

ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนด้วยการปรับค่าความยาวคานโค้ง

ACTIVE VIBRATION ABSORBER USING VARIABLE ARC LENGTH OF
CURVE BEAM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2566

KMITL-2024-EN-M-037-259

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACTIVE VIBRATION ABSORBER USING VARIABLE ARC LENGTH OF
CURVE BEAM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023
KMITL-2024-EN-M-037-259

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ตัวดูดซับการสันสะเทือนด้วยการปรับค่าความยาว คานโค้ง
นักศึกษา	นายอิษวัต รอดอยู่
รหัสประจำตัว	63601066
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ณัฐวุฒิ เตไปวา

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เน้นการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ดูดซับการสันสะเทือนที่สามารถปรับค่าได้ เพื่อลดปัญหาการสันสะเทือนที่เกิดขึ้นในการใช้งาน โดยเฉพาะเมื่อความเร็วหรือความถี่ของการสันสะเทือนมีการเปลี่ยนแปลง อุปกรณ์นี้ถูกออกแบบให้เคลื่อนที่ในมิติเดียว โดยมีเครื่องกำเนิดการสันสะเทือนที่ควบคุมด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้ และติดตั้งมวลไม่สมดุล เพื่อสร้างแรงเหวี่ยงระหว่าง 14.799 และ 133.189 นิวตัน ที่ความถี่ความเร็วรอบ 10 และ 30 ต่อวินาที การควบคุมความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์ดูดซับการสันสะเทือนนี้ใช้แผงควบคุมขนาดเล็กหรือไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F103C8T6 - Black Pill และเกณฑ์ควบคุมเป็นเกณฑ์แบบปรับความถี่ดูดซับสำหรับปรับความแข็งของสปริง

สปริงถูกออกแบบให้อยู่ในรูปแบบคานโค้ง เพื่อให้อุปกรณ์ดูดซับการสันสะเทือนมีขนาดเล็กและติดตั้งง่าย และสามารถตอบสนองต่อน้ำหนักที่เปลี่ยนไปได้อย่างรวดเร็ว การลดการสันสะเทือนของระบบถูกปรับให้เหมาะสมโดยการเปลี่ยนความยาวของคานโค้ง ผ่านการปรับตำแหน่งของแขนล้อคเพื่อเปลี่ยนแปลงความแข็งของสปริง ระบบควบคุมแบบป้อนกลับนำมาใช้ส่งข้อมูลตำแหน่งหมุนของมอเตอร์ผ่านตัวต้านทานปรับค่าได้ จากนั้นคำนวณความคลาดเคลื่อนและส่งค่ากลับเพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้อง

การทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสันสะเทือนได้รับการดำเนินการโดยใช้ซอฟต์แวร์จำลองการเคลื่อนที่ของ ADAMS เพื่อคำนวณประสิทธิภาพในการลดการสันสะเทือนของระบบหลัก ที่มีและไม่มีติดตั้งตัวดูดซับแบบแอคทีฟ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า การออกแบบตัวดูดซับการสันสะเทือนแบบแอคทีฟด้วยคานโค้งสามารถลดการสันสะเทือนได้ถึง 65.49 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองจริงที่ได้สร้างเครื่องทดสอบ ประสิทธิภาพในการใช้งานจริงลดลงมี ประสิทธิภาพมากที่สุดคือ 34.917% ในขณะที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดคือ 7.711% สรุปได้ว่าการออกแบบตัวดูดซับการสันสะเทือนแบบแอคทีฟด้วยคานโค้งสามารถลดการสันสะเทือนได้ และแม้ว่าผลลัพธ์จะไม่ได้เป็นพิเศษ แต่ก็เพียงพอสำหรับการเริ่มต้นและหาทางแก้ไขต่อไปเพื่อให้การทดลองจริงได้ผลลัพธ์ที่สูงขึ้นใกล้เคียงกับผลลัพธ์จากการจำลอง

Thesis	Active Vibration Absorber Using Variable Arc Length of Curve Beam
Student	Mr. Itsawat Rodyoo
Student ID.	63601066
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Dr. Nattawoot Depaiwa

ABSTRACT

This thesis focuses on the design and creating of active vibration absorber to mitigate vibration problems encountered during operation, especially when the vibration speed or frequency changes. The device is designed to move in one dimension and consists of a vibration generator controlled by a variable resistor and equipped with an unbalanced mass to generate force between 14.799 and 133.189 N at rotational frequencies of 10 and 30 Hz, respectively. The natural frequency of the vibration absorber is controlled using a microcontroller, the STM32F103C8T6 - Black Pill, and a tuned frequency control strategy to adjust the spring stiffness.

