

การออกแบบตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้โดยการใช้คานโค้ง
สำหรับเครื่องจักรหมุน

ACTIVE VIBRATION ABSORBER DESIGN WITH CURVED BEAM FOR
ROTATING MACHINE



วิทยาพร ตันติธนากรกุล
ศิวกรณ์ ชลาประเสริฐ
สิทธิชัย ศรีภัทราพันธุ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้โดยการใช้คานโค้ง
สำหรับเครื่องจักรหมุน

ACTIVE VIBRATION ABSORBER DESIGN WITH CURVED BEAM FOR
ROTATING MACHINE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACTIVE VIBRATION ABSORBER DESIGN WITH CURVED BEAM FOR
ROTATING MACHINE



WICHAYAPORN TANTITHANAKORNKUL

SIWAKORN CHALAPRASERT

SITTICHAJ SRIPATTARAPHAN

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

2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2564

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้โดยการใช้คานโค้งสำหรับ
เครื่องจักรหมุน

ACTIVE VIBRATION ABSORBER DESIGN WITH CURVED BEAM FOR
ROTATING MACHINE

ผู้จัดทำ

- | | | | |
|------------------|---------------|--------------|----------|
| 1. นางสาววิชญาพร | ตันติธนากรกุล | รหัสประจำตัว | 61010965 |
| 2. นายศิวกรณ์ | ชลาประเสริฐ | รหัสประจำตัว | 61011028 |
| 3. นายสิทธิชัย | ศรีภัทรพันธุ์ | รหัสประจำตัว | 61011110 |


(ผศ.ดร.อนันต์ พิณโสภณ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้โดยการใช้คานโค้งสำหรับเครื่องจักรหมุน

นางสาววิชญาพร	ตันติธนากรกุล	61010965
นายศิวกรณ์	ชลาประเสริฐ	61011028
นายสิทธิชัย	ศรีภัทราพันธุ์	61011110
ผศ.ดร.อนุรัตน์	พิณโสภณ	อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ	เดไปวา	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ปีการศึกษา 2564		

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้ด้วยคานโค้งสำหรับเครื่องจักรชนิดหมุน โดยมีขอบเขตของการศึกษาที่เครื่องจักรหมุนในช่วงความถี่ 10 ถึง 30 Hz และถูกบังคับให้เคลื่อนที่ในแนวตั้งเพียงเท่านั้น ระบบหลักถูกออกแบบความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 10.883 Hz เครื่องจักรหมุนถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ที่สามารถปรับความดันไฟฟ้าจาก 0-24 V มวลไม่สมดุลถูกติดตั้งบนเครื่องจักรหมุนเพื่อให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางสำหรับจำลองการสั่นสะเทือน โดยขนาดแรงหนีศูนย์กลางที่กระทำกับระบบหลักอยู่ระหว่าง 14.799 ถึง 133.189 N ที่ความเร็วรอบ 10 และ 30 Hz ตามลำดับ

ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้ถูกควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ และทำงานด้วยการปรับค่าความถี่خم้ซ้บของอุปกรณ์ให้ใกล้เคียงกับระบบหลัก โดยคานโค้งจะถูกนำมาใช้แทนสปริง และปรับความยาวของคานโค้งผ่านการหมุนของมอเตอร์เพื่อให้ได้ค่านิจสปริงที่ต้องการ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับถูกนำมาประยุกต์ใช้ส่งข้อมูลตำแหน่งหมุนของมอเตอร์ผ่านตัวต้านทานปรับค่าได้ จากนั้นจะคำนวณความคลาดเคลื่อนและส่งค่ากลับเพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้อง ประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนถูกวัดผลผ่านการเปรียบเทียบขนาดการสั่นสะเทือนสูงสุดระหว่างติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน ซึ่งมีประสิทธิภาพมากที่สุดที่ 34.917% และน้อยสุดที่ 7.711% โดยมีช่วงอัตราส่วนความถี่ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนใช้งานคือ 0.91 ถึง 1.07 เท่าของความถี่เครื่องจักรหมุน

ACTIVE VIBRATION ABSORBER DESIGN WITH CURVED BEAM FOR ROTATING MACHINE

Wichayaporn	Tantithanakornkul	61010965
Siwakorn	Chalaprasert	61011028
Sittichai	Sripattaraphan	61011110
Asst.Prof.Dr. Unnat	Pinsopon	Advisor
Asst.Prof.Dr. Nattawoot	Depaiwa	Co. Advisor
Year 2021		

Abstract

This thesis presents an active vibration absorber design with a curved beam for the rotating machine. For research scope, the frequency range of the rotating machine is suitable for 10 to 30 Hz and is forced to move only in the vertical direction. The primary system was designed with a natural frequency of 10.883 Hz. The rotating machine was worked by adjustable motor at 0-24 V. An unbalanced mass was installed on the machine to create centrifugal forces ranging between 14.799 to 133.189 N at the frequencies between 10 and 30 Hz respectively.

The active vibration absorber was controlled by a microcontroller and works by adjusting the absorber's frequency approximately to the primary system's frequency. The curved beam acted as a stiffness adjustable spring. The length of the curved beam could be adjusted by a rotating motor to achieve the desired value of the spring stiffness. The feedback control system read the motor position from the potentiometer and then calculated the error of the curved beam length so that the operator could correct for the right length. The efficiency was defined as a percentage reduction in vibration amplitude in the primary system while installed and uninstalled active absorber. The most efficient is 34.917% and the least at 7.711%. Furthermore, the range that has a Normalized magnitude less than 1 is 0.91 to 1.07. It is working frequency.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ต้องขอขอบคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ จนสามารถทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรัตน์ พิณโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษาและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐฉิ เตไปวา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนชี้แนะทางการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดระหว่างการดำเนินงาน

พี่เจตจำนง เกษประดิษฐ์ เจ้าหน้าที่เทคนิค ประจำภาควิชาเครื่องกล ที่ให้คำแนะนำ และช่วยแก้ปัญหาระหว่างการปฏิบัติการต่าง ๆ

รวมถึงกำลังใจจากทุก ๆ บุคคล โดยเฉพาะอย่างยิ่งครอบครัวที่เป็นกำลังใจสำคัญสำหรับการฝ่าฟันปัญหาต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนร่วมทีมที่ให้ความร่วมมือร่วมใจ สามัคคีและช่วยกันแก้ไขปัญหาต่าง ๆ เสมอมาจนปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วง

ปริญญาานิพนธ์นี้จะไม่สำเร็จลุล่วงได้ หากไม่ได้รับความช่วยเหลือจากทุกคน

นางสาววิชญาพร ตันติธนากรกุล

นายศิวกรณ์ ชลาประเสริฐ

นายสิทธิชัย ศรีภัทรพันธุ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีระบบการสันสะเทือนในเครื่องจักร.....	4
2.2 ทฤษฎีการดูดซับการสันสะเทือน.....	6
2.3 การโก่งตัวของคาน.....	10
2.4 ทฤษฎีระบบควบคุม.....	12
2.5 งานวิจัยและปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	13
บทที่ 3 แผนการดำเนินงานและอุปกรณ์.....	16
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	16
3.2 เครื่องจักรหมุนจำลองการสันสะเทือน.....	17
3.2.1 ส่วนประกอบและการทำงานของระบบหลัก.....	17
3.2.2 ความถี่ธรรมชาติของระบบหลัก.....	19
3.2.3 แรงที่กระทำกับระบบหลัก.....	20
3.3 ตัวดูดซับการสันสะเทือน.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1 ผังแสดงภาพรวมของการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้	21
3.3.2 ส่วนประกอบและการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้	23
3.4 อุปกรณ์และระบบสำหรับเก็บข้อมูล	25
3.4.1 เครื่องตรวจวัดความเร่ง (Accelerometer)	25
3.4.2 ระบบการเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Acquisition System (DAQ))	26
3.4.3 วิธีการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล	26
บทที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติและมุมหมุนของคานโค้ง	30
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่สปริงและมุมหมุนของคานโค้งทางทฤษฎี	30
4.1.1 ภาวะที่เกิดขึ้นจากมวลถ่วงที่กระทำกับปลายคานสำหรับองศาการหมุนใด ๆ	30
4.1.2 ภาวะที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของคานสำหรับองศาการหมุนใด ๆ	33
4.1.3 ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมหมุนของคานโค้งจากทฤษฎีบทลำดับที่สองของคาสติเกลียโน (Castigliano's Second Theorem)	36
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมหมุนของคานโค้งจากการทดลอง	39
4.2.1 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมหมุนของคานโค้ง	39
4.2.1.1 วิธีการทดลอง	39
4.2.1.2 ผลการทดลอง	40
4.2.2 ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมหมุนของคานโค้งจากการทดลอง	41
4.3 ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างมุมของคานโค้งและความถี่ที่ใช้งานในตัวดูดซับการสั่นสะเทือน	41
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	43
5.1 การทดลองหาระยะขจัด (Normalized Magnitude) ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน	43
5.1.1 วิธีการทดลองหาระยะขจัด (Normalized Magnitude) ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.2 ผลการทดลองหาระยะขจัด (Normalized Magnitude) ของตัวดูดซับ การสั่นสะเทือน.....	44
5.1.3 สรุปผลการทดลองหาระยะขจัด (Normalized Magnitude) ของตัวดูดซับ การสั่นสะเทือน.....	47
5.2 การทดลองหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนในช่วง ความถี่ 10 - 30 Hz.....	48
5.2.1 วิธีการทดลองหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนในช่วง ความถี่ 10-30 Hz.....	48
5.2.2 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนในช่วง ความถี่ 10-30 Hz.....	49
5.2.3 สรุปผลการทดลองหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนในช่วง ความถี่ 10-30 Hz.....	53
บทที่ 6 สรุปผลการดำเนินการและข้อเสนอแนะ.....	54
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	54
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	55
บรรณานุกรม.....	57
ภาคผนวก.....	59
ภาคผนวก ก.....	60
ภาคผนวก ข.....	76
ภาคผนวก ค.....	83

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงผลการทดลองของค่าปัจจัยสปริงเปรียบเทียบกับมุมหมุนของแกนโค้งที่ 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 และ 110 องศาตามลำดับ.....	40
5.1 แสดงผลการทดลองระหว่างอัตราส่วนความถี่ของเครื่องจักรหมุนและตัวดูดซับการสั่นสะเทือน (Frequency Ratio) ที่ความถี่ 14 Hz และตัวแปรไร้หน่วยของระยะขจัด (Normalized Magnitude).....	44
5.2 แสดงขนาดของการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่าง ๆ ในกรณีที่ไม่มีตัวดูดซับการสั่นสะเทือน.....	49
5.3 แสดงขนาดของการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 10 - 30 Hz ในกรณีที่มีตัวดูดซับการสั่นสะเทือน.....	50



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 สะพานทาโคมาแนโรส์ (Tacoma Narrows Bridge).....	2
2.1 แผนภาพวัตถุอิสระของมวลไม่สมดุล (ก) และระบบหลัก (ข).....	4
2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของระยะขจัดและอัตราส่วนระหว่าง ความถี่เครื่องจักรหมุนและความถี่ธรรมชาติ.....	6
2.3 แสดงตัวดูดซับการสั่นสะเทือนด้วยระบบมวล-สปริง.....	7
2.4 แสดงการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบหลักที่ติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน.....	10
2.5 แสดงถึงระบบควบคุมแบบเปิดสัญญาณเอาต์พุตจะไม่มีป้อนกลับมาสู่ระบบ.....	13
2.6 แสดงถึงระบบควบคุมแบบปิดสัญญาณเอาต์พุตจะถูกลดโดยอุปกรณ์วัด และป้อนสัญญาณกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต.....	13
3.1 โครงสร้างสำหรับการติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน.....	17
3.2 มอเตอร์กระแสตรงขนาด 350 W 24 V.....	18
3.3 สปริงรับแรงกด.....	18
3.4 จานหมุนและมวลไม่สมดุล.....	19
3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ใช้งานและขนาดของการสั่นสะเทือน แบบไม่มีตัวดูดซับการสั่นสะเทือน.....	20
3.6 ผังแสดงภาพรวมของการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้.....	22
3.7 โครงสร้างตัวดูดซับการสั่นสะเทือน.....	23
3.8 คานโค้ง.....	24
3.9 มวลดูดซับการสั่นสะเทือน.....	24
3.10 ชุดควบคุม.....	25
3.11 เครื่องตรวจวัดความเร่ง.....	26
3.12 ระบบเก็บรวบรวมข้อมูล DEWE43A (ซ้าย) และ DEWESoftX (ขวา).....	26
3.13 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องตรวจวัดความเร่ง.....	27
3.14 การต่อสายระหว่างอุปกรณ์.....	27
3.15 การตั้งค่าสัญญาณความเร่งในโปรแกรม DEWESoftX.....	28
3.16 การแปลงข้อมูลความเร่งเป็นขนาดการสั่นสะเทือน.....	28
3.17 แสดงการแปลงฟูเรียร์จาก DEWESoftX.....	29

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
4.1 แสดงแบบจำลองการทำงานของคานโค้ง จุดยึดคาน และแขนยึดคาน.....	30
4.2 แสดงการทำงานของคานโค้งที่ยื่นจากจุดยึดคานเป็นระยะ s ที่ θ ใด ๆ บนระบบพิกัดหลัก $X'Y'$ และระบบพิกัดรอง xy	31
4.3 แสดงแผนภาพอิสระของคานโค้งอิสระ (ส่วนที่ยื่นออกไปจากจุดยึดคาน) โดยแรงกระทำเกิดจากมวลถ่วง.....	32
4.4 แสดงแผนภาพอิสระของคานโค้งที่มีแรงกระทำ คือ น้ำหนักของคานเพียงเท่านั้น.....	33
4.5 แสดงการวิเคราะห์หาแรงจุดเทียบเท่าของคานโค้ง.....	34
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมหมุนของคานโค้ง.....	41
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมและความถี่ของคานโค้ง.....	42
5.1 ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนที่มีคานโค้งและมวลถ่วง.....	44
5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของระยะขจัดและอัตราส่วนระหว่างความถี่ เครื่องจักรหมุนและความถี่ธรรมชาติ.....	47
5.3 แสดงระบบการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรหมุน.....	48
5.4 แสดงผลการลดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ในช่วง 10-30 Hz โดยมีเส้นแนวโน้มพหุนามกำลัง 3	52
5.5 แสดงประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ในช่วง 10-30 Hz.....	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการดำเนินชีวิตประจำวันและงานวิศวกรรมนั้นสามารถพบเจอการสั่นสะเทือนได้มากมาย ซึ่งมีทั้งจากการสั่นสะเทือนโดยธรรมชาติ และจากการสั่นสะเทือนโดยการบังคับ อาทิเช่น การสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าเมื่อเกิดแรงที่ไม่สมดุลจากตำแหน่งของผ้า การสั่นสะเทือนของรถยนต์เมื่อวิ่งผ่านลูกระนาด หรือพื้นผิวที่ไม่เรียบ รวมทั้งการสั่นสะเทือนที่เกิดจากธรรมชาติต่าง ๆ

การสั่นสะเทือน (Vibration) คือ การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัตถุเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงที่หยุดนิ่ง การสั่นสะเทือนนั้นสามารถสร้างความเสียหายอย่างมากเกินกว่าที่จะสามารถคาดการณ์ได้ ในอดีตนั้นมีเหตุการณ์การสั่นสะเทือนเนื่องจากแรงลมที่ตรงกับความถี่ธรรมชาติของสะพานทาโคมาแนโรส (Tacoma Narrows Bridge) จนเกิดการพังทลายในปี ค.ศ. 1940 ในด้านงานวิศวกรรมนั้น การสั่นสะเทือนสามารถสร้างความเสียหายได้อย่างมากมายต่อเครื่องจักร อาทิเช่น การสั่นสะเทือนจนเกิดการสึกหรอหรือแตกร้าว ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง และลดประสิทธิภาพในการทำงานลงไป ด้วยเหตุนี้ความรู้ ความเข้าใจในพฤติกรรมของการสั่นสะเทือนจึงมีบทบาทและความสำคัญอย่างมากในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือน รวมทั้งการประยุกต์ใช้ความสามารถของการสั่นสะเทือนมาสร้างเป็นประโยชน์

การแก้ปัญหาการสั่นสะเทือนหรือการใช้ประโยชน์จากการสั่นสะเทือนในปัจจุบันนั้นมีให้เห็นได้มากมาย อาทิเช่น การแก้ปัญหาการสั่นสะเทือนจากเครื่องยนต์โดยการใช้อย่างรองแทนเครื่อง การออกแบบสิ่งก่อสร้างด้วยการตระหนักถึงความถี่ธรรมชาติของระบบ การนำการสั่นสะเทือนจากคลื่นในทะเลมาผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น ในการแก้ปัญหาการสั่นสะเทือนรูปแบบหนึ่งนั้น คือ การติดตั้งอุปกรณ์ที่มีหน้าที่ในการดูดซับการสั่นสะเทือนเพิ่มเติมไปยังระบบเพื่อทำให้การสั่นสะเทือนลดลง จึงเรียกอุปกรณ์ลดการสั่นสะเทือนรูปแบบนี้ว่า ตัวดูดซับการสั่นสะเทือน (Vibration Absorber) ที่มีการใช้งานในปัจจุบันอย่างกว้างขวาง อาทิเช่น การติดตั้งตุ้มขนาดใหญ่เพื่อดูดซับการสั่นสะเทือนในตึกสูง เป็นต้น โดยหลักการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน คือ การติดตั้งตัวเก็บพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ที่มีค่าที่เหมาะสมกับระบบเพื่อลดการสั่นสะเทือน แต่สำหรับการทำงานที่เกิดแรงจากความไม่สมดุลที่มีการแปรผันหลายค่า จึงเป็นเหตุให้ประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนลดลงไปเมื่อมีความไม่เหมาะสมของพารามิเตอร์กับการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้การแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้ตาม

ความเหมาะสมของการสั่นสะเทือนของระบบในแต่ละช่วงเวลานั้นจึงมีความสำคัญเพื่อคงไว้ซึ่งประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน



รูปที่ 1.1 สะพานทาโคมาแนโรส์ (Tacoma Narrows Bridge)

(ที่มา: <https://www.re-thinkingthefuture.com/architectural-facts/a2573-10-things-you-did-not-know-about-the-tacoma-narrows-bridge/>)

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาความสามารถของคานโค้งที่ถูกใช้เป็นตัวเก็บและปลดปล่อยพลังงานศักย์ในการลดการสั่นสะเทือน
2. เพื่อลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากแรงที่ไม่สมดุลในช่วงการสั่นสะเทือนที่ต่างกันออกไปแบบอัตโนมัติ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้สามารถลดการสั่นสะเทือนจากแรงที่ไม่สมดุลที่เกิดขึ้นต่างกันได้
2. คานโค้งสามารถที่จะทำหน้าที่เป็นตัวเก็บและปลดปล่อยพลังงานศักย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. รูปแบบการทำงานที่เหมาะสมของความสัมพันธ์กันระหว่างระบบควบคุมและตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1. เครื่องจักรหมุนถูกจำกัดการเคลื่อนที่ให้เคลื่อนที่ได้หนึ่งมิติ
2. คานโค้งถูกใช้แทนสปริงในการทำหน้าที่เป็นตัวเก็บและปลดปล่อยพลังงานศักย์
3. มวลของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนมีค่าไม่เกินร้อยละ 25 ของมวลเครื่องจักรหมุน
4. ความถี่ของการสั่นสะเทือนอยู่ในช่วงตั้งแต่ 10 ถึง 30 Hz

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

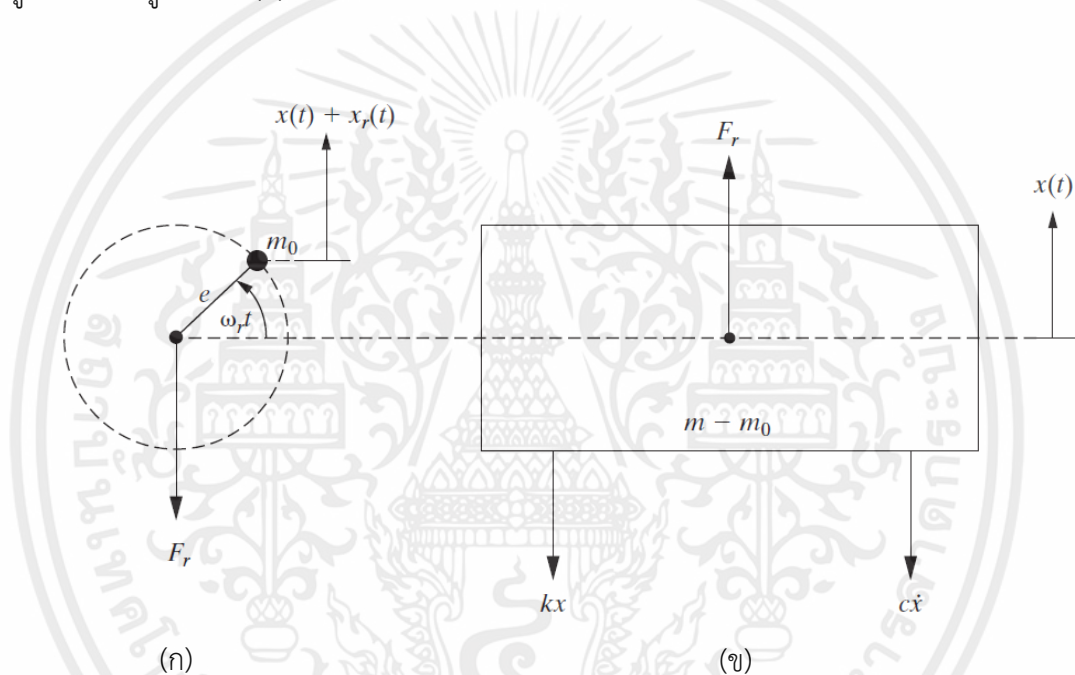
1. สามารถลดการสั่นสะเทือนที่มีการแปรผันต่างกันไปตามแรงที่กระทำจากความไม่สมดุลได้โดยอัตโนมัติ
2. เพิ่มขีดความสามารถในการแก้ปัญหาการสั่นสะเทือนที่ใช้ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนจากเดิมที่สามารถทำได้เพียงแค่ช่วงที่จำกัด
3. แสดงให้ทราบถึงความหลากหลายของตัวเก็บและปลดปล่อยพลังงานศักย์ที่ไม่ได้ใช้เพียงแต่สปริงเท่านั้น
4. สามารถประยุกต์ใช้ได้กับการแก้ไขปัญหาอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนด้วยตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่า

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีระบบการสั่นสะเทือนในเครื่องจักร

การสั่นสะเทือนส่วนมากถูกแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การสั่นสะเทือนโดยอิสระ (Free Vibration) และการสั่นสะเทือนแบบบังคับ (Force vibration) สำหรับการสั่นสะเทือนในเครื่องจักร หมุนนั้นเป็นแบบบังคับ ที่เกิดจากความไม่สมดุลของมวลขณะเครื่องจักรทำงาน ซึ่งทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางดังรูปที่ 2.1 (ก)



รูปที่ 2.1 แผนภาพวัตถุอิสระของมวลไม่สมดุล (ก) และระบบหลัก (ข)

(ที่มา: Daniel J. Inman, 2014)

เมื่อพิจารณาในกรณีศึกษาที่บังคับให้มีการเคลื่อนที่เฉพาะแนวตั้งดังรูปที่ 2.1 โดยมีมวลไม่สมดุลขนาด m_0 อยู่ห่างจากจุดหมุนของเครื่องจักรเป็นระยะทาง e และเครื่องจักรหมุนด้วยความถี่ ω สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของมวลไม่สมดุลได้ดังสมการที่ (2.1)

$$m_0(\ddot{x} + \ddot{x}_r) = -F_r \quad (2.1)$$

เมื่อพิจารณาถึงแรงที่กระทำต่อเครื่องจักรที่มีมวลรวมทั้งหมด m ตามรูปที่ 2.1 (ข) จะได้สมการการเคลื่อนที่ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(m - m_0)\ddot{x} = F_r - c\dot{x} - kx \quad (2.2)$$

