การศึกษาตัวหน่วงแบบใช้ของไหลหนืดยืดหยุ่นสำหรับการลดการสั่นบนพื้นจำลอง

Study of Viscoelastic Dampers for Reducing Vibration on Imitated Road Surface

กิตติธัช วงศ์วัชรไพบูลย์
จารุวิณ อินทรัตน์
พีรวิชญ์ ทองไพฑูรย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาตัวหน่วงแบบใช้ของไหลหนืดยืดหยุ่นสำหรับการลดการสั่นบนพื้นจำลอง

Study of Viscoelastic Dampers for Reducing Vibration on Imitated Road Surface

กิตติธัช วงศ์วัชรไพบูลย์
จารุวิณ อินทรัตน์
พีรวิชญ์ ทองไพฑูรย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study of Viscoelastic Dampers for Reducing Vibration on Imitated Road Surface

KITTITUCH WONGWATCHARAPAIBOON

JARUWIN INTHARAT

PHEERAVICH THONGPAITOON

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาตัวหน่วงแบบใช้ของไหลหนืดยืดหยุ่นสำหรับการลดการสั่นบนพื้นจำลอง

กิตติธัช วงศ์วัชรไพบูลย์	59010116
จารุวิณ อินทรัตน์	59010191
พีรวิชญ์ ทองไพฑูรย์	59010989
ดร.บำรุง พ่วงเกิด	อาจารย์ที่ปรึกษา
อาจารย์สยาม สงวนรัมย์	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ปีการศึกษา 2562

บทคัดย่อ

โครงงานศึกษาการลดแรงสั่นสะเทือน โดยเฉพาะการส่งแรงสั่นสะเทือนผ่านไปสู่พื้นจำลอง แนวคิดคือการใช้ตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่น ซึ่งมีคุณสมบัติที่แสดงทั้งความหนืดและความยืดหยุ่นรวมเข้าด้วยกัน เมื่อออกแรงกระทำต่อของไหลเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง แต่เมื่อปล่อยแรงออกของไหลสามารถคืนรูปร่างเดิมได้ ทำให้ความหนืดมีค่าไม่คงที่เมื่อได้รับแรงกระทำ โดยของไหลที่นำมาทดลองเป็นส่วนย่อยของของไหลหนืดยืดหยุ่น คือ ของไหลชนิดนอนนิวโตเนียน การทดลองประกอบด้วยกันสองขั้นตอน ขั้นตอนแรก คือการทดลองด้วยเครื่องทดลองการสั่นสะเทือนที่วัดการสั่นสะเทือนออกมาเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการสั่นสะเทือนกับเวลา เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของของไหลหนืดยืดหยุ่น และพบว่าส่งผลต่อการลดการสั่นสะเทือนของระบบ จึงนำไปสู่การทดลองขั้นตอนที่สองคือการทดลองด้วยชุดพื้นจำลองที่วัดการสั่นสะเทือนออกมาได้เป็นสองกราฟประกอบไปด้วย กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับแรงลัพธ์ หลังจากนั้นนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกันระหว่างระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงกับระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่น และเมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ทำให้ทราบว่าตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นมีคุณสมบัติในการลดและดูดซับการสั่นสะเทือนแปรผันตามแรงและความเร่งที่มากระทำ

คำหลัก **:** ตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่น การลดการสั่นสะเทือน และ นอนนิวโตเนียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study of Viscoelastic Dampers for Reducing Vibration on Imitated Road Surface

KITTITUCH WONGWATCHARAPAIBOON	59010116
JARUWIN INTHARAT	59010191
PHEERAVICH THONGPAITOON	59010989
Dr.BUMROONG PUANGKIRD	Advisor
SAYAM SAGUANRUM	Co. Advisor

Year 2019

ABSTRACT

This project has been conducted on how to reduce vibration especially, transmission from force to the imitated road surface. The concept is using viscoelastic dampers which have both viscosity and elastic. When the force is applied, fluid appearance has been changed. If released force fluid could be returned to the original shape, so the viscosity is not constant. The fluids that use in the experiments are the subset of viscoelastic fluids which have a property of Non-Newtonian. As for the experiments, there are two processes. The first process is the vibration test machine which has a graph of the relationship between vibration distance & time for study mechanical properties of the viscoelastic fluid and it affected to reducing vibration of the system. And the second process is imitated road surface set which has two graphs including the relationship between vibration distance & frequency and vibration acceleration & force. After that comparing the results of experiments between the viscoelastic damped system and the undamped system. As the results of the experiments, it has characteristics of reducing and absorbing vibration vary on force and acceleration.

Keywords **:** Viscoelastic Damper, Reducing Vibration and Non-Newtonian

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประสบผลสำเร็จลุล่วงตามเป้าหมายได้เป็นอย่างดี เนื่องมาจากการได้ประสิทธิ์ประสานวิชาความรู้ทั้งยังให้ข้อมูล ข้อเสนอแนะ และความคิดเห็นจาก ดร.บำรุง พ่วงเกิด ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์สยาม สงวนรัมย์ และรองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข ที่ช่วยเหลือในกระบวนการดำเนินงานวิจัยทดลอง และการสนับสนุนส่งเสริมในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตราภรณ์ วงศางาม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร ที่ช่วยแนะนำ ให้ความรู้ และปรับปรุงวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้ามีความรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และความกรุณา ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณบุคคลทั้งสาม ได้แก่ นายธนวันต์ ห้องดอกไม้ นายเอกชัย จันทโรภาสกร และนายศุภกร เอื้อปัญจะศิลา สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเหล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษา ปรับปรุงแก้ไข และเอื้อเฟื้อเผื่อแผ่สถานที่ในการทำงาน

ขอกราบขอบพระคุณนายวรวงศ์ วงศ์วัชรไพบูลย์ นางวรินทร์ วงศ์วัชรไพบูลย์ บิดามารดาของนายกิตติธัช วงศ์วัชรไพบูลย์ ตามลำดับ นายธีระวุฒิ ทองไพฑูรย์ บิดาของ นายพีรวิชญ์ ทองไพฑูรย์ และรองศาสตราจารย์ ดร.สรรเสริญ อินทรัตน์ นางสุวรรณี อินทรัตน์ บิดามารดาของนายจารุวิณ อินทรัตน์ ตามลำดับ ที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีได้อย่างสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณสมาชิกทุกคนในกลุ่มที่คอยสนับสนุน ช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา รับฟังความคิดเห็น และแก้ไขปัญหาร่วมกัน ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีได้อย่างสมบูรณ์

นายกิตติธัช วงศ์วัชรไพบูลย์

นายจารุวิณ อินทรัตน์

นายพีรวิชญ์ ทองไพฑูรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VIII

สารบัญภาพ IX

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 1

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 1

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา 2

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย 2

1.5 ขอบเขตการวิจัย 2

1.6 ขั้นตอนการศึกษา 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับของไหล 6

2.1.1 ของไหลหนืดยืดหยุ่น 6

2.1.2 ของไหลนิวโตเนียน 6

2.1.3 ของไหลนอนนิวโตเนียน 7

2.1.4 กฎการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงเส้น 8

2.1.5 กฎทรงมวล 9

2.1.6 Kelvin-Voigt model 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการสั่นสะเทือน 10
2.2.1 การเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิก 11
2.2.2 ตัวหน่วง 11
2.2.3 การสั่นสะเทือน 12
2.2.4 การสั่นกำทอน 16
2.3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกการสั่นสะเทือน 16
2.3.1 การสั่นสะเทือนในแนวแกน 16
2.3.2 สปริง 17
2.3.3 โมเมนต์ความเฉื่อย 17
2.3.4 Fast Fourier Transform 18
2.4 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 19
2.4.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลอง ตัวหน่วงของไหลหนืดที่รองรับการสั่นสะเทือนตกค้างที่ความถี่ต่ำในอุปกรณ์เครื่องมือเชิงกล 19
2.4.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตัวหน่วงความหนืดเพื่อลดการเคลื่อนที่ของลมและแผ่นดินไหวจากสิ่งปลูกสร้าง 20

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 21
3.1 หลักการทดลอง 21
3.2 เครื่องทดลองการสั่นสะเทือน 21
3.2.1 อุปกรณ์การทดลอง 22
3.2.2 ขอบเขตที่กำหนด 23
3.2.3 สปริง 23
3.2.4 ตัวหน่วง 27
3.2.5 ขั้นตอนการทดลอง 28
3.3 ชุดพื้นจำลอง 30
3.3.1 วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลอง 31
3.3.2 เครื่องวัดการสั่นสะเทือน 32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 รูปแบบแรงที่กระทำบนพื้นจำลอง 33
3.3.4 การสั่นสะเทือนบนพื้นถนนจริง 35

บทที่ 4 ผลการทดลองการสั่นสะเทือน 37
4.1 ผลการทดลองจากเครื่องทดลองการสั่นสะเทือน 37
4.1.1 ระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วง 37
4.1.2 ระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงน้ำมัน 38
4.1.3 ระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพด 40
4.2 ผลการทดลองจากชุดพื้นจำลอง 41
4.2.1 การใช้บาสเก็ตบอล 42
4.2.2 การเดิน 43
4.2.3 การวิ่ง 45
4.2.4 การกระโดด 46
4.2.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองระยะการสั่นสะเทือนกับแรงที่กระทำ 48
4.2.6 การเปรียบเทียบผลการทดลองความเร่งการสั่นสะเทือนของชุดพื้นจำลอง 48
4.3 ผลการสั่นสะเทือนของพื้นถนน 49
4.3.1 จักรยานยนต์ 49
4.3.2 รถกระบะ 50
4.3.3 รถพ่วง 50
4.3.4 การเปรียบเทียบความเร่งการสั่นสะเทือนกับแรงที่กระทำ 51

บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง 52
5.1 สรุปผลการทดลอง 52
5.2 ข้อเสนอแนะ 55
5.2.1 ประเภทของของไหลหนืดยืดหยุ่น 55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 เครื่องทดลองการสั่นสะเทือน 55
5.2.3 การนำไปประยุกต์ใช้ 55
ภาคผนวก 56
ภาคผนวก ก ข้อมูลจากผลการทดลองการสั่นสะเทือนบนพื้นชุดจำลอง 57
ภาคผนวก ข รายการสัญลักษณ์ 66
อ้างอิง 67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1 แผนการดำเนินงานช่วงระยะเวลาภาคการศึกษาที่ 1 4

1.2 แผนการดำเนินงานช่วงระยะเวลาภาคการศึกษาที่ 2 5

2.1 สูตรการหาโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุต่างๆ 18

3.1 คุณสมบัติต่างๆของตัวเซนเซอร์ 32

4.1 ข้อมูลที่ได้จากกราฟของระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วง 38

4.2 ข้อมูลที่ได้จากกราฟของระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงน้ำมัน 40

4.3 ข้อมูลที่ได้จากกราฟของระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพด 41

4.4 แรงลัพธ์ของระบบ 48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปที่ **หน้า**

2.1 กราฟความสัมพันธ์ elongational viscosity กับ Shear Viscosity 7

2.2 กราฟความสัมพันธ์ความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือน 7

2.3 กราฟความสัมพันธ์ความหนืดกับอัตราการเฉือน 8

2.4 Voigt model 10

2.5 ระบบมวลติดสปริง 13

2.6 แผนภาพวัตถุอิสระและแผนภาพจลศาสตร์ของระบบมวลติดสปริง 13

2.7 ระบบมวลติดสปริงและตัวหน่วง 13

2.8 แผนภาพวัตถุอิสระและแผนภาพจลศาสตร์ของระบบมวลติดสปริงและตัวหน่วง 13

2.9 ระบบมวลติดสปริงและตัวหน่วงที่มีแรงภายนอกมากระทำ 14

2.10 แผนภาพวัตถุอิสระและแผนภาพจลศาสตร์ของระบบระบบมวลติดสปริงและตัวหน่วงที่มีแรงภายนอกมากระทำ 14

2.11 การตอบสนองแบบ Underdamped สำหรับวัดความหน่วง 15

2.12 ลำดับความถี่ 16

2.13 ประเภทของการแปลงฟูเรียร์ 18

2.14 แผนผังการสั่นสะเทือนแบบโยกและตัวอย่างการสั่นของเครื่องมือเชิงกล 19

2.15 โมเดลแบบดั้งเดิมและโมเดลการสั่นแบบโยก 20

3.1 เครื่องทดลองการสั่นสะเทือน 22

3.2 ภาพจำลองเครื่องทดลองการสั่นสะเทือน 22

3.3 มอเตอร์ที่ใช้หมุนกระดาษกราฟ 22

3.4 มวลถ่วง 22

3.5 ที่จับยึดตัวหน่วง 22

3.6 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์การกระจัดกับเวลา 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 ขดลวดสปริง 24
3.8 การตรวจสอบโดยใช้ Dial Indicator 25
3.9 ระบบคานในสภาวะสมดุลรูปแบบเมื่อไม่มีมวลมาถ่วง 25
3.10 ระบบคานในสภาวะสมดุลรูปแบบเมื่อมีมวลมาถ่วง 26
3.11 ระบบคานในสภาวะสมดุลเมื่อมีมวลถ่วง 28
3.12 แผนภาพอิสระของคาน 28
3.13 แผนภาพจลศาสตร์ของคาน 28
3.14 เครื่องวัดความสั่นสะเทือน 31
3.15 รางไม้ 31
3.16 แผ่นไม้ 31
3.17 แป้งข้าวโพดผสมน้ำ 31
3.18 เครื่องวัดการสั่นสะเทือน 32
3.19 ส่วนประกอบเครื่องวัดการสั่นสะเทือน 32
3.20 แผนภาพอิสระของการเดิน 33
3.21 รายละเอียดมวลจักรยานยนต์ 35
3.22 รายละเอียดมวลรถกระบะ 36
3.23 รายละเอียดมวลรถพ่วง 36
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนและเวลาแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วงของการทดลองครั้งที่ 1 37
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนและเวลาแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วงของการทดลองครั้งที่ 2 38
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนและเวลาแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วงของการทดลองครั้งที่ 3 38
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนและเวลาแบบติดตั้งตัวหน่วงน้ำมันของการทดลองครั้งที่ 1 39
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนและเวลาแบบติดตั้งตัวหน่วงน้ำมันของการทดลองครั้งที่ 2 39
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนและเวลาแบบติดตั้งตัวหน่วงน้ำมันของการทดลองครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

..... 39

4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนและเวลาแบบติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพดของการทดลองครั้งที่ 1 40

4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนและเวลาแบบติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพดของการทดลองครั้งที่ 2 40

4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนและเวลาแบบติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพดของการทดลองครั้งที่ 3 41

4.10 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของบาสเก็ตบอลแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วง 42

4.11 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของบาสเก็ตบอลแบบติดตั้งตัวหน่วง 42

4.12 กราฟเปรียบเทียบระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของบาสเก็ตบอล 43

4.13 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของการเดินแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วง 43

4.14 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของการเดินแบบติดตั้งตัวหน่วง..... 44

4.15 กราฟเปรียบเทียบระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของการเดิน 44

4.16 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของการวิ่งแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วง 45

4.17 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของการวิ่งแบบติดตั้งตัวหน่วง 45

4.18 กราฟเปรียบเทียบระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของการวิ่ง 46

4.19 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของการกระโดดแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วง 46

4.20 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของการกระโดดแบบติดตั้งตัวหน่วง 47

4.21 กราฟเปรียบเทียบระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของการวิ่ง 47

4.22 แผนภูมิเปรียบเทียบระหว่างระยะการสั่นสะเทือนกับแรงที่กระทำของผลการทดลองทั้ง 4 รูปแบบ 48

4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของการสั่นสะเทือนกับแรงลัพธ์ที่กระทำ 49

4.24 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของจักรยานยนต์ 49

4.25 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของรถกระบะ 50

4.26 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของรถพ่วง 50

4.27 กราฟความสัมพันธ์ความเร่งของการสั่นสะเทือนกับแรงที่มากระทำ 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องจากการสั่นสะเทือนเป็นปรากฏการณ์ทางกลที่สามารถทำให้โครงสร้างได้รับพลังงานจนก่อให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างและชิ้นงานต่างๆ การสั่นสะเทือนคือการแกว่งหรือสั่นของวัตถุรอบๆจุดสมดุล ยกตัวอย่างเช่นการแกว่งของลูกตุ้ม การสั่นสะเทือนของปั๊มน้ำ และการยืดหดของสปริง เป็นต้น หรือเหตุการณ์ต่างๆ ที่สามารถพบเห็นได้ในชีวิตประจำวัน อาทิเช่น การสั่นสะเทือนของลำโพงหรือเครื่องซักผ้า การสั่นสะเทือนแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆด้วยกัน คือ การสั่นสะเทือนแบบอิสระ เป็นการสั่นที่วัตถุได้รับพลังงานไม่ว่าเป็นพลังงานจลน์หรือพลังงานศักย์โดยปราศจากแรงภายนอกเปรียบได้กับการดึงเก้าอี้ชิงช้าให้มีความสูงระยะหนึ่งแล้วปล่อยให้แกว่งอย่างอิสระ ต่างจากการสั่นสะเทือนแบบบังคับ ที่เป็นการสั่นโดยรับแรงกระทำจากภายนอกอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยความถี่ของการสั่นมีค่าเท่ากับความถี่ของแรงที่กระทำต่อระบบ แรงที่กระทำนี้อาจประกอบไปด้วยแรงเสียดทาน แรงเสริม และแรงหน่วงเปรียบได้กับการสั่นแบบฮาร์มอนิก เพราะฉะนั้นตัวแปรที่สำคัญในการแก้ปัญหานี้คือ ตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นที่ทำหน้าที่ในการลดแรงสั่นสะเทือน โดยตัวหน่วงแต่ละประเภทมีประโยชน์ในการใช้งานที่แตกต่างกันไปในแต่ละช่วงความถี่ เช่น การเกิดปรากฏการณ์ธรรมชาติอย่างแผ่นดินไหวและลมนั้นสำหรับตึกสูงเกิดการสั่นกำทอนที่ความถี่ต่ำ จึงควรใช้ตัวหน่วงของไหลหนืดเพราะตัวหน่วงนี้ตอบสนองต่อความถี่ต่ำได้ดี จึงเป็นเหตุให้ผู้จัดทำได้มุ่งเน้นศึกษาในโครงงานศึกษานี้ ซึ่งโครงงานส่วนใหญ่สนใจเกี่ยวกับการลดการสั่นสะเทือนในโครงสร้างของสิ่งปลูกสร้างต่างๆ แตกต่างจากโครงงานการศึกษานี้ซึ่งมุ่งเน้นไปที่คุณสมบัติของตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นที่ใช้ในชุดพื้นจำลอง

จากปัญหาที่พบทำให้เป็นจุดเริ่มต้นในการทำโครงงานวิจัยเล่มนี้ เพื่อจุดประสงค์ในการควบคุมช่วงความถี่ในการสั่นสะเทือนให้อยู่ในขอบเขตที่สามารถรับได้ กล่าวคือโครงสร้างมีอายุการใช้งานได้นานขึ้นและป้องกันการเกิดความเสียหายกับโครงสร้างนั้นๆ เพราะหากความถี่ของแรงกระทำมีค่าอยู่ในช่วงหรือขอบเขตความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างนั้นๆ ผลที่ตามมาคือ โครงสร้างได้รับความเสียหายที่มาก รวมถึงการสามารถลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมและการเปลี่ยนส่วนประกอบที่มีราคาสูงของถนนหรือโครงสร้างต่างๆ ผลลัพธ์เหล่านี้เกิดขึ้นเนื่องจากการสั่นสะเทือนที่ลดลงนั่นเอง โดยการควบคุมการสั่นสะเทือนสามารถทำได้โดยการติดตั้งตัวหน่วงเข้าไปกับระบบ

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในโครงงานเล่มนี้ทำการศึกษาเพื่อทราบตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อระบบที่ทำให้การสั่นสะเทือนเกิดการเปลี่ยนแปลง และเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมและคุณสมบัติเชิงกลของไหลหนืดยืดหยุ่น ว่าส่งผลต่อการลดการสั่นสะเทือนในรูปแบบใด อีกทั้งเพื่อสังเกตการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการลดการสั่นสะเทือนที่มีแรงมากระทำต่อระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่น และในกรณีที่ระบบปราศจากตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นในรูปแบบของกราฟว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร ทั้งนี้ทั้งนั้นจุดมุ่งหมายเพื่อให้ตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นนี้สามารถลดและดูดซับการสั่นสะเทือนได้เมื่อมีแรงมากระทำ และนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การใช้ตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่น สามารถลดการสั่นสะเทือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อใช้งานในสถานการณ์ที่มีแรงกระทำมาก มีค่าความถี่ในการสั่นสะเทือนที่ต่ำ และมีการออกแรงอย่างต่อเนื่อง โดยตัวหน่วงชนิดนี้แปลงจากพลังงานทางกลไปเป็นพลังงานความร้อน ต่างกับตัวหน่วงทั่วไปที่ลดการสั่นสะเทือนตามสัมประสิทธิ์ความหน่วง

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ตัวหน่วง ณ ที่นี้มีหน้าที่ในการลดการสั่นสะเทือนอยู่ในการสั่นแบบอิสระของระบบที่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน ระบบการสั่นสะเทือนโดยทั่วไปมักแทนการสูญเสียพลังงานจากสาเหตุต่างๆ ว่าเป็นการสูญเสียจากตัวหน่วงการสั่นสะเทือน โดยตัวหน่วงการสั่นสะเทือนที่ใช้กันมากในการวิเคราะห์ปัญหาการสั่นสะเทือน ได้แก่ ตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่น และในการวิจัยนี้ได้ใช้ในส่วนของ ตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่น ซึ่งเป็นตัวหน่วงที่มีการต้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุเมื่อเคลื่อนที่ในตัวกลางที่เป็นของไหล เช่น อากาศ ก๊าซ หรือของเหลว โดยวัตถุดิบที่เลือกนำมาใช้ได้แก่ น้ำมัน และแป้งข้าวโพด ในการทำการทดลองเบื้องต้นผู้วิจัยเลือกใช้คุณสมบัติของน้ำแป้งข้าวโพดผสมน้ำในอัตราส่วนน้ำ 1 ส่วน ต่อ แป้งข้าวโพด 2 ส่วน ทำให้เกิดความหนืดที่มีคุณสมบัติแบบของไหลนอนนิวโตเนียน ที่ค่าความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเมื่อออกแรงกระทำลงไปเนื้อสัมผัสในพื้นที่กดกลายเป็นของแข็งชั่วขณะ เพื่อนำมาพิจารณาว่า ตัวหน่วงของไหลหนืดสามารถลดความถี่การสั่นสะเทือนได้มากน้อยเพียงใด

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับของไหลหนืดคือ Rheology เป็นการศึกษาการไหลของสสารซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในสภาพของเหลว แต่ยังเป็นของแข็งอ่อนหรือของแข็งภายใต้เงื่อนไขที่พวกมันตอบสนองด้วยการไหลของพลาสติกมากกว่าการเสียรูปแบบยืดหยุ่นในการตอบสนองต่อแรงที่ใช้หรือกระทำ อีกทั้งทฤษฎีนี้ยังเป็นศาสตร์แห่งการเสียรูปและการไหลภายในวัสดุ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

มีการแบ่งการทดลองเพื่อศึกษาเรื่องการสั่นสะเทือนแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนแรก คือ เครื่องทดลองการสั่นสะเทือน ที่ศึกษาความแตกต่างทางคุณสมบัติของระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงน้ำมัน ระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่น และระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วง ขั้นตอนที่สอง คือ ชุดพื้นจำลอง ที่ศึกษาระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วงและระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นเพียงชนิดเดียว โดยปรับเปลี่ยนรูปแบบของแรงที่มากระทำต่อระบบ ซึ่งจากการทดลองสนใจอัตราการลดการสั่นสะเทือนของระบบ และความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของระบบ อันประกอบไปด้วยความถี่ แรง และความเร่งที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ในการทำโครงงานศึกษา ได้แบ่งการดำเนินงานเป็น 2 ช่วงเวลาด้วยกัน คือ ช่วงเดือน สิงหาคม พ.ศ. 2562 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2562 เริ่มต้นด้วยการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือน และคุณสมบัติของของไหลหนืด ทำการทดลองจากเครื่องทดลองการสั่นสะเทือนของอาจารย์สยาม สงวนรัมย์ นำกราฟที่ได้มาคำนวณหาค่าต่างๆ ที่ส่งผลต่อการสั่นสะเทือน เมื่อพบว่ากราฟที่ได้ไม่เป็นไปตามทฤษฎีที่ศึกษามาจึงทำการปรึกษาหารือกับอาจารย์สยาม สงวนรัมย์เพื่อหาทางแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นโดยได้ตั้งสมมุติฐานสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นมาตามปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปแบบกราฟที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นได้มีการถอดประกอบเครื่องทำให้ทราบสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น จึงได้ทำการซื้อและเปลี่ยนชิ้นส่วนอะไหล่ที่เกิดปัญหา รวมถึงปรับแต่งค่าต่างๆของเครื่องทดลองที่ส่งผลให้กราฟเกิดความผิดพลาด แล้วทำการประกอบเครื่องกลับเป็นเหมือนเดิม พร้อมทดสอบกราฟที่ได้อีกครั้งหนึ่ง พบว่ากราฟมีค่าสอดคล้องตามทฤษฎี จึงได้ทำการทดลองตามเงื่อนไขที่ต้องการศึกษา จากนั้นได้ออกแบบชุดพื้นทดลองการสั่นสะเทือนและศึกษาซอฟต์แวร์ของอุปกรณ์ทดลอง นำที่ออกแบบไปปรึกษาอาจารย์บำรุง พ่วงเกิด เพื่อให้อาจารย์แนะนำปรับปรุงแก้ไขชุดการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ หลังจากนั้นเดินทางไปซื้อวัสดุในการทดลองแล้วทำการสร้างชุดการทดลอง เมื่อสร้างเสร็จจึงทำการทดลองตามที่ได้วางแผนไว้ จัดทำโครงงานศึกษา และสอบโครงงานศึกษา ซึ่งแผนการดำเนินงานช่วงระยะเวลาภาคการศึกษาที่ 1 แสดงได้ดังตารางที่ 1.1