System vibration reduction is optimized by changing the length of the curved beam, which is achieved by adjusting the position of the locking arm to change the spring stiffness. A feedback control system is used to transmit the motor's rotational position data through a variable resistor, then calculate the error and send it back to achieve the desired position.

The performance of the vibration absorber was tested and evaluated using ADAMS motion simulation software. The results showed that the designed active vibration absorber with a curved beam can reduce vibration by up to 65.49%. However, based on the experimental results obtained from the constructed test rig, the actual efficiency was lower, with a maximum of 34.917% and a minimum of 7.711%. Although the results are not ideal, they provide a good starting point for further development and refinement to achieve higher experimental results closer to the simulation results.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ณัฐวุฒิ เตไปวา และอาจารย์ ผศ.ดร.อนุรัตน์ พิณโสภณ ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการวางแผน ให้คำชี้แนะและช่วยแก้ไขปัญหา ตลอดจนการให้คำปรึกษาแนะนำในการดำเนินการวิจัย และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ รวมทั้งแก้ไขปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จนสามารถทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำในการปรับแก้รูปเล่มวิทยานิพนธ์ อันจะเป็นประโยชน์ในการต่อยอดงานให้สมบูรณ์แบบมากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคุณเจตจำนง เกษประดิษฐ์ เจ้าหน้าที่เทคนิค ประจำภาควิชาเครื่องกล ที่ให้คำแนะนำ และช่วยแก้ปัญหาระหว่างการปฏิบัติการ รวมถึงกำลังใจจากทุกคน คำแนะนำให้คำปรึกษาจากครูอาจารย์ทุกท่าน ที่ช่วยประกอบให้วิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์

ประโยชน์อันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบให้แต่ผู้ช่วยเหลือและผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งที่กล่าวถึงและไม่ได้กล่าวถึง ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

นายอิษวัต รอดอยู่

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.....	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีระบบการสันสะเทือนในเครื่องจักร.....	4
2.2 ทฤษฎีการดูดซับการสันสะเทือน.....	6
2.3 การคำนวณการโก่งตัวของคาน.....	10
2.4 ทฤษฎีระบบควบคุม.....	15
2.5 งานวิจัยและปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 แผนการดำเนินงานและอุปกรณ์.....	19
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	19
3.2 เครื่องจักรหมุนจำลองการสันสะเทือน.....	20
3.2.1 ส่วนประกอบและการทำงานของระบบหลัก.....	20
3.2.2 ความถี่ธรรมชาติของระบบหลัก.....	22
3.2.3 แรงที่กระทำกับระบบหลัก.....	22
3.3 ตัวดูดซับการสันสะเทือน.....	23

สารบัญ (ต่อ)

