.9 s จึงจะหายไปเหลือเพียงแค่การสั่นแบบคงตัวเท่านั้น เมื่อเป็นเช่นนั้น จึงสามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของมุมการกระดกที่ความเร็วต่าง ๆ ได้

จากตารางที่ 4.5 ทำการประมวลผลลัพธ์หาพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนแบบกระดกของตู้รถที่ความเร็วของรถจักรตั้งแต่ 0 ถึง 15 km/hr แล้วบันทึกผลลงใน Microsoft Excel แล้วทำการสร้างกราฟออกมา ได้ออกมาดังรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมการสั่นสะเทือนแบบกระดกเทียบกับความเร็วของรถจักรของตู้รถในช่วงการสั่นสะเทือนแบบคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเชิงมุมของการสั่นสะเทือนแบบกระดกเทียบกับความเร็วของรถจักรของตู้รถที่ช่วงการสั่นสะเทือนแบบคงตัว

จากรูปที่ 4.18 จะสังเกตได้ว่ามุมการหมุนจะสามารถพิจารณาในระดับหน่วยมิลลิเรเดียนจึงจะเหมาะสมกว่า เนื่องจากจากการเก็บผลการประมวลผลพบว่า มุมการสั่นจะมีค่าน้อยมาก ๆ ซึ่งแอมพลิจูดของมุมที่เยอะที่สุดจะอยู่ราว ๆ 1.19 mrad หรือ 0.0682° ซึ่งเป็นค่าวิกฤติที่เกิดขึ้นในช่วงความเร็วที่ทำให้เกิดการกำทอนของระบบ โดยเกิดขึ้นในช่วงความเร็วรถจักร 8 ถึง 9 km/hr

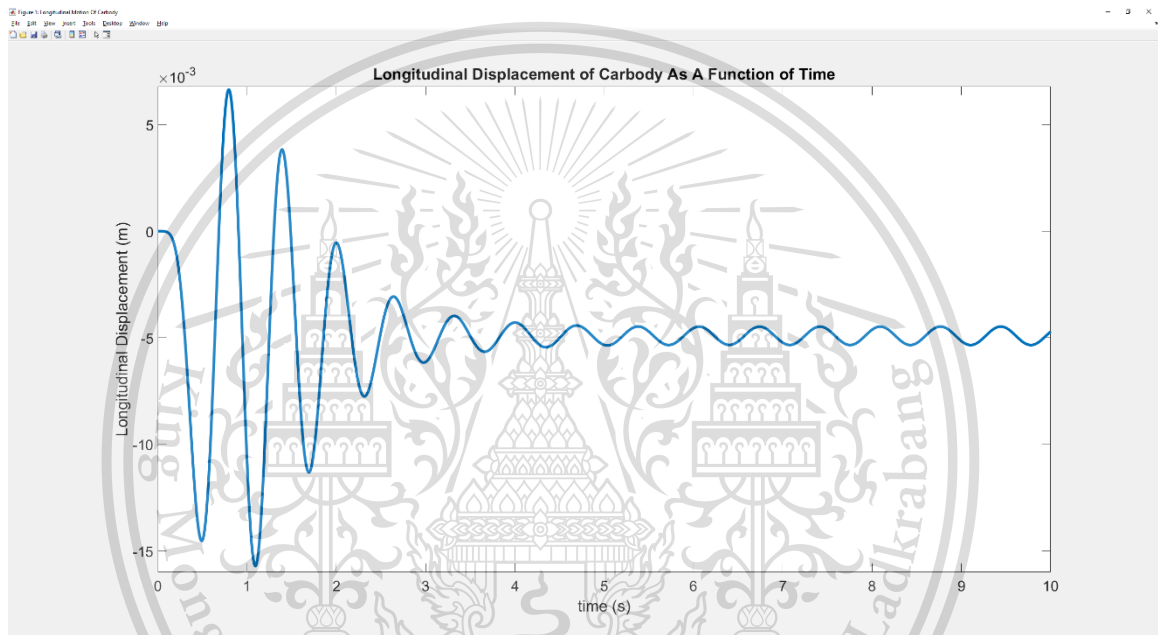
ในขณะที่กราฟในรูปที่ 4.19 จะเห็นว่า ลักษณะของกราฟจะมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกับกราฟในรูปที่ 4.18 แต่หากดูในช่วงความเร็วตั้งแต่ 12 km/hr เป็นต้นไปจะพบว่าค่าของความเร่งเชิงมุมจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งมีความเร็ว 15 km/hr แต่ทั้งนี้ความเร่งเชิงมุมของการกระดก ยังถือว่ามีค่าน้อยอยู่ โดยระดับหน่วยที่เหมาะสมต่อการพิจารณาคือระดับหน่วย mrad/s^2 เมื่อเป็นเช่นนั้นหมายความว่าความเร่งเชิงมุมที่เกิดขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าดัชนีการโดยสารของระบบมาก จึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงเพื่อการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.3 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของตู้รถสำหรับในทิศทางตามแนวยาวของรถจักร

จะทำการพิจารณาการสั่นสะเทือนตามแนวยาวของรถจักรเป็นลำดับสุดท้าย ซึ่งเป็นหนึ่งในรูปแบบการสั่นที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลองระบบ 5 องศาอิสระ โดยจะต้องพิจารณาพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนในแนวดังกล่าวก่อน

จากข้อมูลตารางที่ 4.5 ทำการพิจารณาลักษณะและพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนแบบกระดกของตู้รถ โดยเลือกทดสอบที่ความเร็ว 8 km/hr ในโปรแกรม MATLAB จะได้กราฟการสั่นสะเทือนแบบกระดกของตู้รถออกมาได้ดังรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21