และในช่วงเวลาที่ 2 ซึ่งเป็นภาคการศึกษาที่ 2 คือ ช่วงเดือน มกราคม พ.ศ.2563 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2563 ได้ทำโครงงานการศึกษาต่อจากภาคการศึกษาที่ 1 โดยขั้นแรกทำการปรึกษาและนำเสนอแนวทางการดำเนินงานที่ได้วางแผนไว้ต่ออาจารย์ที่ปรึกษา จากนั้นทำการตรวจสอบอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้งานเพื่อตรวจสอบดูว่าอุปกรณ์เสื่อมหรือชำรุดหรือไม่ เมื่อตรวจสอบแล้วทำการวัดการสั่นสะเทือนตามแนวทางที่ได้ตั้งไว้คือ ระยะการสั่นสะเทือนและความเร่งบนพื้นถนนจริงที่พาหนะเคลื่อนที่ผ่าน และความเร่งบนพื้นจำลองเพื่อเพิ่มความสมบูรณ์ของโครงงานการศึกษาตามคำแนะนำของอาจารย์ผู้สอบ แล้วตรวจสอบทำการจัดรูปแบบข้อมูลที่ได้มาให้เรียบร้อย เพื่อนำไปใช้ในการนำเสนอ รูปเล่มโครงงาน รายงานความก้าวหน้า และป้ายประกาศ จากนั้นนำไปแสดงให้อาจารย์ที่ปรึกษาตรวจสอบเพื่อพัฒนาและปรับปรุงในส่วนที่บกพร่องไป เมื่อโครงงานการศึกษามีความสมบูรณ์นำส่งไปให้อาจารย์ผู้คุมสอบตามระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งแผนการดำเนินงานช่วงระยะเวลาภาคการศึกษาที่ 2 แสดงได้ดังตารางที่ 1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานช่วงระยะเวลาภาคการศึกษาที่ 1

การดำเนินงาน	สิงหาคม				กันยายน				ตุลาคม				พฤศจิกายน				ธันวาคม			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1.ศึกษาและทบทวนวรรณกรรมบทวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือน	→	→	→					→	→											
2.ปรึกษาหารือรายงานความคืบหน้ากับอาจารย์ที่ปรึกษา	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
3.ทดสอบที่เครื่องทดลองการสั่นสะเทือน				→	→	→														
4.ปรับแต่งและแก้ไขอุปกรณ์						→	→													
5.ออกแบบชุดพื้นจำลอง								→	→											
6.สร้างและประกอบชุดพื้นจำลอง									→	→										
7.ทดสอบการสั่นสะเทือนจากชุดพื้นจำลองที่มีตัวหน่วง											→	→								
8.ทดสอบการสั่นสะเทือนจากชุดพื้นจำลองที่ไม่มีตัวหน่วง											→	→								
9.จัดทำรายงานโครงงานศึกษา									→	→	→	→	→	→	→					
10.สอบโครงงานศึกษา																		→	→	

ตารางที่ 1.2 แผนการดำเนินงานช่วงระยะเวลาภาคการศึกษาที่ 2

การดำเนินงาน	มกราคม				กุมภาพันธ์				มีนาคม				เมษายน				พฤษภาคม			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1.ปรึกษาหารือรายงานความคืบหน้ากับอาจารย์ที่ปรึกษา	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→			
2.ตรวจสอบและเตรียมความพร้อมอุปกรณ์เครื่องมือวัด	→	→																		
3.ทดสอบการสั่นบนพื้นถนนจริง			→	→																
4.สร้างรูปแบบการนำเสนอผลการทดลอง					→	→			→	→	→	→								
5.ทดสอบการสั่นสะเทือนจากชุดพื้นจำลองที่มีตัวหน่วง							→	→	→											
6.ทำป้ายประกาศเพื่อนำเสนอโครงงาน												→	→							
7.จัดทำรายงานโครงงานศึกษา													→	→	→	→				
8.พัฒนาและปรับปรุงโครงงาน						→	→					→	→	→	→	→				
9.สอบโครงงานศึกษา																	→	→		

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวเกี่ยวกับทฤษฎี และงานวิจัยที่ได้ศึกษาค้นคว้าซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับโครงงานการศึกษา ที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่เชื่อมโยงกัน การควบคุมตัวแปรที่ส่งผลต่อการทดลอง การวิเคราะห์ส่วนประกอบของเครื่องทดลองและชุดพื้นการทดลองที่ส่งผลกับค่าที่ได้รับ การเปรียบเทียบคุณสมบัติของของไหลที่บรรจุในตัวหน่วง ทั้งนี้ยังประกอบไปด้วยเหตุและผลของการที่ผลทดลองเกิดความผิดพลาดคลาดเคลื่อนไปจากอุดคติ ซึ่งการศึกษาค้าคว้าในการทำโครงงานการศึกษาเล่มนี้แบ่งเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับของไหล

2.1.1 ของไหลหนืดยืดหยุ่น

ของไหลชนิดนี้ชื่อเรียกว่า viscoelastic fluid เป็นของไหลที่มีคุณสมบัติทั้งความยืดหยุ่นและความหนืด โดยคุณสมบัติทั้งสองแสดงออกมาในเวลาเดียวกัน ทำให้เมื่อออกแรงกระทำต่อของไหล การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกิดขึ้นในทันที เช่นเดียวกับกรณีที่ปล่อยแรงกระทำวัตถุสามารถกลับคืนรูปร่างเดิมได้ โดยที่สมบัติทางด้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างดังกล่าวขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรด้วยกัน ได้แก่ เวลา อุณหภูมิ ความเค้น และอัตราความเครียด

2.1.2 ของไหลนิวโตเนียน

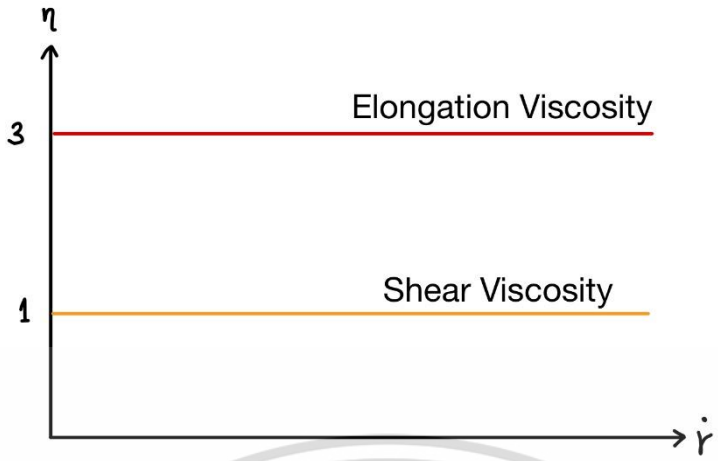
เป็นของไหลเนื้อเดียวกัน ไม่มีอนุภาคแขวนลอย มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนเป็นเส้นตรง ตัวอย่างของไหลประเภทนี้ เช่น น้ำ น้ำมันพืช น้ำส้มสายชู น้ำเกลือ น้ำเชื่อม เป็นต้น โดยค่าของ elongational viscosity เป็น 3 เท่าของ Shear Viscosity สามารถได้รับมาจากสมการความต่อเนื่องสำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ ดังรูปที่ 2.1

$$\eta_e = 3\eta$$

เมื่อ η_e คือ elongational viscosity $(Pa \cdot s)$

η คือ Shear Viscosity $(Pa \cdot s)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

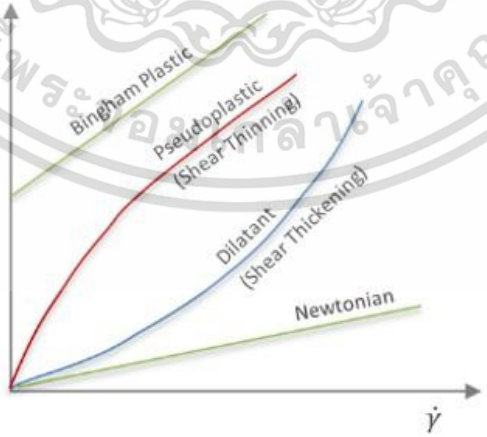


รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ elongational viscosity กับ Shear Viscosity

2.1.3 ของไหลนอนนิวโตเนียน

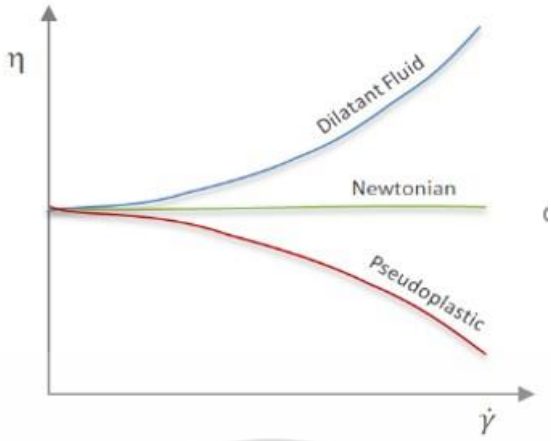
เป็นของไหลที่สามารถเปลี่ยนแปลงความหนืดได้ค่าความหนืดจึงไม่คงที่เมื่อได้รับแรงกระทำ โดยมีคุณสมบัติกึ่งของเหลวกึ่งของแข็งไม่เป็นอันใดอันหนึ่ง ของไหลแบบนอนนิวโตเนียนแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ของไหลแบบนอนนิวโตเนียนที่ไม่ขึ้นกับเวลา และของไหลแบบนอนนิวโตเนียนที่ขึ้นกับเวลา ดังรูปที่ 2.2 สำหรับขอบเขตในการศึกษาทำการเลือกใช้น้ำแป้งข้าวโพด ซึ่งเป็นของไหลแบบนอนนิวโตเนียนที่ไม่ขึ้นกับเวลา ทั้งนี้ของไหลแบบนอนนิวโตเนียนที่ไม่ขึ้นกับเวลาแบ่งย่อยได้ออกเป็นอีก 3 ประเภท ดังรูปที่ 2.3 ได้แก่

1. ของไหลแบบซูโดพลาสติก ซึ่งมีคุณสมบัติเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนทำให้ความหนืดปรากฏลดลง
2. ของไหลแบบไดเลแทนต์ มีคุณสมบัติเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนทำให้ความหนืดปรากฏเพิ่มขึ้น
3. ของไหลแบบบิงแฮมพลาสติก มีคุณสมบัติเมื่อไม่มีแรงมากระทำ ทำให้มีพฤติกรรมเหมือนของแข็ง คือ ไม่มีการไหล แต่เริ่มมีการไหลเมื่อมีแรงมากระทำ โดยแรงที่กระทำต้องมากกว่า yield value



รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ความหนืดกับอัตราการเฉือน

2.1.4 กฎการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงเส้น

เนื่องจากในการพิจารณาของไหลที่อยู่ในตัวหน่วงจำเป็นต้องสนใจเกี่ยวกับโมเมนตัมที่เกิดขึ้นกับของไหล และจากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตันที่พูดถึงเกี่ยวกับกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมที่แรงภายนอกกระทำทั้งหมดผ่านมวลของไหลมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมทั้งหมดโดยแรงภายนอกที่เกิดขึ้นมีสองประเภท คือ แรงในตัวของไหล ยกตัวอย่างเช่น แรงที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลกกระทำกับของไหล และแรงบนพื้นผิว โดยสามารถอธิบายได้จาก Cauchy stress tensor แสดงดังสมการด้านล่าง ซึ่งใช้สำหรับการวิเคราะห์ความเครียดในเนื้อวัสดุ ที่มีการเสียรูปเล็กน้อย สำหรับการเสียรูปมากจำเป็นต้องใช้วิธีการวัดแบบอื่นเช่น Piola–Kirchhoff stress tensor the Biot stress tensor และ the Kirchhoff stress tensor สำหรับสมการเชิงอนุพันธ์การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{D(\rho u)}{Dt} = \nabla \cdot \sigma + \rho g \tag{2.1}$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของไหล $\left(\mathrm{kg/m^3}\right)$

u คือ ความเร็วของไหล $(\mathrm{m/s})$

σ คือ Cauchy stress tensor $\left(\mathrm{N/m^2}\right)$

โดย σ คือ Cauchy stress tensor โดยมักประกอบไปด้วย extra-stress tensor (T) และ isotropic pressure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma = -pI + T \tag{2.2}$$

เมื่อ p คือ ความดัน (pa)

T คือ ความเค้นหนืด $\left(\mathrm{N/m^2}\right)$

I คือ เมตริกซ์เอกลักษณ์

g คือ แรงโน้มถ่วงโลก ขึ้นกับความเร่ง และถูกควบคุมให้อยู่ในรูปของแรงในตัววัตถุ จึงสามารถเขียนอนุพันธ์เชิงวัสดุ ได้ว่า

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \cdot \nabla \tag{2.3}$$

ในกรณีที่ไม่พิจารณา แรงที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลกกระทำกับของไหล สมการการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมแสดงได้ดังนี้

$$\rho\left(\frac{\partial}{\partial t} + u \cdot \nabla\right)u = \nabla \cdot \sigma \tag{2.4}$$

2.1.5 กฎทรงมวล

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในปริมาตรของไหลมีค่าเท่ากับอัตราที่มวลเคลื่อนผ่านพื้นที่ S ณ ตำแหน่งทางเข้า ทำให้ได้สมการว่า

$$\frac{d}{dt}\int_V \rho dV = -\int_S \rho u \cdot n dA \tag{2.5}$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของไหล $\left(\mathrm{kg/m^3}\right)$

u คือ ความเร็วของไหล $(\mathrm{m/s})$

n คือ เวกเตอร์ 1 หน่วยที่มีทิศทางออกจากพื้นผิว

จากสมการด้านบนนำมาจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \tag{2.6}$$

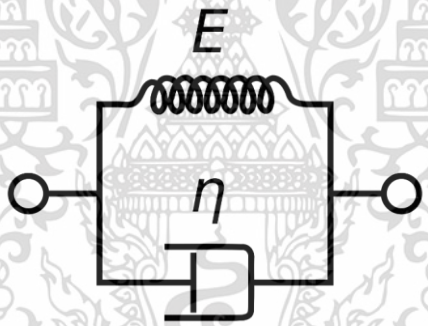
สำหรับอุณหภูมิคงที่และการไหลที่ไม่มีการอัดตัว ที่ซึ่งความหนาแน่นของไหลคงที่ ณ เวลาใดๆ และการกระจายเชิงพื้นที่ ทำให้สามารถลดรูปสมการที่ (2.6) เหลือเป็น

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \tag{2.7}$$

จากสมการที่ 2.7 ทำให้ทราบว่า เมื่อนำของไหลปูรองใต้พื้นถนนคอนกรีต ของไหลไม่มีการเคลื่อนที่ไหลไปตามแนวระนาบ เนื่องจากไดเวอร์เจนซ์ของความเร็วมีค่าเป็นศูนย์

2.1.6 Kelvin-Voigt model

Kelvin-Voigt material เป็นวัสดุของไหลหนืดที่มีคุณสมบัติทั้งความหนืดและความยืดหยุ่นส่วนตัว โมเดลสามารถแสดงโดยตัวลดการสั่นสะเทือนที่มีความหนืดและสปริงที่มีความยืดหยุ่นมาเชื่อมต่อกันแบบขนานดังรูปที่ 2.4 ต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 Voigt model

แต่ถ้านำตัวลดการสั่นสะเทือนที่มีความหนืดและสปริงที่มีความยืดหยุ่นมาเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม เรียกว่า Maxwell Model ซึ่งไม่ได้ถูกกล่าวถึงในโครงงานเล่มนี้

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือนเกิดขึ้นได้เนื่องจากหลายสาเหตุด้วยกันทั้งฐานรับแรงบิดเอียง การเยื้องศูนย์กลาง หรือการบิดงอของชิ้นส่วน ผลที่ได้รับคือ ถ้าการสั่นสะเทือนตรงกับความถี่ธรรมชาติของระบบนั้นๆ ทำให้เกิดความเสียหายอย่างมาก การพิจารณาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อที่สามารถเลือกของไหลที่ใช้ในตัวหน่วงเพื่อลดแรงสั่นสะเทือนและควบคุมปัจจัยที่ส่งผลนั้นๆได้อย่างถูกต้อง ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในความเป็นจริงได้เป็นผลสัมฤทธิ์ตามเป้าหมาย ทั้งนี้ต้องทำการพิจารณาเงื่อนไขในการสั่นสะเทือนด้วยกันหลายแบบเพื่อทราบถึงรูปแบบการสั่นสะเทือนที่แตกต่างกันไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 การเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิก

เป็นรูปแบบการเคลื่อนที่ในลักษณะที่วัตถุเคลื่อนที่กลับไปมาซ้ำตำแหน่งเดิม ซึ่งการสั่นสะเทือนนับเป็นหนึ่งในการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกเช่นกัน เมื่อนำไปวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาทำให้สามารถทราบความถี่และคาบได้จากการที่วัตถุเคลื่อนที่เป็นระยะเวลาหนึ่งจนกลับมาที่ตำแหน่งเดิม จากการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาซ้ำที่ตำแหน่งเดิมๆนั้น ทำให้ได้ความถี่ธรรมชาติเชิงมุมขึ้นดังสมการ

$$\omega_n = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \tag{2.8}$$

เมื่อ ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติเชิงมุม $(\mathrm{rad/s})$

f คือ ความถี่ (Hz)

T คือ คาบ (s)

สำหรับระบบที่มีมวลติดสปริง วัตถุมีการเคลื่อนที่กลับไปมาซ้ำตำแหน่งเดิมเช่นกัน ทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{2.9}$$

เมื่อ k คือ ค่านิจสปริง $(\mathrm{N/s})$

m คือ มวลวัตถุ (kg)

2.2.2 ตัวหน่วง

เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการลดแรงสั่นสะเทือน ผลจากการที่แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของกระบอกลูกสูบที่เคลื่อนผ่านตัวกลางของไหลภายในตัวหน่วง เช่น น้ำมัน แป้งข้าวโพด เป็นต้น ซึ่งในการทดลองกราฟที่ได้จากการสั่นสะเทือนสำหรับการสั่นสะเทือนแบบมีตัวหน่วงและไม่มีตัวหน่วง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัย ทำให้ตัวหน่วงเป็นตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์รูปแบบการสั่นสะเทือน โดยความสัมพันธ์ของแรงต้านทานการเคลื่อนที่เป็นดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = -cv \tag{2.10}$$

เมื่อ F คือ แรงต้านทานการเคลื่อนที่ (N)

c คือ สัมประสิทธิ์ความหน่วง $(\mathrm{N \cdot s/m})$

v คือ เวกเตอร์ความเร็ว $(\mathrm{m/s})$

โดยค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง มีความสัมพันธ์กับความถี่ธรรมชาติเมื่อปราศจากตัวหน่วง ดังต่อไปนี้

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} \tag{2.11}$$

เมื่อ ζ คือ อัตราส่วนความหน่วง

c คือ สัมประสิทธิ์ความหน่วง $(\mathrm{N \cdot s/m})$

m คือ มวลของระบบ (kg)

ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติที่ปราศจากตัวหน่วง $(\mathrm{rad/s})$

สำหรับความถี่ธรรมชาติที่มีตัวหน่วง สามารถหาได้จาก

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \tag{2.12}$$

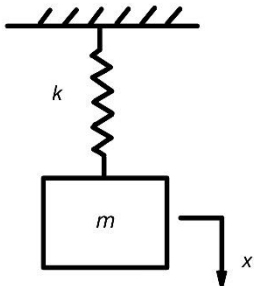
เมื่อ ω_d คือ ความถี่ธรรมชาติที่มีตัวหน่วง $(\mathrm{rad/s})$

2.2.3 การสั่นสะเทือน

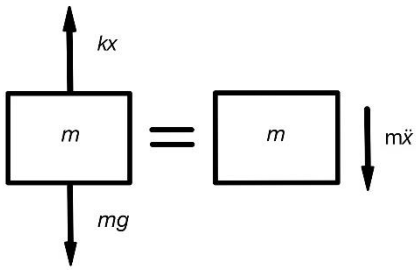
การสั่นสะเทือน คือ การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของอนุภาคหรือมวลรอบๆ ณ ตำแหน่งจุดสมดุล โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่

การสั่นสะเทือนอย่างอิสระ หมายถึง การสั่นสะเทือนของระบบที่มีการตอบสนองกับแรงหรือแรงบิดที่มากระตุ้นสภาวะสมดุลในตอนแรกส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือน โดยขณะที่สั่นสะเทือนนั้นไม่มีแรงใดๆ มากระทำกับระบบเลย ใช้ในการพิจารณาเครื่องทดสอบการสั่นสะเทือนโดยปราศจากมวลถ่วงน้ำหนัก จากรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ระบบมวลติดสปริง



รูปที่ 2.6 แผนภาพวัตถุอิสระและแผนภาพจลศาสตร์ของระบบมวลติดสปริง

$$m\ddot{x} + kx = 0 \tag{2.13}$$

เมื่อ m คือ มวลของระบบ (kg)

$\ddot{x}$ คือ เวกเตอร์ความเร่ง $(\mathrm{m/s^2})$

k คือ ค่านิจสปริง $(\mathrm{N/m})$

x คือ เวกเตอร์ระยะทาง (m)

โดยทางด้านขวาของสมการเป็นศูนย์ เนื่องจากไม่มีแรงภายนอกมากระทำกับระบบหลังจากเกิดการสั่นสะเทือน สำหรับในกรณีมีการติดตั้งตัวหน่วงเข้าไปเพื่อลดการสั่นสะเทือน พิจารณาได้จากสมการดังต่อไปนี้

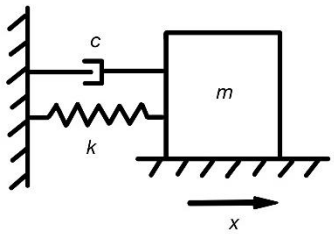
$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{A_1}{A_2}\right) \tag{2.14}$$

เมื่อ ϕ คือ มุมเฟส (rad)

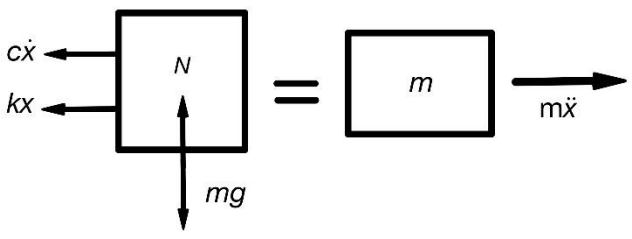
A คือ แอมพลิจูด (m)

ซึ่งผลเฉลยของสมการสามารถเขียนได้ดังนี้

$$x(t) = A_1\cos\omega_n t + A_2\sin\omega_n t = A\sin\left(\omega_n t + \phi\right) \tag{2.15}$$



รูปที่ 2.7 ระบบมวลติดสปริงและตัวหน่วง



รูปที่ 2.8 แผนภาพวัตถุอิสระและแผนภาพจลศาสตร์ของระบบมวลติดสปริงและตัวหน่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \tag{2.16}$$

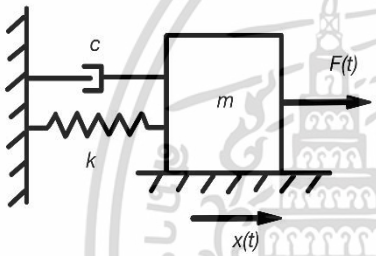
เมื่อ c คือ ค่าคงที่ตัวหน่วง หรือสัมประสิทธิ์ความหน่วง $(\mathrm{kg/s})$

x คือ เวกเตอร์ความเร็ว $(\mathrm{m/s})$

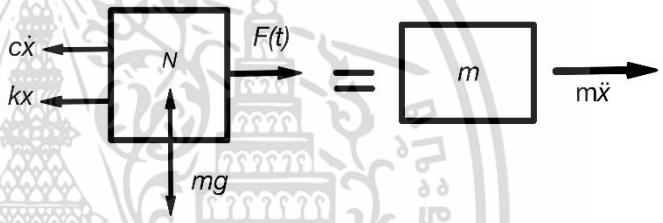
ซึ่งผลเฉลยของสมการระบบมวลติดสปริงและตัวหน่วงจากรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$x(t) = e^{-\xi\omega_n t}\left(A_1\cos\omega_d t + A_2\sin\omega_d t\right) = Ae^{-\xi\omega_n t}\sin\left(\omega_d t + \phi\right) \tag{2.17}$$

การสั่นสะเทือนแบบบังคับ เป็นการมีแรงภายนอกมากระทำอย่างต่อเนื่องขณะที่ระบบสั่นสะเทือน ดังรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10ยกตัวอย่างเช่น การสั่นสะเทือนที่เกิดจากเครื่องยนต์ พื้นถนน ใช้ในการพิจารณาเครื่องทดสอบการสั่นสะเทือนโดยมีมวลถ่วงน้ำหนัก และชุดพื้นจำลองที่เปลี่ยนตัวแปรแรงที่ใส่เข้าไปให้ระบบ โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ดังนี้



รูปที่ 2.9 ระบบมวลติดสปริงและตัวหน่วงที่มีแรงภายนอกมากระทำ



รูปที่ 2.10 แผนภาพวัตถุอิสระและแผนภาพจลศาสตร์ของระบบระบบมวลติดสปริงและตัวหน่วงที่มีแรงภายนอกมากระทำ

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \tag{2.18}$$

เมื่อ m คือ มวลของระบบ (kg)

$\ddot{x}$ คือ เวกเตอร์ความเร่ง $\left(\mathrm{m/s^2}\right)$

c คือ ค่าคงที่ตัวหน่วง $(\mathrm{kg/s})$

$\dot{x}$ คือ เวกเตอร์ความเร็ว $(\mathrm{m/s})$

k คือ ค่านิจสปริง $(\mathrm{N/m})$

x คือ เวกเตอร์ระยะทาง (m)

F คือ แรงภายนอกที่กระทำกับระบบ (N)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งผลเฉลยของสมการสามารถเขียนได้ดังนี้

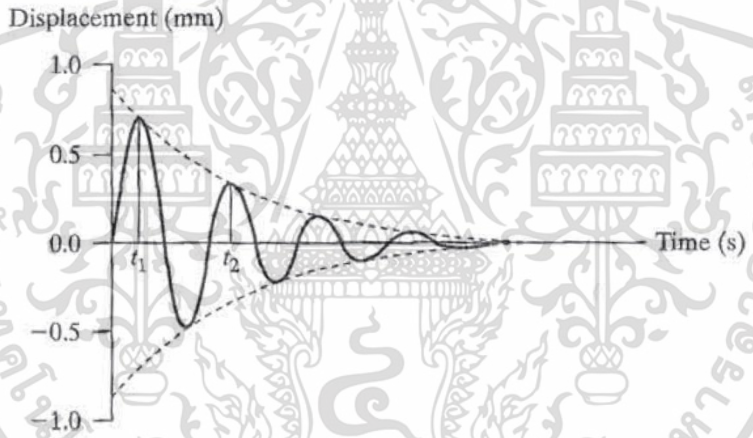
$$x(t) = Ae^{-\xi\omega_n t}\sin\left(\omega_d t + \phi\right) + X\cos\left(\omega t\right) \tag{2.19}$$

$$\phi = \tan^{-1}\frac{\omega_d\left(x_0 - X\cos\theta\right)}{v_0 + \left(x_0 - X\cos\theta\right)\xi\omega_n - \omega X\sin\theta} \tag{2.20}$$

$$A = \frac{x_0 - X\cos\theta}{\sin\phi} \tag{2.21}$$

$$X = \frac{\frac{F}{m}}{\sqrt{\left(\omega_n{}^2 - \omega^2\right)^2 + \left(2\xi\omega_n\omega\right)^2}} \tag{2.22}$$