แทนสมการที่ (2.1) ในสมการที่ (2.2) จะได้

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m_0\ddot{x}_r \quad (2.3)$$

โดยที่ x_r ซึ่งเป็นระยะห่างตามแนวตั้งของมวลไม่สมดุล ทำให้มีค่าเท่ากับ $x_r = e\sin\omega_r t$ และจะมีค่าของ $\ddot{x}_r = -e\omega_r^2 \sin\omega_r t$ สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m_0e\omega_r^2 \sin\omega_r t \quad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.4) ทำให้ทราบได้ว่า พจน์ $m_0e\omega_r^2 \sin\omega_r t$ แสดงถึงแรงภายนอกที่กระทำต่อระบบ หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า $F_r = m_0e\omega_r^2 \sin\omega_r t$ หากพิจารณาถึงการตอบสนองของระบบที่สภาวะคงตัว ผลจากแรงภายนอกจะเป็นตัวกำหนดลักษณะของผลลัพธ์ดังนี้

$$x_p(t) = X\sin(\omega_r t - \theta) \quad (2.5)$$

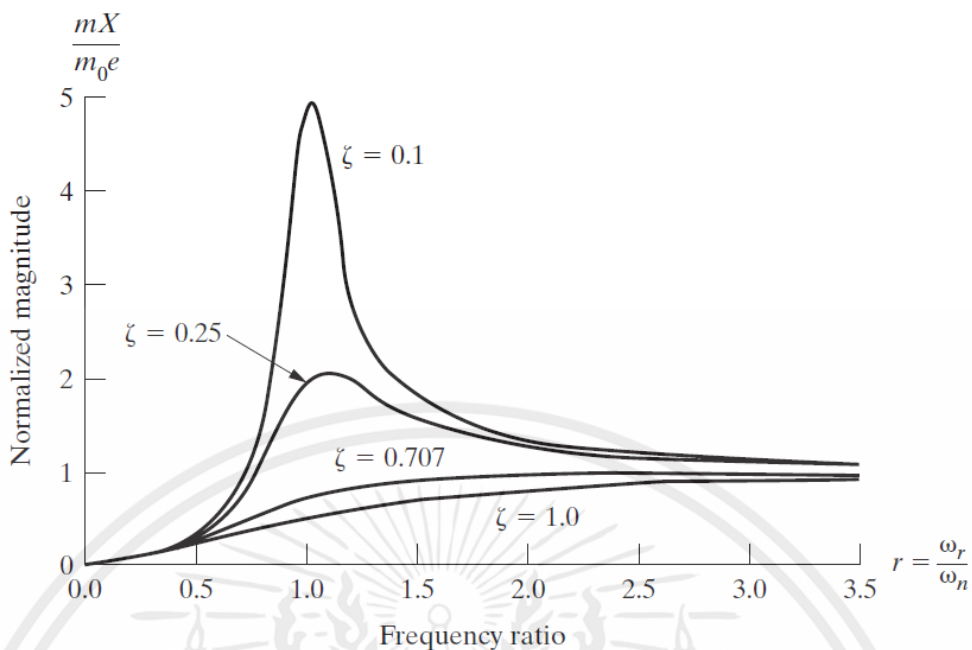
โดยกำหนดให้ $r = \omega_r/\omega_n$ ทำให้ได้ระยะขจัดสูงสุดเท่ากับสมการที่ (2.6)

$$X = \frac{m_0e}{m} \frac{r^2}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.6)$$

และมุมเฟสเท่ากับสมการที่ (2.7)

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\zeta r}{1-r^2} \quad (2.7)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2.6) จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนความถี่ธรรมชาติและความถี่เครื่องจักรหมุนที่มีค่าใกล้กัน หรือ r เข้าใกล้ 1 ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนมากดังรูปที่ 2.2

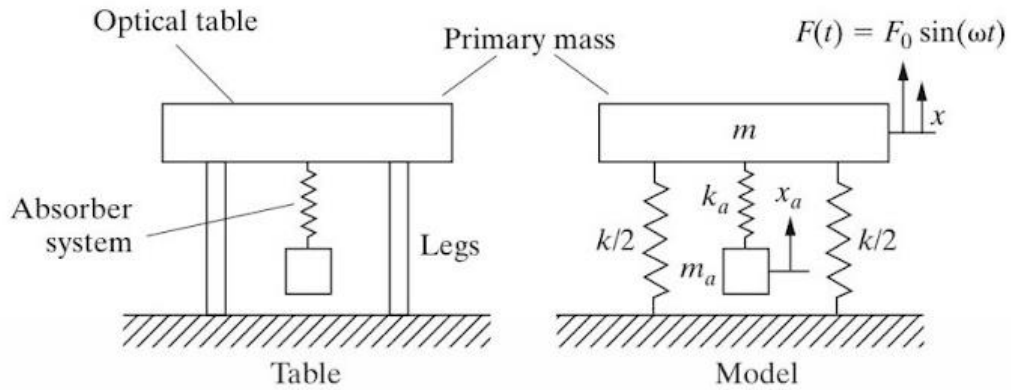


รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของระยะขจัดและอัตราส่วนระหว่างความถี่เครื่องจักรหมุนและความถี่ธรรมชาติ (ที่มา: Daniel J. Inman, 2014)

2.2 ทฤษฎีการดูดซับการสั่นสะเทือน

วิธีการลดการสั่นสะเทือนทำได้โดยการหยุดหรือตัดแปลงแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือน แต่การหยุดการสั่นสะเทือนจากแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนเป็นไปได้ยาก หรืออาจเป็นไปได้เลย เนื่องจากชิ้นส่วนของเครื่องจักรมีการเคลื่อนที่ และเกิดความเร่งขึ้นจากการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ ทำให้เครื่องจักรเกิดการไม่สมดุลในการทำงานขึ้น และเกิดการสั่นสะเทือนขึ้นในที่สุด เพื่อลดการสั่นสะเทือนจึงมีการควบคุมการสั่นสะเทือนให้อยู่ในช่วงที่เครื่องจักรสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย

ตัวดูดซับการสั่นสะเทือน (Vibration Absorber) เป็นการลดการสั่นสะเทือนจากระบบโดยตรงด้วยการติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือนเข้าไปในระบบ ซึ่งมีมวลที่ทำหน้าที่ดูดซับการสั่นสะเทือนผ่านสปริงที่ยึดอยู่กับระบบดังรูปที่ 2.3 เมื่อติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน ระบบจะมีการเปลี่ยนจาก 1 องศาอิสระ (Degree of Freedom, DOF) เป็น 2 องศาอิสระ ทำให้ระบบใหม่หลังการติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือนมีค่าความถี่ธรรมชาติ 2 ค่า



รูปที่ 2.3 แสดงตัวดูดซับการสั่นสะเทือนด้วยระบบมวล-สปริง
(ที่มา: Daniel J. Inman, 2014)

พิจารณาการเคลื่อนที่ของระบบประกอบด้วยมวล m และค่านิจสปริง k ถูกกระทำด้วยแรงภายนอกแบบฮาร์โมนิก $F_0 \sin \omega t$ การเคลื่อนที่ของมวล m แสดงด้วยระยะ $x = x(t)$ เมื่อติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือนด้วยมวล m_a และค่านิจสปริง k_a ทำให้มีระยะการสั่นของมวลดูดซับการสั่นสะเทือน x_a สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้ดังสมการที่ (2.8)

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{x}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k + k_a & -k_a \\ -k_a & k_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0 \sin \omega t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

เนื่องจากมวลทั้งสองก้อนสั่นด้วยความถี่เท่ากัน มีการเคลื่อนที่ผ่านจุดสมดุลพร้อมกัน จึงสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$x(t) = X \sin \omega t \quad (2.9)$$

$$x_a(t) = X_a \sin \omega t \quad (2.10)$$

แทนสมการที่ (2.9) และ (2.10) ลงไปในสมการที่ (2.8) จะได้

$$\begin{bmatrix} k + k_a - m\omega^2 & -k_a \\ -k_a & k_a - m_a\omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ X_a \end{bmatrix} \sin \omega t = \begin{bmatrix} F_0 \\ 0 \end{bmatrix} \sin \omega t \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ X_a \end{bmatrix} = \frac{1}{(k + k_a - m\omega^2)(k_a - m_a\omega^2) - k_a^2} \begin{bmatrix} k_a - m_a\omega^2 & k_a \\ k_a & k + k_a - m\omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{1}{(k + k_a - m\omega^2)(k_a - m_a\omega^2) - k_a^2} \begin{bmatrix} (k_a - m_a\omega^2)F_0 \\ k_a F_0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

ใช้วิธีการหาค่าตอบทางเมทริกซ์จะได้ผลเฉลยของขนาดการเคลื่อนที่ของมวลระบบ X และขนาดการเคลื่อนที่ของมวลดูดซับการสั่นสะเทือน X_a ดังสมการที่ (2.13) และ (2.14)

$$X = \frac{(k_a - m_a\omega^2)F_0}{(k + k_a - m\omega^2)(k_a - m_a\omega^2) - k_a^2} \quad (2.13)$$

$$X_a = \frac{k_a F_0}{(k + k_a - m\omega^2)(k_a - m_a\omega^2) - k_a^2} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.13) สามารถกำหนดค่าของตัวแปร k_a และ m_a เพื่อให้การสั่นสะเทือนเข้าสู่สภาวะคงตัว ($X = 0$) ได้ดังสมการ (2.15)

$$\omega^2 = \frac{k_a}{m_a} \quad (2.15)$$

จากสมการที่ (2.10) และ (2.14) สามารถคำนวณสมการการเคลื่อนที่ที่สภาวะคงตัวของมวลตัวดูดซับการสั่นสะเทือนได้ดังสมการ (2.16) โดยที่ $k_a = m_a\omega^2$

$$x_a = -\frac{F_0}{k_a} \sin\omega t \quad (2.16)$$

ดังนั้นการสั่นสะเทือนของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนจะมีค่าตามสมการ (2.17)

$$X_a = F_0/k_a \quad (2.17)$$

ซึ่งแรงที่กระทำโดยมวลของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนต่อมวลระบบหลักเท่ากับสมการ (2.18)

$$k_a x_a = k_a(-F_0/k_a) = -F_0 \quad (2.18)$$

ดังนั้นเมื่อตัวดูดซับการสั่นสะเทือนถูกปรับค่าไปยังความถี่ที่เหมาะสม และได้เข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว แรงที่ถูกดูดซับโดยตัวดูดซับการสั่นสะเทือนจะมีขนาดเท่ากับแรงที่ไม่สมดุล (F_0) ทำให้แรงลัพธ์ที่กระทำต่อมวลระบบหลักมีค่าเท่ากับศูนย์ตลอดเวลา หรือไม่มีการเคลื่อนที่

การจะทำให้ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนสามารถดูดซับการสั่นสะเทือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยอย่างง่าย ประกอบด้วย

1. กระบวนการหาผลเฉลยโดยตรงสำหรับแรงภายนอกที่กระทำแบบฮาร์มอนิกนั้นจะต้องไม่เบี่ยงเบนไปจากค่าคงที่มาก ถ้าเกิดการเบี่ยงเบนมากเกินไปจะทำให้การดูดซับไม่มีประสิทธิภาพ

2. ค่านิจสปริง k_a ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนจะต้องสามารถรองรับแรงสั่นสะเทือนและการโก่งตัวได้อย่างเต็มที่ เช่นเดียวกับมวลของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน โดยสามารถตรวจสอบอัตราส่วนมวล μ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาจากการสั่นพ้องในการออกแบบตัวดูดซับการสั่นสะเทือนได้จากสมการ (2.19)

$$\mu = \frac{m_a}{m} \quad (2.19)$$

จากสมการ (2.20) และ (2.21) เพื่อหาค่าความถี่ โดย ω_p คือ ค่าความถี่เชิงมุมธรรมชาติของระบบหลักก่อนติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน และ ω_a คือ ค่าความถี่เชิงมุมธรรมชาติของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนก่อนติดตั้งเข้ากับระบบหลัก

$$\omega_p = \sqrt{\frac{k_p}{m_p}} \quad (2.20)$$

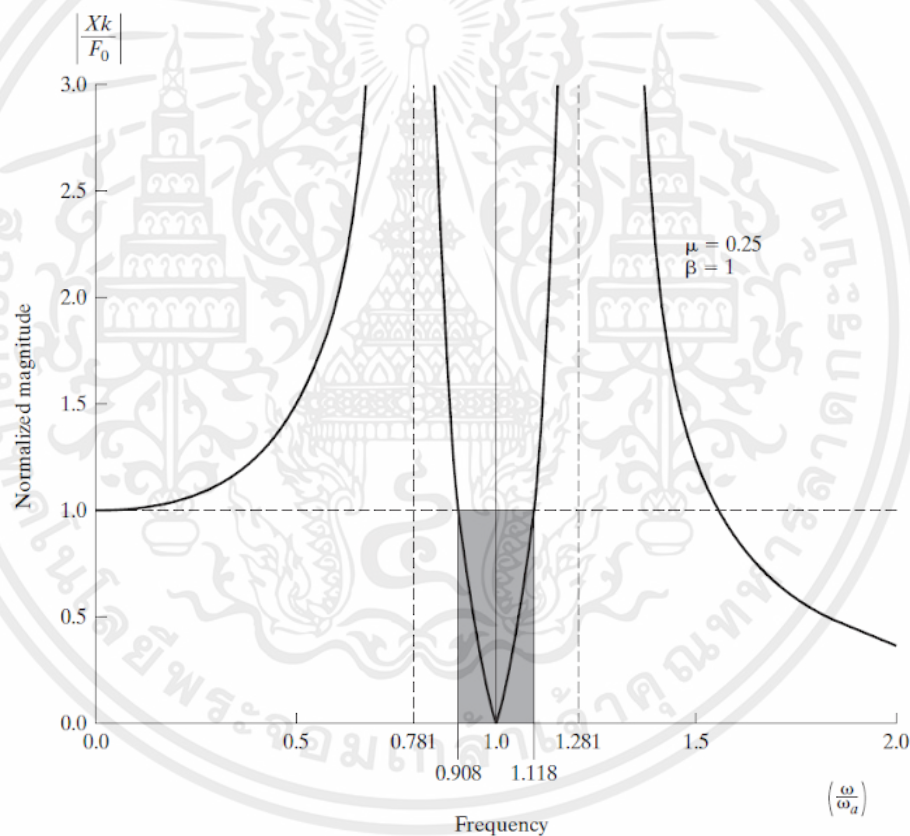
$$\omega_a = \sqrt{\frac{k_a}{m_a}} \quad (2.21)$$

เมื่อ β คือ อัตราส่วนการสั่นสะเทือน (The Frequency Ratio) ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนกับระบบหลัก สามารถหาได้จากสมการที่ (2.22) เมื่อแทนค่า μ , ω_a และ ω_p ลงในสมการที่ (2.13) จะได้ความสัมพันธ์ของขนาดการสั่นสะเทือนของมวล m ของระบบแบบไร้มิติดังสมการที่ (2.23)

$$\beta = \omega_a / \omega_p \quad (2.22)$$

$$\frac{Xk}{F_0} = \frac{1 - \omega^2/\omega_n^2}{\left[1 + \mu(\omega_a/\omega_p)^2 - (\omega/\omega_p)^2\right] \left[1 - (\omega/\omega_a)^2 - \mu(\omega_a/\omega_p)^2\right]} \quad (2.23)$$

ดังรูปที่ 2.4 เมื่อกำหนดให้ $\mu = 0.25$ และ $\beta = 1$ จะพบว่าช่วงที่แสดงส่วนการแรงแงเป็นช่วงที่ขนาดการสั่นสะเทือนน้อยกว่าระยะยวบตัวสถิตของระบบที่เกิดจากแรง F_0 ซึ่งเป็นช่วงการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน ($0.908\omega_a < \omega < 1.118\omega_a$) และในการเลือกค่ามวลของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน m_a กับค่านิจสปริงของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน k_a นั้นจะต้องเลือกให้อยู่ในช่วงการแรงแงนี้ และระวังไม่ให้ค่า r มีค่าตรงกับหรือใกล้กับ 0.781 หรือ 1.281 ซึ่งจะทำให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonance)



รูปที่ 2.4 แสดงการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบหลักที่ติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน
(ที่มา: Daniel J. Inman, 2014)

2.3 การโค้งตัวของคาน

ในปริปัญานี้พันธฉบับนี้ คานโค้งถูกนำไปใช้แทนสปริงโดยอาศัยพฤติกรรมคั้นรูปของวัสดุที่มีความยืดหยุ่น (Elastic Behavior)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการคำนวณขนาดของการโก่งตัวของคานโค้งได้อ้างอิงมาจากทฤษฎีของคาสติเกลียโน (Deflection by Castigliano's Theorem) และทำการทดสอบขนาดการโก่งตัวของคานโค้งผ่านชิ้นงานเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของทฤษฎี

สำหรับพลังงานความเครียด (Strain Energy) จะถูกสะสมในรูปของผลรวมในแต่ละองค์ประกอบย่อย (Element) ของชิ้นงานที่ยาว L ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.24) สำหรับโมเมนต์ดัด และสมการที่ (2.25) สำหรับโมเมนต์บิด

$$U_b = \int_0^L \frac{M_b^2}{2EI} dx \quad (2.24)$$

$$U_t = \int_0^L \frac{M_t^2}{2GK_t} dx \quad (2.25)$$

โดยที่ M_b คือ โมเมนต์ดัดของวัสดุ ($N \cdot m$)

M_t คือ โมเมนต์บิดของวัสดุ ($N \cdot m$)

E คือ มอดุลัสสภาพยืดหยุ่น (GPa)

G คือ มอดุลัสแรงเฉือน (GPa)

I คือ โมเมนต์เฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดคาน ($kg \cdot m^2$)

K_t คือ โมเมนต์เชิงขั้วของวัสดุ (m^4)

ดังนั้นพลังงานความเครียดรวมของวัสดุจึงเท่ากับผลรวมของพลังงานจากโมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิดตามสมการที่ (2.26)

$$U = \int_0^L \frac{M_b^2}{2EI} dx + \int_0^L \frac{M_t^2}{2GK_t} dx \quad (2.26)$$

จากนั้นทฤษฎีของคาสติเกลียโนข้อที่สองถูกนำมาใช้สำหรับขนาดการหาการโก่งตัวของคาน δ เมื่อมีภาระ P มากระทำดังสมการที่ (2.27)

$$x_j = \frac{\partial U}{\partial P_j} = \int_0^L \frac{M}{EI} \frac{\partial M}{\partial P_j} dx \quad (2.27)$$

2.4 ทฤษฎีระบบควบคุม

ระบบควบคุมสามารถแบ่งชนิดของระบบควบคุมได้ดังนี้

1. **ระบบคงตัวหรือระบบพลวัต (Static or Dynamics Systems)** ถ้าระบบมีสัญญาณเอาต์พุตที่เวลา t_1 ขึ้นกับสัญญาณอินพุตที่เวลา t_1 เท่านั้น คือ ระบบไม่มีความจำ ถ้าระบบมีสัญญาณเอาต์พุตขึ้นกับสัญญาณอินพุตในอดีตหรือระบบสามารถเก็บพลังงานได้ คือ ระบบพลวัตหรือระบบมีความจำ

2. **ระบบเวลาต่อเนื่องหรือระบบเวลาดีสครีต (Continuous-Time or Discrete-time Systems)** ถ้าระบบมีสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตที่มีค่าทุกช่วงเวลา หรืออาจกล่าวได้ว่า คือ ระบบเวลาต่อเนื่อง ถ้าระบบเกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา และสัญญาณเอาต์พุตและอินพุตไม่มีการเปลี่ยนแปลง คือ ระบบเวลาดีสครีต

3. **ระบบเชิงเส้นหรือระบบไม่เชิงเส้น (Linear or Non-Linear Systems)** ถ้าสมการอนุพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 1 และถ้าตามทฤษฎีการทับซ้อน (Superposition Theorem) คือ ถ้า $Y_1(t)$ เป็นสัญญาณเอาต์พุต จากสัญญาณอินพุต $r_1(t)$ และ $Y_2(t)$ เป็นสัญญาณเอาต์พุต จากสัญญาณอินพุต $r_2(t)$ สัญญาณเอาต์พุตที่รวมกันจะเท่ากับ $Y_1(t) + Y_2(t)$ จะเป็นแบบระบบเชิงเส้น

4. **ระบบที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาหรือระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time-Varying or Time-invariant Systems)** ถ้าระบบมีพารามิเตอร์ของสมการอนุพันธ์เปลี่ยนแปลงตามเวลา อาจกล่าวได้ว่า ถ้าป้อนสัญญาณอินพุต $x(t)$ ที่เวลา t แล้วจะได้สัญญาณเอาต์พุตเป็น $y(t)$ ที่เวลา t ดังนั้นหากป้อนสัญญาณอินพุตเดิมที่เวลา $(t + \delta)$ คือ $x(t + \delta)$ สัญญาณเอาต์พุตผลลัพธ์ จะไม่ได้ค่าเดิม คือ $y(t + \delta)$ นั่นคือระบบที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ถ้าระบบมีคุณสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาเปลี่ยนไป คือ ระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

ระบบควบคุมสามารถแบ่งได้ 2 แบบตามการส่งสัญญาณย้อนกลับ (Feedback) ดังนี้

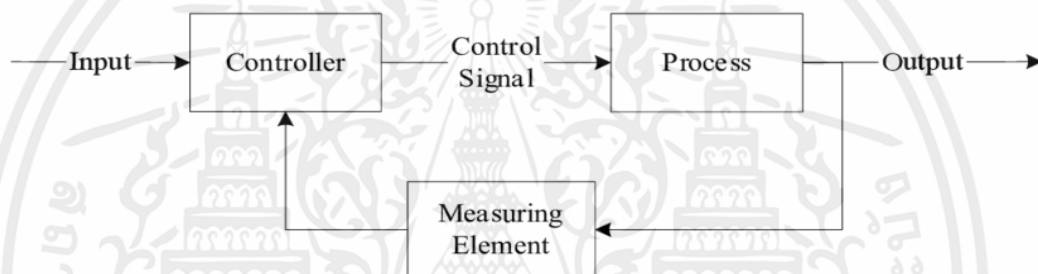
1. **ระบบควบคุมแบบเปิด (Open Loop Control System)** คือ ระบบที่มีการป้อนอินพุตเข้าไปให้กับระบบ (System) และได้สัญญาณเอาต์พุตออกมาแต่ไม่มีการนำสัญญาณป้อนกลับมาสู่ระบบซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



Open Loop System

รูปที่ 2.5 แสดงถึงระบบควบคุมแบบเปิดสัญญาณเอาต์พุตจะไม่มีการป้อนกลับมาสู่ระบบ

2. ระบบควบคุมแบบปิด (Close loop Control System) คือ ระบบที่มีการป้อนอินพุตเข้าไปให้กับระบบ (System) และได้สัญญาณเอาต์พุตออกมา แต่มีอุปกรณ์เครื่องมือวัด (Measurement) ในการนำสัญญาณเอาต์พุตกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตเพื่อปรับปรุงแก้ไขให้มีความผิดพลาดลดลงอยู่ตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.6



Closed Loop System

รูปที่ 2.6 แสดงถึงระบบควบคุมแบบปิดสัญญาณเอาต์พุตจะถูกวัดโดยอุปกรณ์วัด และป้อนสัญญาณกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต

2.5 งานวิจัยและปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิธีการดูดซับการสั่นสะเทือนได้มีมาอย่างยาวนาน และได้มีความหลากหลายอย่างมากในปัจจุบันทั้งในรูปแบบของการดูดซับการสั่นสะเทือนสำหรับความถี่คงที่ หรือแม้กระทั่งการดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผ่านโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์อีกด้วย โดยในอดีตนั้นความสงสัยในการสั่นสะเทือนเริ่มขึ้นจากการสังเกตปรากฏการณ์รอบตัว อาทิเช่น การสั่นของกลอง กีตาร์ จนได้มีการศึกษาการสั่นสะเทือนอย่างจริงจังตามมา

กาลิเลโอ (Galileo) (ค.ศ. 1590) ได้เริ่มต้นศึกษาคุณสมบัติของลูกตุ้มโดยค้นพบว่าคาบของลูกตุ้มนั้นไม่ขึ้นกับขนาดการสั่นสะเทือนสูงสุด (Amplitude) หรือความกว้างของการแกว่ง โดยประมาณและไม่ขึ้นกับมวล ทำให้หลังจากนั้นเริ่มมีการศึกษาเรื่องนาฬิกาลูกตุ้มและสัญญาณฮาร์มอนิกในเวลาถัดมา

ในเวลาต่อมาการศึกษาเรื่องการสั่นสะเทือนของวัสดุโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ได้แพร่หลายมากขึ้น (ที่มา: Singiresu S. Rao, 2018)

ฮุก (Hooke) (ค.ศ. 1676) ได้ศึกษาคคุณสมบัติทางวัสดุโดยกล่าวถึงความยืดหยุ่นและแรงในสปริง (ที่มา: Singiresu S. Rao, 2018)

โทมัส ยัง (Thomas Young) (ค.ศ. 1807) ได้ศึกษาสภาพยืดหยุ่นของวัสดุซึ่งเป็นการสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด และต่อมาค้นพบมอดุลัสของยัง (Young's Modulus) (ที่มา: The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2021)

คาร์โล อัลเบอร์โต คาสติเกลียโน (Carlo Alberto Castigliano) (ค.ศ. 1879) ได้ศึกษาวิธีการกำหนดขนาดการโก่งตัวของคานสำหรับวัสดุที่มีความยืดหยุ่นเชิงเส้น นอกจากนี้ทฤษฎีบทลำดับที่สองของคาสติเกลียโน (Castigliano's Second Theorem) ได้ถูกนำมาใช้ในปริปัญานิพนธ์นี้