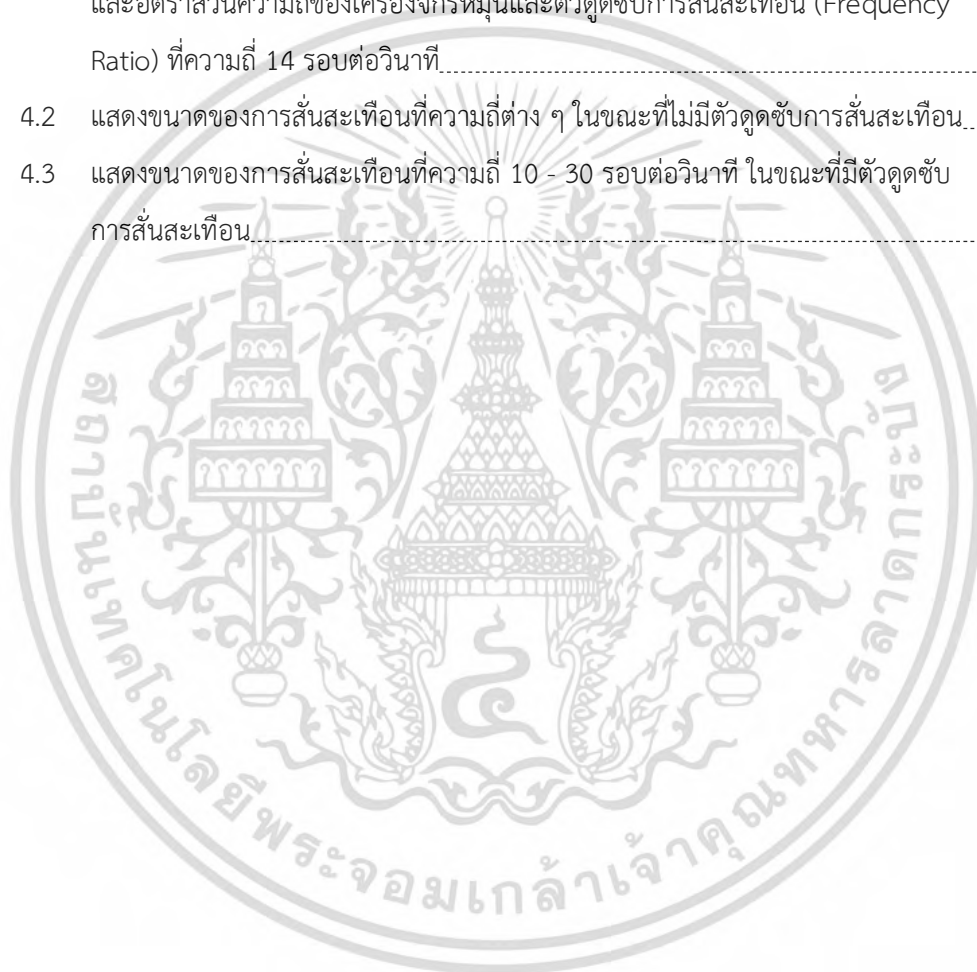
	หน้า
3.3.1 ผังแสดงภาพรวมของการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้	23
3.3.2 ส่วนประกอบและการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้	24
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่สปริงและมุมหมุนของคานโค้งทางทฤษฎี	26
3.4.1 ภาวะที่เกิดขึ้นจากมวลถ่วงที่กระทำกับปลายคานสำหรับองศาการหมุนใด ๆ	26
3.4.2 ภาวะที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของคานสำหรับองศาการหมุนใด ๆ	29
3.4.3 ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมหมุนของคานโค้งจากทฤษฎีบทลำดับที่สองของคาสติเกลียโน (Castigliano's Second Theorem)	32
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมหมุนของคานโค้งจากการทดลอง	35
3.5.1 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมหมุนของคานโค้ง	35
3.5.1.1 วิธีการทดลอง	35
3.5.1.2 ผลการทดลอง	36
3.5.2 ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมหมุนของคานโค้งจากการทดลอง	36
3.6 ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างมุมของคานโค้งและความถี่ที่ใช้งานในตัวดูดซับการสั่นสะเทือน	37
3.7 อุปกรณ์สำหรับเก็บข้อมูล	38
3.7.1 เครื่องตรวจวัดความเร่ง (Accelerometer)	38
3.7.2 ระบบการเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Acquisition System (DAQ))	38
3.7.3 วิธีการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล	39
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	42
4.1 การทดลองหาระยะขจัด (Normalized Magnitude) ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน	42
4.1.1 วิธีการทดลองหาระยะขจัด (Normalized Magnitude) ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2 ผลการทดลองหาระยะขจัด (Normalized Magnitude) ของตัวดูดซับ	
การสั่นสะเทือน.....	43
4.1.3 สรุปผลการทดลองหาระยะขจัด (Normalized Magnitude) ของตัวดูดซับ	
การสั่นสะเทือน.....	45
4.2 การทดลองหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนในช่วง	
ความถี่ 10 - 30 รอบต่อวินาที.....	45
4.2.1 วิธีการทดลองหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนในช่วง	
ความถี่ 10-30 รอบต่อวินาที.....	45
4.2.2 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนในช่วง	
ความถี่ 10-30 รอบต่อวินาที.....	46
4.2.3 สรุปผลการทดลองหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนในช่วง	
ความถี่ 10-30 รอบต่อวินาที.....	49
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินการและข้อเสนอแนะ.....	50
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	50
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	51
บรรณานุกรม.....	53
ภาคผนวก.....	55
ภาคผนวก ก.....	56
ภาคผนวก ข.....	72
ภาคผนวก ค.....	79