ระบบที่ใช้ในการทดลองเป็นการสั่นแบบบังคับโดยมีแรงภายนอกที่กระทำขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ต้องการศึกษา โดยแรงมีทั้งในรูปแบบต่อเนื่องและแบบการดลในที่นี้สนใจการสั่นสะเทือนของพื้นถนนที่เกิดจากรถยนต์ที่วิ่งบนพื้นถนน เพราะการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนี้อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่ถนนได้



รูปที่ 2.11 การตอบสนองแบบ Underdamped สำหรับวัดความหน่วง

จากรูปที่ 2.11 สำหรับการพิจารณาการสั่นสะเทือนที่ลดลงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการสั่นสะเทือนกับเวลาที่เกิดขึ้น สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\delta = \ln\left(\frac{x_t}{x_{t+T}}\right) = \zeta\omega_n T \tag{2.23}$$

เมื่อ δ คือ อัตราการลดลงแบบลอการิทึม

x_t คือ แอมพริจูดของคลื่นลูกแรกที่พิจารณา (m)

x_{t+T} คือ แอมพริจูดของคลื่นลูกที่ถัดจากลูกแรก (m)

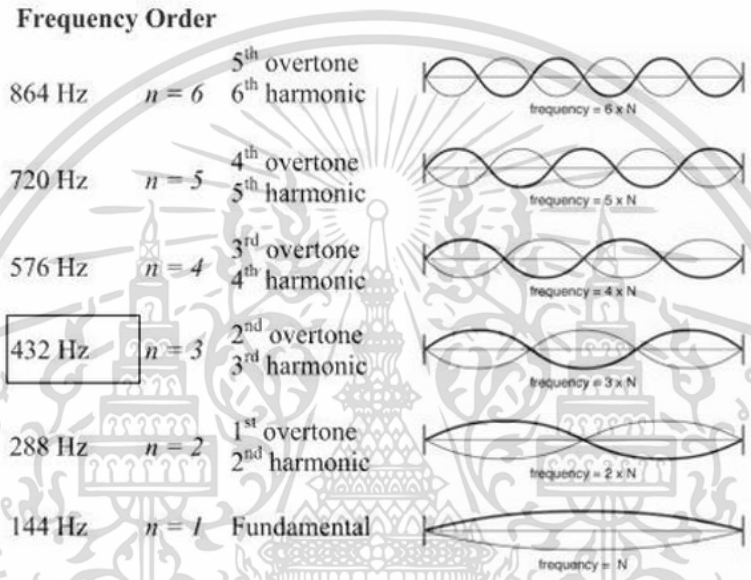
T คือ คาบการสั่นสะเทือน (s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 การสั่นกำทอน

เป็นการที่มีแรงกระทำให้วัตถุสั่น แล้วมีความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นคือวัตถุเกิดการสั่นแรงมากกว่าปกติ ทำให้ ณ ที่ความถี่นี้แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนมีค่ามากที่สุด โดยความถี่นั้นสามารถเรียกได้หลายแบบด้วยกัน คือ หากมีค่าเป็นจำนวนเท่าของจำนวนเต็มของความถี่มูลฐานเดิมที่ก่อให้เกิดการสั่นพ้อง เรียกว่า ฮาร์โมนิก หากเป็นความถี่ของคลื่นนิ่งที่มีค่าถัดจากความถี่มูลฐาน เรียกว่า โอเวอร์โทน แสดงดังรูปที่ 2.12

ซึ่งจากจำนวนเท่าเหล่านี้ทำให้ทราบถึงความถี่ของระบบนั้นที่ทำให้เกิดความเสียหายได้ ผลที่ได้คือ ทำให้เลือกใช้ของไหลที่บรรจุอยู่ในตัวหน่วงได้สอดคล้องกับความเสียหายที่ต้องการป้องกันไม่ให้เกิดขึ้น



รูปที่ 2.12 ลำดับความถี่

2.3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสั่นสะเทือน

ประเด็นหลักที่พึงพิจารณาในการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องการสั่นสะเทือน ประกอบไปด้วยการปรับปรุงแก้ไขชิ้นส่วนของเครื่องทดลอง และวิเคราะห์ชุดพื้นจำลองเพื่อเพิ่มประสิทธิผลประสิทธิภาพของผลลัพธ์ที่ได้รับ จากการทดลอง สังเกตุ และตั้งคำถามถึงผลลัพธ์ที่ออกมาพบว่าไม่เป็นไปตามขอบเขตที่ยอมรับได้ จึงทำการพิจารณาวิเคราะห์ถึงสาเหตุของปัญหาในแต่ละชิ้นส่วนของเครื่องทดลองที่ส่งผล พบว่าสาเหตุมาจากตลับลูกปืนที่เสื่อมสภาพจากการล้า การเกิดช่องว่างของเพลาที่สวมใส่กับคาน และสปริงที่เกิดการบิดตัวและเสียรูป สำหรับในส่วนของชุดพื้นจำลองเมื่อพิจารณาถึงปัญหาที่อาจส่งผลต่อการสั่นสะเทือน พบว่าสาเหตุหลักๆมาจากการที่พื้นไม่มีความสม่ำเสมอส่งผลให้ในแต่ละตำแหน่งที่เกิดแรงกดลง มีระยะกระจัดการสั่นไม่เท่ากัน

2.3.1 การสั่นสะเทือนในแนวแกน

โดยปกติแล้วการสั่นของคานที่ใช้ทดลองเกิดขึ้นในแนวดิ่งเพียงแนวเดียว แต่ถ้าหากว่ามีการเกิดการสั่นในแนวแกนอื่นๆเกิดขึ้นไม่ว่าสาเหตุมาจากการเกิดช่องว่างระหว่างช่องใส่คาน การที่ตัวยึดไม่แน่น หรือแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการที่คานเกิดการเคลื่อนที่ มีผลทำให้ความถี่น้อยลงไปกว่าที่ควรเป็น เพราะว่าการสั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในลักษณะนี้ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานมากขึ้น เนื่องมาจากพลังงานจากการสั่นสะเทือนแทนที่ไปอยู่บนแกนแนวดิ่งทั้งหมดกลับถูกแบ่งไปให้แนวแกนอื่นๆ ในส่วนของชุดพื้นจำลองนั้นมีการเกิดการสั่นในแนวแกนอื่นๆ เช่นกัน โดยอาจเกิดการไถลของชุดพื้นจำลองส่งผลให้พลังงานที่ทำให้เกิดการสั่นลดลง ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นทำให้คานหยุดสั่นเร็วขึ้น ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการทดลอง

2.3.2 สปริง

เนื่องจากว่าการทดลองนี้เป็นการสั่นสะเทือนโดยมีอุปกรณ์ทดลองหลักคือสปริง ตัวสปริงไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากอายุการใช้งานของสปริงที่ใช้มานานพอสมควรจนเกิดความเสื่อมสภาพ การบิดตัวและเสียรูปของสปริงส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องทดลองทั้งหมด รวมทั้งการไม่เยื้องศูนย์ของตัวสปริงเช่นกัน เมื่อวิเคราะห์ตัวอุปกรณ์ที่ใช้แล้วอาจมีการปรับเปลี่ยนหรือแก้ไขตัวสปริงเพื่อลดความคลาดเคลื่อนและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในผลลัพธ์ของการทดลอง

$$F = kx \tag{2.24}$$

$$k = \frac{Gd^4}{8D^3 n_a} \tag{2.25}$$

$$D = D_o - d \tag{2.26}$$

เมื่อ G คือเชียร์โมดูลัสของวัสดุ (Pa)

d คือเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดสปริง (m)

D_o คือเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกของสปริง (m)

D คือเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของสปริง (m)

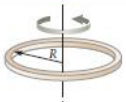
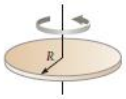
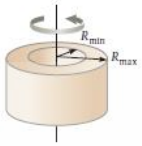
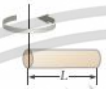
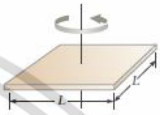
n_a คือจำนวนคอยล์ของสปริง

2.3.3 โมเมนต์ความเฉื่อย

สำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่เชิงโมเมนต์ตัม ตัวแปรที่อยู่ในสมการที่มีความสำคัญในกระบวนการคำนวณ คือ โมเมนต์ความเฉื่อย เพราะบ่งบอกถึงคุณสมบัติของวัตถุว่ามีค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเชิงมุมรอบแกนหมุนที่กำหนดอย่างไร เนื่องจากวัตถุทุกชนิดรักษาสภาพหยุดนิ่งหรือสภาพการเคลื่อนที่ให้คงที่ แสดงออกมาเป็นเส้นตรงจนกระทั่งมีแรงลัพธ์ที่ไม่เป็นศูนย์มากระทำกับระบบ ซึ่งจากกฎของนิวตันที่ได้กล่าวมานั้น ทำให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุต่างๆที่อยู่ในระบบมีความสำคัญและต้องนำมาพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สูตรการหาโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุต่างๆ

Object	Shape	Object	Shape
Hoop $I = mR^2$		Rod pivoted at center $I = \frac{1}{12}mL^2$	
Solid sphere $I = \frac{2}{5}mR^2$		Pulley/cylinder/disc $I = \frac{1}{2}mR^2$	
Spherical shell $I = \frac{2}{3}mR^2$		Wheel or hollow cylinder $I = \frac{1}{2}m(R_{max}^2 + R_{min}^2)$	
Rod pivoted at one end $I = \frac{1}{3}mL^2$		Solid square plate with axis perpendicular to plate $I = \frac{1}{12}mL^2$	

Note: In each case, m is the total mass of the object.

2.3.4 Fast Fourier Transform

เทคนิคการวิเคราะห์ฟูเรียร์ เป็นเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ระบบและการวิเคราะห์สัญญาณเมื่อสัญญาณที่เป็นคาบ หรือสัญญาณที่ไม่เป็นคาบแต่มีพลังงานจำกัด แบ่งประเภทได้ดังรูปที่ 2.13 ทั้งนี้การใช้อนุกรมฟูเรียร์และการแปลงฟูเรียร์มีข้อจำกัด คือ สัญญาณที่ได้จากการวัดไม่สามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันแบบปิด (Closed-form Function) และมีลักษณะเป็นจุดๆ สัญญาณลักษณะนี้อยู่ในรูปแบบไม่ต่อเนื่อง

สัญญาณตามปกติสามารถแก้ปัญหาได้โดย DFT (Discrete Fourier Transform) ที่เป็นวิธีการแปลงลำดับของตัวเลขทั้งที่เป็นจำนวนจริงและจำนวนเชิงซ้อน แต่เนื่องจากสัญญาณจากการสั่นสะเทือนมีความซับซ้อนมากทำให้การคำนวณแบบ DFT ใช้เวลานานเกินไป จึงแก้ไขปัญหาด้วยการใช้อัลกอริธึมชื่อ FFT (Fast Fourier Transform)

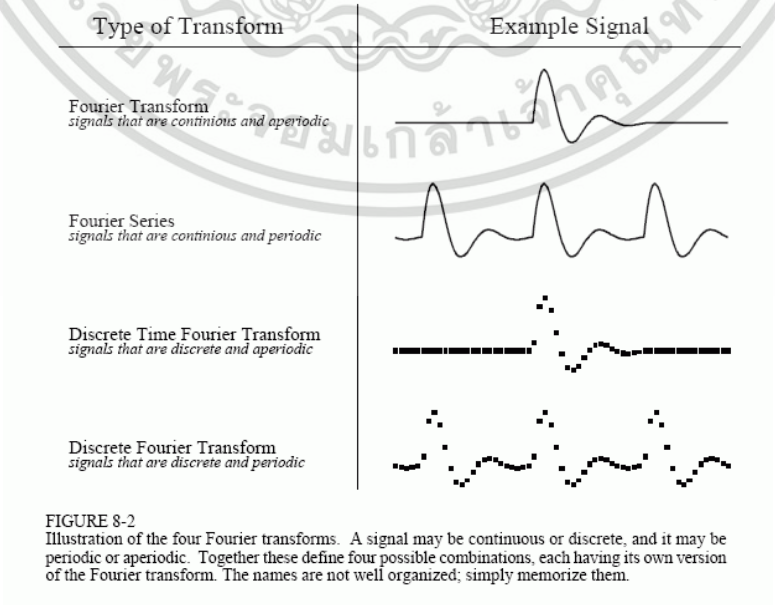


FIGURE 8-2
Illustration of the four Fourier transforms. A signal may be continuous or discrete, and it may be periodic or aperiodic. Together these define four possible combinations, each having its own version of the Fourier transform. The names are not well organized; simply memorize them.

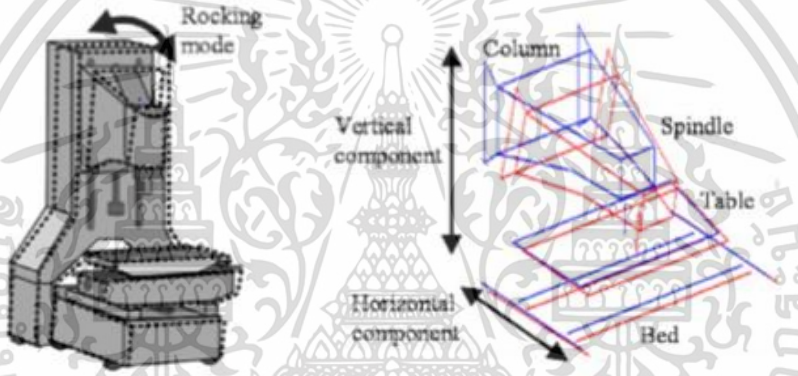
รูปที่ 2.13 ประเภทของการแปลงฟูเรียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลอง ตัวหน่วงของไหลหนืดที่รองรับการสั่นสะเทือนตกค้างที่ความถี่ต่ำในอุปกรณ์เครื่องมือเชิงกล

Kotaro Mori, Daisuke Kono, Iwao Yamaji และ Atsushi Matsubara ได้ทำศึกษาการสั่นสะเทือนที่เหลืออยู่ซึ่งทำให้ความแม่นยำและผลผลิตของเครื่องจักรลดลง การสั่นสะเทือนโดยการโยกถูกกระตุ้นโดยการป้อนการเคลื่อนไหว การสั่นสะเทือนโดยการโยกเป็นหนึ่งในวิธีการซึ่งเครื่องจักรทั้งหมดสั่นก้องกังวานและเป็นแหล่งทรัพยากรการสั่นสะเทือนที่เหลืออยู่ที่ความถี่ต่ำ คุณลักษณะการสั่นแบบการโยกถูกกำหนดโดยโครงสร้างตัวรองรับเครื่องจักรดังรูปที่ 2.14 ดังนั้นมันจำเป็นที่ต้องเพิ่มการหน่วงของโครงสร้างตัวรองรับเครื่องจักรเพื่อลดการสั่นสะเทือนที่เหลืออยู่จากการสั่นแบบโยก นอกจากนั้นมันสำคัญมากสำหรับเครื่องมือเชิงกลที่ฝืดหรือแข็งที่อเพื่อที่ลดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการขับเคลื่อน ตัวซัพพอร์ตตัวหน่วงไปลดความอ่อนล้าของตัวรองรับเครื่องจักรขณะเพิ่มตัวหน่วง

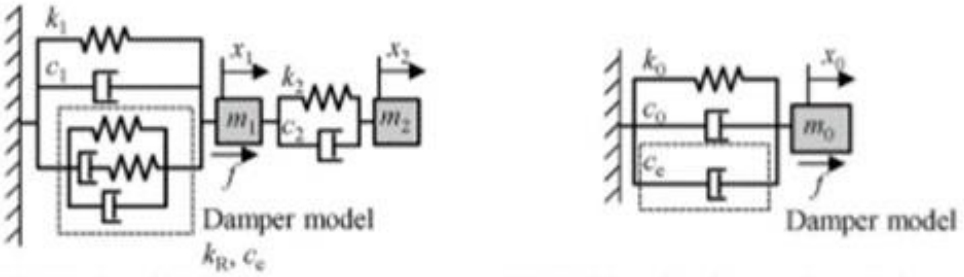


รูปที่ 2.14 แผนผังการสั่นสะเทือนแบบโยกและตัวอย่างการสั่นของเครื่องมือเชิงกล

เพราะฉะนั้นระบบตัวหน่วงแบบยืดหยุ่นที่มีความหนืดถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มการรองรับตัวหน่วงที่ปราศจากการลดความเหนื่อยล้าโดยสนใจที่องค์ประกอบของการสั่นสะเทือนแบบโยก อย่างไรตัวหน่วงที่ใช้หน่วงมีปริมาณที่ต้องใช้ค่อนข้างมากเลยทำให้ยากที่กำหนดพื้นที่ตัวหน่วงโดยเชิงปริมาณในเครื่องมือเชิงกลเพื่อลดการสั่นสะเทือนแบบโยกในระดับต่อไป ในการศึกษาครั้งนี้ตัวหน่วงที่พัฒนาแล้วถูกออกแบบโดยใช้ตัวยืดหยุ่นหนืดทั้ง 4 รูปแบบในการออกแบบดังรูปที่ 2.15 เพราะความไม่เป็นเชิงเส้นของของโมเดล วิธีการคำนวณเวลาโดเมนที่ซ้ำถูกแนะนำสำหรับการซิมมูเลชั่น วิธีนี้ทำให้สามารถประมาณผลกระทบของตัวหน่วงในเครื่องมือเครื่องจักรกลได้ ยึดตามโมเดลในการศึกษานี้ การนำเสนอของระบบตัวหน่วงสามารถประยุกต์เครื่องมือเชิงกลได้หลากหลายเพื่อลดการสั่นสะเทือนที่เหลืออยู่โดยปราศจากการปรับพื้นที่ของแดมเปอร์ของเครื่องมือโดยการลองผิดลองถูกและวิธีที่ผิดๆ

ซึ่งจากงานวิจัยเรื่องตัวหน่วงของไหลหนืดที่รองรับการสั่นสะเทือนตกค้างที่ความถี่ต่ำในอุปกรณ์เครื่องมือเชิงกล ถูกใช้เป็นแนวความคิดในการประยุกต์ตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นในโครงสร้างอื่น ที่ยังไม่ถูกพัฒนาหรือต่อยอด สำหรับโครงงานวิจัยเล่มนี้ คือ โครงสร้างถนน นั่นเอง โดยทำการทดลองจากการสร้างพื้นจำลองขึ้นมาเพื่อดูผลลัพธ์การลดการสั่นสะเทือนของของไหลหนืดยืดหยุ่นว่ามีประสิทธิภาพอย่างไร มีแนวโน้มที่สามารถนำไปใช้งานในโครงสร้างพื้นถนนจริงๆ ได้หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 โมเดลแบบดั้งเดิมและโมเดลการสั่นแบบโยก

2.4.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตัวหน่วงความหนืดเพื่อลดการเคลื่อนที่ของลมและแผ่นดินไหวจากสิ่งปลูกสร้าง

Bijan Samali และ Kenny Kwok ได้ศึกษาตัวหน่วงหนืดนี้ที่ประสบความสำเร็จในการรวมเข้าด้วยกันในตึกสูง โดยถูกใช้เพื่อกระจายพลังงานในระบบที่เกิดจากลมพัดและแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นกับสิ่งปลูกสร้าง ตัวหน่วงชนิดนี้ค่อยๆลดพลังงานเชิงกลในโครงสร้างอาคารโดยเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน หลายๆปัจจัยไม่ว่าเป็นอุณหภูมิโดยรอบและความถี่กระทบต่อสมถรรภาพและประสิทธิผลของระบบตัวหน่วง ตัวหน่วงหนืดนี้ได้เพิ่มการหน่วงทั้งหมดของโครงสร้าง จากนี้ไปปรับปรุงสมถรรภาพทั้งหมดของสิ่งกระตุ้นต่อสิ่งปลูกสร้าง ประสิทธิผลของตัวหนืดหน่วงนี้ได้ถูกประท้วงทั้งการทดลองโดยนักวิจัยหลายท่านตลอด 25 ปีที่ผ่านมา หอคอยคู่ของตึกเวิล์ดเทรดเซ็นเตอร์ในนิวยอร์กและตึกโคลอมเบียซีเฟิสในเซ็ตเทิลวอชิงตันเป็นตึกอาคารแรกที่ซึ่งได้รับผลประโยชน์จากการติดตั้งตัวหน่วงหนืดนี้ ในการสั่นสะเทือนตัวหน่วงหนืดสามารถร่วมกับไม่ว่าเป็นโครงสร้างใหม่หรือผู้ท้าชิงเก่าสำหรับการปรับปรุงใหม่ของอาคารเดิมที่ซึ่งเพิ่มเติมความสามารถรอบด้านลงไปของตัวหน่วงหนืดนี้

ซึ่งจากงานวิจัยเรื่อง การใช้ตัวหน่วงความหนืดเพื่อลดการเคลื่อนที่ของลมและแผ่นดินไหวจากสิ่งปลูกสร้างนั้น เป็นงานวิจัยที่ช่วยยืดยันว่าของไหลหนืดยืดหยุ่นนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาและปรับปรุงโครงสร้างต่างๆได้ โดยจากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าสำหรับตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นนั้นสามารถช่วยในการลดแรงสั่นสะเทือนได้ดี จึงเหมาะแก่การศึกษาเพื่อนำมาใช้ทดลองในโครงสร้างพื้นถนนจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 หลักการทดลอง

เนื่องจากเป้าหมายของการทดลองเป็นการลดการสั่นสะเทือนในตัวโครงสร้าง ซึ่งในที่นี้คือพื้นถนน โดยการอาศัยตัวหน่วงของไหลหนืดลดการสั่นสะเทือน และกลับสู่สภาวะปกติให้เร็วที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ จึงได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนการทดลองเครื่องทดลองการสั่นสะเทือน เริ่มแรกตรวจสอบและซ่อมแซมอุปกรณ์ทั้งหมด หลังจากนั้นเริ่มทำการทดลองโดยใช้ตัวหน่วง 2 ชนิด ได้แก่ น้ำมัน และน้ำแป้งข้าวโพด จากนั้นแสดงผลลัพธ์ออกมาในรูปแบบของกราฟความมสัมพันธ์ระหว่างคาบกับระยะการสั่นสะเทือน และเมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาวิเคราะห์ทำให้ได้อัตราการลดลงแบบลอการิทึม

ขั้นตอนการทดลองบนชุดพื้นจำลองการสั่นสะเทือน ทำการออกแบบปรับปรุงแก้ไข และพัฒนาชุดการทดลองให้เป็นไปตามที่ต้องการ ใช้ซอฟต์แวร์ VSE004 ในการทดลองตามเงื่อนไขต่างๆ ที่ได้ออกแบบไว้ คือ ปล่อยบาสเก็ตบอลที่ความสูง 2 เมตร การเดิน การวิ่ง และการกระโดด โดยใส่ตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นไว้ข้างในชุดพื้นจำลองเพื่อลดการสั่นสะเทือน เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นจำลองที่ปราศจากตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่น และการเปลี่ยนรูปแบบแรงที่กระทำต่อพื้นจำลองที่เปลี่ยนแปลงไป และเมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาวิเคราะห์ทำให้ทราบถึงการตอบสนองระหว่างระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการดูดซับการสั่นสะเทือน

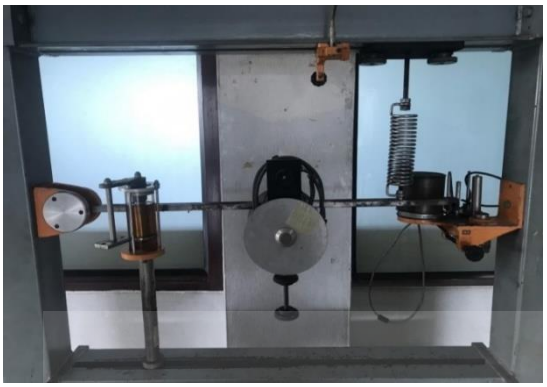
ในส่วนของพื้นถนนจริงทำการวัดการสั่นสะเทือนโดยใช้เครื่องวัดการสั่นสะเทือนติดตั้งไว้บนพื้นถนนที่มียานพาหนะเคลื่อนผ่าน ทำการทดลองโดยจำแนกประเภทเป็นจักรยานยนต์ รถกระบะ และรถพ่วง ซึ่งทำให้ทราบถึงการตอบสนองของพื้นถนนจริงที่แตกต่างกันไปเมื่อรูปแบบยานพาหนะแตกต่างกันทั้งความเร่งและระยะการสั่นของพื้นถนนจริง

3.2 เครื่องทดลองการสั่นสะเทือน

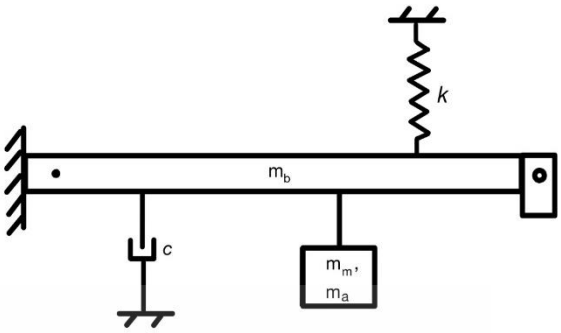
เป็นเครื่องทดลองการสั่นสะเทือนดังรูปที่ 3.1 มีรูปแบบการทดลองเชิงโมเมนตัม โดยการอาศัยแรงกดที่กระทำบนคานให้แกว่งไปมาดังภาพจำลองในรูปที่ 3.2 วัดการสั่นจากการใช้ปากกาที่ใส่ ณ จุดจับยึด ให้เขียนรูปแบบการสั่นสะเทือนลงบนกระดาษกราฟ โดยที่จับยึดกระดาษกราฟหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ 3 รอบต่อวินาที และมีความยาวเส้นรอบวงมีค่าเท่ากับ 292 มิลลิเมตร

ทั้งนี้ชิ้นส่วนของเครื่องทดลองเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการสั่นสะเทือน ซึ่งถูกออกแบบมาให้สูญเสียพลังงานจากแรงเสียดทาน และแรงตามแนวแกนอื่นน้อยที่สุด เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับอุดมคติมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 เครื่องทดลองการสั่นสะเทือน



รูปที่ 3.2 ภาพจำลองเครื่องทดลองการสั่นสะเทือน

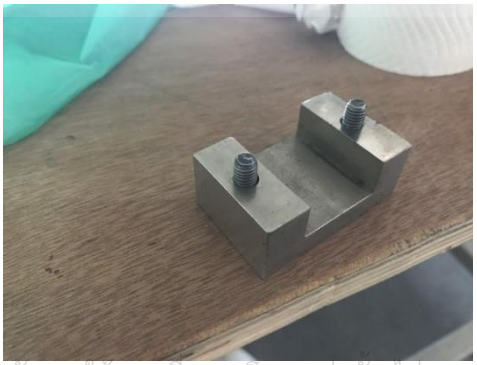
3.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย

1. คาน
2. มอเตอร์ที่ใช้หมุนกระดาษกราฟ ดังรูปที่ 3.3
3. มวลถ่วง ดังรูปที่ 3.4
4. สปริง
5. ตัวหน่วง
6. ที่จับยึดตัวหน่วง ดังรูปที่ 3.5
7. ปากกา