เมื่อการศึกษาการสั่นสะเทือนได้รับความสนใจมากขึ้น องค์ความรู้ ความเข้าใจต่าง ๆ ในการสั่นสะเทือนทำให้เกิดความพยายามในการแก้ปัญหาที่เกิดจากการสั่นสะเทือนโดยได้มีการคิดค้นการแก้ปัญหาด้วยวิธีการต่าง ๆ มากมายแต่วิธีหนึ่งที่ใช้ได้อย่างแพร่หลาย และถูกนำมาศึกษาในปริปัญานิพนธ์นี้คือการลดการสั่นสะเทือนด้วยตัวดูดซับการสั่นสะเทือน (ที่มา: HPD Construction, 2021)

ฟราห์ม (Frahm) (ค.ศ. 1909) ได้ศึกษาการดูดซับการสั่นแบบพลวัต (Dynamic Vibration Absorber) แบบไม่มีตัวหน่วง โดยการเพิ่มระบบมวลติดสปริงเข้าไปในระบบ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สำคัญสำหรับการลดการสั่นสะเทือนในปัจจุบัน (ที่มา: Singiresu S. Rao, 2018)

ออร์มอนด์รอยด์และเดน ฮาร์ท็อก (Ormondroyd and Den Hartog) (ค.ศ. 1928) ได้เผยแพร่แนวคิดการลดการสั่นสะเทือนด้วยตัวดูดซับการสั่นสะเทือนผ่านหนังสือการสั่นสะเทือนเชิงกล (Mechanical Vibrations) (ค.ศ. 1940) (ที่มา: Daniel J. Inman, 2014)

ฮันต์ (Hunt) (ค.ศ. 1979) ได้เสนอแนวคิดการใช้ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนสำหรับการแก้ปัญหาในเฮลิคอปเตอร์โดยการประยุกต์ใช้กับระบบไฮดรอลิกระหว่างใบพัดและลำตัว (ที่มา: Hunt, 1979)

ลามันคูซา (Lamancusa) (ค.ศ. 1987) ได้มีการใช้ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบ Adaptive-Passive สำหรับแก้ปัญหาเสียงรบกวนจากเครื่องยนต์ (ที่มา: Lamancusa, 1989)

เฟรนเช็ค (Franchek) และคณะ (ค.ศ. 1995) ได้มีการแก้ปัญหการสั่นสะเทือนของอาคารด้วยการใช้ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนติดตั้งกับแบบจำลองอาคาร 4 ชั้น (ที่มา: Franchek M.A., Ryan M.W. และ Bernhard R.J., 1996)

บูจารี (Boujari) และคณะ (ค.ศ. 2012) ได้มีการพัฒนาระบบดูดซับการสั่นสะเทือนด้วยการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบ PID 2 องศาอิสระร่วมด้วย (ที่มา: Boujari, 2012)

ฤทธิและวิทวัส (พ.ศ. 2563) ได้ศึกษาทฤษฎีการลดการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงกับความยาวของคานโค้ง ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ได้มีการทดลองผ่านทางโปรแกรมจำลองโดยเปรียบเทียบขนาดการสั่นสะเทือนสูงสุดระหว่างติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือนและไม่ได้ติดตั้ง ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมจำลองพบว่าสามารถลดขนาดการสั่นสะเทือนได้สูงสุด 65.49 % ที่ความถี่ใช้งาน 15 Hz (ที่มา: ฤทธิและวิทวัส, 2563)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

แผนการดำเนินงานและอุปกรณ์

ในบทนี้จะกล่าวถึงแผนการดำเนินงานและรายละเอียดของอุปกรณ์ซึ่งรวมถึงวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลในปฏิยานิพนธ์ฉบับนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ปฏิยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการดำเนินการเชิงประดิษฐ์โดยมีการพัฒนาต่อยอดจากปฏิยานิพนธ์การออกแบบตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้ด้วยคานโค้งสำหรับเครื่องจักรชนิดหมุนของนายฤทธิ คมไธสง และนายวิทวัส ศรีมา โดยจะเริ่มดำเนินการดำเนินงานจากการศึกษาทฤษฎีและตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ที่มีอยู่ พัฒนาวิธีการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน ตลอดจนการทดสอบประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน สามารถเรียงลำดับขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีการสั่นสะเทือนในเครื่องจักรและวิธีการดูดซับการสั่นสะเทือน
2. ศึกษาการโค้งตัวของคานโค้ง
3. ศึกษาระบบควบคุมและการวัด
4. ศึกษาวิธีการและคำสั่งการทำงานสำหรับเขียนโปรแกรมควบคุม
5. ปรับปรุงโครงสร้างสำหรับเครื่องจักรหมุนจำลองการสั่นสะเทือนและตรวจสอบการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงสำหรับการหมุน
6. ออกแบบวิธีการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้
7. วางแผนการจัดซื้ออุปกรณ์ในการสร้างเครื่องจักรหมุนจำลองการสั่นสะเทือนและตัวดูดซับการสั่นสะเทือน
8. ตรวจสอบการทำงานของระบบหลักให้เป็นไปตามที่กำหนด
9. ทดสอบคานโค้งสำหรับการใช้แทนสปริง และหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างคานโค้งสปริงและมุมหมุน
10. เขียนคำสั่งควบคุมการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้ด้วยโปรแกรม Arduino
11. ทดสอบความสามารถในการดูดซับการสั่นสะเทือนสำหรับตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้
12. สรุปผลการดำเนินงานและจัดทำสรุปเล่มรายงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องจักรหมุนจำลองการสั่นสะเทือน

ระบบหลักของการสั่นสะเทือนถูกนำมาจำลองเป็นเครื่องจักรหมุนที่เกิดการสั่นสะเทือนจากมวลไม่สมดุล โดยควบคุมมอเตอร์เพื่อปรับค่าความเร็วรอบของเครื่องจักร ซึ่งเครื่องจักรหมุนจำลองการสั่นสะเทือน มีความสำคัญในการนำการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับระบบหลักมาใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนโดยการวัดขนาดของการกระจัดและความเร็วรอบของมอเตอร์ มอเตอร์ที่ติดกับระบบหลักนั้นจะถูกนำมาออกแบบตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

3.2.1 ส่วนประกอบและการทำงานของระบบหลัก

ระบบหลักมีส่วนประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังนี้

1. โครงสร้างสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์

อุปกรณ์สำหรับการรองรับน้ำหนักของเครื่องจักร ประกอบไปด้วย แผ่นอลูมิเนียมขนาด 30x30 cm สำหรับการติดตั้งระบบการหมุนติดตั้งบนสปริงและมีการติดตั้งลูกปืนสไลด์เพื่อที่จะควบคุมการเคลื่อนที่ได้เฉพาะแนวตั้ง และแผ่นอลูมิเนียมขนาด 30x30 cm สำหรับการติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างสำหรับการติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

2. ระบบการหมุน

เป็นอุปกรณ์สำหรับสร้างการหมุนในระบบหลัก ประกอบด้วย มอเตอร์กระแสตรง 350 W 24 V ระบบกระแสไฟฟ้าจากตัวต้านทานปรับค่าได้ทำให้สามารถปรับความเร็วรอบได้ตั้งแต่ 10 จนถึง 30 Hz ต่อเข้ากับสายพานเพื่อที่จะส่งกำลังไปยังเพลลาสำหรับการหมุน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 มอเตอร์กระแสตรงขนาด 350 W 24 V

3. สปริง

อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและเป็นปัจจัยที่กำหนดความถี่ธรรมชาติของระบบหลัก ประกอบด้วยสปริงรับแรงกด 4 ชั้น มีค่าความแข็งที่ 12.784 N/mm ติดตั้งที่ฐานเพื่อรองรับ โครงสร้างหลัก ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 สปริงรับแรงกด

4. จานหมุนและมวลไม่สมดุล

เป็นอุปกรณ์สำหรับสร้างแรงไม่สมดุลประกอบด้วย จานไม่สมดุล แผ่นเหล็กทรงกลม หนา 0.6 cm เส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 cm เจาะรูศูนย์กลางวงกลมสำหรับติดตั้งเพลลา และที่ระยะห่าง 3.75 cm สำหรับการติดตั้งมวลไม่สมดุล ประกอบด้วย แผ่นเหล็กกลม หนา 0.35 cm เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 cm จำนวน 3 แผ่น โดยมีน้ำหนักรวมเท่ากับ 0.10 kg ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 งานหมุนและมวลไม่สมดุล

3.2.2 ความถี่ธรรมชาติของระบบหลัก

ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบจะช่วยในการออกแบบระบบหลักและความเร็วรอบในการหมุนของมอเตอร์เพื่อไม่ให้เกิดการสั่นสะเทือนที่มากเกินไป โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.1)

$$\omega = \sqrt{k/m} \quad (3.1)$$

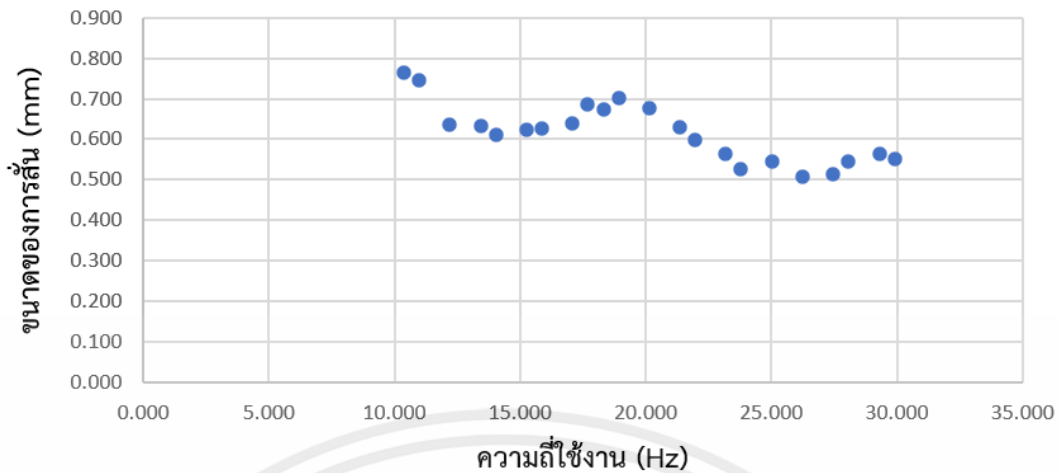
เมื่อแทนค่ามวลทั้งหมดที่สปริงต้องรับภาระ เท่ากับ 10.94 kg และค่านิจสปริงรวมทั้ง 4 ชั้น ที่ต่อแบบขนาน เท่ากับ 51.137 N/mm ทำให้ได้ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ

$$\omega = \sqrt{51137/10.94}$$

$$\omega = 68.370 \text{ rad/s}$$

$$\omega = 10.883 \text{ Hz}$$

สำหรับการทดลองเพื่อใช้เทียบกับการคำนวณทางทฤษฎีนั้น ทำโดยการใช้เครื่องตรวจวัดความเร่ง (Accelerometer) เพื่อหาขนาดของการกระจัดที่ต่างออกไปจากปกติอย่างเด่นชัดในขณะที่ระบบไม่มีมวลของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนติดตั้งอยู่เพื่อหาความถี่ธรรมชาติของระบบ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ใช้งานและขนาดของการสั่นสะเทือนแบบไม่มีตัวดูดซับ การสั่นสะเทือน

ทำให้ทราบว่าความถี่ธรรมชาติของระบบหลักที่ได้จากการทดลองนั้นอยู่ในช่วงประมาณ 10.38 Hz นอกจากนี้ระบบอาจมีความถี่ธรรมชาติที่หลายความถี่ซึ่งเป็นผลมาจากการที่อุปกรณ์ไม่ได้เป็นชิ้นเดียวกันและคุณสมบัติวัสดุมีความยืดหยุ่น จะสามารถสังเกตได้จากขนาดการสั่นสะเทือนที่สูงขึ้นที่ประมาณ 18 Hz และที่ประมาณ 29 Hz

ความแตกต่างของความถี่ธรรมชาติของระบบระหว่างทฤษฎีและการทดลองนั้นเป็นผลมาจากค่าปัจจัยสปริงในการทดลองนั้นไม่ได้มีค่าคงที่ตลอดในแต่ละช่วงในการรับแรง รวมถึงการยืดสปริงอาจไม่แน่นอนหนาพอ ซึ่งทำให้การยืดหดของสปริงนั้นทำงานได้ไม่เต็มที่

3.2.3 แรงที่กระทำกับระบบหลัก

แรงที่กระทำกับระบบหลักมาจากแรงหนีศูนย์กลางของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของมวลไม่สมดุล โดยขนาดของแรงจะขึ้นกับมวลไม่สมดุล ระยะห่างและความเร็วรอบการหมุนดังสมการที่ (3.2)

$$F_r = m_0 e \omega_r^2 \sin \omega_r t \quad (3.2)$$

โดยที่ m_0 คือ มวลไม่สมดุลมีขนาดเท่ากับ 0.1 kg

e คือ ระยะห่างระหว่างมวลไม่สมดุลจนถึงจุดศูนย์กลางเพลลาเท่ากับ 3.75 cm

ω_r คือ ความเร็วรอบซึ่งสามารถปรับค่าได้ในช่วง 10 ถึง 30 Hz หรือ 62.820 ถึง 188.460 rad/s

ดังนั้น จากสมการที่ (3.2) ขนาดของแรงที่กระทำกับระบบหลักสูงสุดจะอยู่ในช่วง 14.799 N ที่ความถี่ 10 Hz ถึง 133.189 N ที่ความถี่ 30 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

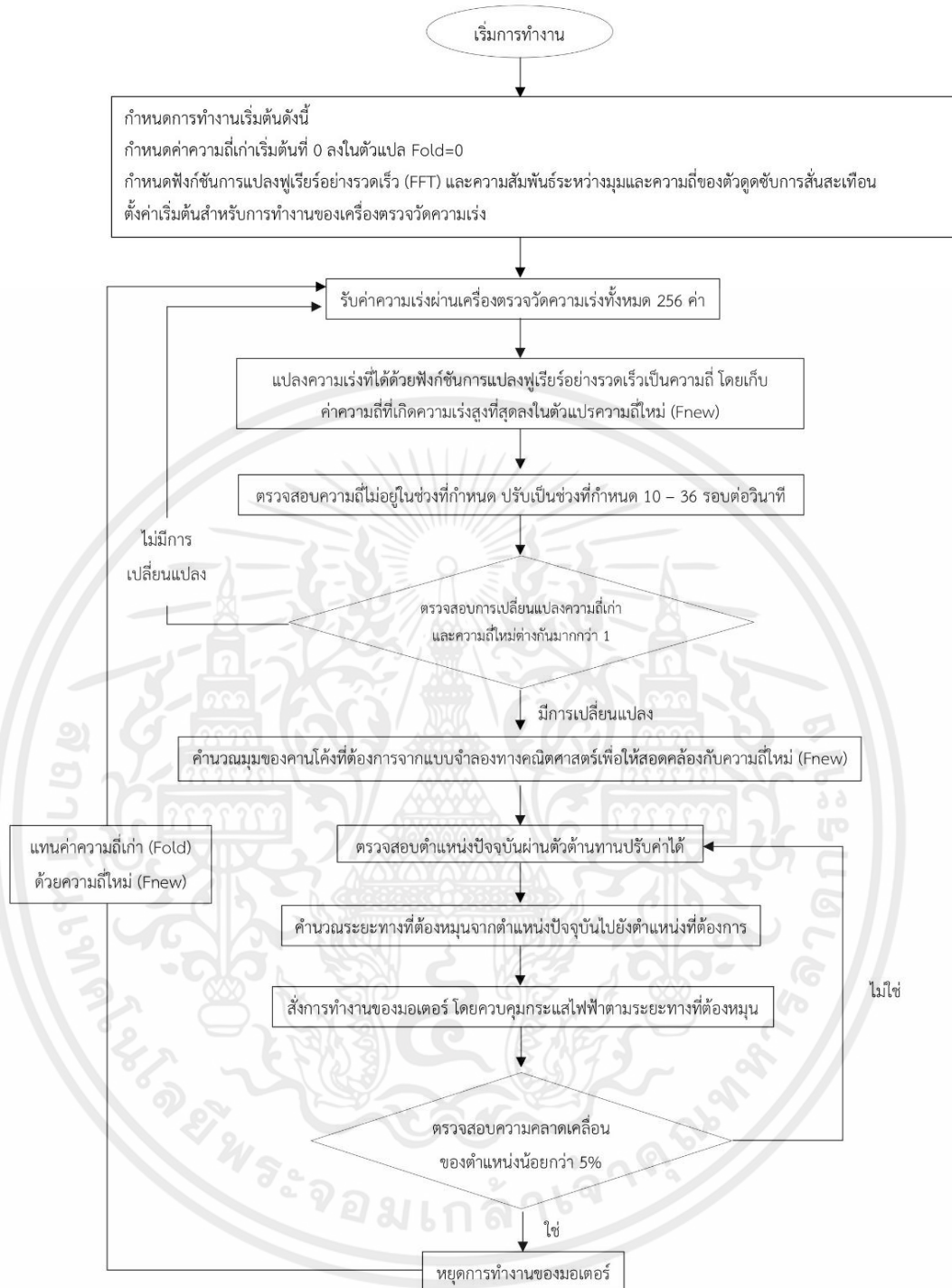
ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้ถูกควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ และทำงานด้วยการปรับค่าความถี่ขั้วของอุปกรณ์ให้ใกล้เคียงกับระบบหลัก โดยคานโค้งจะถูกนำมาใช้แทนสปริง และปรับความยาวของคานโค้งผ่านการหมุนของมอเตอร์เพื่อให้ได้ค่าจสปริงที่ต้องการ

3.3.1 ผังแสดงภาพรวมของการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้

การทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนถูกเขียนโปรแกรมผ่าน Arduino IDE ซึ่งถูกแสดงในภาคผนวก ก สำหรับการดำเนินงานจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

ส่วนการทำงานเริ่มต้นซึ่งจะทำเมื่อเริ่มเปิดเครื่องเพียงครั้งเดียวเท่านั้น โดยจะทำการกำหนดค่าความถี่แรกเริ่ม (Fold) เริ่มที่ 0 Hz, กำหนดฟังก์ชันการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (FFT), กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างมุมและความถี่ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน และตั้งค่าเริ่มต้นสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็ว

ส่วนการทำงานวนซ้ำ โดยในส่วนนี้จะทำงานซ้ำจนกระทั่งปิดเครื่อง โดยจะเริ่มจากการเก็บค่าตัวแปรความเร็วไว้ในตัวแปรอาร์เรย์ (Array) ทั้งหมด 256 ค่า จากนั้นจะเรียกใช้งานฟังก์ชันการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (FFT) เพื่อหาค่าความถี่ ณ เวลานั้น เก็บในตัวแปรความถี่ใหม่ (Fnew) เพื่อให้อยู่ในช่วงที่ความถี่ที่รองรับ ตรวจสอบความถี่ใหม่ที่ได้น้อยกว่า 10 Hz ให้ปรับเป็น 10 Hz และถ้ามากกว่า 36 Hz ให้ปรับเป็น 36 Hz จากนั้นตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความถี่ระหว่างความถี่ใหม่ (Fnew) และความถี่แรกเริ่ม (Fold) หากพบว่าความถี่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 1 Hz จะทำการเก็บค่าความเร็วซ้ำ จนกระทั่งมีการเปลี่ยนแปลงความถี่มากกว่า 1 Hz คำนวณมุมของคานโค้งที่ต้องการจากความสัมพันธ์ระหว่างมุมและความถี่ใหม่เก็บไว้ในตัวแปร (Deg) จากนั้นจะตรวจสอบตำแหน่งปัจจุบันผ่านตัวต้านทานปรับค่าได้ซึ่งยึดติดกับแกนของมอเตอร์ แปลงค่ามุมของคานโค้งให้สัมพันธ์กับตำแหน่งปัจจุบันที่ได้จากตัวต้านทาน คำนวณระยะทางโดยอ้างอิงจากผลต่างระหว่างมุมของคานโค้งและตำแหน่งปัจจุบัน จากนั้นสั่งการทำงานมอเตอร์โดยให้ความเร็วรอบขึ้นกับระยะทางระหว่างที่มอเตอร์ทำงาน ระบบจะทำการตรวจสอบข้อมูลตำแหน่งปัจจุบันจากตัวต้านทานปรับค่าได้และป้อนระยะทางกลับไปเพื่อให้ความเร็วมอเตอร์ช้าลง ขณะเข้าใกล้มุมที่ต้องการ จนกระทั่งมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 5 % มอเตอร์จะหยุดทำงานและเริ่มต้นเก็บข้อมูลความเร็วชุดใหม่ โดยการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้ทั้งหมดจะถูกเขียนบนผังงาน (Flow Chart) ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ผังแสดงภาพรวมของการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้

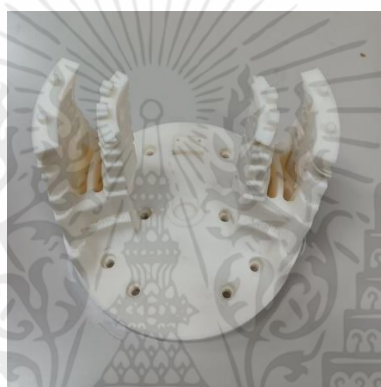
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ส่วนประกอบและการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้

สำหรับส่วนประกอบได้มีการพัฒนาต่อยอดมาจากปริญญานิพนธ์การออกแบบตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้ด้วยคานโค้งสำหรับเครื่องจักรชนิดหมุนของนายฤทธิ คมไธสง และนายวิทวัส ศรีมา โดยใช้งานโครงสร้างตัวดูดซับการสั่นสะเทือน คานโค้งและมวลดูดซับการสั่นสะเทือนเดิม และปรับปรุงชุดควบคุมใหม่ให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

1. โครงสร้างตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

เป็นอุปกรณ์สำหรับติดตั้งคานโค้ง มวลถ่วง และชุดควบคุม โดยสร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติ และถูกยึดไว้ร่วมกับโครงสร้างในระบบหลักเพื่อให้เคลื่อนที่ไปด้วยกัน ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 โครงสร้างตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

2. คานโค้ง

อุปกรณ์สำหรับใช้ในการดูดซับการสั่นสะเทือนซึ่งทำหน้าที่แทนสปริง ติดอยู่กับมอเตอร์กระแสตรงสามารถหมุนปรับระยะความยาวของคานโค้ง เพื่อให้ได้ค่านิจสปริงของคานโค้งที่เหมาะสม จึงใช้วัสดุเป็นอลูมิเนียม ที่มีพื้นที่หน้าตัดคานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หนา 0.3 cm กว้าง 1 cm รัศมีคานโค้งเท่ากับ 5 cm ดังรูปที่ 3.8 ทำให้ได้ค่านิจสปริงเท่ากับ 5174.49 N/mm ที่มุมหมุน 120 องศา ถึง 47605.01 N/m ที่มุมหมุน 40 องศา



รูปที่ 3.8 คานโค้ง

3. มวลติดขัดการสั่นสะเทือน

มวลถ่วงน้ำหนัก 0.5 kg ทำจากเหล็กทรงกระบอกตันรัศมี 9 mm สูง 45 mm ดังรูปที่ 3.9 ทำหน้าที่เป็นมวลสำหรับการติดขัดการสั่นสะเทือนผ่านคานโค้ง โดยน้ำหนักของมวลติดขัดการสั่นสะเทือนถูกออกแบบให้สอดคล้องกับค่านิจสปริงของคานโค้ง เพื่อให้ได้ความถี่ของตัวติดขัดการสั่นสะเทือนอยู่ในช่วง 10-30 Hz



รูปที่ 3.9 มวลติดขัดการสั่นสะเทือน

4. ชุดควบคุม

อุปกรณ์สำหรับการควบคุมองศาของคานโค้งเพื่อให้คานโค้งมีคุณสมบัติค่านิจสปริงตามที่ต้องการ แสดงดังรูปที่ 3.10 โดยจะประกอบด้วย

4.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ทำหน้าที่ควบคุมและสั่งการทำงานของอุปกรณ์ทั้งหมด โดยใช้ STM32 รุ่น STM32F103C8T6 Blackpill ที่สามารถเขียนโปรแกรมผ่าน Arduino IDE ได้ โดยใช้ไฟฟ้าขาเข้าแรงดันไฟฟ้า 5 V สามารถรับส่งได้ทั้งสัญญาณดิจิตอล (Digital) และอนาล็อก (Analog) แบบ Pulse Width Modulation (PWM) ทำให้สามารถกำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ได้