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงผลการทดลองของค่านิจสปริงเปรียบเทียบกับมุมหมุนของคานโค้งที่ 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 และ 110 องศาตามลำดับ.....	36
4.1 แสดงผลการทดลองระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของระยะขจัด (Normalized Magnitude) และอัตราส่วนความถี่ของเครื่องจักรหมุนและตัวดูดซับการสั่นสะเทือน (Frequency Ratio) ที่ความถี่ 14 รอบต่อวินาที.....	43
4.2 แสดงขนาดของการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่าง ๆ ในขณะที่ไม่มีตัวดูดซับการสั่นสะเทือน.....	46
4.3 แสดงขนาดของการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 10 - 30 รอบต่อวินาที ในขณะที่มีตัวดูดซับการสั่นสะเทือน.....	47



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ผลกระทบของอาคารจากการสั่นสะเทือนทั้งทางตรง (ภาพถ่าย) และทางอ้อมพื้นดินทรุด (ภาพขวา).....	2
2.1 แผนภาพวัตถุอิสระของมวลไม่สมดุล (ก) และระบบหลัก (ข).....	4
2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติของระยะขจัดและอัตราส่วนระหว่างความถี่เครื่องจักรหมุนและความถี่ธรรมชาติ.....	6
2.3 แสดงตัวดูดซับการสั่นสะเทือนด้วยระบบมวล-สปริง.....	6
2.4 แสดงการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบหลักที่ติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน.....	10
2.5 5 (ก) คานโค้ง (พื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ) โค้งเป็นรูปทรง 1 ใน 4 ของวงรี (ข) นิยามรูปทรงเรขาคณิตของคาน (ค) โมเมนต์ผสม : Mb โมเมนต์ดัด และ Mt โมเมนต์บิด ซึ่งผลของแรงเฉือนที่มีต่อการเสียรูปของคานนั้นน้อยมาก (แรงเฉือนจึงไม่ถูกแสดงในรูป).....	11
2.6 แสดงถึงระบบควบคุมแบบเปิดสัญญาณเอาต์พุตจะไม่มีป้อนกลับมาสู่ระบบ.....	16
2.7 แสดงถึงระบบควบคุมแบบปิดสัญญาณเอาต์พุตจะถูกวัดโดยอุปกรณ์วัดและป้อนสัญญาณกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต.....	17
3.1 โครงสร้างสำหรับการติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน.....	20
3.2 มอเตอร์กระแสตรงขนาด 350 วัตต์ 24 โวลต์.....	20
3.3 สปริงรับแรงกด.....	21
3.4 จานหมุนและมวลไม่สมดุล.....	21
3.5 ผังแสดงภาพรวมของการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้.....	23
3.6 โครงสร้างตัวดูดซับการสั่นสะเทือน.....	24
3.7 คานโค้ง.....	24
3.8 มวลดูดซับการสั่นสะเทือน.....	25
3.9 ชุดควบคุม.....	26
3.10 แสดงแบบจำลองการทำงานของคานโค้ง จุดยึดคาน และแขนยึดคาน.....	26
3.11 แสดงการทำงานของคานโค้งที่ยื่นจากจุดยึดคาน.....	27
3.12 แสดงแผนภาพอิสระของคานโค้งอิสระ (ส่วนที่ยื่นออกไปจากจุดยึดคาน) โดยแรงกระทำเกิดจากมวลถ่วง.....	28
3.13 แสดงแผนภาพอิสระของคานโค้งที่มีแรงกระทำ คือ น้ำหนักของคานเพียงเท่านั้น.....	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 แสดงการวิเคราะห์หาแรงจุดเทียบเท่าของคานโค้ง.....	30
3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมหมุนของคานโค้ง.....	36
3.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมและความถี่ของคานโค้ง.....	37