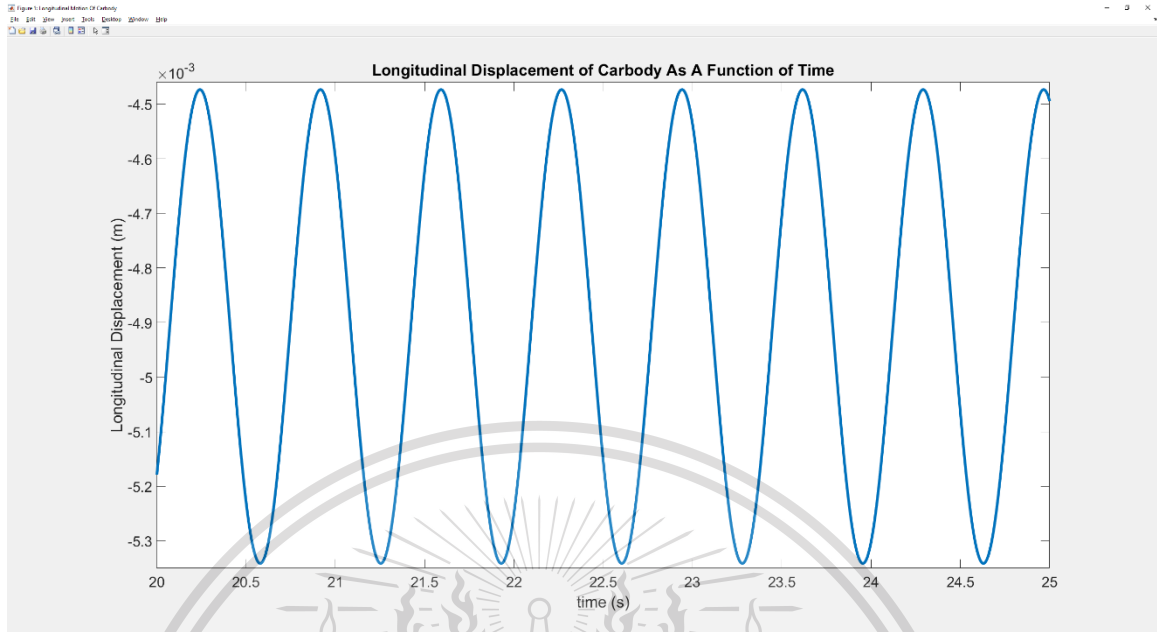


รูปที่ 4.20 พฤติกรรมของการสั่นสะเทือนตามยาวของตู้รถ ที่ความเร็วของรถจักร 8 km/hr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use⁷³ only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

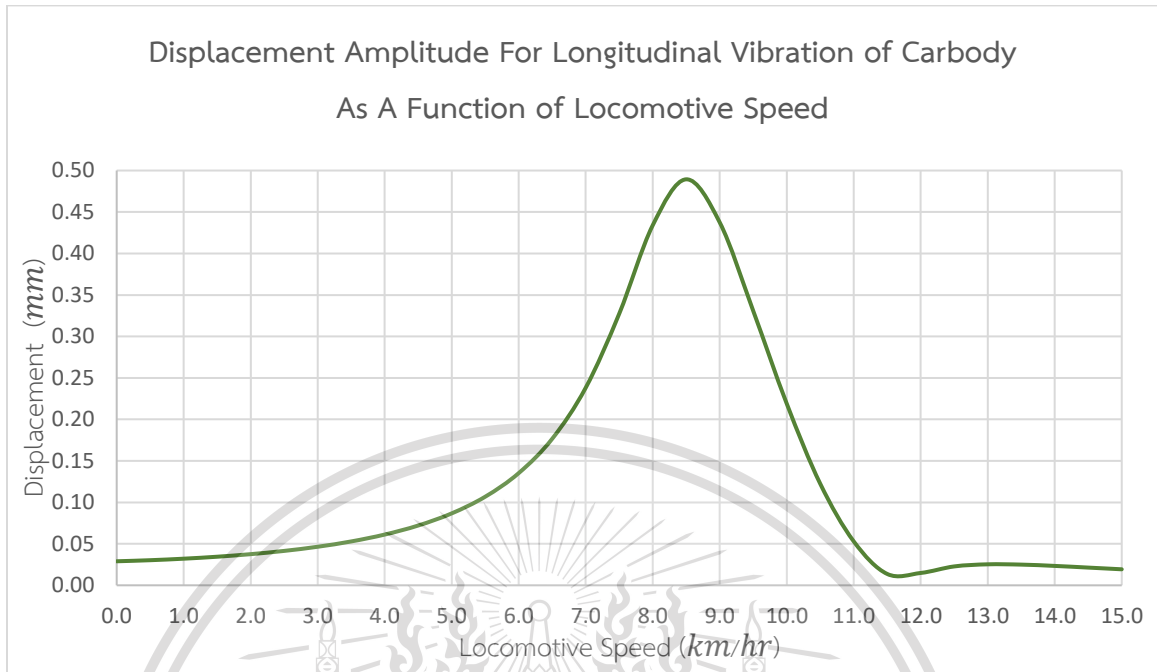


รูปที่ 4.21 พฤติกรรมการสั่นสะเทือนตามยาวของตู้รถ ที่ความเร็วของรถจักร 8 *km/hr* เฉพาะช่วงการสั่นสะเทือนแบบคงตัว

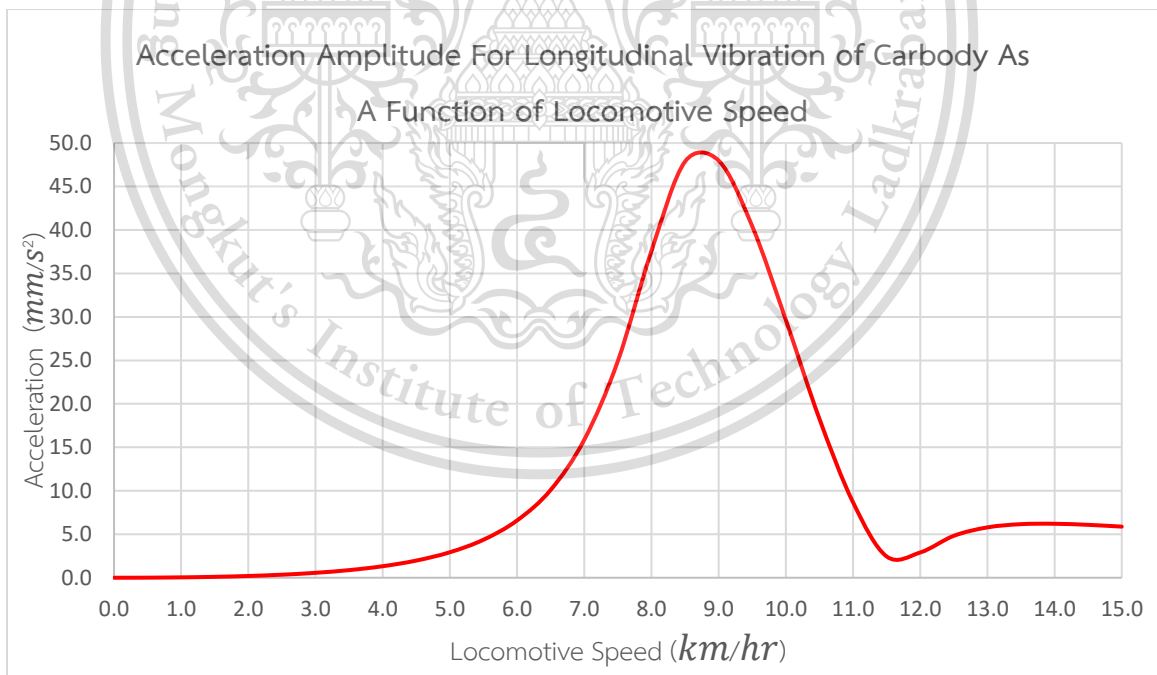
จากรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 จะสังเกตได้ว่า ลักษณะการสั่นสะเทือนตามแนวยาว จะมีลักษณะของการสั่นในรูปของฟังก์ชันการสั่นแบบบังคับ มีทั้งการสั่นในส่วนของการสั่นแบบชั่วคราว และการสั่นแบบคงตัว โดยในช่วงการสั่นแบบชั่วคราวจะใช้เวลาประมาณ 5.5 s จึงจะหายไป เหลือเพียงแค่การสั่นแบบคงตัวเท่านั้น เมื่อเป็นเช่นนั้น จึงสามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์การสั่นสะเทือนตามยาวของตู้รถที่ความเร็วต่าง ๆ ได้