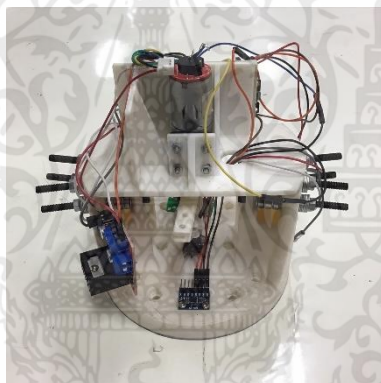
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 เครื่องตรวจวัดความเร่ง ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณความเร่งเพื่อที่จะแปลงข้อมูลให้เป็นความถี่ของการสั่นสะเทือน โดยใช้ GY-521 MPU6050 ใช้แรงดันไฟฟ้า 3-5 V โดยมีช่วงการทำงานที่บวก 16 ถึง ลบ 16 ของค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

4.3 อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ ทำหน้าที่กำหนดปริมาณทางไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ เพื่อควบคุมความเร็วให้ได้ตามที่ต้องการ โดยใช้มอเตอร์ชนิด H-Bridge รุ่น L298N H-Bridge Dual Motor Controller Module รับไฟฟ้าขาเข้าแบบกระแสตรง 3.2 ถึง 40 V และรองรับการทำงานบนไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้งาน

4.4 มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) ขนาด 12 V ทำหน้าที่หมุนคานโค้ง

4.5 ตัวต้านทานปรับค่าได้ ทำหน้าที่ส่งตำแหน่งปัจจุบันกลับไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผล โดยใช้ WH148 Series B10K สามารถปรับความต้านทานสูงสุด 10 $k\Omega$ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต่อเข้ากับแกนหมุน 6 mm



รูปที่ 3.10 ชุดควบคุม

3.4 อุปกรณ์และระบบสำหรับเก็บข้อมูล

ใช้สำหรับการเก็บข้อมูลขนาดการสั่นสะเทือนและความถี่ที่เกิดขึ้นที่ค่าต่าง ๆ ของระบบจากการรับข้อมูลและวิเคราะห์ค่าสัญญาณผ่านโปรแกรม โดยใช้เครื่องตรวจวัดความเร่งเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 เครื่องตรวจวัดความเร่ง (Accelerometer)

เครื่องตรวจวัดความเร่งเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าเชิงกลที่ใช้วัดแรงในการเร่ง โดยตรวจจับความเร่งจากพีโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ที่มีคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจากแรงในการเร่ง สำหรับปริญญาโทฉบับนี้ ใช้เครื่องตรวจวัดความเร่งสามแกน รหัส 8692C50 จากบริษัท KISTLER ตามรูปที่ 3.11 โดยมีช่วงการทำงานสูงสุดที่ 50 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก มีค่าความไวที่ 100 mV/g และมีความคลาดเคลื่อน 5 %

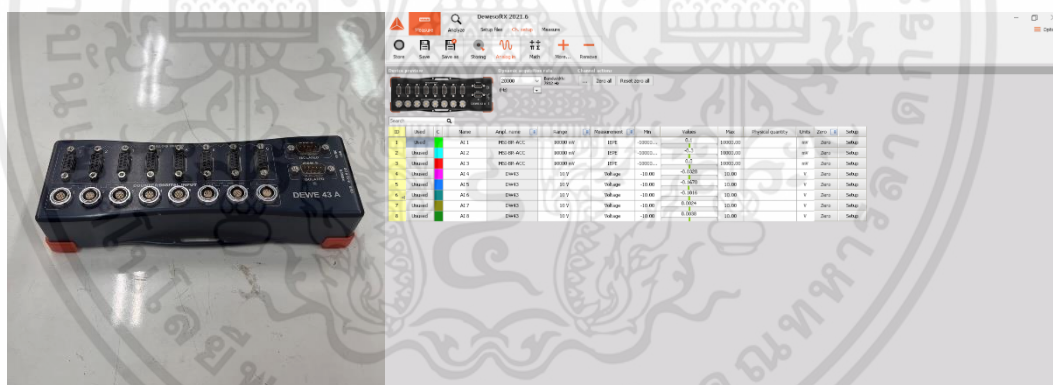
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 เครื่องตรวจวัดความเร่ง

3.4.2 ระบบการเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Acquisition System (DAQ))

เป็นกระบวนการเก็บสัญญาณจากแหล่งที่ต้องการวัดทั้งในรูปแบบของอนาล็อก (Analog) และดิจิทัล (Digital) แล้วนำมาจัดเก็บไว้ใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลในภายหลังบนเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยจะอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างฮาร์ดแวร์ (Hardware) และซอฟต์แวร์ (Software) คือ DEWE43A และ DEWESoftX ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ระบบเก็บรวบรวมข้อมูล DEWE43A (ซ้าย) และ DEWESoftX (ขวา)

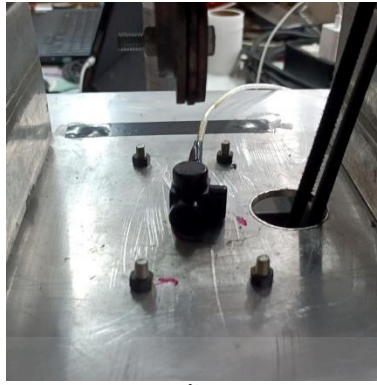
3.4.3 วิธีการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมจะถูกส่งมาในรูปแบบสัญญาณไฟฟ้าและจะนำไปวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม DEWESoftX เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เข้าใจได้ง่ายขึ้น

1. การติดตั้งเครื่องตรวจวัดความเร่ง

ติดตั้งเครื่องตรวจวัดความเร่งที่กึ่งกลางฐานของเครื่องจักรหมุนจำลองการสั่นสะเทือนโดยใช้แม่เหล็กยึด ดังรูปที่ 3.13 ต่อสายเข้ากับอุปกรณ์ DEWE43A และคอมพิวเตอร์ 3.14 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



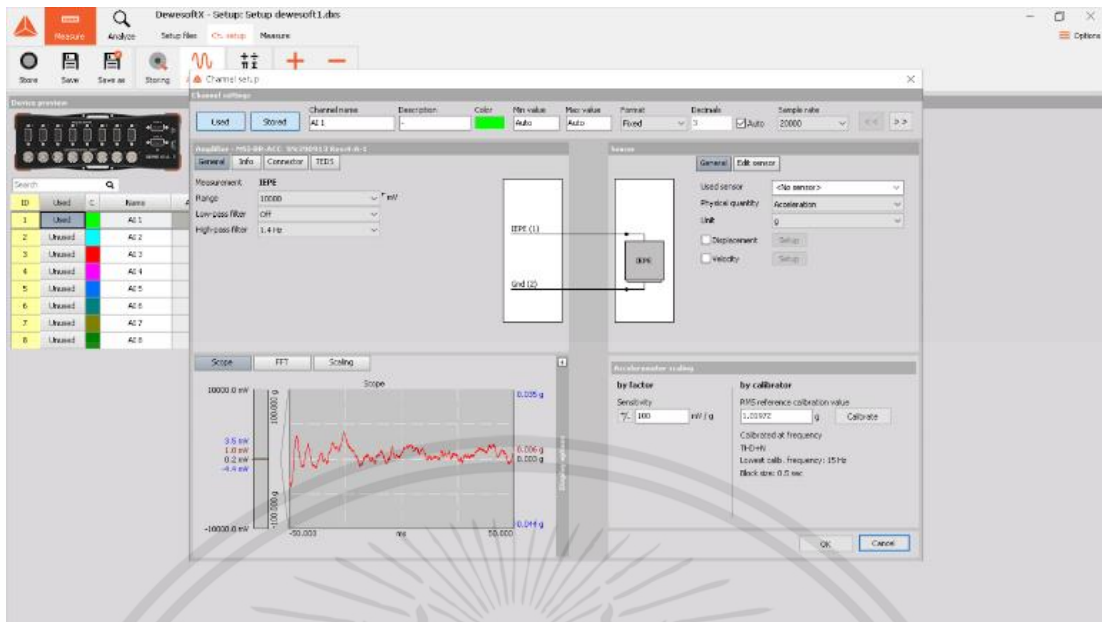
รูปที่ 3.13 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องตรวจวัดความเร่ง



รูปที่ 3.14 การต่อสายระหว่างอุปกรณ์

2. การตั้งค่าข้อมูลความเร่ง

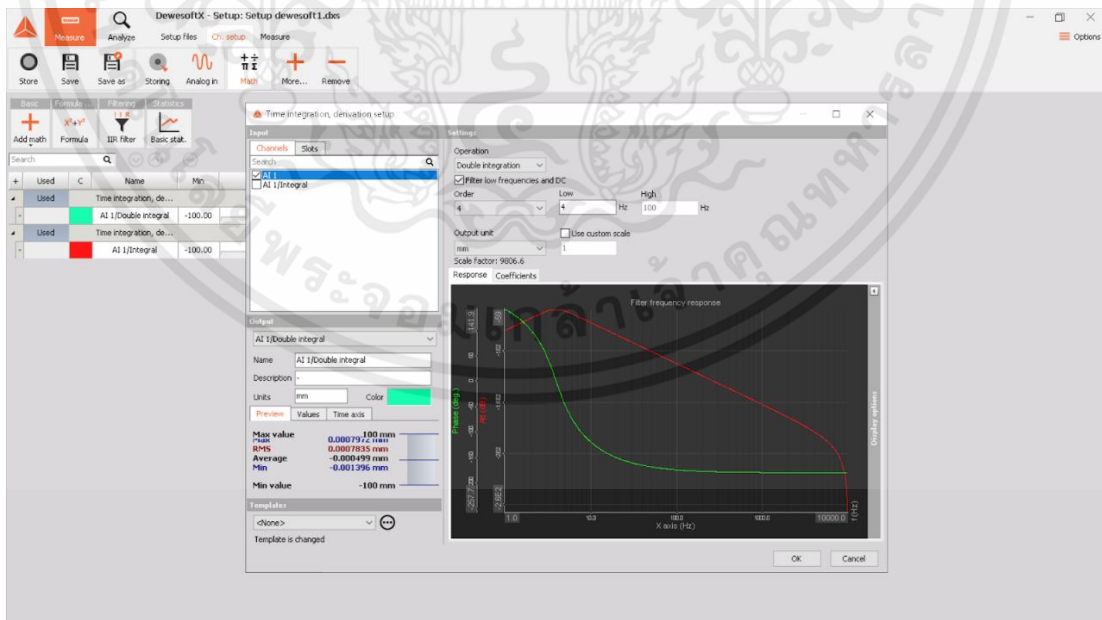
ความเร่งที่ได้จากเครื่องตรวจวัดความเร่งจะส่งสัญญาณทางไฟฟ้ามายังอุปกรณ์รับข้อมูลและแปลงสัญญาณทางไฟฟ้ากลับเป็นความเร่งตั้งค่าความไวที่ 100 mV/g ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การตั้งค่าสัญญาณความเร่งในโปรแกรม DEWESoftX

3. การแปลงข้อมูลความเร่งเป็นขนาดการสั่นสะเทือน

ใช้ฟังก์ชันปริพันธ์สองชั้นของโปรแกรมในการแปลงข้อมูลความเร่งที่ได้เป็นขนาดของการสั่นสะเทือน โดยใช้ตัวคูณ 9806.6 ในการเปลี่ยนหน่วยจากค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเป็น mm ดังรูปที่ 3.16

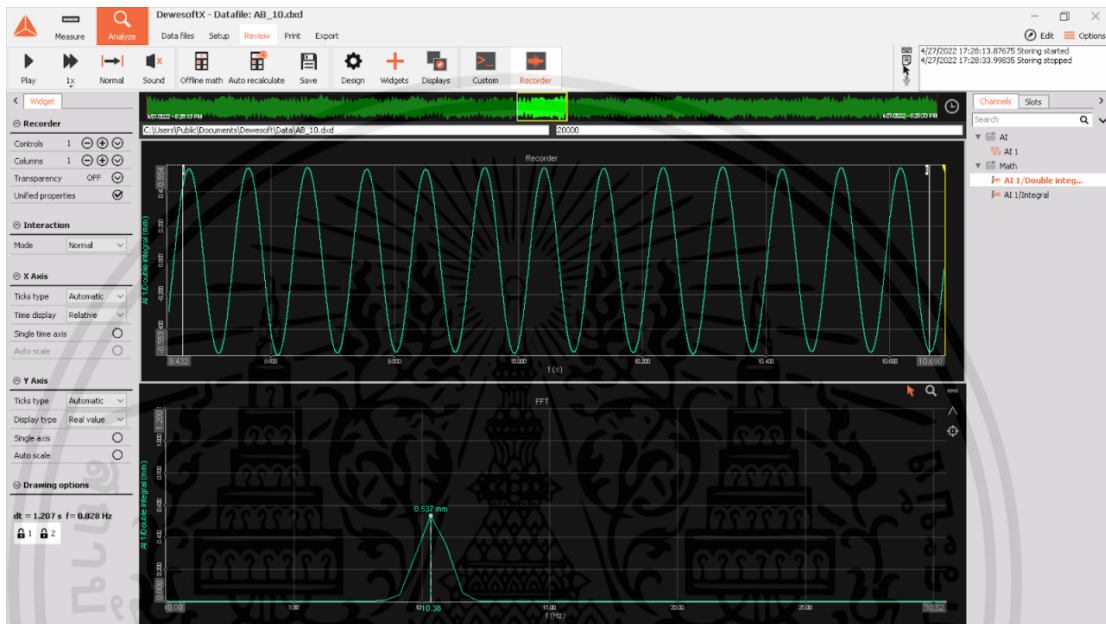


รูปที่ 3.16 การแปลงข้อมูลความเร่งเป็นขนาดการสั่นสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform)

การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับการแปลงข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่องในรูปองค์ประกอบของเวลา (Time Domain) ให้อยู่ในรูปองค์ประกอบของความถี่ (Frequency Domain) ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาขนาดการสั่นสะเทือนและความถี่ที่เกิดขึ้น ณ ขณะนั้น ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แสดงการแปลงฟูเรียร์จาก DEWESoftX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

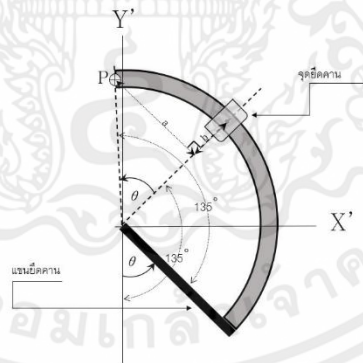
ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติและมุมหมุนของคานโค้ง

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่สปริงและมุมหมุนของคานโค้งทางทฤษฎี

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่สปริงและมุมหมุนของคานโค้งในทางทฤษฎีนั้น ต้องคำนึงถึงแรงที่มากระทำกับคาน ซึ่งเกิดจากแรงเนื่องจากน้ำหนักของลูกตุ้มหรือมวลถ่วงที่กระทำที่ปลายคาน และแรงเนื่องจากน้ำหนักของคานโค้ง จากนั้นใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวหามุมหมุนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ธรรมชาติรวมทั้งระบบของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน ทำให้สามารถปรับตำแหน่งของคานโค้งที่ความถี่ต่าง ๆ ได้

4.1.1 ภาวะที่เกิดขึ้นจากมวลถ่วงที่กระทำกับปลายคานสำหรับองศาการหมุนใด ๆ

ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนในส่วนของสปริงที่ทำหน้าที่เก็บและปล่อยพลังงานศักย์ถูกใช้แทนด้วยคานโค้ง โดยปลายคานโค้งด้านหนึ่งติดอยู่กับแกนยึดคานโค้ง และใช้ตำแหน่งของจุดยึดคานในการกำหนดระยะความยาวของคานโค้ง ซึ่งสัมพันธ์กับมุมกวาดของแกนยึดคาน โดยที่มุมกวาดและระยะความยาวของคานโค้งนั้นจะส่งผลต่อค่านิจสปริง ซึ่งมุม θ นั้นทำมุมกับแกน Y' ที่ $42^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงแบบจำลองการทำงานของคานโค้ง จุดยึดคาน และแกนยึดคาน

(ที่มา: ฤทธิและวิทวัส, 2563)

โดยที่ P คือ แรงกระทำจากน้ำหนักของมวลถ่วง โดยยึดติดไว้ที่ปลายคาน (N)

θ คือ มุมที่แกนยึดคานกวาดไปจากแกนอ้างอิง Y' (องศา)

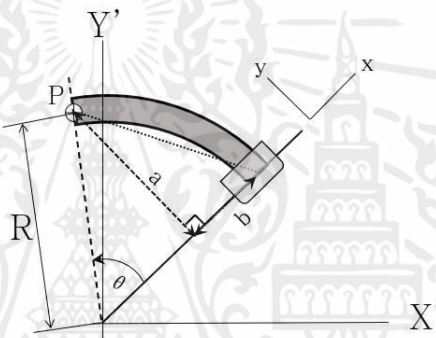
a คือ ระยะที่วัดจากจุด P ถึงจุดตัดตั้งฉาก (mm)

b คือ ระยะจากจุดตัดตั้งฉากถึงหน้าตัดของคานที่วางตัวทำมุม θ กับ แกน Y' (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมุมที่แขนยึดคานกวาดไปจากแกนอ้างอิง Y' ระยะของคานโค้งจากจุดยึดคานจะเปลี่ยนแปลงไป โดยส่วนของคานโค้งที่ถัดจากจุดยึดคานไปถือว่าเป็นส่วนอิสระ และมีหน้าที่ในการดูดซับและปลดปล่อยพลังงานศักย์ ซึ่งค่านิจสปริงจะเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งต่าง ๆ ที่คานโค้งเคลื่อนที่ไป

จากทฤษฎีบทลำดับที่สองของคาสติเกลียโน (Castigliano's Second Theorem) ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3 ใช้การคำนวณจากรูปทรงของคานโค้งที่มีลักษณะเป็น $1/4$ ของวงรี ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะไม่สามารถใช้ทฤษฎีดังกล่าวได้โดยตรง เนื่องจากมีการใช้คานโค้งในลักษณะที่เป็นวงกลม จึงจำเป็นต้องประยุกต์ใช้ทฤษฎีดังกล่าวในการหาค่าการโก่งตัวของคานโค้ง รวมทั้งการหาความสัมพันธ์ของมุมกวาด θ ซึ่งส่งผลต่อค่านิจสปริง



รูปที่ 4.2 แสดงการทำงานของคานโค้งที่ยื่นจากจุดยึดคานเป็นระยะ S ที่ θ ใด ๆ บนระบบพิกัดหลัก $X'Y'$ และระบบพิกัดรอง xy

(ที่มา: ฤไทและวิหวัศ, 2563)

โดยที่ R คือ รัศมีความโค้งของคานโค้ง (mm)

s คือ ระยะของคานโค้งที่ยื่นจากจุดยึดคานไปถึงมวลถ่วง (mm)

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าระยะ a และ b มีความสัมพันธ์กับ θ ดังนี้

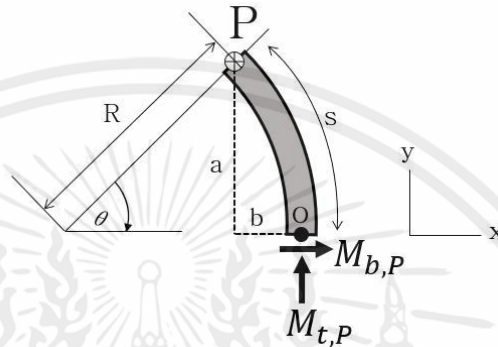
$$a = R \sin \theta \quad (4.1)$$

$$b = R(1 - \cos \theta) \quad (4.2)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของคานโค้ง S และมุม θ คือ

$$s = R\theta \quad (4.3)$$

เมื่อวิเคราะห์แรงและโมเมนต์ที่กระทำกับคานโค้งที่ยื่นไปจากจุดยึดคาน จะเห็นได้ว่าแรง P ที่เป็นแรงกระทำจากน้ำหนักของมวลถ่วงจะทำให้เกิดแรงเฉือนภายในและโมเมนต์ปฏิกิริยาขึ้นที่คานโค้งส่วนที่เป็นอิสระ ดังแสดงที่รูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงแผนภาพอิสระของคานโค้งอิสระ (ส่วนที่ยื่นออกไปจากจุดยึดคาน) โดยแรงกระทำเกิดจากมวลถ่วง

(ที่มา: ฤทธิและวิหวัศ, 2563)

จากรูปที่ 4.3 แสดงโมเมนต์ตัด $M_{b,P}$ และโมเมนต์บิด $M_{t,P}$ ที่กระทำกับคานโค้ง ณ จุด O ที่เป็นจุดยึดคาน โดยสามารถละเว้นแรงเฉือนภายในที่หน้าตัดของคานโค้งได้ เนื่องจากมีผลต่อการเสียรูปของคานน้อย

ในการวิเคราะห์การหมุนของคานโค้งอิสระ ณ จุด O ที่แกน x และ y ในรูปที่ 4.3 จะได้สมการสมดุลการหมุนที่แกน x ดังนี้

$$M_{b,P} - Pa = 0 \quad (4.4)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (4.1) ในสมการ (4.4) จะได้

$$M_{b,P} = PR\sin\theta \quad (4.5)$$

จากรูปที่ 4.3 ได้สมการสมดุลการหมุนที่แกน y ดังนี้

$$M_{t,P} - Pb = 0 \quad (4.6)$$

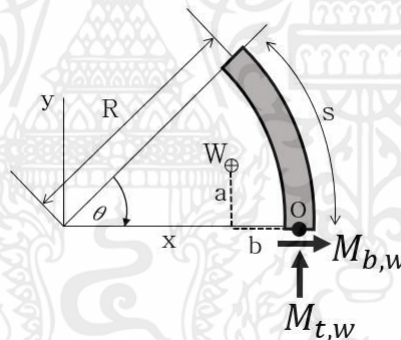
เมื่อแทนค่าสมการ (4.2) ในสมการ (4.6) จะได้

$$M_{t,P} = PR(1 - \cos\theta) \quad (4.7)$$

- ดังนั้นการเสียรูปของคานโค้งสามารถเกิดได้ 2 รูปแบบ คือ 1. การเสียรูปจากโมเมนต์บิด
2. การเสียรูปจากโมเมนต์ดัด ซึ่งแสดงในสมการ (4.5) และ (4.7) ตามลำดับ

4.1.2 ภาระที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของคานสำหรับองศาการหมุนใด ๆ

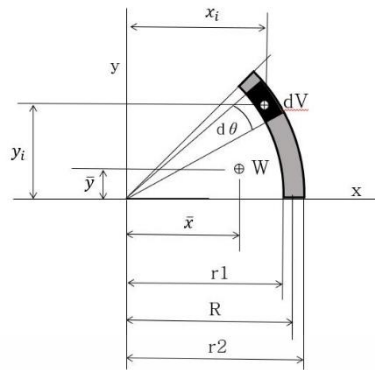
ในการวิเคราะห์ภาระที่เกิดขึ้นกับคานโค้งอันเนื่องมาจากน้ำหนักของคานโค้ง น้ำหนักของคานโค้งจะกระทำ ณ จุด O ซึ่งเป็นจุดยึดคาน โดยจะพิจารณาเฉพาะน้ำหนักคานเพียงเท่านั้น ไม่สนใจแรงภายนอกอื่น ๆ ซึ่งสามารถเขียนแผนภาพอิสระได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงแผนภาพอิสระของคานโค้งที่มีแรงกระทำ คือน้ำหนักของคานเพียงเท่านั้น
(ที่มา: ฤไทและวิทวัส, 2563)

น้ำหนักของคานจะกระทำในรูปแบบของแรงกระจาย (Distributed Force) โดยกระทำไปตามคานโค้งขึ้นกับความหนาแน่นในแต่ละจุด ดังนั้นภาระที่เกิดขึ้นบนคานโค้งที่จุด O จะต้องทำการหาแรงจุดเทียบเท่าของน้ำหนักคาน (Equivalent Concentrated Force)

แรงจุดเทียบเท่าของน้ำหนักคานประกอบไปด้วยขนาดของแรงจุดและจุดศูนย์กลาง ซึ่งขนาดของแรงจุดสามารถหาได้จากน้ำหนักของคานโค้งส่วนอิสระ แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงการวิเคราะห์หาแรงจุดเทียบเท่าของคานโค้ง
(ที่มา: ฤไทและวิทวัส, 2563)

- โดยที่ dV คือ ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นขนาดดกณิกนันต์
 $d\theta$ คือ มุมที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นขนาดดกณิกนันต์
 W คือ น้ำหนักของคานโค้งส่วนปลายอิสระ (kg)
 r_1 คือ รัศมีในของคานโค้ง (mm)
 r_2 คือ รัศมีนอกของคานโค้ง (mm)
 \bar{x} คือ จุดศูนย์กลางวงคานบนแกน x (mm)
 \bar{y} คือ จุดศูนย์กลางวงคานบนแกน y (mm)
 t คือ ความหนาของคานโค้ง (mm)
 x_i คือ ตำแหน่งบนแกน x ของมวลขนาดดกณิกนันต์ใด ๆ (mm)
 y_i คือ ตำแหน่งบนแกน y ของมวลขนาดดกณิกนันต์ใด ๆ (mm)

