การออกแบบระบบกันสะเทือนสำหรับหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก

Design of Suspension System for Miniature Electric Locomotive

ธนากร โพธิ์ตุ่น
ศิวกร กอบุญช่วย
อนุรักษ์ อัตถิ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
หลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design of Suspension System for Miniature Electric Locomotive

THANAKORN PHOTUN
SIVAKORN KOBUNCHUAY
ANURAK ATTHI

A THESIS SUBMITTED IN PARTAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEER IN RAIL TRANSPORTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF THECHNOLOGY LADKRABANG 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2565

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางราง
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบระบบกันสะเทือนสำหรับหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก

Design of Suspension System for Miniature Electric Locomotive

ผู้จัดทำ

1.	นาย ธนากร	โพธิ์ตุ่น	รหัสประจำตัว	62010384
2.	นาย ศิวกร	กอบุญช่วย	รหัสประจำตัว	62010879
3.	นาย อนุรักษ์	อัตถิ	รหัสประจำตัว	62011013

_____อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบระบบกันสะเทือนสำหรับหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก

นาย ธนากร โพธิ์ตุ่น 62010384

นาย ศิวกร กอบุญช่วย 62010879

นาย อนุรักษ์ อัตถิ 62011013

ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2565

บทคัดย่อ

หัวรถจักรไฟฟ้าเป็นต้นกำลังที่ใช้ลากจูงรถโดยสารหรือรถบรรทุกสินค้า ซึ่งต้องออกแบบให้มีสมรรถนะในการลากจูงที่ดี รวมถึงต้องมีระบบกันสะเทือนที่มีสรรถนะที่ดีเช่นกัน จุดประสงค์หลักของโครงงานนี้จะเป็นการออกแบบระบบกันสะเทือนสำหรับหัวรถจักรไฟฟ้าเพื่อให้มีความสะดวกสบายต่อการขนส่งของผู้โดยสารและใช้ในการแข่งขัน Railway Challenge ในการออกแบบระบบกันสะเทือนจะอ้างอิงตามข้อกำหนดของดัชนีการโดยสารเพื่อใช้ในการประเมินคุณภาพการเดินรถและความสบายในการโดยสาร โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบ 4 องศาอิสระของแบบจำลองรถจักรไฟฟ้าที่เคลื่อนที่บนทางตรงและผิวรางที่มีความขรุขระเป็นฟังก์ชันไซนูซอยด์ เพื่อมาสร้างช่วงเงื่อนไขของค่าคงที่ตัวหน่วงและค่านิจสปริงเพื่อใช้ประกอบการเลือกโช้คอัพ ถุงลมและสปริงที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design of Suspension System of Miniature Electric Locomotive

Thanakorn Photun 62010384

Sivakorn Koboonchuay 62010879

Anurak Atthi 62011013

Asst.Prof.Dr. Monsak Pimsarn Advisor

Year 2022

Abstract

Electric locomotive is generally used for hauling passenger coaches or freight cars and must be designed to have good tractive performance and well-performed suspension system. The main object of this project is to design suspension system of electric locomotive to provide comfort for passenger transport and to be used in the Railway Challenge. Suspension design is based on the ride index. The ride is used to assess ride quality and ride comfort. The four degree of freedom vibration analysis of electric locomotive model operate on straight tracks and rail surfaces with roughness was used as a sinusoid function for create a range of conditions of damping coefficient and stiffness spring to be used in selecting the appropriate shock absorber, air spring and spring.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สำเร็จรุร่วงได้ ถ้าไม่ได้รับอนุเคราะห์จากอนุเคราะห์และสนับสนุนจากบุคคลหลายท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือ ความเอาใจใส่ คำแนะนำ และคอยให้คำปรึกษาในด้านต่างๆ โดยเฉพาะ ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยชี้แนะแนวทางและกระตุ้นให้คณะผู้จัดทำ จนกระทั่งปริญญานิพน์ฉบับนี้สำเร็จเรียบร้อยด้วยดี ทางคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ นาย กิตติธัช เกิดสุวรรณ, นาย จิรายุ สมประสงค์ และ นายสรวิชญ์ แสงรัตน์ ที่เป็นต้นแบบปริญญานิพนธ์ให้ทางคณะผู้จัดทำได้ศึกษาและนำมาต่อยอด อีกทั้งยังคอยให้คำปรักษาด้านโปรแกรม MATLAB จนเกิดปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ขึ้น

ขอขอบพระคุณทางภาควิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ อุปกรณ์ และงบประมาณที่ใช้ในโครงงานนี้ และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ และทุกๆคนที่มีส่วนร่วมในการให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในโครงงานครั้งนี้

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำหวังว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจศึกษาต่อไป

นายธนากร โพธิ์ตุ่น
นายศิวกร กอบุญช่วย
นายอนุรักษ์ อัตถิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

สารบัญ V

สารบัญรูปภาพ VIII

สารบัญตาราง XI

บทที่ 1 1

1.1 ความเป็นมาแล้วความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 1

1.3 สมมติฐานของการศึกษา 1

1.4 ขอบเขตของการศึกษา 2

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา 2

บทที่ 2 3

2.1 บทนำ 3

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบกันสะเทือน 4

2.3.1 ลักษณะของการสั่น 4

2.3.2 การสั่นสะเทือนของรถไฟจากล้อ 5

2.3.3 การสั่นสะเทือนของรถ 8 ล้อ 6

2.3.4 การสั่นสะเทือนบนรถไฟที่เกิดจากแรงภายนอก 9

2.3.5 ระบบถุงลมกันสะเทือน 11

2.3.6 ระบบการสั่นสะเทือนหลายองศาความอิสระ: การสั่นสะเทือนที่ไม่มีตัวหน่วงอิสระ 16

2.3.7 ระบบการสั่นของฐานองศาอิสระเท่ากับหนึ่ง 16

2.3.8 แบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไฟ (Dynamic Mdel of a Vehicle) 20

2.3.9 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของรถไฟ 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ดัชนีการโดยสารรถไฟของสเปอร์ลิง (Sperling's Ride Index)..... 26
2.5 ปฏิกิริยาต่อความสะดวกสบายต่อสภาพแวดล้อมที่มีการสั่นสะเทือน..... 29
บทที่ 3 30
3.1 บทนำ..... 30
3.2 แบบจำลองหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก..... 32
3.2.1 ส่วนประกอบของแบบจำลองหัวรถจักร..... 32
3.3 วิเคราะห์หาผลเฉลยของสมการการสั่นสะเทือนแบบ 4 องศาอิสระ 34
3.3.1 สมมติฐานในการดำเนินงาน 34
3.3.2 พารามิเตอร์ภายในระบบ..... 34
3.3.3 ระบบสมการการเคลื่อนที่สำหรับแบบจำลองรถไฟ 4 องศาอิสระ..... 36
3.3.4 การสร้างชุดคำสั่งแบบจำลอง 4 องศาอิสระด้วยโปรแกรม MATLAB 37
3.3.5 การประมวลผลหาค่าดัชนีการโดยสาร 39
3.3.6 การแสดงผลการประมวลผล..... 40
3.4 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ 40
3.5 การวิเคราะห์หาช่วงของค่านิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วงที่เหมาะสมต่อ..... 40
3.5.1 การวิเคราะห์ระบบลดทอนการสั่นสะเทือนขั้นที่หนึ่ง (Primary Suspension)..... 41
3.5.2 การวิเคราะห์ระบบลดทอนการสะเทือนขั้นที่สอง (Secondary Suspension)..... 44
3.6 การสร้างคำสั่งประมวลผลหาผลเฉลยจากระบบลดทอนการสั่นสะเทือน..... 44
3.7 การวิเคราะห์ค่าดัชนีการโดยสาร Wz จากเงื่อนไขของการออกแบบสปริงและตัวหน่วงสำหรับชุดลดทอนการสั่นสะเทือนในแนวตั้งที่เหมาะสม..... 46
3.7.1 การวิเคราะห์ค่าดัชนีการโดยสารด้วยค่าขอบของค่านิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วง 46
3.7.2 การเลือกสปริงสำหรับระบบลดทอนกันสะเทือนขั้นที่หนึ่ง 49
3.7.3 การเลือกตัวหน่วงสำหรับระบบลดทอนกันสะเทือนขั้นที่หนึ่ง 51
3.7.4 การเลือกถุงลมสำหรับระบบลดทอนกันสะเทือนขั้นที่สอง 52
3.8 การสร้างแบบจำลองการสั่นสะเทือนของหัวรถจักรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 54
4.1 บทนำ 54
4.2 ผลการทดลอง 54
บทที่ 5 61
5.1 บทนำ 61
5.2 สรุปผลการทดลอง 61
5.3 ปัญหาที่เกิดขึ้น 62
5.4 ข้อเสนอแนะ 63
บรรณานุกรม 64
ภาคผนวก 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 การสั่นสะเทือนของรถไฟ 5
รูปที่ 2.2 การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน 6 แนวแกน 6
รูปที่ 2.3 รถ 8 ล้อ 6
รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะอย่างง่ายของโบกี้ 7
รูปที่ 2.5 แสดงแบบจำลองที่ใช้ศึกษาการเคลื่อนที่ของส่วนแคร่รถไฟด้านบน 7
รูปที่ 2.6 แสดงแบบจำลองที่ใช้ศึกษาการเคลื่อนที่ของส่วนแคร่รถไฟด้านหน้า 8
รูปที่ 2.7 แสดงแบบจำลองที่ใช้ศึกษาการเคลื่อนที่ของส่วนแคร่รถไฟด้านข้าง 8
รูปที่ 2.8 ตะเฆ่ที่ประแจซึ่งทำให้เกิดการสั่นเพิ่มมากขึ้น 10
รูปที่ 2.9 ระบบการรับน้ำหนักของรถไฟ 10
รูปที่ 2.10 ถุงลมโดนัท 11
รูปที่ 2.11 ถุงลมทรงกระบอก 12
รูปที่ 2.12 พื้นที่หน้าตัดสุทธิของถุงลม 13
รูปที่ 2.13 Dynamic Air Spring Rate 13
รูปที่ 2.14 (a) แบบจำลองการกระตุ้นการสั่นจากฐาน (Base) (b) จำลองการเคลื่อนที่ของมวล m 17
รูปที่ 2.15 ค่าการส่งผ่านการกระจัด (Displacement Transmissibility) 20
รูปที่ 2.16 แบบจำลองการสั่นสะเทือนของรถไฟที่มีระดับความอิสระเท่ากับ 6 22
รูปที่ 2.17 แบบจำลองการสั่นสะเทือนของรถไฟแบบครึ่งคัน ที่มีระดับความอิสระเท่ากับ 2 22

รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงวิธีดำเนินงาน 31
รูปที่ 3.2 ภาพแสดงตำแหน่งและชิ้นส่วนของหัวรถจักร 33
รูปที่ 3.3 แผนภาพของพารามิเตอร์และมิติต่างๆ 34
รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงวัตถุอิสระ (Free body diagram) ของหัวรถจักร 35
รูปที่ 3. 5 แผนภาพแสดงตำแหน่งของอุปกรณ์ 38
รูปที่ 3.6 แผนภาพของรถไฟแบบครึ่งคัน พร้อมตัวแปรและพิกัดต่าง ๆ 39
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการโดยสารกับค่าความเร็วของรถจักรแต่ละกรณี 47
รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการโดยสารกับค่าความเร็วของรถจักรเฉพาะกรณี 48
รูปที่ 3.9 แผนภาพวาดของล้อรถไฟสำหรับการแข่งขัน 48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.10 ภาพจำลองการติดตั้งชุดสปริงและตัวหน่วงภายในระบบ 49
รูปที่ 3.11 การแสดงผลของอัตราส่วนแอมพลิจูดการกระจัดของการสั่นกับความเร็วของรถ 50
รูปที่ 3.12 โช๊คอัพจักรยาน 51
รูปที่ 3.13 ถุงลมสองชั้น ขนาดเล็ก รหัส 2S 52
รูปที่ 3.14 การจำลองการวางถุงลมบนโบกี้ 53
รูปที่ 3.15 เครื่องมือ Simulink ในโปรแกรม MATLAB 53

รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการโดยสารกับค่าความเร็วของรถจักร 55
รูปที่ 4.2 กราฟพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของหัวรถจักรขนาดเล็ก ที่ความเร็ว 10km/hr 55
รูปที่ 4.3 กราฟพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของหัวรถจักรขนาดเล็ก ที่ความเร็ว 15km/hr 56
รูปที่ 4.4 กราฟพฤติกรรมการสั่นแบบคงตัวของหัวรถจักรขนาดเล็กที่ความเร็ว 10 km/hr และ 15 km/hr 56
รูปที่ 4.5 กราฟพฤติกรรมการสั่นแบบกระดกของหัวรถจักรขนาดเล็ก ที่ความเร็ว 10 km/hr 57
รูปที่ 4.6 กราฟพฤติกรรมการสั่นแบบกระดกของหัวรถจักรขนาดเล็ก ที่ความเร็ว 15 km/hr 57
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของการสั่นในแนวตั้งกับความเร็วของรถจักรขนาดเล็กที่ช่วงการสั่นแบบคงตัว 58
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของการสั่นในแนวตั้งกับความเร็วของรถจักรขนาดเล็กที่ช่วงการสั่นแบบคงตัว 58
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของการสั่นแบบกระดกกับความเร็วของรถจักรขนาดเล็กที่ช่วงการสั่นแบบคงตัว 59
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของการสั่นแบบกระดกกับความเร็วของรถจักรขนาดเล็กที่ช่วงการสั่นแบบคงตัว 59

รูปที่ ก.1 แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งสำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบ 1 องศาอิสระ ... 67

รูปที่ ข.1 แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งสำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบ 4 องศาอิสระ ... 69

รูปที่ จ.1 Data Sheet ของถุงลม WBZ100 83

รูปที่ ฉ.1 แบบจำลอง Block diagram ของการสั่นสะเทือนแบบ 4 องศาอิสระ 86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ฉ.2 ค่าการกระตุ้นจากผิวราง 87

รูปที่ ช.1 แบบจำลอง Block diagram ของการสั่นสะเทือนแบบ 2 องศาอิสระ 89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงความหมายของตัวแปรต่าง ๆ ในระบบ 8
ตารางที่ 2.2 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ของแผนภาพจำลองการกระตุ้นการสั่นจากฐาน..... 17
ตารางที่ 2.3 ค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนักของความเร่งที่ช่วงความถี่กระตุ้นต่าง ๆ 27
ตารางที่ 2.4 ตารางประเมินการโดยสาร - คุณภาพการเดินรถ 28
ตารางที่ 2.5 ตารางประเมินการโดยสาร – ความนุ่มนวลหรือความสบายในการโดยสาร 28
ตารางที่ 2.6 ตารางความเร่งการสั่นสะเทือน ที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้ 29

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงหมายเลขชิ้นส่วนของหัวรถจักร 33
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของระบบ..... 35
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรแรงของระบบ 36
ตารางที่ 3.4 ค่าของตัวแปร 37
ตารางที่ 3. 5 น้ำหนักอุปกรณ์ 38
ตารางที่ 3.6 ตารางแสดงค่าคงที่สปริงที่มีเปอร์เซ็นต์ระยะยุบต่างๆ 50
ตารางที่ 3.7 ตารางแสดงข้อมูลจำเพาะของตัวหน่วงที่เลือกมา 51

ตารางที่ 4.1 ค่าของตัวแปร 54

ตารางที่ ค.1 แสดงการคำนวณเบื้องต้น 73
ตารางที่ ค.2 การเก็บค่าแอมพลิจูดในกรณีที่ 1 74
ตารางที่ ค.3 การเก็บค่าแอมพลิจูดในกรณีที่ 2 75
ตารางที่ ค.4 การเก็บค่าแอมพลิจูดในกรณีที่ 3 76
ตารางที่ ค.5 การเก็บค่าแอมพลิจูดในกรณีที่ 4 77
ตารางที่ ค.6 การเก็บค่าแอมพลิจูดในกรณีที่ 5 78
ตารางที่ ค.7 การเก็บค่าแอมพลิจูดในกรณีที่ 6 79
ตารางที่ ค.8 การเก็บค่าแอมพลิจูดในกรณีที่ 7 80
ตารางที่ ค.9 การเก็บค่าแอมพลิจูดในกรณีที่ 8 81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.1 ตารางแสดงผลการรับแรงและปริมาตรของถุงลมในแต่ละความสูงและความดัน 84
ตารางที่ จ.2 ตารางแสดงผลการรับแรงและปริมาตรของถุงลมที่ความสูง 140,150,160 mm..... 84
ตารางที่ จ.3 ตารางแสดงพื้นที่หน้าตัดสุทธิของถุงลมที่ความสูง 140,150,160 mm 84
ตารางที่ จ.4 ความดันเกจและความดันสัมบูรณ์ในถุงลม..... 85
ตารางที่ จ.5 ค่านิจสปริงในแต่ละความดันที่ความสูง 150 mm..... 85

ตารางที่ ฉ.1 ตารางเก็บค่าการสั่นสะเทือนในแนวตั้งและการสั่นแบบกระดก..... 88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์คำย่อ

M_c(kg)	มวลของตู้รถไฟ หน่วยเป็นกิโลกรัม
M_t(kg)	มวลของโครงแคร่ หน่วยเป็นกิโลกรัม
M_w(kg)	มวลของชุดล้อและเพรา หน่วยเป็นกิโลกรัม
$I_{c(x,y,z)}$(kg▪m^2)	โมเมนต์ความเฉื่อยของตู้รถไฟรอบแกน X Y และ Z
$I_{t(x,y,z)}$(kg▪m^2)	โมเมนต์ความเฉื่อยของโครงแคร่รอบแกน X Y และ Z
$I_{w(x,y,z)}$(kg▪m^2)	โมเมนต์ความเฉื่อยของชุดล้อและเพลารอบแกน X Y และ Z
$K_{p(x,y,z)}$(N/m)	ค่านิจสปริงของระบบกันสะเทือนขั้นที่ 1 ในแนวแกน X Y และ Z
$C_{p(x,y,z)}$(N/m)	ค่าความหน่วงของระบบกันสะเทือนขั้นที่ 1 ในแนวแกน X Y และ Z
$K_{s(x,y,z)}$(N/m)	ค่านิจสปริงของระบบกันสะเทือนขั้นที่ 2 ในแนวแกน X Y และ Z
$C_{s(x,y,z)}$(N/m)	ค่าความหน่วงของระบบกันสะเทือนขั้นที่ 2 ในแนวแกน X Y และ Z
L(m)	ความยาวของตู้รถไฟ
$2L_s$(m)	ระยะห่างระหว่างระบบกันสะเทือนขั้นที่ 2 ตามแนวยาว
d_p(m)	ระยะห่างกึ่งหนึ่งระหว่างระบบกันสะเทือนขั้นที่ 1 ตามแนวขวาง
d_s(m)	ระยะห่างกึ่งหนึ่งระหว่างระบบกันสะเทือนขั้นที่ 2 ตามแนวขวาง
2b(m)	ระยะห่างระหว่างชุดล้อและเพลา (Wheelbase)
H_{tw}(m)	ความสูงจากจุดศูนย์กลางมวลของโครงแคร่ถึงระบบกันสะเทือนขั้นที่ 2
H_{st}(m)	ความสูงจากจุดศูนย์กลางมวลของโครงแคร่ถึงระบบกันสะเทือนขั้นที่ 2
V(m/s)	ความเร็วของรถไฟ
ω_n	ความถี่ธรรมชาติเชิงมุมของระบบ (rad/s)
ω_b	ความถี่จากการกระตุ้นเชิงมุม (rad/s)
ζ	อัตราส่วนการหน่วง (Damping ratio)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Y	แอมพลิจูดของระยะการสั่นของฐาน (m)
t	เวลา (s)
f	ค่าความถี่จากการกระตุ้น (Hz)
F(f)	ค่าประกอบถ่วงน้ำหนัก (Weighting Factor)
(W_z)	ค่าดัชนีการโดยสาร ด้วยวิธีของสเปอร์ลิง (Sperling's Method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การใช้งานระบบขนส่งทางรางมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อความรวดเร็วและความสะดวกสบายต่อการคมนาคมขนส่งของผู้โดยสาร ดังนั้นปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการศึกษา การสั่นสะเทือนของระบบกันสั่นสะเทือนสำหรับหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก (Miniature Electric Locomotive Suspension) ของตู้รถไฟ (Car body) ขณะที่วิ่งบนรางในทางตรง โดยวิธีการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบหลายองศาอิสระ ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการสั่นเทือนที่เกิดจากพื้นผิวของราง ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อนำค่าความถี่และแอมพลิจูดของการสั่นมาประเมินการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง (Vertical Motion) ให้อยู่ในรูปของดัชนีการโดนสาร (Ride Index)) โดยทำการสร้างแบบจำลองของรถไฟขึ้นมา โดยอ้างอิงจากข้อกำหนดของ IMechE Railway Challenge ซึ่งกำหนดให้มีการออกแบบที่ความเร็ว 15 km/hr และอ้างอิงค่าดัชนีความสะดวกสบายจากมาตรฐาน EN 12299 และ ISO 2631-1 มาใช้ในการออกแบบ และพิจารณาค่าดัชนีการโดยสาร จากนั้นวิเคราะห์หาปัจจัยจากผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินงานเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบกันสะเทือนของรถจักรไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อออกแบบชุดคำสั่งการประมวลผลที่ใช้ในการหาสมการผลเฉลยของแบบจำลองของระบบ

1.2.2 เพื่อออกแบบช่วงค่านิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วงที่เหมาะสมต่อระบบ

1.2.3 เพื่อศึกษาค่านิจสปริงของถุงลม (Air Spring)

1.2.4 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1.3.1. ชิ้นส่วนต่างๆของระบบกันสะเทือนของรถจักรไฟฟ้า (Electric Locomotive)ประพฤติตัวเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) ยกเว้นตัวสปริงและตัวหน่วง ที่มีการยืดหยุ่น (Flexible)

1.3.2 ตัวทางมีความสมบูรณ์ และประพฤติตัวเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body)

1.3.3 การสั่นสะเทือนของตัวรถจักรมาจากความขรุขระของพื้นผิวราง (Track Irregularity) และรางทั้งสองข้างมีผิวเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.4 สำหรับการคำนวณค่าความสะดวกสบายในการโดยสาร กำหนดให้ผลลัพธ์มีค่าเท่ากันในทุกบริเวณของรถโดยสาร

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 ความเร็วของรถไฟไม่เกิน 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยอ้างอิงจากข้อกำหนดการแข่งขัน IMechE Railway Challenge

1.4.2 ทางรถไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นทางตรงเท่านั้น

1.4.3 การวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม MATLAB และบันทึกผลด้วยโปรแกรม Microsoft Excel

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อความเข้าใจอย่างถูกต้อง

1.5.2 ตั้งสมมุติฐานการสั่นสะเทือนของแบบจำลองระหว่างการเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีผิวรางขรุขระ

1.5.3 ศึกษาการเขียนชุดคำสั่งในโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้ความรู้ และแนวคิดเกี่ยวกับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของรถไฟ โดยวิธีการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบหลายองศาอิสระ โดยใช้โปรแกรม MATLAB ร่วมกับการบันทึก ผลโดยโปรแกรม Microsoft Excel มาใช้เพื่อช่วยในการคำนวณและวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของรถจักร ไฟฟ้าที่ความเร็วต่าง ๆ ประกอบกับศึกษาจากแนวทางการพิจารณาเพื่อเลือกใช้สปริงและตัวหน่วงที่ เหมาะสมต่อระบบรถจักร

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Dumitriu, M. และ Gheti, M.A. (2016) [1] ศึกษาเกี่ยวกับการประเมินคุณภาพการขับขี่และความสะดวกสบายระหว่างการสั่นสะเทือนในแนวตั้งของตู้รถไฟที่เกิดจากความผิดปกติในราง ซึ่งการประเมินนี้ใช้วิธี Wz เป็นดัชนีของการโดยสารที่คำนวณผ่านแอพพลิชั่นบางตัวของการจำลองเชิงตัวเลขโดยพิจารณาจากผลกระทบของความเร็วและคุณสมบัติของระบบกันสะเทือนที่มีผลต่อคุณภาพการขับขี่ที่ผ่านการวิเคราะห์แล้ว ผลลัพธ์ที่ได้จะเน้นไปที่ชุดคุณลักษณะของพลวัตรพฤติกรรม (Dynamic Behavior) ซึ่งสามารถใช้กับทุกระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่นเดียวกับความเป็นไปได้ในการเพิ่มคุณภาพการขับขี่และความสะดวกสบายในการโดยสารจากการเลือก Secondary Suspension

Vinnlas et al. (2011) [2] ศึกษาเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองของส่วนประกอบระบบกันสะเทือนในแบบจำลองพลวัตของยานพหนะที่ใช้กับราง โดยส่วนประกอบระบบกันสะเทือน (Suspension) มีบทบาทสำคัญในพฤติกรรมการวิ่งของรถไฟ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนประกอบระบบกันสะเทือนจึงเป็นส่วนประกอบสำคัญของมัลติบอร์ดี้ของยานพาหนะที่ใช้กับราง จุดมุ่งหมายนี้คือการทบทวนแบบจำลองที่มีอยู่สำหรับส่วนประกอบระบบกันสะเทือนของยานพาหนะที่ใช้กับรางและการใช้แบบจำลองเหล่านี้ด้วยวิธีการพลศาสตร์ของมัลติบอดี้ เพื่ออธิบายว่าตัวแปร (Parameter) ของแบบจำลองสามารถกำหนดได้อย่างไร และเพื่อหารือเกี่ยวกับระดับที่ต้องการของรายละเอียดของแบบจำลองส่วนประกอบในมุมมองของความแม่นยำที่คาดหวังจากแบบจำลองการจำลองโดยรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติธัช เกิดสุวรรณ, จิรายุ สมประสงค์ และ สรวิชญ์ แสงรัตน์ (2020) [3] ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความสะดวกสบายต่อการโดยสารของแบบจำลองรถจักร 5 องศาอิสระ เคลื่อนที่บนทางตรงและผิวรางมีความขรุขระเป็นฟังก์ชันไซนูซอยด์ ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนเพื่อนำมาประเมินค่าดัชนีการโดยสาร (W_z) ที่ใช้สำหรับประเมินความนุ่มนวลการโดยสาร เพื่อการแข่งขันการออกแบบรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2563 ได้ทำการอ้างอิงตามมาตรฐาน EN12299 และ ISO2631-1 ออกแบบช่วงของค่านิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วง เพื่อเขียนชุดคำสั่ง MATLAB สำหรับการประมวลผลแก้หาผลเฉลยของแบบจำลองระบบลดทอนการสั่นสะเทือนและกำหนดให้ค่าดัชนีการโดยสาร ไม่เกิน 3.25

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบกันสะเทือน

2.3.1 ลักษณะของการสั่น

การสั่นแบบอิสระ (Free Vibration) คือ การสั่นของระบบในลักษณะที่หลังจากมีการรบกวนระบบที่หยุดนิ่งอยู่ที่จุดสมดุลครั้งแรกเพื่อทำให้เกิดการสั่นขึ้นแล้ว การสั่นนั้นดำเนินต่อไปโดยไม่มีแรงจากภายนอกมากระทำกับระบบอีกเลย และการรบกวนระบบอาจจะเป็นการทำให้เกิดการขจัด

การสั่นแบบบังคับ (Forced Vibration) คือ การสั่นของระบบภายใต้แรงกระทำจากภายนอก

การสั่นแบบไม่มีความหน่วง (Undamped Vibration) การสั่นที่ไม่มีการสูญเสียพลังงานให้กับสิ่งแวดล้อมของระบบไม่ว่าจะอยู่ในรูปแรงเสียทานหรือแรงต้าน และเมื่อระบบเคลื่อนที่แบบไม่มีความหน่วงจะทำให้พลังงานรวมของระบบในระหว่างการเคลื่อนที่นี้มีค่าคงที่ โดยการสั่นแบบไม่มีความหน่วงและการสั่นแบบอิสะความถี่ของระบบจะเรียกว่า ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency)

การสั่นแบบมีความหน่วง (Damped Vibration) คือ การสั่นที่มีการสูญเสียพลังงานในระหว่างที่เกิดการเคลื่อนที่ของระบบ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการสั่นตามสภาพความเป็นจริงนั้นจะเป็นการสั่นแบบมีความหน่วงแทบทั้งสิ้น

การสั่นแบบเชิงเส้น (Linear Vibration) คือ ระบบของการสั่นซึ่งประกอบไปด้วย มวล สปริง และตัวหน่วง มีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงค่าของแรงกระทำไปอย่างเป็นเชิงเส้นกับระยะทางหรือความเร็วของพิกัดที่ใช้ โดยการสั่นแบบเชิงเส้นเราสามารถใช้ หลักของการรวมตำแหน่ง (Principle of Superposition)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสั่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Vibration) คือ ระบบของการสั่นซึ่งประกอบไปด้วย มวล สปริง และตัวหน่วง มีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงค่าของแรงกระทำไปอย่างไม่เป็นเชิงเส้นกับระยะทางหรือความเร็วของพิกัดที่ใช้

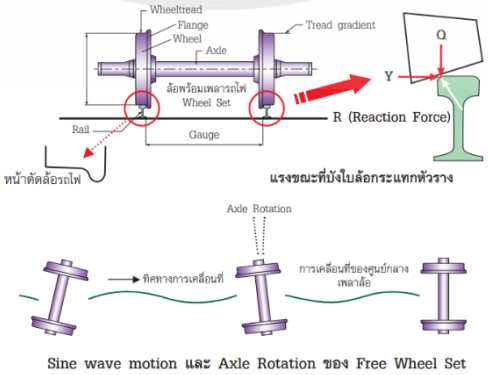
การสั่นแบบกำหนดได้ (Deterministic Vibration) คือ ระบบที่เกิดการสั่นอยู่ภายใต้แรงกระทำจากภายนอกลักษณะใดก็ตาม ถ้าแรงที่กระทำอยู่นั้นสามารถกำหนดขนาดของแรงได้หรือทราบค่าความสัมพันธ์ของแรง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาที่แรงนั้นกระทำ

การสั่นแบบสุ่ม (Random Vibration) คือ ระบบที่เกิดการสั่นอยู่ภายใต้แรงกระทำจากภายนอกลักษณะใดก็ตาม ถ้าแรงที่กระทำต่อระบบไม่สามารถกำหนดขนาดของแรงได้

2.3.2 การสั่นสะเทือนของรถไฟจากล้อ

การศึกษาและปรับปรุงล้อรถไฟได้กระทำมาโดยลำดับ ล้อรถไฟปัจจุบันมีรู้ร่างเป็นรูปกรวยตัด (Truncated-cone Shape) พื้นล้อเป็นระนาบเอียงเนื่องจากต้องการให้ล้อพร้อมเพลามีคุณสมบัติคัดท้ายตัวเอง (Self Steering) กล่าวคือ เมื่อผลักให้ล้อพร้อมเพลาเคลื่อนที่ไปบนราง ล้อด้านที่วิ่งด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่าจะวิ่งออกหน้าล้อที่วิ่งด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า เพลาล้อก็จะเอียงไปในทางที่จะคัดท้ายให้ล้อพร้อมเพลาเคลื่อนที่กลับไปในทางตรงกันข้ามซึ่ง ล้อด้านที่เคยวิ่งด้วยเส้นผ่านศูนย์เล็กกว่าจะเปลี่ยนเป็นวิ่งด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่าและวิ่งออกหน้าล้อด้านตรงข้ามเป็นการคัดท้ายให้เกิดการส่ายตัวกลับ สลับกันไปมา ดังนั้น หากเป็นการเคลื่อนที่ในสภาพปกติแล้ว แรงกระแทกระหว่างบังใบล้อกับหัวรางก็จะมีความรุนแรงน้อยกว่าล้อรถไฟที่เป็นรูปทรงกระบอก