จากตารางที่ 4.5 ทำการประมวลผลผลลัพธ์หาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนแบบกระดกของตู้รถที่ความเร็วของรถจักรตั้งแต่ 0 ถึง 15 *km/hr* แล้วบันทึกผลลงใน Microsoft Excel แล้วทำการสร้างกราฟออกมา ได้ออกมาดังรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของการสั่นสะเทือนตามแนวยาวเทียบกับความเร็วของรถจักรของตู้รถที่ช่วงการสั่นสะเทือนแบบคงตัว



รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งการสั่นสะเทือนตามแนวยาวเทียบกับความเร็วของรถจักร

ของตู้รถที่ช่วงการสั่นสะเทือนแบบคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่าเช่นเดียวกันกับในกรณีของการสั่นแบบกระดกแล้วการสั่นของล้อในแนวตามยาว มีช่วงของความเร็วในการเกิดค่าวิกฤติเดียวกันคือที่ช่วงของความเร็ว 8 ถึง 9 km/hr มีการลงไปจุดต่ำสุดที่ความเร็ว 11.5 km/hr แล้วดีดขึ้นมาเล็กน้อยแล้วจึงลดลงอย่างช้า ๆ จนกระทั่งมีความเร็ว 15 km/hr

ส่วนกราฟจากรูปที่ 4.23 จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับกราฟในรูปที่ 4.15 เพียงแต่จะมีขนาดความเร่งที่สูงกว่ามาก เนื่องจากว่าไม่มีเกณฑ์และแนวทางใด ๆ ที่ใช้ในการหาดัชนีการโดยสารสำหรับในแนวตามยาวของรถได้ ดังนั้นเพื่อที่จะวิเคราะห์ความสะท้านสะเทือนที่เกิดขึ้นตามแนวยาวของตู้รถ จะใช้ตารางที่ 2.6 ในการพิจารณาถึงความเหมาะสมของการสั่นสะเทือนในแนวตามยาวของตู้รถ

สำหรับกราฟในรูปที่ 4.23 จะเห็นว่าค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นคือ 47.98 mm/s^2 หรือ 0.04798 m/s^2 เมื่อตรวจสอบกับตารางที่ 2.6 แล้วจะพบว่า ค่าดังกล่าวจะอยู่ในช่วงที่มีความเร่งน้อยกว่า 0.315 m/s^2 หรือไม่มีความไม่สะดวกสบายเกิดขึ้น (Not Uncomfortable) หรือก็คือความเร่งมีค่าน้อยมากจนไม่รู้สึถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ดังนั้นการสั่นสะเทือนตามแนวยาวของตู้รถอยู่ในระดับที่เหมาะสมแล้ว

ทั้งนี้ในการคำนวณการเคลื่อนในแนวที่เหลือนอกเหนือจากการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง ได้ทำการเลือกใช้ชุดสปริงและตัวหน่วงตามแนวยาว ให้มีคุณสมบัติเดียวกันกับ ชุดสปริงและตัวหน่วงในแนวตั้ง เนื่องจากการวัดค่าความสะท้านสะเทือนในการโดยสารนั้นในความเป็นจริงจะต้องมีการวัด ค่าที่หลายตำแหน่ง ได้แก่บริเวณส่วนหน้า ส่วนกลาง และส่วนท้ายของรถโดยสาร ตามมาตรฐาน ISO2631-1 แต่เนื่องจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการคำนวณค่าความสะท้านสะเทือนในการโดยสารแบบมองเป็นภาพรวมของรถจักร ฉะนั้นแล้วเพื่อให้ค่าผลลัพธ์ที่ได้มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริง จึงเลือกใช้ชุดสปริงและตัวหน่วงให้เหมือนกันทั้งหมดทั้งระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use⁷⁶ only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาการประเมินค่าดัชนีการโดยสารที่ยอมรับได้ของรถจักรไฟฟ้าด้วยวิธีการพิจารณาแบบจำลองของรถจักรกำลังแบบแบบ 5 องศาอิสระ โดยใช้โปรแกรม MATLAB ร่วมกับการใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการบันทึกผลเพื่อในการวิเคราะห์

1. ชุดคำสั่งสำหรับการประมวลผลสามารถใช้งานเพื่อการแก้ชุดสมการหาผลเฉลยของแบบจำลองระบบ 5 องศาอิสระได้
2. เมื่ออ้างอิงข้อมูลของพารามิเตอร์จากรถจักรไฟฟ้าที่ได้ออกแบบไว้สำหรับการแข่งขัน Electric Locomotive Design Contest 2020 และเมื่ออ้างอิงการวิเคราะห์บนพื้นฐานของระบบ 1 องศาอิสระ จะสามารถหาช่วงของค่านิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วงที่เหมาะสมต่อระบบดังกล่าวได้ โดยจากแบบจำลองที่เลือกใช้ จะมีสปริงและตัวหน่วงในแนวตั้งอย่างละ 2 ตัว นั่นคือเมื่อเริ่มทำการวิเคราะห์จะได้ช่วงของค่านิจสปริงที่ $1,201.28 \leq K_z < 10,811.31 \text{ N/m}$ และมีช่วงของค่าคงที่ความหน่วงที่ $175.23 \leq C_z \leq 525.67 \text{ N} \cdot \text{s/m}$
3. ในกรณีที่กำหนดให้ลักษณะของทางมีฟังก์ชันเป็นรูปแบบไซน์ซอไซด์ โครงสร้างของรถจะมีผลต่อการกระจัดของการสั่นสะเทือนในแนวตั้งของตู้รถ หรือในอีกความหมายคือ ระยะห่างระหว่างชุดล้อและเพลามีความสัมพันธ์กับค่าของความยาวคลื่นบนทางที่ส่งผลต่อการสั่นในแนวตั้งของตัวรถ นั่นคือเมื่อระยะห่างระหว่างชุดล้อและเพลามีค่าเท่ากับค่าของความยาวคลื่นบนทาง หรือเป็นค่าที่ซึ่งเป็นพหุคูณซึ่งกันและกัน ที่สภาวะรถจักรหยุดนิ่งจะมีอัตราส่วนแอมพลิจูดการกระจัดของการสั่นสะเทือนเป็น 1 ซึ่งถือเป็นค่าที่มากที่สุดที่เป็นไปได้ หากไม่สอดคล้องกับกรณีดังกล่าว อัตราส่วนแอมพลิจูดการกระจัดของการสั่นสะเทือน ณ สภาวะหยุดนิ่งจะมีค่าที่ลดลงไป
4. เมื่อนำค่าขอบบนและขอบล่างจากช่วงของค่านิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วงมาตรวจสอบหาค่าดัชนีจะพบว่าค่าที่ได้ตลอดทุกช่วงความเร็ว จะไม่มีทางเกิน 3.25 นั้นหมายความว่า ช่วงดังกล่าวที่ได้เลือกใช้นั้นสามารถใช้ค่าใดภายในช่วงมาคิดได้เลยโดยที่ค่าดัชนีการโดยสารจะไม่เกิน 3.25 แน่นนอน หากเกินค่านี้นี้ไปรถจักรจะเกิดความไม่สะดวกสบายขึ้นเป็นอย่างมาก