รูปที่ 3.3 มอเตอร์ที่ใช้หมุนกระดาษกราฟ

รูปที่ 3.4 มวลถ่วง



รูปที่ 3.5 ที่จับยึดตัวหน่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ขอบเขตที่กำหนด

1. k คือ ค่านิจสปริงเท่ากับ 3.15 $\mathrm{kN/m}$
2. M_a คือ มวลถ่วงที่ใส่ในการทดลองเท่ากับ 4.845 kg
3. M_b คือ มวลของแท่งคานเท่ากับ 1.92 kg
4. M_m คือ มวลของเครื่องหมุนเท่ากับ 5.186 kg
5. M_p คือ มวลของแท่นใส่ปากกาและปากกาเท่ากับ 0.027 kg
6. M_d คือ มวลของตัวยึดตัวหน่วงกับแท่งบาร์เท่ากับ 0.724 kg
7. L_o คือ ความยาวจากปลายแท่งบาร์ด้านสั้นถึงศูนย์กลางจุดหมุนเท่ากับ 0.043 m
8. L_p คือ ความยาวแท่นใส่ปากกาเท่ากับ 0.020 m
9. l_1 คือ ความยาวจุดศูนย์กลางจุดหมุนถึงจุดกึ่งกลางแท่งบาร์เท่ากับ 0.338 m
10. l_2 คือ ความยาวศูนย์กลางจุดหมุนถึงศูนย์กลางงตำแหน่งที่แขวนมอเตอร์เท่ากับ 0.400 m
11. l_3 คือ ความยาวศูนย์กลางจุดหมุนถึงศูนย์กลางของตำแหน่งแขวนสปริงเท่ากับ 0.650 m
12. l_4 คือ ความยาวศูนย์กลางจุดหมุนถึงจุดกึ่งกลางแท่นใส่ปากกาเท่ากับ 0.729 m
13. l_5 คือ ความยาวศูนย์กลางจุดหมุนถึงจุดกึ่งกลางตำแหน่งยึดตัวหน่วงเท่ากับ 0.250 m
14. l คือ ความยาวแท่งบาร์เท่ากับ 0.762 m

รูปที่ 3.6 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์การกระจัดกับเวลา

3.2.3 สปริง

ในการสร้างสปริงได้ทำการออกแบบเพื่อให้ได้ค่านิจสปริงเท่ากับ 4 กิโลนิวตันต่อเมตร เนื่องจากค่าดังกล่าวเป็นค่าที่มากที่สุดที่เครื่องทดลองสามารถรับได้ไหว สังเกตุจากรูปที่ 3.6 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาโดยปราศจากมวลถ่วงและตัวหน่วง ทำให้ทราบว่าหากใช้สปริงที่มีค่านิจสปริงสูงไปมากกว่านี้ กราฟที่แสดงออกมาอาจมีการขีดเขียนซ้อนทับกันได้ จึงได้มีการออกแบบสัดส่วนของสปริงให้มีขนาดดังต่อไปนี้

1. เส้นผ่าศูนย์กลางของลวดสปริงเท่ากับ 5 mm
2. เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกของสปริงเท่ากับ 49 mm
3. จำนวนคอยล์ของสปริงเท่ากับ 18 coil
4. ความยาวของสปริงเท่ากับ 130 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สปริงที่ใช้เป็นสปริงสำหรับติดตั้งเพื่อทำการทดลองทำจากวัสดุ sus304h stainless steel (S30409) ดังรูปที่ 3.7 โดยมีค่าคุณสมบัติทางกลดังต่อไปนี้

1. ค่าYoung's Modulus เท่ากับ 200 GPa
2. ค่าPoisson's Ratio เท่ากับ 0.28
3. ค่าShear Modulus เท่ากับ 77 GPa

โดยสัดส่วนของสปริงที่ได้ออกมาได้มาจากสมการดังด้านล่าง

$$D = D_o - d$$

$$k = \frac{Gd^4}{8D^3 n_a}$$

$$4000 = \frac{(77\times10^9)(0.005)^4}{8(D_o - 0.005)^3(18)}$$

$$(D_o - 0.005)^3 = 8.355\times10^{-5}$$

$$D_o = 0.0487 \text{ m}$$

รูปที่ 3.7 ขดลวดสปริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากได้รับสปริงมาได้ทำการตรวจสอบค่านิจสปริงว่าเป็นไปตามที่คำนวณออกมาหรือไม่ ประกอบด้วย 2 วิธี ดังนี้

1. การตรวจสอบโดยใช้ Dial Indicator

รูปที่ 3.8 การตรวจสอบโดยใช้ Dial Indicator

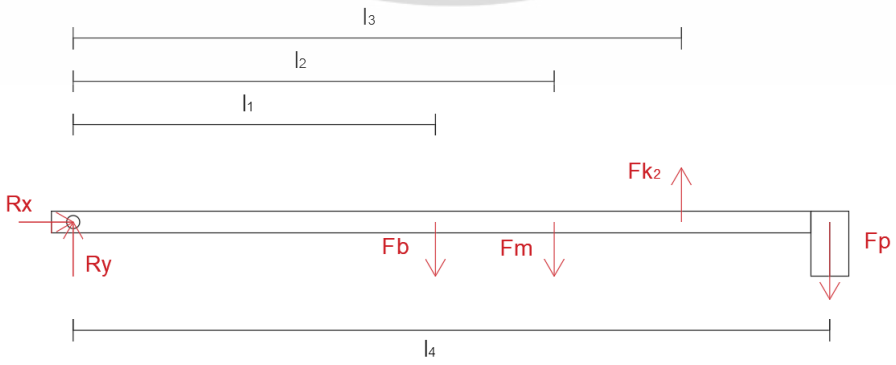
ติดตั้งสปริงกับ Dial Indicator ตั้งให้อุปกรณ์อยู่ ณ ตำแหน่ง 0 มิลลิเมตร ใส่มวลลงไปทีละก้อนวัดระยะที่มวลกด ทำจนใส่มวลลงไป 6 ก้อน ดังรูปที่ 3.8 เพื่อให้เห็นความคงที่ จากนั้นใช้สมการ

$$kx = mg$$

เพื่อหาค่านิจสปริงจากระยะที่มวลแต่ละก้อนกด Dial Indicator นำค่านิจสปริงที่ได้ทั้ง 6 ค่า มาหาค่าเฉลี่ยทำให้ทราบว่าค่านิจสปริงมีค่าเท่ากับ 3.153 กิโลนิวตันต่อเมตร

2. ตรวจสอบโดยการคำนวณจากระบบคานในสภาวะสมดุล

เขียนแผนภาพอิสระของวัตถุ พิจารณาระบบคานในสภาวะสมดุลทั้งรูปแบบเมื่อไม่มีมวลมาถ่วงและมีมวลถ่วง ได้ดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ โดยกำหนดให้



รูปที่ 3.9 ระบบคานในสภาวะสมดุลรูปแบบเมื่อไม่มีมวลมาถ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

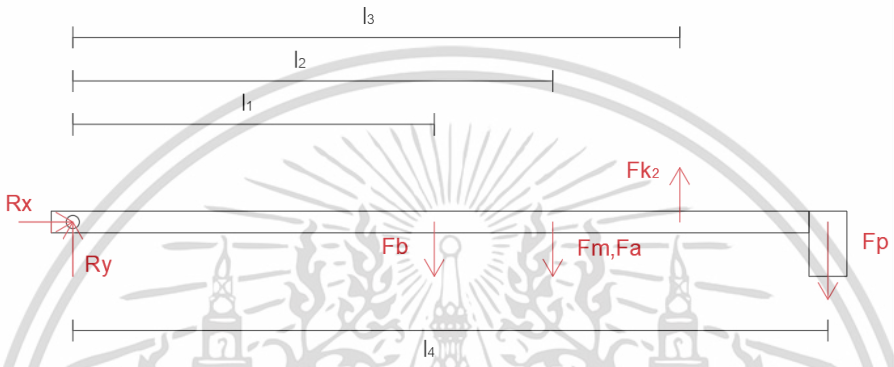
จากรูปที่ 3.9 เนื่องจากพิจารณาระบบคานในสภาวะสมดุลเมื่อไม่มีมวลถ่วง ได้ว่า

$$\sum \overrightarrow{M} = 0$$

$$F_b \cdot l_1 + F_b \cdot l_2 - F_{k_1} \cdot l_3 + F_p \cdot l_4 = 0$$

$$(M_b \cdot g \cdot l_1) + (M_m \cdot g \cdot l_2) - (k \cdot x_3 \cdot l_3) + (M_p \cdot g \cdot l_4) = 0 \qquad (3.1)$$

โดย x_3 คือ ระยะยืดของสปริงจากความยาวปกติของสปริงจนถึงความยาวของสปริงในสภาวะสมดุล



รูปที่ 3.10 ระบบคานในสภาวะสมดุลรูปแบบเมื่อมีมวลมาถ่วง

จากรูปที่ 3.10 เนื่องจากพิจารณาระบบคานในสภาวะสมดุลเมื่อมีมวลถ่วง ได้ว่า

$$\sum \bar{M} = 0$$

$$F_b \cdot l_1 + F_b \cdot l_2 + F_a \cdot l_2 - F_{k_2} \cdot l_3 + F_p \cdot l_4 = 0$$

$$(M_b \cdot g \cdot l_1) + (M_m \cdot g \cdot l_2) + (M_a \cdot g \cdot l_2) - (k \cdot (x_5 + \Delta) \cdot l_3) + (M_p \cdot g \cdot l_4) = 0$$

$$[(M_b \cdot g \cdot l_1) + (M_m \cdot g \cdot l_2) - (k \cdot x_5 \cdot l_3) + (M_p \cdot g \cdot l_4)] + (M_a \cdot g \cdot l_2) - (k \cdot \Delta \cdot l_3) = 0 \qquad (3.2)$$

แทนสมการที (3.2) ใน สมการที่ (3.1) ได้ว่า

$$0 + M_a \cdot g \cdot l_2 - k \cdot \Delta \cdot l_3 = 0$$

$$M_a \cdot g \cdot l_2 = k \cdot \Delta \cdot l_3$$

$$k = \frac{M_a \cdot g \cdot l_2}{\Delta \cdot l_3} \qquad (3.3)$$

จากการแทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการที่ (3.3) รวมถึงระยะยืดสปริงที่มีค่าเท่ากับ 0.8 เซนติเมตร ทำให้ทราบว่าค่านิจสปริงเท่ากับ 3.656 กิโลนิวตันต่อเมตร แล้วพิจารณาค่าเฉลี่ยของค่านิจสปริงจากการคำนวณทั้งสองวิธีจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_{avg} = \frac{k_{Dial} + k_{Bar}}{2}$$

$$k_{avg} = \frac{3.153+3.656}{2} = 3.4045 \text{ kN/m}$$

พบว่าค่านิจสปริงที่ได้จากการตรวจสอบมีความคลาดเคลื่อนจากค่านิจสปริงที่ได้ออกแบบไว้คำนวณจากสมการดังต่อไปนี้

$$\%error = \left| \frac{k_{theory} - k_{actual}}{k_{theory}} \right| \times 100$$

$$\%error = \left| \frac{4-3.656}{4} \right| \times 100$$

$$\%error = 14.89\%$$

ทั้งนี้ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากปัจจัยความเค้น กล่าวคือ ณ ตอนแรกที่สปริงถูกผลิตเสร็จจากโรงงาน เกิดการเยื้องศูนย์กันระหว่างตะขอกับตัวขดลวดสปริง จึงทำการแก้ไขโดยการบิดและดัดเพื่อให้เกิดการร่วมศูนย์กัน จากแรงกระทำที่เกิดขึ้นเป็นสาเหตุที่ทำให้สปริงเกิดความเค้นขึ้นในตัววัสดุส่งผลต่อค่านิจปริงเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

3.2.4 ตัวหน่วง

ของเหลวภายในตัวหน่วงที่ใช้ในการทดลองมีการสับเปลี่ยนเพื่อทดสอบคุณสมบัติของของเหลวที่ใช้โดยนำมาเปรียบเทียบว่าควรใช้ของเหลวชนิดใดในสถานการณ์นั้นๆ โดยของเหลวที่นำมาทดสอบมีดังนี้

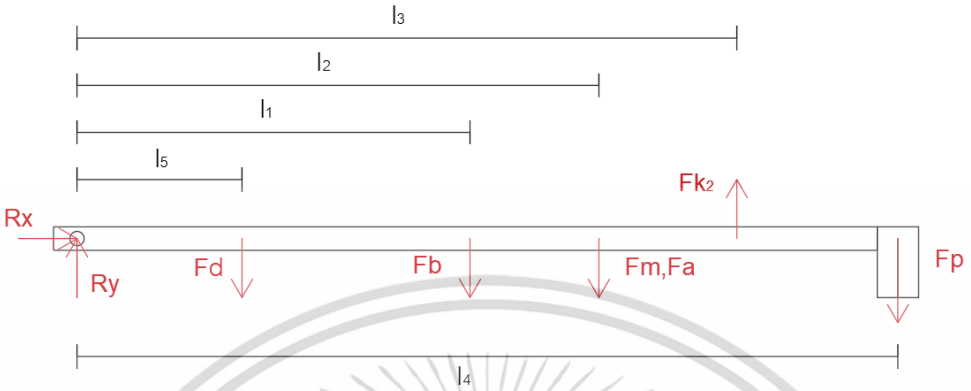
1. น้ำมันเครื่อง (PT Maxnitron 5000)
2. น้ำแป้งข้าวโพด (Oobleck)

น้ำแป้งข้าวโพดที่นำมาใช้มีอัตราส่วนระหว่าง แป้ง ต่อ น้ำ ที่อัตราส่วนหลายๆอัตราส่วน โดยได้ทดสอบที่อัตราส่วน 2.5 : 1 พบว่ามีความหนืดมากเกินไปจนแป้งจับเป็นก้อนทำให้ไม่สามารถใส่หน้าแปลนของตัวหน่วงลงไปในน้ำแป้งข้าวโพดได้ จากนั้นได้มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของน้ำแป้งข้าวโพดเป็น 1.5 ต่อ 1 พบว่าน้ำแป้งข้าวโพดที่ได้ไม่มีการจับตัวกันทำให้ไม่มีคุณสมบัติของไหลหนืด จึงได้ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของน้ำแป้งข้าวโพดอีกครั้ง โดยใช้อัตราส่วนแป้งข้าวโพด 2 ส่วน ต่อน้ำ 1 ส่วน สำหรับอัตราส่วนนี้เป็นอัตราส่วนที่ทำให้แป้งและน้ำจับตัวกันได้พอดีทำให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 ขั้นตอนการทดลอง

จากการพิจารณาระบบคานในสภาวะสมดุลเมื่อติดตั้งตัวหน่วงอยู่ห่างจากจุดหมุน 25 เซนติเมตร และระบบมีมวลถ่วงได้ดังรูปที่ 3.11 ได้สมการดังต่อไปนี้



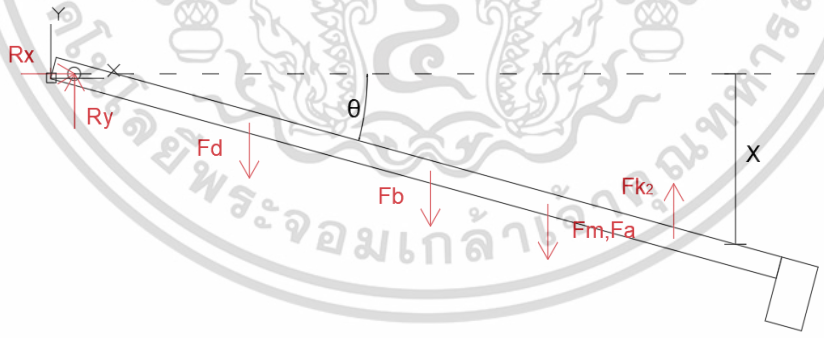
รูปที่ 3.11 ระบบคานในสภาวะสมดุลเมื่อมีมวลถ่วง

$$\sum \vec{M} = 0$$

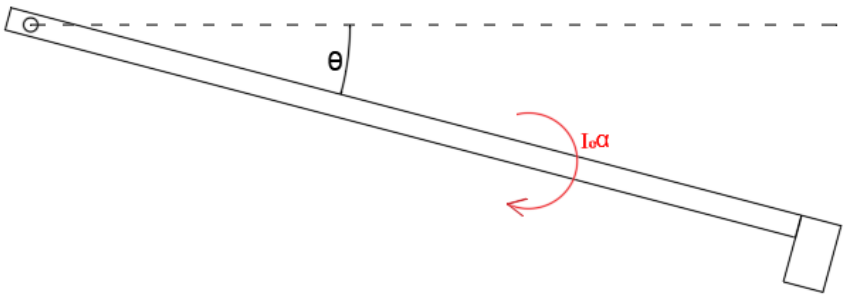
$$F_b l_1 + F_M l_2 + F_a l_2 - F_{k_1} l_3 + F_p l_4 + F_d l_5 = 0$$

$$\begin{aligned}(M_b \cdot g \cdot l_1) + (M_M \cdot g \cdot l_2) + (M_a \cdot g \cdot l_2) \\ -(k \cdot (x_5 + \Delta) \cdot l_3) + (M_p \cdot g \cdot l_4) + (M_d \cdot g \cdot l_5) = 0\end{aligned} \quad (3.4)$$

จากการทดลองการสั่นสะเทือนแบบอิสระโดยที่มีตัวหน่วงอยู่ตำแหน่งดังกล่าว พิจารณาการสั่นสะเทือนของคาน ณ เวลาใดๆ จากรูปที่ 3.12 และรูปที่ 3.13 ได้สมการว่า



รูปที่ 3.12 แผนภาพอิสระของคาน



รูปที่ 3.13 แผนภาพจลศาสตร์ของคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากกำหนดให้ทิศตามเข็มนาฬิกามีค่าเป็นบวก

$$\sum \vec{M}_o = I_o \vec{\alpha}$$

$$F_b l_1 \cos\theta + F_M l_2 \cos\theta + F_a l_2 \cos\theta - F_{k_3} l_3 \cos\theta + F_p l_4 \cos\theta + F_d l_5 \cos\theta - F_c l_5 \cos\theta = I_o \alpha$$

$$(M_b \cdot g \cdot l_1 \cos\theta) + (M_M \cdot g \cdot l_2 \cos\theta) + (M_a \cdot g \cdot l_2 \cos\theta) - (k(x_5 + \Delta + x) l_3 \cos\theta)$$

$$+(M_p \cdot g \cdot l_4 \cos\theta) + (M_d \cdot g \cdot l_5 \cos\theta) - (c\dot{x} l_5 \cos\theta) = I_o$$

จากรูปที่ 3.12 พบว่า x คือ ระยะยืดของสปริงที่ยืดออกมา ณ จุดสมดุลในเวลาใดๆ มีค่าเท่ากับ $l_3 \sin\theta$ และ $\dot{x} = \frac{d}{dt}(l_5 \sin\theta) = l_5 \dot{\theta} \cos\theta$

$$[(M_b \cdot g \cdot l_1) + (M_M \cdot g \cdot l_2) - (k \cdot x_5 \cdot l_3) + (M_p \cdot g \cdot l_4) + (M_d \cdot g \cdot l_5)$$

$$-(k\Delta l_3) + (M_a \cdot g \cdot l_2)]\cos\theta - (k l_3^2 \sin\theta \cos\theta) - (c l_5^2 \dot{\theta} \cos^2\theta) = I_o \quad (3.5)$$

เนื่องจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเกิดมุมเล็กมากจึงสามารถอนุมานได้ว่า

$$\lim_{\theta \to 0} \sin\theta = \theta \text{ และ } \lim_{\theta \to 0} \cos\theta = 1$$

แทนสมการที่ (3.4) ลงในสมการที่ (3.5)

$$(0)(1) - k l_3^2 (\theta)(1) - c l_5^2 \dot{\theta} (1)^2 = I_o \ddot{\theta}$$

$$I_o \ddot{\theta} + c l_5^2 \dot{\theta} + k l_3^2 \theta = 0$$

$$\ddot{\theta} + \frac{c l_5^2}{I_o} \dot{\theta} + \frac{k l_3^2}{I_o} \theta = 0 \quad (3.6)$$

พิจารณาโมเมนต์ความเฉื่อยรอบจุดหมุนของระบบ ได้ว่า

$$I_o = \sum I_i = I_{o,b} + I_{o,m} + I_{o,a} + I_{o,p} + I_{o,d}$$

$$I_o = [\frac{1}{12} M_b L^2 + M_b l_1^2] + (M_M l_2^2) + (M_a l_2^2) + (M_p l_4^2) + (M_d l_5^2) \quad (3.7)$$

แทนสมการที่ (3.7) ลงในสมการที่ (3.6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ddot{\theta}+[\frac{cl_5^2}{\frac{1}{12}M_bL^2+M_bl_1^2+M_Ml_2^2+M_al_2^2+M_pl_4^2+M_dl_5^2}]\dot{\theta}$$
$$+[\frac{kl_3^2}{\frac{1}{12}M_bL^2+M_bl_1^2+M_Ml_2^2+M_al_2^2+M_pl_4^2+M_dl_5^2}]\theta=0$$

เนื่องจากเทียบกับสมการ $\ddot{\theta}+(2\zeta\omega_n)\dot{\theta}+(\omega_n^2)\theta=0$ ได้ว่า

$$2\zeta\omega_n=\frac{cl_5^2}{\frac{1}{12}M_bL^2+M_bl_1^2+M_Ml_2^2+M_al_2^2+M_pl_4^2+M_dl_5^2}$$

$$c=\frac{2\zeta\omega_n}{l_5^2}[\frac{1}{12}M_bL^2+M_bl_1^2+M_Ml_2^2+M_al_2^2+M_pl_4^2+M_dl_5^2] \quad (3.8)$$

และ
$$\omega_n=\sqrt{\frac{kl_3^2}{\frac{1}{12}M_bL^2+M_bl_1^2+M_Ml_2^2+M_al_2^2+M_pl_4^2+M_dl_5^2}} \quad (3.9)$$

จากการทดลองได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลามา ทำให้ทราบความถี่ธรรมชาติของระบบที่มีตัวหน่วง และคำนวณความถี่ธรรมชาติของระบบจากสมการที่ (3.9) จากนั้นแทนลงในสมการด้านล่าง

$$\omega_d=\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

จากการแก้สมการทำให้ทราบค่าอัตราส่วนการหน่วง เมื่อนำไปแทนในสมการที่ (3.8) ทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์ตัวหน่วง ซึ่งบ่งบอกถึงคุณสมบัติของของไหลชนิดนั้นๆ

3.3 ชุดพื้นจำลอง

พื้นจำลองที่สร้างขึ้นมาออกแบบเพื่อใช้ทดสอบการสั่นสะเทือนโดยมีการเปรียบเทียบระหว่างการมีวัสดุช่วยลดการสั่นสะเทือนและการไม่มีวัสดุช่วยลดการสั่นสะเทือน โดยวัสดุที่นำมาใช้เพื่อลดการสั่นสะเทือนเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติของไหลหนืดยืดหยุ่น ซึ่งทำการทดสอบโดยใช้น้ำแป้งข้าวโพดเพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการลดการสั่นสะเทือนของวัสดุนั้นๆ และเปรียบเทียบกับการสั่นสะเทือนเมื่อไม่มีวัสดุที่ช่วยลดการสั่นสะเทือน

ในการทดสอบประกอบไปด้วยแรงกระทำที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนในรูปแบบที่ต่างกัน ได้แก่ การกระโดด การเดิน การวิ่ง การปล่อยวัตถุตกจากที่สูงในลักษณะแรงชั่วขณะ เพื่อหาข้อสรุปว่าวัสดุแต่ละประเภทสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับสถานการณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดการทดลองประกอบด้วย

1. เครื่องวัดการสั่นสะเทือน ดังรูปที่ 3.14
2. น้ำแป้งข้าวโพด
3. รางไม้ ดังรูปที่ 3.15
4. แผ่นไม้ มวล 4.25 กิโลกรัม ดังรูปที่ 3.16
5. เซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือน
6. น็อตตัวเมีย (M10)

รูปที่ 3.14 เครื่องวัดความสั่นสะเทือน

รูปที่ 3.15 รางไม้

รูปที่ 3.16 แผ่นไม้

3.3.1 วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลอง

วัสดุที่นำมาเป็นตัวอย่างในการทดลองอาจมีสถานะเป็นของเหลวหรือของแข็งได้เช่นกัน แต่ต้องมีคุณสมบัติของไหลหนืดยืดหยุ่น ดังรูปที่ 3.17 เพื่อใช้ในการลดการสั่นสะเทือน โดยในที่นี้วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลอง คือ แป้งข้าวโพดผสมน้ำ

รูปที่ 3.17 แป้งข้าวโพดผสมน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

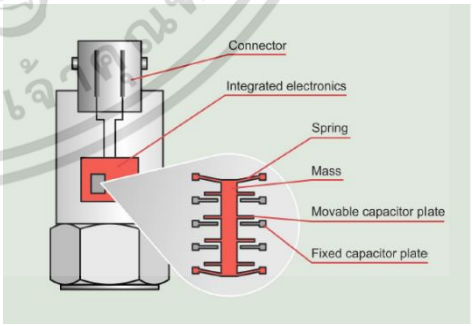
3.3.2 เครื่องวัดการสั่นสะเทือน

เครื่องวัดการสั่นสะเทือน ดังรูปที่ 3.18 ใช้เป็นเครื่องวัดการสั่นสะเทือนโดยใช้หลักการ capacitive หรือเซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ โดยเซนเซอร์ประเภทนี้มีโครงสร้างภายในและภายนอกคล้ายกับการเหนี่ยวนำ เป็นการตรวจจับวัตถุแบบไร้การสัมผัสโดยอิงกับสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามพื้นที่ระหว่างวัตถุกับเซนเซอร์ โดยเมื่อวัตถุมีการสั่นสะเทือนส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำให้สนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ทำให้เซนเซอร์รับรู้ได้ว่ามีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น ส่วนประกอบของตัวเซนเซอร์จากรูปที่ 3.19 นี้สามารถ แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ 1.Movable capacitor 2.Fixed capacitor ส่วนที่เป็น Fixed capacitor เป็นส่วนที่ยึดอยู่กับเซนเซอร์ Movable capacitor เป็นส่วนที่ถูกยึดไว้ด้วยสปริงและมีการเคลื่อนที่เมื่อมีการเกิดการสั่นสะเทือน โดยสัญญาณที่วัดได้จากตัวเซนเซอร์อยู่ในรูปของ FFT สัญญาณความถี่ห่างกันช่วงละ 1.53 เฮิรตซ์ สำหรับคุณสมบัติต่างๆของตัวเซนเซอร์มีดังนี้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติต่างๆของตัวเซนเซอร์

ช่วงการสั่นสะเทือน (m/s^2)	-25 ถึง 25
ช่วงความถี่ (Hz)	0 ถึง 6000
ความไว $(\mu A/g)$	142
เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด $(\%)$	0.2
วัสดุที่ใช้	stainless Steel
อุณหภูมิที่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ $(^{\circ}c)$	-30 ถึง 125