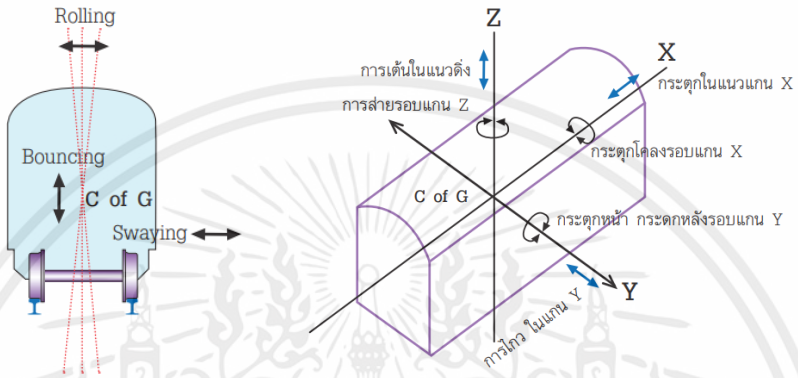
ล้อรถไฟที่ลาดเอียงจะทำให้เพลาล้อส่ายตัวไปมารอบศูนย์กลาง (Axle Hunting) ในขณะเดียวกันศูนย์กลางของเพลาล้อจะเคลื่อนที่ออกทางด้านข้างซ้ายขวาสลับกันศูนย์กลางของเพลาล้อในขณะที่ล้อเคลื่อนที่ไปตามทางจึงส่ายเป็นลักษณะไซนูซอยด์ (Sinusoidal Motion) การเคลื่อนที่ของล้อพร้อมเพลาดังนี้ ก่อให้เกิดการสั่นของตู้รถไฟที่นำมาวางลงบนล้อพร้อมเพลา



รูปที่ 2.1 การสั่นสะเทือนของรถไฟ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสั่นสะเทือนของรถไฟในสภาพที่เป็นจริง จะเกิดการผสมผสานของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ทั้ง 6 แนวแกนดังรูปที่ 2.2 นอกจากนั้น หากมีสิ่งผิดปกติเกิดขึ้นบนรางรถไฟ เช่น รางยุบตัว หรือเมื่อรถวิ่งผ่านประแจซึ่งมีช่องว่างความผิดปกติจากทางรถไฟเหล่านี้จะกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงยิ่งขึ้น และการสั่นสะเทือนนี้ก็จะมีผลตั้งแต่ทำให้ล้อและรางสึก ทำให้ผู้โดยสารรู้สึกไม่สบายไปจนถึงขั้นที่รุนแรงมากจนถึงเป็นเหตุให้รถตกรางได้



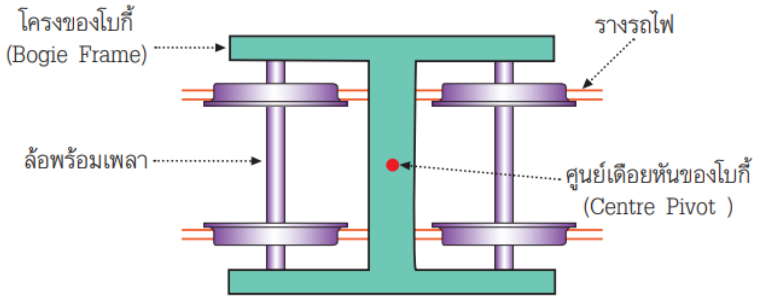
รูปที่ 2.2 การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน 6 แนวแกน [5]

2.3.3 การสั่นสะเทือนของรถ 8 ล้อ

รถไฟ 4 ล้อเป็นรถไฟที่วิศวกรรมไฟประดิษฐ์ใช้งานในระยะแรก แต่ไม่สามารถวิ่งด้วยความเร็วสูงได้เนื่องจากคาบในการส่ายตัวของล้อมีระยะสั้น ทำให้ตัวรถมีการสั่นสะเทือนที่เกินมาตรฐานความปลอดภัยในทุกทิศทาง เมื่อวิ่งด้วยความเร็วสูงในระยะต่อมาจึงมีผู้คิดประดิษฐ์รถ 8 ล้อขึ้นโดยการนำเอารถ 4 ล้อมาทำให้สั้นลงเรียกว่า “โบกี้” แล้วเอาตัวรถวางทับลงไปอีกชั้นหนึ่ง ดังรูปที่ 2.3 ถึง รูปที่ 2.4

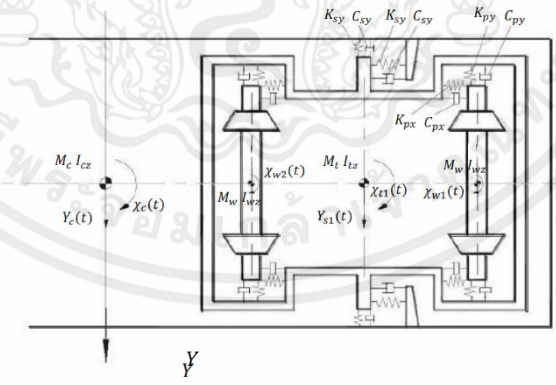
รูปที่ 2.3 รถ 8 ล้อ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



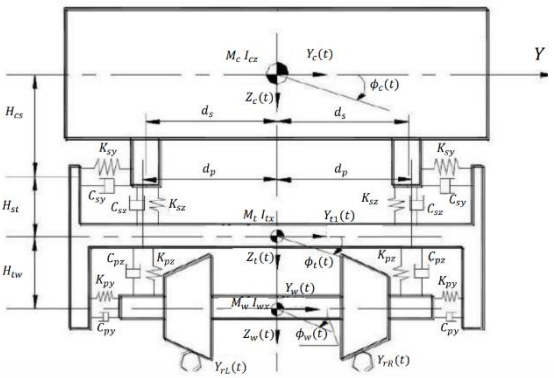
รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะอย่างง่ายของโบกี้ [5]

โดยวิธีการสร้างรถไฟแบบมีโบกี้ขึ้นมีดังนี้ การส่ายตัวเป็นงูเลื้อยของล้อพร้อมเพลาซึ่งเป็นต้นเหตุของการสั่นสะเทือนของตัวรถไฟก็จะลดลงไป แต่การสั่นสะเทือนพื้นฐานซึ่งเกิดกับรถ 4 ล้อ ก็ยังทำให้โบกี้มีสั่นสะเทือนอยู่ตามเดิม แต่การสั่นสะเทือนดังกล่าวจะถูกส่งผ่านขึ้นมาถึงตัวรถน้อยลง และถึงแม้ว่าจะแก้ไขให้การสั่นสะเทือนที่ไม่พึงประสงค์ลดลงโดยการใส่โบกี้เข้าไปเพื่อให้การสั่นสะเทือนไปปรากฏที่ตัวโบกี้ แต่การสั่นสะเทือนที่ไม่ทับรอยกัน (Out of phase) ของโบกี้หน้าและหลัง ก็ยังเป็นเหตุให้ตัวรถยังเกิดการส่ายรอบจุดศูนย์ถ่วง (Center of Gravity, CG) อยู่ เพียงแต่มีระดับความรุนแรงลดลง ในทำนองเดียวกัน การสั่นสะเทือนในแนวแกนอื่นของตัวรถก็ยังมีอยู่ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 2.5 ถึงรูปที่ 2.7

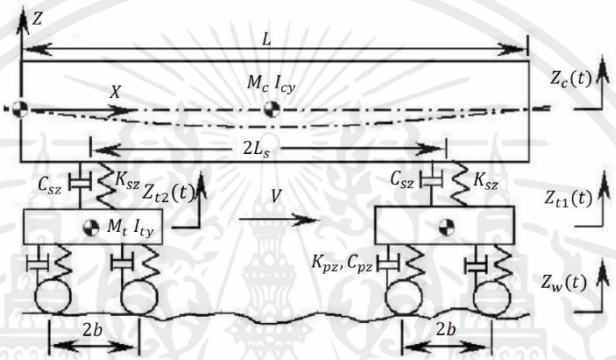


รูปที่ 2.5 แสดงแบบจำลองที่ใช้ศึกษาการเคลื่อนที่ของส่วนแคร่รถไฟด้านบน [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงแบบจำลองที่ใช้ศึกษาการเคลื่อนที่ของส่วนแคร่รถไฟด้านหน้า [9]



รูปที่ 2.7 แสดงแบบจำลองที่ใช้ศึกษาการเคลื่อนที่ของส่วนแคร่รถไฟด้านข้าง [9]

จากรูปที่ 2.5 ถึงรูปที่ 2.7 เป็นการวิเคราะห์รถไฟด้วยระบบ 26 องศาอิสระ แบ่งชุดล้อและเพลาอย่างละ 4 องศาอิสระ โครงแคร่อย่างละ 4 องศาอิสระและตู้รถไฟ 4 องศาอิสระโดยมีตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบเป็นดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงความหมายของตัวแปรต่าง ๆ ในระบบ

ตัวแปร	คำอธิบายตัวแปร
M_c(kg)	มวลของตู้รถไฟ
M_t(kg)	มวลของโครงแคร่
M_w(kg)	มวลของชุดล้อและเพลา
$I_{c(x,y,z)}$(kg·m^2)	โมเมนต์ความเฉื่อยของตู้รถไฟรอบแกน X Y และ Z
$I_{t(x,y,z)}$(kg·m^2)	โมเมนต์ความเฉื่อยของโครงแคร่รอบแกน X Y และ Z
$I_{w(x,y,z)}$(kg·m^2)	โมเมนต์ความเฉื่อยของชุดล้อและเพลารอบแกน X Y และ Z
$K_{p(x,y,z)}$(N/m)	ค่านิจสปริงของระบบกันสะเทือนขั้นที่ 1 ในแนวแกน X Y และ Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) แสดงความหมายของตัวแปรต่าง ๆ ในระบบ

$C_{p(x,y,z)}$(N/m)	ค่าความหน่วงของระบบกันสะเทือนขั้นที่ 1 ในแนวแกน X Y และ Z
$K_{s(x,y,z)}$(N/m)	ค่านิจสปริงของระบบกันสะเทือนขั้นที่ 2 ในแนวแกน X Y และ Z
$C_{s(x,y,z)}$(N/m)	ค่าความหน่วงของระบบกันสะเทือนขั้นที่ 2 ในแนวแกน X Y และ Z
L(m)	ความยาวของตู้รถไฟ
$2L_s$(m)	ระยะห่างระหว่างระบบกันสะเทือนขั้นที่ 2 ตามแนวยาว
d_p(m)	ระยะห่างกึ่งหนึ่งระหว่างระบบกันสะเทือนขั้นที่ 1 ตามแนวขวาง
d_s(m)	ระยะห่างกึ่งหนึ่งระหว่างระบบกันสะเทือนขั้นที่ 2 ตามแนวขวาง
2b(m)	ระยะห่างระหว่างชุดล้อและเพลา (Wheelbase)
H_{tw}(m)	ความสูงระหว่างจุดศูนย์กลางมวลของชุดล้อและเพลากับโครงแคร
H_{st}(m)	ความสูงจากจุดศูนย์กลางมวลของโครงแคร่ถึงระบบกันสะเทือนขั้นที่ 2
H_{cs}(m)	ความสูงจากระบบกันสะเทือนขั้นที่ 2 ถึงจุดศูนย์กลางมวลของตู้รถไฟ
V(m/s)	ความเร็วของรถไฟ
$Y_c(t)$	ฟังก์ชันการเคลื่อนตามแนวขวางของตู้รถไฟ
$Y_{t(1,2)}(t)$	ฟังก์ชันการเคลื่อนตามแนวขวางของโครงแคร่ตัวที่ 1 และตัวที่ 2
$Y_{w(1,2,3,4)}(t)$	ฟังก์ชันการเคลื่อนตามแนวขวางของชุดล้อและเพลาตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 4
$Z_c(t)$	ฟังก์ชันการเคลื่อนตามแนวตั้งของตู้รถไฟ
$Z_{t(1,2)}(t)$	ฟังก์ชันการเคลื่อนตามแนวตั้งของโครงแคร่ตัวที่ 1 และตัวที่ 2
$Z_{w(1,2,3,4)}(t)$	ฟังก์ชันการเคลื่อนตามแนวตั้งของชุดล้อและเพลาตัวที่ 1 ถึงตัวที่ 4
$\emptyset_c(t)$	ฟังก์ชันการโคลงของตู้รถไฟ
$\emptyset_{t(1,2)}(t)$	ฟังก์ชันการโคลงของโครงแคร่ตัวที่ 1 และตัวที่ 2
$\emptyset_{w(1,2,3,4)}(t)$	ฟังก์ชันการโคลงของโครงชุดล้อและเพลาที่ 1 ถึงตัวที่ 4
$X_c(t)$	ฟังก์ชันการส่ายของตู้รถไฟ
$X_{t(1,2)}(t)$	ฟังก์ชันการส่ายของโครงแคร่ตัวที่ 1 และตัวที่ 2
$X_{w(1,2,3,4)}(t)$	ฟังก์ชันการส่ายของโครงชุดล้อและเพลาที่ 1 ถึงตัวที่ 4

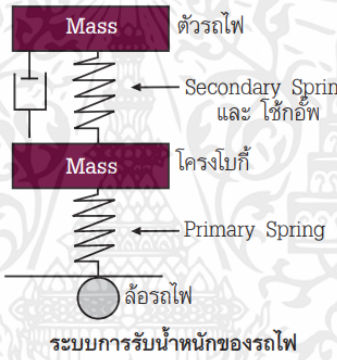
2.3.4 การสั่นสะเทือนบนรถไฟที่เกิดจากแรงภายนอก

ความผิดปกติของทางรถไฟจะกระตุ้นให้การสั่นสะเทือนที่มีอยู่แล้วตามธรรมชาติมีความรุนแรงมากขึ้น ดังนั้นในเบื้องต้นจึงต้องออกแบบเพื่อสร้างและบำรุงรักษาทางรถไฟให้มั่นคง แต่สภาพที่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จริง ก็คงหลีกเลี่ยงแรงกระทำภายนอนเหล่านั้นไม่ได้ อย่างน้อยเมื่อรถไฟวิ่งผ่านประแจซึ่งเนื้อรางโหว่เป็นช่องดังรูปที่ 2.8 ก็จะกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนในแนวดิ่งที่ผิดปกติขึ้น

รูปที่ 2.8 ตะเฆ่ที่ประแจซึ่งทำให้เกิดการสั่นเพิ่มมากขึ้น [5]



รูปที่ 2.9 ระบบการรับน้ำหนักของรถไฟ [5]

ในการออกแบบโบกี้นั้น วิศวกรจะพยายามลดการสั่นสะเทือนจากล้อให้ขึ้นมาถึงตัวรถน้อยลง จัดให้มี Primary Suspension อยู่ระหว่างเพลาล้อกับโบกี้ และ Secondary Suspension อยู่ระหว่างโบกี้กับตัวรถไฟ ดังรูปที่ 2.9 นอกจากออกแบบการรับน้ำหนักเป็นสองชั้นแล้ว ยังต้องติดตั้งโช้กอัพ (Shock Absorber) เพื่อระงับการสั่นสะเทือนที่ผิดปกติให้จางหายไปโดยเร็ว ส่วนการออกแบบโบกี้สำหรับรถไฟที่วิ่งด้วยความเร็วต่ำก็อาจจะเป็นโช้กอัพแบบง่ายๆ เช่น รถสินค้า 4 ล้อ หรือรถโบกี้โดยสารในสมัยแรกๆ ซึ่งใช้สปริงแบบเหล็ก แผ่น (Leaf Spring) ไม่ติดตั้งโช้กอัพ อาศัยแรงเสียดสีระหว่างแผ่นเหล็กสปริงเมื่อเกิดการสั่นในแนวดิ่ง ช่วยระงับการสั่นสะเทือนไปพร้อมกับการทำหน้าที่เป็นระบบรับน้ำหนักชั้นแรกรถเหล่านี้สามารถวิ่งได้ ด้วยความเร็ว 50 - 70 กม./ชม. เท่านั้น เพราะแรงเสียดทานระหว่างแผ่นแหนบมีค่าไม่แน่นอน ควบคุมการสั่นได้ไม่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับรถโดยสารสมัยใหม่ซึ่งต้องการออกแบบให้สามารถวิ่งด้วยความเร็วสูงจะต้องมีวิธีการควบคุมการสั่นสะเทือนที่รัดกุมกว่า ได้แก่การออกแบบโบกี้โดยใช้สปริงขด (Coil Spring) และโช้กอัพที่มี คุณภาพสูงเป็นระบบรับน้ำหนักชั้นแรกและใช้สปริงขด หรือถุงลม (Air Spring) หรือแผ่นยางสลับโลหะใน Secondary Suspension

2.3.5 ระบบถุงลมกันสะเทือน

ในปัจจุบัน ประเทศในกลุ่มประชาคมยุโรป และสหรัฐอเมริกา มีความนิยมใช้ระบบถุงลมกันสะเทือนกันมากขึ้น ด้วยเหตุผลหลายประการ กล่าวคือ ระบบกันสะเทือนแบบถุงลมหรือระบบ Air Suspension เป็นระบบกันสะเทือนที่ทำให้ผู้ขับขี่มีความรู้สึกสะดวกสบาย ตัวรถไม่โคลงมาก เสียงเงียบไม่ดังเหมือนรถที่ใช้แหนบสปริง มีความสั่นสะเทือนน้อยกว่าระบบแหนบจึงทำให้ทั้งตัวรถ สินค้า และถนนเสียหายน้อย จนกระทั่งมีบางประเทศกำหนดให้ใช้ระบบถุงลมกันสะเทือนเป็นมาตรฐาน ในการประกอบการขนส่งทั่วไป

Air spring หรือ ถุงลม ยังมีชื่อเรียกอื่นอีก เช่น Bellow และ หมอนลม เป็นต้น เป็นอุปกรณ์สำหรับแยกแรงสั่นสะเทือนจากต้นกำเนิดแรงสั่น มีใช้ทั้งในงานอุตสาหกรรมเพื่อแยกแรงสั่นที่เกิดขึ้นจากปั๊มลม มอเตอร์ หรือเครื่องจักรต่างๆ ไม่ให้ส่งผลไปถึงผู้ใช้งาน เครื่องจักร หรืออุปกรณ์ใกล้เคียงอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน/เสียหายของอุปกรณ์/เครื่องจักรได้ และใช้ในยานยนต์ (จะเรียกว่าถุงลม) เพื่อลดแรงสั่นที่เกิดขึ้นกับตัวรถและผู้โดยสาร

ชนิดของถุงลม แบ่งออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

1. ถุงลมโดนัท (Air Spring Convoluted type) ถุงลมประเภทนี้มีลักษณะคล้ายลูกบอลทรงกลม มีความแข็งแรงทนทานเป็นพิเศษ รับน้ำหนักได้มาก ยกได้สูงมักนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องจักรหนัก ยกวัตถุขนาดใหญ่ ชั้นแล้วแต่ลักษณะการใช้งาน สามารถดัดแปลงใช้ได้หลายรูปแบบ

รูปที่ 2.10 ถุงลมโดนัท

ที่มา : https://www.ridetech.com/product/air-spring-267c-double-convoluted/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ถุงลมทรงกระบอก (Air Spring Sleeve type) ถุงลมประเภทนี้มีลักษณะคล้ายกระบอกไม้ไผ่หรือถ้วยแก้วทรงสูง โดยตัวถุงลมเมื่อถูกใช้งาน จะพับตัวเข้าด้านในซ้อนกันอยู่ และลักษณะการพับซ้อนเข้าด้านในนี้ทำให้เกิดช่องอากาศภายใน จึงทำให้ยืดหยุ่นตัวได้ดี ทั้งยังให้ความนุ่มนวลสูง และซับแรงกระแทกได้ดี การใช้งานเหมาะกับพื้นที่ติดตั้งจำกัดและบรรทุกน้ำหนักเบา

รูปที่ 2.11 ถุงลมทรงกระบอก

ที่มา : https://miamistar.com/products/air-bag-cab-us30-1s4-067

การเลือกใช้ถุงลมของเราจะเลือกใช้เป็นถุงลมโดนัทเพราะรับน้ำหนักได้ดี มีความทนทานและสามารถล็อคความสูงได้ซึ่งแตกต่างจากถุงลมทรงกระบอกที่ค่อนข้างยืดหยุ่น [7]

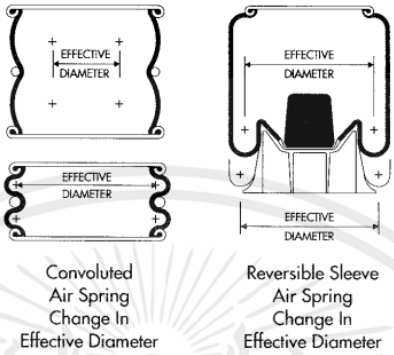
2.3.5.1 หลักการพื้นฐานของถุงลม [8]

1. พื้นที่หน้าตัดสุทธิ (Effective area)

พื้นที่หน้าตัดสุทธิ คือ พื้นที่ที่รับน้ำหนักของถุงลม โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของมันถูกกำหนดโดยระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรัศมีความโค้งของห่วงถุงลมดังรูปที่ 2.12 โดยห่วงจะประมาณวงกลมเสมอเนื่องจากความดันอากาศภายในทำงานอย่างสม่ำเสมอในทุกทิศทาง ดังนั้นเฉพาะพื้นที่ภายในจุดศูนย์กลางเท่านั้นจึงจะมีประสิทธิภาพในแนวตั้ง สำหรับถุงลมโดนัท (Convoluted Air Spring) พื้นที่หน้าตัดสุทธิจะเพิ่มขึ้นในการอัดและลดลงเมื่อยืดออก สำหรับถุงลมทรงกระบอกแบบพลิกกลับได้ (Reversible Sleeve Air Spring) พื้นที่ที่หน้าตัดสุทธิจะคงที่ในขณะที่ทำงานที่ด้านตรงของลูกสูบ เพิ่มขึ้นเมื่อทำงานกับการจุดระเบิดของลูกสูบในการอัด และลดลงเมื่อส่วนยางยกออกจากลูกสูบในส่วนขยาย เมื่อรถที่มีถุงลมในระบบกันสะเทือนของมันหยุดนิ่ง จากนั้นโหลดถูกเพิ่มหรือถอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออก วาล์วควบคุมระดับ (Levelling Valve) ของรถทำงานเพื่อเพิ่มหรือขจัดอากาศที่อยู่ในถุงลมให้เพียงพอเพื่อรักษาความสูงโดยรวมของถุงลมที่ตั้งไว้ จากนั้นจะเพิ่มหรือลดแรงดันในถุงลมตามปริมาณที่จำเป็นในการจัดเตรียมแรงยกที่ต้องการเพื่อให้ตรงกับแรงกดลงในปัจจุบันที่สร้างขึ้นโดยโหลดใหม่และจะกลับไปอยู่จุดสมดุลอีกครั้ง

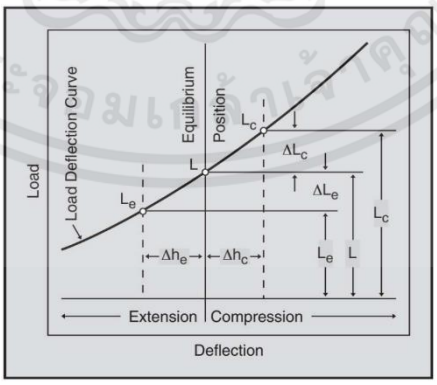


$$\text{Effective Area} = \frac{\text{Load}}{\text{Pressure}}$$

รูปที่ 2.12 พื้นที่หน้าตัดสุทธิของถุงลม [8]

2. ค่านิจสปริงของถุงลม

ค่านิจสปริงของถุงลมคือความชันของเส้นสัมผัสที่ตำแหน่งสมดุล (Equilibrium Position) ซึ่งเป็นตัวแหน่งที่เราจะออกแบบจากความสูงที่ต้องการ สำหรับการโก่งตัวที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยค่านิจสปริงของถุงลมเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของโหลดต่อการโก่งตัว



รูปที่ 2.13 Dynamic Air Spring Rate [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_s = \frac{L_c - L_e}{\Delta h_c + \Delta h_e} \quad (2.1)$$

เมื่อ K_s = ค่านิจสปริงของถุงลม (kN/m)

L_c = โหลดจากการอัดตัว (N)

L_e = โหลดจากการขยายตัว (N)

h_c = ความสูงของถุงลมที่โหลดจากการอัดตัว (mm)

h_e = ความสูงของถุงลมที่โหลดจากการขยายตัว (mm)

โดยโหลดที่กระทำกับถุงลมสามารถหาได้จากแรงดันและพื้นที่หน้าตัดสุทธิ คือ

$$L_c = P_{gc}(A_c)$$
$$L_e = P_{ge}(A_e) \quad (2.2)$$

เมื่อ P_{gc} = ความดันเกจที่ L_c (kPa)

P_{ge} = ความดันเกจที่ L_e (kPa)

A_c = พื้นที่หน้าตัดสุทธิที่ L_c (m^2)

A_e = พื้นที่หน้าตัดสุทธิที่ L_e (m^2)

แทน (2.2) ใน (2.1) จะได้

$$K_s = \frac{P_{gc}(A_c) - P_{ge}(A_e)}{\Delta h_c + \Delta h_e} \quad (2.3)$$

ความดันเกจ (Gauge Pressure)

$$P_{gc} = P_{ac} - P_{atm}$$
$$P_{ge} = P_{ae} - P_{atm} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ P_{ac} = ความดันสัมบูรณ์ที่ L_c (kPa)

P_{ae} = ความดันสัมบูรณ์ที่ L_e (kPa)

P_{atm} = ความดันบรรยากาศมีค่าเท่ากับ 101.3 kPa

ใช้กฎรวมของแก๊สในสภาวะ Polytropic

$$P_{ac} = P_{a1}\left(\frac{V_1}{V_c}\right)^n$$
$$P_{ae} = P_{a1}\left(\frac{V_1}{V_e}\right)^n \quad (2.5)$$

เมื่อ P_{a1} = ความดันสัมบูรณ์ที่ตำแหน่งสมดุล (kPa)

V_1 = ปริมาตรถุงลมที่ตำแหน่งสมดุล (m^3)

V_c = ปริมาตรถุงลมที่ L_c (m^3)

V_e = ปริมาตรถุงลมที่ L_e (m^3)

n = 1.38 สำหรับการใช้งานกับยานพาหนะแบบปกติ [8]

แทน (2.5) ใน (2.4) จะได้

$$P_{gc} = P_{a1}\left(\frac{V_1}{V_c}\right)^{1.38} - 101.3$$
$$P_{ge} = P_{a1}\left(\frac{V_1}{V_e}\right)^{1.38} - 101.3 \quad (2.6)$$

แทน (2.6) ใน (2.3) จะได้

$$K_s = \frac{\left[P_{a1}\left(\frac{V_1}{V_c}\right)^{1.38} - 101.3\right]A_c - \left[P_{a1}\left(\frac{V_1}{V_e}\right)^{1.38} - 101.3\right]A_e}{\Delta h_c + \Delta h_e}$$

จัดรูปใหม่

$$K_s = \frac{P_{a1}\left[A_c\left(\frac{V_1}{V_c}\right)^{1.38} - A_e\left(\frac{V_1}{V_e}\right)^{1.38}\right] - 101.3(A_c - A_e)}{h_e - h_c} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6 ระบบการสั่นสะเทือนหลายองศาความอิสระ: การสั่นสะเทือนที่ไม่มีตัวหน่วงอิสระ (Multiple Degree of freedom System: Undamped Free Vibration) [10]

การสั่นสะเทือนที่ไม่มีตัวหน่วงอิสระ ระบบที่มีการสั่นสะเทือนที่องศาความอิสระมากกว่าหนึ่ง สามารถเมทริกซ์มาช่วยในการวิเคราะห์การแก้ปัญหา ระบบการสั่นเทือนหลายองศาอิสระที่ไม่มีตัวหน่วงสามารถถูกเขียนอยู่ในรูปของสมการเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (2.8)

$$M\ddot{x}+Kx=0 \tag{2.8}$$

Eigenvalue Problem ถูกนำมาใช้เพื่อความถี่ธรรมชาติของระบบการสั่นโดยการเปลี่ยนรูปของสมการที่ (2.8) เปลี่ยนเป็นรูปเวกเตอร์เมทริกซ์ $x=M^{-\frac{1}{2}}q$ และคูณด้วยเมทริกซ์ $M^{-\frac{1}{2}}$ ทั้งสมการทำการสมมติคำตอบให้ $q=ve^{-j\omega t}$ สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (2.9)

$$\tilde{K}v=\omega^2 v=\lambda v \tag{2.9}$$

เมื่อ $\tilde{K}$ คือ เมทริกซ์ค่าความแข็งของสปริงบรรทัดฐานมวล (Mass-Normalized Stiffness Matrix)

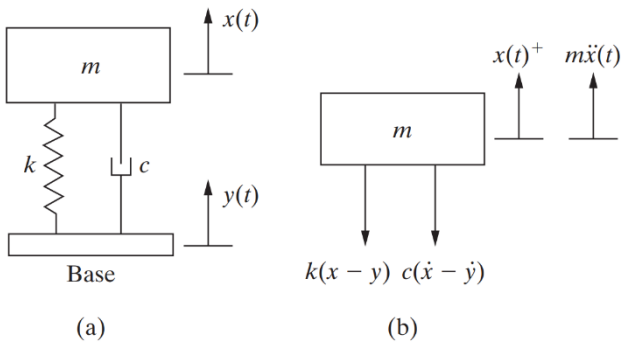
λ คือ ค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalue)

v คือ เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ (Eigenvector)

2.3.7 ระบบการสั่นของฐานองศาอิสระเท่ากับหนึ่ง (One-degree-of-freedom base excitation)

การสั่นในแนวดิ่งที่เกิดจากการกระตุ้นการสั่นที่ฐานที่องศาอิสระเท่ากับหนึ่ง พิจารณาระบบมวลสปริงและตัวหน่วงที่ถูกกระตุ้นด้วยการกระจัดที่ฐานดังรูปที่ 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 (a) แบบจำลองการกระตุ้นการสั่นจากฐาน (Base) (b) จำลองการเคลื่อนที่ของมวล m ที่ถูกกระตุ้น

ตารางที่ 2.2 แสดงตัวแปรและพารามิเตอร์ของแผนภาพจำลองการกระตุ้นการสั่นจากฐาน

ตัวแปร	คำอธิบายตัวแปร
m (kg)	มวลของวัตถุเหนือสปริง
k (N/m)	ค่านิจสปริงของระบบ
c (N·s/m)	ค่าคงที่ความหน่วงของระบบ
x(t)	ฟังก์ชันการเคลื่อนที่ของที่ของมวล
y(t)	ฟังก์ชันการเคลื่อนที่ของฐานกระตุ้น