5. สำหรับการสั่นสะเทือนในแนวอื่น ๆ นอกเหนือจากการสั่นสะเทือนในแนวตั้งจะพบว่า ในทุก ๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ชั่วคราวกับการสั่นสะเทือนแบบคงตัวอยู่ด้วยกัน ทั้งนี้การสั่นตามแนวยาวของชุดล้อและเพลาทิ้งแบบ นำและแบบตาม จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันทุกประการและสามารถวิเคราะห์ร่วมกันได้ ซึ่งได้ ผลลัพธ์ออกมาว่ามีการสั่นที่น้อยมาก ๆ จนสามารถที่จะละทิ้งได้ แต่จะส่งผลต่อแนวอื่น ๆ คือแนว ของการกระดกของรถและการสั่นสะเทือนในแนวตามยาวของตู้รถ เนื่องจากว่าสมการการ เคลื่อนที่ของระบบ เมื่อยกเว้นเพียงแค่สมการการเคลื่อนในแนวตั้งของตู้รถ จะเห็นว่าในสมการอีก 4 สมการที่เหลือตัวแปรจะผูกกันไปมาหรือเรียกว่าเป็นสมการคู่ควบ (Coupling Equation) สำหรับผลลัพธ์ที่ได้จากการสั่นกระดกจะเป็นไปในทางเดียวกันกับการสั่นสะเทือนตามแนวยาวของ ชุดล้อและเพล่า ส่วนการสั่นสะเทือนตามแนวยาวของตู้รถจะพบว่ามีความเร่งที่สูงมาก ๆ ในช่วง ความเร็วสั้น ๆ แต่การคิดคำนวณค่าดัชนีการโดยสารนั้น จะคิดแค่เพียงในแนวตั้งและแนวขวาง ไม่มีการคำนวณที่รองรับไว้สำหรับแนวตามยาว เนื่องจากว่าเป็นแนวที่ไม่ควรมีการสั่นสะเทือน เกิดขึ้นในระบบ รวมถึงแนวโน้มโดยรวมของความเร่งการสั่นสะเทือนที่ไม่สูงมาก จึงสามารถละทิ้ง ได้เช่นกัน

5.2 วิจัยผลการทดลอง

จากผลลัพธ์ที่ได้ทำการวิเคราะห์และศึกษาที่ความเร็วคงที่ในช่วงความเร็วที่กำหนดนั้นพบว่า การ พิจารณาแบบ 5 องศาอิสระโดยการคิดแบบไร้โครงแคร่ (Bogie-less) จะให้ค่าของดัชนีการโดยสาร คลาดเคลื่อนจากรถจักรจริงที่มีโครงแคร่ เพราะเนื่องจากรถจักรที่มีโครงแคร่ จะมีการแบ่งอุปกรณ์กัน สะเทือนออกเป็น 2 ชั้นได้แก่ชั้นกันสะเทือนปฐมภูมิ (Primary Suspension) และชั้นกันสะเทือนทุติยภูมิ (Secondary Suspension) และทั้งนี้การศึกษาทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะพิจารณาภายใต้เงื่อนไขทางตรงในช่วง ความเร็วที่กำหนด รวมถึงกำหนดปัจจัยสภาพทางให้คงที่ และการวิเคราะห์นั้นไม่ได้คำนึงถึงปัจจัยด้าน อากาศพลศาสตร์ และรูปทรงเรขาคณิตของตัวรถโดยสาร ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีคลาดเคลื่อนจากผลลัพธ์ที่ เกิดขึ้นจริงในการเดินรถ

5.3 ปัญหาจากการศึกษา

1. เนื่องจากประสบปัญหาจากข้อจำกัดด้านเวลา และทรัพยากร ทำให้สามารถศึกษาได้เพียงกรณี การวิ่งบนทางตรง
2. แม้ว่าการใช้โปรแกรม MATLAB จะสามารถใช้วิธีการ Fast Fourier Transform (FFT) ในการ ช่วยหาค่าแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนได้ แต่จากการทดลองเปรียบเทียบการใช้วิธีดังกล่าวกับการ พิจารณาช่วงสภาวะคงตัวที่ละสมการแล้ว พบว่าค่าแอมพลิจูดที่ได้จากการ FFT จะให้ค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลทั้งหมดไว้ใช้ประโยชน์ด้วยวิธีการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลาดเคลื่อนของคำตอบเนื่องจาก FFT ความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง (Sampling) จะมีผลต่อคำตอบที่ได้ และเพื่อความถูกต้องของชุดข้อมูลจึงเลือกพิจารณาแอมพลิจูดที่ละสมการ ทำให้มีข้อจำกัดด้านเวลาในการเพิ่มความถี่ของชุดข้อมูลที่นำมาใช้พิจารณารูปคลื่นการโดยสาร

3. การแบ่งพิจารณาความเร็วของการวิ่งของรถจักร ส่งผลต่อแนวโน้มที่ได้รับออกมา ผู้จัดทำทำการเพิ่มหน่วยความเร็วที่ละ 0.5 km/hr จาก 0 ถึง 15 km/hr จึงทำให้แนวโน้มที่ได้ออกมาอาจผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริงอยู่บ้าง เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว การย่อยช่วงข้อมูลในการพิจารณาให้น้อยลงอีกจึงเป็นสิ่งที่แนะนำให้ปฏิบัติ

5.4 ข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางในการศึกษาในอนาคต

1. สามารถนำไปเป็นแนวทางในการวิเคราะห์เมื่อรถจักรมีการเพิ่มโครงคร่าวเข้ามาในระบบ นั้นหมายถึงการที่องศาอิสระเพิ่มขึ้นมากกว่า 5 องศาอิสระ ผลลัพธ์ที่ได้ออกมาอาจตรงกับความเป็นจริงมากขึ้นกว่าเดิม
2. สามารถวิเคราะห์หาดัชนีการโดยสารที่สูงที่สุดที่เป็นไปได้บริเวณทางโค้งต่อ (Transition Curve) ซึ่งจำเป็นต้องทางข้อมูลของ มุมยกโค้ง (Cant) ความสูงการยกโค้ง (Superposition) ฟังก์ชันความโค้งของทางโค้งต่อ (Transition Curve Curvature Function) เพราะช่วงโค้งต่อจะมีรัศมีตลอดโค้งไม่สม่ำเสมอ การสัมผัสกันระหว่างล้อและราง (Wheel – Rail Contact) แรงคืบบนทาง (Creep Force) และขนาดของทาง (Track Gauge) รวมถึงค่าอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อการคำนวณหาค่าวิกฤติสำหรับค่าดัชนีการโดยสาร
3. นอกเหนือจากการวิเคราะห์หาค่าวิกฤติสำหรับค่าดัชนีการโดยสารทางโค้งต่อแล้ว จะสามารถวิเคราะห์การโคลงของตัวรถจักร (Rolling Motion) และการสั่นสะเทือนตามแนวขวางของรถจักร (Lateral Motion) บริเวณทางโค้งต่อ เพื่อนำไปวิเคราะห์ถึงการกระตุกตามแนวยาว (Lateral Jerk) นำไปสู่การหาค่าของ ความสะดวกสบายของรถบนทางโค้งต่อ (Comfort on Curve Transition) หรือใช้ตัวแปรว่า P_{CT} ซึ่งย่อมาจากคำว่าร้อยละการรบกวนของช่วงโค้งต่อ (Percentage Disturbed from Curve Transitions) ซึ่งเป็นค่าที่ปรากฏอยู่ในเอกสารมาตรฐาน EN12299 : Railway applications— Ride comfort for passengers — Measurement and evaluation [16]
4. สามารถวิเคราะห์ในกรณีที่ทางรถไฟไม่ใช้ทางที่มีรูปแบบฟังก์ชันคลื่น นั่นคือการมองว่าทางรถไฟมีลักษณะเป็นฟังก์ชันคาบ (Periodic Track Irregularity) ซึ่งจัดเป็นความผิดปกติของทางรูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่ง รวมถึงการวิเคราะห์ทางรถไฟในรูปแบบของทางที่มีความผิดปกติแบบสุ่ม (Stochastic Track Irregularity) เพื่อการวิเคราะห์ที่ตรงกับความเป็นจริงมากที่สุด