รูปที่ 3.18 เครื่องวัดการสั่นสะเทือน



รูปที่ 3.19 ส่วนประกอบเครื่องวัดการสั่นสะเทือน

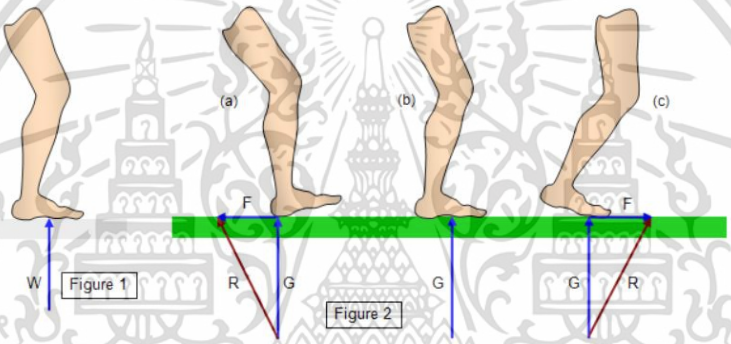
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 รูปแบบแรงที่กระทำบนพื้นจำลอง

กรณีที่ 1 บาสเก็ตบอล ทำการทดสอบแรงที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนจากการปล่อยบาสเก็ตบอลตกอย่างอิสระ กำหนดระยะทางจากตำแหน่งแนวดิ่งที่ความสูง 2 เมตร จากพื้นจำลอง มวลของบาสเก็ตบอลมีค่าเท่ากับ 0.58 กิโลกรัม และความเร็วเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0 เมตรต่อวินาที คำนวณแรงตกกระทบจากสมการดังนี้

$$F = mg$$
$$F = 0.58 \times 9.81$$
$$F = 5.6898 \text{ N}$$

กรณีที่ 2 การเดิน ทำการทดสอบแรงที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนจากการเดินบนชุดพื้นจำลอง โดยผู้ทดลองมีมวล 52 กิโลกรัม จากรูปที่ 3.20 แรงในแนวดิ่งของการเดินมีค่ามากกว่ายืนนิ่งเพราะขณะยืนนิ่งแรงมีความสมดุลกับน้ำหนัก แต่ขณะเดินมีการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมขณะการก้าว ทำให้เมื่อเดินแรงในแนวดิ่งมีค่ามากกว่าน้ำหนักตัว 1.5 เท่า ส่วนค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างเท้าเปล่ากับไม้มีค่าเท่ากับ 0.55



รูปที่ 3.20 แผนภาพอิสระของการเดิน

$$G = 1.5mg$$
$$G = 1.5 \times 52 \times 9.81$$
$$G = 765.180$$
$$F = \mu G$$
$$F = 0.55 \times 765.18$$
$$F = 420.849$$
$$R^2 = G^2 + F^2$$
$$R = \sqrt{G^2 + F^2}$$
$$R = \sqrt{(765.180)^2 + (420.849)^2}$$
$$R = 873.278 \text{ N}$$

กรณีที่ 3 การวิ่ง ทำการทดสอบแรงที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนจากการเดินบนชุดพื้นจำลอง โดยผู้ทดลองมีมวล 52 กิโลกรัม แรงที่เกิดจากการวิ่งมีลักษณะคล้ายกับการเดิน โดยเมื่อวิ่งแรงในแนวดิ่งมีค่ามากกว่าน้ำหนักตัว 2 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G = 2mg$$
$$G = 2\times52\times9.81$$
$$G = 1020.240$$
$$F = \mu G$$
$$F = 0.55\times1020.24$$
$$F = 561.132$$
$$R^2 = G^2 + F^2$$
$$R = \sqrt{G^2 + F^2}$$
$$R = \sqrt{(1020.240)^2 + (561.132)^2}$$
$$R = 1164.370 \text{ N}$$

กรณีที่ 4 กระโดด ทดสอบโดยกำหนดตัวแปรที่ส่งผลต่อแรงที่กระทำจากการกระโดด คือ พิจารณาจากตำแหน่งอ้างอิงที่พื้นในแนวระดับ ณ ความสูง 0 เมตร ระยะจากจุดสูงสุดที่ความเร็วเป็นศูนย์จนถึงตำแหน่งของชุดพื้นจำลองมีค่าเท่ากับ 4.00 เซนติเมตร ระยะที่โครงสร้างพื้นยุบลงไปจากแรงจากการกระโดดมีค่าเฉลี่ยนเท่ากับ 6.56 มิลลิเมตร และมวลของผู้ทดลองมีค่า 52 กิโลกรัม ทำให้ทราบแรงที่กระทำต่อพื้นจำลองจากการคำนวณต่อไปนี้ จากสมการการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ ได้ว่า

$$v^2 = u^2 + 2gs_1$$
$$v^2 = 0^2 + (2\times9.81\times0.090)$$
$$v^2 = 1.766$$
$$v = 1.329 \text{ m/s}$$
$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_3v_3$$
$$(52\times1.329) + (3.7\times0) = (52+3.7)\times v_3$$
$$v_3 = 1.241 \text{ m/s}$$

จากกฎอนุรักษ์พลังงาน ได้ว่า

$$\sum E_1 = \sum E_2$$
$$W = E_k$$
$$W = \frac{1}{2}m_tv^2$$
$$F\times s_2 = \frac{1}{2}(m_1+m_2)v^2$$
$$F = \frac{55.7\times1.241^2}{2\times0.00656}$$
$$F = 6538 \text{ N}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

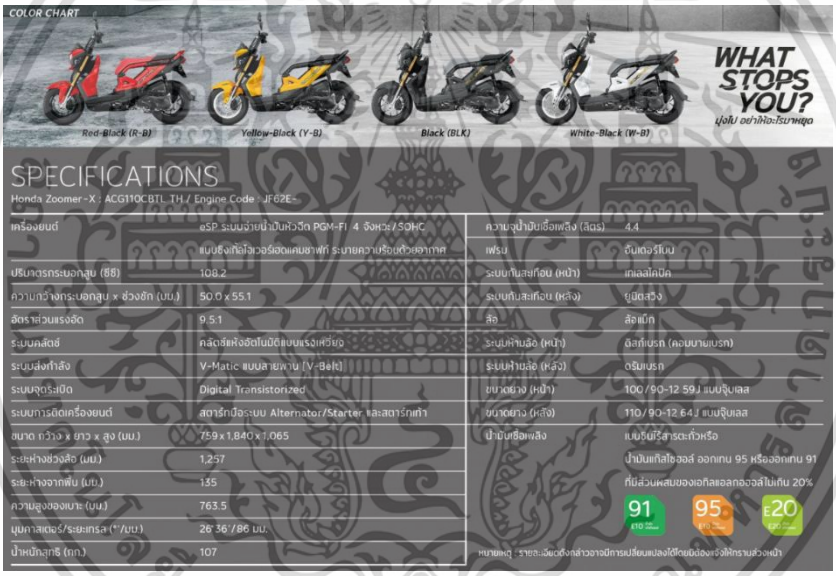
3.3.4 การสั่นสะเทือนบนพื้นถนนจริง

ในการทดลองวัดการสั่นสะเทือนบนพื้นถนนจริง ใช้พาหนะในการทดลองด้วยกัน 3 ประเภท ได้แก่ จักรยานยนต์ รถกะบะ และรถพ่วงที่ใช้บรรทุกของ โดยเลือกจากปัจจัยสำคัญๆ คือ จำนวนล้อของยานพาหนะ และมวลของยานหนะ ทั้งนี้ข้อมูลในเรื่องของมวลอิงตามบริษัทที่ผลิตยานพาหนะนั้นๆ หรือค่าเฉลี่ยมวลตามประเภทพาหนะ ซึ่งสามารถแสดงดังนี้

1. จักรยานยนต์

ประเภทจักรยานยนต์ที่ใช้ในการทดลองเป็นเป็นจักยานยนต์ที่ผลิตโดยบริษัท Honda รุ่น Zoomer-X (2019) แสดงได้ดงรูปที่ 3.21 ซึ่งสามารถคำนวณน้ำหนักได้ว่า

$$F = mg$$
$$F = 107 \times 9.81$$
$$F = 1049.67 \text{ N}$$



รูปที่ 3.21 รายระเอียดมวลจักรยานยนต์

2. รถกระบะ

ประเภทรถยนต์ที่ใช้ในการทดลองนั้น ใช้เป็นรถกระบะ เนื่องจากตามท้องถนนที่ทำการวัดการสั่นสะเทือนนั้นมีจำนวนมาก และมวลรถกระบะของทุกยี่ห้อมีความใกล้เคียงกันมากกว่ารถกระบะปกติ แสดงดังรูป 3.22 ซึ่งสามารถคำนวณน้ำหนักได้ว่า

$$m = 5065 \text{ lbs} = 5065 \div 2.205 \text{ kg}$$
$$m = 2297.05 \text{ kg}$$
$$F = mg$$
$$F = 2297.05 \times 9.81$$
$$F = 22537.94 \text{ N}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Brand	Height	Width	Length	Weight
Ford F-150	76.15"	79.9"	229.9"	4,797 lbs
Chevrolet Silverado 1500	76.95"	81.2"	235.4"	4,706 lbs
GMC Sierra 1500	75.5"	81.2"	235.4"	4,850 lbs
Ram 1500	77.6"	82.1"	235.4"	5,058 lbs
Toyota Tundra	76.5"	79.9"	238.4"	5,390 lbs
Nissan Titan	75.9"	80.1"	228.1"	5,587 lbs
Average	**76.4"**	**80.7"**	**233.8"**	**5,065 lbs**

รูปที่ 3.22 รายระเอียดมวลรถกระบะ

3. รถพ่วง

ประเภทรถพ่วงที่ใช้ในการทดลอง ใช้เฉพาะรถพ่วงที่ไม่ได้บรรทุกอะไรไว้ด้านหลัง เนื่องจากเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาและทำให้ค่าเฉลี่ยมวลโดยรวมของรถพ่วง เมื่อนำมาคิดแล้วไม่ต่างกันมาก แสดงดังรูปที่ 3.23 ซึ่งสามารถคำนวณน้ำหนักได้ว่า

$$m = 7929.8 \text{ lbs} = 7929.8 \div 2.205 \text{ kg}$$

$$m = 3521.21 \text{ kg}$$

$$F = mg$$

$$F = 3521.21 \times 9.81$$

$$F = 34543.07 \text{ N}$$

Engine	Transmission	Axle Ratio	GVWR	Payload	Base Weight		
					Total	Front	Rear
REGULAR CAB - CA 60" - 4X2 - DRW							
6.7L CUMMINS DIESEL	A6 AS69RC	4.10	18,000	10,250	7,749	4,558	3,191
6.7L CUMMINS DIESEL	M6 DC-G56	4.10	19,000	11,390	7,609	4,438	3,171
6.7L CUMMINS DIESEL	M6 DC-G56	4.44	19,000	11,390	7,609	4,438	3,171
6.7L CUMMINS DIESEL	A6 AS69RC	4.44	19,000	11,250	7,749	4,558	3,191
6.7L CUMMINS DIESEL	A6 AS69RC	4.88	19,000	11,250	7,749	4,558	3,191
REGULAR CAB - CA 84" - 4X2 - DRW							
6.7L CUMMINS DIESEL	A6 AS69RC	4.10	18,000	10,130	7,874	4,648	3,226
6.7L CUMMINS DIESEL	M6 DC-G56	4.10	19,500	11,790	7,714	4,518	3,196
6.7L CUMMINS DIESEL	M6 DC-G56	4.44	19,500	11,790	7,714	4,518	3,196
6.7L CUMMINS DIESEL	A6 AS69RC	4.44	19,500	11,630	7,874	4,648	3,226
6.7L CUMMINS DIESEL	A6 AS69RC	4.88	19,500	11,630	7,874	4,648	3,226
REGULAR CAB - CA 108" - 4X2 - DRW							
6.7L CUMMINS DIESEL	A6 AS69RC	4.10	18,000	10,040	7,959	4,689	3,270
6.7L CUMMINS DIESEL	M6 DC-G56	4.10	19,500	11,700	7,799	4,559	3,240
6.7L CUMMINS DIESEL	M6 DC-G56	4.44	19,500	11,700	7,799	4,559	3,240
6.7L CUMMINS DIESEL	A6 AS69RC	4.44	19,500	11,540	7,959	4,689	3,270
6.7L CUMMINS DIESEL	A6 AS69RC	4.88	19,500	11,540	7,959	4,689	3,270
REGULAR CAB - CA 120" - 4X2 - DRW							
6.7L CUMMINS DIESEL	A6 AS69RC	4.10	18,000	9,950	8,049	4,734	3,315
6.7L CUMMINS DIESEL	M6 DC-G56	4.10	19,500	11,610	7,889	4,604	3,285
6.7L CUMMINS DIESEL	M6 DC-G56	4.44	19,500	11,610	7,889	4,604	3,285
6.7L CUMMINS DIESEL	A6 AS69RC	4.44	19,500	11,450	8,049	4,734	3,315
6.7L CUMMINS DIESEL	A6 AS69RC	4.88	19,500	11,450	8,049	4,734	3,315
CREW CAB - CA 60" - 4X2 - DRW							
6.7L CUMMINS DIESEL	A6 AS69RC	4.10	18,000	9,670	8,330	4,831	3,499
6.7L CUMMINS DIESEL	M6 DC-G56	4.10	19,000	10,830	8,170	4,701	3,469
6.7L CUMMINS DIESEL	M6 DC-G56	4.44	19,000	10,830	8,170	4,701	3,469
6.7L CUMMINS DIESEL	A6 AS69RC	4.44	19,000	10,670	8,330	4,831	3,499
6.7L CUMMINS DIESEL	A6 AS69RC	4.88	19,000	10,670	8,330	4,831	3,499

รูปที่ 3.23 รายระเอียดมวลรถพ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองการสั่นสะเทือน

โครงงานเล่มนี้ได้ทำการทดลองประกอบด้วยกัน 2 ขั้นตอนดังที่กล่าวไปก่อนหน้า เนื่องจากในแต่ละขั้นตอนผลการทดลองที่ได้รับมีความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันไป ในการวัดการสั่นสะเทือนของระบบเพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างที่ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงทำการทดลอง 2 รูปแบบด้วยกัน ได้แก่ ระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วง ระบบที่ติดตั้งตัวหน่วง ทั้งนี้ได้มีการนำอุปกรณ์เครื่องมือไปวัดการสั่นสะเทือนบนพื้นถนนจริงด้วย เพื่อทราบระยะทางและความเร่งที่เกิดขึ้น ทำให้ทราบข้อมูลดังนี้

4.1 ผลการทดลองจากเครื่องทดลองการสั่นสะเทือน

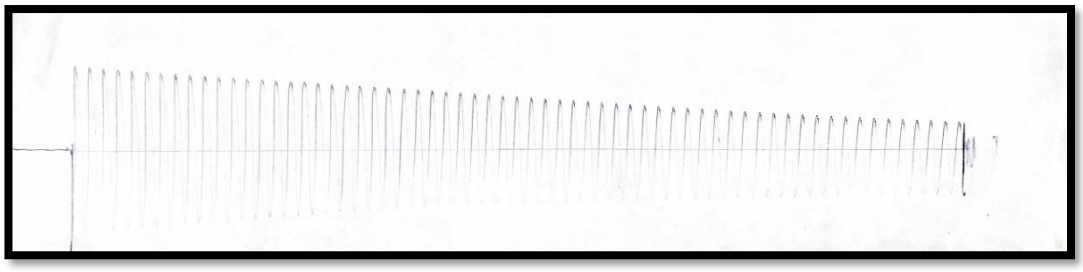
จากเครื่องทดลองการสั่นสะเทือนเป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการสั่นสะเทือนกับเวลา ซึ่งผลการทดลองที่ได้หากมีการติดตั้งตัวหน่วงสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อทราบถึงอัตราการหดตัวของลูกคลื่นได้ โดยการทดลองประกอบไปด้วย 3 รูปแบบ คือ ระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วง ระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงน้ำมัน และระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพด

4.1.1 ระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วง

รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนและเวลาแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วงของการทดลองครั้งที่

จากรูปที่ 4.1 พบว่าค่าที่ได้จากกราฟคือ เวลาที่จับตั้งแต่ลูกคลื่นแรกจนถึงลูกสุดท้ายคือ 10.06 วินาที และจำนวนลูกคลื่นเท่ากับ 42 ลูก โดยมีอัตราการลดลงของลูกคลื่นลู่เข้าสู่ศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนและเวลาแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วงของการทดลองครั้งที่ 2

จากรูปที่ 4.2 พบว่าค่าที่ได้จากกราฟคือ เวลาที่จับตั้งแต่ลูกคลื่นแรกจนถึงลูกสุดท้ายคือ 16.08 วินาที และจำนวนลูกคลื่นเท่ากับ 63 ลูก โดยมีอัตราการลดลงของลูกคลื่นลู่เข้าสู่ศูนย์

รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนและเวลาแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วงของการทดลองครั้งที่ 3

จากรูปที่ 4.3 พบว่าค่าที่ได้จากกราฟคือ เวลาที่จับตั้งแต่ลูกคลื่นแรกจนถึงลูกสุดท้ายคือ 10.03 วินาที และจำนวนลูกคลื่นเท่ากับ 44 ลูก โดยมีอัตราการลดลงของลูกคลื่นลู่เข้าสู่ศูนย์

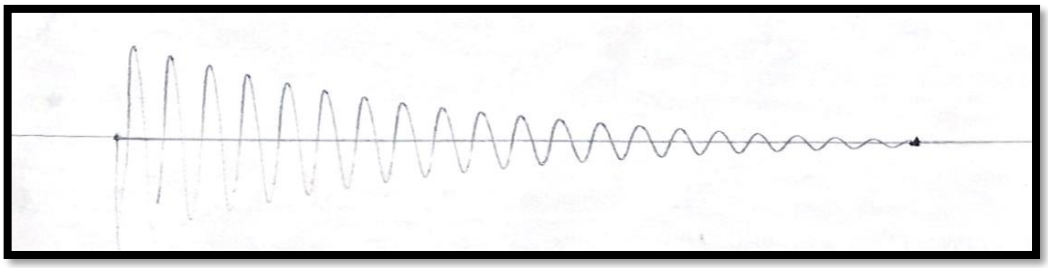
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลที่ได้จากกราฟของระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วง

	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	การทดลองครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ความถี่ (รอบ/วินาที)	4.175	3.918	4.387	4.16
คาบ (วินาที/รอบ)	0.24	0.255	0.228	0.241

จากตารางที่ 4.1 คำนวณหาความถี่จากการนำจำนวนลูกคลื่นที่นับได้หารด้วยเวลาตั้งแต่คลื่นลูกแรกถึงคลื่นลูกสุดท้าย โดยคาบคำนวณได้จากส่วนกลับของความถี่ ทำให้ได้ค่าดังที่แสดงในตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงน้ำมัน



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนและเวลาแบบติดตั้งตัวหน่วงน้ำมันของการทดลองครั้งที่ 1

จากรูปที่ 4.4 พบว่าค่าที่ได้จากกราฟคือ เวลาที่จับตั้งแต่ลูกคลื่นแรกจนถึงลูกสุดท้ายคือ 5.10 วินาที และจำนวนลูกคลื่นเท่ากับ 20 ลูก โดยมีอัตราการลดลงของลูกคลื่นลู่เข้าสู่ศูนย์

รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนและเวลาแบบติดตั้งตัวหน่วงน้ำมันของการทดลองครั้งที่ 2

จากรูปที่ 4.5 พบว่าค่าที่ได้จากกราฟคือ เวลาที่จับตั้งแต่ลูกคลื่นแรกจนถึงลูกสุดท้ายคือ 5.63 วินาที และจำนวนลูกคลื่นเท่ากับ 22 ลูก โดยมีอัตราการลดลงของลูกคลื่นลู่เข้าสู่ศูนย์

รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนและเวลาแบบติดตั้งตัวหน่วงน้ำมันของการทดลองครั้งที่ 3

จากรูปที่ 4.6 พบว่าค่าที่ได้จากกราฟคือ เวลาที่จับตั้งแต่ลูกคลื่นแรกจนถึงลูกสุดท้ายคือ 5.35 วินาที และจำนวนลูกคลื่นเท่ากับ 21 ลูก โดยมีอัตราการลดลงของลูกคลื่นลู่เข้าสู่ศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

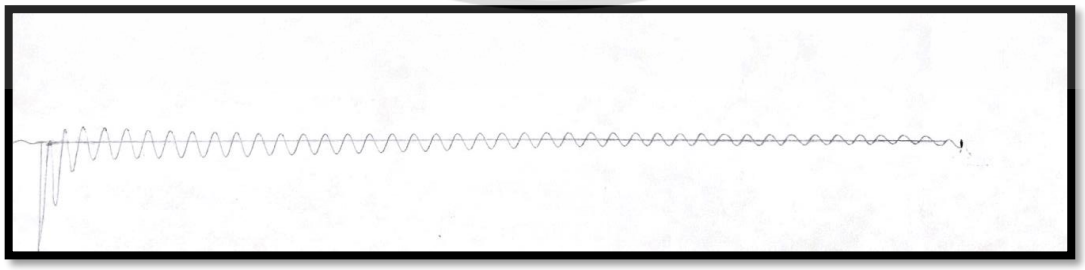
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลที่ได้จากกราฟของระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงน้ำมัน

	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	การทดลองครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ความถี่ (รอบ/วินาที)	3.922	3.907	3.925	3.918
คาบ (วินาที/รอบ)	0.255	0.256	0.2547	0.255
ω_d (รอบ/วินาที)	24.6	24.5	24.6	24.6
อัตราการลดลงแบบลอการิทึม	0.044	0.098	0.112	0.085
อัตราส่วนความหน่วง	0.316	0.324	0.317	0.317
สัมประสิทธิ์ความหน่วง (กิโลกรัม/วินาที)	518	531	517	521

4.1.3 ระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพด

รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนและเวลาแบบติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพดของการทดลองครั้งที่ 1

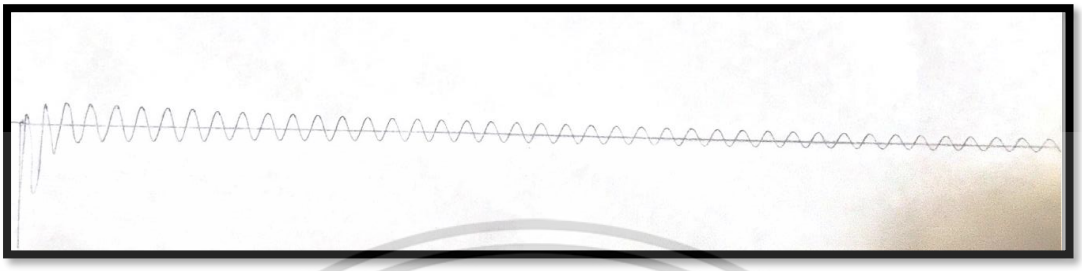
จากรูปที่ 4.7 พบว่าค่าที่ได้จากกราฟคือ เวลาที่จับตั้งแต่ลูกคลื่นแรกจนถึงลูกสุดท้ายคือ 9.99 วินาที และจำนวนลูกคลื่นเท่ากับ 41 ลูก โดยการลดลงมีเพียงแค่คลื่นลูกแรกเท่านั้นที่เป็นแบบชั่วขณะเนื่องจากตัวหน่วงแบบของไหลหนืดตอบสนองได้ดีเมื่อแรงกระทำมีค่ามาก ในส่วนของลูกคลื่นถัดๆไปอัตราการลดลงน้อยมากเนื่องจากแรงกระทำมีค่าน้อย



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนและเวลาแบบติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพดของการทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 พบว่าค่าที่ได้จากกราฟคือ เวลาที่จับตั้งแต่ลูกคลื่นแรกจนถึงลูกสุดท้ายคือ 10.12 วินาที และจำนวนลูกคลื่นเท่ากับ 41 ลูก โดยการลดลงมีเพียงแค่คลื่นลูกแรกเท่านั้นที่เป็นแบบชั่วขณะเนื่องจากตัวหน่วงแบบของไหลหนืดตอบสนองได้ดีเมื่อแรงกระทำมีค่ามาก ในส่วนของลูกคลื่นถัดๆไปอัตราการลดลงน้อยมากเนื่องจากแรงกระทำมีค่าน้อย



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสั่นสะเทือนและเวลาแบบติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพดของการทดลองครั้งที่ 3

จากรูปที่ 4.9 พบว่าค่าที่ได้จากกราฟคือ เวลาที่จับตั้งแต่ลูกคลื่นแรกจนถึงลูกสุดท้ายคือ 10.13 วินาที และจำนวนลูกคลื่นเท่ากับ 41 ลูก โดยการลดลงมีเพียงแค่คลื่นลูกแรกเท่านั้นที่เป็นแบบชั่วขณะเนื่องจากตัวหน่วงแบบของไหลหนืดตอบสนองได้ดีเมื่อแรงกระทำมีค่ามาก ในส่วนของลูกคลื่นถัดๆไปอัตราการลดลงน้อยมากเนื่องจากแรงกระทำมีค่าน้อย

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลที่ได้จากกราฟของระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพด

รูปแบบการวัด	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	การทดลองครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ความถี่ (รอบ/วินาที)	4.104	4.051	4.047	4.067
คาบ (วินาที/รอบ)	0.243	0.247	0.247	0.246
ω_d (รอบ/วินาที)	25	25	25	25
อัตราการลดลงแบบลอการิทึม	-1.322	-1.204	-1.036	-1.187
อัตราส่วนความหน่วง	0.118	0.198	0.198	0.171
สัมประสิทธิ์ความหน่วง (กิโลกรัม/วินาที)	193	325	325	281

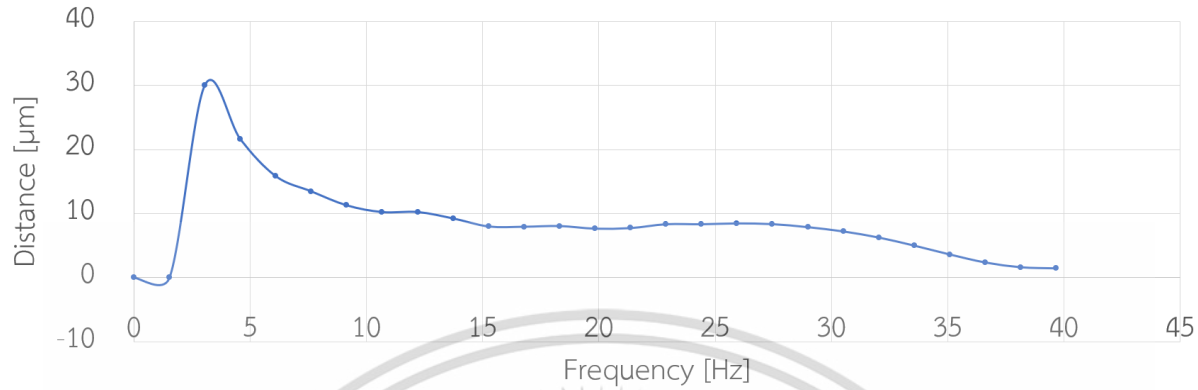
4.2 ผลการทดลองจากชุดพื้นจำลอง

จากการทดลองด้วยชุดพื้นจำลอง โดยทดลองด้วยการใช้แรง 4 รูปแบบ คือ การใช้บาสเกตบอล การเดิน การวิ่ง และ การกระโดดจึงได้ข้อมูลและกราฟเปรียบเทียบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การใช้บาสเก็ตบอล