จะสามารถหาปริมาตรคานโค้งในส่วนที่เป็นอิสระได้ดังนี้

$$V = \int_V dV \quad (4.8)$$

โดยที่

$$dV = \left(\frac{1}{2} r_2^2 d\theta - \frac{1}{2} r_1^2 d\theta \right) t \quad (4.9)$$

แทนค่าสมการ (4.9) ในสมการ (4.8) จะได้

$$V = \frac{1}{2}t \left[\int_0^\theta r_2^2 d\theta - \int_0^\theta r_1^2 d\theta \right] \quad (4.10)$$

$$V = \frac{1}{2}t\theta[r_2^2 - r_1^2] \quad (4.11)$$

โดยที่ W และ V มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$W = mg = \rho Vg \quad (4.12)$$

นำสมการที่ (4.11) มาแทนค่าในสมการที่ (4.12) จะได้

$$W = \frac{1}{2}\rho g t \theta (r_2^2 - r_1^2) \quad (4.13)$$

จากรูปที่ 4.5 ตำแหน่ง x_i และ y_i เป็นฟังก์ชันของมุม θ ดังนี้

$$x_i = R \cos \theta \quad (4.14)$$

$$y_i = R \sin \theta \quad (4.15)$$

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าจุดศูนย์กลางของคานโค้งประกอบด้วยจุดศูนย์กลางบนแกน x และ แกน y ซึ่งสามารถหาค่าได้จาก

$$V\bar{x} = \int x_i dV \quad (4.16)$$

$$V\bar{y} = \int y_i dV \quad (4.17)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (4.9), (4.11), (4.14) และ (4.15) ในสมการที่ (4.16) และ (4.17) จะได้

$$\bar{x} = \frac{R}{\theta} \int_0^\theta \cos \theta d\theta \quad (4.18)$$

$$\bar{y} = \frac{R}{\theta} \sin \theta \quad (4.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้โมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิดที่กระทำบนคานโค้งอันเนื่องมาจากน้ำหนักคาน ดังนี้

$$M_{b,w} = W \cdot a = W \cdot \bar{y} \quad (4.20)$$

$$M_{b,w} = \frac{1}{2} \rho g t R (r_2^2 - r_1^2) (1 - \cos \theta) \quad (4.21)$$

$$M_{t,w} = W \cdot b = W (R - \bar{x}) \quad (4.22)$$

$$M_{t,w} = \frac{1}{2} \rho g t R (r_2^2 - r_1^2) (\theta - \sin \theta) \quad (4.23)$$

4.1.3 ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมหมุนของคานโค้งจากทฤษฎีบทลำดับที่สองของคาสติเกลียโน (Castigliano's Second Theorem)

สมการ (4.24) ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ 1. ส่วนที่แสดงถึงพลังงานสะสมจากการดัด 2. ส่วนที่แสดงถึงพลังงานสะสมที่เกิดจากการบิด โดยโมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิดเป็นผลมาจากแรงจากน้ำหนักของลูกตุ้มและน้ำหนักของคาน ซึ่งโมเมนต์ดังกล่าวแสดงในสมการ (4.25) และ (4.26) ตามลำดับ

$$U = \int_0^L \frac{M_b^2}{2EI} dx + \int_0^L \frac{M_t^2}{2GK_t} dx \quad (4.24)$$

$$M_{b,all} = PR \sin \theta + \frac{1}{2} \rho g t R (r_2^2 - r_1^2) (1 - \cos \theta) \quad (4.25)$$

$$M_{t,all} = PR (1 - \cos \theta) + \frac{1}{2} \rho g t R (r_2^2 - r_1^2) (\theta - \sin \theta) \quad (4.26)$$

นำทฤษฎีบทลำดับที่สองของคาสติเกลียโน (Castigliano's Second Theorem) มาใช้เพื่อหาการโก่งตัวของคาน δ จากภาระ P กระทำ ณ จุดที่ภาระกระทำ โดยหาอนุพันธ์ย่อยของพลังงาน U เทียบกับแรงภายนอก P จะได้สมการ (4.27)

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{1}{2EI} \int_0^L 2M_{b,all} \frac{\partial M_{b,all}}{\partial P} ds + \frac{1}{2GK_t} \int_0^L 2M_{t,all} \frac{\partial M_{t,all}}{\partial P} ds \quad (4.27)$$

ทำการหาอนุพันธ์ย่อยของโมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิดเทียบกับแรงภายนอก P จะได้สมการ (4.28) และ (4.29) ซึ่งเป็นของโมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิดตามลำดับ

$$\frac{\partial M_{b,all}}{\partial P} = R \sin \theta \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial M_{t,all}}{\partial P} = R(1 - \cos \theta) \quad (4.29)$$

ทำการหาอนุพันธ์ความยาวของคานโค้งอิสระจากสมการ (4.3) ได้

$$ds = Rd\theta \quad (4.30)$$

เมื่อแทนค่า $M_{b,all}$, $M_{t,all}$, $\frac{\partial M_{b,all}}{\partial P}$, $\frac{\partial M_{t,all}}{\partial P}$ และ ds จากสมการ (4.25), (4.26), (4.28), (4.29) และ (4.30) ตามลำดับในสมการ (4.27) จะได้

$$\delta = R \left[\frac{1}{EI} \int_0^\theta \left\{ PR \sin \theta + \frac{1}{2} \rho g t R (r_2^2 - r_1^2) (1 - \cos \theta) \right\} R \sin \theta d\theta + \frac{1}{GK_t} \int_0^\theta \left\{ PR (1 - \cos \theta) + \frac{1}{2} \rho g t R (r_2^2 - r_1^2) (\theta - \sin \theta) \right\} R (1 - \cos \theta) d\theta \right] \quad (4.31)$$

ทำการหาปริพันธ์จำกัดเขตจะได้

$$\delta = R^3 \left[P \left\{ \frac{1}{2EI} (\theta - \sin \theta \cos \theta) + \frac{1}{2GK_t} (3\theta - 4 \sin \theta + \sin \theta \cos \theta) \right\} + \frac{1}{2} \rho g t (r_2^2 - r_1^2) \left\{ \frac{1}{2EI} (2 - 2 \cos \theta - \sin^2 \theta) + \frac{1}{2GK_t} (\theta(\theta - 2 \sin \theta) + \sin^2 \theta) \right\} \right] \quad (4.32)$$

จากกฎของฮุก

$$\sum F = k\delta \quad (4.33)$$

ถูกนำมาใช้เพื่อแปลงระยะเสีयरูปของคานโค้งที่เปลี่ยนไปตามตำแหน่งต่าง ๆ เป็นค่านิจสปริงที่เปลี่ยนตามตำแหน่งของคานโค้ง ซึ่งจะได้สมการ

$$k = \frac{\sum F}{\delta} = \frac{P + \frac{1}{2}\rho g t \theta (r_2^2 - r_1^2)}{\delta} \quad (4.34)$$

จากสมการ (4.32) และ (4.34) ค่าตัวแปรที่เป็นคุณสมบัติของคานโค้ง คือ R , EI และ GK_t โดยที่ R คือ รัศมีความโค้งของคาน

EI คือ ค่านิจการดัด

GK_t คือ ความแข็งแรงการบิด

ใช้วัสดุของคานโค้งเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม 304 พื้นที่หน้าตัดคานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หนา 0.3 cm กว้าง 1 cm และมีรัศมีความโค้งของคาน 5 cm

มอดุลัสสภาพยืดหยุ่น (E) = 89.46 GPa

อัตราส่วนปัวซอง (ν) = 0.29

มอดุลัสแรงเฉือน (G) = 35.22 GPa

ความหนาแน่น (ρ) = 7900 kg/m³

โมเมนต์ที่สองของพื้นที่รอบแกนรอง x (I_x) = $2.25 \cdot 10^{-11} \text{ m}^4$

โมเมนต์ที่สองของพื้นที่รอบแกนรอง z (I_z) = $2.50 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4$

โมเมนต์ที่สองเชิงขั้วของพื้นที่ (K_t) = $I_x + I_z = 2.75 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4$

เมื่อแทนค่าคุณสมบัติต่าง ๆ และแทนค่าสมการ (4.32) ในสมการ (4.34) จะได้

$$k = \frac{(392.4 + 9.3\theta) \cdot 10^{-4}}{6.6\theta^2 + 2054\theta - 94 \sin \theta \cos \theta - 22\sin^2\theta - 13.2\theta\sin\theta - 1114\sin\theta - 57.75\cos\theta + 57.75} \quad (4.35)$$

สมการ (4.35) แสดงความสัมพันธ์ค่านิจสปริงสำหรับคานโค้งเมื่อ θ กวาดไปที่มุมต่าง ๆ โดยที่ความสัมพันธ์ค่านิจสปริงของคานโค้งกับ θ

นำความถี่ของการสั่นที่ตรวจวัดได้ไปใช้ในการระบุความถี่ธรรมชาติและค่านิจสปริงของคานโค้ง จากนั้นใช้ค่านิจสปริงที่หาได้เพื่อหาค่า θ ที่เหมาะสมในการปรับตำแหน่งของคานโค้ง โดยตัวดู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อปฏิบัติการสั่นสะเทือนได้ถูกออกแบบไว้ให้มีมวลถ่วงทั้งหมด 2 ก้อน ก้อนละ 0.5 kg นำไปใช้ในการคำนวณในสมการที่ (4.36) เพื่อนำไปหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมระหว่างค่านิจสปริงและมุม θ ที่ต้องกวาดไปสำหรับมวลสปริงหนึ่งข้าง

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{0.5}} \quad (4.36)$$

จากนั้นหาความถี่ธรรมชาติของระบบมวลสปริงรวม โดยแต่ละฝั่งของตัวดูดข้อปฏิบัติการสั่นสะเทือนมีการกำหนดค่าความถี่ธรรมชาติไว้เท่ากัน ดังนั้นจะได้ความถี่ธรรมชาติรวมทั้งระบบของตัวดูดข้อปฏิบัติการสั่นสะเทือนดังนี้

$$\frac{1}{\omega_a^2} = \frac{1}{\omega_1^2} + \frac{1}{\omega_2^2} \quad (4.37)$$

$$\omega_a = \frac{\omega_{a1-2}}{\sqrt{2}} \quad (4.38)$$

จากนั้นทำการหาสมการเพื่อใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลในจุดต่าง ๆ โดยการหาสมการเส้นโค้งได้ดังสมการที่ (4.39)

$$\theta(\omega_a) = 999.99\omega_a^{-0.835} \quad (4.39)$$

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมหมุนของคานโค้งจากการทดลอง

ทำการทดลองเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมหมุนของคานโค้ง จากการวัดระยะโก่งตัวของคานที่มุมต่าง ๆ

4.2.1 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมหมุนของคานโค้ง

4.2.1.1 วิธีการทดลอง

1. ทำการติดตั้งคานโค้งโดยยึดไว้กับโต๊ะทดลอง ปลายคานยื่นออกมาทำมุมเริ่มต้น 40 องศา กับศูนย์กลางคานโค้ง
2. ติดตั้งมวลถ่วง 0.5 kg ไว้ที่ปลายของคานโค้งโดยใช้เชือกยึดคานโค้งและมวลถ่วงไว้ด้วยกัน
3. ติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะ (Dial Indicator) ที่ปลายของคานโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

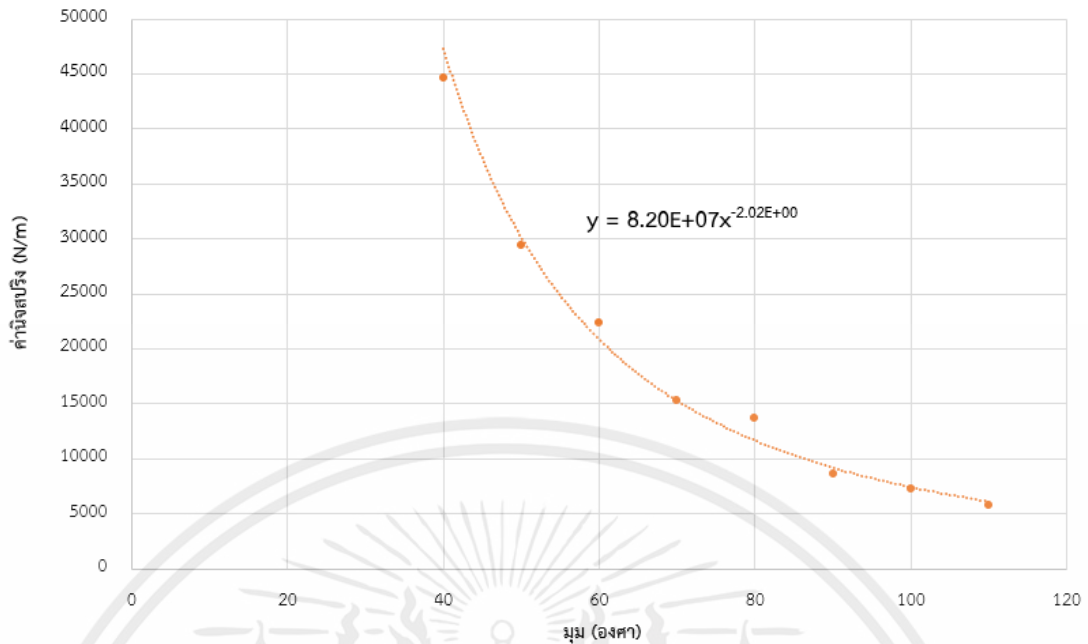
4. ยกมวลถ่วงขึ้นเล็กน้อย จากนั้นตั้งค่าระยะโก่งตัวของอุปกรณ์วัดระยะให้เป็นศูนย์
5. ทำการปล่อยมวลอย่างช้า ๆ เพื่อให้เกิดภาวะที่ปลายคาน เมื่อระยะโก่งตัวคงที่ทำการอ่านค่าบนหน้าปัดอุปกรณ์
6. ปรับองศาการหมุนทีละ 10 องศาและดำเนินการซ้ำตามขั้นตอนที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ

4.2.1.2 ผลการทดลอง

จากการทดลองตามหัวข้อ 4.2.1.1 สามารถวัดระยะโก่งตัวของคานโค้งที่มุมหมุนของคานโค้ง 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 และ 110 องศาได้ดังตารางที่ 4.1 และสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมหมุนของคานโค้งได้ดังรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองของค่านิจสปริงเปรียบเทียบกับมุมหมุนของคานโค้งที่ 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 และ 110 องศาตามลำดับ

มุม (องศา)	ระยะโก่งตัว (mm)				ค่านิจสปริง (N/m)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
40	0.11	0.12	0.10	0.11	44,590.9
50	0.15	0.19	0.16	0.17	29,430.0
60	0.22	0.23	0.21	0.22	22,295.5
70	0.32	0.31	0.33	0.32	15,328.1
80	0.35	0.35	0.38	0.36	13,625.0
90	0.58	0.62	0.50	0.57	8,655.9
100	0.68	0.69	0.66	0.68	7,248.8
110	0.83	0.86	0.87	0.86	5,748.0



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านิสปรังและมวลของคานโค้ง

4.2.2 ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่านิสปรังและมวลของคานโค้งจากการทดลอง จากผลการทดลองทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่านิสปรังและมวลของคานโค้งด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Method) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$K_a = (8.20 \cdot 10^7)(\theta^{-2.02}) \quad (4.40)$$

4.3 ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างมุมของคานโค้งและความถี่ที่ใช้งานในตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

สำหรับค่านิสปรังที่นำมาใช้จะถูกอ้างอิงตามสมการที่ (4.40) และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านความเร็วในการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนจึงแปลงความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับค่านิสปรังเป็นความถี่ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนและค่านิสปรังได้ดังนี้

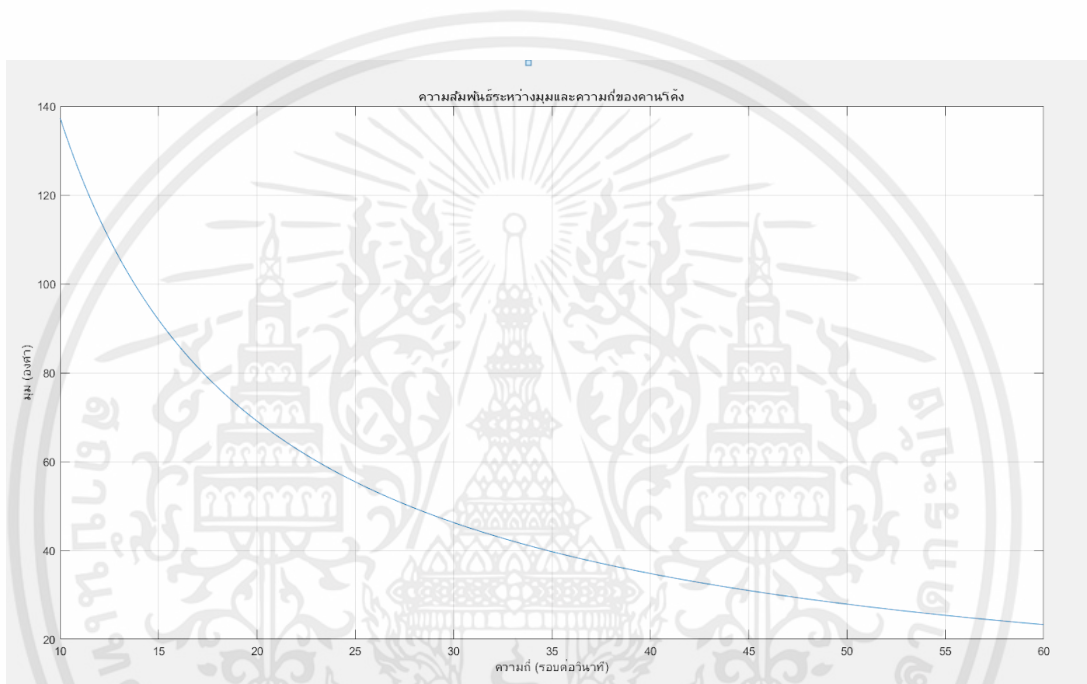
สำหรับคานหนึ่งด้านจะติดตั้งมวลถ่วง 0.5 kg และมีค่านิสปรังตามสมการที่ (4.40) แทนลงในสมการที่ (4.36) ดังนั้นความถี่ธรรมชาติของคานดูดซับการสั่นสะเทือน คือ

$$\omega_a = \sqrt{\frac{(8.20 \cdot 10^7)(\theta^{-2.02})}{0.5}} \quad (4.41)$$

เมื่อกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างมุมในหน่วยองศาและความถี่ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน เช่นเดียวกับทฤษฎีจากสมการ (4.39)

$$\theta(\omega_{a,total}) = 1341.75\omega_{a,total}^{-0.99} \quad (4.42)$$

เมื่อนำสมการที่ (4.42) มาสร้างกราฟผ่านโปรแกรม Matlab ความละเอียด 0.1 ในช่วง 10 ถึง 60 Hz ได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมและความถี่ของคานโค้ง

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

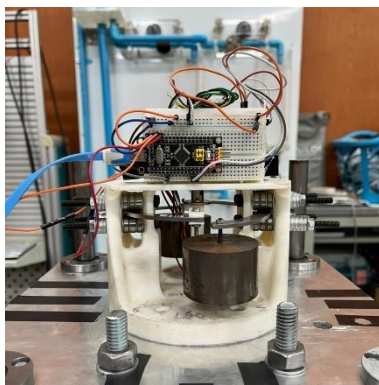
ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองที่ได้ โดยจะแบ่งเป็น 2 การทดลอง คือ การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของระยะขจัด (Normalized Magnitude) และอัตราส่วนความถี่ของเครื่องจักรหมุนและตัวดูดซับการสั่นสะเทือน (Frequency Ratio) ที่ความถี่คงที่ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนเพื่อยืนยันถึงการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนนั้นเป็นไปตามทฤษฎี และการทดลองหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน โดยเปรียบเทียบระหว่างก่อนติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน และหลังติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

5.1 การทดลองหาระยะขจัด (Normalized Magnitude) ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

การทดลองหาระยะขจัดมีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบช่วงความถี่ใช้งานและยืนยันถึงการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนเป็นไปตามทฤษฎี โดยช่วงความถี่ใช้งานจะอยู่ระหว่างช่วงที่ระยะขจัด (Normalized Magnitude) น้อยกว่า 1 หรือหมายความว่าในช่วงนั้นขนาดการสั่นสะเทือนจะลดลง

5.1.1 วิธีการทดลองหาระยะขจัด (Normalized Magnitude) ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

1. ติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือนที่มีคานโค้งและมวลถ่วง ดังรูปที่ 5.1 เนื่องจากเครื่องจักรหมุนไม่สามารถเริ่มต้นที่อัตราส่วนความถี่เท่ากับ 0 ได้ จึงเริ่มทำการทดลองที่อัตราส่วนความถี่ 0.3 หรือ 4 Hz และสิ้นสุดที่อัตราส่วนความถี่ 1.7 หรือ 24 Hz โดยตั้งค่าความถี่ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนที่ 14 Hz เนื่องจากเป็นช่วงที่สามารถดูดซับการสั่นสะเทือนได้มากที่สุดจึงทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.1 ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนที่มีคานโค้งและมวลถ่วง

2. ติดตั้งตัววัดความเร่ง (Accelerometer) ไว้ที่กึ่งกลางของฐานของเครื่องจักรจำลองการสั่นสะเทือน และตั้งค่าตัวรับรู้ตามบทที่ 3.4.3
3. เริ่มทำการหมุนเครื่องจักรจำลองการสั่นสะเทือนโดยเริ่มต้นที่ประมาณ 4 Hz
4. เก็บค่าขนาดการสั่นสะเทือนในหน่วยมิลลิเมตรเป็นเวลา 20 วินาที
5. แปลงข้อมูลที่ได้ โดยการใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) เพื่อประมาณขนาดของการสั่นสะเทือนและความถี่ที่เกิดขึ้น
6. บันทึกผลการทดลองขนาดการสั่นสะเทือนที่ได้จากขั้นตอนที่ 5 โดยจะบันทึกทั้งหมด 3 ค่า คือ ที่เวลา 5 วินาที 10 วินาที และ 15 วินาที
7. ปรับความถี่เครื่องจักรจำลองการสั่นสะเทือน โดยเพิ่มขึ้นทีละประมาณ 0.6 Hz จากนั้นดำเนินการตามขั้นตอนที่ 4 และ 5 ตามลำดับ จนกระทั่งความถี่เป็น 24 Hz

5.1.2 ผลการทดลองหาระยะขจัด (Normalized Magnitude) ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

จากการทดลองตามหัวข้อ 5.1.1 สามารถวัดขนาดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่าง ๆ และทำให้สามารถหาอัตราส่วนความถี่ของเครื่องจักรหมุนและตัวดูดซับการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 14 Hz และระยะขจัดไร้หน่วยได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองระหว่างอัตราส่วนความถี่ของเครื่องจักรหมุนและตัวดูดซับการสั่นสะเทือน (Frequency Ratio) ที่ความถี่ 14 Hz และตัวแปรไร้หน่วยของระยะขจัด (Normalized Magnitude)

ความถี่การสั่นสะเทือน (Hz)	ขนาดการสั่นสะเทือน (mm)				อัตราส่วน ความถี่	ระยะขจัดไร้ หน่วย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
4.27	0.316	0.307	0.315	0.00031	0.305	5.929
4.88	0.872	0.893	0.897	0.00089	0.349	12.883

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิชาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 (ต่อ) แสดงผลการทดลองระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของระยะขจัด (Normalized Magnitude) และอัตราส่วนความถี่ของเครื่องจักรหมุนและตัวดูดซับ การสั่นสะเทือน (Frequency Ratio) ที่ความถี่ 14 Hz

ความถี่การสั่นสะเทือน (Hz)	ขนาดการสั่นสะเทือน (mm)				อัตราส่วน ความถี่	ระยะขจัดไร้ หน่วย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
5.49	2.830	2.840	2.880	0.00285	0.392	32.695
6.10	1.500	1.530	1.380	0.00147	0.436	13.660
6.71	1.140	1.140	1.160	0.00115	0.479	8.806
7.32	0.826	0.806	0.830	0.00082	0.523	5.296
7.93	0.660	0.645	0.641	0.00065	0.566	3.567
9.16	0.581	0.586	0.578	0.00058	0.654	2.397
9.77	0.569	0.570	0.576	0.00057	0.698	2.071
10.38	0.549	0.548	0.554	0.00055	0.741	1.766
10.99	0.526	0.521	0.522	0.00052	0.785	1.497
12.21	0.474	0.486	0.484	0.00048	0.872	1.116
13.43	0.451	0.450	0.449	0.00045	0.959	0.863
14.65	0.364	0.372	0.371	0.00037	1.046	0.594
15.26	0.740	0.734	0.739	0.00074	1.090	1.095
16.46	0.650	0.653	0.659	0.00065	1.176	0.835
17.09	0.564	0.573	0.563	0.00057	1.221	0.671
18.31	0.452	0.461	0.454	0.00046	1.308	0.470
18.92	0.442	0.430	0.451	0.00044	1.351	0.426
20.14	0.524	0.530	0.514	0.00052	1.439	0.446
21.36	0.494	0.490	0.508	0.00050	1.526	0.377
21.97	0.487	0.494	0.484	0.00049	1.569	0.350
23.19	0.503	0.510	0.515	0.00051	1.656	0.327
24.41	0.495	0.497	0.493	0.00050	1.744	0.287