5. จากเอกสารมาตรฐาน EN12299 : Railway applications— Ride comfort for passengers — Measurement and evaluation [16] สามารถนำไปหาอีกค่าหนึ่งได้ นั่นคือค่าของดัชนีความสะดวกสบาย (Comfort Index) หรือแทนได้ด้วย N ซึ่งสามารถใช้ได้หลายวิธีในการคิดคำนวณ รวมถึงค่าความสะดวกสบายแบบต่อเนื่อง (Continuous Comfort) ทั้งสองค่าจะสามารถใช้อธิบายถึงความสะดวกสบายต่อการโดยสารบนรถไฟได้เช่นกัน โดยเป็นการเลือกใช้ชุดข้อมูลทีเปอร์เซนไทล์ที่ 50 และ 95 ของข้อมูลความเร่งที่ได้รับมาวิเคราะห์ต่อเพื่อให้ได้ค่าดังกล่าวออกมา

6. สำหรับโปรแกรมสำหรับการจำลองการประมวลผลที่สามารถนำมาใช้งานเพื่อการวิเคราะห์อย่างแม่นยำและเสมือนจริงมากขึ้นมีมากมาย ตัวอย่างเช่น VI-Rail, SIGMASAMS, Simpack เป็นต้น

7. ข้อเสนอแนะสำหรับการออกแบบระบบกันสะเทือนของรถไฟ

- การวิเคราะห์ดัชนีการโดยสารสามารถวิเคราะห์ได้จากการวิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของรถจักร เพื่อแก้สมการหาค่าความถี่และค่าระยะแอมพลิจูดภายใต้สภาวะคงตัวที่เกิดขึ้น จากนั้นจึงจะสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความถี่และดัชนีการโดยสารได้ เพื่อคำนึงถึงความเร็วที่เหมาะสมในการเดินรถ ภายใต้ตัวแปรต้นในช่วงของค่าที่กำหนดลงไปในการสมการการเคลื่อนที่ เพื่อประเมินค่าคงที่ที่เหมาะสมในช่วงความเร็วที่จะใช้ให้มากที่สุด

- มีรูปแบบการพิจารณาการออกแบบอื่นนอกจากดัชนีการโดยสารอีกเช่น ค่าความถี่ที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบตุ้รถโดยสารไว้อยู่ในช่วง $0.9 - 1.2 \text{ Hz}$ ตุ้รถสินค้ายู่ในช่วง $0.9 - 2.5 \text{ Hz}$ และรถเปล่าอยู่ในช่วง $0.9 - 4 \text{ Hz}$ [17] ในขณะเดียวกัน หากต้องการจะออกแบบระบบกันสะเทือนแบบ Passive จะต้องเลือกช่วงของอัตราส่วนความถี่ที่เหมาะสม ซึ่งอยู่ในช่วง $0.1 \leq \zeta \leq 0.3$ [12]

- วิธีการหนึ่งในการออกแบบระบบกันสะเทือนคือการใช้การประยุกต์ทฤษฎีระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control Theory) มาใช้งาน เพื่อหลีกเลี่ยงข้อจำกัดบางอย่างในวิธีการทางกลศาสตร์ โดยข้อดีของทฤษฎีระบบควบคุมแบบป้อนกลับ คือจะช่วยลดความซับซ้อนในกรณีที่ระดับชั้นองศาอิสระของระบบกันสะเทือนนั้นมีค่ามากหรือสูงจนใกล้เคียงกับความเป็นจริง [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อีกวิธีที่ใช้เกี่ยวกับการหาค่าประกอบของระบบกันสะเทือนที่เหมาะสมที่สุดคือ กระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพระบบกันสะเทือน (Suspension Optimization) ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีที่นิยมใช้หาค่าที่เหมาะสมกับระบบที่สูตรรูปแบบหนึ่ง จัดเป็นกระบวนการวิธีวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์มาใช้แก้ปัญหาดังกล่าว [19]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use⁸¹ only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาคผนวก

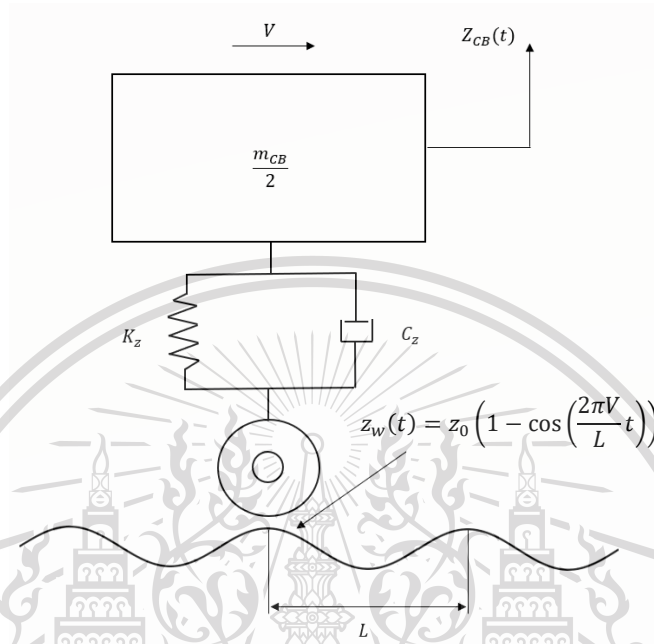
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use⁸² only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ก.