จากการกระจัด $x(t)$ คือการกระจัดของมวล m ที่วัดจากตำแหน่งที่มวลอยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง ซึ่งในขณะนั้น $t=0, x(0)=\dot{x}(0)=y(0)=0$ ใช้สมการการเคลื่อนที่ของนิวตัน ตามกฎข้อที่ 2 จะเขียนสมการได้ดังนี้

$$c(\dot{y}-\dot{x})+k(y-x)=m\ddot{x}$$

จัดรูปใหม่ได้

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=c\dot{y}+ky \qquad (2.10)$$

โดยทั่วไปสมการของการกระตุ้นที่ฐานจะสมมติให้เป็นแบบฮาร์โมนิกหรือในรูปไซน์ฟังชันก์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y(t)=Y\sin(\omega_b t) \tag{2.11}$$

ดังนั้นเมื่อเรานำ (2.11) ไปแทนใน (2.10) และทำการหาร m ทั้งสองข้างของสมการ จากนั้นแทนค่า $c=2m\zeta\omega_n$ และ $k=m\omega_n^2$ จะทำให้ได้สมการการเคลื่อนที่ดังนี้

$$\ddot{x}+2\zeta\omega_n\dot{x}+\omega_n^2 x=2\zeta\omega_n\omega_b Y\cos(\omega_b t)+\omega_n^2 Y\sin(\omega_b t) \tag{2.12}$$

เมื่อ ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติเชิงมุมของระบบ (rad/s)

ω_b คือ ความถี่จากการกระตุ้นเชิงมุม (rad/s)

ζ คือ อัตราส่วนการหน่วง (Damping ratio)

Y คือ แอมพลิจูดของระยะการสั่นของฐาน (m)

จากนั้นทำการหาผลเฉลยของสมการ (2.12) โดยจะเลือกพิจารณาผลของการสั่นสะเทือนในสภาวะคงตัว (Steady State) จะได้ว่า

$$x_{ss}(t)=X\cos(\omega_b t-\theta_1-\theta_2) \tag{2.13}$$

โดยที่ X คือ แอมพลิจูดของระยะการสั่นของมวล (Output Displacement) เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$X=Y\sqrt{\frac{1+(2\zeta r)^2}{(1-r)^2+(2\zeta r)^2}} \tag{2.14}$$

โดยที่ r คือ Frequency Ratio เขียนเป็นสมการได้ว่า $r=\frac{\omega_b}{\omega_n}$ จากนั้นทำการหารสมการ (2.14) ด้วย Y ตลอดสมการจะได้ว่า

$$\frac{X}{Y}=\sqrt{\frac{1+(2\zeta r)^2}{(1-r)^2+(2\zeta r)^2}} \tag{2.15}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะเดียวกัน

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{2\zeta\omega_n\omega_b}{\omega_n^2-\omega_b^2}\right) \tag{2.16}$$

และ

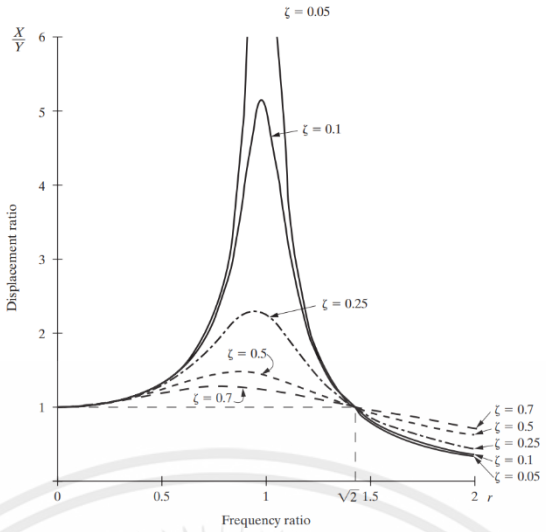
$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{\omega_n}{2\zeta\omega_b}\right) \tag{2.17}$$

อัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดของระยะการสั่นของมวลติดสปริง X กับแอมพลิจูดของระยะการสั่นของฐาน Y (Input Displacement) ดังที่แสดงในสมการ (2.15) มีชื่อเรียกโดยเฉพาะว่าค่าการส่งผ่านการกระจัด (Displacement Transmissibility)

อัตราส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าวัตถุจะเคลื่อนที่ไปเท่าไรเมื่อให้การกระตุ้นโดยการสั่นของพื้นที่ความถี่ต่าง ๆ รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านการกระจัด ที่ความถี่ต่าง ๆ จะเห็นว่าถ้าฐานสั่นกระตุ้นด้วยความถี่ต่ำ ๆ การสั่นของมวลจะมีขนาดเท่ากับการสั่นของพื้น และเมื่อความถี่ของการสั่นสะเทือนของพื้นเพิ่มขึ้นจนเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติแล้ว ขนาดของการสั่นสะเทือนจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่เมื่อความถี่การสั่นของพื้นมีการเพิ่มขึ้นอีก จน $r > \sqrt{2}$ แล้ว การสั่นสะเทือนของมวลที่สนใจจะมีขนาดลดลง

สำหรับผลของสัดส่วนการหน่วงจะพบว่า เมื่อสัดส่วนการหน่วงเพิ่มจะทำให้ขนาดการสั่นสะเทือนลดลงหากการสั่นเกิดที่ความถี่ต่ำ $\left(r > \sqrt{2}\right)$ และการเพิ่มสัดส่วนการหน่วงจะส่งผลให้ขนาดลดลงอย่างมากหากการสั่นของฐานเกิดใกล้กับช่วงความถี่ธรรมชาติ แต่หากการสั่นของฐานเกิดที่ความถี่สูง $\left(r > \sqrt{2}\right)$ แล้ว การเพิ่มสัดส่วนการหน่วงจะทำให้ขนาดของการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นถือว่าเป็นประโยชน์อย่างมากในการออกแบบระบบให้ได้รับผลการสั่นสะเทือนจากการสั่นของฐานน้อยๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ค่าการส่งผ่านการกระจัด (Displacement Transmissibility) ในรูปของฟังก์ชันของ Frequency ratio แสดงให้เห็นว่ามีการกระจัดแบบไร้มิติ $\frac{X}{Y}$ แตกต่างกันอย่างไรตามความถี่ของการเคลื่อนที่ส่วนฐานเพิ่มขึ้นสำหรับสัดส่วนความหน่วงที่แตกต่างกัน [11]

2.3.8 แบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไฟ (Dynamic Model of a Vehicle) [9]

สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนตัวของรถไฟบนระบบราง สามารถแสดงได้ดังสมการที่

$$[M][\ddot{q}]+\left\{[C]+\frac{[C_{\omega R}]}{V}\right\}\{\dot{q}\}+\{[K]+[K_{\omega R}]\}\{q\}=\{Q\} \tag{2.18}$$

เมื่อ [M] คือ เมทริกซ์ความเฉื่อย (Inertia Matrix)

[C] คือ เมทริกซ์ความหน่วง (Viscous Damping Matrix)

$[C_{\omega R}]$ คือ เมทริกซ์ความหน่วงจากการคืบ (Creepage Damping Matrix)

[K] คือ เมทริกซ์ความแข็งสปริง (Stiffness Matrix)

$[K_{\omega R}]$ คือ เมทริกซ์ความแข็งเกร็งของการคืบและความแข็งเกร็งของการสัมผัส (Creepage rigidly and contact rigidly matrix)

[q] คือ เวกเตอร์การกระจัด (Displacement Vector)

[V] คือ ความเร็วให้บริการของยานพาหนะ (Vehicle's Operation Speed)

[Q] คือ การกระตุ้น (Excitation)

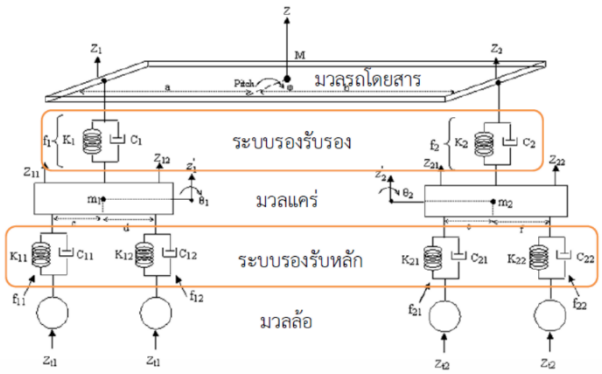
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.9 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของรถไฟ

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

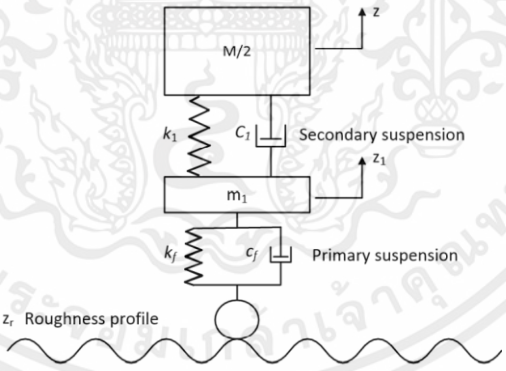
โดยรถไฟที่วิ่งอยู่บนรางโดยปกติก็จะมีการสั่นสะเทือนมาจากหลายปัจจัยเช่นจากความขรุขระของผิวราง รางมีการโค้งงอ (Corrugated Track) โครงสร้างรองรับรางที่มีความแข็งแรงไม่เท่ากัน การเคลื่อนที่ส่ายของตัวรถเป็นต้น ดังนั้นในการออกแบบระบบรองรับต้องทำการออกแบบให้ตัวรถโดยสารมีการสั่นสะเทือนน้อยที่สุดเพื่อความสบายของรถโดยสาร จะใช้การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของรถโดยสารจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ซึ่งการวิเคราะห์จะให้ผลลัพธ์ได้ถูกต้องตามความเป็นจริงนั้นก็ต้องทำการจำลองแบบให้เสมือนจริงมากที่สุด อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนโดยส่วนใหญ่จะคำนึงถึงการสั่นสะเทือนของตัวรถโดยสารในแนวตั้ง ดังนั้นแบบจำลองการสั่นสะเทือนที่นำมาวิเคราะห์ที่สามารถทำนายผลได้ดีเป็นที่ยอมรับจะใช้แบบจำลองดังรูปที่ 2.16 ซึ่งเป็นแบบจำลองของการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของรถไฟ เมื่อรถไฟวิ่งอยู่บนรางที่มีความขรุขระ แบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบจำลองการสั่นสะเทือนที่มีความอิสระเท่ากับ 6 โดยส่วนประกอบจะประกอบด้วยมวลตัวรถ มวลของแคร่และมวลของล้อ ส่วนประกอบเหล่านี้เชื่อมต่อกันด้วยสปริงและตัวหน่วง ซึ่งมีทั้งระบบรองรับหลัก (Primary Suspension) และระบบรองรับรอง (Secondary Suspension) แต่ละล้อจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและสัมผัสกับรางตลอดเวลา ดังนั้นตัวล้อจะเคลื่อนที่ขึ้นลงตามโปรไฟล์ของฟังก์ชันความขรุขระ ดังแสดงในรูป คือ ฟังก์ชัน Z_{t1} และ Z_{t2} ที่แต่ละล้อของแคร่ด้านหน้าและด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แบบจำลองการสั่นสะเทือนของรถไฟที่มีระดับความอิสระเท่ากับ 6 [12]

แบบจำลองการสั่นสะเทือนในรูปที่ 2.16 พิกัดทั่วไปของมวลรถคือ (Z,φ) พิกัดทั่วไปของมวลแคร่ด้านหน้าคือ (z_1,θ_1) และ พิกัดทั่วไปของมวลแคร่ด้านหลังคือ (z_2,θ_2) ซึ่งสมการการเคลื่อนที่ของทั้งระบบจะมีสมการทั้งหมด 6 สมการโดยการวิเคราะห์จะทำการจำลองการเคลื่อนที่เพียงครึ่งหนึ่งของรถไฟ โดยสมมติให้ มวลแคร่ด้านหน้าและด้านหลังมีค่าเท่ากัน คุณสมบัติของระบบรองรับหลักและรองของด้านหน้าและด้านหลังมีค่าเท่ากัน จะได้แบบจำลองใหม่ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แบบจำลองการสั่นสะเทือนของรถไฟแบบครึ่งคัน ที่มีระดับความอิสระเท่ากับ 2 [12]

ในส่วนของระบบรองรับหลักนั้น $k_f=K_{11}+K_{12}$ และ $c_f=C_{11}+C_{12}$ ซึ่งนำมาจากรูปที่ 2.17 จากนั้นทำการหาสมการการเคลื่อนที่ของระบบโดยใช้สมการลากรานจ์ (Lagrange equation) ดังนี้

$$L=KE-PE \tag{2.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ KE คือ พลังงานจลน์ (Kinetic Energy)

PE คือ พลังงานศักย์ (Potential Energy)

ในระบบนี้ถือว่าเป็นระบบที่มีระดับความอิสระเท่ากับ 2 ดังนั้น พิกัดทั่วไปคือ q_1 และ q_2 แต่ในทางการภาพแล้วจะทำการเลือกเป็น z และ z_1 แรงทั่วไปและโมเมนต์ทั่วไปได้เป็น $Q_1=0$ และ $Q_2=0$

จากนั้นทำการหาสมการของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบ ซึ่งก็คือผลรวมของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของมวลทั้งสองรวมกัน จะได้ว่า

สำหรับมวล $\frac{M}{2}$

$$KE_1=\frac{1}{2}\frac{M}{2}\dot{z}^2$$

สำหรับมวล m_1

$$KE_2=\frac{1}{2}m_1\dot{z}_1^2$$

และ

$$KE=KE_1+KE_2=\frac{M}{4}\dot{z}^2+\frac{1}{2}m_1\dot{z}_1^2 \tag{2.20}$$

พลังงานศักย์ในระบบ (ที่มีการเปลี่ยนแปลง) มาจากการยืด-หดของสปริง k_1 และ k_f จะได้ว่า

$$PE=\frac{1}{2}k_1(z-z_1)^2+\frac{1}{2}k_f(z_1-z_r)^2 \tag{2.21}$$

แทน (2.20) และ (2.21) ใน (2.19) จะได้ว่า

$$L=\frac{M}{4}\dot{z}^2+\frac{1}{2}m_1\dot{z}_1^2-\frac{1}{2}k_1(z-z_1)^2-\frac{1}{2}k_f(z_1-z_r)^2 \tag{2.22}$$

ในกรณีของเทอมที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจากการหน่วงนั้นมาจาก พิกัด z และ z_1 จะมีความสัมพันธ์กับตัวหน่วง c_1 และ c_f ดังนั้น เราสามารถหาสมการของเทอม D ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D=\frac{1}{2}c_1(\dot{z}-\dot{z}_1)^2+\frac{1}{2}c_f(\dot{z}_1-\dot{z}_r)^2 \quad (2.23)$$

ทำการหาสมการการเคลื่อนที่ โดยการใช้สมการลากรานช์ จะได้ว่า

เมื่อ $j=1, q_1=z$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{z}}\right)+\frac{\partial D}{\partial \dot{z}}-\frac{\partial L}{\partial z}=Q_1=0 \quad (2.24)$$

โดยที่ $$\frac{\partial L}{\partial \dot{z}}=\frac{M}{2}\dot{z}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{z}}=c_1(\dot{z}-\dot{z}_1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial z}=-k_1(z-z_1)$$

นำสมการที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ไปแทนลงในสมการที่ (2.24) จะได้

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{M}{2}\dot{z}\right]+c_1(\dot{z}-\dot{z}_1)+k_1(z-z_1)=0$$

ทำการหาอนุพันธ์ของเทอมแรกเทียบกับเวลา จะได้ว่า

$$\frac{M}{2}\ddot{z}+c_1(\dot{z}-\dot{z}_1)+k_1(z-z_1)=0 \quad (2.25)$$

เมื่อ $j=2, q_2=z_1$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{z}_1}\right)+\frac{\partial D}{\partial \dot{z}_1}-\frac{\partial L}{\partial \dot{z}_1}=Q_2=0 \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $\frac{\partial L}{\partial \dot{z}_1} = m_1 \dot{z}_1$

$\frac{\partial D}{\partial \dot{z}_1} = -c_1(\dot{z}-\dot{z}_1)+c_f(\dot{z}_1-\dot{z}_r)$

$\frac{\partial L}{\partial \dot{z}_1} = k_1(z-z_1)-k_f(z_1-z_r)$

นำสมการที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ไปแทนลงในสมการที่ (2.26) จะได้

$$\frac{d}{dt}[m_1\dot{z}_1]-c_1(\dot{z}-\dot{z}_1)+c_f(\dot{z}_1-\dot{z}_r)-k_1(z-z_1)+k_f(z_1-z_r)=0$$

ทำการหาอนุพันธ์ของเทอมแรกเทียบกับเวลา จะได้ว่า

$$m_1\ddot{z}_1+(c_1+c_f)\dot{z}_1-c_1\dot{z}+(k_1+k_f)z_1-k_1z=c_f\dot{z}_r+k_fz_r \qquad (2.27)$$

สมการ (2.25) และ (2.27) คือสมการการเคลื่อนที่ของแบบจำลองในรูปที่2.17 ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} M/2 & 0 \\ 0 & m_1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{z}_1 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} c_1 & -c_1 \\ -c_1 & c_1+c_f \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{z}_1 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1+k_f \end{bmatrix}\begin{bmatrix} z \\ z_1 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ c_f\dot{z}_r+k_fz_r \end{bmatrix} \qquad (2.28)$$

จากสมการการเคลื่อนที่ (2.28) มีคุณลักษณะเป็นสมการแบบเชิงเส้น โดยเมทริกซ์ที่อยู่ด้านขวาคือเทอมที่ทำหน้าที่กระตุ้นทำให้เกิดการสั่นสะเทือน เหมือนกรณีการสั่นสะเทือนที่กระตุ้นจากฐาน ซึ่งในที่นี้จะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของความขรุขระของราง z_r ดังรูปที่ 2.17 ความขรุขระนี้โดยปกติสามารถหาได้จากการวัดตามมาตรฐาน ISO 3095 [13] การคำนวณจะกำหนดให้ฟังก์ชันของความขรุขระเป็นแบบฮาร์โมนิคส์และมีค่าดังสมการที่ (2.29)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$z_r = z_0\left(1 - cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right)\right) \quad (2.29)$$

เมื่อ z_0 คือ แอมพลิจูดของลูกคลื่นของราง ให้มีค่า 1 mm

L คือ ความยาวคลื่นของลูกคลื่นราง ให้มีค่า 1.5 mm

x คือ พิกัดตามแนวรางโดย x=vt

v คือ อัตราเร็วของรถไฟ (m/s)

t คือ เวลา (s)

2.4 ดัชนีการโดยสารรถไฟของสเปอร์ลิง (Sperling's Ride Index)

การประเมินคุณภาพของการเดินรถ (Ride Quality) จะสามารถหาค่าดัชนีการโดยสาร (W_z) ด้วยวิธีของสเปอร์ลิง (Sperling's Method) ได้จากสมการนี้

$$(W_z)=0.896\cdot\sqrt[10]{\frac{a^3}{f}} \quad (2.30)$$

เมื่อ a = แอมลิจูดความเร่งของการเคลื่อนที่ของตู้รถไฟ (cm/s^2)

f = ค่าความถี่จากการกระตุ้น (Hz)

ในขณะเดียว สำหรับการประเมินความนุ่มนวลหรือความสบายในการโดยสาร (Ride Comfort) จะสามารถหาได้จาก

$$W_z=0.896\cdot\sqrt[10]{\frac{a^3}{f}F(f)} \quad (2.31)$$

เมื่อ F(f) = ค่าประกอบถ่วงน้ำหนัก (Weighting Factor)

ค่า F(f) ถูกนำมาใช้ เพื่อแก้ไขค่าความเร่งที่ขึ้นอยู่กับความถี่กระตุ้น เพื่อเป็นการคำนึงถึงความไวของร่างกายมนุษย์ต่อการรับรู้ถึงความสั่นสะเทือนได้ โดยดูเทียบได้จากตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนักของความเร่งที่ช่วงความถี่กระตุ้นต่าง ๆ

Direction	Computation relation	Applicability domain
Vertical	F(f)=0.325f	0.5<f<5.9 Hz
	F(f)=400/f	5.9<f<20 Hz
	F(f)=1	f>20 Hz
Horizontal	F(f)=0.8f	0.5<f<5.9 Hz
	F(f)=650/f	5.9<f<26 Hz
	F(f)=1	f>26 Hz

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

$$W_z=0.896\cdot\sqrt[10]{B(f)^3a^3} \tag{2.32}$$

สำหรับการประเมินคุณภาพในการเดินรถ

$$B(f)=1.14\sqrt{\frac{\left[\left(1-0.056f^2\right)^2+(0.645f)^2\right]\cdot 3.55f^2}{\left[\left(1-0.252f^2\right)^2+\left(1.547f-0.00444f^3\right)^2\right]\cdot(1+3.55f^2)}} \tag{2.33}$$

สำหรับการประเมินความสะดวกสบายในการโดยสารจากการสั่นในแนวตั้งและแนวนอน เป็นไปตามสมการ (2.34) และ (2.35) ตามลำดับ

$$B_v(f)=0.588\sqrt{\frac{1.911f^2+\left(0.25f^2\right)^2}{\left(1-0.277f^2\right)^2+\left(1.563f-0.0368f^3\right)^2}} \tag{2.34}$$

$$B_h(f)=0.737\sqrt{\frac{1.911f^2+\left(0.25f^2\right)^2}{\left(1-0.277f^2\right)^2+\left(1.563f-0.0368f^3\right)^2}} \tag{2.35}$$

หรือเขียนให้อยู่ในสมการเดียวกันว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B_h(f)=1.253B_v(f) \quad (2.36)$$

ความสำคัญของดัชนีการโดยสาร (W_z) สำหรับการประเมินคุณภาพการเดินรถได้ระบุไว้ในตารางที่ 2.4 และสำหรับตารางที่ 2.5 จะอธิบายถึงเกณฑ์ของความนุ่มนวลหรือความสบายในการโดยสารสำหรับทิศทางในแนวตั้งและแนวนอน

ตารางที่ 2.4 ตารางประเมินการโดยสาร - คุณภาพการเดินรถ

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ปฏิกิริยาต่อความสะดวกสบายต่อสภาพแวดล้อมที่มีการสั่นสะเทือน

อ้างอิงจากเอกสารมาตรฐาน ISO 2631-1 “Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements” [14] ได้กล่าวไว้ว่า ค่าขนาดการสั่นสะเทือนที่ยอมรับได้เพื่อความสะดวกสบาย ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการที่แตกต่างกันไปในแต่ละรูปแบบการใช้งาน ดังนั้นจึงไม่มีการกำหนดขีดจำกัดในส่วนนี้ ค่าต่อไปนี้เป็นตัวบ่งชี้โดยประมาณของปฏิกิริยาที่น่าจะเป็นไปได้ต่อขนาดการสั่นสะเทือนต่าง ๆ โดยรวมในระบบขนส่งสาธารณะ อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาที่ระดับต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับความคาดหวังของผู้โดยสารโดยคำนึงถึงระยะเวลาการเดินทางและประเภทของกิจกรรมที่ผู้โดยสารคาดว่าจะทำให้สำเร็จ เช่น การอ่าน การรับประทานอาหาร การเขียน ฯลฯ และปัจจัยอื่น ๆ เช่น เสียง อุณหภูมิ เป็นต้น ขนาดที่ระดับต่าง ๆ คือขนาดความเร่งในช่วง ๆ หนึ่ง เป็นไปตามตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ตารางความเร่งการสั่นสะเทือนที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้

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

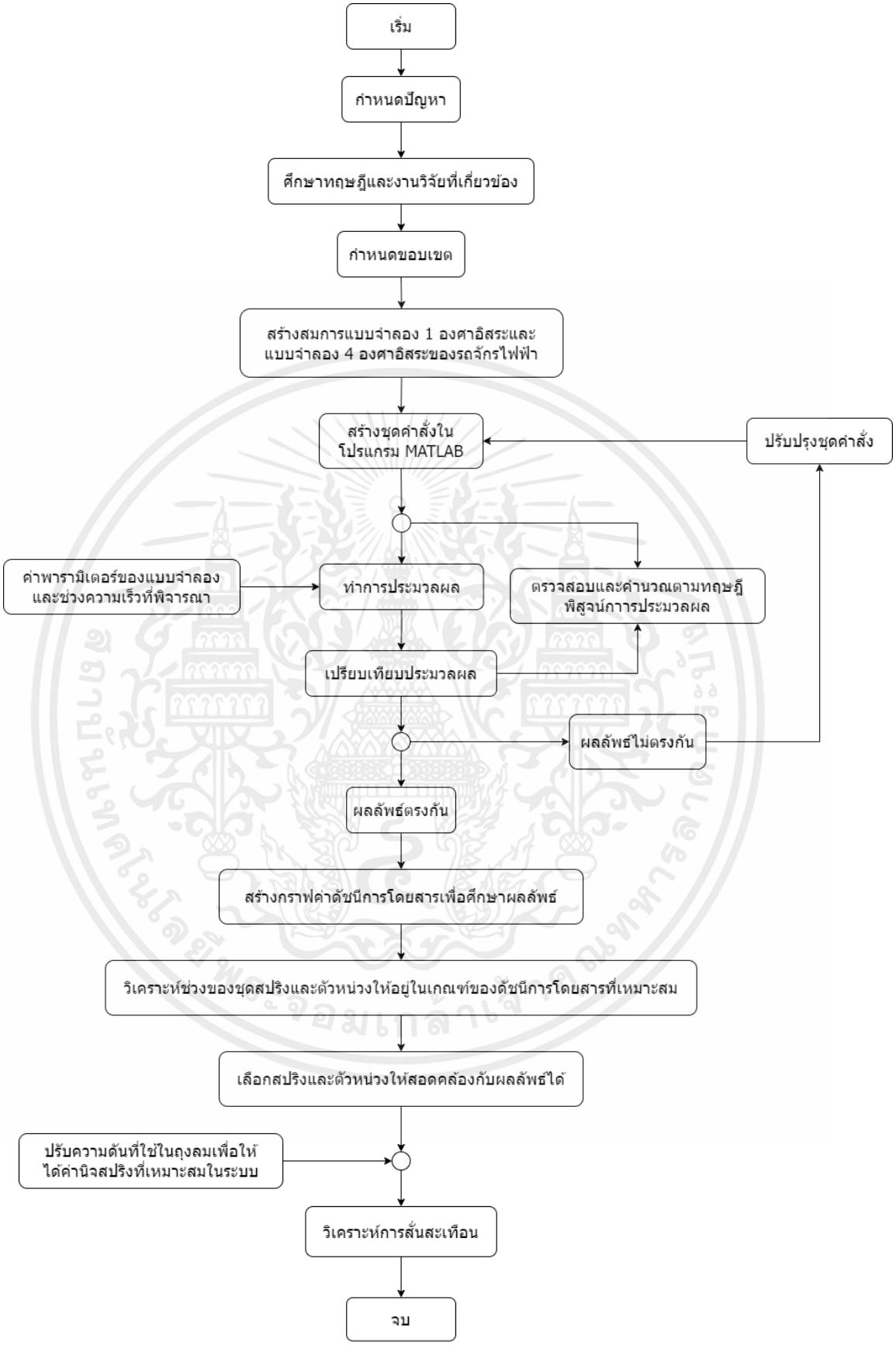
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินงาน

3.1 บทนำ

ในบทที่ 3 จะกล่าวที่ถึงขั้นตอนการทำงานและรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนหลายองศาอิสระ คำนวณหาค่าแอมพลิจูดของความเร่งและความถี่การสั่นสะเทือนของหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก หลังการกำหนดขอบการศึกษา เริ่มจากการนำสมการการสั่นสะเทือนหลายองศาอิสระ มาวิเคราะห์การแก้สมการหาผลเฉลยของสมากรการเคลื่อนที่ของของหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยใช้ชุดคำสั่งที่สร้างไว้ในโปรแกรม MATLAB ในการประมวลผลหาค่าแอมพลิจูดของความเร่งและความถี่ที่เกิดขึ้น และทำการคำนวณดัชนีการโดยสาร (Ride Index) ด้วยโปรแกรม MATLAB นำผลที่ได้มเปรียบเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎี เลือกสปริงและตัวหน่วงให้สอดคล้องกับผลลัพธ์ ทำการปรับถุงลมให้สอดคล้องกับผลลัพธ์ โดยรูปที่ 3.1 แสดงถึงแผนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงวิธีดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 แบบจำลองหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก

ข้อมูลและพารามิเตอร์ของชิ้นส่วนต่าง ของหัวรถจักรที่ทำการศึกษามีโครงแคร่ (Bogie) ตัวตู้รถ (Carbody) ชุดล้อและเพลา (Wheelsets) มี 4 องศาอิสระ ได้แก่

1.การเคลื่อนที่ในทิศแนวตั้งของตัวตู้รถ (Vertical motion of carbody) คือ z_c

2.การเคลื่อนที่แบบกระดกของตัวตู้รถ (Pitch motion of carbody) คือ θ_c

3.การเคลื่อนที่ในทิศแนวตั้งของโครงแคร่หน้า คือ z_{b1}

4.การเคลื่อนที่ในทิศแนวตั้งของโครงแคร่หลัง คือ z_{b2}

3.2.1 ส่วนประกอบของแบบจำลองหัวรถจักร

3.2.1.1 ตัวตู้รถ (Carbody)

ตัวตู้รถเป็นโครงสร้างส่วนบน มีหน้าที่ติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ระบบควบคุม ระบบปั้นลม ที่นั่งสำหรับคนขับ

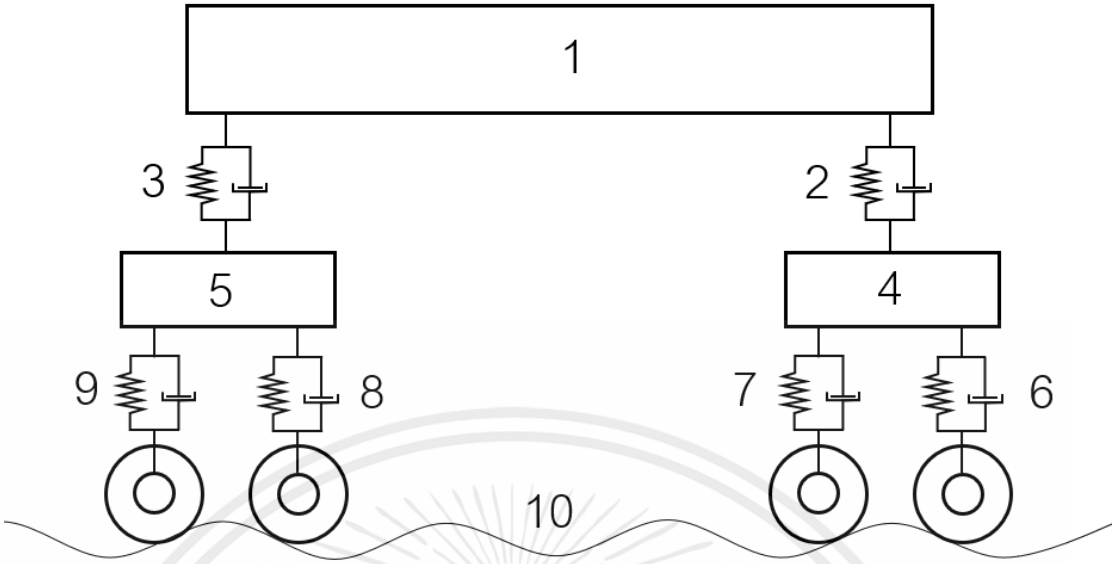
3.2.1.2 โครงแคร่ (Bogie)