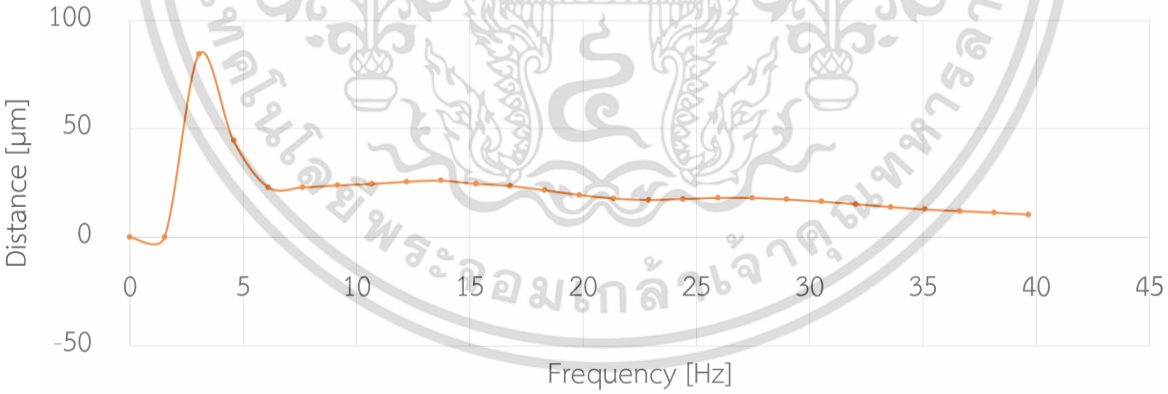
1. แบบไม่ติดตั้งตัวหน่วง



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของบาสเก็ตบอลแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วง

จากรูปที่ 4.10 พบว่า สำหรับการปล่อยบาสเก็ตบอลตกอย่างอิสระที่ความสูง 2 เมตรของระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วง ความถี่ที่ 3.052 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงเป็นลำดับที่ 1 โดยมีเท่ากับ 30.0 ไมโครเมตร และความถี่ที่ 4.578 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงรองลงมาเป็นลำดับที่ 2 โดยมีค่า 21.6 ไมโครเมตร ซึ่งระยะการสั่นสะเทือนเริ่มมีค่าลดลงใกล้เคียงกันตั้งแต่ความถี่ 6.103 เฮิรตซ์ เป็นต้นไป

2. แบบติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพด

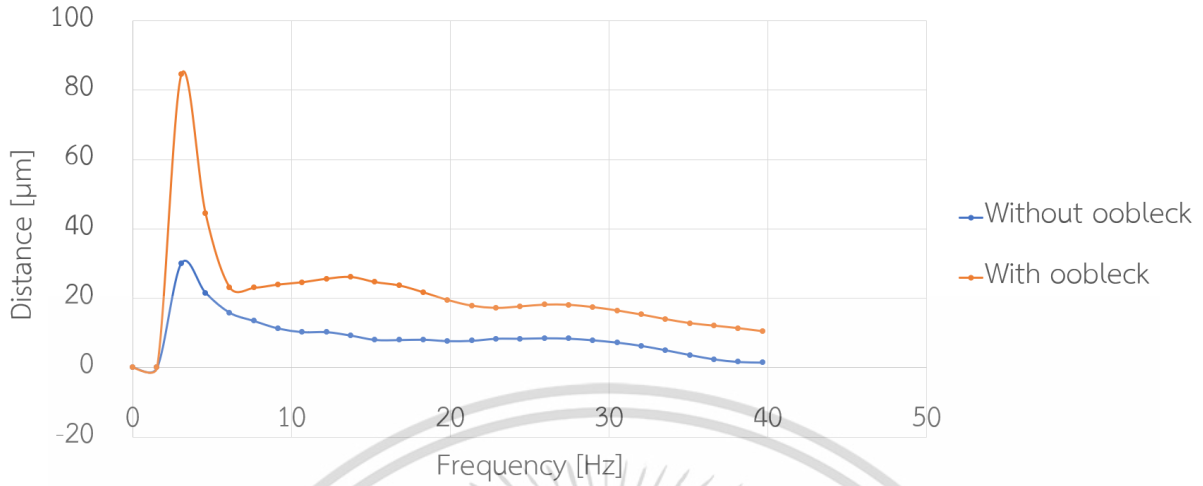


รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของบาสเก็ตบอลแบบติดตั้งตัวหน่วง

จากรูปที่ 4.11 พบว่า สำหรับการปล่อยบาสเก็ตบอลตกอย่างอิสระที่ความสูง 2 เมตรของระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพด ความถี่ที่ 3.052 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงเป็นลำดับที่ 1 โดยมีเท่ากับ 84.5 ไมโครเมตร และความถี่ที่ 4.578 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงรองลงมาเป็นลำดับที่ 2 โดยมีค่าเท่ากับ 44.5 ไมโครเมตร ซึ่งระยะการสั่นสะเทือนเริ่มมีค่าลดลงอย่างใกล้เคียงกันตั้งแต่ความถี่ 6.103 เฮิรตซ์ เป็นต้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเปรียบเทียบระหว่างการทดลองแบบติดตั้งตัวหน่วงและแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพด

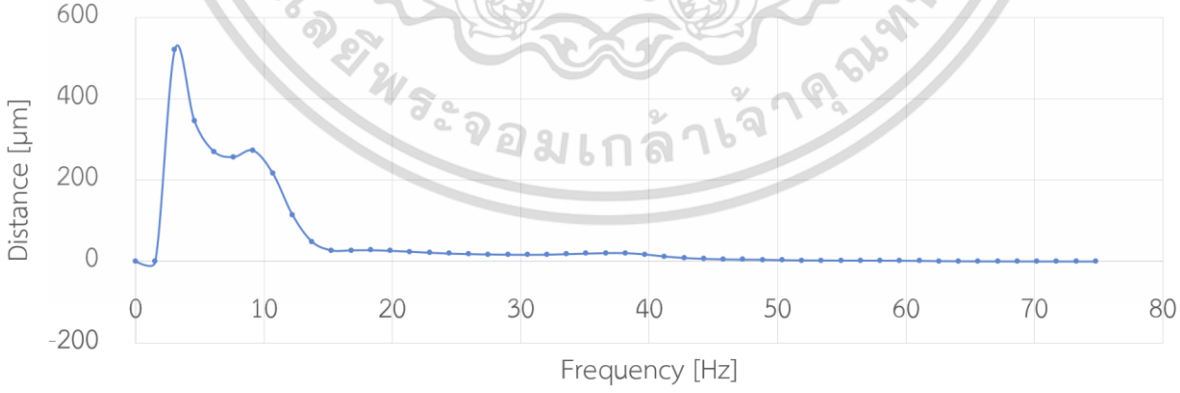


รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของบาสเก็ตบอล

จากรูปที่ 4.12 พบว่า สำหรับการปล่อยบาสเก็ตบอลตกอย่างอิสระที่ความสูง 2 เมตร ความถี่ที่ 3.05 เฮิรตซ์ ทำให้เกิดระยะการสั่นสะเทือนสูงที่สุดทั้งสำหรับระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วงและติดตั้งตัวหน่วง น้ำแป้งข้าวโพดมีค่าเท่ากับ 30.0 ไมโครเมตร และ 84.5 ไมโครเมตร ทั้งนี้สาเหตุที่ทำให้ระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงมีระยะการสั่นสะเทือนมากกว่าระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วง เพราะแรงที่กระทำต่อพื้นถนนจำลองมีค่าน้อยเกินไปจึงเป็นผลให้ตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นไม่สามารถแสดงคุณสมบัติในการตอบสนองต่อแรงสั่นสะเทือนแบบชั่วขณะได้ดีเท่าที่ควร

4.2.2 การเดิน

1. แบบไม่ติดตั้งตัวหน่วง

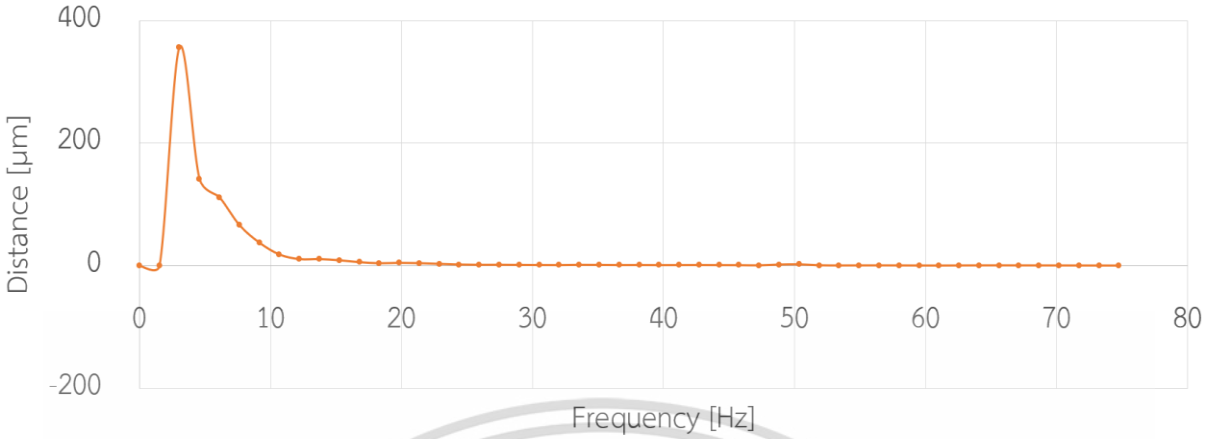


รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของการเดินแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วง

จากรูปที่ 4.13 พบว่า สำหรับการเดินของระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วง ความถี่ที่ 3.052 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงเป็นลำดับที่ 1 โดยมีเท่ากับ 521 ไมโครเมตร และความถี่ที่ 4.578 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงรองลงมาเป็นลำดับที่ 2 โดยมีค่าเท่ากับ 346 ไมโครเมตร ซึ่งระยะการสั่นสะเทือนเริ่มมีค่าลดลงอย่างใกล้เคียงกันตั้งแต่ความถี่ 6.103 เฮิรตซ์ เป็นต้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

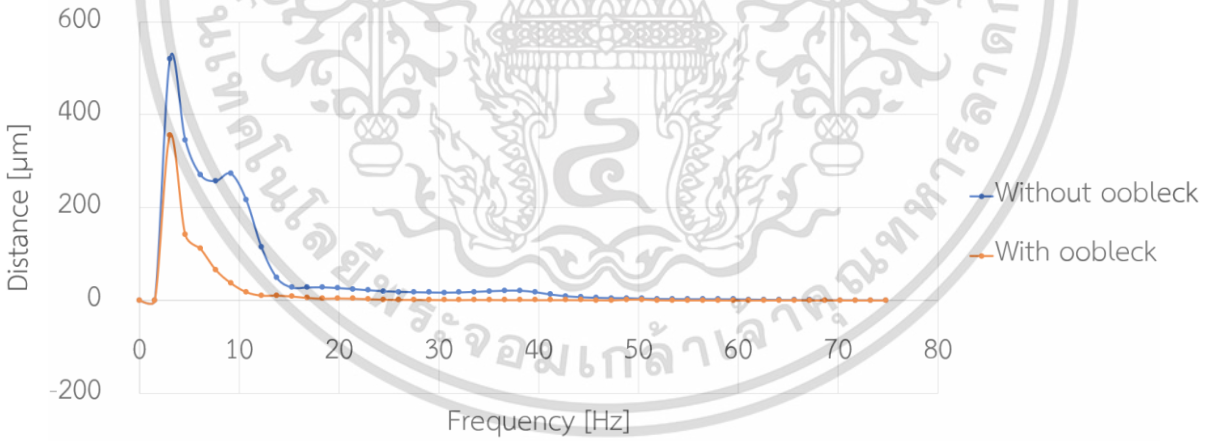
2. แบบติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพด



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของการเดินแบบติดตั้งตัวหน่วง

จากรูปที่ 4.14 พบว่า สำหรับการเดินของระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพด ความถี่ที่ 3.052 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงเป็นลำดับที่ 1 โดยมีเท่ากับ 357 ไมโครเมตร และความถี่ที่ 4.578 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงรองลงมาเป็นลำดับที่ 2 โดยมีค่าเท่ากับ 142 ไมโครเมตร ซึ่งระยะการสั่นสะเทือนเริ่มมีค่าลดลงอย่างใกล้เคียงกันตั้งแต่ความถี่ 6.103 เฮิรตซ์ เป็นต้นไป

3. การเปรียบเทียบระหว่างการทดลองแบบติดตั้งตัวหน่วงและแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพด



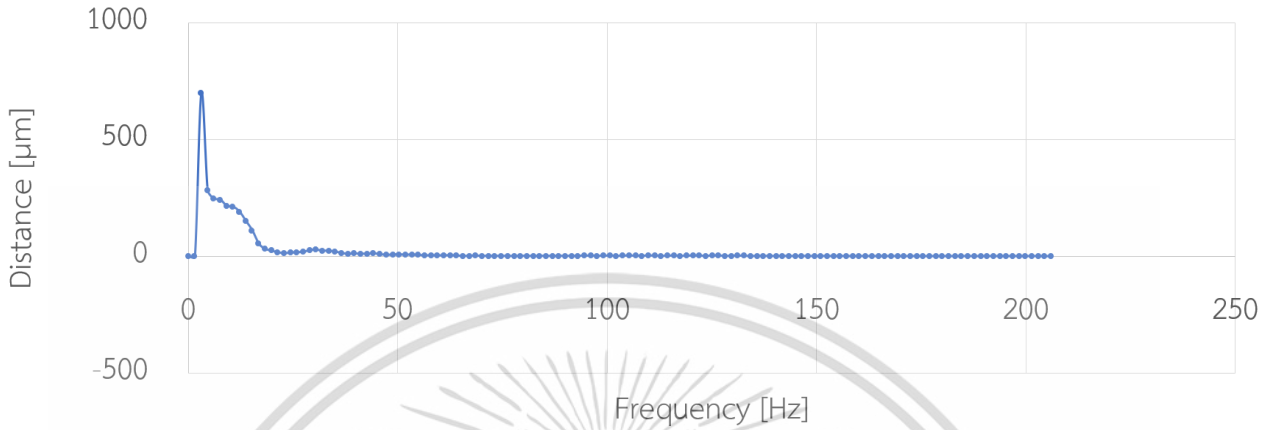
รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของการเดิน

จากรูปที่ 4.15 พบว่า สำหรับการเดิน ความถี่ที่ 3.05 เฮิรตซ์ ทำให้เกิดระยะการสั่นสะเทือนสูงที่สุดทั้งสำหรับระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วงและติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพดมีค่าเท่ากับ 521 ไมโครเมตร และ 357 ไมโครเมตร สังเกตได้ว่าระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงมีระยะการสั่นสะเทือนน้อยกว่าระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วง เพราะแรงที่กระทำต่อพื้นถนนจำลองมีค่ามากพอจึงเป็นผลให้ตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นสามารถแสดงคุณสมบัติในการตอบสนองต่อแรงสั่นสะเทือนแบบชั่วขณะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การวิ่ง

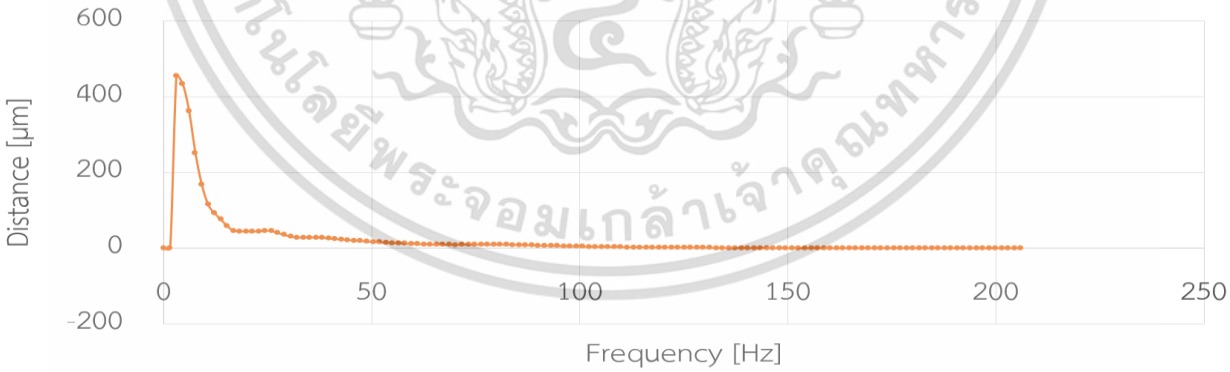
1. แบบไม่ติดตั้งตัวหน่วง



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของการวิ่งแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วง

จากรูปที่ 4.16 พบว่า สำหรับการวิ่งของระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วง ความถี่ที่ 3.052 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงเป็นลำดับที่ 1 โดยมีเท่ากับ 719 ไมโครเมตร และความถี่ที่ 4.578 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงรองลงมาเป็นลำดับที่ 2 โดยมีค่าเท่ากับ 283 ไมโครเมตร ซึ่งระยะการสั่นสะเทือนเริ่มมีค่าลดลงอย่างใกล้เคียงกันตั้งแต่ความถี่ 6.103 เฮิรตซ์ เป็นต้นไป

2. แบบติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพด

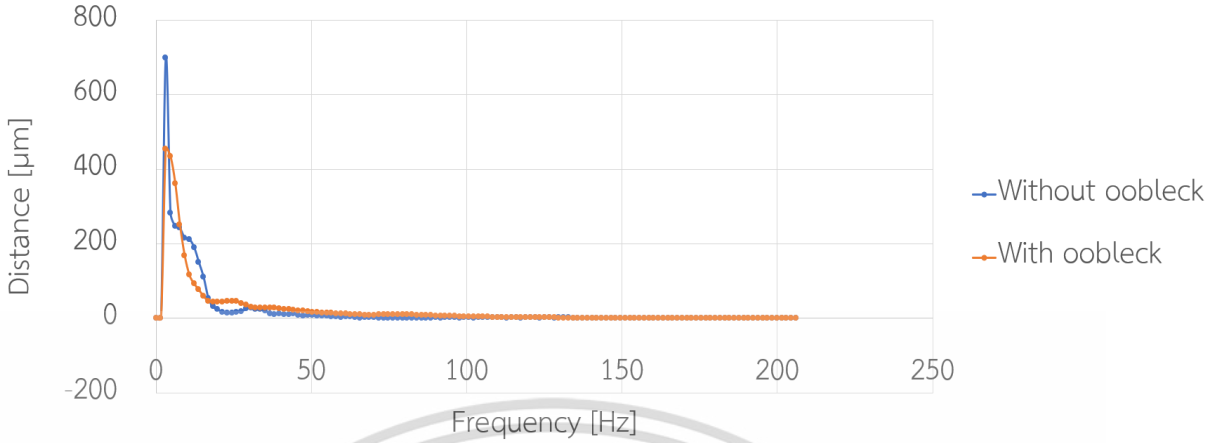


รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของการวิ่งแบบติดตั้งตัวหน่วง

จากรูปที่ 4.17 พบว่า สำหรับการวิ่งของระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพด ความถี่ที่ 3.052 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงเป็นลำดับที่ 1 โดยมีเท่ากับ 458 ไมโครเมตร และความถี่ที่ 4.578 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงรองลงมาเป็นลำดับที่ 2 โดยมีค่าเท่ากับ 434 ไมโครเมตร ซึ่งระยะการสั่นสะเทือนเริ่มมีค่าลดลงอย่างใกล้เคียงกันตั้งแต่ความถี่ 6.103 เฮิรตซ์ เป็นต้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเปรียบเทียบระหว่างการทดลองแบบติดตั้งตัวหน่วงและแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพด

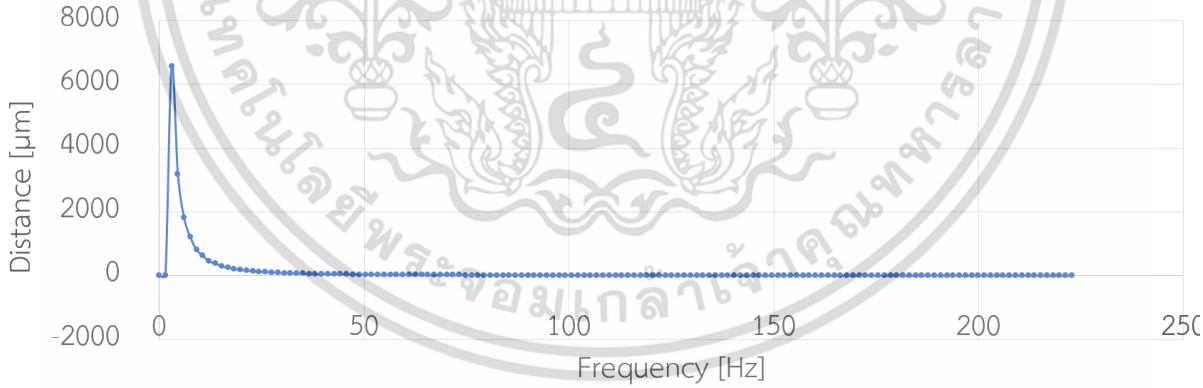


รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของการวิ่ง

จากรูปที่ 4.18 พบว่า สำหรับการวิ่ง ความถี่ที่ 3.05 เฮิรตซ์ ทำให้เกิดระยะการสั่นสะเทือนสูงที่สุดทั้งสำหรับระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วงและติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพดมีค่าเท่ากับ 719 ไมโครเมตร และ 458 ไมโครเมตร สังเกตได้ว่าระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงมีระยะการสั่นสะเทือนน้อยกว่าระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วง เพราะแรงที่กระทำต่อพื้นถนนจำลองมีค่ามากพอจึงเป็นผลให้ตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นสามารถแสดงคุณสมบัติในการตอบสนองต่อแรงสั่นสะเทือนแบบชั่วขณะได้

4.2.4 การกระโดด

1. แบบไม่ติดตั้งตัวหน่วง

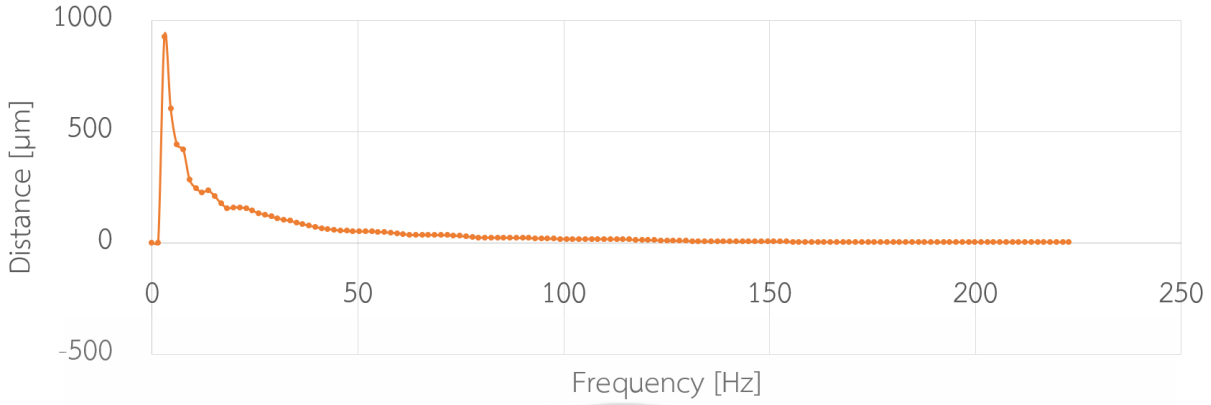


รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของการกระโดดแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วง

จากรูปที่ 4.19 พบว่า สำหรับการกระโดดของระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วง ความถี่ที่ 3.052 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงเป็นลำดับที่ 1 โดยมีเท่ากับ 6,563 ไมโครเมตร และความถี่ที่ 4.578 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงรองลงมาเป็นลำดับที่ 2 โดยมีค่าเท่ากับ 3,182 ไมโครเมตร ซึ่งระยะการสั่นสะเทือนเริ่มมีค่าลดลงอย่างใกล้เคียงกันตั้งแต่ความถี่ 6.103 เฮิรตซ์ เป็นต้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แบบติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพด



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของการกระโดดแบบติดตั้งตัวหน่วง

จากรูปที่ 4.20 พบว่า สำหรับการกระโดดของระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพด ความถี่ที่ 3.052 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงเป็นลำดับที่ 1 โดยมีเท่ากับ 924 ไมโครเมตร และความถี่ที่ 4.578 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงรองลงมาเป็นลำดับที่ 2 โดยมีค่าเท่ากับ 601 ไมโครเมตร ซึ่งระยะการสั่นสะเทือนเริ่มมีค่าลดลงอย่างใกล้เคียงกันตั้งแต่ความถี่ 6.103 เฮิรตซ์ เป็นต้นไป

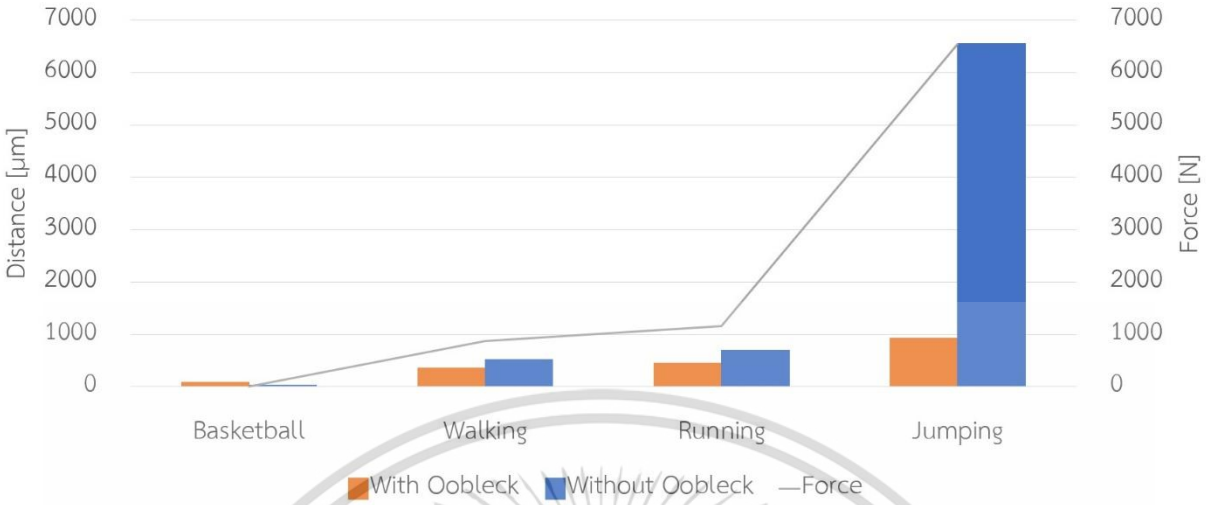
3. การเปรียบเทียบระหว่างการทดลองแบบติดตั้งตัวหน่วงและแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพด

รูปที่ 4.21 กราฟเปรียบเทียบระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของการวิ่ง

จากรูปที่ 4.21 พบว่า สำหรับการกระโดด ความถี่ที่ 3.05 เฮิรตซ์ ทำให้เกิดระยะการสั่นสะเทือนสูงที่สุดทั้งสำหรับระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วงและติดตั้งตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพดมีค่าเท่ากับ 6563 ไมโครเมตร และ 924 ไมโครเมตร สังเกตได้ว่าระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงมีระยะการสั่นสะเทือนน้อยกว่าระบบที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วง เพราะแรงที่กระทำต่อพื้นถนนจำลองมีค่ามากพอจึงเป็นผลให้ตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นสามารถแสดงคุณสมบัติในการตอบสนองต่อแรงสั่นสะเทือนแบบชั่วขณะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองระยะการสั่นสะเทือนกับแรงที่กระทำ



รูปที่ 4.22 แผนภูมิเปรียบเทียบระหว่างระยะการสั่นสะเทือนกับแรงที่กระทำของผลการทดลองทั้ง 4 รูปแบบ

จากรูปที่ 4.22 เป็นผลการทดลองชุดพื้นทดลองการสั่นสะเทือนทั้ง 4 รูปแบบ พบว่า สำหรับ 3 กรณีหลัง เมื่อออกแรงกระทำกับพื้นจำลองที่ไม่มีตัวหน่วงแบบใช้ของไหลหนืดยืดหยุ่นกราฟแท่งสีส้มสูงกว่าสีน้ำเงิน แสดงว่าระยะการยุบตัวของแผ่นไม้จากการสั่นสะเทือนที่วางบนพื้นจำลองนั้นยุบมากกว่าแบบที่มีตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นเนื่องจากว่าตัวหน่วงที่นำมาใช้นั้นดูดซับแรงได้มากกว่าการไม่มีตัวหน่วง ส่วน กรณีบาสเก็ตบอลที่สีน้ำเงินมีระยะกระจัดมากกว่าสีส้มเนื่องจากแรงของบาสเก็ตบอลที่กระทำต่อพื้นจำลองนั้นน้อยมาก ตามคุณสมบัติของนอนนิวโตเนียนเมื่อมีมาแรงกระทำมากเกิดการแข็งตัวเสมือนของแข็ง แต่เมื่อออกแรงกระทำที่ค่อนข้างน้อยเกิดการยุบตัวลงเสมือนของไหล

4.2.6 การเปรียบเทียบผลการทดลองความเร่งการสั่นสะเทือนของชุดพื้นจำลอง

ในการทดลองวัดความเร่งการสั่นสะเทือนของชุดพื้นจำลองตามเงื่อนไขต่างๆที่ได้กำหนด โดยนำค่าความเร่งที่มีค่ามากสุดมาพิจารณา จากการใช้กฎข้อที่ 3 ของนิวตัน คือ ความเร่งของวัตถุแปรผันตามแรงที่กระทำต่อวัตถุ แต่แปรผกผันกับมวลของวัตถุ ทำให้สามารถคำนวณหาแรงลัพธ์ที่กระทำต่อระบบที่พิจารณา เมื่อมวลที่ใช้ในการคำนวณเป็นมวลรวมของระบบ คือ มวลของบาสเก็ตบอลกับแผ่นไม้ และมวลของผู้ทำการทดลองกับแผ่นไม้ ทำให้ได้ค่าดังที่แสดงในตาราง

ตารางที่ 4.4 แรงลัพธ์ของระบบ

รูปแบบแรงที่กระทำ	มวลรวมของระบบ (กิโลกรัม)	ความเร่ง (เมตร/วินาที^{2})	แรงลัพธ์ (นิวตัน)
การใช้บาสเก็ตบอล	4.83	0.120492	0.58197636
การเดิน	56.25	0.428276	24.090525
การวิ่ง	56.25	0.471302	26.5107375
การกระโดด	56.25	0.679637	38.22958125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตาราง 4.4 พบว่าแรงลัพธ์ของระบบมีค่าน้อยกว่าแรงที่กระทำ เช่น การกระโดดที่มีแรงกระทำ 6,538 นิวตัน และแรงลัพธ์เท่ากับ 38.23 นิวตัน สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากมีแรงอื่นที่มีทิศสวนทางกับแรงที่กระทำ เช่น แรงหนืดของของไหลหนืดยืดหยุ่น แรงปฏิกริยาที่แผ่นไม้กระทำกับรูปแบบแรงที่กดลงมา เป็นต้น ซึ่งจากค่าที่ได้จากการทดลองคือความเร่งที่เกิดขึ้นขณะที่วัตถุสั่นสะเทือน ทำให้สามารถคำนวณหาค่าของแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละการทดลอง และสามารถนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของการสั่นสะเทือนกับแรงลัพธ์ที่กระทำดังรูปที่ 4.23

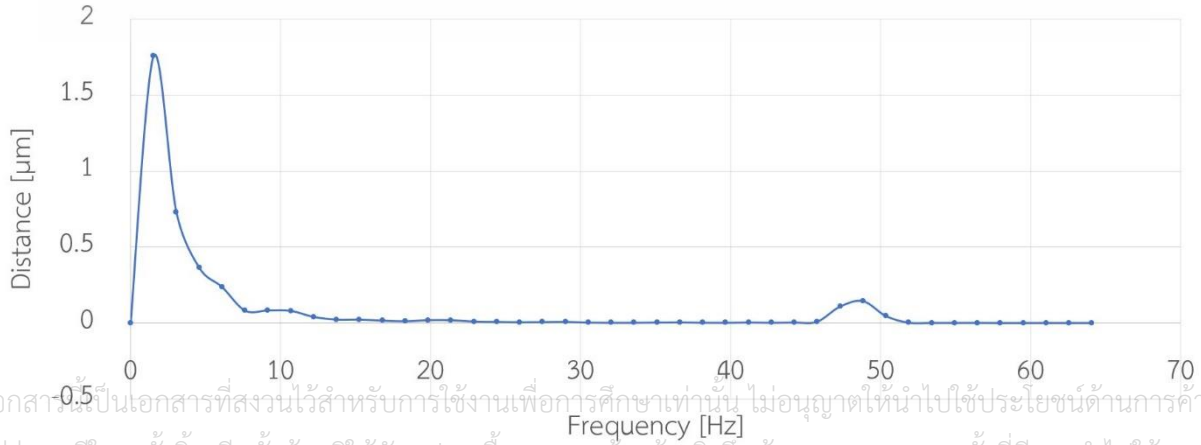
รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของการสั่นสะเทือนกับแรงลัพธ์ที่กระทำ

จากรูปที่ 4.23 สังเกตุเห็นได้ว่าความเร่งของการสั่นสะเทือนแปรผันตรงต่อแรงลัพธ์ที่กระทำ คือ ยิ่งความเร่งของการสั่นสะเทือนมีค่ามากแรงลัพธ์ยิ่งมีค่ามากตามไปด้วย โดยที่การเปลี่ยนแปลงความเร่งของการสั่นสะเทือนและการเปลี่ยนแปลงของแรงลัพธ์ที่กระทำมีค่าคงที่

4.3 ผลการสั่นสะเทือนของพื้นถนน

เนื่องจากโครงงานเล่มนี้เป็นการศึกษาการลดแรงสั่นสะเทือนในพื้นจำลอง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ต่อในถนนจริง จึงทำการนำอุปกรณ์เครื่องมือไปวัดการสั่นสะเทือนในพื้นถนนจริงโดยกำหนดระยะการวัดจากตำแหน่งของเซนเซอร์ถึงพาหนะเท่ากับ 2.25 เมตร เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงในการศึกษา ซึ่งทำการวัดการสั่นสะเทือนโดยแบ่งกลุ่มข้อมูลเป็น 3 รูปแบบด้วยกัน คือ จักรยานยนต์ รถกระบะ และรถพ่วง 12 ล้อ แสดงดังต่อไปนี้

4.3.1 จักรยานยนต์

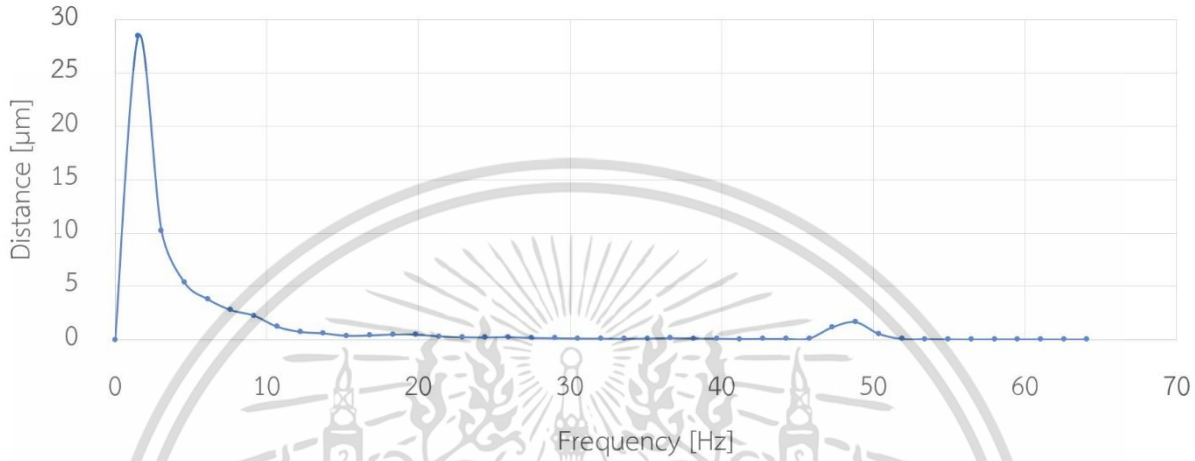


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของจักรยานยนต์

จากรูปที่ 4.24 พบว่า สำหรับการสั่นของจักรยานยนต์บนพื้นถนน ความถี่ที่ 3.052 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงเป็นลำดับที่ 1 โดยมีเท่ากับ 1.76 ไมโครเมตร และความถี่ที่ 4.578 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงรองลงมาเป็นลำดับที่ 2 โดยมีค่าเท่ากับ 0.731 ไมโครเมตร ซึ่งระยะการสั่นสะเทือนเริ่มมีค่าลดลงอย่างใกล้เคียงกันตั้งแต่ความถี่ 9.155 เฮิรตซ์ เป็นต้นไป

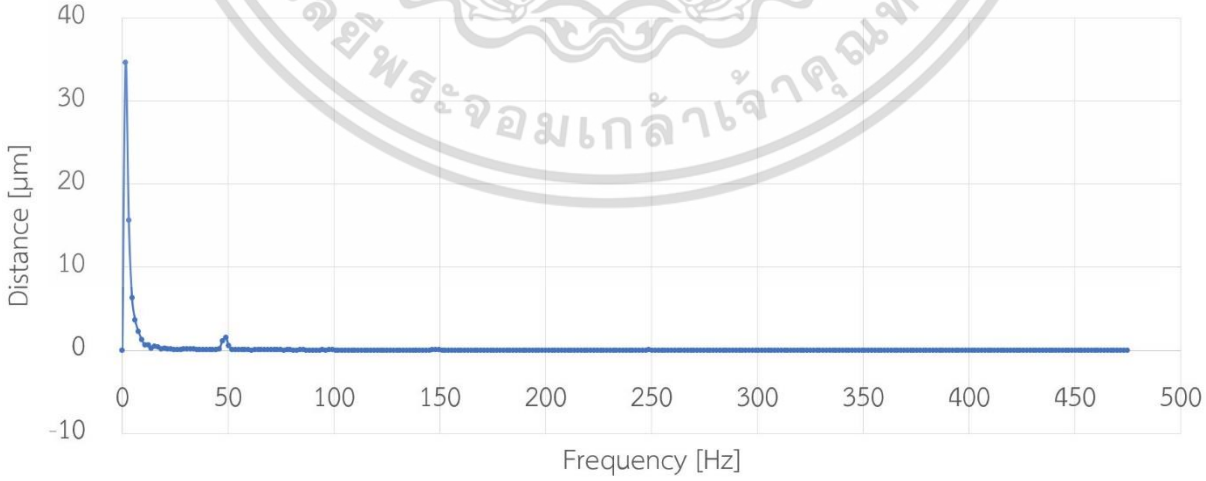
4.3.2 รถกระบะ



รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของรถกระบะ

จากรูปที่ 4.25 พบว่า สำหรับการสั่นของจักรยานยนต์บนพื้นถนน ความถี่ที่ 3.052 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงเป็นลำดับที่ 1 โดยมีเท่ากับ 28.4 ไมโครเมตร และความถี่ที่ 4.578 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงรองลงมาเป็นลำดับที่ 2 โดยมีค่าเท่ากับ 10.2 ไมโครเมตร ซึ่งระยะการสั่นสะเทือนเริ่มมีค่าลดลงอย่างใกล้เคียงกันตั้งแต่ความถี่ 15.26 เฮิรตซ์ เป็นต้นไป

4.3.3 รถพ่วง

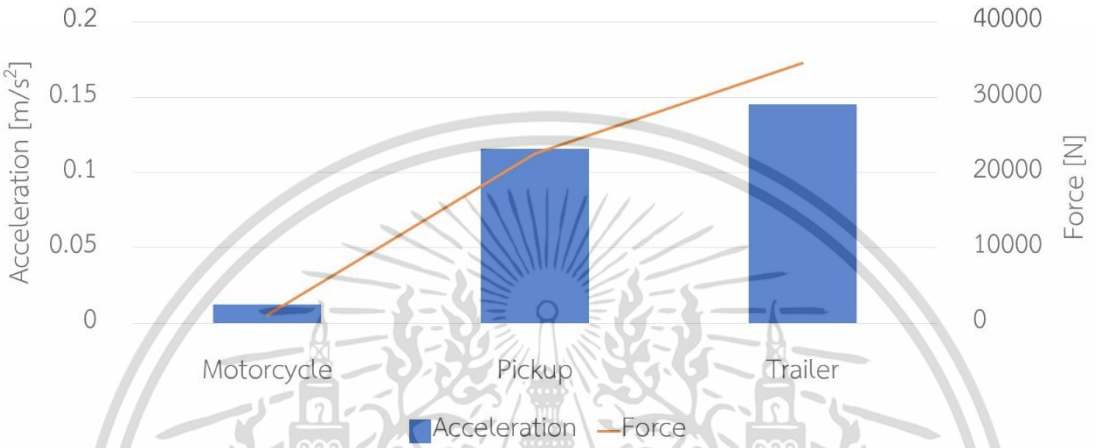


รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่ของรถพ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.26 พบว่า สำหรับการสั่นของจักรยานยนต์บนพื้นถนน ความถี่ที่ 3.052 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงเป็นลำดับที่ 1 โดยมีเท่ากับ 34.6 ไมโครเมตร และความถี่ที่ 4.578 เฮิรตซ์ ทำให้ระยะการสั่นสะเทือนมีค่าสูงรองลงมาเป็นลำดับที่ 2 โดยมีค่าเท่ากับ 15.7 ไมโครเมตร ซึ่งระยะการสั่นสะเทือนเริ่มมีค่าลดลงอย่างใกล้เคียงกันตั้งแต่ความถี่ 12.21 เฮิรตซ์ เป็นต้นไป โดยช่วงความถี่ที่รถพ่วงกระทำต่อถนนเกิดขึ้นในช่วงที่แคบกว่าจักรยานยนต์และรถกระบะ

4.3.4 การเปรียบเทียบความเร่งการสั่นสะเทือนกับแรงที่กระทำ



รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ความเร่งของการสั่นสะเทือนกับแรงที่มากระทำ

จากรูปที่ 4.27 พบว่า จักรยานยนต์ส่งแรงที่มากระทำต่อถนนเท่ากับ 1,049.67 นิวตัน รถกระบะส่งแรงที่กระทำต่อถนนเท่ากับ 22,537.94 นิวตัน และรถพ่วงขนาด 12 ล้อ ส่งแรงกระทำต่อถนนเท่ากับ 34,543.07 นิวตัน โดยแรงที่มากระทำนั้นพิจารณามาจากน้ำหนักโดยเฉลี่ยของพาหนะประเภทนั้นคูณกับแรงโน้มถ่วงของโลกดังที่แสดงในบทที่ 3 และทำให้ทราบว่าความเร่งในการสั่นสะเทือนแปรผันตามแรงที่มากระทำ โดยที่จักรยานยนต์มีความเร่งเท่ากับ 0.012 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง รถกระบะมีความเร่งเท่ากับ 0.115 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง และรถพ่วงมีความเร่งเท่ากับ 0.145 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง เพราะฉะนั้นรถพ่วงที่มีแรงกระทำมากที่สุดจึงส่งผลให้เกิดความเร่งในการสั่นมาก ขณะที่จักรยานยนต์มีแรงกระทำน้อยที่สุดส่งผลให้เกิดความเร่งในการสั่นสะเทือนน้อยที่สุดนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงงานการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาเรื่องคุณสมบัติเชิงกลของของไหลหนืดยืดหยุ่นและการลดสั่นสะเทือนบนโครงสร้างพื้นจำลอง โดยใช้ของไหลหนืดยืดหยุ่นเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญ ในส่วนของการทดลองแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบใหญ่ๆ ด้วยกัน ได้แก่

ขั้นตอนแรก คือ การติดตั้งตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นในเครื่องทดลองการสั่นสะเทือน

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรม
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของของไหลหนืดยืดหยุ่น
3. ทำให้ทราบถึงความแตกต่างระหว่างตัวหน่วงน้ำมันกับตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพด

ขั้นตอนที่สอง คือ การนำของไหลหนืดยืดหยุ่นมาบรรจุรองไว้ใต้ชุดพื้นจำลอง แล้วใช้เซนเซอร์จับวัดการสั่นของของไหลหนืดยืดหยุ่น

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งการสั่นสะเทือนกับแรง
3. การวัดการสั่นสะเทือนบนพื้นถนนจริง เพื่อทราบระยะการสั่นสะเทือนและความเร่งการสั่นสะเทือนบนท้องถนน
4. เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงในการศึกษาและพัฒนาโครงสร้างถนนที่นำของไหลหนืดยืดหยุ่นไปประยุกต์ใช้ต่อไปในอนาคต โดยผลการทดลองที่ได้นำเสนอออกมาในรูปแบบของกราฟและตาราง

การทดลองในขั้นตอนแรก นำของไหลมาใช้ด้วยกัน 2 ชนิด ได้แก่ น้ำมันที่เป็นของไหลนิวโตเนียนซึ่งเป็นของไหลประเภทที่ความหนืดมีค่าคงที่ และน้ำแป้งข้าวโพดที่เป็นของไหลนอนนิวโตเนียนซึ่งเป็นของไหลประเภทที่ความหนืดเปลี่ยนแปลงได้เมื่อได้รับแรงกระทำ มาเป็นตัวหน่วงในการทดลองกับเครื่องทดลองการสั่นสะเทือนเพื่อสังเกตพฤติกรรมของไหลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการสั่นสะเทือนกับเวลา ซึ่งจากผลการทดลองเครื่องทดลองการสั่นสะเทือน พบว่า

1. ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของน้ำมันมีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของน้ำแป้งข้าวโพด แต่ทว่าค่าสัมประสิทธิ์ของน้ำแป้งข้าวโพดมีค่ามากกว่าของน้ำมันเพราะมีคุณสมบัติที่เป็นของไหลหนืดมากกว่า ที่ผลการทดลองเป็นเช่นนี้สาเหตุเพราะคุณสมบัติของน้ำแป้งข้าวโพดหรือตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นแสดงคุณสมบัติให้เห็นได้ชัดเจนในกรณีที่ถูกแรงมากระทำมากๆ
2. สำหรับของไหลหนืดยืดหยุ่นนั้น ยิ่งมีแรงกระทำมากของไหลหนืดยืดหยุ่นยิ่งดูดซับการสั่นสะเทือนได้มากตามไปด้วยโดยแสดงพฤติกรรมเสมือนของแข็ง แต่หากมีแรงกระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยการดูดซับและการลดการสั่นสะเทือนน้อยลงไปด้วย หรือไม่ดูดซับเลยโดยแสดงพฤติกรรมเสมือนของไหล

3. จากการทดลองค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของน้ำมันมีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของน้ำแป้งข้าวโพดเนื่องจากการทดลองนี้ใช้แรงที่ค่อนข้างน้อย น้ำแป้งข้าวโพดจึงไม่สามารถแสดงคุณสมบัติได้เต็มที่นั่นเอง
4. จากกราฟความสัมพันธ์ระยะการสั่นสะเทือนกับเวลาที่ได้ พบว่า ในระบบที่ไม่มีตัวหน่วงความสามารถในการลดกระสั่นสะเทือนซึ่งแสดงออกมาในรูปแบบของอัตราการลดลงนั้นมีค่าที่น้อยมากตลอดทั้งช่วงเวลาการสั่นสะเทือนและลดลงเป็นแนวโน้มเชิงเส้นโดยความถี่ในการสั่นสะเทือนนั้นอยู่ที่ 4.16 รอบต่อวินาที พอทำการติดตั้งตัวหน่วงน้ำมัน พบว่า อัตราการลดลงของระยะการสั่นสะเทือนของของไหลที่เป็นนิวโตเนียนมีค่าเท่ากับ 0.085 เท่าในแต่ละลูกคลื่นที่ติดกัน ซึ่งความถี่ในการสั่นอยู่ที่ 3.92 รอบต่อวินาที ซึ่งน้อยกว่าระบบที่ไม่มีตัวหน่วง แสดงให้เห็นว่าระบบที่มีตัวหน่วงสามารถลดการสั่นได้อย่างมาก สังเกตุได้จากการลดลงที่แสดงในรูปแบบแนวโน้มคล้ายฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล
5. สำหรับกรณีที่ตัวหน่วงน้ำมันมีแรงชั่วขณะที่มีค่ามากมากระทำผลลัพธ์ที่ได้ คือ ตัวหน่วงสามารถลดการสั่นได้เพียงแค่ในระดับหนึ่งตามคุณสมบัติของของไหลนิวโตเนียนนั้นๆ เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการลดลงของระยะการสั่นสะเทือนสำหรับตัวหน่วงน้ำแป้งข้าวโพดที่มีค่ามากเฉพาะลูกคลื่นแรกมีค่าเท่ากับ -1.19 เท่าเทียบระหว่างคลื่นลูกแรกกับคลื่นลูกที่ติดกัน ซึ่งความถี่ในการสั่นอยู่ที่ 4.07 รอบต่อวินาที เพราะว่าแรงที่กระทำ ณ จุดเริ่มต้นมีค่ามากที่สุด หลังจากนั้นรูปแบบของอัตราการลดการสั่นสะเทือนมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ เนื่องจากแรงที่กระทำต่อระบบมีค่าน้อย ตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นอย่างน้ำแป้งข้าวโพดจึงไม่สามารถแสดงคุณสมบัติเชิงกลออกมาให้เห็นได้อย่างชัดเจน
6. ทำให้ทราบว่าตัวหน่วงจำพวกของไหลหนืดยืดหยุ่นนั้นเหมาะกับการใช้งานในเงื่อนไขที่มีแรงกระทำมีค่ามากและเป็นแรงชั่วขณะหรือที่เรียกว่า แรงช็อค ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของโครงงาน ซึ่งทำการจำลองและออกแบบแรงที่มากระทำต่อพื้นถนนดังกล่าวในส่วนการทดลองที่สองในโครงงานศึกษาเล่มนี้

การทดลองในขั้นตอนที่สองนั้น ทำการทดลองบนชุดพื้นจำลองโดยแบ่งย่อยเป็นอีก 4 การทดลอง ได้แก่ การทดลองที่ใช้ตัวหน่วงไหลยืดหยุ่นและไม่ใช้ตัวหน่วงไหลยืดหยุ่นโดยมีเงื่อนไขแรงที่มากระทำ คือ การปล่อยบาสเกตบอลตกจากความสูง 2 เมตร การเดิน การวิ่ง และการกระโดด เพื่อสังเกตุถึงพฤติกรรมของของไหลหนืดยืดหยุ่นว่าตอบสนองในรูปแบบความสัมพันธ์อย่างไร พบว่า

1. สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างระยะการสั่นสะเทือนกับความถี่นั้น เมื่อเปรียบเทียบแรงกระทำกับพื้นจำลองที่ไม่มีตัวหน่วงกับแบบที่มีตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นนั้น พบว่าความถี่ที่ทำให้เกิดระยะการสั่นสะเทือนมากที่สุดของทุกเงื่อนไขแรงกระทำมีค่าอยู่ที่ 3.052 เฮิรตซ์ ในเงื่อนไขแรงกระทำแรกคือ การใช้บาสเก็ตบอลที่มีมวล 0.58 กิโลกรัม ปล่อยจากความสูง 2 เมตร ได้ว่า แรงกระทำมีค่า 5.69 นิวตัน ระยะการสั่นสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของระบบไม่มีตัวหน่วงอยู่ที่ 30 ไมโครเมตร และระยะการสั่นสะเทือนของระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงอยู่ที่ 84.5 ไมโครเมตร