การคำนวณหาสมการการสั่นสะเทือนในสภาวะคงตัวของระบบ 1 องศาอิสระ



รูปที่ ก.1 แผนภาพของรถไฟแบบครึ่งคัน พร้อมตัวแปรและพิกัดต่าง ๆ สำหรับการวิเคราะห์ระบบ 1 องศาอิสระ

พิจารณาเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว ให้

$$X_{ss}(t) = X \cos(\omega_b t - \theta_1 - \theta_2) \quad [8]$$

โดย

$$X = Y \sqrt{\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}}$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{\frac{km}{2}}}$$

$$r = \frac{\omega_b}{\omega_n}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{2\zeta \omega_n \omega_b}{\omega_n^2 - \omega_b^2} \right)$$

และ

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\omega_n}{2\zeta \omega_b} \right)$$

แทนค่าได้

$$\zeta = \frac{1,051.34 / 2}{2 \sqrt{\frac{(21,622.62/2)(141.997)}{2}}}$$

$$\zeta = 0.3$$

ให้ $V = 10 \text{ km/hr}$

$$\omega_b = \frac{2\pi \times 10 \times \frac{5}{18}}{1.5} = 11.636 \text{ rad/s}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{2 \times 21,622.62/2}{141.997}} = 12.34 \text{ rad/s}$$

$$r = \frac{\omega_b}{\omega_n} = \frac{11.636}{12.34} = 0.943$$

$$X = 0.001 \sqrt{\frac{1 + (2 \times 0.3 \times 0.943)^2}{(1 - 0.943^2)^2 + (2 \times 0.3 \times 0.943)^2}}$$

$$X = 0.00199 \text{ m}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{2 \times 0.3 \times 12.34 \times 11.636}{12.34^2 - 11.636^2} \right) = 1.377 \text{ rad}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{12.34}{2 \times 0.3 \times 11.636} \right) = 1.056 \text{ rad}$$

$$X_{ss}(t) = 0.00199 \cos(11.636t - 2.433)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลรวมของฟังก์ชันตรีโกณมิติที่มีความถี่เท่ากัน

จากสมการ

$$X_{ss}(t) = 1.297 \times 10^{-3} \sin(11.636t) - 1.513 \times 10^{-3} \cos(11.636t)$$

ทำให้อยู่ในรูปของ

$$X_{ss}(t) = A \cos(\omega_b t - \varphi)$$

$$\text{จะได้ } A = \sqrt{(1.297 \times 10^{-3})^2 + (1.513 \times 10^{-3})^2} = 0.00199$$

$$\text{และ } \varphi = \pi - \tan^{-1} \left(\frac{1.297 \times 10^{-3}}{1.513 \times 10^{-3}} \right) = 2.433$$

$$X_{ss}(t) = 0.00199 \cos(11.636t - 2.433)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use⁸⁵ only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ค.

ชุดคำสั่งของโปรแกรม MATLAB สำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบ 1 องศาอิสระ



รูปที่ ค.1 แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งสำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบ 1 องศาอิสระ

```

clc;
clear;
syms t real; % independent variable
syms s ; % complex-frequency s
syms ZCB(t) % dependant variables
syms m c k Y L V t % parameter

dZCB_dot = diff(ZCB,t);
dZCB_dotdot = diff(dZCB_dot,t);

eqn = m*dZCB_dotdot + c*dZCB_dot + k*ZCB == ...
      (c*Y*((2*pi*V)/L)*cos((2*pi*V*t)/L) +
      k*Y*sin((2*pi*V*t)/L))
eqnLT = laplace(eqn,t,s)

% substitute the variables
syms R1
eqnLT = subs(eqnLT,laplace(ZCB(t), t, s),R1);
%eqnLT = eqnLT

%Substitute Initial Conditions eqnLT
eqnLT = subs(eqnLT,subs(diff(ZCB(t), t), t, 0),0);
eqnLT = subs(eqnLT,subs(ZCB(t),0),0);

vars = [m c k Y L V]

%Substitute Value According to Matrix vars
values = [141.9966 1051.34/2 21622.62/2 0.001 1.5 10*5/18]
eqnLT = subs(eqnLT,vars,values)

eqnLT = solve(eqnLT,R1)

eqniLT = ilaplace(eqnLT);
eqniLT = vpa(eqniLT)

fplot(eqniLT,[0 5])
title('Vertical Displacement Vibration')
ylabel('ZCB(t)')
xlabel('t')

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use⁸⁷ only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ง.

ชุดคำสั่งของโปรแกรม MATLAB สำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบ 5 องศาอิสระ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
รูปที่ ง.1 แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งสำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบ 5 องศาอิสระ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

clc;
clear;
syms t real; % independent variable
syms s ; % complex-frequency s
syms XCB(t) PhiCB(t) Xwl(t) Xwt(t) ZCB(t) ; % dependant variables
syms MCB Kx Kz ICB Mw r lz lx g Cz Cx V L; % parameter

Zwl(t) = 0.001*(1-cos(((2*pi*V)/L)*(t+(lx/V))));
Zwt(t) = 0.001*(1-cos(((2*pi*V)/L)*(t-(lx/V))));

dXCB_dot = diff(XCB,t);
dXCB_dotdot = diff(dXCB_dot,t);
dPhiCB_dot = diff(PhiCB,t);
dPhiCB_dotdot = diff(dPhiCB_dot,t);
dXwl_dot = diff(Xwl,t);
dXwl_dotdot = diff(dXwl_dot,t);
dXwt_dot = diff(Xwt,t);
dXwt_dotdot = diff(dXwt_dot,t);
dZCB_dot = diff(ZCB,t);
dZCB_dotdot = diff(dZCB_dot,t);
dZwl_dot = diff(Zwl,t);
dZwt_dot = diff(Zwt,t);

eqn1 = MCB*dXCB_dotdot == -2*Kx*XCB+2*Kx*lx*PhiCB(t)+Kx*Xwl+Kx*Xwt-...
2*Cx*dXCB_dot+2*Cx*lx*dPhiCB_dot+Cx*dXwl_dot+Cx*dXwt_dot;

eqn2 = MCB*dZCB_dotdot == -2*Kz*ZCB-2*Cz*dZCB_dot+Cz*Zwl+Cz*Zwt+...
Cz*dZwl_dot+Cz*dZwt_dot-MCB*g;

eqn3 = ICB*dPhiCB_dotdot == 2*Kx*lx*ZCB-2*Kx*lx^2*PhiCB-...
2*Kz*lx^2*PhiCB-Kx*lx*Xwl-Kx*lx*Xwt-
Kz*lx*Zwl+Kz*lx*Zwt+...
2*Cx*lx*dXCB_dot-2*Cx*lx^2*dPhiCB_dot-
2*Cz*lx^2*dPhiCB_dot-...
Cx*lx*dXwl_dot-Cx*lx*dXwt_dot-
Cz*dZwl_dot*lx+Cz*dZwt_dot*lx;

eqn4 = dXwl_dotdot*(Mw+(ICB/r^2)) == Kx*XCB-Kx*Xwl-Kx*lx*PhiCB+...
Cx*dXCB_dot-Cx*lx*dPhiCB_dot-
Cx*dXwl_dot;

eqn5 = dXwt_dotdot*(Mw+(ICB/r^2)) == Kx*XCB-Kx*Xwt-Kx*lx*PhiCB+...
Cx*dXCB_dot-Cx*lx*dPhiCB_dot-
Cx*dXwt_dot;

eqn1LT = laplace(eqn1,t,s);
eqn2LT = laplace(eqn2,t,s);
eqn3LT = laplace(eqn3,t,s);
eqn4LT = laplace(eqn4,t,s);
eqn5LT = laplace(eqn5,t,s);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 % substitute the variables
 syms R1 R2 R3 R4 R5
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ห้ามแก้ไขเนื้อหาหรือข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

eqn1LT = subs (eqn1LT,laplace (Xwl (t), t, s),R2);
eqn1LT = subs (eqn1LT,laplace (Xwt (t), t, s),R5);
eqn1LT = subs (eqn1LT,laplace (PhiCB (t), t, s),R3);
eqn2LT = subs (eqn2LT,laplace (ZCB (t), t, s),R4);
eqn3LT = subs (eqn3LT,laplace (PhiCB (t), t, s),R3);
eqn3LT = subs (eqn3LT,laplace (ZCB (t), t, s),R4);
eqn3LT = subs (eqn3LT,laplace (Xwt (t), t, s),R5);
eqn3LT = subs (eqn3LT,laplace (XCB (t), t, s),R1);
eqn3LT = subs (eqn3LT,laplace (Xwl (t), t, s),R2);
eqn4LT = subs (eqn4LT,laplace (Xwl (t), t, s),R2);
eqn4LT = subs (eqn4LT,laplace (XCB (t), t, s),R1);
eqn4LT = subs (eqn4LT,laplace (PhiCB (t), t, s),R3);
eqn5LT = subs (eqn5LT,laplace (Xwt (t), t, s),R5);
eqn5LT = subs (eqn5LT,laplace (XCB (t), t, s),R1);
eqn5LT = subs (eqn5LT,laplace (PhiCB (t), t, s),R3);

% Substitute Initial Conditions eqn1LT
eqn1LT = subs (eqn1LT,subs (XCB (t), 0), 0);
eqn1LT = subs (eqn1LT,subs (Xwl (t), 0), 0);
eqn1LT = subs (eqn1LT,subs (Xwt (t), 0), 0);
eqn1LT = subs (eqn1LT,subs (PhiCB (t), 0), 0);
eqn1LT = subs (eqn1LT,subs (diff (XCB (t), t), t, 0), 0);

%Substitute Initial Conditions eqn2LT
eqn2LT = subs (eqn2LT,subs (ZCB (t), 0), 0);
eqn2LT = subs (eqn2LT,subs (diff (ZCB (t), t), t, 0), 0);

%Substitute Initial Conditions eqn3LT
eqn3LT = subs (eqn3LT,subs (PhiCB (t), 0), 0);
eqn3LT = subs (eqn3LT,subs (diff (PhiCB (t), t), t, 0), 0);
eqn3LT = subs (eqn3LT,subs (XCB (t), 0), 0);
eqn3LT = subs (eqn3LT,subs (Xwl (t), 0), 0);
eqn3LT = subs (eqn3LT,subs (Xwt (t), 0), 0);

%Substitute Initial Conditions eqn4LT
eqn4LT = subs (eqn4LT,subs (Xwl (t), 0), 0);
eqn4LT = subs (eqn4LT,subs (diff (Xwl (t), t), t, 0), 0);
eqn4LT = subs (eqn4LT,subs (XCB (t), 0), 0);
eqn4LT = subs (eqn4LT,subs (Xwl (t), 0), 0);
eqn4LT = subs (eqn4LT,subs (PhiCB (t), 0), 0);

%Substitute Initial Conditions eqn5LT
eqn5LT = subs (eqn5LT,subs (Xwt (t), 0), 0);
eqn5LT = subs (eqn5LT,subs (diff (Xwt (t), t), t, 0), 0);
eqn5LT = subs (eqn5LT,subs (XCB (t), 0), 0);
eqn5LT = subs (eqn5LT,subs (PhiCB (t), 0), 0);