โดยที่อัตราส่วนความถี่คำนวณจากความถี่การสั่นสะเทือนหารด้วยความถี่ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนคงที่คือ 14 Hz และระยะขจัดไร้หน่วยคำนวณจากผลคูณของขนาดการสั่นสะเทือนเฉลี่ยและค่านิจสปริงของระบบหารด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางตามสมการ (3.2) ซึ่งจะแสดงดังสมการที่ (5.1)

$$\left| \frac{X_k}{F_0} \right| = \frac{X_{avg} \times 51137}{0.1 \times 0.0375 \times \omega^2} \quad (5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าพารามิเตอร์ของระบบ จะถูกแสดงด้วยตัวแปร μ ซึ่งแสดงถึงอัตราส่วนระหว่างมวลดูดซับการสั่นสะเทือนและมวลระบบ ดังสมการที่ (5.2) และ ตัวแปร β ซึ่งแสดงถึงอัตราส่วนระหว่างความถี่ดูดซับการสั่นสะเทือนและความถี่ธรรมชาติของระบบ ดังสมการที่ (5.3)

$$\mu = \frac{m_a}{m} = \frac{1}{10.94} = 0.0914 \quad (5.2)$$

$$\beta = \frac{\omega_a}{\omega_p} = \frac{14}{10.883} = 1.2864 \quad (5.3)$$

สำหรับการทดลองแทนค่าขนาดการสั่นสะเทือนเฉลี่ยจากตารางในตัวแปร X_{avg} สำหรับทฤษฎีแทนค่าขนาดการสั่นสะเทือนจากสมการ (5.4) ในตัวแปร X_{avg}

$$X = \frac{(k_a - m_a \omega^2) F_0}{(k + k_a - m \omega^2)(k_a - m_a \omega^2) - k_a^2} \quad (5.4)$$

ตัวอย่างการคำนวณทางทฤษฎี ขนาดการสั่นสะเทือนที่ความถี่การสั่นสะเทือน (ω) เท่ากับ 12.6 Hz หรือ 79.15 rad/s ซึ่งให้ค่าระยะขจัดเท่ากับ 1

จากความสัมพันธ์ระหว่างมุมหมุนและความถี่ในบทที่ 4 ที่ความถี่เท่ากับ 14 Hz มีมุมหมุนเท่ากับ 99.01 องศา ซึ่งมีค่านิจสปริงของคานโค้ง (k_a) เท่ากับ 7729.99 N/m และมีมวลดูดซับการสั่นสะเทือนรวม (m_a) เท่ากับ 1 kg สำหรับระบบหลักมีค่านิจสปริงรวม (k) เท่ากับ 51137 N/m มีมวลรวม (m) เท่ากับ 10.94 kg และมีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (F_0) เท่ากับ 23.493 N ดังนั้นขนาดการสั่นทางทฤษฎีตามสมการที่ (5.4) เท่ากับ -0.000466 m

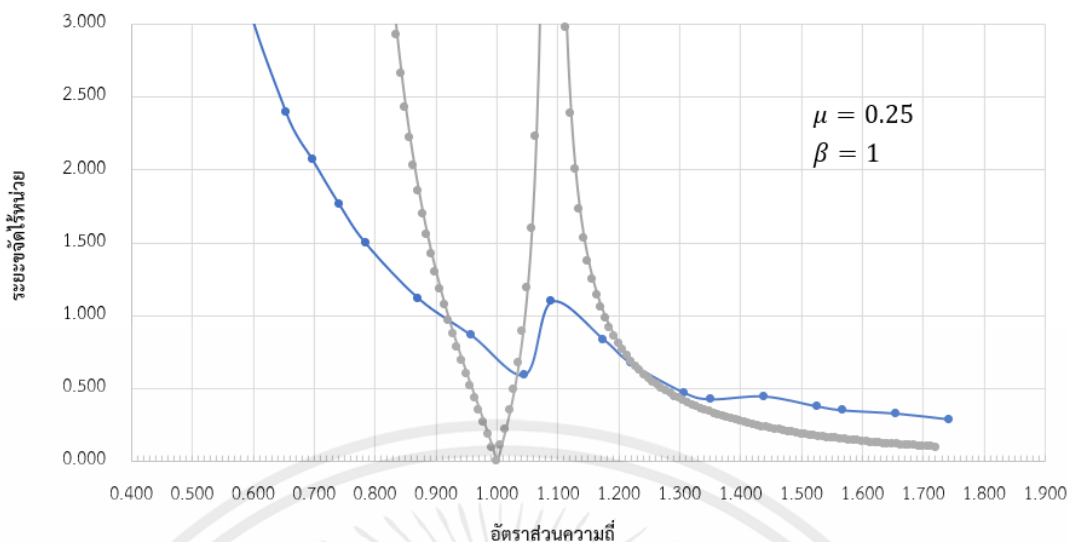
$$X = \frac{(7729.99 - 1 \cdot 79.15^2) \cdot 23.493}{(51137 + 7729.99 - 10.94 \cdot 79.15^2)(7729.99 - 1 \cdot 79.15^2) - 7729.99^2} = -0.000466$$

เมื่อแทนค่าขนาดการสั่นทางทฤษฎีในสมการที่ (5.1) จะได้ระยะขจัดทางทฤษฎีเท่ากับ

$$\left| \frac{Xk}{F_0} \right| = \left| \frac{(-0.000466)(51137)}{23.493} \right| = 1.014$$

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะขจัดไร้หน่วยและอัตราส่วนความถี่จากการทดลอง (สีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับทางทฤษฎี (สีเทา) ได้ดังรูปที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของระยะขจัดและอัตราส่วนระหว่างความถี่เครื่องจักรหมุนและความถี่ธรรมชาติ

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าระยะขจัดจากการทดลองและทฤษฎีมีแนวโน้มเดียวกัน และมีจุดตัดที่ระยะขจัดเท่ากับ 1 หรือช่วงความถี่ใช้งานที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับการสั่นสะเทือนด้วยคานโค้งมีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับสปริง หากพิจารณาที่ระยะขจัดที่ต่ำที่สุดจะพบว่า ผลจากการทดลองมีอัตราส่วนความถี่ที่สูงกว่าทฤษฎี เพราะการควบคุมคานโค้งไม่สามารถหมุนไปยังองศาที่ต้องการได้ โดยที่การทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนมีความคลาดเคลื่อนด้านตำแหน่งได้สูงสุด 5% และที่อัตราส่วนความถี่ 1.09 พบว่ากราฟระยะขจัดจากการทดลองไม่สามารถสูงเท่ากับกราฟระยะขจัดทางทฤษฎีได้ เนื่องจากระบบมีความฝืดระหว่างอุปกรณ์ ซึ่งทำให้ระบบเป็นการสั่นสะเทือนแบบไม่มีตัวหน่วงไม่สมบูรณ์

5.1.3 สรุปผลการทดลองหาระยะขจัด (Normalized Magnitude) ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระยะขจัดแบบไร้หน่วยและอัตราส่วนความถี่พบว่าอัตราส่วนความถี่ที่สามารถลดระยะขจัดแบบไร้หน่วยได้ต่ำที่สุดจากการทดลองและในทางทฤษฎี คือ 1.046 และ 1.000 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนมีความคลาดเคลื่อนของความถี่ที่ปรับเท่ากับ 4.6 % และขนาดระยะขจัดแบบไร้หน่วยต่ำสุดที่ 0.594 ในขณะที่ทางทฤษฎีสามารถลดได้จนถึง 0 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับการสั่นสะเทือนไม่สามารถลดขนาดการสั่นสะเทือนสูงสุดได้ตามทฤษฎี นอกจากนั้นช่วงที่มีขนาดระยะขจัดแบบไร้หน่วยน้อยกว่า 1 คือ 0.91 ถึง 1.07 นอกจากนั้นขนาดระยะขจัดแบบไร้หน่วยที่ 1.09

5.2 การทดลองหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่

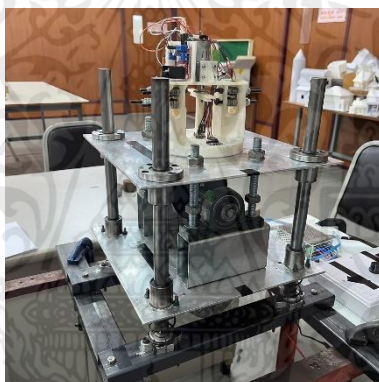
10 - 30 Hz

การทดลองหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ 10 - 30 Hz มีจุดประสงค์เพื่อระบุขนาดของการสั่นสะเทือนที่ลดลงระหว่างไม่ติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน และติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน ในรูปของเปอร์เซ็นต์ซึ่งจะถูกนิยามด้วยคำว่า ประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับการสั่นสะเทือนสามารถปรับค่าความถี่ได้ในช่วง 10 - 30 Hz ตามจุดประสงค์ของปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

5.2.1 วิธีการทดลองหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่

10-30 Hz

1. ติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือนโดยที่ไม่มีคานโค้งและมวลถ่วง ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงระบบการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรหมุน

2. ติดตั้งตัววัดความเร่ง (Accelerometer) ไว้ที่กึ่งกลางของฐานของเครื่องจักรจำลองการสั่นสะเทือน และตั้งค่าอุปกรณ์ตามบทที่ 3.4.3
3. เริ่มทำการหมุนเครื่องจักรจำลองการสั่นสะเทือนโดยเริ่มต้นที่ประมาณ 10 Hz
4. เก็บค่าขนาดการสั่นสะเทือนในหน่วยมิลลิเมตรเป็นเวลา 20 วินาที
5. แปลงข้อมูลที่ได้ โดยการใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) ประมาณขนาดของการสั่นสะเทือนสูงสุดและความถี่ที่เกิดขึ้น
6. บันทึกผลการทดลองขนาดการสั่นสะเทือนที่ได้จากขั้นตอนที่ 5 โดยจะบันทึกที่ 3 ค่า คือที่เวลา 5 วินาที 10 วินาที และ 15 วินาที
7. ปรับความถี่เครื่องจักรจำลองการสั่นสะเทือน โดยเพิ่มขึ้นทีละประมาณ 1 Hz จากนั้นดำเนินการตามขั้นตอนที่ 4 และ 5 ตามลำดับ จนกระทั่งความถี่เป็น 30 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ทำการติดตั้งคานโค้งและมวลถ่วงเข้าไปในระบบ จากนั้นตั้งค่าตัวดูดซับการสั่นสะเทือนให้ปรับค่าได้แบบอัตโนมัติ

9. ดำเนินการตามข้อ 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ

5.2.2 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ 10-30 Hz

จากการทดลองตามหัวข้อ 5.2.1 สามารถวัดขนาดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่าง ๆ ในช่วง 10-30 Hz ในขณะที่ไม่มีตัวดูดซับการสั่นสะเทือนได้ดังตารางที่ 5.2 และในขณะที่มีตัวดูดซับการสั่นสะเทือนดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 แสดงขนาดของการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่าง ๆ ในขณะที่ไม่มีตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

ความถี่ (Hz)	ขนาดของการสั่นสะเทือน (mm)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
10.380	0.764	0.760	0.765	0.763
10.990	0.743	0.746	0.748	0.746
12.210	0.641	0.642	0.624	0.636
13.430	0.641	0.626	0.629	0.632
14.040	0.609	0.608	0.615	0.611
15.260	0.621	0.624	0.622	0.622
15.870	0.626	0.635	0.622	0.628
17.090	0.638	0.636	0.639	0.638
17.700	0.689	0.688	0.681	0.686
18.310	0.670	0.673	0.678	0.674
18.920	0.710	0.702	0.689	0.700
20.140	0.669	0.675	0.682	0.675
21.360	0.628	0.632	0.633	0.631
21.970	0.602	0.597	0.599	0.599
23.190	0.562	0.569	0.561	0.564
23.800	0.530	0.528	0.522	0.527
25.020	0.545	0.545	0.546	0.545
26.250	0.509	0.505	0.508	0.507
27.470	0.510	0.512	0.515	0.512

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 (ต่อ) แสดงขนาดของการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่าง ๆ ในขณะที่ไม่มีตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

ความถี่ (Hz)	ขนาดของการสั่นสะเทือน (mm)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
28.080	0.539	0.549	0.544	0.544
29.300	0.563	0.565	0.562	0.563
29.910	0.549	0.552	0.552	0.551

ตารางที่ 5.3 แสดงขนาดของการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 10 - 30 Hz ในขณะที่มีตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

ความถี่ (Hz)	ขนาดของการสั่นสะเทือน (mm)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
10.380	0.577	0.575	0.578	0.577
10.990	0.532	0.539	0.534	0.535
12.210	0.504	0.499	0.500	0.501
12.820	0.466	0.443	0.440	0.450
14.040	0.422	0.418	0.420	0.420
14.650	0.457	0.456	0.455	0.456
15.870	0.640	0.622	0.622	0.628
16.480	0.662	0.674	0.670	0.669
17.090	0.603	0.643	0.639	0.628
18.310	0.475	0.462	0.454	0.464
18.920	0.475	0.464	0.471	0.470
20.140	0.493	0.498	0.514	0.502
21.360	0.512	0.520	0.507	0.513
21.970	0.518	0.522	0.525	0.522
23.190	0.515	0.510	0.509	0.511
23.800	0.494	0.494	0.502	0.497
25.020	0.493	0.485	0.499	0.492
26.250	0.448	0.446	0.449	0.448
27.470	0.443	0.450	0.435	0.443
28.690	0.453	0.460	0.449	0.454

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 (ต่อ) แสดงขนาดของการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 10 - 30 Hz ในขณะที่มีตัวดูดซับ
การสั่นสะเทือน

ความถี่ (Hz)	ขนาดของการสั่นสะเทือน (mm)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
29.300	0.485	0.486	0.485	0.485
29.910	0.478	0.479	0.476	0.478

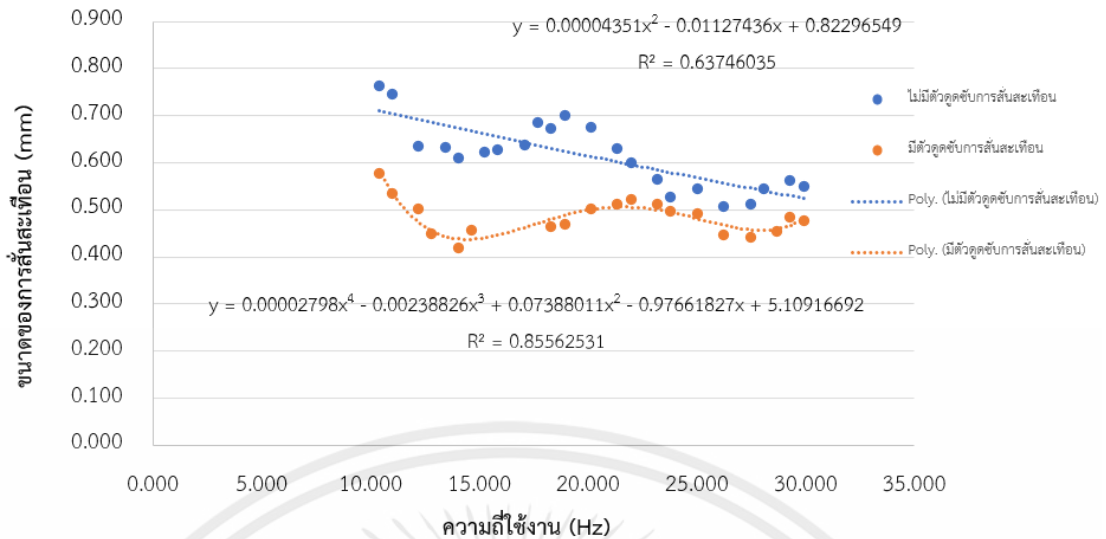
เนื่องจากเครื่องจักรจำลองการสั่นสะเทือนไม่สามารถปรับความถี่โดยละเอียดได้ ทำให้ข้อมูลเกิดความไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นสำหรับการหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนจะเก็บข้อมูลขนาดของการสั่นสะเทือนแต่ละความถี่ทั้งหมด 3 ครั้ง เพื่อนำมาเฉลี่ยกัน แล้วนำไปวิเคราะห์การถดถอย เพื่อนำสมการแนวโน้มที่ได้ไปใช้หาค่าที่จุดต่าง ๆ โดยมีความถี่ตั้งแต่ 10 ถึง 30 Hz การเลือกใช้กำลังของสมการพหุนามนั้น จะเลือกใช้จากค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนองที่สามารถอธิบายได้มีอยู่ในตัวแบบเชิงเส้น (R-Squared) ในเกณฑ์อ้างอิงที่ 0.60 % ดังนั้นจึงเลือกใช้กำลังของสมการแนวโน้ม ที่กำลัง 2 สำหรับระบบที่ไม่มีการติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน และกำลัง 4 สำหรับระบบที่มีการติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน ซึ่งให้ค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนองที่สามารถอธิบายได้มีอยู่ในตัวแบบเชิงเส้น (R-Squared) สำหรับระบบที่ไม่มีตัวดูดซับการสั่นสะเทือนและสำหรับระบบที่มีตัวดูดซับการสั่นสะเทือนเท่ากับ 0.637 และ 0.856 ตามลำดับ โดยระบบที่ไม่มีตัวดูดซับการสั่นสะเทือนมีสมการแนวโน้ม ดังสมการที่ (5.2)

$$y = 0.00004351x^2 - 0.01127436x + 0.82296549 \quad (5.2)$$

ระบบที่มีตัวดูดซับการสั่นสะเทือนมีสมการแนวโน้ม ดังสมการที่ (5.3)

$$y = 0.00002798x^4 - 0.00238826x^3 + 0.07388011x^2 - 0.97661827x + 5.10916692 \quad (5.3)$$

แสดงได้ดังรูปที่ 5.4

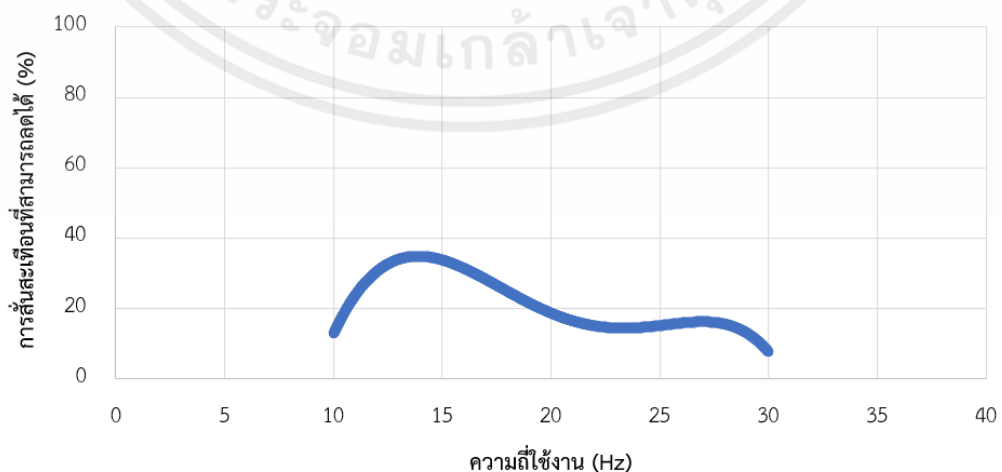


รูปที่ 5.4 แสดงผลการลดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ในช่วง 10-30 Hz โดยมีเส้นแนวโน้มพหุนามกำลัง 3

ในการหาประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนสามารถคิดได้จากขนาดการสั่นสะเทือนขณะไม่ได้ติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน เทียบกับขนาดการสั่นสะเทือนเมื่อติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือนดังสมการที่ (5.4)

$$Eff = \frac{x_{na} - x_a}{x_{na}} \times 100 \quad (5.4)$$

จากการคำนวณประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนตามสมการที่ (5.4) จะได้ประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ในช่วง 10-30 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 สรุปผลการทดลองหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ 10-30 Hz

จากรูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับการสั่นสะเทือนจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการลดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ในช่วงก่อน 15 Hz เนื่องจากช่วงดังกล่าวมีการสั่นสะเทือนเพียงแค่ 1 มิติ โดยจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อความถี่ใช้งานสูงขึ้นดังแสดงในช่วง 20 Hz เป็นต้นไป จากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในแกนอื่น ๆ นอกเหนือจากการเคลื่อนที่ขึ้นลง



บทที่ 6

สรุปผลการดำเนินการและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการศึกษาวិธีการ รวมถึงประดิษฐ์ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้ในช่วงความถี่ 10 ถึง 30 Hz โดยใช้เครื่องจักรหมุนติดตั้งมวลไม่สมดุลในการจำลองการสั่นสะเทือนและใช้คานโค้งแทนสปริงในการทำหน้าที่เป็นตัวเก็บและปลดปล่อยพลังงานศักย์ อีกทั้งยังทดสอบประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้

สำหรับเครื่องจักรหมุนจำลองการสั่นสะเทือนถูกพัฒนาขึ้นสำหรับสร้างการสั่นสะเทือนให้กับระบบโดยจะติดตั้งตัวต้านทานแบบปรับค่าได้เพื่อปรับปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่เข้าสู่มอเตอร์ ซึ่งส่งผลต่อความเร็วรอบของเครื่องจักรให้อยู่ในช่วงประมาณ 0 ถึง 30 Hz ติดตั้งมวลถ่วงขนาด 0.1 kg ในรัศมี 3.75 cm ห่างจากศูนย์กลางเพลลาทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง 14.799 ถึง 133.189 N นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งลิเนียร์บุชชิ่ง (Linear Bushing) เข้ากับฐานของเครื่องจักรและฐานตัวดูดซับการสั่นสะเทือน เพื่อจำกัดการเคลื่อนที่ใน 1 มิติ

ในส่วนของคานโค้งถูกนำมาวิเคราะห์ถึงภาระที่กระทำกับคานทั้งที่เกิดจากภาระภายนอกขนาด 4.905 N และภาระอันเนื่องมาจากน้ำหนักของคานในองศาใด ๆ โดยจะใช้วัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่มีรัศมาคานโค้ง 5 cm และหนา 0.3 cm นอกจากนี้ยังนำทฤษฎีบทลำดับที่สองของคาสติเกลียโน (Castigliano's Second Theorem) มาวิเคราะห์ขนาดการโก่งตัวของคานโค้ง และทดสอบขนาดการโก่งตัวของคานโค้งในทางปฏิบัติ เนื่องจากคานโค้งได้มีการรับภาระเป็นระยะเวลานาน ทำให้ทางคณะผู้จัดทำได้ใช้ความสัมพันธ์ทางปฏิบัติที่มีค่านิจสปริงน้อยกว่าทางทฤษฎี

สำหรับตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้ถูกพัฒนาขึ้นให้รองรับความถี่ในช่วง 10 ถึง 36 Hz ซึ่งมากกว่าช่วงที่ทำการทดลอง โดยโครงสร้างของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนถูกสร้างขึ้นจากเครื่องพิมพ์สามมิติ ใช้มวลถ่วงขนาด 0.5 kg โดยจะใช้ระบบสปริง - มวลถ่วงทั้งหมด 2 ชุดเพื่อให้เกิดความสมดุล นอกจากนี้ยังศึกษาถึงระบบควบคุมแบบปิด ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ใช้ ภายในชุดประกอบไปด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เครื่องตรวจวัดความเร่ง อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์กระแสตรง มอเตอร์กระแสตรง ตัวต้านทานปรับค่าได้ และโปรแกรมควบคุมผ่าน Arduino IDE

การทดลองหาความสัมพันธ์ของระยะขจัดและอัตราส่วนความถี่ระหว่างตัวดูดซับการสั่นสะเทือนถูกออกแบบมาเพื่อยืนยันสมมติฐานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนเมื่อเทียบกับทฤษฎี ซึ่งพบว่าความถี่ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนสามารถปรับได้ใกล้เคียงกับกับความถี่การหมุนของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องจักร โดยมีความคลาดเคลื่อนที่ 4.6 % นอกจากนั้นระยะขจัดแบบไร้หน่วยมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับทฤษฎีและต่ำสุดที่ 0.594

การทดลองหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ 10-30 Hz พบว่าในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 - 15 Hz ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนจะมีประสิทธิภาพที่มากขึ้นในการลดการสั่นสะเทือน เนื่องจากช่วงดังกล่าวมีการสั่นสะเทือนเพียงแค่ 1 เมตร โดยจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อความถี่ใช้งานสูงขึ้นตั้งแต่ 20 Hz เป็นต้นไป เป็นผลมาจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในแกนอื่น ๆ นอกเหนือจากการเคลื่อนที่ขึ้นลง