โครงแคร่เป็นโครงสร้างส่วนกลาง อยู่ระหว่างตัวตู้รถกับชุดล้อ มีหน้าที่รับน้ำหนักจากตัวตู้รถและเป็นตัวรับแรงกระแทกรับการสั่นสะเทือนจากผิวราง

3.2.1.3 ชุดล้อและเพลา (Wheelsets)

ชุดล้อและเพลาเป็นส่วนล่าง มีหน้าที่รับน้ำหนักจากตัวรถและโครงแคร่และหมุนเคลื่อนที่ไปบนราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ภาพแสดงตำแหน่งและชิ้นส่วนของหัวรถจักร

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงหมายเลขชิ้นส่วนของหัวรถจักร

หมายเลขชิ้นส่วน	ชื่อเรียก
1	ตู้รถ
2	ระบบกันสะเทือนขั้นที่สอง ที่โครงแคร่หน้า
3	ระบบกันสะเทือนขั้นที่สอง ที่โครงแคร่หลัง
4	โครงแคร่หน้า
5	โครงแคร่หลัง
6	ระบบกันสั่นสะเทือนขั้นที่หนึ่ง ที่ชุดล้อและเพลานำ โครงแคร่หน้า
7	ระบบกันสั่นสะเทือนขั้นที่หนึ่ง ที่ชุดล้อและเพลาตาม โครงแคร่หน้า
8	ระบบกันสั่นสะเทือนขั้นที่หนึ่ง ที่ชุดล้อและเพลานำ โครงแคร่หลัง
9	ระบบกันสั่นสะเทือนขั้นที่หนึ่ง ที่ชุดล้อและเพลาตาม โครงแคร่หลัง
10	ราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.4 ระบบกันสะเทือน

ระบบกันสะเทือน (Suspension System) มีหน้าที่รับการสั่นสะเทือนและเป็นตัวเชื่อมต่อโครงสร้างเข้าด้วย เพื่อลดการสั่นสะเทือน และในระบบกันสะเทือนประกอบไปด้วยสปริงและตัวหน่วง ตามตำแหน่งที่แสดงในรูป 3.2 ตำแหน่งอย่างละ 2 ชุด

3.3 วิเคราะห์หาผลเฉลยของสมการการสั่นสะเทือนแบบ 4 องศาอิสระ

ในการวิเคราะห์หาผลเฉลยของสมการการสั่นสันสะเทือน 4 องศาอิสระประกอบไปด้วย การเคลื่อนที่ในทิศแนวตั้งของตัวตู้รถ (Z_c), การเคลื่อนที่แบบกระดกของตัวตู้รถ (θ_c), การเคลื่อนที่ในทิศแนวตั้งของโครงแคร่หน้า (Z_{b1}), การเคลื่อนที่ในทิศแนวตั้งของโครงแคร่หลัง (Z_{b2}) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ของพลศาสตร์การสั่นสะเทือน นำค่าแอมพลิจูดของความเร่งความถี่ในการสั่นสะเทือน เพื่อนำไปคำนวณค่าดัชนีการโดยสาร

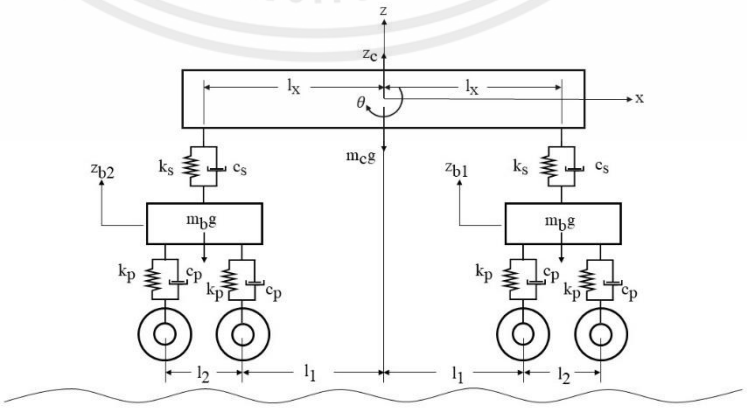
3.3.1 สมมติฐานในการดำเนินงาน

สมมติฐานการวิเคราะห์ระบบในการดำเนินงาน ได้ดังนี้

1. รถไฟเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ และความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 15 km/hr
2. ลักษณะผิวทางเป็นฟังก์ชันไซนูซอยด์
3. ค่านิจสปริง ค่านิจสปริงของถุงลม และตัวหน่วงเป็นระบบสมการเชิงเส้น
4. ตัวตู้รถ โครงแคร่ ชุดล้อและเพลาและรางเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Bodies)
5. ให้ล้อและรางสัมผัสกันเสมอ
6. ไม่คำนึงถึงการเคลื่อนที่ตามแนวขวางของมวลตู้รถและมวลแคร่

3.3.2 พารามิเตอร์ภายในระบบ

กำหนดพารามิเตอร์และมิติต่างๆ ในการคำนวณของระบบ ดังรูปที่ 3.3

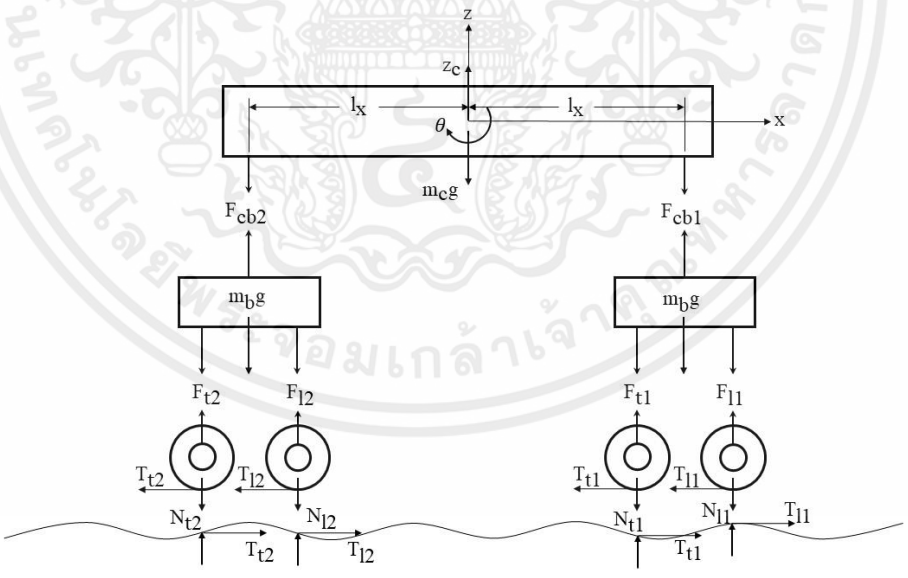


รูปที่ 3.3 แผนภาพของพารามิเตอร์และมิติต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของระบบ

ตัวแปร (หน่วย)	คำอธิบาย
m_c (kg)	มวลของตู้รถ
m_b (kg)	มวลของโครงแคร่
k_s (N/m)	ค่านิจสปริงของระบบกันสะเทือนขั้นที่สอง
k_p (N/m)	ค่านิจสปริงของระบบกันสะเทือนขั้นที่หนึ่ง
c_s (N·s/m)	ค่าความหน่วงของระบบกันสะเทือนขั้นที่สอง
c_p (N·s/m)	ค่าความหน่วงของระบบกันสะเทือนขั้นที่หนึ่ง
l_x (m)	ระยะจากจุดกึ่งกลางตู้ถึงกึ่งกลางโครงแคร่
l_1(m)	ระยะจากจุดกึ่งกลางตู้ถึงชุดล้อและเพลา
l_2(m)	ระยะห่างชุดล้อและเพลานำกับชุดล้อและเพลาตาม
J (kg·m^2)	โมเมนต์ความเฉื่อยของตู้รถ



รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงวัตถุอิสระ (Free body diagram) ของหัวรถจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรแรงของระบบ

ตัวแปร	คำอธิบาย
F_{cb1}	แรงที่ตู้กระทำต่อโครงแคร่หน้า
F_{cb2}	แรงที่ตู้กระทำต่อโครงแคร่หลัง
F_{l1}	แรงที่ชุดล้อและเพลานำกระทำต่อโครงแคร่หน้า
F_{t1}	แรงที่ชุดล้อและเพลาตามกระทำต่อโครงแคร่หน้า
F_{l2}	แรงที่ชุดล้อและเพลานำกระทำต่อโครงแคร่หลัง
F_{t2}	แรงที่ชุดล้อและเพลาตามกระทำต่อโครงแคร่หลัง
N	แรงที่รางกระทำต่อล้อ
T	แรงคืบตามแนวยาวที่กระทำต่อล้อ

3.3.3 ระบบสมการการเคลื่อนที่สำหรับแบบจำลองรถไฟ 4 องศาอิสระ

แบบจำลองรถไฟ 4 องศาอิสระ ประกอบไปด้วย $z_c(t)$, $z_{b1}(t)$, $z_{b2}(t)$ และ $\theta(t)$ สามารถวิเคราะห์หาสมการการเคลื่อนที่ 4 สมการดังนี้

สมการการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของโครงแคร่หน้า

$$m_b\ddot{z}_{b1}= -2k_p(z_{b1}-z_{l1})-2c_p(\dot{z}_{b1}-\dot{z}_{l1})-2k_p(z_{b1}-z_{t1})-2c_p(\dot{z}_{b1}-\dot{z}_{l1})$$
$$-2k_s(z_{b1}-z_c+l_x\theta)-2c_s(\dot{z}_{b1}-\dot{z}_c+l_x\dot{\theta}) \quad (3.1)$$

สมการการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของโครงแคร่หลัง

$$m_b\ddot{z}_{b2}= -2k_p(z_{b2}-z_{l2})-2c_p(\dot{z}_{b2}-\dot{z}_{l2})-2k_p(z_{b2}-z_{t2})-2c_p(\dot{z}_{b2}-\dot{z}_{l2})$$
$$-2k_s(z_{b2}-z_c-l_x\theta)-2c_s(\dot{z}_{b2}-\dot{z}_c-l_x\dot{\theta}) \quad (3.2)$$

สมการการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของตัวตู้รถ

$$m_c\ddot{z}_c= -2k_s(z_c-l_x\theta-z_{b1})-2c_s(\dot{z}_c-l_x\dot{\theta}-\dot{z}_{b1})-2k_s(z_c-l_x\theta-z_{b2})-2c_s(\dot{z}_c-l_x\dot{\theta}-\dot{z}_{b2}) \quad (3.3)$$

สมการการเคลื่อนที่แบบกระดกของตัวตู้รถ

$$J\ddot{\theta} = -2k_sl_x(z_c-l_x\theta-z_{b1})-2c_sl_x(\dot{z}_c-l_x\dot{\theta}-\dot{z}_{b1})-2k_sl_x(z_c-l_x\theta-z_{b2})-2c_sl_x(\dot{z}_c-l_x\dot{\theta}-\dot{z}_{b2}) \quad (3.4)$$

สมการการกระตุ้นจากผิวราง

ที่โครงแคร่หน้า

ชุดล้อและเพลานำ $z_{l1}= z_0\left\{1-\cos\left[\left(\frac{2\pi v}{L}\right)\cdot\left(t+\frac{l_1+l_2}{v}\right)\right]\right\}$ (3.5)

ชุดล้อและเพลาตาม $z_{t1}= z_0\left\{1-\cos\left[\left(\frac{2\pi v}{L}\right)\cdot\left(t+\frac{l_1}{v}\right)\right]\right\}$ (3.6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่โครงแคร่หลัง

ชุดล้อและเพลานำ $z_{l2}= z_0 \left\{1\text{-}\cos\left[\left(\frac{2\pi v}{L}\right)\cdot\left(t\text{-}\frac{l_1}{v}\right)\right]\right\}$ (3.7)

ชุดล้อและเพลาตาม $z_{t2}= z_0 \left\{1\text{-}\cos\left[\left(\frac{2\pi v}{L}\right)\cdot\left(t\text{-}\frac{l_1+l_2}{v}\right)\right]\right\}$ (3.8)

3.3.4 การสร้างชุดคำสั่งแบบจำลอง 4 องศาอิสระด้วยโปรแกรม MATLAB

การประเมินค่าดัชนีการโดยสาร ต้องสร้างชุดคำสั่ง MATLAB ในการในการวิเคราะห์ผล ทั้งนี้ในแบบจำลองจะต้องมีการกำหนดค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์

3.3.4.1 กำหนดค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้

ค่าต่างๆที่กำหนดเป็นค่าโดยประมาณโดยอ้างอิงจากระเบียบการแข่งขัน IMechE Railway Challenge [15] เพื่อใช้ในการวิเคราะห์มีข้อมูลตามตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าของตัวแปร

ตัวแปร (หน่วย)	ค่าของตัวแปร
m_c (kg)	2000
m_b (kg)	134.9
l_x (m)	1.15
l_1(m)	0.783
l_2(m)	0.728
J ($kg\cdot m^2$)	948

3.3.4.2 การคำนวณหาโมเมนต์ความเฉื่อย

การคำนวณหาโมเมนต์ความเฉื่อยสามารถหาได้จากสมการที่ (3.9)

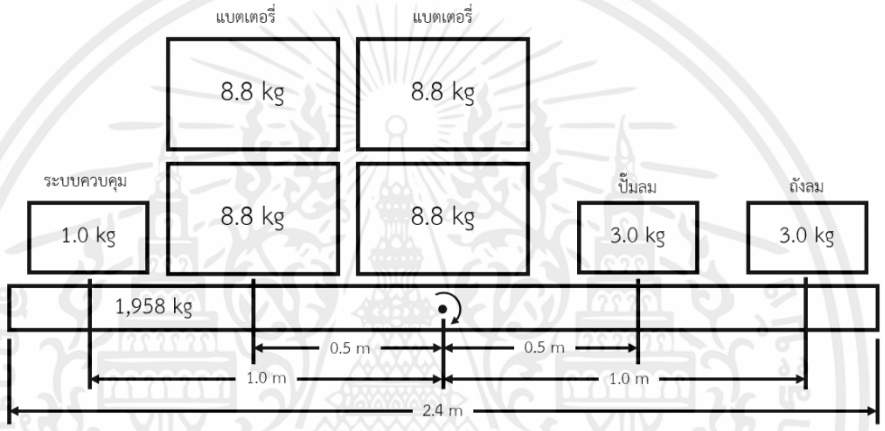
$$J = \sum m_i R_i^2 \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3. 5 น้ำหนักอุปกรณ์

ตัวแปร (หน่วย)	ค่าของตัวแปร	คำอธิบาย
m_f (kg)	1958	น้ำหนักโครงรถ
$m_{battery}$ (kg)	8.8	น้ำหนักแบตเตอรี่
m_{pump}(kg)	3.0	น้ำหนักปั๊มลม
m_{tank}(kg)	3.0	น้ำหนักถังลม
$m_{control}$(kg)	1.0	น้ำหนักระบบควบคุม

น้ำหนักอุปกรณ์ที่ออกแบบสำหรับการแข่งขัน IMche Railway challenge [15]



รูปที่ 3. 5 แผนภาพแสดงตำแหน่งของอุปกรณ์

จากสมการที่ (3.9) จะได้ $$J = \frac{1}{12} m_f L_{2.4}^2 + 2m_{battery} r_{0.5}^2 + m_{pump} r_{0.5}^2 + m_{control} r_1^2 + m_{tank} r_1^2$$

$$J = \frac{1}{12}(1958)(2.4)^2 + 2(8.8)(0.5)^2 + 3(0.5)^2 + 1(1)^2 + 3(1)^2$$

$$J = 948 \text{ kg}\cdot\text{m}^2 \qquad (3.10)$$

3.3.4.3 การหาช่วงสำหรับสปริงและตัวหน่วงที่เหมาะสม

การหาช่วงสปริงและตัวหน่วงที่เหมาะสมสำหรับระบบ โดยใช้ทฤษฎีระบบการสั่นสะเทือนของฐานองศาอิสระเท่ากับ 1 มาวิเคราะห์ และใช้หาค่าดัชนีการโดยสาร

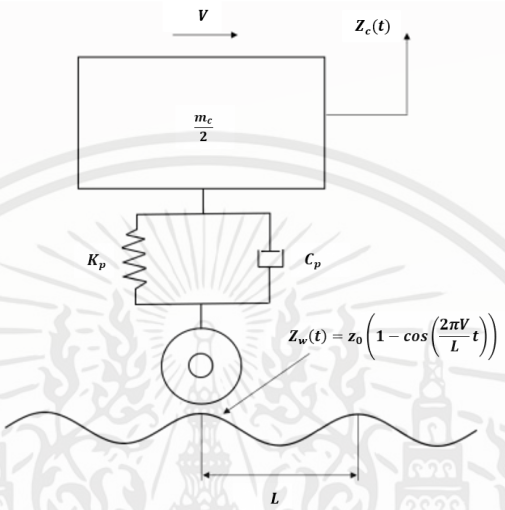
3.3.4.4 การเขียนชุดคำสั่งด้วยโปรแกรม MATLAB สำหรับการแก้หาผลเฉลยของ

สมการสำหรับแบบจำลองรถไฟ 4 องศาอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากระบุค่าที่นำมาใช้เพื่อการวิเคราะห์ในเบื้องต้นแล้ว ทำการเขียนชุดคำสั่งมา 1 ชุด สำหรับแก้ปัญหาระบบสมการจากหัวข้อ 3.3.3 ผลเฉลยที่ได้ จะมีทั้งหมด 4 สมการ

เพื่อการตรวจสอบความถูกต้องของชุดคำสั่งดังกล่าว จะทำการทดสอบด้วยการหาผลเฉลยสำหรับระบบ 1 องศาอิสระด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นแบบจำลองในรูปแบบรถครึ่งคัน ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนภาพของรถไฟแบบครึ่งคัน พร้อมตัวแปรและพิกัดต่าง ๆ

รูปแบบของสมการและเงื่อนไขต่าง ๆ จะเป็นไปตามหัวข้อ 2.4 โดยจะทำการใช้ชุดคำสั่งที่ออกแบบไว้แล้ว มาคิดหาผลเฉลยสำหรับระบบ 1 องศาอิสระด้วยค่าของตัวแปรเช่นเดียวกันกับของระบบจำลองแบบ 4 องศาอิสระ หากการประมวลผลจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ตรงกับการคิดคำนวณหาผลเฉลยด้วยการเขียนกระดาษโดยอ้างอิงจากหัวข้อ 2.4 นั่นหมายความว่าชุดคำสั่งดังกล่าวจะสามารถใช้แก้หาผลเฉลยสำหรับแบบจำลอง 4 องศาอิสระได้นั่นเอง

3.3.5 การประมวลผลหาค่าดัชนีการโดยสาร

หลังจากได้แนวทางการเขียนชุดคำสั่งใน MATLAB ที่ถูกต้องแล้ว ต่อไปจะเป็นการดำเนินการหาค่า ดัชนีการโดยสารเพื่อเป็นการวิเคราะห์ว่า ด้วยลักษณะโครงสร้างของระบบ จะมีค่าของดัชนีอยู่ในเกณฑ์ ไหน และมีค่าที่เหมาะสมหรือไม่ หลังจากหาค่าได้แล้วจะทำการเปรียบเทียบกับตารางที่ 2.5 ซึ่งเป็น ตารางสำหรับการดูค่าความเหมาะสมของดัชนีการโดยสาร-ความนุ่มนวลหรือความสะดวกสบายในการ โดยสาร เพื่อที่เราจะสามารถเปรียบเทียบได้ว่า หากได้ค่าของดัชนีออกมาค่าหนึ่งจะสามารถบ่งบอกอะไร ให้เราเมื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 2.5 ได้บ้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 การแสดงผลการประมวลผล

สำหรับการแสดงผลลัพธ์ของค่าดัชนีการโดยสาร จะทำการประมวลผลภายในโปรแกรม MATLAB ให้เรียบร้อยก่อน จากนั้นจึงเก็บผลลัพธ์ที่ได้ไปใส่ในตารางของ Microsoft Excel เพื่อทำการแสดงผลเป็นกราฟเพื่อการเปรียบเทียบข้อมูลต่อไป สำหรับการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง ผลลัพธ์ดังกล่าว ได้แก่ ค่าแอมพลิจูดการกระจัดการสั่นของตู้รถ ค่าความถี่จากการกระตุ้นของทาง ส่วนในแนวการสั่นสะเทือนอื่น ๆ จะสนใจที่ค่าแอมพลิจูดการกระจัดของการสั่น และค่าแอมพลิจูดความเร่งของการสั่น ซึ่งทั้งหมดจะเปลี่ยนไปตามความเร็วของรถไฟที่กำหนดไว้

3.4 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้

หลังจากหาช่วงที่เหมาะสมสำหรับชุดสปริงและตัวหน่วง โดยเปรียบเทียบค่าความสะดวกสบายในการเดินรถโดยสารจากตารางที่ 2.5 ซึ่งเป็นตารางประเมินการเดินรถ-ความนุ่มนวลหรือ ความสะดวกสบายในการโดยสาร เพื่อพิจารณาค่าที่เหมาะสมของชุดสปริงและตัวหน่วงในแนวตั้งและแนวตามยาว ว่ามีค่าที่เหมาะสมตามเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้เพื่อใช้ออกแบบในการแข่งขันอย่างที่ควรจะเป็นหรือไม่ ถ้าหากอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดจึงจะทำการเลือกชิ้นส่วนของชุดสปริงและตัวหน่วงที่มีอยู่จริงโดยใช้ค่าคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้ และนำผลลัพธ์จากการใช้ค่าคุณสมบัติของชุดสปริงและตัวหน่วงที่ได้เลือก นำไปคำนวณอีกครั้งเพื่อดูถึงความเหมาะสมและสรุปผลลัพธ์ที่ได้ออกมา จากนั้นจึงทำการ ประเมินว่าการสั่นสะเทือนในแนวอื่น ๆ มีผลต่อความสะดวกสบายโดยรวมหรือไม่ โดยจะใช้ตารางที่ 2.6 สำหรับการดูความเหมาะสมของการสั่นสะเทือนในแนวตามยาวของตู้รถ

3.5 การวิเคราะห์หาช่วงของค่านิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วงที่เหมาะสมต่อ ชุดสปริงและตัวหน่วงในแนวตั้ง

การเริ่มต้นวิเคราะห์การสั่นสะเทือนด้วยชุดคำสั่งนั้น จะทำการคำนวณหาช่วงที่เหมาะสมต่อการใช้งานมาสร้างเงื่อนไข (Condition) เพื่อใช้ในการออกแบบของชุดสปริงและตัวหน่วงของหัวรถจักรซึ่งมีการติดตั้งระบบลดทอนการสั่นสะเทือนขั้นที่หนึ่งและขั้นที่สองได้ดังต่อไปนี้

ในขั้นตอนแรกนั้นเริ่มต้นจากการหาค่าของความถี่เชิงมุมของการสั่นกระตุ้น (Excitation Angular Frequency: ω_b) ตามสมการที่ (3.11)

$$\omega_b = \frac{2\pi v}{L} \tag{3.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอ้างอิงจากกฎระเบียบของการแข่งขัน IMechE Railway Challenge ได้ระบุไว้ว่าความเร็วสูงสุดสำหรับรถจักรนั้นจะต้องวิ่งด้วยความเร็วสูงสุดไม่เกิน 15 km/hr โดยที่กำหนดว่า L = 1.5 m จะได้ค่าของความถี่เชิงมุมของการสั่นกระตุ้นได้เท่ากับ 17.453 rad/s

รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ของการส่งผ่านการกระจัด (Displacement Transmissibility) ในรูปของฟังก์ชันของ r (Frequency ratio) จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง $\mathrm{r}=\sqrt{2}$ ของกราฟนั้นในแต่ละเงื่อนไขที่มีค่า Damping ratio ต่างกันจะตัดกันที่ตำแหน่งนี้เสมอ ซึ่งเมื่อค่า $\mathrm{r}>\sqrt{2}$ อัตราส่วนของแอมพลิจูด (Amplitude) ของการสั่นสะเทือนจะลดตัวลงเมื่อค่า Frequency ratio เพิ่มขึ้น หมายความว่าเมื่อชุดล้อและเพลา ออกแบบให้มีแอมพลิจูดระยะการสั่นสะเทือนที่ 0.001 m เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 3095 [13] ให้คงที่ตลอดทั้งการวิ่งโดยระยะการสั่นสะเทือนของตู้รถจะลดต่ำลงและเบาบางจนไม่สัมผัสถึงแรงจากการสั่นสะเทือนได้

$$\mathrm{r}=\frac{\omega_{\mathrm{b}}}{\omega_n}>\sqrt{2} \tag{3.12}$$

ตามเงื่อนไขดังกล่าวจึงนำมาใช้เป็นเงื่อนไขสำคัญในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่ควรจะเกิดขึ้นตามสมการที่ (3.12) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระบบลดทอนการสั่นสะเทือนขั้นที่หนึ่งและขั้นที่สองดังนี้

3.5.1 การวิเคราะห์ระบบลดทอนการสั่นสะเทือนขั้นที่หนึ่ง (Primary Suspension)

สามารถวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติเชิงมุม (Natural Angular Frequency: ω_{n}) ได้ดังนี้

$$\frac{17.453}{\omega_{\mathrm{n}}}>\sqrt{2}$$

$$\omega_n < 12.341 \tag{3.13}$$

เนื่องจาก $\omega_{\mathrm{n}}=\sqrt{\frac{\mathrm{k}}{\mathrm{m}}}$ โดย $\mathrm{m}=2000\ \mathrm{kg}$ แทนลงในสมการที่ (3.13) จะได้

$$\mathrm{k_1} < 304617.4198\ \mathrm{N/m} \tag{3.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการกำหนดค่า Damping ratio โดยพิจารณะให้อยู่ในช่วง $0.1 \leq \zeta \leq 0.3$ [16] เพื่อใช้ในการหาคงที่ความหน่วงในแนวตั้ง

จาก $\zeta = \frac{c}{2m\omega_n}$ โดย $\omega_n = 12.341$ rad/s จะได้

กรณีที่ $\zeta = 0.1$ จะได้ว่า

$$0.1 \leq \frac{c_1}{2(2000)(12.34)}$$

$$k_1 \geq 4936.5366$$

กรณีที่ $\zeta = 0.3$ จะได้ว่า

$$\frac{c_1}{2(2000)(12.34)} \leq 0.3$$

$$c_1 \leq 14809.6098$$

ดังนั้น ค่าคงที่ความหน่วงจะอยู่ในช่วง

$$4936.5366 \leq c_1 \leq 14809.6098 \ \text{N·s/m} \tag{3.15}$$

จากนั้นนำค่าความหน่วงมาพิจารณาหาค่าขอบล่างของค่านิจสปริงจากทั้ง 2 กรณี

กรณีที่ 1 เลือกใช้ค่าคงที่ความหน่วง $c_1 = 4936.5366$ N·s/m เพื่อแทนค่าในสมการ Damping ratio

เมื่อ $\zeta = 0.1$ จะได้ว่า

$$0.1 \leq \frac{4936.5366}{2(2000)(\omega_n)}$$

$$\omega_n \leq 12.341$$

$$k_1 \leq 304617.4198$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\zeta = 0.3$ จะได้ว่า

$$\frac{4936.5366}{2(2000)(\omega_n)} \leq 0.3$$

$$\omega_n \geq 4.1138$$

$$k_1 \geq 33846.3799$$

กรณีที่ 2 เลือกใช้ค่าคงที่ความหน่วง $c_1 = 14809.6098$ N·s/m เพื่อแทนค่าในสมการ Damping ratio

เมื่อ $\zeta = 0.1$ จะได้ว่า

$$0.1 \leq \frac{14809.6098}{2(2000)(\omega_n)}$$

$$\omega_n \leq 37.0240$$

$$k_1 \leq 2741556.778$$

เมื่อ $\zeta = 0.3$ จะได้ว่า

$$\frac{14809.6098}{2(2000)(\omega_n)} \leq 0.3$$

$$\omega_n \geq 4.1138$$

$$k_1 \geq 304617.4198$$

ในกรณีที่ 2 เมื่อ $\zeta = 0.1$ พบว่าค่าความถี่ธรรมชาติเชิงมุมมีค่ามากเกินไปโดยเมื่อคำนึงถึงเงื่อนไขของ Frequency ratio ที่จะอยู่ภายในช่วง $r = \sqrt{2}$ เพื่อให้การสั่นลดลงในช่วงความถี่นี้ จึงสรุปให้ช่วงของค่านิจสปริงนี้จะได้ว่า

$$33846.3799 \leq k_1 \leq 304617.4198 \text{ N/m} \qquad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 การวิเคราะห์ระบบลดทอนการสะเทือนขั้นที่สอง (Secondary Suspension)

ในส่วนของการพัฒนาระบบลดทอดการสะเทือนนั้นจะมีการพิจารณาโดยเปรียบระหว่างระบบที่ไม่มีการลดทอนการสะเทือนขั้นที่สองและระหว่างระบบที่มีการลดทอนการสะเทือนขั้นที่สองโดยจะนำช่วงของค่านิจสปริงเป็นไปตามสมการที่ (3.16) ปรับให้มีค่านิจสปริงอ่อนกว่า 5 เท่า [17] ซึ่งในการกำหนดช่วงจะออกแบบเบื้องต้นให้อ่อนกว่าอยู่ที่ 3 เท่า โดยช่วงของค่านิจปริงจะได้ว่า

$$0 \leq k_2 \leq 101539.1399 \ \text{N/m} \tag{3.17}$$

3.6 การสร้างคำสั่งประมวลผลหาผลเฉลยจากระบบลดทอนการสั่นสะเทือน

การดำเนินการประมวลผ่านการเขียนชุดคำสั่งสำหรับโปรแกรม MATLAB เพื่อการแก้สมการหาผลเฉลยของชุดสมการของระบบ 4 องศาอิสระ จะเริ่มต้นจากการขั้นพื้นฐานโดยการแก้สมการหาผลเฉลยของสมการของระบบ 1 องศาอิสระซึ่งจะไม่มีการติดตั้งระบบลดทอนการสั่นทะเทือนขั้นที่สองส่งผลให้มีค่านิจสปริง k_2 = 0 N/mโดยจะเริ่มจากการคิดคำนวณตามทฤษฎีในสมการที่ (2.13) เป็นการหาสมการช่วงสภาวะคงตัวเพื่อใช้ในการยืนยันว่าชุดคำสั่งนี้ใช้ได้จริง ในการพิจารณกำหนดให้ m = 2000 kg, v = 15 km/hr, Y = 0.001 m, L = 1.5 m และทดสอบกับระบบลดทอนการสั่นสะเทือนขั้นที่หนึ่งกำหนดให้ค่านิจสปริง k_1 = 304617.4198 N/m และค่าความหน่วง c_1=14809.6098 N·s/m มาใช้ในการวิเคราะห์ดังนี้

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

โดยที่

$$\zeta = \frac{c_1}{2\sqrt{k_1 m}} = \frac{14809.6098}{2\sqrt{304617.4198\times 2000}} = 0.3$$