```

```

vars = [MCB Kx Kz ICB Mw r lz lx g Cz Cx V L];
%Substitute Value According to Matrix vars
values = [141.9966 10320 10320 97.038 23.977 0.125 0.5475 0.6525...
          9.81 246.1 246.1 8*5/18 1.5];

```

```

eqn1LTsub = subs (eqn1LT,vars,values);
eqn2LTsub = subs (eqn2LT,vars,values);
eqn3LTsub = subs (eqn3LT,vars,values);
eqn4LTsub = subs (eqn4LT,vars,values);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในแวดวงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นแต่มีมติเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

eqn5LTsub = subs(eqn5LT,vars,values);

eqns = [eqn1LTsub eqn2LTsub eqn3LTsub eqn4LTsub eqn5LTsub];
vars = [R1 R2 R3 R4 R5];
[R1 R2 R3 R4 R5] = solve(eqns,vars);

R1 = vpa(R1)
R2 = vpa(R2)
R3 = vpa(R3)
R4 = vpa(R4)
R5 = vpa(R5)

R1LT = ilaplace(R1,s,t)
R2LT = ilaplace(R2,s,t)
R3LT = ilaplace(R3,s,t)
R4LT = ilaplace(R4,s,t)
R5LT = ilaplace(R5,s,t)

d_R1LT_dotdot = diff(diff(R1LT,t),t)
d_R2LT_dotdot = diff(diff(R2LT,t),t)
d_R3LT_dotdot = diff(diff(R3LT,t),t)
d_R4LT_dotdot = diff(diff(R4LT,t),t)
d_R5LT_dotdot = diff(diff(R5LT,t),t)

figure('Name','Longitudinal Motion Of Carbody')
subplot(2,1,1)
fplot(R1LT,[50 200])
title('Longitudinal Displacement of Carbody As A Function of Time')
ylabel('Longitudinal Displacement (m)')
xlabel('time (s)')
set(gca,'FontSize',20)

subplot(2,1,2)
fplot(d_R1LT_dotdot,[50 200])
title('Longitudinal Acceleration of Carbody As A Function of Time')
ylabel('Longitudinal Acceleration (m/s^2)')
xlabel('time (s)')
set(gca,'FontSize',20)

figure('Name','Longitudinal Motion Of Leading Wheelset')
subplot(2,1,1)
fplot(R2LT,[0 20])
title('Longitudinal Displacement of Leading Wheelset As A Function of Time')
ylabel('Longitudinal Displacement (m)')
xlabel('time (s)')
set(gca,'FontSize',18)

subplot(2,1,2)
fplot(d_R2LT_dotdot,[0 20])
title('Longitudinal Acceleration of Leading Wheelset As A Function of Time')
ylabel('Longitudinal Acceleration (m/s^2)')
xlabel('time (s)')
set(gca,'FontSize',18)

```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

figure('Name','Pitch Motion Of Carbody')
subplot(2,1,1)
fplot(R3LT,[0 20])
title('Pitch Angle of Carbody As A Function of Time')
ylabel('Pitch Angle (rad)')
xlabel('time (s)')
set(gca,'FontSize',24)

subplot(2,1,2)
fplot(d_R3LT_dotdot,[0 20])
title('Pitch Angular Acceleration of Carbody As A Function of Time')
ylabel('Pitch Angular Acceleration (rad/s^2)')
xlabel('time (s)')
set(gca,'FontSize',24)
axis([0 20 -12*10^-3 12*10^-3])

figure('Name','Vertical Motion Of Carbody')
subplot(2,1,1)
fplot(R4LT,[0 20])
title('Vertical Displacement of Carbody As A Function of Time')
ylabel('Vertical Displacement (m)')
xlabel('time (s)')
set(gca,'FontSize',24)

subplot(2,1,2)
fplot(d_R4LT_dotdot,[0 20])
title('Vertical Acceleration of Carbody As A Function of Time')
ylabel('Vertical Acceleration (m/s^2)')
xlabel('time (s)','FontSize',20)
set(gca,'FontSize',24)

figure('Name','Longitudinal Motion Of Trailing Wheelset')
subplot(2,1,1)
fplot(R5LT,[0 20])
title('Longitudinal Displacement of Trailing Wheelset As A Function of Time')
ylabel('Longitudinal Displacement (m)')
xlabel('time (s)')
set(gca,'FontSize',18)

subplot(2,1,2)
fplot(d_R5LT_dotdot,[0 20])
title('Longitudinal Acceleration of Trailing Wheelset As A Function of Time')
ylabel('Longitudinal Acceleration (m/s^2)')
xlabel('time (s)')
set(gca,'FontSize',18)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use⁹² only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก จ.