จากการทดลองต่าง ๆ ทำให้ทราบว่า ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนไม่สามารถลดการสั่นสะเทือนได้อย่างสมบูรณ์ตามทฤษฎี แต่มีประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนต่างกันไปในแต่ละช่วงซึ่งตรงตามทฤษฎีของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับเครื่องจักรหมุนจำลองการสั่นสะเทือนควรออกแบบให้มีช่องว่างระหว่างแต่ละส่วนประกอบให้น้อยที่สุด หรือทำให้อุปกรณ์มีจำนวนชิ้นที่น้อยลงเนื่องจากในทางปฏิบัติชิ้นอุปกรณ์แต่ละชิ้นมีการสั่นสะเทือนเป็นของตัวเอง เมื่อมีช่องว่างที่ไม่พอดีแล้วนั้น จะเกิดการสั่นสะเทือนที่มากกว่าทฤษฎี และเมื่อทำการยึดส่วนประกอบต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ช่องว่างที่ไม่พอดีนั่น จะทำให้เกิดความผิดปกติในการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรหมุนจำลองการสั่นสะเทือน ส่งผลให้การสั่นสะเทือนในระบบหลักไม่เป็นไปตามทฤษฎี
2. โครงสร้างตัวดูดซับการสั่นสะเทือนควรทำจากวัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่านี้ เนื่องจากต้องรับแรงจากการสั่นสะเทือน โดยเฉพาะส่วนยึดติดคานหมุนซึ่งพบร่องรอยความเสียหายระหว่างการใช้งาน
3. ควรหลีกเลี่ยงช่วงที่เกิดความถี่ธรรมชาติของระบบให้สามารถมั่นใจได้ว่าจุดที่เกิดการสั่นสะเทือนสูงสุดไม่ได้เกิดจากความถี่ธรรมชาติของระบบตรงกับความถี่การหมุนของเครื่องจักรจำลองการสั่นสะเทือน เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนได้อย่างถูกต้อง
4. คานโค้งที่ทำหน้าที่แทนสปริงควรที่จะพิจารณาถึงความล้าและอายุการใช้งานจากการสั่นสะเทือน เพราะคานโค้งถูกแรงที่กระทำเป็นคาบ
5. การควบคุมมอเตอร์ในเครื่องจักรหมุนจำลองการสั่นสะเทือนควรมีความละเอียดและแม่นยำมากกว่านี้ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความต่อเนื่อง

6. ระบบการวัดในตัวดูดซับการสั่นสะเทือนควรพิจารณาถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ทั้งทางด้านของเวลาในการเก็บข้อมูลและการแปลงข้อมูลความถี่
7. ความคุ้มค่าทางด้านราคาควรถูกนำมาพิจารณาซึ่งถือเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญทางวิศวกรรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- ฤทธิ คมไธสง และ วิทวัส ศรีมา. 2563. การออกแบบตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้ด้วยคานโค้งสำหรับเครื่องจักรชนิดหมุน. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Abhilash_patel. 2020. **ApproxFFT for Arduino**. Retrieve 20 January 2022 from : <https://create.arduino.cc/projecthub/abhilashpatel121/approxfft-fastest-fft-function-for-arduino-fd4917>
- Den Hartog, J.P. 1956. **Mechanical Vibration**. 2nd ed. New York : McGraw-Hill.
- Franchek, M.A., Ryan, M.W. and Bernhard, R.J. 1995. Adaptive-passive vibration control. **Journal of Sound and Vibration**. Vol.189. Issue 5.
- Hanson Technology. **L298N Dual H-Bridge Motor Driver Datasheet**. Retrieve 20 January 2022 from: <http://www.handsontec.com/dataspecs/L298N%20Motor%20Driver.pdf>
- Harshitha K S. **10 Things you did not know about the Tacoma Narrows Bridge**. Retrieve 20 January 2022 from: <https://www.re-thinkingthefuture.com/architectural-facts/a2573-10-things-you-did-not-know-about-the-tacoma-narrows-bridge/>
- HPD Construction. 2021. **What is Castigliano Theorem?**. Retrieve 24 February 2022 from :<https://www.hpdconsult.com/what-is-castiglianos-theorem/>
- Hunt, J.B. 1979. **Dynamic Vibration Absorbers**. London : Mechanical Engineering Publications.
- InvenSense Inc. 2012. **MPU6000 and MPU6050 Product Specification Revision 3.3**. Retrieve 20 January 2022 from: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/517744/ETC1/MPU-6050.html>
- Lamancusa J.S. 1987. An Actively Tuned, Passive Muffler System for Engine Silencing, **Proceedings of Noise-Con87**. Pennsylvania : The Pennsylvania State University

บรรณานุกรม (ต่อ)

- M. Boujari, A.K. Ghorbani-Tanha and M. Rahimian. 2012. **Two Degrees of Freedom PID Control for Active Vibration Control of Structures**. Tehran : University of Tehran.
- Moksony, F. 1990. Small is beautiful. **The use and interpretation of R2 in social research**. Szociológiai Szemle, Special issue, 130-138.
- Singiresu S. Rao. 2018. **Mechanical Vibrations**. Pearson Education, Inc. pp. 33
- Victoria K Chames Staff Writer. 2019. **More Ways to Keep Buildings Safe in Earthquakes**. Retrieve 24 February 2022 from:
<https://blog.jumpstartinsurance.com/more-ways-to-keep-buildings-safe-in-earthquakes/>
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. **Tacoma Narrows Bridge**.
 Retrieve 24 February 2022 from: <https://www.britannica.com/topic/Tacoma-Narrows-Bridge>
- The Editors of Encyclopaedia Britannica, **Young's modulus**. Retrieve 19 January 2022 from: <https://www.britannica.com/science/Youngs-modulus>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

ชุดคำสั่งการทำงาน (Code) ของตัวดูซ์การสันสะเทือนแบบปรับค่าได้จากโปรแกรม
Arduino

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ชุดคำสั่งส่วนการควบคุมการทำงาน

```

#include <MPU6050_tockn.h>
#include <Wire.h>

void setup()
{
  Serial.begin(250000);
  Wire.begin();
  mpu6050.begin();
  mpu6050.calcGyroOffsets(true);
}
MPU6050 mpu6050(Wire);
float fold = 0;
void loop()
{
  float Lold, Hold, Lnew, Hnew, fnew, Deg,PR, ERR, dist;
  int Acc[256];
  // input degree component//
  Lold = 42;
  Hold = 120;
  Lnew = 1484;
  Hnew = 2500;
  Serial.println("fold="+String(fold,0));
  for (int num = 0; num < 256 ; num += 1)
  {
    mpu6050.update();
    Acc[num] = mpu6050.getAccZ() * 100 - 101;
    Serial.print(Acc[num]);
    Serial.print(",");
    Serial.println(num);
  }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    delay(10);
}
fnew = Approx_FFT(Acc, 256, 100);
fnew=fnew-2;
Serial.print("fcal=");
Serial.println(fnew);
if (fnew < 10)
{
    fnew = 10;
}
else if (fnew > 36)
{
    fnew = 36;
}
Serial.println("fnew="+String(fnew,2)); // แสดงความถี่ที่ใช้จริง //
Deg = 1341.75 * pow(fnew, -0.9901);
Serial.println("DEG="+String(Deg,2));
float val = map(Deg , Hold, Lold, Lnew, Hnew);
Serial.println("val="+String(val,2));
PR = analogRead(PA0);
Serial.println("Position Resistance="+String(PR,2));
if ((fnew - fold > 1) || (fnew - fold < -1))
{
    do {
        dist =PR-val ;
        Serial.println("dist="+String(dist,2));
        if(dist>=0)
        {
            float pid= map(dist,996,0, 230 ,255);
            Serial.print("pid=");

```

```

Serial.println(pid);
analogWrite(PA7,0);
analogWrite(PA6,pid);
}
if(dist<0)
{
dist=-1*dist;
float pid= map(dist,996,0, 230 ,255);
Serial.print("pid=");
Serial.println(pid);
analogWrite(PA6,0);
analogWrite(PA7,pid);
}
PR = analogRead(PA0);
Serial.println("PR="+String(PR,0));
ERR=(val-PR)/val*100;
Serial.println("ERR="+String(ERR,0));
} while ((ERR > 5)|| (ERR < -5));
analogWrite(PA7,0);
analogWrite(PA6,0);
}
fold = fnew;
delay(2000);
}

```

2. ชุดคำสั่งด้านการคำนวณฟังก์ชันฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว

คำนวณฟังก์ชันฟูเรียร์อย่างรวดเร็วโดยประมาณ โดยที่ชุดคำสั่งอ้างอิงมาจาก Open Source Code ของ abhilashpatel121 จาก Project Hub โดยทางคณะผู้จัดทำได้ทำการทดสอบความถี่ที่ได้ใกล้เคียงกับเครื่องตรวจวัดความเร่ง DEWE43A

```

byte isin_data[128] =
{ 0, 1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20,
  22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 39, 40, 41, 42,
  44, 45, 46, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 56, 57, 59, 60, 61, 63, 64, 65,
  67, 68, 70, 71, 72, 74, 75, 77, 78, 80, 81, 82, 84, 85, 87, 88, 90,
  91, 93, 94, 96, 97, 99, 100, 102, 104, 105, 107, 108, 110, 112, 113, 115, 117,
  118, 120, 122, 124, 125, 127, 129, 131, 133, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146, 148,
  150, 152, 155, 157, 159, 161, 164, 166, 169, 171, 174, 176, 179, 182, 185, 188, 191,
  195, 198, 202, 206, 210, 215, 221, 227, 236
};

unsigned int Pow2[14] = {1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096};
byte RSSdata[20] = {7, 6, 6, 5, 5, 5, 4, 4, 4, 4, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 2, 2, 2};
//-----//

//-----FFT Function-----//
float Approx_FFT(int in[], int N, float Frequency)
{
  int a, c1, f, o, x, data_max, data_min = 0;
  long data_avg, data_mag, temp11;
  byte scale, check = 0;

  data_max = 0;
  data_avg = 0;
  data_min = 0;

  for (int i = 0; i < 12; i++) //calculating the levels
  {
    if (Pow2[i] <= N) {
      o = i;
    }
  }

```

```

}
a = Pow2[o];
int out_r[a]; //real part of transform
int out_im[a]; //imaginary part of transform

for (int i = 0; i < a; i++) //getting min max and average for scalling
{ out_r[i] = 0; out_im[i] = 0;
  data_avg = data_avg + in[i];
  if (in[i] > data_max) {
    data_max = in[i];
  }
  if (in[i] < data_min) {
    data_min = in[i];
  }
}

data_avg = data_avg >> o;
scale = 0;
data_mag = data_max - data_min;
temp11 = data_mag;

//scalling data from +512 to -512

if (data_mag > 1024)
{ while (temp11 > 1024)
  { temp11 = temp11 >> 1;
    scale = scale + 1;
  }
}
}

```

```

if (data_mag < 1024)
{ while (temp11 < 1024)
    { temp11 = temp11 << 1;
      scale = scale + 1;
    }
}

```

```

if (data_mag > 1024)
{
    for (int i = 0; i < a; i++)
    { in[i] = in[i] - data_avg;
      in[i] = in[i] >> scale;
    }
    scale = 128 - scale;
}

```

```

if (data_mag < 1024)
{ scale = scale - 1;
  for (int i = 0; i < a; i++)
  {
    in[i] = in[i] - data_avg;
    in[i] = in[i] << scale;
  }

```

```

    scale = 128 + scale;

```

```

}

```

```

x = 0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for (int b = 0; b < o; b++)          // bit reversal order stored in im_out array
{
    c1 = Pow2[b];
    f = Pow2[o] / (c1 + c1);
    for (int j = 0; j < c1; j++)
    {
        x = x + 1;
        out_im[x] = out_im[j] + f;
    }
}

for (int i = 0; i < a; i++)          // update input array as per bit reverse order
{
    out_r[i] = in[out_im[i]];
    out_im[i] = 0;
}

int i10, i11, n1, tr, ti;
float e;
int c, s, temp4;
for (int i = 0; i < o; i++)          //fft
{
    i10 = Pow2[i];                    // overall values of sine/cosine
    i11 = Pow2[o] / Pow2[i + 1]; // loop with similar sine cosine
    e = 1024 / Pow2[i + 1]; //1024 is equivalent to 360 deg
    e = 0 - e;
    n1 = 0;

    for (int j = 0; j < i10; j++)

```

```

{
c = e * j; //c is angle as where 1024 unit is 360 deg
while (c < 0) {
c = c + 1024;
}
while (c > 1024) {
c = c - 1024;
}

n1 = j;

for (int k = 0; k < i11; k++)
{
temp4 = i10 + n1;
if (c == 0) {
tr = out_r[temp4];
ti = out_im[temp4];
}
else if (c == 256) {
tr = -out_im[temp4];
ti = out_r[temp4];
}
else if (c == 512) {
tr = -out_r[temp4];
ti = -out_im[temp4];
}
else if (c == 768) {
tr = out_im[temp4];
ti = -out_r[temp4];
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else if (c == 1024) {
tr = out_r[temp4];
ti = out_im[temp4];
}
else {
tr = fast_cosine(out_r[temp4], c) - fast_sine(out_im[temp4], c); //the fast
sine/cosine function gives direct (approx) output for A*sinx
ti = fast_sine(out_r[temp4], c) + fast_cosine(out_im[temp4], c);
}

out_r[n1 + i10] = out_r[n1] - tr;
out_r[n1] = out_r[n1] + tr;
if (out_r[n1] > 15000 || out_r[n1] < -15000) {
check = 1; //check for int size, it can handle only +31000 to -31000,
}

out_im[n1 + i10] = out_im[n1] - ti;
out_im[n1] = out_im[n1] + ti;
if (out_im[n1] > 15000 || out_im[n1] < -15000) {
check = 1;
}

n1 = n1 + i10 + i10;
}
}

if (check == 1) { // scalling the matrices if value
higher than 15000 to prevent varible from overflowing
for (int i = 0; i < a; i++)
{

```

```

    out_r[i] = out_r[i] >> 1;
    out_im[i] = out_im[i] >> 1;
}
check = 0;
scale = scale - 1;           // tracking overall scaling of input data
}

}

if (scale > 128)
{ scale = scale - 128;
  for (int i = 0; i < a; i++)
  { out_r[i] = out_r[i] >> scale;
    out_im[i] = out_im[i] >> scale;
  }
  scale = 0;
}                               // revers all scaling we done till here,
else {
  scale = 128 - scale; // in case of nnumber getting higher than 32000, we will
represent in as multiple of 2^scale
}

/*
for(int i=0;i<a;i++)
{
  Serial.print(out_r[i]);Serial.print("\t");           // un comment to print
RAW o/p
  Serial.print(out_im[i]);
  Serial.print("\n");Serial.print("\t");
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Serial.print("*2^");Serial.println(scale);
}
*/

//---> here onward out_r contains amplitude and our_in conntains frequency (Hz)
int fout, fm, fstep;
float fstep;
fstep = Frequency / N;
fstep = fstep;
fout = 0; fm = 0;

for (int i = 1; i < Pow2[o - 1]; i++) // getting amplitude from complex number
{
    out_r[i] = fastRSS(out_r[i], out_im[i]);
    // Approx RSS function used to calculated magnitude quickly
    out_im[i] = out_im[i - 1] + fstep;
    if (fout < out_r[i]) {
        fm = i;
        fout = out_r[i];
    }

    // un comment to print Amplitudes (1st value (offset) is not printed)
    //Serial.print(out_r[i]); Serial.print("\t");
    //Serial.print("*2^");Serial.println(scale);
}

float fa, fb, fc;
fa = out_r[fm - 1];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

fb = out_r[fm];
fc = out_r[fm + 1];
fstep = (fa * (fm - 1) + fb * fm + fc * (fm + 1)) / (fa + fb + fc);

return (fstep * Frequency / N);
}

//-----fast sine/cosine-----//

int fast_sine(int Amp, int th)
{
    int temp3, m1, m2;
    byte temp1, temp2, test, quad, accuracy;
    accuracy = 5; // set it value from 1 to 7, where 7 being most accurate but slowest
    // accuracy value of 5 recommended for typical applicaiton
    while (th > 1024) {
        th = th - 1024; // here 1024 = 2*pi or 360 deg
    }
    while (th < 0) {
        th = th + 1024;
    }
    quad = th >> 8;

    if (quad == 1) {
        th = 512 - th;
    }
    else if (quad == 2) {
        th = th - 512;
    }
    else if (quad == 3) {

```

```

        th = 1024 - th;
    }

temp1 = 0;
temp2 = 128;//2 multiple
m1 = 0;
m2 = Amp;

temp3 = (m1 + m2) >> 1;
Amp = temp3;
for (int i = 0; i < accuracy; i++)
{ test = (temp1 + temp2) >> 1;
  temp3 = temp3 >> 1;
  if (th > isin_data[test]) {
    temp1 = test;
    Amp = Amp + temp3;
    m1 = Amp;
  }
  else if (th < isin_data[test]) {
    temp2 = test;
    Amp = Amp - temp3;
    m2 = Amp;
  }
}

if (quad == 2) {
    Amp = 0 - Amp;
}

else if (quad == 3) {
    Amp = 0 - Amp;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
return (Amp);
}

int fast_cosine(int Amp, int th)
{
    th = 256 - th; //cos th = sin (90-th) formula
    return (fast_sine(Amp, th));
}

//-----//

//-----Fast RSS-----//

int fastRSS(int a, int b)
{ if (a == 0 && b == 0) {
    return (0);
}
int min, max, temp1, temp2;
byte clevel;
if (a < 0) {
    a = -a;
}
if (b < 0) {
    b = -b;
}
clevel = 0;
if (a > b) {
    max = a;
    min = b;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

} else {
    max = b;
    min = a;
}

if (max > (min + min + min))
{
    return max;
}
else
{
    temp1 = min >> 3; if (temp1 == 0) {
        temp1 = 1;
    }
    temp2 = min;
    while (temp2 < max) {
        temp2 = temp2 + temp1;
        clevel = clevel + 1;
    }
    temp2 = RSSdata[clevel]; temp1 = temp1 >> 1;
    for (int i = 0; i < temp2; i++) {
        max = max + temp1;
    }
    return (max);
}
}

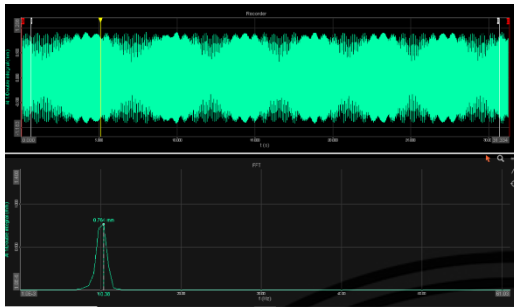
```



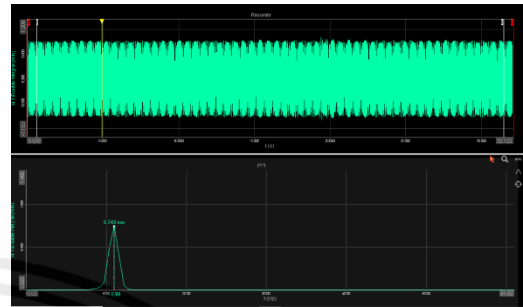
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ผลการทดสอบของระบบที่ไม่ได้ติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือนที่ได้จากโปรแกรม DEWESoftX