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

$$\omega_b = \frac{2\pi v}{L} = \frac{2\pi\times 15\times \frac{5}{18}}{1.5} = 17.453 \ \text{rad/s}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_1}{m}} = \sqrt{\frac{304617.4198}{2000}} = 12.341 \ \text{rad/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r = \frac{\omega_b}{\omega_n} = 1.414$$

$$X = 0.001 \times \sqrt{\frac{1+(2\times 0.3\times 1.414)^2}{\left(1-1.414^2\right)^2+(2\times 0.3\times 1.414)^2}} = 0.001 \text{ m}$$

และ

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{2\zeta\omega_n\omega_b}{\omega_n^2-\omega_b^2}\right) = -0.7036$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{\omega_n}{2\zeta\omega_b}\right) = 0.8672$$

แทนค่าในสมการที่ (2.13) ได้

$$x_{ss}(t)=0.001\cos(17.453t-0.163) \tag{3.18}$$

นำสมการที่ (3.18) มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จาก MATLAB ตามสมการที่ (3.19) โดยเลือกเฉพาะส่วนที่เป็นสภาวะคงตัวเท่านั้นซึ่งชุดคำสั่งเป็นไปตามภาคผนวก ก.

$$x_{ss}(t)=0.00016279\cos(17.453t)-0.00098666\sin(17.453t) \tag{3.19}$$

นำสมการที่ (3.19) มาจัดรูปใหม่ในรูป

$$x_{ss}(t)=A\cos(\omega_b t-\varphi) \tag{3.20}$$

จะได้

$$A=\sqrt{(0.00016279)^2+(0.00098666)^2} = 0.000999 \approx 0.001$$

$$\varphi = \pi - \tan^{-1}\left(\frac{0.00098666}{0.00016279}\right) = 0.163205 = 0.163$$

แทนค่า A และ ϕ ลงในสมการที่ (3.18)

$$x_{ss}(t)=0.001\cos(17.453t-0.163)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (3.19) ใหม่แล้ว จะพบว่าสมการที่ (3.18) จะมีค่าเท่ากับสมการที่ (3.19) ที่ผ่านการจัดรูปใหม่ จึงสรุปได้ว่าชุดคำสั่งดังกล่าวสามารถใช้ได้จริง จากนั้นนำชุดคำสั่งมาปรับใช้ในระบบ 4 องศาอิสระเพื่อใช้ในการประเมินการโดยสาร-ความนุ่มนวลหรือความสบายในการโดยสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การวิเคราะห์ค่าดัชนีการโดยสาร Wz จากเงื่อนไขของการออกแบบสปริงและตัวหน่วงสำหรับชุดลดทอนการสั่นสะเทือนในแนวตั้งที่เหมาะสม

3.7.1 การวิเคราะห์ค่าดัชนีการโดยสารด้วยค่าขอบของค่านิจสปริงและค่าคงที่ความหน่วง

ชุดคำสั่งที่ใช้ในการแก้สมการหาผลเฉลยด้วยโปรแกรม MATLAB จะมีชุดคำสั่งเป็นไปตามภาคผนวก ข. โดยชุดคำสั่งนี้นำมาประมวลผลเพื่อวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในแนวตั้งในขั้นต้น เพื่อเป็นการตรวจสอบช่วงที่คำนวณออกมาในหัวข้อ 3.5 ว่ามีค่าดัชนีการโดยสารเกิน 3.00 ตามที่ได้ตั้งเป้าไว้หรือไม่ แบ่งออกเป็น 8 กรณีดังนี้

1) C_1=4636.54 Ns/m, K_1=33846.38 N/m, K_2= 0 N/m

2) C_1=4636.54 Ns/m, K_1=33846.38 N/m, K_2= 60923.48 N/m

3) C_1=4636.54 Ns/m, K_1=304617.42 N/m, K_2= 0 N/m

4) C_1=4636.54 Ns/m, K_1=304617.42 N/m, K_2= 60923.48 N/m

5) C_1=14809.61 Ns/m, K_1=33846.38 N/m, K_2= 0 N/m

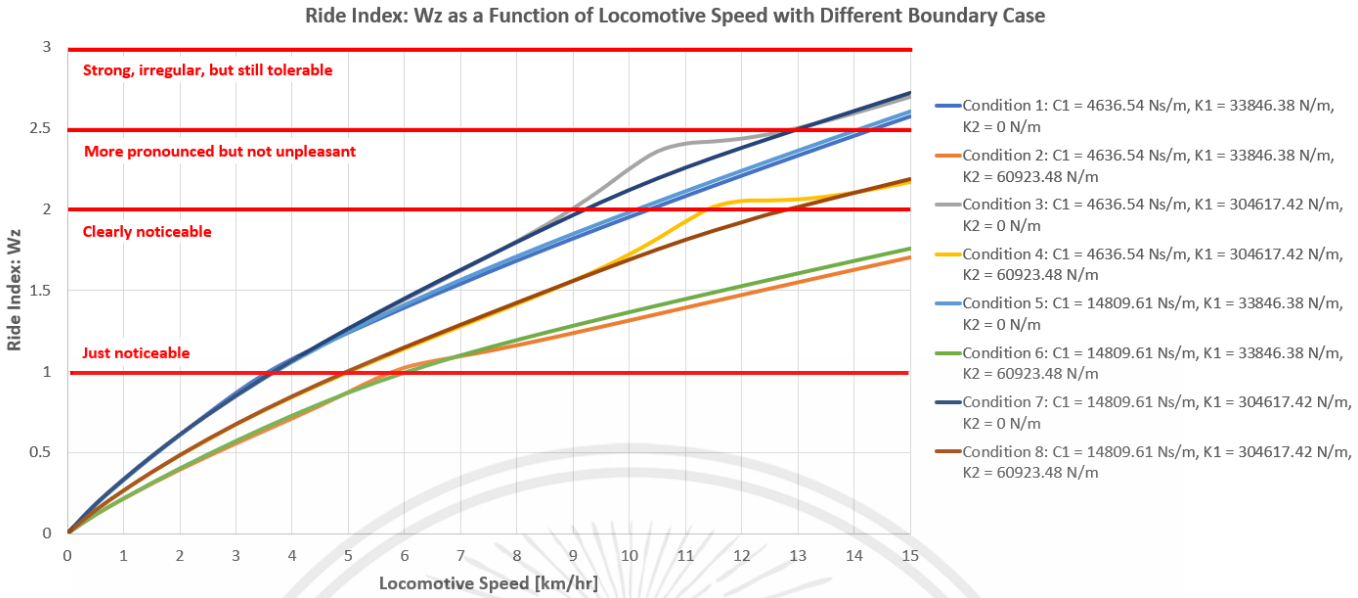
6) C_1=14809.61 Ns/m, K_1=33846.38 N/m, K_2= 60923.48 N/m

7) C_1=14809.61 Ns/m, K_1=304617.42 N/m, K_2= 0 N/m

8) C_1=14809.61 Ns/m, K_1=304617.42 N/m, K_2= 60923.48 N/m

โดยทั้ง 8 กรณีนี้ใช้สำหรับประกอบการเลือกสปริงและตัวหน่วงที่เหมาะสม อีกทั้งยังมีการเปรียบเทียบระหว่างติดตั้งและไม่ติดตั้งถุงลม เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น โดยจะมีการเก็บค่าแอมพลิจูดในแต่ละช่วงความเร็วคือ 0 - 15 km/h เป็นช่วงละ 0.5 km/h และเก็บค่าด้วย Microsoft Excel ตามภาคผนวก ค.จะแสดงผลเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการโดยสารและความเร็วดังรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

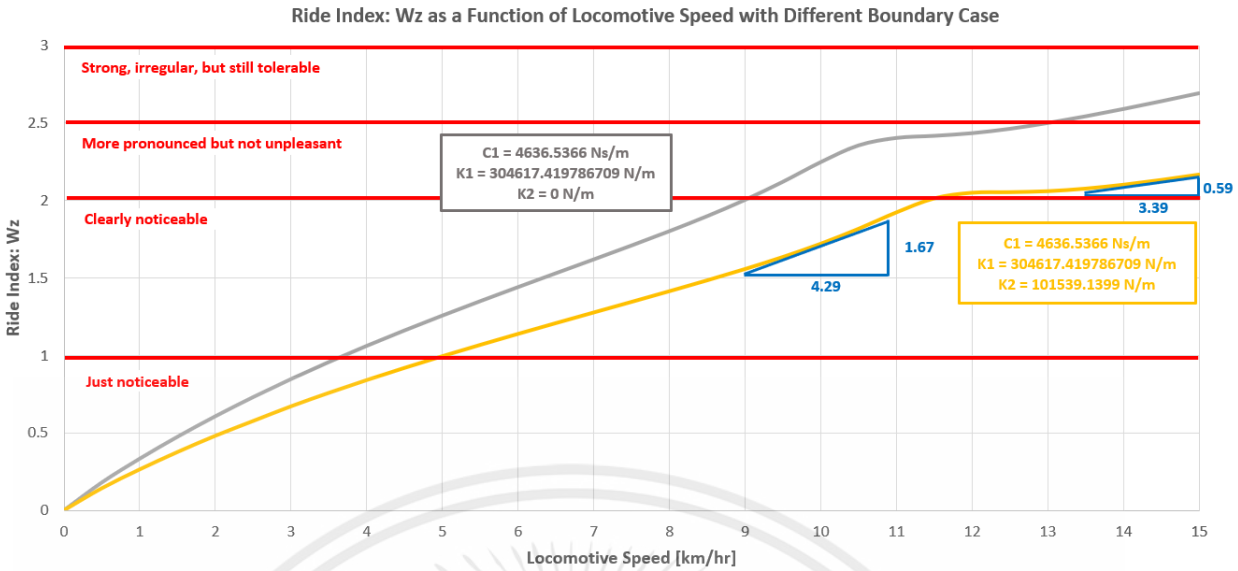


รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการโดยสารกับค่าความเร็วของรถจักร พร้อมช่วงของค่าความสะดวกสบายการโดยสารในแต่ละกรณี

จะเห็นได้ว่าค่าที่ขอบของทั้ง 8 กรณีนั้นล้วนแล้วมีค่าดัชนีไม่เกิน 3 ในความเร็วของรถจักรที่ 15 km/h โดยในกรณีที่ 1,3,5,7 จะไม่มีการติดตั้งถุงลมส่งผลให้ค่าดัชนีอยู่ในช่วงที่ 2.5-3 ซึ่งเป็นช่วงที่รับรู้การสั่นได้อย่างชัดเจนแต่ไม่รบกวนมาก นำมาเปรียบเทียบกับกรณีที่ติดตั้งถุงลมเริ่มจากกรณีที่ 4,8 จะเป็นกรณีที่มีค่านิจสปริงที่ขอบบนจะมีค่าดัชนีที่สูงกว่า กรณีที่ 2,6 ที่มีค่าสปริงที่ขอบล่างและมีค่าดัชนีที่ต่ำกว่าซึ่งส่งผลได้ดีกว่า แต่ในการออกแบบไม่สามารถออกแบบให้สปริงมีความแข็งที่น้อยได้ เนื่องจากระยะยุบของสปริงที่มากเกินไปจะส่งผลให้ชุดล้อและเพลาเกิดการชนกับโครงแคร่ได้ จึงต้องมีการออกแบบให้สปริงมีความแข็งมาก

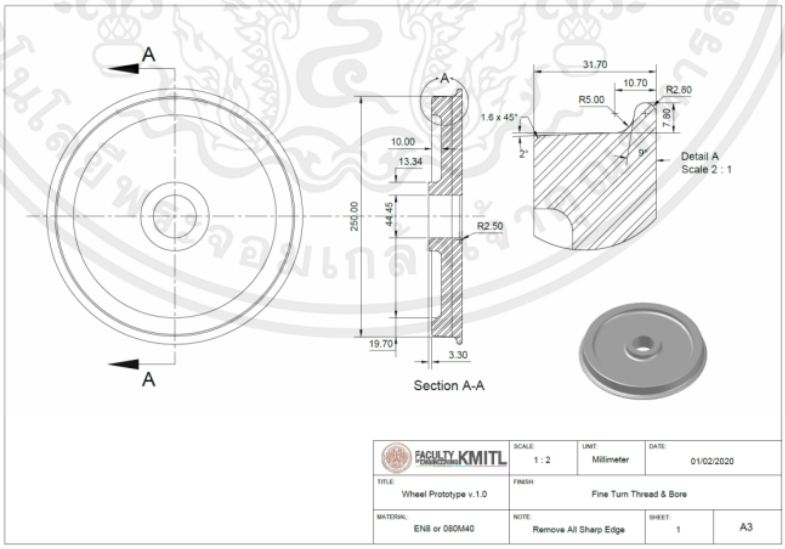
โดนกรณีที่น่าสนใจจะอยู่ที่กรณีที่ 3,4 ที่มีแนวโน้มที่ค่าดัชนีที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดจากแตะละกรณี โดยการที่ช่วงความเร็ว 9-13 km/h แสดงตามรูปที่ 3.7 จะมีการเปลี่ยนความชันของกราฟจาก 0.389 เหลือ 0.174 ที่แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ จึงเลือกออกแบบตามกรณีที่ 4 เพราะทางทีมมีการติดตั้งถุงลมในระบบลดทอนการสั่นสะเทือนขั้นที่สอง ซึ่งในกรณีที่ 3 ไม่มีการติดตั้งถุงลมจึงถูกตัดออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการโดยสารกับค่าความเร็วของรถจักร พร้อมช่วงของค่าความสะดวกสบายการโดยสารเฉพาะกรณีที่ 3 และ 4

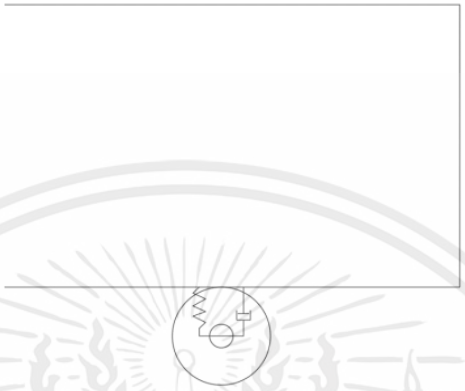
หลังจากได้ช่วงที่เหมาะสมต่อการออกแบบแล้ว ต่อมาทำการเลือกใช้ชุดสปริงและตัวหน่วงที่มีความเหมาะสมกับที่ทางทีมต้องการ ซึ่งในการเลือกนั้นจำเป็นต้องวิเคราะห์พิกัดตามโครงสร้างของตัวรถเสียก่อนว่าชุดสปริงและตัวหน่วงที่จะนำมาใช้มีข้อมูลจำเพาะต่างๆ โดยเฉพาะความยาวของมันว่าเป็นอย่างไร สิ่งที่ต้องสังเกตเป็นอย่างแรกคือขนาดของล้อที่ออกแบบไว้แสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แผนภาพวาดของล้อรถไฟสำหรับการแข่งขัน Electric Locomotive Design Contest 2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งที่ต้องสังเกตคือขนาดของล้อที่นำมาใช้งาน ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางรวม 250 mm หรือรัศมี 125 mm และที่ล้อได้ออกแบบไว้แล้วว่าให้มีความยาวในส่วนของบังใบล้อ 7.8 mm เมื่อทำการติดตั้งชุดสปริงและตัวหน่วงจะทำการติดตั้งที่บริเวณจุดศูนย์กลางของเพลาล้อและจบที่ติดอยู่บริเวณใต้ท้องรถ แสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ภาพจำลองการติดตั้งชุดสปริงและตัวหน่วงภายในระบบ

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าถ้าต้องการจะติดตั้งสปริงให้มีระยะที่สั้นที่สุดที่เป็นไปได้สำหรับการติดตั้ง นั้นจะพิจารณาว่าล้อจะติดอยู่กับตัวตู้รถพอดี ซึ่งจะติดกันในส่วนของบังใบล้อ หมายความว่าความยาวของสปริงที่ติดตั้งจะต้องมีค่ามากกว่า 132.8 mm ขึ้นไปจึงจะถือว่าเหมาะสม ในส่วนของการเลือกขนาดของตัวหน่วงนั้น ไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ เทียบเท่ากับการเลือกสปริง เพียงแต่ไม่ควรเลือกให้มีขนาดที่ใหญ่เกินพอดี ซึ่งสามารถอ้างอิงขนาดของตัวหน่วงได้จากขนาดของสปริงที่เลือกมาแล้วได้

3.7.2 การเลือกสปริงสำหรับระบบลดทอนกันสะเทือนขั้นที่หนึ่ง

ในวิเคราะห์ระบบลดทอนการสะเทือนขั้นที่หนึ่ง (Primary Suspension)

กำหนดให้ Unsprung mass (m') คือมวลของชุดล้อ ทำตัวเป็น Base Excitation Force มีสมการ Zr เป็นสมการการเคลื่อนที่

Sprung Mass (M) คือ มวลของ Bogie Frame + Half Car Body เท่ากับ 1000 kg

พิจารณา เงื่อนไขของการสั่นแบบ Base Excitation โดยคำนึงถึงสัดส่วนของความถี่ธรรมชาติเชิงมุมของ sprung (ω_n) และ unsprung mass (ω_b) ว่า ถ้าอยากให้ระบบมีการสั่นที่ Sprung mass น้อย ๆ จะใช้สปริง 4 ตัว แต่ละตัวจะรับน้ำหนัก 250 kg ต้องการความสูงของสปริงเมื่อยุบแล้วคือ 150 mm ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ การยุบที่ 32 % ดังนั้นสปริงจะมีความยาว 220 mm จากแคตตาล็อกของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

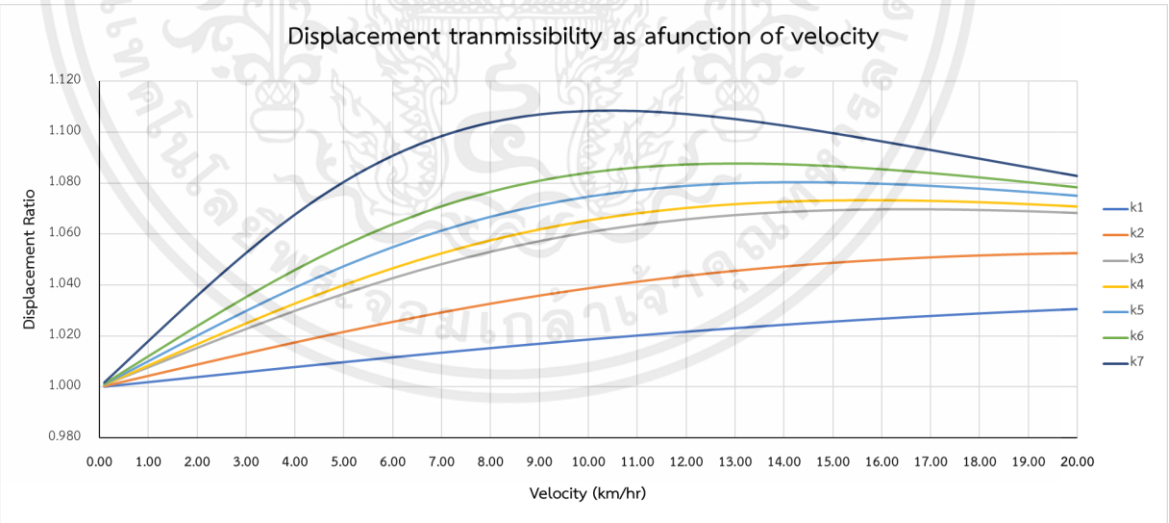
บริษัทมิซูมิ จะได้สปริงที่มีค่าคงที่สปริง 3.75 kgf/mm หรือ เท่ากับ 36.79 kN/m เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ 50 mm ความยาว 225 mm

การเลือกสปริงของการลดทอนการสะเทือนขั้นที่หนึ่ง (Primary Suspension)

โดยน้ำหนักรถครึ่งคันหนัก 1000 กิโลกรัม ซึ่งใช้สปริง 4 ตัว ทำให้สปริงแต่ละตัวรับน้ำหนัก 250 กิโลกรัม

ตารางที่ 3.6 ตารางแสดงค่าคงที่สปริงที่มีเปอร์เซ็นต์ระยะยุบต่างๆ

Condition	ระยะยุบของสปริง (%)	ความยาวของสปริงก่อนใส่น้ำหนัก (mm)	ค่า k (kN/m)	w (rad/s)	$r = \frac{\omega_b}{\omega_n}$ (ที่ความเร็ว 15 km/hr)
1	10	166.67	147.15	24.26	0.72
2	20	187.50	65.40	16.17	1.08
3	30	214.29	38.15	12.35	1.41
4	32	220.59	36.79	11.79	1.48
5	36	234.38	29.07	10.78	1.62
6	40	250.00	24.53	9.90	1.76
7	50	300.00	16.35	8.09	2.16



รูปที่ 3.11 การแสดงผลของอัตราส่วนแอมพลิจูดการกระจัดของการสั่นกับความเร็วของรถ

จากรูปที่ 3.11 สปริงที่มีค่าคงที่น้อยจะมีอัตราส่วนของแอมพลิจูดการสั่นน้อยกว่าสปริงที่มีค่าคงที่เยอะกว่า แต่ค่าคงที่สปริงที่น้อยจะมีระยะยุบมากด้วย ดังนั้นเพื่อไม่ให้ระยะยุบมากเกินไปและสปริงไม่แข็งเกินไป จึงสปริงที่มีการยุบที่ 32 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3 การเลือกตัวหน่วงสำหรับระบบลดทอนกันสะเทือนขั้นที่หนึ่ง

ตัวหน่วง หรือโช๊คอัพ (Shock Absorber) มีหน้าที่เป็นตัวควบคุมการยุบตัว และการยืดตัวของสปริง ช่วยลดแรงกระแทกที่เกิดจากพื้นผิวของรางที่ไม่เรียบ โดยโช๊คอัพจะเป็นตัวหน่วงการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของหัวรถจักร เพื่อให้ได้รับการสั่นสะเทือนน้อยที่สุด โดยทั่วไปนั้นจะไม่มีหน้าที่รับน้ำหนัก ซึ่งในการออกแบบจะออกแบบให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง (Damping Coefficient : c) อยู่ที่ 5000 N·s/m โดยในการคำนวณการเลือกนั้นจะเป็นไปตามภาคผนวก ง. โดยเลือกโช๊คอัพจากบริษัท MEROCA MTB ตามในรูปที่ 3.12 และมีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.7

รูปที่ 3.12 โช๊คอัพจักรยาน

ที่มา : https://shorturl.asia/B8ceP

ตารางที่ 3.7 ตารางแสดงข้อมูลจำเพาะของตัวหน่วงที่เลือกมา

MT-100-150	
ส่วนประกอบ	ค่า
ความยาว (mm)	150
ระยะการเคลื่อนที่ (mm)	29
น้ำหนัก (g)	330
แรง (N)	4,450
ความเร็วกระบอกสูบ (m/s)	0.5
ค่าคงที่ความหน่วง (N·s/m)	5,000
ชนิดเกลียวปลาย	M6×8.0
เส้นผ่านศูนย์กลางกระบอก	44
เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกสูบ	12
ราคา (บาท/ชิ้น)	1,160.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.4 การเลือกถุงลมสำหรับระบบลดทอนกันสะเทือนขั้นที่สอง

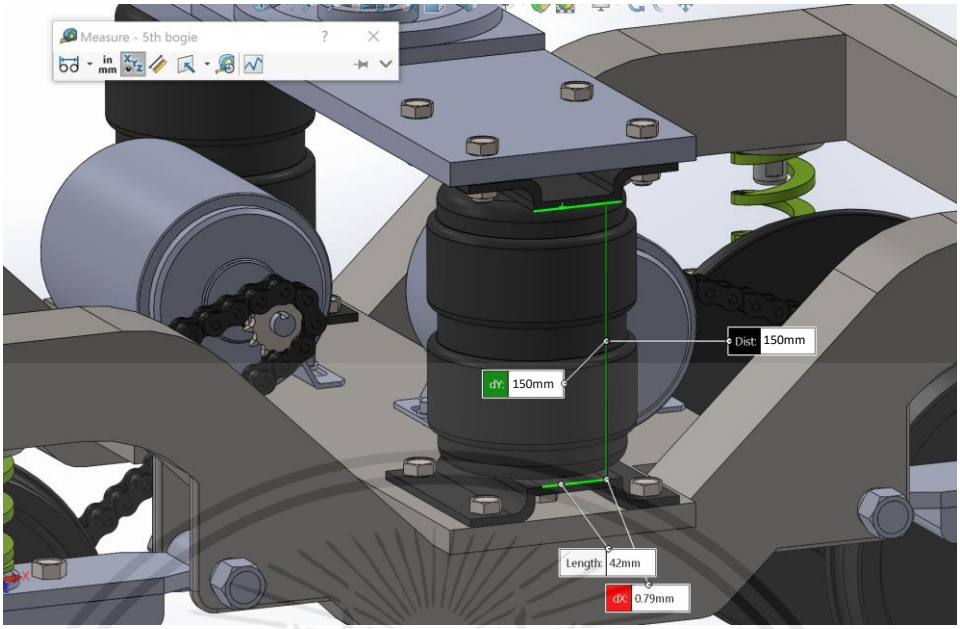
ในวิเคราะห์ระบบลดทอนการสะเทือนขั้นที่สอง (Secondary Suspension) โดยการเลือกใช้ถุงเป็นถุงลมทรงโดนัท โดยถุงลมชนิดนี้สามารถรับน้ำหนักได้ดี มีความทนทานและสามารถล็อคความสูงได้ซึ่งแตกต่างจากถุงลมทรงกระบอกที่มีความยืดหยุ่นมาก เพื่อให้สามารถรองรับน้ำหนักของตู้รถจักรได้อีกยังรักษาความสูงของตัวตู้ไม่ให้ชนกับโบกี้ ซึ่งตัวถุงลมนั้นสามารถปรับค่านิจสปริงได้ตามการออกแบบความสูงและความดันให้ได้ตามต้องการ โดยในการพิจารณาการเลือกถุงลมนั้นจะเลือกจากพื้นที่ที่ทำการติดตั้งบนโบกี้อยู่ที่ 160×130 mm จึงเลือกใช้เป็นถุงลมของบริษัท MTEC Air Suspension แสดงในรูปที่ 3.13

รูปที่ 3.13 ถุงลมสองชั้น ขนาดเล็ก รหัส 2S

ที่มา : https://www.mtecairsuspension.com/17734741/

จากนั้นทำการจำลองการวางถุงลมโบกี้แสดงในรูปที่ 3.14 จะมีความสูงอยู่ที่ 150 mm โดยกำหนดเพื่อให้ได้ค่านิจสปริงที่เหมาะสมให้อ่อนกว่าสปริงในระบบลดทอนกันสะเทือนขั้นที่หนึ่ง จึงออกแบบให้มีความดันที่ 3 bar โดยในการคำนวณหาค่านิจสปริงของถุงลมจะตามภาคผนวก จ. จะได้ค่านิจสปริงเท่ากับ 34 kN/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

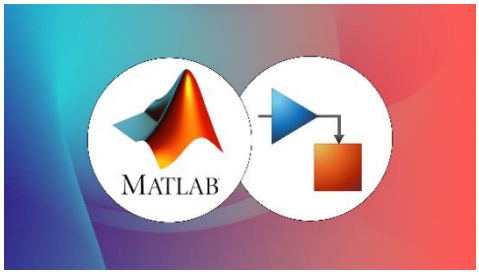


รูปที่ 3.14 การจำลองการวางถุงลมบนโบกี้

3.8 การสร้างแบบจำลองการสั่นสะเทือนของหัวรถจักรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในขั้นตอนการสร้างแบบจำลองการสั่นสะเทือนของหัวรถจักรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ มีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของหัวรถจักรที่เกิดขึ้น ซึ่งต้องศึกษาพฤติกรรมภายใต้สภาวะแบบไดนามิก (Dynamic) ของระบบที่อยู่ใน 4 องศาอิสระ โดยสิ่งสำคัญคือต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายพฤติกรรมของระบบก่อน

Simulink เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพที่สามารถใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเครื่องกลแสดงในรูปที่ 3.15 รวมถึงแบบจำลองที่มีการสั่นสะเทือน โดย Simulink มีบล็อกและไลบารี (Block and library) มากมายที่สามารถใช้สร้างแบบจำลองได้โดยการเชื่อมต่อบล็อกที่เหมาะสมเพื่อแสดงถึงส่วนประกอบของระบบและวิธีการที่พวกมันโต้ตอบกัน แสดงให้เห็นพฤติกรรมเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน



รูปที่ 3.15 เครื่องมือ Simulink ในโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงการผลลัพธ์จากแบบจำลองการสั่นสะเทือนแบบ 4 องศาอิสระ เริ่มจากการพิจารณาดัชนีการโดยสาร-ความนุ่มนวลและความสะดวกสบายในการโดยสาร (Ride Comfort) หรือค่าดัชนีการโดยสาร (W_z) ของหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก รวมไปถึงการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในแต่ละองศาอิสระ ผ่านโปรแกรม MATLAB ในรูปแบบ Simulink และบันทึกค่าด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ในการพิจารณาเพื่อสรุปผลภายในระบบ

4.2 ผลการทดลอง

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน 4 องศาอิสระของแบบจำลองหัวรถจักรขนาดเล็ก

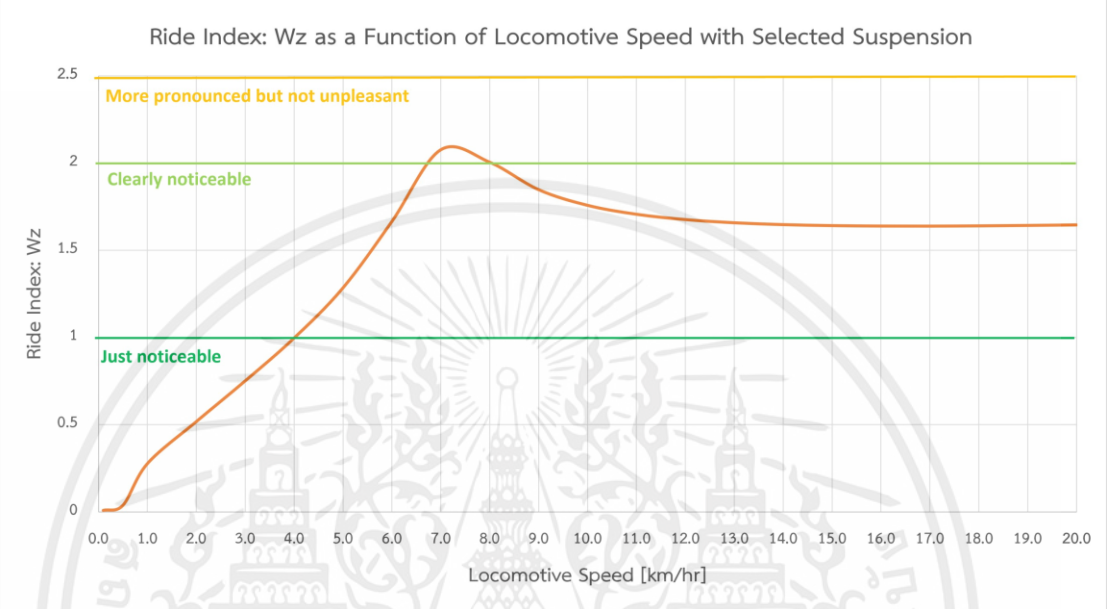
นำชุดคำสั่งจาก MATLAB มาประมวลผลในรูปแบบ Simulink กำหนดค่านิจสปริงและตัวหน่วงที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาผลเฉลยของชุดสมการระบบ 4 องศาอิสระ คือการสั่นสะเทือนของตัวตู้ การกระดกของตัวตู้ การสะสั่นเทือนของชุดโครงแคร่หน้า และการสั่นของชุดโครงแคร่หลังตามสมการที่ (3.1) ถึง (3.4) ทำการพิจารณาการสั่นของระบบ โดยเลือกใช้ความเร็ว 10 และ 15 km/hr