ชุดคำสั่งของโปรแกรม MATLAB สำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบ 5 องศาอิสระ
เฉพาะการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง



รูปที่ จ.1 แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งสำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบ 5 องศาอิสระเฉพาะ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน การสั่นสะเทือนในแนวตั้ง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

clc;
clear;
syms t real; % independent variable
syms s ; % complex-frequency s
syms ZCB(t) % dependant variables
syms MCB Kz Mw lx g Cz L V Z0 % parameter
assume([t MCB Kz Cz] > 0)
dZCB_dot = diff(ZCB,t);
dZCB_dotdot = diff(dZCB_dot,t);

eqn = MCB*dZCB_dotdot == -1*2*Kz*ZCB-2*Cz*dZCB_dot+...
      Kz*Z0*(1-cos(((2*pi*V)/L)*(t+(lx/V))))+...
      Kz*Z0*(1-cos(((2*pi*V)/L)*(t-(lx/V))))+...
      Cz*Z0*(2*pi*V/L)*sin(((2*pi*V)/L)*(t+(lx/V)))+...
      Cz*Z0*(2*pi*V/L)*sin(((2*pi*V)/L)*(t-(lx/V)))-...
      MCB*g;

eqnLT = laplace(eqn,t,s);

% substitute the variables
syms R1
eqnLT = subs(eqnLT,laplace(ZCB(t),t,s),R1);

%Substitute Initial Conditions eqnLT
eqnLT = subs(eqnLT,subs(ZCB(t),0),0);
eqnLT = subs(eqnLT,subs(diff(ZCB(t),t),t,0),0);
eqnLTsolve = solve(eqnLT,R1)

eqniLT = ilaplace(eqnLTsolve,s,t)
eqniLT = vpa(eqniLT)
vars = [MCB Kz lx g Cz V L Z0];
values = [141.9966 3400 0.6525 9.81 246.1 15*5/18 1.5 0.001];
eqniLTsub = subs(eqniLT,vars,values)
d_eqniLTsub_dotdot = diff(diff(eqniLTsub,t),t)

figure(1)
fplot(eqniLTsub,[0 20])
title('Vertical Displacement of Carbody As A Function of Time')
ylabel('Vertical Displacement (m)')
xlabel('time (s)')

figure(2)
fplot(diff(diff(eqniLTsub,t),t),[0 20])
title('Vertical Acceleration of Carbody As A Function of Time')
ylabel('Vertical Acceleration (m/s^2)')
xlabel('time (s)')

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Oldrich Polach. 2554. **Modelling of suspension components in a rail vehicle dynamic context.** [ออนไลน์] แหล่งที่มา
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00423114.2011.586430>
เข้าดูเมื่อวันที่ 13/10/2563.
- [2] กมลนัทธ์ ทองกุล จารุวิทย์ ผึ้งชลจิตต์ และ สาริษฐ์ อรุณ. 2563. **การประเมินความเร็วที่ยอมรับได้ของรถไฟโดยสารในทางโค้งด้วยวิธีการพลศาสตร์ของมัลติบอร์ดี.** สาขาวิศวกรรมขนส่งทางราง. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] นคร จันทพร. 2554. **ช่างรถไฟ: ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ โครงการจัดตั้งสถาบันพัฒนาเทคโนโลยีระบบขนส่งทางรางแห่งชาติ.** พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
- [4] KMUTT Railway Team. 2563. **รายงานแนวคิดในการออกแบบหัวจักรรถไฟไฟฟ้า.** กรุงเทพฯ
- [5] วิชัย คิวะโกศิษฐ์. 2562. **หลักการวิศวกรรมระบบราง.** กรุงเทพฯ : ศูนย์วิศวกรรมระบบราง
- [6] Li Haitao. 2563. **Training of High-speed Train Vehicle Dynamics Simulation Technology : China Railway Rolling Stock Corporation (CRRC)**
- [7] ณัฐชนน อนรรพณ์ สรรเพชญ ชำนาญกิจ และ อานัน ตียะชินกุล. 2559. **การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในแนวตั้งของแบบจำลองย่อขนาดรถไฟแบบครึ่งคัน.** ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [8] Daniel J. Inman. 2014. **Engineering Vibration.** 4th ED. Harlow : Pearson
- [9] มนต์ศักดิ์ พิมสาร. 2557. **เอกสารประกอบการสอนวิชา 01156126 RAIL VEHICLE DYNAMICS.** กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [10] Madalina Dumitriu, Marius Alin Gheti. 2016. **Evaluation of The Ride Comfort in Railway Vehicles Based on The Index W_z .** Bucharest : University Politehnica of Bucharest
- [11] ISO 2631-1 **Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole - body vibration - Part 1: General requirements.** 1997. Geneva :

International Organization for Standardization

- [12] Klaus Knothe, Sebastian Satchel. 2017. **Rail Vehicle Dynamic.** Cham : Springer

- [13] T. B. Poole. 2020. **IMechE Railway Challenge: Technical Specification**. London : Institution of Mechanical Engineers
- [14] **Standard Components for Plastic Mold**. 2015. MISUMI Corporation
- [15] **The Spring Catalogue #15**. 2019. Lesjöfors Group
- [16] **EN12299 : Railway applications— Ride comfort for passengers — Measurement and evaluation**. 2009. Brussels : European Committee for Standardization
- [17] Simon Iwnicki. 2006. **Handbook of Railway Vehicle Dynamics**. 2nd ED. Florida : Taylor and Francis
- [18] Daisuke Iba, Arata Masuda. 2006. **Design of Passive Suspension System of Railway Vehicles via Control Theory**. Kyoto: Department of Mechanical and System Engineering. Kyoto Institute of Technology
- [19] Reza N. Jazar. 2017. **Vehicle Dynamics, Theory and Application**. 4th ED. Melbourne : Springer
- [20] **VI-Rail 18.0 Documentation**. 2017. Marburg : VI-grade GmbH
- [21] Sunil Kumar Sharma, Anil Kumar. 2018. **Ride Comfort of a Higher Speed Rail Vehicle Using a Magnetorheological Suspension System**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics. London : SAGE Journal. Institution of Mechanical Engineers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use⁹⁶ only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.