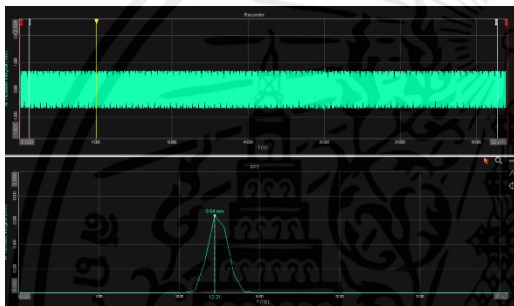
10.38 Hz



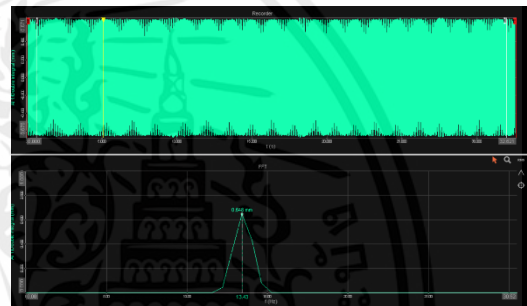
10.99 Hz



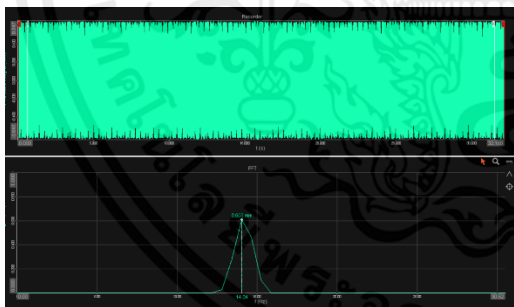
12.21 Hz



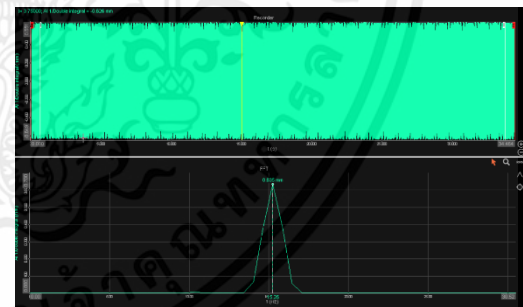
13.43 Hz



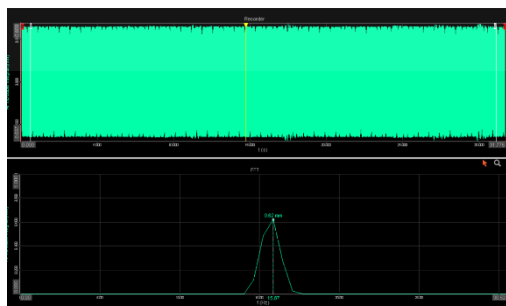
14.04 Hz



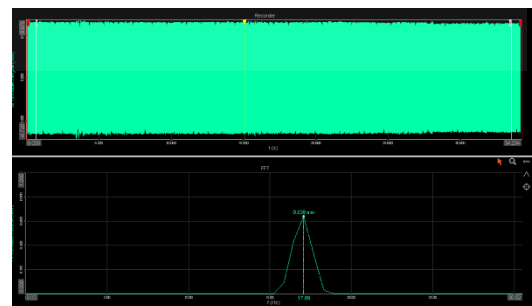
15.26 Hz



15.87 Hz

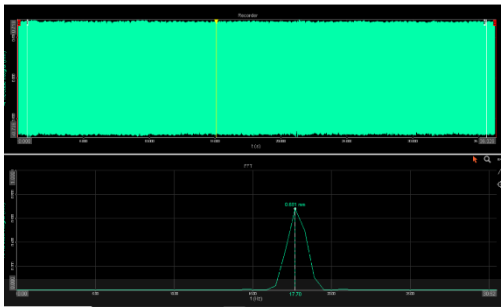


17.09 Hz

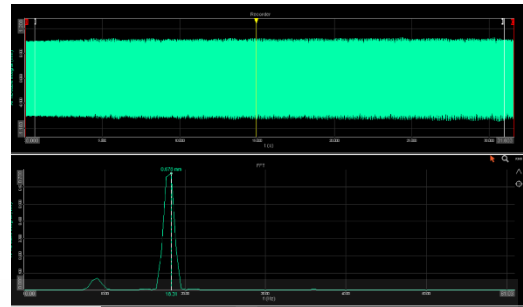


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

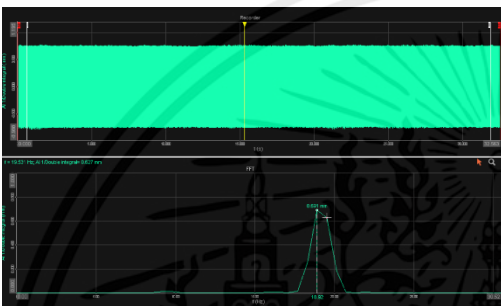
17.70 Hz



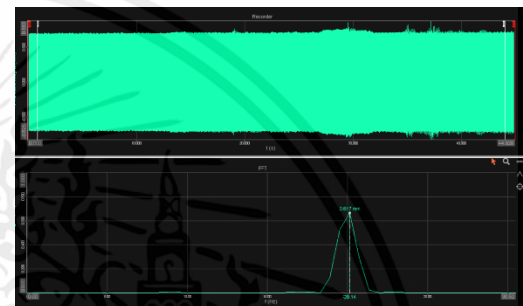
18.31 Hz



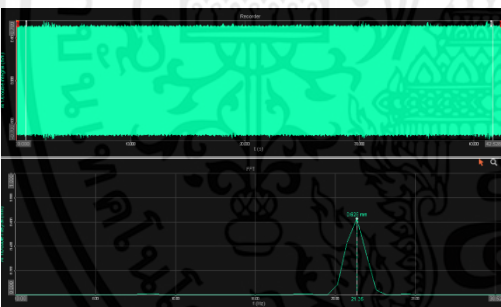
18.92 Hz



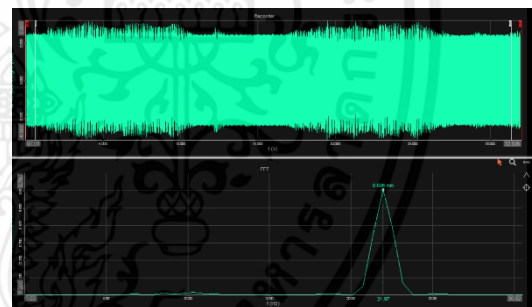
20.14 Hz



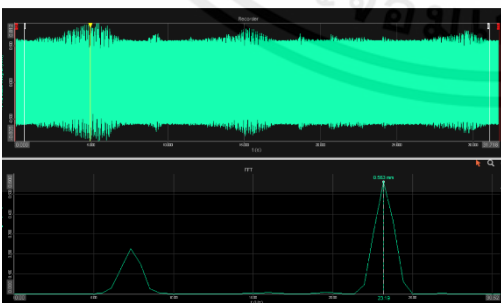
21.36 Hz



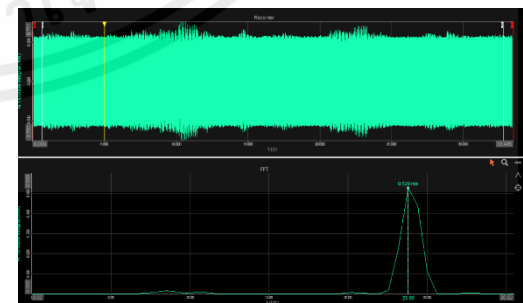
21.97 Hz



23.19 Hz

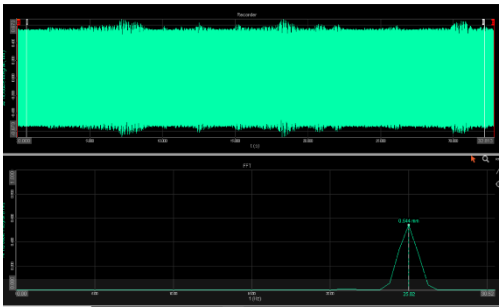


23.80 Hz

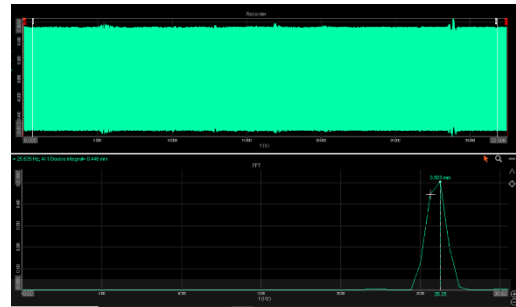


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

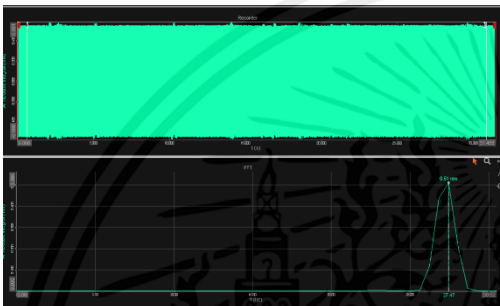
25.02 Hz



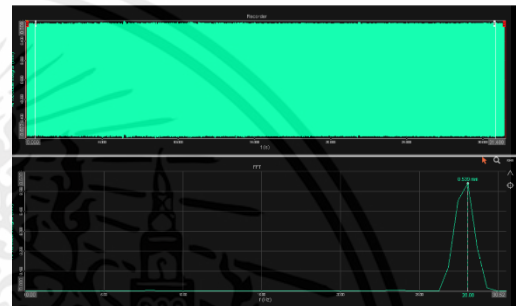
26.25 Hz



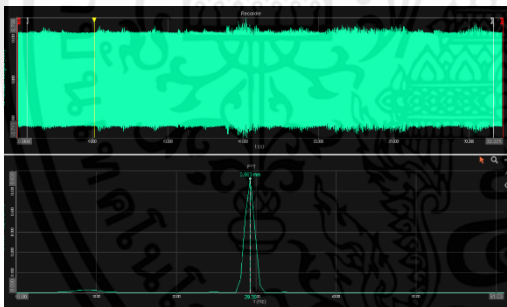
27.47 Hz



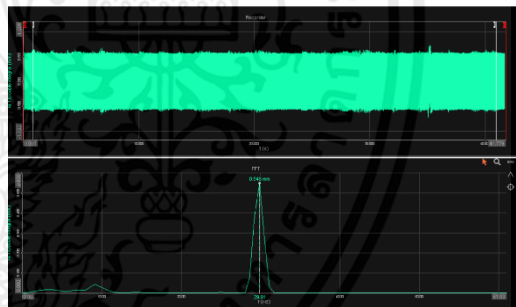
28.08 Hz



29.30 Hz

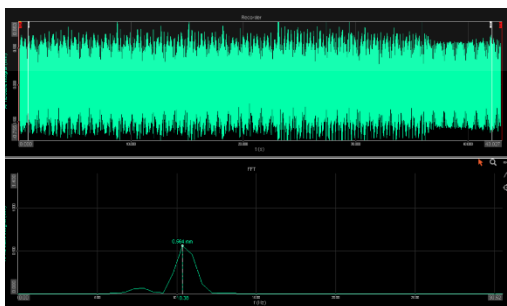


29.91 Hz

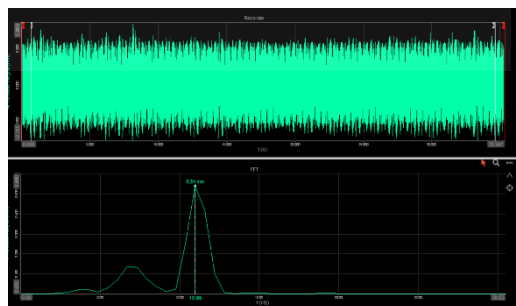


1. ผลการทดสอบของระบบที่ติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือนที่ได้จากโปรแกรม DEWESoftX

10.38 Hz

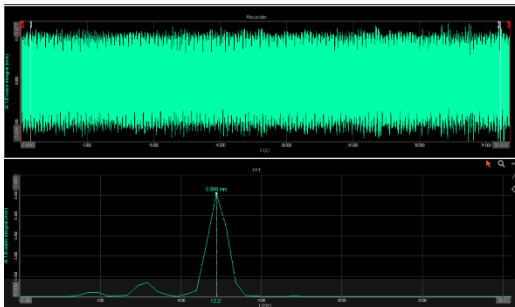


10.99 Hz

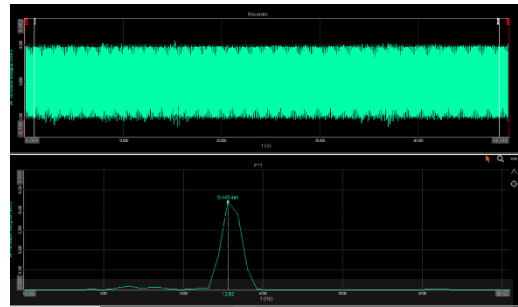


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

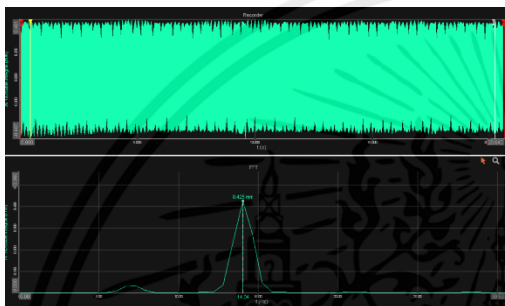
12.21 Hz



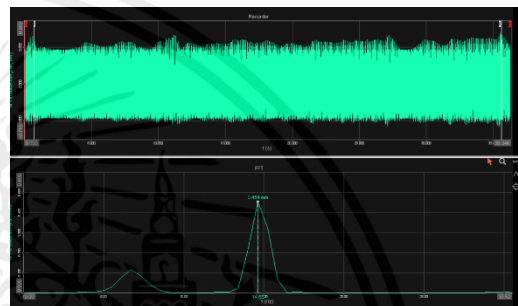
12.82 Hz



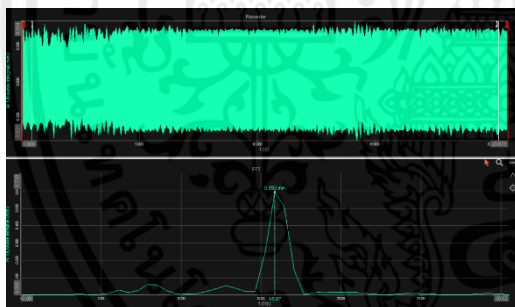
14.04 Hz



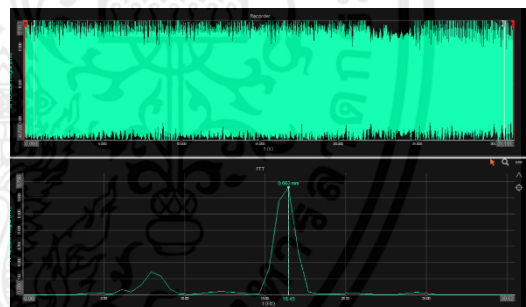
14.65 Hz



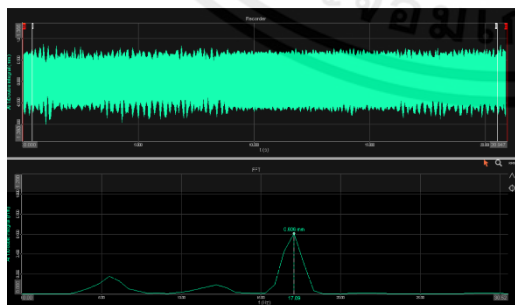
15.87 Hz



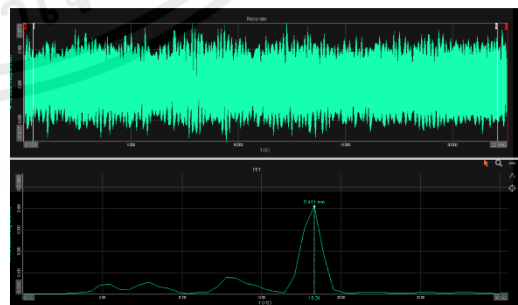
16.48 Hz



17.09 Hz

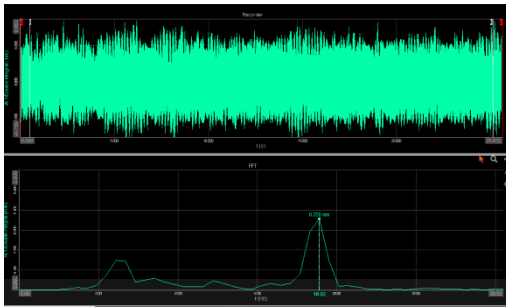


18.31 Hz

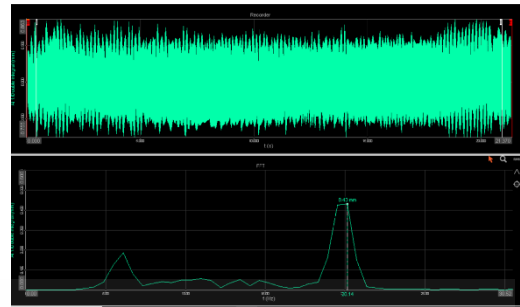


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

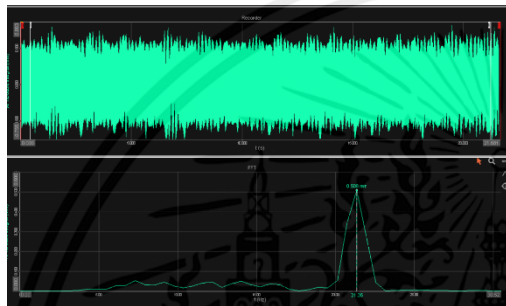
18.92 Hz



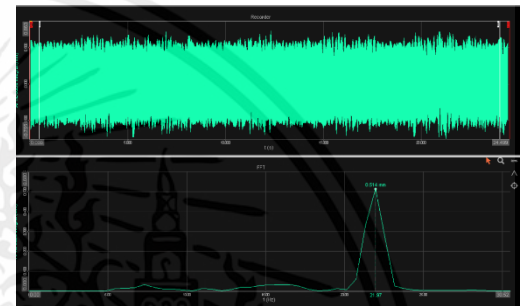
20.14 Hz



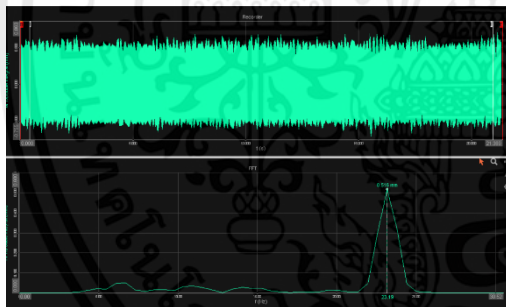
21.36 Hz



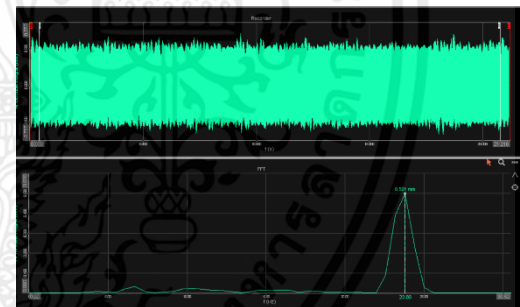
21.97 Hz



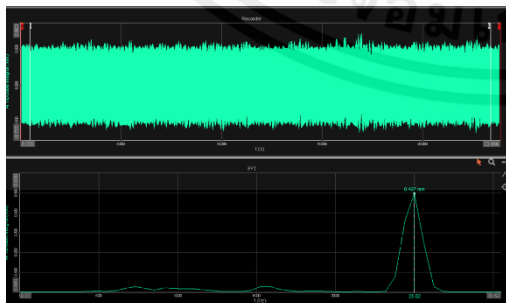
23.19 Hz



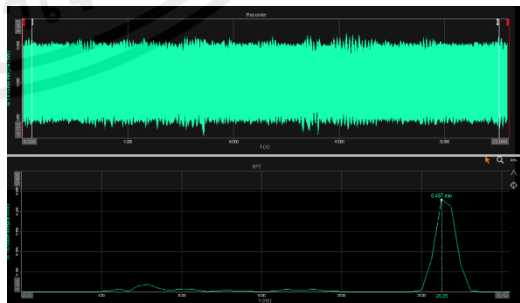
23.80 Hz



25.02 Hz

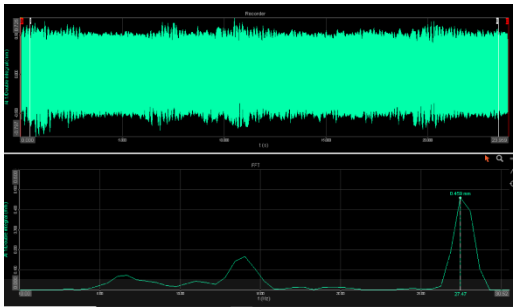


26.25 Hz

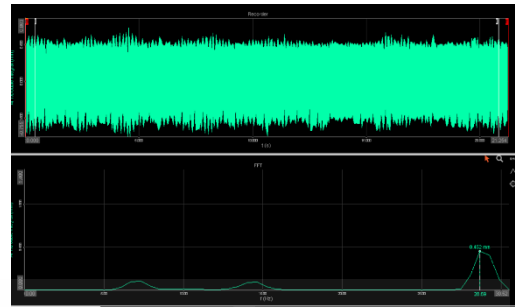


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

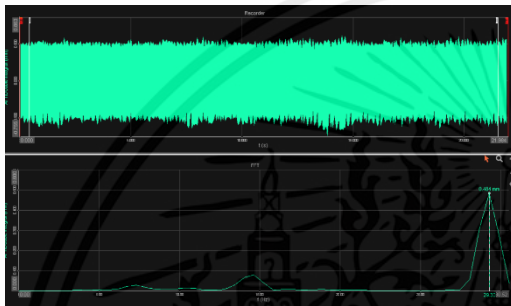
27.47 Hz



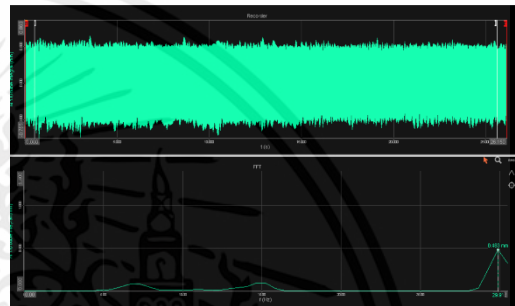
28.69 Hz



29.30 Hz



29.91 Hz




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค
รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	MPU-6000/MPU-6050 Product Specification	Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.3 Release Date: 5/16/2012
---	--	--

6.2 Accelerometer Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T_A = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
ACCELEROMETER SENSITIVITY						
Full-Scale Range	AFS_SEL=0		±2		g	
	AFS_SEL=1		±4		g	
	AFS_SEL=2		±8		g	
	AFS_SEL=3		±16		g	
ADC Word Length	Output in two's complement format		16		bits	
Sensitivity Scale Factor	AFS_SEL=0		16,384		LSB/g	
	AFS_SEL=1		8,192		LSB/g	
	AFS_SEL=2		4,096		LSB/g	
	AFS_SEL=3		2,048		LSB/g	
Initial Calibration Tolerance			±3		%	
Sensitivity Change vs. Temperature	AFS_SEL=0, -40°C to +85°C		±0.02		%/°C	
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		0.5		%	
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	
ZERO-G OUTPUT						
Initial Calibration Tolerance	X and Y axes		±50		mg	1
	Z axis		±80		mg	
Zero-G Level Change vs. Temperature	X and Y axes, 0°C to +70°C		±35		mg	
	Z axis, 0°C to +70°C		±60		mg	
SELF TEST RESPONSE						
Relative	Change from factory trim	-14		14	%	2
NOISE PERFORMANCE						
Power Spectral Density	@10Hz, AFS_SEL=0 & ODR=1kHz		400		μg/√Hz	
LOW PASS FILTER RESPONSE						
	Programmable Range	5		260	Hz	
OUTPUT DATA RATE						
	Programmable Range	4		1,000	Hz	
INTELLIGENCE FUNCTION INCREMENT						
			32		mg/LSB	

1. Typical zero-g initial calibration tolerance value after MSL3 preconditioning
2. Please refer to the following document for further information on Self-Test: *MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Descriptions*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



User Guide

L298N Dual H-Bridge Motor Driver

This dual bidirectional motor driver, is based on the very popular L298 Dual H-Bridge Motor Driver Integrated Circuit. The circuit will allow you to easily and independently control two motors of up to 2A each in both directions. It is ideal for robotic applications and well suited for connection to a microcontroller requiring just a couple of control lines per motor. It can also be interfaced with simple manual switches, TTL logic gates, relays, etc. This board equipped with power LED indicators, on-board +5V regulator and protection diodes.



SKU: MDU-1049

Brief Data:

- Input Voltage: 3.2V-40Vdc.
- Driver: L298N Dual H Bridge DC Motor Driver
- Power Supply: DC 5 V - 35 V
- Peak current: 2 Amp
- Operating current range: 0 - 36mA
- Control signal input voltage range :
 - Low: $-0.3V \leq V_{in} \leq 1.5V$
 - High: $2.3V \leq V_{in} \leq V_{ss}$
- Enable signal input voltage range :
 - o Low: $-0.3 \leq V_{in} \leq 1.5V$ (control signal is invalid)
 - o High: $2.3V \leq V_{in} \leq V_{ss}$ (control signal active).
- Maximum power consumption: 20W (when the temperature $T = 75^{\circ}C$).
- Storage temperature: $-25^{\circ}C \sim +130^{\circ}C$.
- On-board +5V regulated Output supply (supply to controller board i.e. Arduino).
- Size: 3.4cm x 4.3cm x 2.7cm



Handson Technology

Data Specs

WH148 Series Rotary Potentiometers

WH148 series standard 3-pin rotary potentiometer with a knurled shaft. The WH148 series potentiometers are available in a variety of resistance values and either Audio or Linear taper options.



SKU: [RES1498](#)

Brief Data:

- Series: WH148.
- Potentiometer Type: Rotary.
- Resistance: 10k Ω \pm 20%.
- Number of Gangs: 1.
- Number of Turns: 1.
- Power Rating: 0.125W.
- Resistance Taper: Curve B Linear Type.
- Element Material: Carbon.
- Mounting Type: Panel Mount.
- Termination Style: Solder Lug.
- Shaft Length: 7mm.
- Shaft Diameter: \varnothing 6mm.
- Actuator Type: Knurled Shaft.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Type 8692C5 ... 8692C50, 8692C5M1 ... 8692C50M1,

8692C SERIES, TRIAXIAL PiezoBEAM[®] ACCELEROMETERS

Designed for measuring structural response in modal applications, the 8692C series of triaxial accelerometers measure vibration in three, mutually perpendicular axes (x, y and z), simultaneously. The sensors feature high sensitivity and a low impedance voltage output. These lightweight accelerometers reduce mass loading on thin-walled structures. This series of accelerometers, each with an

integral four-pin connector, are designed for simplified and versatile installation. The unique, built-in magnet facilitates quick mounting; adhesive may be used for more permanent installations. As an option, the M1 version is available with 10-32 mounting thread in place of the internal magnet while the M3 version is available with color coded caps for axis identification. The 8692C series features

Continued

- Low impedance, voltage mode
- Unique integral mounting magnet
- Low cost, lightweight triaxial design
- High accuracy and stability
- Choice of ranges and sensitivities
- Excellent thermal stability
- Conforming to CE



Technical Data	Units	8692C5		8692C10		8692C50	
		8692C5M1	8692C50M1	8692C10M1	8692C10M1	8692C50M1	8692C50M1
Acceleration Range	g	±5	±10	±10	±10	±50	±50
Acceleration Limit	g _{pk}	±3	±16	±16	±16	±80	±80
Threshold nom.	g _{rms}	120	280	280	280	1000	1000
Sensitivity ±5% @ 3 g _{rms} & 100Hz	mV/g	1000	500	500	500	100	100
Resonant Frequency mounted, nom.	kHz	9	22	22	22	22	22
Frequency Response ±5%	Hz	1 ... 3000	1 ... 5000	1 ... 5000	1 ... 5000	1 ... 6000	1 ... 6000
Phase Shift, < 5°	Hz	4 ... 2000	4 ... 2000	4 ... 2000	4 ... 2000	4 ... 4000	4 ... 4000
Amplitude Non-linearity	%FSO	±1	±1	±1	±1	±1	±1
Time Constant nom.	s	1	1	1	1	1	1
Transverse Sensitivity	%	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Long Term Stability	%	±1	±1	±1	±1	±1	±1
Environmental:							
Base Strain Sensitivity @ 250 µs	g/µε	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Shock Limit (0.2ms pulse width)	g _{pk}	5000	10000	10000	10000	10000	10000
Temperature Coefficient of Sensitivity	%/°C	-0.02	+0.04	+0.04	+0.04	+0.04	+0.04
	%/°C	-0.04	+0.08	+0.08	+0.08	+0.08	+0.08
Temperature Range Operating (4 mA supply current)	°F	32 ... 149	32 ... 149	32 ... 149	32 ... 149	32 ... 149	32 ... 149
	°C	0 ... 65	0 ... 65	0 ... 65	0 ... 65	0 ... 65	0 ... 65
Storage	°F	-10 ... 200	-10 ... 200	-10 ... 200	-10 ... 200	-10 ... 200	-10 ... 200
	°C	-23 ... 94	-23 ... 94	-23 ... 94	-23 ... 94	-23 ... 94	-23 ... 94
Output:							
Bias nom.	VDC		11	11	11	11	11
Impedance	Ω		<500	<500	<500	<500	<500
Voltage full scale	V		±5	±5	±5	±5	±5
Current	mA		2	2	2	2	2
Source:							
Voltage	VDC		20 ... 30	20 ... 30	20 ... 30	20 ... 30	20 ... 30
Constant Current	mA		2 ... 20	2 ... 20	2 ... 20	2 ... 20	2 ... 20
Impedance min.	kΩ		100	100	100	100	100

1 g = 9.80665 m/s², 1 inch = 25.4 mm, 1 gram = 0.03527 oz, 1 lbf-in = 0.1129 Nm

Kistler Instrument Corporation reserves the right to discontinue or change specifications, designs or materials without notice consistent with sound engineering principles and quality practices.

Kistler Instrument Corporation, 75 John Glenn Drive, Amherst NY 14228
Phone 716-491-5100, Fax 716-491-1226, e-mail: sales.us@kistler.com, www.kistler.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้