ตารางที่ 4.1 ค่าของตัวแปร

ตัวแปร (หน่วย)	ค่า
m_c (kg)	2000
m_b (kg)	135
l_x (m)	1.15
l_1 (m)	0.783
l_2 (m)	0.728
J ($kg \cdot m^2$)	948
k_p (N/m)	36,750
k_s (N/m)	37,000
c_p (N·S/m)	5000
c_s (N·s/m)	0

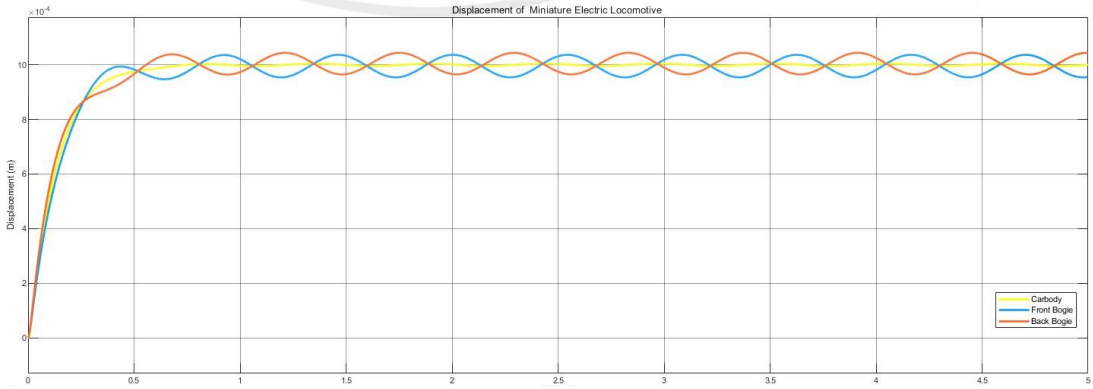
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 เข้าชุดประมวลผล Simulink ในโปรแกรม MATLAB จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการโดยสารกับค่าความเร็วของรถจักร, กราฟการสั่นสะเทือนของตัวรถจักร, กราฟการสั่นสะเทือนของการกระดกของตัวตู้, กราฟการสะสั่นเทือนของชุดโครงแคร่หน้าและการสั่นของชุดโครงแคร่หลัง



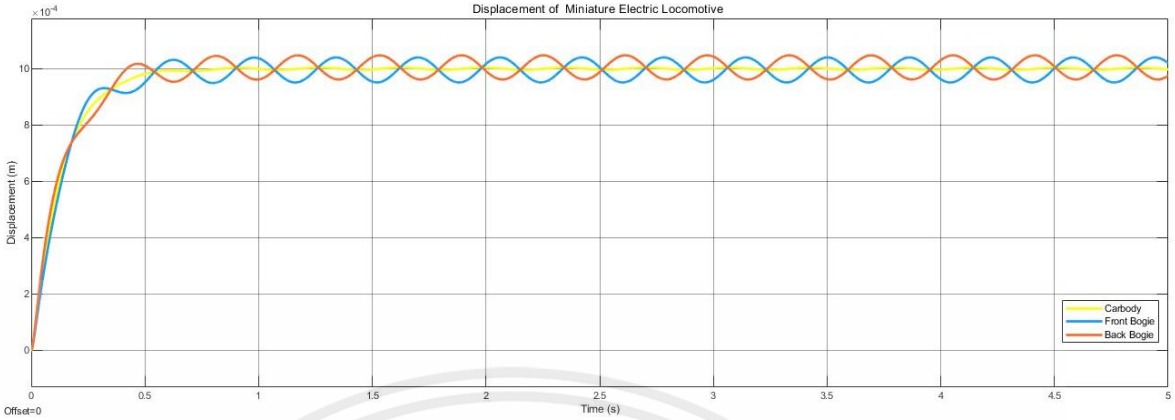
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการโดยสารกับค่าความเร็วของรถจักร

จากกราฟในรูปที่ 4.1 โดยจากชุดลดทอนการสั่นสะเทือนที่เลือกมานั้นมีค่าดัชนีการโดยสารไม่เกิน 3.00 ตลอดทุกช่วงความเร็วที่กำหนดในการแข่งขัน โดยในช่วงที่ความเร็ว 0 ถึง 7 km/hr จะมีค่าดัชนีการโดยสารต่ำกว่า 2.5 และจะเกินค่า 2.5 ในช่วงสั้นๆ ที่ความเร็วราว 8 km/hr และจะลดลงไปจนถึงคงที่ที่ความเร็ว 9 ถึง 13 km/hr จะเริ่มลู่เข้าที่ค่าดัชนีที่น้อยกว่า 2 ที่ความเร็ว 14 km/hr เป็นต้นไปจึงสรุปได้ว่าระลดทอนการสั่นสะเทือนที่เลือกมานั้นสามารถลดได้ดี และจากการประเมินตัวรถจักรมีความนุ่มสบายต่อการนั่งโดยสารเป็นอย่างมาก



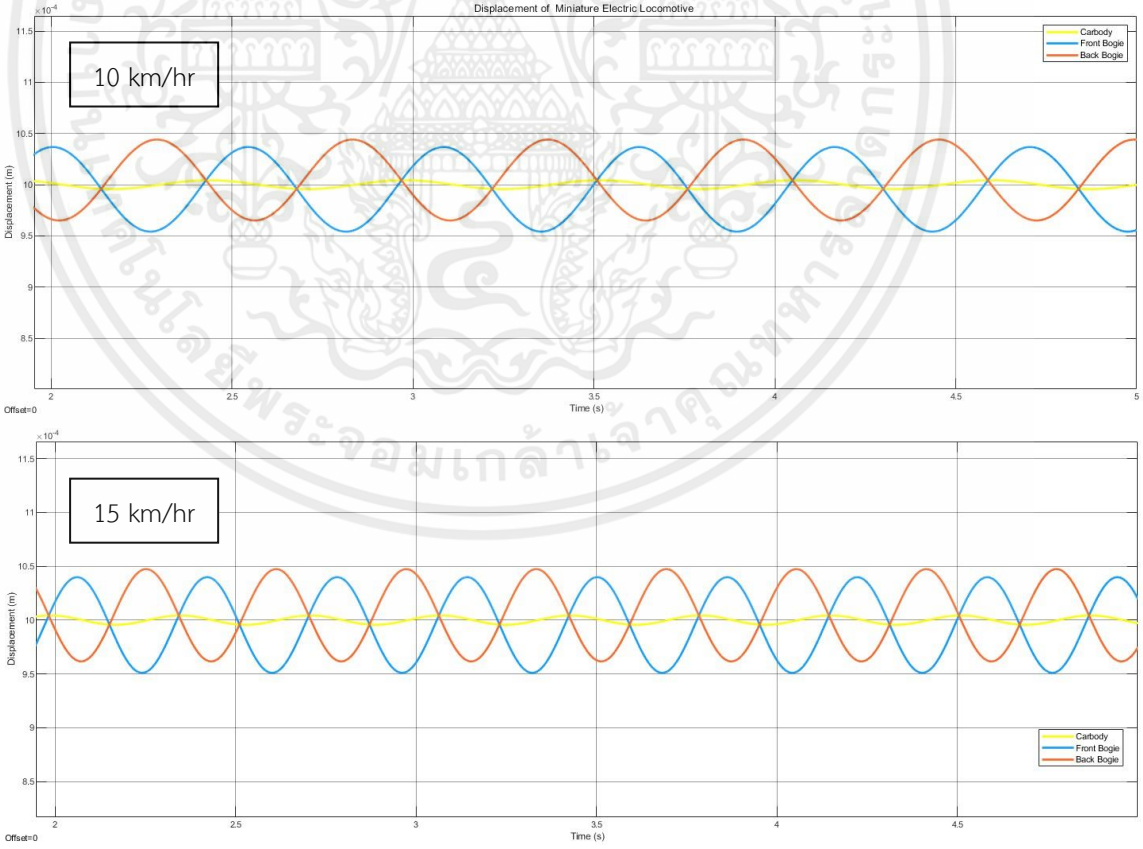
รูปที่ 4.2 กราฟพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของหัวรถจักรขนาดเล็ก ที่ความเร็ว 10km/hr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของหัวรถจักรขนาดเล็ก ที่ความเร็ว 15km/hr

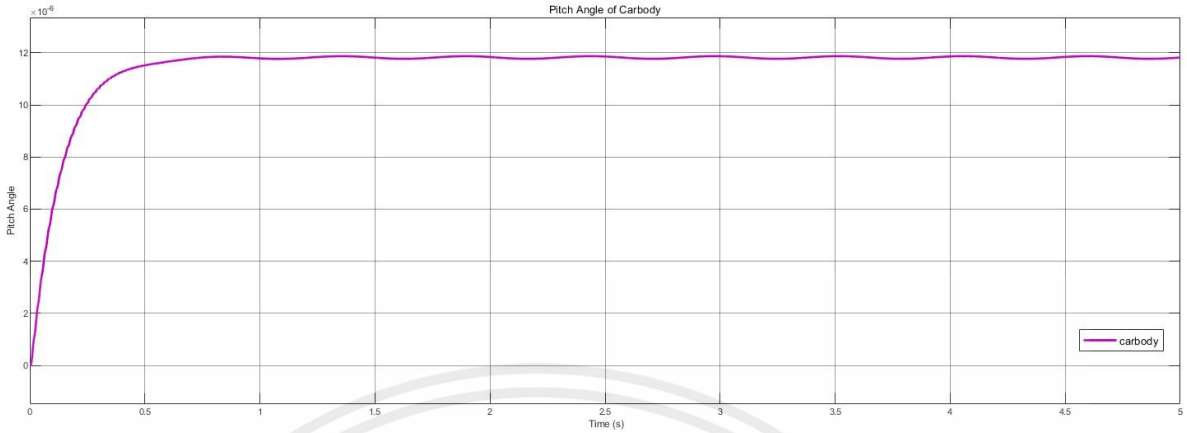
จากการสังเกตจะได้ว่า ไม่ว่าความเร็วจะมีค่าเท่าใดพฤติกรรมการสั่นสะเทือนในแนวตั้งของหัวรถจักรมีลักษณะที่เป็นไปตามคลื่นของราง โดยลักษณะที่เกิดขึ้นการสั่นสะเทือนนั้นจะลู่เข้าแอนพลิจูดของลูกคลื่นราง (Z_0) และจะเริ่มเข้าสู่ช่วงการสั่นแบบคงตัวเมื่อเวลาผ่านไป 2 วินาที ตามรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3



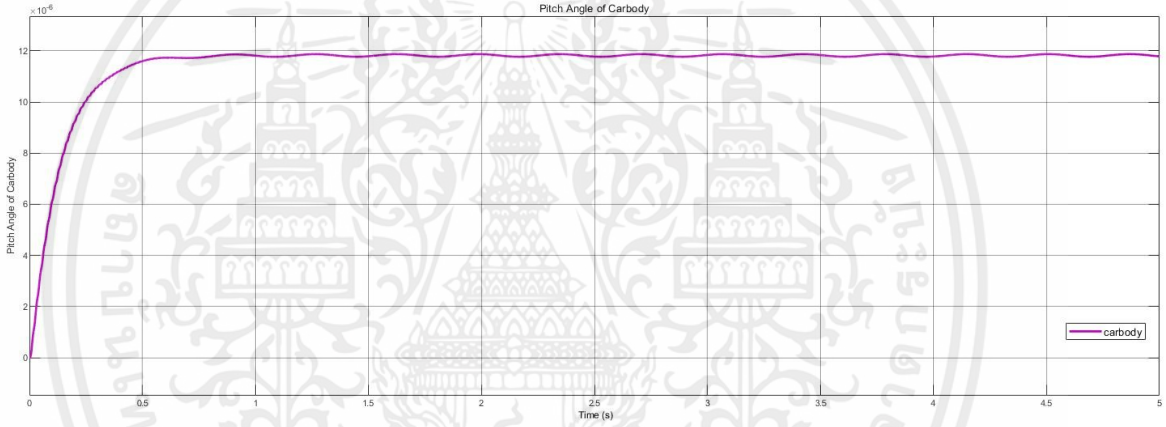
รูปที่ 4.4 กราฟพฤติกรรมการสั่นแบบคงตัวของหัวรถจักรขนาดเล็กที่ความเร็ว 10 km/hr และ 15 km/hr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟการกระดกของตัวรถจักร



รูปที่ 4.5 กราฟพฤติกรรมการสั่นแบบกระดกของหัวรถจักรขนาดเล็ก ที่ความเร็ว 10 km/hr

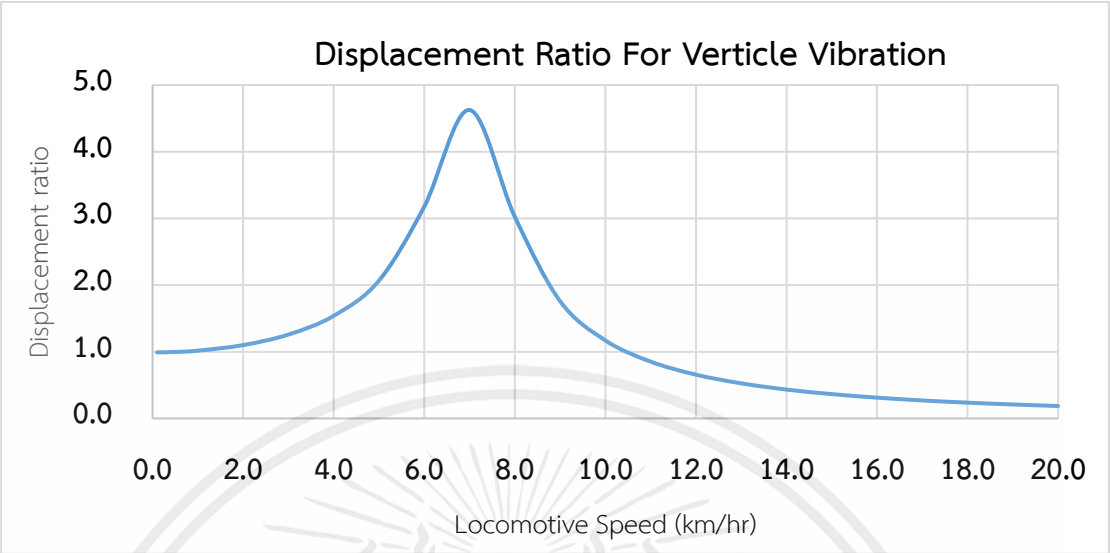


รูปที่ 4.6 กราฟพฤติกรรมการสั่นแบบกระดกของหัวรถจักรขนาดเล็ก ที่ความเร็ว 15 km/hr

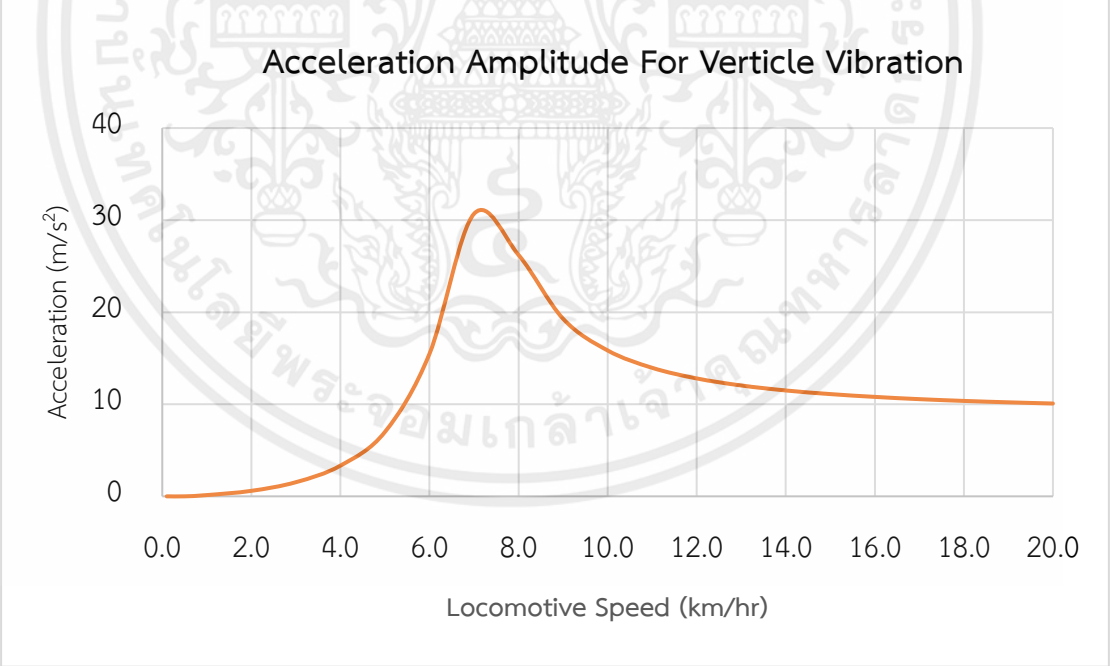
จากรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการกระดกของหัวรถจักรขนาดเล็กนั้น เริ่มแรกจะเริ่มเข้าสู่การสั่นแบบไม่คงตัวก่อนเวลา 1 วินาที ทั้งความเร็ว 10 และ 15 km/hr และหลัง 1 วินาที จะเริ่มลู่เข้าค่าที่ 1.18×10^{-5} rad

จากตารางที่ 4.1 ทำการประมวลผลจากการสั่นสะเทือนในแนวตั้งและการสั่นแบบกระดกของตัวรถจักรขนาดเล็ก โดยเก็บข้อมูลค่าแอมพลิจูดของพฤติกรรมการสั่นแบบคงตัวของหัวรถจักรขนาดเล็กตั้งแต่ 0 ถึง 20 km/hr บันทึกผลในโปแกรม Microsoft Excel นำข้อมูลที่บันทึกมาสร้างกราฟ ได้ดังรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

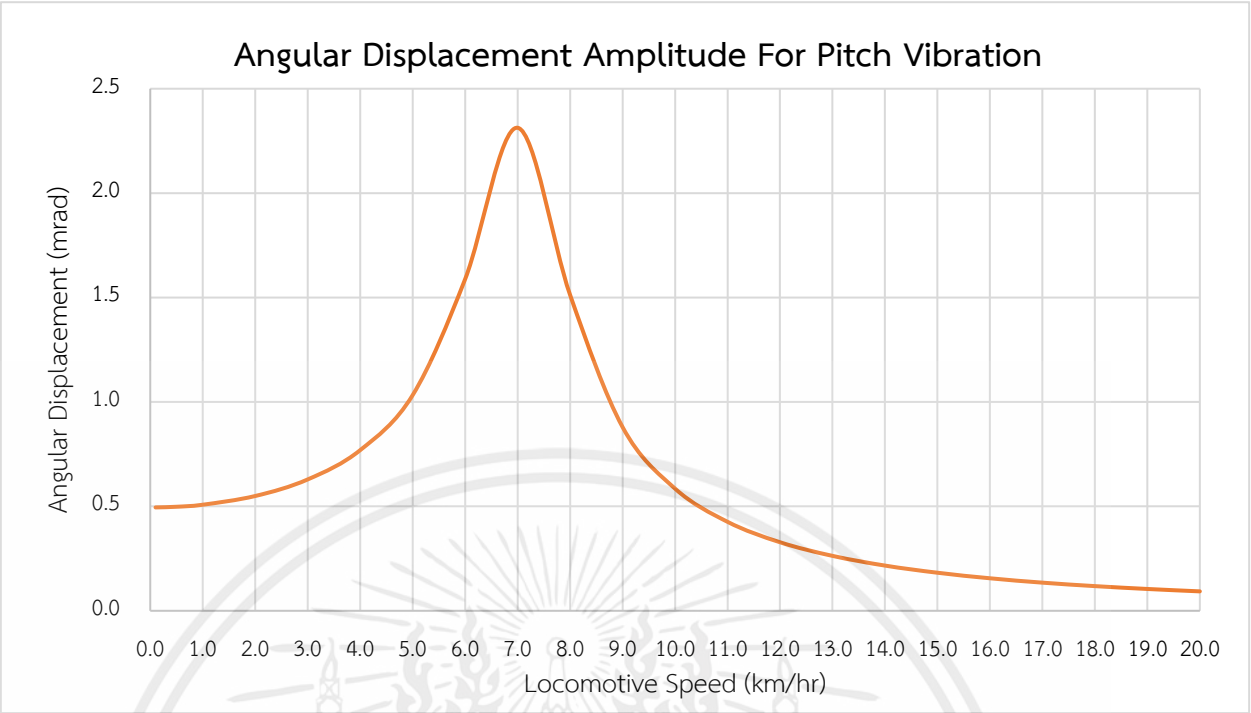


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของการสั่นในแนวตั้งกับความเร็วของรถจักรขนาดเล็กที่ช่วงการสั่นแบบคงตัว

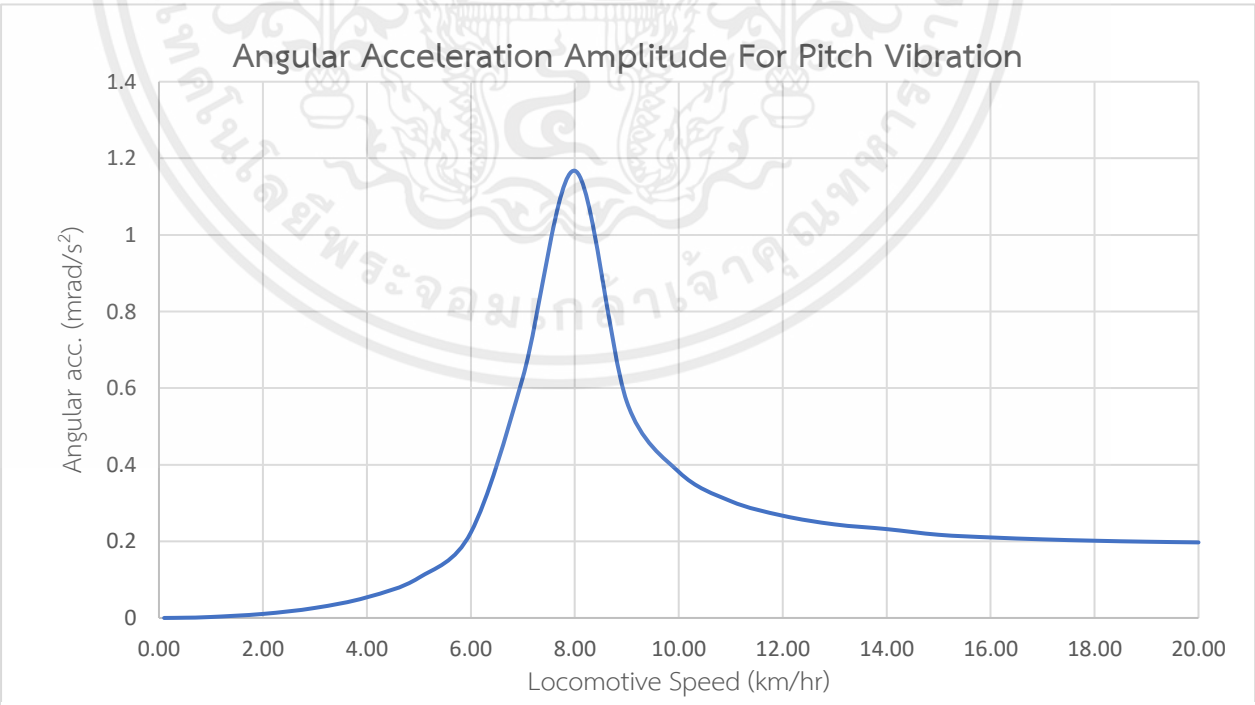


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของการสั่นในแนวตั้งกับความเร็วของรถจักรขนาดเล็กที่ช่วงการสั่นแบบคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของการสั่นแบบกระดกกับความเร็วของรถจักรขนาดเล็กที่ช่วงการสั่นแบบคงตัว



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของการสั่นแบบกระดกกับความเร็วของรถจักรขนาดเล็กที่ช่วงการสั่นแบบคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 และ 4.9 สังเกตได้ว่า โดยรวมแล้วแอมพลิจูดของการกระจัดของการสั่นสะเทือนจะมีค่าที่ น้อยมาก ๆ น้อยในระดับหน่วยมิลิเมตร (mm) แต่ถึงจะเป็นแบบนั้นจะเห็นได้ว่า ตั้งแต่ความเร็ว 2 km/hr จะเริ่มมีการเพิ่มขึ้นของการกระจัดของการสั่นสะเทือนที่เห็นได้ชัด และเกิดการกระจัดของการ สั่นที่มากที่สุดในช่วงความเร็ว 6 ถึง 8 km/hr เนื่องจากความเร็วช่วงนั้นทำให้เกิดการกำทอนทำให้เกิด ค่าวิกฤติที่บริเวณดังกล่าว หลังจากนั้นจึงลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งที่ความเร็วรถ 11 km/hr และลดลงไปอย่างช้า ๆ จนกระทั่งถึงความเร็วสูงสุดคือ 20 km/hr

จากกราฟของความเร่งในรูปที่ 4.8 และ 4.10 การสั่นสะเทือนของหัวรถจรชักรขนาดเล็กที่มีค่าเล็กมากๆ หมายความว่าความเร่งที่เกิดขึ้นไม่ส่งผลกระทบต่อค่าดัชนีการโดยสารของระบบจึงไม่ต้องคำนึงถึงการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและเสนอแนะ

5.1 บทนำ

เมื่อทราบถึงผลการทดลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผ่านโปรแกรม MATLAB แล้วในบทนี้ จะกล่าวถึงการสรุปผลการทดลอง ปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอแนะในการพัฒนาระบบกันสะเทือนของรถจักรไฟฟ้านี้

5.2 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาค่าดัชนีการโดยสารที่ยอมรับได้ของรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็กและขอบเขตขอจำกัดทางกายภาพของโครงแคร่ ด้วยการพิจารณาแบบจำลองการสั่นสะเทือน 4 องศาอิสระ โดยใช้ชุดประมวลผล Simulink ในโปรแกรม MATLAB ร่วมกับการบันทึกผลในโปรแกรม Microsoft Excel

1. ชุดคำสั่ง MATLAB สามารถใช้แก้ชุดสมการหาผลเฉลยของแบบจำลองการสั่นสะเทือนแบบ 4 องศาอิสระได้

2. จากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นบนหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก เริ่มจากวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการส่งผ่านการกระจัดกับ Frequency ratio ออกแบบที่ $r = \sqrt{2}$ เพื่อใช้ในการออกแบบระบบลดทอนการสะเทือนขั้นที่หนึ่ง จะได้ช่วงค่านิจสปริงที่ $33.846 \le k_1 \le 304.617$ kN/m และช่วงค่าคงที่ความหน่วงที่ $4.937 \le c_1 \le 14.810$ kN·s/m โดยในการวิเคราะห์ระบบลดทอนการสะเทือนขั้นที่สองนั้นจะออกแบบให้ค่านิจปริงในขั้นที่สองมีค่าน้อยกว่าขั้นที่หนึ่งเริ่มที่ 3 เท่าโดยช่วงค่านิจสปริงนั้นจะอยู่ที่ $0 \le k_2 \le 101.539$ kN/m เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นว่าการติดตั้งระบบลดทอนการสะเทือนขั้นที่สองนั้นส่งผลดีต่อดัชนีการโดยสาร-ความนุ่มนวลและความสะดวกสบายในการโดยสาร และในการออกแบบระบบลดทอนการสั่นสะเทือนขั้นที่หนึ่งได้มีการเลือกใช้สปริงและโช๊คอัพโดยมีค่าคงที่เท่ากับ 36.75 kN/m และ 5000 N·s/m ตามลำดับ

3. ในการออกแบบระบบลดทอนการสั่นสะเทือนขั้นที่สองได้มีการเลือกใช้ถุงลม โดยสรุปแล้วหลักการในการออกแบบถุงลมเพื่อให้ได้ค่านิจสปริงที่ต้องการนั้นสามารถกำหนดเงื่อนไขได้จากการเลือกความสูงของถุงลมที่ต้องการติดตั้งและความดันภายในถุงลม โดยในการคำนวณเป็นรูปแบบสมการเชิงเส้นคือแรงโหลดต่อความสูงโดยจะเป็นการเทียบจากการกำหนดความสูงของถุงลมรอบความสูงของถุงลมที่ออกแบบ โดยในการออกแบบของทางทีมต้องการที่ความสูง 150 mm ความสูงรอบที่ออกแบบก็อยู่ที่ 140 และ 160 mm โดยค่านิจสปริงก็จะเปลี่ยนไปตามแรงดันที่เราออกแบบอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที โดยจะมีอยู่ในช่วงที่ 3 – 8 bar เพื่อให้เพียงพอต่อการรับน้ำหนักของหัวรถจักรได้ โดยค่านิจสปริงที่ออกแบบไว้จะเท่ากับ 34 kN/m ที่ความสูง 150 mm และความดัน 3 bar

4. จากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของชุดล้อและเพลาที่ส่งผลต่อโบกี้ จะมีลักษณะที่เป็นไปตามคลื่นหรือ Wave Function โดยจากการสังเกตนั้นไม่ว่าความเร็วของรถจักรเป็นเท่าใด ลักษณะการสั่นแบบบังคับ (Force Vibration) คือมีทั้งการสั่นในส่วนของการสั่นแบบชั่วครู่ (Transient Vibration) และการสั่นแบบคงตัว (Steady State Vibration) ซึ่งจะส่งผลไปถึงหัวรถจักรที่ไม่ได้เกิดเพียงการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง แต่จะก่อให้เกิดการสั่นในแนวกระดกของรถและการสั่นสะเทือนในแนวตามยาวของตู้รถ แต่ในการคิดคำนวณหาค่าดัชนีการโดยสารนั้น จะคิดแค่เพียงในแนวตั้งและแนวขวาง ไม่มีการคำนวณที่รองรับไว้สำหรับแนวตามยาว เนื่องจากว่าเป็นแนวที่ไม่ควรมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นในระบบจึงสามารถละทิ้งได้

5.3 ปัญหาที่เกิดขึ้น

1. การใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อเก็บผลเฉลยของสมการการสั่นเทือนทั้ง 1 องศาอิสระและ 4 องศาอิสระด้วยวิธีการ Fast Fourier Transform (FFT) ในการช่วยหาค่าแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนได้ แต่จากกการทดลองเปรียบเทียบการใช้วิธีดังกล่าวกับการพิจารณาช่วงสภาวะคงตัวทีละสมการแล้วพบว่า ค่าแอมพลิจูดที่ได้จากการ FFT จะให้ค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบเนื่องจาก FFT มีความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง (Sampling) จะมีผลต่อคำตอบที่ได้ และเพื่อวคามถูกต้องของชุดข้อมูลจึงเลือกพิจารณาแอมพลิจูดทีละสมการ ทำให้มีข้อจำกัดด้านเวลาในการเพิ่มความถี่ของชุดข้อมูลที่นำมาใช้พิจารณากราฟดัชนีการโดยสาร

2. การสร้างแบบจำลอง Block diagram ของการสั่นสะเทือนที่มีความซับซ้อนมากจากสมการการสั่นสะเทือนแบบ 4 องศาอิสระ ทำให้การเชื่อมต่อแต่ละบล็อกผิดพลาด เกิดผลลัพธ์ที่ผิดผลาดต้องใช้เวลาในการตรวจสอบหลายรอบ

3. การแบ่งพิจารณาความเร็วของการวิ่งเร็วของวิ่งของรถจักร โดยทางทีมได้ทำการวิเคราะห์ที่ความเร็วอยู่ที่ 0 ถึง 15 km/hr เพิ่มหน่วยความเร็วทีละ 0.5 km/hr และวิเคราะห์ที่ความเร็วอยู่ที่ 0 ถึง 20 km/h เพิ่มหน่วยความเร็วทีละ 1 km/hr จึงทำให้แนวโน้มที่ได้ออกมาอาจผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริงอยู่บ้าง ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยพิจารณาในการเพิ่มหน่วยความเร็วให้น้อยลงไปอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ควรหาโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนโดยเฉพาะ เพื่อประหยัดเวลาและง่ายต่อการแก้ไขข้อผิดพลาดจากการป้อนค่า

2. การทดสอบการสั่นสะเทือนของหัวรถจักรไฟฟ้าขนาดเล็ก ที่มีการวิ่งจริงเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลลัพธ์ ค่าดัชนีความสะดวกสบายที่เกิดจริงเทียบกับการวัดจากแบบจำลอง เพื่อตรวจสอบความแม่นยำและความเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับแบบจำลอง

3. 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

4. ในการออกแบบเพื่อการแข่งขัน Railway Challenge ในหัวข้อ ความนุ่มนวลในการขับเคลื่อน (Ride comfort) ได้มีการให้ความเร่งตามหลัก EN12299:2009‘Railway applications – Ride comfort for passengers – Measurement and evaluation’(section 6.7.2 – Mean Comfort Standard Method) โดยย่านความเร่งที่จะได้คะแนนเต็มที่ 150 คะแนน ต้องน้อยกว่า 0.20 m/s^2 ซึ่งโมเดลในการออกแบบครั้งนี้มีความเร่งอยู่ที่ 0.283 m/s^2 เนื่องด้วยจากข้อจำกัดหลายอย่างไม่ว่าจะเป็น การออกแบบชุดลดทอนการสั่นสะเทือนให้สอดคล้องกับโบกี้ จึงอาจต้องมีการออกแบบโบกี้ใหม่เพื่อให้ออกแบบชุดลดทอนการสั่นสะเทือนได้ดีขึ้น

5. ในการออกแบบระบบลดทอนการสั่นสะเทือนโดยในส่วนของสมการการกระตุ้นจากผิวรางสามารถคาดเคลื่อนขึ้นได้เนื่องจากใช้ค่าตามมาตรฐาน ISO 3095 ที่กำหนดให้ z_0 (amplitude) เท่ากับ 1 mm และ L (wavelength) เท่ากับ 1.5 m อาจแตกต่างจากรางที่ใช้ในการแข่ง Railway Challenge ส่งผลให้ระบบลดทอนการสั่นสะเทือนที่ออกแบบมานั้นมีความคลาดเคลื่อนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] Madalina Dumitriu, Marius Alin Gheti. 2559. **Evaluation of The Ride Comfort in Railway Vehicles Based on The Ibdex Wz**. Bucharest: University Politehinica of Bucharest

[2] 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 22/11/2565.