2. สาเหตุที่ระบบติดตั้งตัวหน่วงมีระยะการสั่นสะเทือนมากกว่านั้นเพราะว่า แรงที่กระทำต่อตัวหน่วงมีค่าน้อยเกิดไปทำให้ของไหลไม่สามารถแสดงพฤติกรรมคุณสมบัติเชิงกลของตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นได้ ต่อมาเมื่อทำทดลองแรงกระทำเงื่อนไขที่สอง คือ การเดิน โดยผู้เดินมีมวล 52 กิโลกรัม ได้ว่า แรงกระทำมีค่า 873.28 นิวตัน ระยะการสั่นสะเทือนของระบบไม่มีตัวหน่วงอยู่ที่ 521 ไมโครเมตร และระยะการสั่นสะเทือนของระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงอยู่ที่ 357 ไมโครเมตร โดยสามารถลดการสั่นได้ร้อยละ 31.48 สังเกตุได้ว่าตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นสามารถแสดงพฤติกรรมการลดการสั่นสะเทือนได้มากกว่าเงื่อนไขแรงกระทำแรก เมื่อทดลองต่อตามเงื่อนไขที่สาม คือ การวิ่ง โดยผู้ทดลองมีมวลเท่าเดิม ได้ว่า แรงกระทำมีค่า 1,164.37 นิวตัน ระยะการสั่นสะเทือนของระบบไม่มีตัวหน่วงอยู่ที่ 719 ไมโครเมตร และระยะการสั่นสะเทือนของระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงอยู่ที่ 458 ไมโครเมตร โดยสามารถลดการสั่นได้ร้อยละ 36.30 สังเกตุเห็นได้ว่าตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นแสดงประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนได้ดีขึ้นจากเงื่อนไขแรงกระทำที่สองเท่ากับร้อยละ 4.82 และเงื่อนไขที่สี่ซึ่งเป็นเงื่อนไขสุดท้าย คือ การกระโดด โดยผู้ทดลองมีมวลเท่าเดิม ได้ว่า แรงกระทำมีค่า 6,538 นิวตัน ระยะการสั่นสะเทือนของระบบไม่มีตัวหน่วงอยู่ที่ 6,563 ไมโครเมตร และระยะการสั่นสะเทือนของระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงอยู่ที่ 924 ไมโครเมตร โดยสามารถลดการสั่นสะเทือนได้อยู่ที่ร้อยละ 85.92 สังเกตุได้ว่าตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นแสดงประสิทธิภาพได้มากที่สุดเนื่องจากแรงที่กระทำมีค่ามากที่สุด
3. สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับแรงลัพธ์ที่กระทำต่อระบบที่ติดตั้งตัวหน่วง พบว่า ความเร่งของการสั่นสะเทือนแปรผันตามแรงลัพธ์ที่กระทำเช่นกัน ทั้งนี้ค่าแรงลัพธ์ที่กระทำต่อระบบมีค่าน้อยกว่าแรงที่กระทำเนื่องมาจากมีแรงอื่นๆ เช่น แรงหนืดของของไหลหนืดยืดหยุ่น ที่แสดงในทิศทางตรงกันข้ามจึงเกิดการหักล้างกับแรงที่กระทำ จึงสามารถสรุปได้ว่าความสามารถในการลดการสั่นสะเทือนของของไหลหนืดยืดหยุ่นแปรผันตามแรงที่มากระทำ ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติของนอนนิวโตเนียน คือ เมื่อออกแรงกระทำที่ค่อนข้างมากต่อระบบที่ติดตั้งตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นยิ่งเกิดการแข็งตัว แต่เมื่อออกแรงกระทำที่ค่อนข้างน้อยหรือผ่อนแรง ตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นจึงแสดงคุณสมบัติในการยุบตัวหรืออ่อนตัวลงนั่นเอง โดยได้ตรงตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้เบื้องต้น
4. นอกจากนี้ยังได้มีการนำเครื่องวัดการสั่นสะเทือนไปวัดความสัมพันธ์ต่างๆเช่นเดียวกับพื้นจำลอง แต่วัดบนพื้นถนนจริง โดยแบ่งประเภทยานพาหนะที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนเป็น 3 ประเภทด้วยกัน คือ จักยานยนต์ที่มีน้ำหนัก 1,049.67 นิวตัน รถกระบะที่มีน้ำหนักเฉลี่ย 22,537.94 นิวตัน และรถพ่วงที่มีน้ำหนักเฉลี่ย 34,543.07 นิวตัน ก่อให้เกิดระยะการสั่นสะเทือนบนท้องถนนเท่ากับ 1.76 ไมโครเมตร 28.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครเมตร และ 34.6 ไมโครเมตร ตามลำดับ สำหรับความเร่งที่เกิดขึ้นสำหรับยานพาหนะทั้ง 3 ประเภท มีค่าเท่ากับ 0.01 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง 0.12 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง และ 0.14 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าทั้งระยะการสั่นสะเทือนและความเร่งในการสั่นสะเทือนแปรผันตามแรงที่มากระทำเช่นเดียวกับการทดลองบนชุดพื้นจำลอง โดยจากข้อมูลเหล่านี้แสดงถึงความสัมพันธ์ที่ใช้ตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นในชุดพื้นจำลองกับพื้นถนนจริง เพื่อนำมาเปรียบเทียบให้เห็นถึงแนวโน้มการลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น รวมถึงผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ประเภทของของไหลหนืดยืดหยุ่น

เนื่องจากของไหลหนืดยืดหยุ่นที่ใช้ในการทดลองเป็นของไหลที่ได้มาจากการผสมกันในอัตราส่วนระหว่างแป้งข้าวโพด 2 ส่วน กับน้ำ 1 ส่วน ซึ่งแป้งข้าวโพดนั้นเป็นสารอินทรีย์ทำให้สามารถเสียหรือเกิดกลิ่นเหม็นได้ จึงมีอายุการใช้งานที่ค่อนข้างสั้นและไม่สามารถคงคุณสมบัติของไหลหนืดยืดหยุ่นได้นาน เพราะฉะนั้นในการใช้งานจริงจึงควรเลือกใช้สารอนินทรีย์หรือสารประกอบสังเคราะห์เป็นส่วนผสมแทน อีกทั้งของไหลจำเป็นต้องได้รับแรงที่มากพอเพื่อแสดงคุณสมบัติความหนืดและความยืดหยุ่นจึงเป็นไปตามสมมุติฐาน

5.2.2 เครื่องทดลองการสั่นสะเทือน

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการสั่นสะเทือนกับเวลาที่ได้จากเครื่องทดลองการสั่นสะเทือนนั้นไม่ได้เป็นค่าที่เกิดจากการสั่นสะเทือนแบบอุดมคติ เนื่องจากมีแรงฝืดตามข้อต่อ แรงเสียดทาน รวมถึงแรงต้านอากาศ จึงเป็นเหตุให้กราฟที่ได้ออกมาระยะการสั่นสะเทือนมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป แม้ว่ารูปแบบของการเคลื่อนที่นั้นเป็นการสั่นสะเทือนแบบอิสระ

5.2.3 การนำไปประยุกต์ใช้

เนื่องจากผลการทดลองระหว่างชุดพื้นจำลองที่ติดตั้งตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่น ชุดพื้นจำลองที่ไม่ติดตั้งตัวหน่วง และพื้นถนนจริง มีความสอดคล้องกันทั้งความเร่งและระยะการสั่นสะเทือน แต่พื้นถนนจริงไม่สามารถนำตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นมาติดตั้งบนถนนจริงได้ เพราะการจราจรในตัวเมืองโดยทั่วไปมีจำนวนยานพาหนะค่อนข้างเยอะส่งผลให้การจราจรติดขัด หากนำตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นไปใช้จะไม่เกิดประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากแรงที่ยานพาหนะกระทำต่อพื้นถนนไม่ได้เป็นแรงชั่วขณะ แต่เป็นแรงที่กระทำอย่างต่อเนื่องทำให้โครงสร้างถนนที่มีตัวหน่วงของไหลหนืดยืดหยุ่นเกิดการยุบตัวได้ เพราะฉะนั้นจึงเหมาะแก่การนำไปใช้ในถนนต่างจังหวัดในเส้นทางที่ยานพาหนะสามารถทำความเร็วได้จึงทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลจากผลการทดลองการสั่นสะเทือนบนพื้นชุดจำลอง

ตารางที่ ก1 ระยะการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ณ ความถี่ต่างๆของบาสเก็ตบอลแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วง

ความถี่[Hz]	ระยะการสั่นสะเทือน[m]			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1.525879	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3.051758	0.000024	0.000038	0.000028	0.000030
4.577637	0.000014	0.000023	0.000027	0.000022
6.103516	0.000010	0.000014	0.000024	0.000016
7.629395	0.000007	0.000011	0.000022	0.000013
9.155273	0.000005	0.000007	0.000022	0.000011
10.681152	0.000005	0.000005	0.000021	0.000010
12.207031	0.000003	0.000007	0.000021	0.000010
13.732910	0.000001	0.000006	0.000020	0.000009
15.258789	0.000000	0.000003	0.000020	0.000008
16.784668	0.000000	0.000003	0.000021	0.000008
18.310547	0.000001	0.000003	0.000021	0.000008
19.836424	0.000001	0.000001	0.000022	0.000008
21.362305	0.000000	0.000001	0.000022	0.000008
22.888186	0.000000	0.000001	0.000023	0.000008
24.414063	0.000000	0.000001	0.000024	0.000008
25.939939	0.000000	0.000000	0.000025	0.000008
27.465820	0.000000	0.000000	0.000024	0.000008
28.991701	0.000000	0.000000	0.000023	0.000008
30.517578	0.000000	0.000000	0.000021	0.000007
32.043457	0.000000	0.000000	0.000019	0.000006
33.569336	0.000000	0.000000	0.000015	0.000005
35.095215	0.000000	0.000000	0.000011	0.000004
36.621094	0.000000	0.000000	0.000007	0.000002
38.146973	0.000000	0.000000	0.000005	0.000002
39.672848	0.000000	0.000000	0.000004	0.000001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก2 ระยะการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ณ ความถี่ต่างๆของบาสเก็ตบอลแบบติดตั้งตัวหน่วง

ความถี่ [Hz]	ระยะการสั่นสะเทือน [m]			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1.525879	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3.051758	0.000109	0.000068	0.000077	0.000085
4.577637	0.000060	0.000033	0.000041	0.000045
6.103516	0.000019	0.000043	0.000007	0.000023
7.629395	0.000007	0.000055	0.000006	0.000023
9.155273	0.000004	0.000065	0.000003	0.000024
10.681152	0.000002	0.000072	0.000001	0.000025
12.207031	0.000002	0.000075	0.000000	0.000026
13.732910	0.000003	0.000076	0.000000	0.000026
15.258789	0.000001	0.000073	0.000000	0.000025
16.784668	0.000002	0.000069	0.000000	0.000024
18.310547	0.000001	0.000064	0.000000	0.000022
19.836424	0.000000	0.000058	0.000000	0.000019
21.362305	0.000001	0.000052	0.000000	0.000018
22.888186	0.000001	0.000051	0.000000	0.000017
24.414063	0.000001	0.000052	0.000000	0.000018
25.939939	0.000001	0.000054	0.000000	0.000018
27.465820	0.000001	0.000054	0.000000	0.000018
28.991701	0.000001	0.000051	0.000000	0.000017
30.517578	0.000001	0.000048	0.000000	0.000016
32.043457	0.000001	0.000044	0.000000	0.000015
33.569336	0.000001	0.000041	0.000000	0.000014
35.095215	0.000000	0.000038	0.000000	0.000013
36.621094	0.000000	0.000036	0.000000	0.000012
38.146973	0.000001	0.000033	0.000000	0.000011
39.672848	0.000001	0.000030	0.000000	0.000010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก3 ระยะการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ณ ความถี่ต่างๆของการเดินแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วง

ความถี่ [Hz]	ระยะการสั่นสะเทือน [m]			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1.525879	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3.051758	0.000515	0.000521	0.000526	0.000521
4.577637	0.000346	0.000343	0.000347	0.000346
6.103516	0.000284	0.000253	0.000274	0.000270
7.629395	0.000300	0.000232	0.000239	0.000257
9.155273	0.000343	0.000249	0.000228	0.000273
10.681152	0.000253	0.000206	0.000192	0.000217
12.207031	0.000127	0.000103	0.000115	0.000115
13.732910	0.000064	0.000028	0.000057	0.000049
15.258789	0.000047	0.000001	0.000035	0.000028
16.784668	0.000041	0.000010	0.000033	0.000028
18.310547	0.000037	0.000015	0.000033	0.000028
19.836424	0.000032	0.000017	0.000031	0.000027
21.362305	0.000025	0.000018	0.000030	0.000025
22.888186	0.000021	0.000018	0.000028	0.000022
24.414063	0.000018	0.000017	0.000025	0.000020
25.939939	0.000017	0.000016	0.000023	0.000019
27.465820	0.000017	0.000016	0.000021	0.000018
28.991701	0.000018	0.000015	0.000018	0.000017
30.517578	0.000019	0.000015	0.000016	0.000017
32.043457	0.000020	0.000017	0.000015	0.000017
33.569336	0.000020	0.000020	0.000015	0.000019
35.095215	0.000022	0.000021	0.000016	0.000020
36.621094	0.000023	0.000021	0.000019	0.000021
38.146973	0.000021	0.000020	0.000022	0.000021
39.672848	0.000014	0.000017	0.000022	0.000018
41.198730	0.000007	0.000012	0.000019	0.000013
42.724609	0.000004	0.000008	0.000015	0.000009
44.250488	0.000002	0.000007	0.000012	0.000007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

45.776371	0.000002	0.000006	0.000010	0.000006
47.302246	0.000002	0.000005	0.000008	0.000005
48.828125	0.000003	0.000004	0.000007	0.000005
50.354004	0.000001	0.000005	0.000005	0.000004

ตารางที่ ก4 ระยะการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ณ ความถี่ต่างๆของการเดินแบบติดตั้งตัวหน่วง

ความถี่ [Hz]	ระยะการสั่นสะเทือน [m]			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
1.525879	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3.051758	0.000312	0.000455	0.000302	0.000357
4.577637	0.000080	0.000275	0.000070	0.000142
6.103516	0.000074	0.000168	0.000092	0.000112
7.629395	0.000031	0.000118	0.000050	0.000066
9.155273	0.000036	0.000061	0.000016	0.000037
10.681152	0.000025	0.000016	0.000014	0.000018
12.207031	0.000011	0.000013	0.000007	0.000011
13.732910	0.000010	0.000019	0.000003	0.000011
15.258789	0.000008	0.000017	0.000001	0.000009
16.784668	0.000004	0.000011	0.000001	0.000006
18.310547	0.000002	0.000007	0.000003	0.000004
19.836424	0.000002	0.000008	0.000004	0.000005
21.362305	0.000001	0.000009	0.000002	0.000004
22.888186	0.000001	0.000006	0.000002	0.000003
24.414063	0.000001	0.000003	0.000001	0.000002
25.939939	0.000000	0.000003	0.000001	0.000001
27.465820	0.000001	0.000002	0.000001	0.000001
28.991701	0.000002	0.000001	0.000001	0.000001
30.517578	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
32.043457	0.000000	0.000002	0.000001	0.000001
33.569336	0.000001	0.000002	0.000001	0.000001
35.095215	0.000001	0.000002	0.000001	0.000001
36.621094	0.000000	0.000002	0.000001	0.000001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

38.146973	0.000000	0.000002	0.000001	0.000001
39.672848	0.000000	0.000001	0.000001	0.000001
41.198730	0.000001	0.000002	0.000001	0.000001
42.724609	0.000001	0.000001	0.000000	0.000001
44.250488	0.000001	0.000001	0.000000	0.000001
45.776371	0.000001	0.000001	0.000000	0.000001
47.302246	0.000000	0.000001	0.000000	0.000000
48.828125	0.000001	0.000002	0.000002	0.000002
50.354004	0.000002	0.000002	0.000002	0.000002

ตารางที่ ก5 ระยะการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ณ ความถี่ต่างๆของการวิ่งแบบไม่ติดตั้งตัวหน่วง

ความถี่ [Hz]	ระยะการสั่นสะเทือน [m]			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0
1.525879	0.000000	0.000000	0.000000	0
3.051758	0.000634	0.000865	0.000660	0.00071976
4.577637	0.000270	0.000254	0.000326	0.000283338
6.103516	0.000213	0.000256	0.000275	0.000248048
7.629395	0.000227	0.000206	0.000294	0.000242308
9.155273	0.000254	0.000081	0.000313	0.000216043
10.681152	0.000266	0.000063	0.000309	0.000212544
12.207031	0.000257	0.000041	0.000274	0.000190874
13.732910	0.000228	0.000018	0.000207	0.000150765
15.258789	0.000177	0.000035	0.000120	0.00011052
16.784668	0.000114	0.000010	0.000039	5.43505E-05
18.310547	0.000053	0.000013	0.000028	3.13185E-05
19.836424	0.000015	0.000016	0.000042	2.44183E-05
21.362305	0.000010	0.000005	0.000033	1.61946E-05
22.888186	0.000013	0.000012	0.000017	1.38138E-05
24.414063	0.000011	0.000022	0.000011	1.48438E-05
25.939939	0.000010	0.000019	0.000023	1.73666E-05
27.465820	0.000014	0.000013	0.000030	1.894E-05
28.991701	0.000019	0.000028	0.000033	2.65542E-05
30.517578	0.000023	0.000029	0.000032	2.80509E-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

32.043457	0.000024	0.000019	0.000028	2.3916E-05
33.569336	0.000021	0.000027	0.000023	2.36591E-05
35.095215	0.000015	0.000029	0.000017	2.02247E-05
36.621094	0.000009	0.000020	0.000010	1.30259E-05
38.146973	0.000007	0.000023	0.000003	1.10161E-05
39.672848	0.000007	0.000026	0.000002	1.16675E-05
41.198730	0.000008	0.000018	0.000006	1.07596E-05
42.724609	0.000008	0.000017	0.000009	1.10834E-05
44.250488	0.000006	0.000022	0.000009	1.2267E-05
45.776371	0.000003	0.000017	0.000008	9.01194E-06
47.302246	0.000002	0.000010	0.000005	5.62006E-06
48.828125	0.000005	0.000013	0.000005	7.74558E-06
50.354004	0.000007	0.000013	0.000004	7.94195E-06

ตารางที่ ก6 ระยะการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ณ ความถี่ต่างๆของการวิ่งแบบติดตั้งตัวหน่วง

ความถี่ [Hz]	ระยะการสั่นสะเทือน [m]			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0
1.525879	0.000000	0.000000	0.000000	0
3.051758	0.000418	0.000454	0.000502	0.000458068
4.577637	0.000406	0.000435	0.000460	0.000433709
6.103516	0.000190	0.000457	0.000440	0.000362191
7.629395	0.000106	0.000298	0.000349	0.000251066
9.155273	0.000049	0.000186	0.000270	0.00016821
10.681152	0.000011	0.000129	0.000208	0.000116279
12.207031	0.000016	0.000105	0.000157	9.2982E-05
13.732910	0.000033	0.000084	0.000113	7.66854E-05
15.258789	0.000045	0.000055	0.000078	5.90854E-05
16.784668	0.000052	0.000033	0.000056	4.69305E-05
18.310547	0.000057	0.000033	0.000044	4.50254E-05
19.836424	0.000060	0.000037	0.000038	4.47797E-05
21.362305	0.000058	0.000045	0.000030	4.44227E-05
22.888186	0.000054	0.000055	0.000026	4.50784E-05
24.414063	0.000048	0.000060	0.000032	4.67577E-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25.939939	0.000043	0.000056	0.000037	4.55418E-05
27.465820	0.000037	0.000047	0.000038	4.06812E-05
28.991701	0.000032	0.000041	0.000034	3.56892E-05
30.517578	0.000026	0.000039	0.000029	3.12378E-05
32.043457	0.000022	0.000039	0.000026	2.89092E-05
33.569336	0.000019	0.000040	0.000027	2.86796E-05
35.095215	0.000018	0.000041	0.000028	2.89658E-05
36.621094	0.000018	0.000040	0.000029	2.89627E-05
38.146973	0.000018	0.000036	0.000030	2.7911E-05
39.672848	0.000018	0.000032	0.000029	2.62295E-05
41.198730	0.000017	0.000031	0.000028	2.4974E-05
42.724609	0.000016	0.000030	0.000026	2.39995E-05
44.250488	0.000015	0.000028	0.000023	2.22667E-05
45.776371	0.000015	0.000027	0.000021	2.07983E-05
47.302246	0.000014	0.000026	0.000018	1.94648E-05
48.828125	0.000013	0.000024	0.000017	1.78998E-05
50.354004	0.000014	0.000022	0.000015	1.71268E-05

ตารางที่ ก7 ระยะการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ณ ความถี่ต่างๆของการกระโดดแบบติดตั้งตัวหน่วง

ความถี่ [Hz]	ระยะการสั่นสะเทือน [m]			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0
1.525879	0.000000	0.000000	0.000000	0
3.051758	0.007343	0.006174	0.006174	0.006563613
4.577637	0.003248	0.003150	0.003150	0.003182521
6.103516	0.001696	0.001880	0.001880	0.001818922
7.629395	0.001163	0.001230	0.001230	0.001207883
9.155273	0.000705	0.000865	0.000865	0.000811844
10.681152	0.000612	0.000643	0.000643	0.000632462
12.207031	0.000358	0.000496	0.000496	0.00045011
13.732910	0.000383	0.000396	0.000396	0.000391754
15.258789	0.000231	0.000324	0.000324	0.000293222
16.784668	0.000251	0.000271	0.000271	0.000264697
18.310547	0.000180	0.000231	0.000231	0.000214185

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19.836424	0.000166	0.000200	0.000200	0.00018863
21.362305	0.000139	0.000175	0.000175	0.000163285
22.888186	0.000120	0.000155	0.000155	0.000143623
24.414063	0.000107	0.000139	0.000139	0.00012833
25.939939	0.000094	0.000125	0.000125	0.000114617
27.465820	0.000082	0.000113	0.000113	0.000102772
28.991701	0.000075	0.000103	0.000103	9.34894E-05
30.517578	0.000063	0.000094	0.000094	8.39017E-05
32.043457	0.000062	0.000087	0.000087	7.83947E-05
33.569336	0.000052	0.000080	0.000080	7.08551E-05
35.095215	0.000053	0.000075	0.000075	6.76231E-05
36.621094	0.000045	0.000070	0.000070	6.14816E-05
38.146973	0.000046	0.000065	0.000065	5.88655E-05
39.672848	0.000039	0.000061	0.000061	5.37305E-05
41.198730	0.000039	0.000058	0.000058	5.14748E-05
42.724609	0.000033	0.000054	0.000054	4.74098E-05
44.250488	0.000033	0.000051	0.000051	4.53424E-05
45.776371	0.000029	0.000049	0.000049	4.22262E-05
47.302246	0.000028	0.000046	0.000046	4.01056E-05
48.828125	0.000027	0.000045	0.000045	3.87837E-05
50.354004	0.000023	0.000043	0.000043	3.63955E-05

ตารางที่ ก8 ระยะการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ณ ความถี่ต่างๆของการกระโดดแบบติดตั้งตัวหน่วง

ความถี่ [Hz]	ระยะการสั่นสะเทือน [m]			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0
1.525879	0.000000	0.000000	0.000000	0
3.051758	0.000912	0.000881	0.000977	0.00092356
4.577637	0.000673	0.000575	0.000558	0.000601681
6.103516	0.000526	0.000372	0.000423	0.000440018
7.629395	0.000486	0.000271	0.000499	0.000418845
9.155273	0.000423	0.000103	0.000323	0.000283034
10.681152	0.000366	0.000062	0.000308	0.000245385
12.207031	0.000324	0.000064	0.000292	0.000226417
13.732910	0.000273	0.000121	0.000307	0.000233822

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15.258789	0.000257	0.000127	0.000244	0.000209358
16.784668	0.000247	0.000080	0.000206	0.000177697
18.310547	0.000238	0.000059	0.000168	0.000154999
19.836424	0.000227	0.000075	0.000173	0.000158593
21.362305	0.000214	0.000101	0.000160	0.000158337
22.888186	0.000201	0.000111	0.000152	0.00015463
24.414063	0.000187	0.000108	0.000136	0.00014367
25.939939	0.000173	0.000099	0.000127	0.000132838
27.465820	0.000156	0.000104	0.000117	0.000125654
28.991701	0.000139	0.000101	0.000111	0.000116993
30.517578	0.000125	0.000095	0.000107	0.000108782
32.043457	0.000114	0.000090	0.000106	0.000103148
33.569336	0.000105	0.000086	0.000103	9.80571E-05
35.095215	0.000095	0.000078	0.000099	9.08376E-05
36.621094	0.000087	0.000067	0.000095	8.31795E-05
38.146973	0.000079	0.000063	0.000090	7.73094E-05
39.672848	0.000076	0.000054	0.000082	7.05396E-05
41.198730	0.000074	0.000048	0.000073	6.50919E-05
42.724609	0.000073	0.000048	0.000064	6.18307E-05
44.250488	0.000071	0.000045	0.000057	5.76446E-05
45.776371	0.000070	0.000046	0.000048	5.42373E-05
47.302246	0.000069	0.000049	0.000040	5.28395E-05
48.828125	0.000069	0.000050	0.000034	5.10799E-05
50.354004	0.000066	0.000049	0.000037	5.04737E-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

รายการสัญลักษณ์

k	หมายถึง	ค่านิจสปริง (N/m)
m	หมายถึง	มวลวัตถุ (kg)
$\ddot{x}$	หมายถึง	เวกเตอร์ความเร่ง (m/s^2)
$\dot{x}$	หมายถึง	เวกเตอร์ความเร็ว (m/s)
x	หมายถึง	เวกเตอร์ระยะทาง (m)
ζ	หมายถึง	อัตราส่วนความหน่วง
c	หมายถึง	สัมประสิทธิ์ความหน่วง (Ns/m)
ω_n	หมายถึง	ความถี่ธรรมชาติที่ปราศจากตัวหน่วง (rad/s)
ω_d	หมายถึง	ความถี่ธรรมชาติที่มีหน่วง (rad/s)
G	หมายถึง	เชียร์โมดูลัสของวัสดุ (Pa)
d	หมายถึง	เส้นผ่าศูนย์กลางของลวดสปริง (m)
D_o	หมายถึง	เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกของสปริง (m)
D	หมายถึง	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของสปริง (m)
n_a	หมายถึง	จำนวนคอยล์ของสปริง
δ	หมายถึง	อัตราการลดลงแบบลอการิทึม
x_t	หมายถึง	แอมพริจูดของคลื่นลูกแรกที่พิจารณา
x_{t+T}	หมายถึง	แอมพริจูดของคลื่นลูกที่ถัดจากลูกแรก
T	หมายถึง	คาบการสั่นสะเทือน (s)
A	หมายถึง	แอมพลจูด (m)
ϕ	หมายถึง	มุมเฟส(radian)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Daniel J. Inman. (2007**). Engineering Vibration**, New Jersey, Pearson Education, Inc. 3th ED.

[2] B.SamaliK.C.S.Kwok. (2007). **Use of viscoelastic dampers in reducing wind- and earthquake-induced motion of building structures**, Graduate School of Engineering, University of Technology, Sydney, PO Box 123, Broadway, NSW, Australia.

[3] Kotaro Mori, Daisuke Kono, Iwao Yamaji and Atsushi Matsubara. (2017). **Modelling of viscoelastic damper support for reduction in low frequency residual vibration in machine tools**, Kyoto University, Japan.

[4] Li Zhang and Mingzhou Su. (2018). **A design method of viscoelastic damper parameters based on the elastic-plastic response reduction curve,** Key Laboratory of Green Building in West China, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China.

[5] Junfeng Ge and Faouzi Alaya Cheikh. (2019). **Road surface condition detection utilizing resonance frequency and optical technologies,** Department of Computer Science, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Teknologivegen 22, 2815 Gjovik, Norway.

[6] Roberto Spinola Barbosa. (2012). **Vehicle Vibration Response Subjected to Longwave Measured Pavement Irregularity,** Department of Mechanical Engineering, Sao Paulo University, Portuguese.

[7] Bumroong Puangkird. (2007). **Numerical Simulations of Complex Viscoelastic Flows**, Department of Computer Science, Swansea university.

[8] อัคคพัฒน์ สว่างสุรีย์ และ ธนกฤต เผือกทอง. (2555). **การศึกษาประเมินความแข็งแรงและอายุการใช้งาน ของถนนลาดยางภายหลังก่อสร้าง,** ภาควิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ, สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง, มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้