[3] กิตติธัช เกิดสุวรรณ, จิรายุ สมประสงค์ และ สรวิชญ์ แสงรัตน์. 2563. การวิเคราะห์ความสะดวกสบายต่อการโดยสารของแบบจำลองรถจักร 5 องศาอิสระ. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[4] จิระพล ศรีเสริฐผล. 2561. **Vibration and System Modeling.** ประเทศไทย : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัด นครราชสีมา

[5] นคร จันทศร. 2554. **ช่างรถไฟ: ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ โครงสร้างการจัดตั้งเทคโนโลยีระบบขนส่งทางรางแห่งชาติ.** พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

[6] อารมณ์ มณีจุฑากร. 2539. ระบบถุงลมกันสะเทือน. วิศวกรรมสาร มก. 27(1): 98-112.

[7] **Double Convoluted Air Spring.** [ออนไลน์] แหล่งที่มา https://www.continental-industry.com/en/solutions/suspension-anti-vibration/railway/bogie/secondary-suspension/products/product-range/double-convoluted-air-spring เข้าดูเมื่อวันที่ 21/11/2565.

[8] **Rail Applications Design Guide.** 2548. Nashville: Firestone Industrial Product Company, LLC.

[9] Li Haitao. 2563**. Training of High-speed Train Vehicle Dynamics Simulation Technology.** China: China Railway Rolling Stock Corporation (CRRC)

[10] ณัฐชนน อนุรพันธ์, สรรเพชย ชำนาญกิจ และ อานัน ติยะษีนุกูล. 2559. **การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนใน แนวดิ่งของแบบจำลองย่อขนาดรถไฟครึ่งคัน.** ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิศวกรรมศาสตร์. สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[11] Daniel J. Inman. 2557. Engineering Vibration. 4th ED. Harlow : Pearson

[12] มนต์ศักดิ์ พิมสาร. 2557. **เอกสารประกอบการสอนวิชา 01156126 RAIL VEHICLE DYNAMICS.** กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[13] ISO 3095:2013(en) **Acoustics — Railway applications — Measurement of noise emitted by railbound vehicles.** 2556. [ออนไลน์] แหล่งที่มา https://www.iso.org/standard/55726.html เข้าดูเมื่อวันที่ 21/11/2565.

[14] **ISO 2631-1 Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole – body vibration – Part 1: General requirements.** 2540. Geneva: International Organization for Standardization

[15] IMechE. (n.d.). **IMechE Railway Challenge**. Retrieved 13 September 2022, from https://www.imeche.org/events/challenges/railway-challenge

[16] Klaus Knothe, Sebastian Satchel. 2017. Rail Vehicle Dynamic. Cham : Springer

[17] มนต์ศักดิ์ พิมสาร. 2565. **Introduction to rail vehicle dynamics**. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

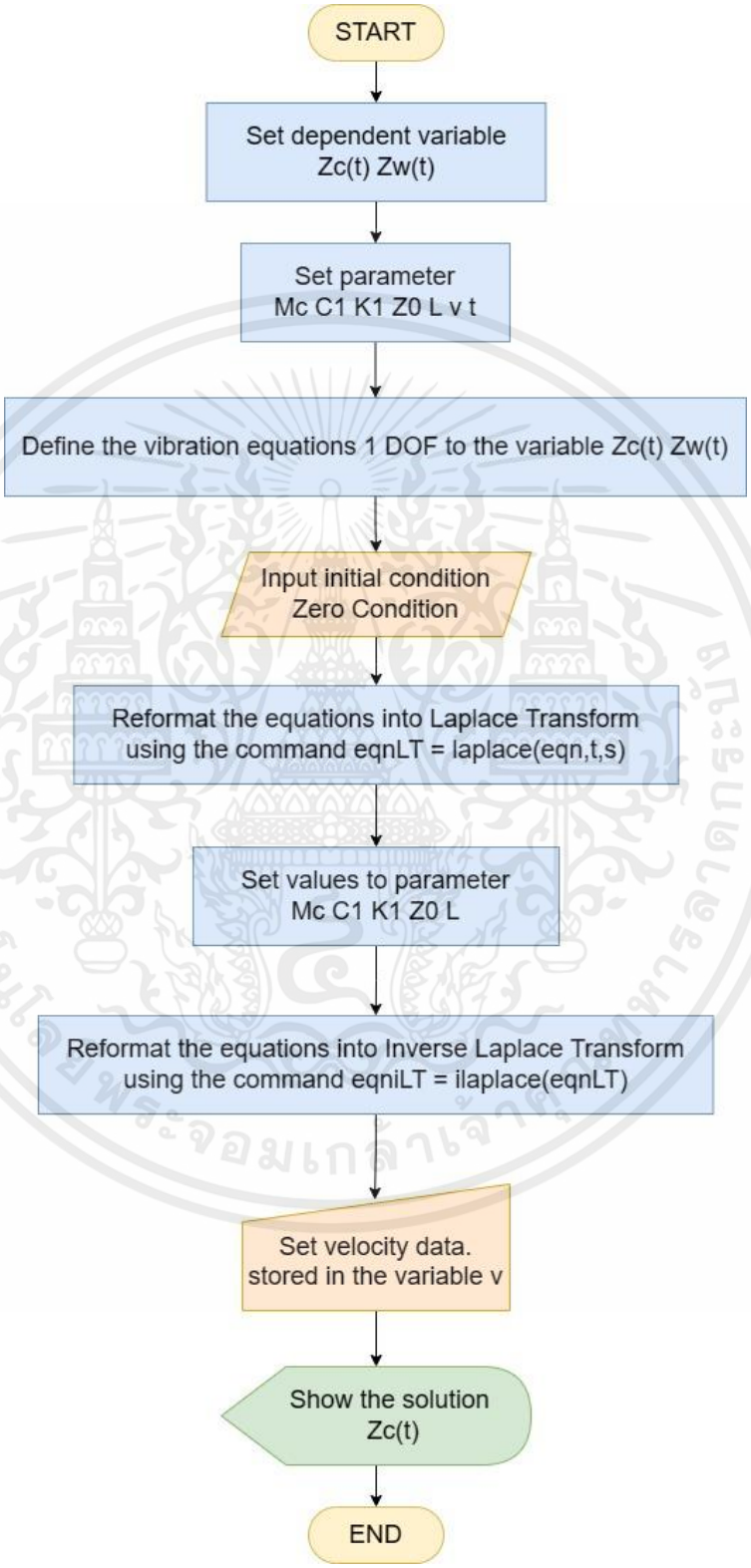
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ชุดคำสั่งของโปรแกรม MATLAB สำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบ 1 องศาอิสระ



รูปที่ ก.1 แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งสำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบ 1 องศาอิสระ

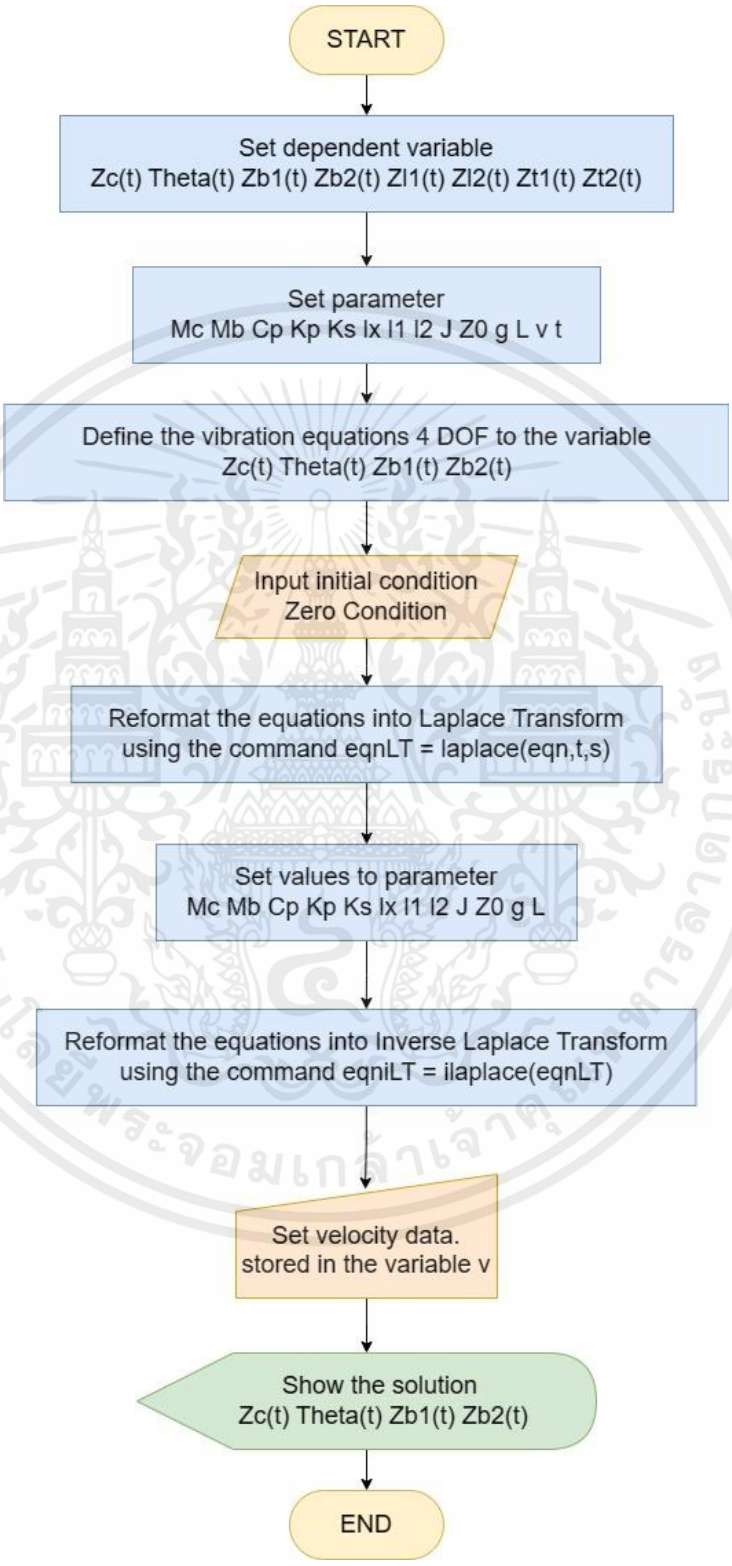
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%%% 1DOF of Car Body

clc
clear all;
syms t real; % independent variable
syms s; % complex-frequency s
syms Zc(t) Zw(t); % dependant variables
syms Mc C1 K1 Z0 L v t; % parameter

Zc_dot = diff(Zc,t);
Zc_dotdot = diff(Zc_dot,t);

Zw(t) = Z0*(1-cos(((2*pi*v)/L)*t));
Zw_dot = diff(Zw,t);

eqn = Mc*Zc_dotdot + C1*Zc_dot + K1*Zc == (C1*Zw_dot) + K1*Zw

eqnLT = laplace(eqn,t,s)

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

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

%Substitute Value According to Matrix vars
vars = [Mc C1 K1 Z0 L v]
values = [2000 14809.61 304617.42 0.001 1.5 15*5/18]

eqnLT = subs(eqnLT,vars,values) %Substitute value to Equation
eqnLT = solve(eqnLT,R1)
eqniLT = ilaplace(eqnLT) % Inverse Laplace
eqniLT = vpa(eqniLT)
eqniLTsub = subs(eqniLT,vars,values)
d_eqniLTsub_dotdot = diff(diff(eqniLTsub,t),t)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ชุดคำสั่งของโปรแกรม MATLAB สำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบ 4 องศาอิสระ



รูปที่ ข.1 แผนผังการทำงานของชุดคำสั่งสำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบ 4 องศาอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%%% 4DOF of Car Body

clc;
clear;
syms t real; % independent variable
syms s; % complex-frequency s
syms Zc(t) Theta(t) Zb1(t) Zb2(t) Zl1(t) Zt1(t) Zl2(t) Zt2(t); % dependant variables
syms Mc Mb Cp Kp Ks lx l1 l2 J Z0 g L v t; % parameter

%% Track irregularity
% front bogie => R5&R6
Zl1(t)=Z0*(1-cos((2*pi*v/L)*(t+((l1+l2)/v))));
Zt1(t)=Z0*(1-cos((2*pi*v/L)*(t+(l1/v))));
% back bogie => R7&R8
Zl2(t)=Z0*(1-cos((2*pi*v/L)*(t-(l1/v))));
Zt2(t)=Z0*(1-cos((2*pi*v/L)*(t-((l1+l2)/v))));
% derivative
Zl1_dot = diff(Zl1,t);
Zt1_dot = diff(Zt1,t);
Zl2_dot = diff(Zl2,t);
Zt2_dot = diff(Zt2,t);

%% Derivative equation
% Front bogie =>R1
Zb1_dot = diff(Zb1,t);
Zb1_dotdot = diff(Zb1_dot,t);
% Back bogie =>R2
Zb2_dot = diff(Zb2,t);
Zb2_dotdot = diff(Zb2_dot,t);
% Car =>R3&R4
Zc_dot = diff(Zc,t);
Zc_dotdot = diff(Zc_dot,t);
Theta_dot = diff(Theta,t);
Theta_dotdot = diff(Theta_dot,t);

%% Equation of Motion

eqn1 = (Mb+Mc)*Zb1_dotdot+4*Cp*Zb1_dot+(4*Kp+2*Ks)*Zb1 == 2*Kp*(Zl1+Zt1)+2*Cp*↙
(Zl1_dot+Zt1_dot)...
    +2*Ks*(Zc-(lx*Theta));

eqn2 = (Mb+Mc)*Zb2_dotdot+4*Cp*Zb2_dot+(4*Kp+2*Ks)*Zb2 == 2*Kp*(Zl2+Zt2)+2*Cp*↙
(Zl2_dot+Zt2_dot)...
    +2*Ks*(Zc+(lx*Theta));

eqn3 = Mc*Zc_dotdot+4*Ks*Zc == 2*Ks*Zb1+2*Ks*Zb2+4*lx*Theta;

eqn4 = J*Theta_dotdot+2*Ks*(2*lx*Theta) == 2*Ks*lx*(Zb1+Zb2)+4*Ks*lx*Zc;

%% Laplace Eqn
eqn1LT = laplace(eqn1,t,s);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
eqn2LT = laplace(eqn2,t,s);
eqn3LT = laplace(eqn3,t,s);
eqn4LT = laplace(eqn4,t,s);

%% Substitute the variables
syms R1 R2 R3 R4
eqn1LT = subs(eqn1LT,laplace(Zb1(t),t,s),R1);
eqn1LT = subs(eqn1LT,laplace(Zc(t),t,s),R3);
eqn1LT = subs(eqn1LT,laplace(Theta(t),t,s),R4);
eqn2LT = subs(eqn2LT,laplace(Zb2(t),t,s),R2);
eqn2LT = subs(eqn2LT,laplace(Zc(t),t,s),R3);
eqn2LT = subs(eqn2LT,laplace(Theta(t),t,s),R4);
eqn3LT = subs(eqn3LT,laplace(Zb1(t),t,s),R1);
eqn3LT = subs(eqn3LT,laplace(Zb2(t),t,s),R2);
eqn3LT = subs(eqn3LT,laplace(Zc(t),t,s),R3);
eqn3LT = subs(eqn3LT,laplace(Theta(t),t,s),R4);
eqn4LT = subs(eqn4LT,laplace(Zb1(t),t,s),R1);
eqn4LT = subs(eqn4LT,laplace(Zb2(t),t,s),R2);
eqn4LT = subs(eqn4LT,laplace(Zc(t),t,s),R3);
eqn4LT = subs(eqn4LT,laplace(Theta(t),t,s),R4);

%% Substitute Initial Conditions eqn1LT
eqn1LT = subs(eqn1LT,subs(Zb1(t),0),0);
eqn1LT = subs(eqn1LT,subs(diff(Zb1(t),t),t,0),0);
eqn1LT = subs(eqn1LT,subs(Zc(t),0),0);
eqn1LT = subs(eqn1LT,subs(Theta(t),0),0);
%% Substitute Initial Conditions eqn2LT
eqn2LT = subs(eqn2LT,subs(Zb2(t),0),0);
eqn2LT = subs(eqn2LT,subs(diff(Zb2(t),t),t,0),0);
eqn2LT = subs(eqn2LT,subs(Zc(t),0),0);
eqn2LT = subs(eqn2LT,subs(Theta(t),0),0);
%% Substitute Initial Conditions eqn3LT
eqn3LT = subs(eqn3LT,subs(Zb1(t),0),0);
eqn3LT = subs(eqn3LT,subs(Zb2(t),0),0);
eqn3LT = subs(eqn3LT,subs(Zc(t),0),0);
eqn3LT = subs(eqn3LT,subs(diff(Zc(t),t),t,0),0);
eqn3LT = subs(eqn3LT,subs(Theta(t),0),0);
%% Substitute Initial Conditions eqn4LT
eqn4LT = subs(eqn4LT,subs(Zb1(t),0),0);
eqn4LT = subs(eqn4LT,subs(Zb2(t),0),0);
eqn4LT = subs(eqn4LT,subs(Zc(t),0),0);
eqn4LT = subs(eqn4LT,subs(Theta(t),0),0);
eqn4LT = subs(eqn4LT,subs(diff(Theta(t),t),t,0),0);
%% Substitute Value According to Matrix vars
vars = [Mc Mb Cp Kp Ks lx l1 l2 J Z0 g L v];
values = [2000 134.9 5000 36750 37000 1 0.55 0.9 900 0.001 9.81 1.5 10*5/8];
eqn1LTsub = subs(eqn1LT,vars,values);
eqn2LTsub = subs(eqn2LT,vars,values);
eqn3LTsub = subs(eqn3LT,vars,values);
eqn4LTsub = subs(eqn4LT,vars,values);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%% Solve
eqns = [eqn1LTsub eqn2LTsub eqn3LTsub eqn4LTsub];
varR = [R1 R2 R3 R4];
[R1, R2, R3, R4] = solve(eqns,varR);

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ผลลัพธ์ที่ได้จากชุดคำสั่งการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบ 4 องศาอิสระ

ค. 1 การคำนวณเบื้องต้นเพื่อใช้ในการคำนวณดัชนีการโดยสาร

ตารางที่ ค.1 แสดงการคำนวณเบื้องต้น

v(km/h)	v(m/s)	ωd (rad/s)	frequency	B(f)
0	0	0	0	0
0.5	0.138889	0.581776	0.092593	0.074672
1	0.277778	1.163553	0.185185	0.145961
1.5	0.416667	1.745329	0.277778	0.211227
2	0.555556	2.327106	0.37037	0.268972
2.5	0.694444	2.908882	0.462963	0.318803
3	0.833333	3.490659	0.555556	0.361135
3.5	0.972222	4.072435	0.648148	0.396823
4	1.111111	4.654211	0.740741	0.42688
4.5	1.25	5.235988	0.833333	0.452302
5	1.388889	5.817764	0.925926	0.473976
5.5	1.527778	6.399541	1.018519	0.492652
6	1.666667	6.981317	1.111111	0.508949
6.5	1.805556	7.563093	1.203704	0.523363
7	1.944444	8.14487	1.296296	0.536292
7.5	2.083333	8.726646	1.388889	0.548053
8	2.222222	9.308423	1.481481	0.558896
8.5	2.361111	9.890199	1.574074	0.569021
9	2.5	10.47198	1.666667	0.578585
9.5	2.638889	11.05375	1.759259	0.587715
10	2.777778	11.63553	1.851852	0.59651
10.5	2.916667	12.2173	1.944444	0.605051
11	3.055556	12.79908	2.037037	0.613401
11.5	3.194444	13.38086	2.12963	0.621608
12	3.333333	13.96263	2.222222	0.629713
12.5	3.472222	14.54441	2.314815	0.637743
13	3.611111	15.12619	2.407407	0.645721
13.5	3.75	15.70796	2.5	0.653661
14	3.888889	16.28974	2.592593	0.661574
14.5	4.027778	16.87152	2.685185	0.669464
15	4.166667	17.45329	2.777778	0.67733

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2 การเก็บค่าจากชุดคำสั่งใน 8 กรณี

ตารางที่ ค.2 การเก็บค่าแอมพลิจูดในกรณีที่ 1

Condition 1: C1 = 4636.54 Ns/m, K1 = 33846.38 N/m, K2 = 0 N/m				
Amplitude (m)	a (cm/s^2)	Wz Index	r (Freq ratio)	Z/Z0 (Displacement ratio)
0.001093744	0	0	0	1.093744335
0.001112514	0.037654577	0.17688795	0.141421356	1.112514171
0.001126603	0.152525682	0.32906352	0.282842712	1.126602622
0.001148145	0.349745028	0.47158099	0.424264069	1.148145199
0.001180388	0.639229699	0.60759596	0.565685425	1.180387865
0.001226642	1.037934538	0.73945818	0.707106781	1.226641713
0.00127926	1.558739744	0.86723882	0.848528137	1.279260182
0.001295425	2.148427206	0.98224759	0.989949493	1.295425189
0.001251832	2.711678621	1.07663674	1.13137085	1.251831909
0.001196223	3.27951211	1.15978439	1.272792206	1.196222576
0.001153983	3.905813836	1.23949885	1.414213562	1.153982742
0.001124598	4.605690204	1.31751741	1.555634918	1.124597532
0.001103872	5.380139001	1.39394638	1.697056274	1.103872155
0.001088752	6.227702979	1.46874052	1.83847763	1.088751988
0.00107428	7.126653087	1.54060751	1.979898987	1.074279582
0.001068467	8.13684388	1.61357611	2.121320343	1.06846731
0.001061392	9.196617082	1.68381213	2.262741699	1.061392252
0.00105563	10.32575221	1.75275323	2.404163055	1.055629772
0.001050851	11.52387485	1.82052029	2.545584411	1.050851376
0.001046828	12.79071285	1.88722735	2.687005768	1.046827979
0.001043396	14.12606459	1.95297898	2.828427124	1.043395527
0.001040434	15.52977788	2.01786947	2.96984848	1.040433744
0.001037853	17.00173594	2.08198274	3.111269836	1.037852604
0.001035583	18.54184771	2.14539277	3.252691192	1.035583475
0.001033573	20.15004119	2.20816415	3.394112549	1.033573174
0.00103178	21.82625873	2.27035268	3.535533905	1.031779883
0.00103017	23.5704536	2.33200599	3.676955261	1.030170285
0.001028718	25.38258755	2.39316407	3.818376617	1.028717526
0.0010274	27.26262894	2.45385975	3.959797973	1.027399723
0.001026199	29.21055139	2.5141192	4.101219329	1.026198873
0.0010251	31.22633271	2.57396221	4.242640686	1.025100033

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 การเก็บค่าแอมพลิจูดในกรณีที่ 2

Condition 2: C1 = 4636.54 Ns/m, K1 = 33846.38 N/m, K2 = 60923.48 N/m				
Amplitude (m)	a (cm/s^2)	Wz Index	r (Freq ratio)	Z/Z0 (Displacement ratio)
0.00039427	0	0	0	0.394269989
0.000396921	0.01343433	0.11516488	0.141421356	0.396920722
0.000400528	0.054225668	0.21401325	0.282842712	0.400527828
0.00040524	0.123443086	0.30603647	0.424264069	0.405239746
0.000411324	0.222749088	0.39279406	0.565685425	0.411323693
0.000419221	0.354727806	0.47526248	0.707106781	0.41922097
0.000429648	0.523513147	0.55448172	0.848528137	0.429648071
0.000443777	0.735992495	0.63175564	0.989949493	0.443777296
0.000463532	1.004088783	0.70881304	1.13137085	0.463532208
0.000491864	1.348474046	0.78793356	1.272792206	0.491864351
0.000531512	1.798976581	0.87124972	1.414213562	0.531512257
0.000574762	2.353888887	0.95544582	1.555634918	0.574762417
0.000585439	2.853357179	1.02215603	1.697056274	0.585438692
0.000551168	3.152702793	1.06207198	1.83847763	0.551168135
0.000510066	3.383721974	1.09281604	1.979898987	0.510065999
0.00047899	3.64771875	1.12502298	2.121320343	0.478990171
0.000457158	3.961124508	1.1599869	2.262741699	0.457157977
0.000441573	4.319294841	1.19693468	2.404163055	0.441573276
0.000430073	4.716283092	1.235089	2.545584411	0.430073447
0.000421305	5.147732579	1.27392224	2.687005768	0.421304938
0.000414425	5.610709011	1.31310323	2.828427124	0.414424601
0.000408893	6.103243307	1.35242762	2.96984848	0.408893181
0.000404354	6.62399031	1.39176972	3.111269836	0.404354333
0.000400565	7.17200935	1.43105227	3.252691192	0.400564954
0.000397354	7.746626823	1.47022802	3.394112549	0.397354308
0.000394599	8.347349483	1.50926829	3.535533905	0.394599339
0.000392209	8.973808717	1.54815576	3.676955261	0.392209299
0.000390116	9.625723937	1.58687989	3.818376617	0.390115897
0.000388267	10.30287799	1.62543391	3.959797973	0.388266811
0.000386621	11.00510029	1.66381284	4.101219329	0.386621306
0.000385147	11.73225504	1.70201213	4.242640686	0.385147213

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 การเก็บค่าแอมพลิจูดในกรณีที่ 3

Condition 3: C1 = 4636.54 Ns/m, K1 = 304617.42 N/m, K2 = 0 N/m				
Amplitude (m)	a (cm/s^2)	Wz Index	r (Freq ratio)	Z/Z0 (Displacement ratio)
0.001103956	0	0	0	1.103955859
0.001104876	0.037396039	0.17959268	0.047140452	1.104875586
0.001106279	0.1497741	0.33296293	0.094280904	1.106278578
0.001108193	0.337574776	0.4747116	0.141421356	1.10819262
0.00111066	0.601469169	0.60697363	0.188561808	1.11066008
0.001113741	0.942402178	0.73083869	0.23570226	1.113740588
0.001117515	1.361658272	0.84725685	0.282842712	1.117515106
0.001122092	1.860958744	0.95718046	0.329983164	1.122091931
0.001127615	2.442604959	1.0615531	0.377123617	1.127615494
0.001134279	3.109691259	1.16128199	0.424264069	1.134279357
0.001142346	3.866426792	1.25722678	0.471404521	1.142345738
0.001152175	4.718633111	1.35020848	0.518544973	1.152175443
0.001164275	5.674534802	1.44103696	0.565685425	1.16427493
0.001179372	6.746055362	1.53055768	0.612825877	1.179372428
0.001198545	7.951014436	1.61972435	0.659966329	1.198544725
0.001223434	9.316983139	1.70971324	0.707106781	1.223434057
0.001256624	10.88823667	1.80210666	0.754247233	1.256624032
0.001302268	12.73826669	1.89917676	0.801387685	1.302267699
0.001366895	14.98967851	2.00420287	0.848528137	1.366894772
0.00145868	17.8229427	2.12098521	0.895668589	1.458679848
0.00157397	21.30927551	2.24775949	0.942809041	1.573970062
0.001646473	24.57567069	2.35604256	0.989949493	1.646472812
0.001583042	25.93283828	2.4042088	1.037089945	1.583042099
0.001456524	26.07866985	2.417879	1.084230397	1.456523643
0.001351865	26.35531093	2.43498919	1.13137085	1.351865345
0.001278512	27.04561736	2.46329615	1.178511302	1.278511552
0.001227302	28.08085241	2.50052032	1.225651754	1.227301783
0.001190424	29.37254453	2.54379552	1.272792206	1.190424391
0.001162934	30.8591115	2.5910898	1.319932658	1.162934164
0.001141798	32.50105913	2.64107791	1.36707311	1.141798038
0.001125115	34.2729679	2.69289492	1.414213562	1.125115167

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 การเก็บค่าแอมพลิจูดในกรณีที่ 4

Condition 4: C1 = 4636.54 Ns/m, K1 = 304617.42 N/m, K2 = 60923.48 N/m				
Amplitude (m)	a (cm/s^2)	Wz Index	r (Freq ratio)	Z/Z0 (Displacement ratio)
0.000919963	0	0	0	0.919963216
0.000920698	0.031162304	0.142419685	0.047140452	0.920698279
0.000921771	0.124794442	0.264036312	0.094280904	0.92177097
0.000923198	0.281222332	0.376421139	0.141421356	0.923198458
0.000925006	0.500929836	0.481259261	0.188561808	0.925006301
0.000914169	0.773533116	0.576945162	0.23570226	0.914169393
0.000929916	1.133074236	0.671602605	0.282842712	0.929915824
0.000933126	1.547563804	0.758590821	0.329983164	0.933125929
0.00093694	2.029569913	0.841099105	0.377123617	0.936940078
0.000941462	2.581072898	0.919819909	0.424264069	0.9414625
0.00094683	3.204676455	0.99539661	0.471404521	0.9468299
0.000953224	3.903842942	1.068424613	0.518544973	0.953223501
0.000960887	4.683246866	1.139463377	0.565685425	0.960887034
0.000970154	5.549319222	1.209057224	0.612825877	0.970154221
0.000981492	6.511109759	1.277765231	0.659966329	0.981491899
0.00099557	7.581696563	1.346203808	0.707106781	0.995569665
0.001013376	8.780569974	1.415110168	0.754247233	1.013375773
0.001036415	10.13780409	1.485441897	0.801387685	1.036415325
0.001067054	11.70155762	1.558537663	0.848528137	1.067054102
0.001109096	13.55153476	1.636366488	0.895668589	1.109095788
0.001168543	15.8203764	1.721807093	0.942809041	1.168542722
0.001253068	18.70360612	1.818232165	0.989949493	1.253067693
0.001360343	22.28465319	1.924239584	1.037089945	1.36034258
0.001431752	25.63513941	2.014836689	1.084230397	1.431751958
0.001378017	26.86514264	2.051320659	1.13137085	1.378016576
0.001261598	26.68783319	2.055047038	1.178511302	1.261598231
0.001163869	26.62949108	2.061372012	1.225651754	1.163868582
0.001095162	27.02203246	2.078046896	1.272792206	1.095161725
0.001047184	27.78761925	2.103115167	1.319932658	1.047184128
0.001012645	28.82474562	2.133938102	1.36707311	1.012645091
0.000986906	30.06287511	2.168619012	1.414213562	0.986905973

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 การเก็บค่าแอมพลิจูดในกรณีที่ 5

Condition 5: C1 = 14809.61 Ns/m, K1 = 33846.38 N/m, K2 = 0 N/m				
Amplitude (m)	a (cm/s^2)	Wz Index	r (Freq ratio)	Z/Z0 (Displacement ratio)
0.001103956	0	0	0	1.103956239
0.001126643	0.038132773	0.1775589	0.141421356	1.126642596
0.00115089	0.155813867	0.33117587	0.282842712	1.150890188
0.001171652	0.356905727	0.47445703	0.424264069	1.171652387
0.001186084	0.642314365	0.60847408	0.565685425	1.186083942
0.001193372	1.009783215	0.73338339	0.707106781	1.19337219
0.001194301	1.455219714	0.84954267	0.848528137	1.194301129
0.001190488	1.974392171	0.95766762	0.989949493	1.190488253
0.001183653	2.563990853	1.05869941	1.13137085	1.183652642
0.001175199	3.221874843	1.15363145	1.272792206	1.175199021
0.001166109	3.946857826	1.24339212	1.414213562	1.166109294
0.001156998	4.738385314	1.32879217	1.555634918	1.156998451
0.001148217	5.596269253	1.41051465	1.697056274	1.148216765
0.001139942	6.520513045	1.48912529	1.83847763	1.139942217
0.001132248	7.51120908	1.56508987	1.979898987	1.132247978
0.001125147	8.568483282	1.63879204	2.121320343	1.125146853
0.001118619	9.692467074	1.71054894	2.262741699	1.118618875
0.001112628	10.88328436	1.78062415	2.404163055	1.112627803
0.001107131	12.14104637	1.84923796	2.545584411	1.10713067
0.001102083	13.46585042	1.9165755	2.687005768	1.102083139
0.001097442	14.85778046	1.98279308	2.828427124	1.097442361
0.001093168	16.31690845	2.04802314	2.96984848	1.093168381
0.001089225	17.84329589	2.11237816	3.111269836	1.089224722
0.001085578	19.43699532	2.17595369	3.252691192	1.085578497
0.0010822	21.09805167	2.23883083	3.394112549	1.082200281
0.001079064	22.8265035	2.30107808	3.535533905	1.079063865
0.001076146	24.62238393	2.36275293	3.676955261	1.076145954
0.001073426	26.48572159	2.42390307	3.818376617	1.073425864
0.001070885	28.41654122	2.4845674	3.959797973	1.070885226
0.001068508	30.41486434	2.54477683	4.101219329	1.068507715
0.001066279	32.48070974	2.60455495	4.242640686	1.066278802

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.7 การเก็บค่าแอมพลิจูดในกรณีที่ 6

Condition 6: C1 = 14809.61 Ns/m, K1 = 33846.38 N/m, K2 = 60923.48 N/m				
Amplitude (m)	a (cm/s^2)	Wz Index	r (Freq ratio)	Z/Z0 (Displacement ratio)
0.00039427	0	0	0	0.394269959
0.000403076	0.013642664	0.11569777	0.141421356	0.403076003
0.000414477	0.05611419	0.21622255	0.282842712	0.414477047
0.000427623	0.130261442	0.31101256	0.424264069	0.42762309
0.000442131	0.239432592	0.40139791	0.565685425	0.442131094
0.000457738	0.387319119	0.48796159	0.707106781	0.457737718
0.000474061	0.577628628	0.57108871	0.848528137	0.474060732
0.000490415	0.813339688	0.65098158	0.989949493	0.490414903
0.000505704	1.095440406	0.72757319	1.13137085	0.505704195
0.000518499	1.421494935	0.8004983	1.272792206	0.518499178
0.0005274	1.785057276	0.86922187	1.414213562	0.527399762
0.000531576	2.177023124	0.93331703	1.555634918	0.531576099
0.000531121	2.588619395	0.99272924	1.697056274	0.531121012
0.00052693	3.014062328	1.04783936	1.83847763	0.526930453
0.000520248	3.451267531	1.09931523	1.979898987	0.520247891
0.000512233	3.900876341	1.14789892	2.121320343	0.512232865
0.000503751	4.364839295	1.1942576	2.262741699	0.50375117
0.000495356	4.845379895	1.2389248	2.404163055	0.495356384
0.000487358	5.344479545	1.28230082	2.545584411	0.487358094
0.000479903	5.863716514	1.32467707	2.687005768	0.479903081
0.00047304	6.404276503	1.36626382	2.828427124	0.47303999
0.000466763	6.967022709	1.40721351	2.96984848	0.466762988
0.000461039	7.552573248	1.44763795	3.111269836	0.461038675
0.000455822	8.161367164	1.48762037	3.252691192	0.455821723
0.000451064	8.79371523	1.52722359	3.394112549	0.451063503
0.000446717	9.449837153	1.56649555	3.535533905	0.44671659
0.000442737	10.12988819	1.605473	3.676955261	0.44273691
0.000439085	10.83397792	1.64418401	3.818376617	0.439084586
0.000435724	11.56218353	1.68264968	3.959797973	0.435724089
0.000432624	12.31455909	1.72088532	4.101219329	0.432624037
0.000429757	13.09114217	1.75890128	4.242640686	0.429756847

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.8 การเก็บค่าแอมพลิจูดในกรณีที่ 7

Condition 7: C1 = 14809.61 Ns/m, K1 = 304617.42 N/m, K2 = 0 N/m				
Amplitude (m)	a (cm/s^2)	Wz Index	r (Freq ratio)	Z/Z0 (Displacement ratio)
0.001103956	0	0	0	1.103955889
0.001106402	0.037447709	0.17966708	0.047140452	1.106402181
0.001109386	0.150194803	0.33324324	0.094280904	1.109386016
0.001112937	0.33902014	0.47532045	0.141421356	1.112937467
0.001117097	0.604955299	0.60802691	0.188561808	1.117097492
0.001121919	0.949322311	0.73244455	0.23570226	1.121918872
0.001127467	1.373784751	0.84951344	0.282842712	1.127467326
0.001133823	1.880413685	0.96017152	0.329983164	1.133822569
0.001141079	2.471769159	1.06533973	0.377123617	1.141078991
0.001149345	3.150995285	1.16588801	0.424264069	1.149345259
0.001158742	3.921920801	1.26261322	0.471404521	1.158741586
0.001169392	4.789143512	1.35622993	0.518544973	1.169392368
0.00118141	5.758049971	1.44736701	0.565685425	1.181410188
0.001194865	6.83467112	1.53656174	0.612825877	1.19486459
0.001209726	8.025189074	1.62424272	0.659966329	1.209725892
0.001225773	9.334791625	1.71069296	0.707106781	1.225772529
0.001242457	10.76548065	1.79598726	0.754247233	1.242456618
0.00125875	12.31259684	1.87991055	0.801387685	1.258750311
0.00127306	13.96066999	1.96189547	0.848528137	1.273060447
0.00128338	15.68103595	2.04106222	0.895668589	1.283380165
0.001287823	17.43525899	2.11644875	0.942809041	1.287823026
0.001285401	19.18622781	2.18740095	0.989949493	1.285401438
0.001276529	20.91165055	2.2538949	1.037089945	1.276529118
0.00126281	22.61028367	2.31654497	1.084230397	1.262810293
0.001246303	24.29732375	2.37631564	1.13137085	1.246303261
0.00122883	25.99466456	2.43418075	1.178511302	1.228830478
0.001211665	27.72307395	2.49091964	1.225651754	1.211664717
0.001195536	29.49867779	2.54706772	1.272792206	1.19553638
0.001180777	31.33257504	2.60295264	1.319932658	1.180776769
0.00116747	33.23179646	2.65875368	1.36707311	1.167469646
0.001155564	35.20049966	2.71455435	1.414213562	1.155564238

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.9 การเก็บค่าแอมพลิจูดในกรณีที่ 8

Condition 8: C1 = 14809.61 Ns/m, K1 = 304617.42 N/m, K2 = 60923.48 N/m				
Amplitude (m)	a (cm/s^2)	Wz Index	r (Freq ratio)	Z/Z0 (Displacement ratio)
0.000919963	0	0	0	0.919963241
0.00092198	0.031205679	0.142479127	0.047140452	0.92197981
0.000924398	0.125150075	0.264261819	0.094280904	0.924397787
0.000927237	0.282452638	0.376914421	0.141421356	0.927237315
0.000930526	0.503918998	0.482119002	0.188561808	0.930526024
0.0009343	0.790566615	0.580727515	0.23570226	0.934299757
0.000938604	1.143659918	0.673478806	0.282842712	0.93860351
0.000943493	1.564756567	0.761109336	0.329983164	0.943492554
0.000949034	2.055766655	0.844341453	0.377123617	0.949033663
0.000955306	2.619026522	0.923856871	0.424264069	0.955306322
0.000962404	3.257387789	1.000280356	0.471404521	0.962403599
0.000970432	3.97431928	1.074174922	0.518544973	0.970432108
0.00097951	4.774012654	1.146044089	0.565685425	0.979509941
0.000989761	5.661468009	1.216336282	0.612825877	0.989760522
0.001001299	6.642506672	1.285446959	0.659966329	1.001298815
0.001014204	7.723604457	1.353713943	0.707106781	1.01420391
0.001028469	8.911347723	1.421400475	0.754247233	1.028468985
0.001043918	10.21118781	1.488659523	0.801387685	1.043917542
0.001060079	11.62506888	1.55547437	0.848528137	1.060079165
0.001076041	13.1476557	1.621580557	0.895668589	1.076041187
0.00109035	14.76176462	1.686401313	0.942809041	1.090350329
0.001101118	16.43556958	1.749069875	0.989949493	1.101118208
0.001106485	18.1260406	1.808623898	1.037089945	1.106484567
0.001105353	19.79105513	1.86436023	1.084230397	1.105353144
0.001097936	21.40482131	1.916153473	1.13137085	1.097935677
0.001091502	23.08962788	1.967672666	1.178511302	1.091502389
0.001070409	24.49111504	2.010250055	1.225651754	1.070408716
0.001054024	26.00698794	2.054314624	1.272792206	1.05402352
0.001037768	27.53775561	2.097423916	1.319932658	1.037767947
0.0010224	29.10241428	2.140084288	1.36707311	1.022399897
0.00100828	30.71395126	2.182603334	1.414213562	1.008279542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

การคำนวณเพื่อใช้ในการเลือกตัวหน่วง

เริ่มจากการคำนวณย้อนกลับไปหาค่าความเร็วกระบอกสูบจากการกำหนดค่า c จะได้

$$F_{damping} = -cv$$

$$\text{Piston speed} = v = \frac{2000*9.81}{5000*8}$$

$$\text{Piston speed} = 0.4905 \ \text{m/s}$$

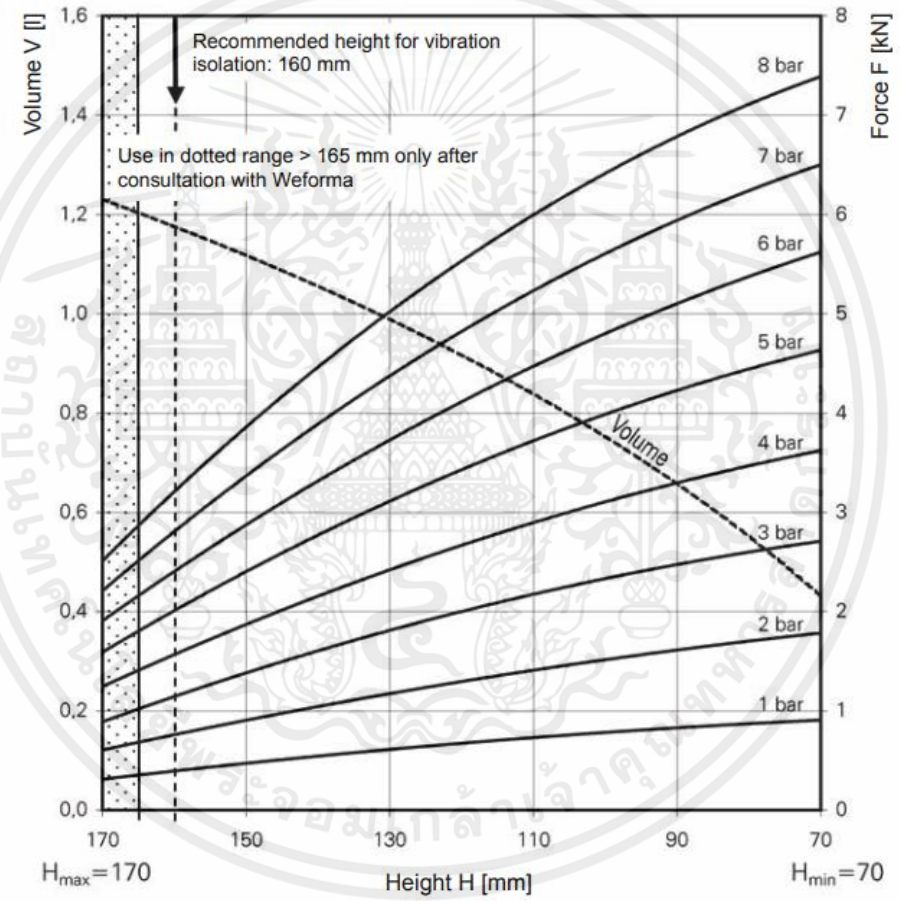
ในการเลือกจะทำการเลือกตัวหน่วงหรือโช๊คอัพที่มีคุณสมบัติ ความเร็วกระบอกสูบมากกว่า 0.4905 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

การคำนวณการออกแบบถุงลมที่ความสูง 150 mm

จ.1 เลือกใช้ Data Sheet จากบริษัท Weforma คือถุงลมรุ่น WBZ100 เนื่องจากมีขนาดใกล้เคียงกับ ถุงลมรุ่น 2S จากบริษัท Mtec



รูปที่ จ.1 Data Sheet ของถุงลม WBZ100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ.2 Static Characteristic Values ของถุงลม WBZ100 อ่านค่าจาก Data Sheet

ตารางที่ จ.1 ตารางแสดงผลการรับแรงและปริมาตรของถุงลมในแต่ละความสูงและความดัน

Force [kN] Table								
Pressure [bar]		3	4	5	6	7	8	Vol [L]
Height [mm]	170	0.9	1.3	1.6	1.9	2.1	2.5	1.23
	160	1.1	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	1.20
	150	1.4	1.8	2.4	2.8	3.4	3.8	1.12
	140	1.6	2.2	2.8	3.3	3.9	4.5	1.10
	130	1.8	2.4	3.1	3.7	4.4	5.0	1.00
	120	2.0	2.7	3.4	4.1	4.8	5.5	0.90
	110	2.2	2.9	3.7	4.5	5.2	6.0	0.83
	100	2.3	3.1	4.0	4.8	5.6	6.4	0.70
	90	2.5	3.3	4.2	5.1	5.9	6.8	0.66
	80	2.6	3.5	4.5	5.4	6.3	7.1	0.60
	70	2.7	3.7	4.7	5.6	6.5	7.4	0.44

จ.3 การคำนวณค่านิจสปริงของถุงลม

ตารางที่ จ.2 ตารางแสดงผลการรับแรงและปริมาตรของถุงลมที่ความสูง 140,150,160 mm

Force [kN] Table								
Pressure [bar]		3	4	5	6	7	8	Vol [L]
Height [mm]	160	1.1	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	1.20
	150	1.4	1.8	2.4	2.8	3.4	3.8	1.12
	140	1.6	2.2	2.8	3.3	3.9	4.5	1.10

หาพื้นที่หน้าตัดสุทธิ (Effective Area) ในทุกความดันจะได้ โดยให้ความที่ออกแบบคือ 150 mm เป็น A_1

$$A_1 = \frac{\text{Force}}{\text{Pressure}}$$

ตารางที่ จ.3 ตารางแสดงพื้นที่หน้าตัดสุทธิของถุงลมที่ความสูง 140,150,160 mm

Pressure [bar]		3	4	5	6	7	8
Area	Ae	0.003667	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
	A1	0.004667	0.0045	0.0048	0.004667	0.004857	0.00475
	Ac	0.005333	0.0055	0.0056	0.0055	0.005571	0.005625

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลงค่าความดันเกจตามตารางให้เป็นความดันสัมบูรณ์เป็นไปตามตารางที่ จ.4

ตารางที่ จ.4 ความดันเกจและความดันสัมบูรณ์ในถุงลม

Pg1 =	300	400	500	600	700	800
Pa1 =	401.3	501.3	601.3	701.3	801.3	901.3

คำนวณหาค่านิจสปริงจากสมการที่ (2.7) ต่อไปจะเป็นตัวอย่างการคำนวณที่ 3 bar

$$K_s = \frac{P_{a1}\left[A_c\left(\frac{V_1}{V_c}\right)^{1.38} - A_e\left(\frac{V_1}{V_e}\right)^{1.38}\right] - 101.3(A_c - A_e)}{\Delta h_c + \Delta h_e}$$

$$K_2 = \frac{401.3\left[0.005333\left(\frac{1.12}{1.10}\right)^{1.38} - 0.003667\left(\frac{1.12}{1.20}\right)^{1.38}\right] - 101.3(0.005333 - 0.003667)}{(160-140)\times 10^{-3}}$$

$$K_2 = 34.37595 \ \text{kN/m}$$

คำนวณให้ครบทุกความดันจะเป็นไปตามตารางที่ จ.5

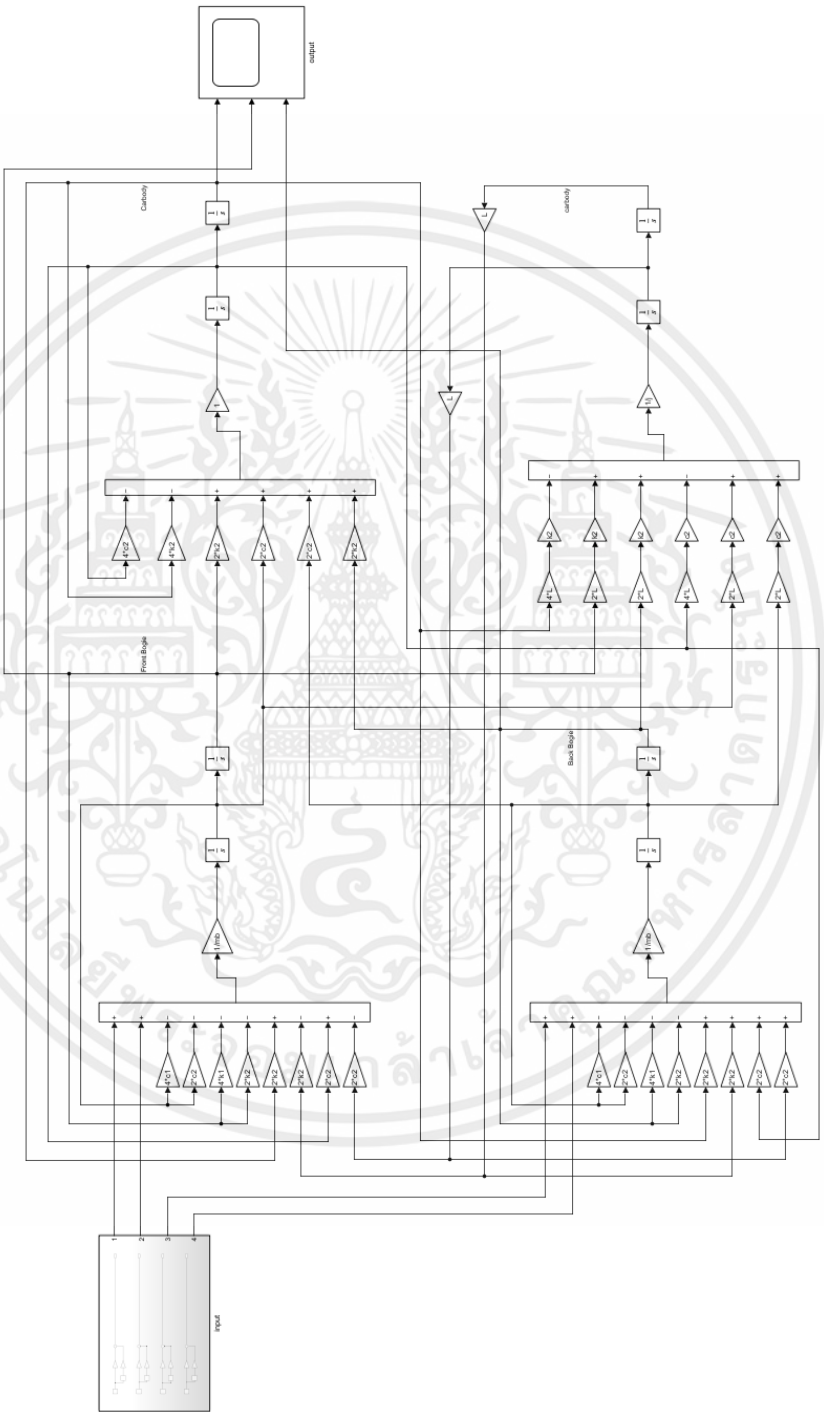
ตารางที่ จ.5 ค่านิจสปริงในแต่ละความดันที่ความสูง 150 mm

Pressure [bar]	3	4	5	6	7	8	Vol [L]
Force [kN]	1.4	1.8	2.4	2.8	3.4	3.8	1.12
Spring rate [kN/m]	34	43	55	63	75	88	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

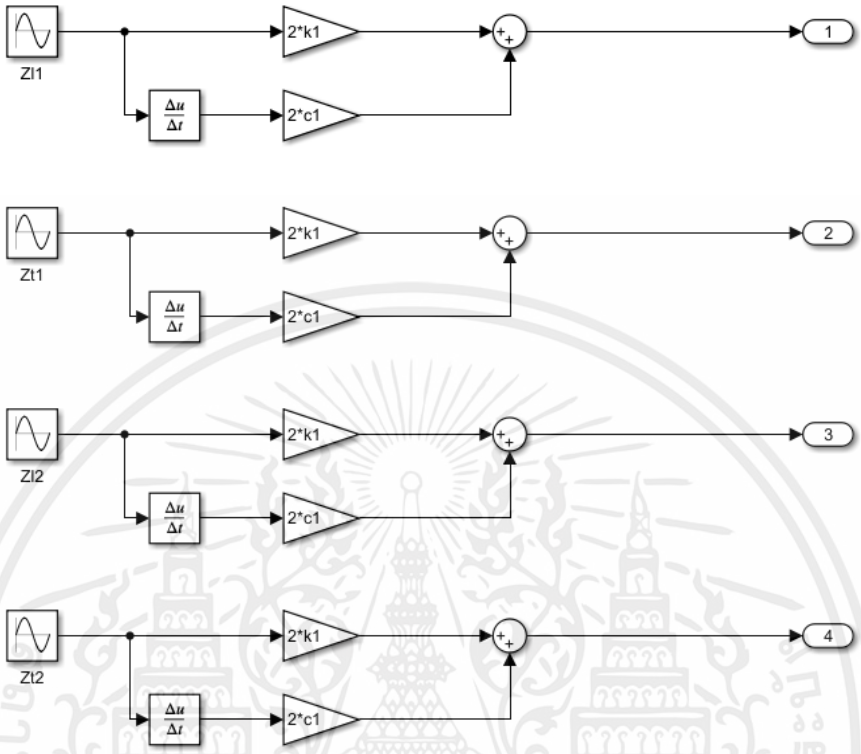
ภาคผนวก ฉ.

แบบจำลองการสั่นสะเทือนแบบ 4 องศาอิสระด้วยชุดคำสั่งของโปรแกรม Simulink



รูปที่ ฉ.1 แบบจำลอง Block diagram ของการสั่นสะเทือนแบบ 4 องศาอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ.2 ค่าการกระตุ้นจากผิวราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

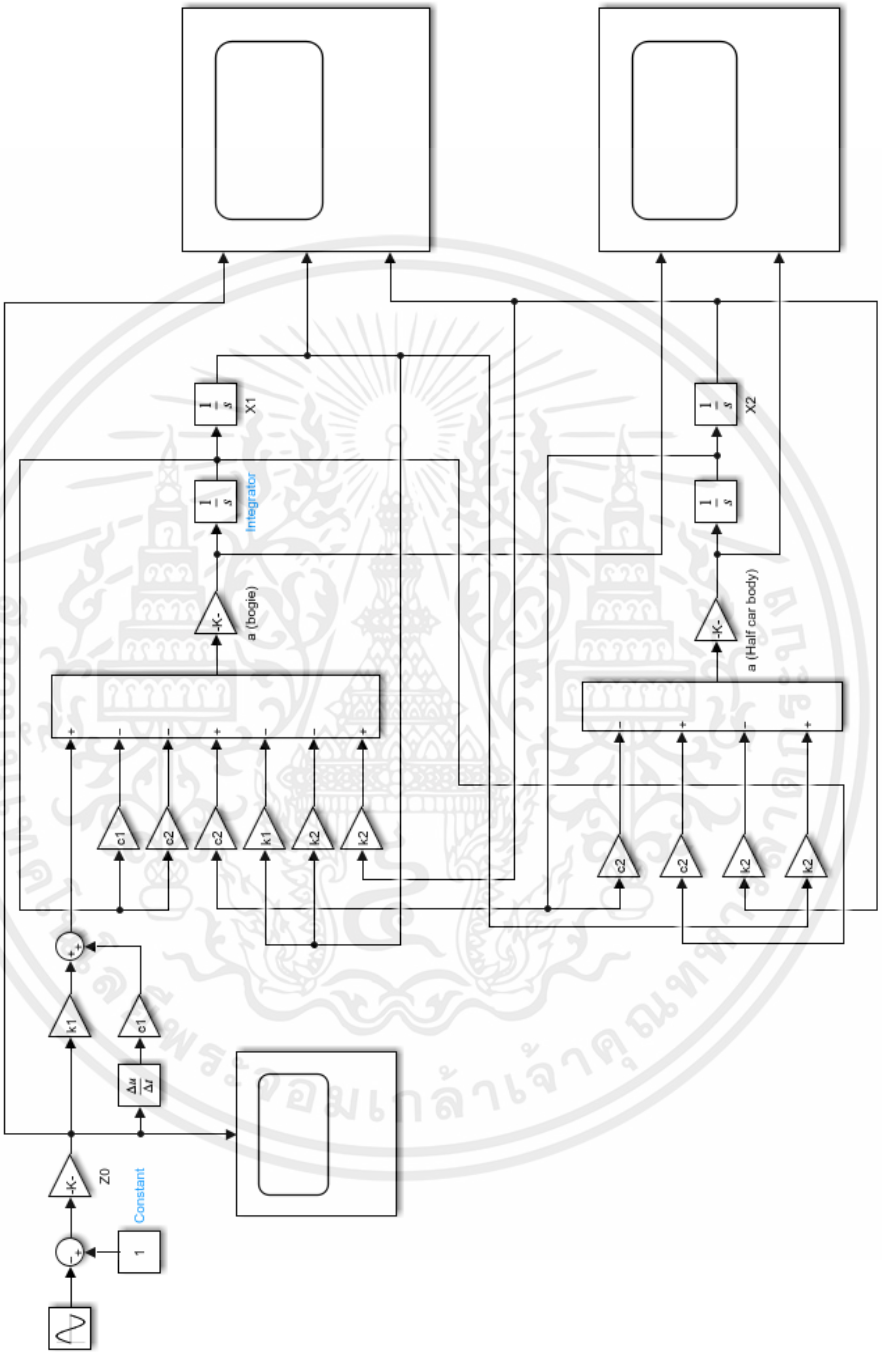
ตารางที่ ฉ.1 ตารางเก็บค่าการสั่นสะเทือนในแนวตั้งและการสั่นแบบกระดก

ความเร็วของรถ (km/hr)	Zc (mm)	acc car body (cm/s^2)	angular (mrad)	angular acc. ($crad/s^2$)
0.10	0.99	0.001	1.98	1.88E-05
0.50	1.00	0.0337	1.99	0.000607
1.00	1.02	0.137	2.03	0.00253
2.00	1.08	0.585	2.16	0.0105
3.00	1.19	1.46	2.39	0.0262
4.00	1.38	3.00	2.76	0.0539
5.00	1.72	5.83	3.44	0.105
6.00	2.43	11.8	4.86	0.223
7.00	4.45	31.2	8.90	0.630
8.00	7.12	61.4	14.2	1.18
9.00	2.86	31.7	5.72	0.565
10.00	1.57	21.2	3.13	0.381
11.00	1.03	16.9	2.07	0.305
12.00	0.75	14.7	1.50	0.267
13.00	0.58	13.3	1.16	0.244
14.00	0.47	12.3	0.930	0.232
15.00	0.38	11.7	0.767	0.217
16.00	0.32	11.2	0.645	0.210
17.00	0.28	10.8	0.552	0.205
18.00	0.24	10.5	0.479	0.202
19.00	0.21	10.3	0.420	0.199
20.00	0.19	10.1	0.372	0.197

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ช.

แบบจำลองการสั่นสะเทือนแบบ 2 องศาอิสระด้วยชุดคำสั่งของโปรแกรม Simulink



รูปที่ ช.1 แบบจำลอง Block diagram ของการสั่นสะเทือนแบบ 2 องศาอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้