3.17 เครื่องตรวจวัดความเร่ง.....	38
3.18 ระบบเก็บรวบรวมข้อมูล DEWE43A (ซ้าย) และ DEWESoftX (ขวา).....	38
3.19 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องตรวจวัดความเร่ง.....	39
3.20 การต่อสายระหว่างอุปกรณ์.....	39
3.21 การตั้งค่าสัญญาณความเร่งในโปรแกรม DEWESoftX.....	40
3.22 การแปลงข้อมูลความเร่งเป็นขนาดการสั่นสะเทือน.....	40
3.23 แสดงการแปลงฟูเรียร์จาก DEWESoft.....	41
4.1 ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนที่มีคานโค้งและมวลถ่วง.....	42
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติของระยะขจัดและอัตราส่วนระหว่างความถี่ เครื่องจักรหมุนและความถี่ธรรมชาติ.....	44
4.3 แสดงผลการลดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ในช่วง 10-30 รอบต่อวินาที โดยมีเส้นแนวโน้มพหุนามกำลัง 3.....	48
4.4 แสดงประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ในช่วง 10-30 รอบต่อวินาที.....	49
5.1 ตัวอย่างระบบหลักที่ป้อนการสั่นสะเทือนเป็นเชิงเส้น.....	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสั่นสะเทือนเป็นปรากฏการณ์ที่พบได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน เราสามารถพบเห็นได้อยู่ตลอดเวลาที่เกิดขึ้นในสถานการณ์ต่างๆ ซึ่งมักไม่เป็นที่พอใจสำหรับหลายๆคน ตัวอย่างเช่น การสั่นสะเทือนจากเครื่องซักผ้าที่ไม่สมดุล รถบรรทุกหรือรถไฟที่ผ่านพื้นที่ใกล้เคียง เครื่องจักรที่ติดตั้งในอาคารเกิดสั่นและเกิดเสียงดัง ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องจักร เช่น การสึกหรอ แตกกร้าว การสั่นสะเทือนรบกวนในอาคารหรือที่พักส่งผลต่อปัญหาสุขภาพ ปัญหาเหล่านี้มีราคาแพงในการแก้ไขหรือซ่อมแซม การติดตั้งตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือนเพื่อลดแรงสั่นสะเทือนของระบบหลักเป็นวิธีการทั่วไป อย่างไรก็ตามตัวดูดซับการสั่นสะเทือนที่มีอยู่ในตลาดมักจะมีข้อจำกัดในการใช้งานในช่วงความถี่เฉพาะ เราจึงต้องมองหาวิธีการที่เหมาะสมที่สุดเพื่อกำหนดข้อจำกัดนี้ โดยการแปลงตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือนธรรมดาให้เป็นตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือนที่ใช้งานและปรับความถี่ให้เหมาะสมได้

ปัจจุบันมีวิธีการแก้ปัญหาคารสั่นสะเทือนหรือการใช้การสั่นสะเทือนมากมาย ดังต่อไปนี้

1. การเปลี่ยนแปลงความถี่

โดยเพิ่มความแข็งของโครงสร้างโดยการเสริมเหล็ก คาน หรือฐานราก วิธีนี้เหมาะกับการแก้ปัญหาคารสั่นสะเทือนที่มีความถี่ต่ำ แต่มีข้อเสียคืออาจเพิ่มน้ำหนักและต้นทุนของโครงสร้างลดมวลของโครงสร้างโดยการถอดชิ้นส่วนที่ไม่จำเป็น วิธีนี้เหมาะกับการแก้ปัญหาคารสั่นสะเทือนที่มีความถี่สูง แต่มีข้อเสียคืออาจส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้าง

เปลี่ยนแปลงความถี่การทำงานของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่เป็นสาเหตุของการสั่นสะเทือน วิธีนี้เหมาะกับกรณีที่เราสาเหตุของการสั่นสะเทือนแน่ชัด แต่มีข้อเสียคืออาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานอาจทำให้การใช้งานของเครื่องจักรได้ไม่เต็มที่

2. การลดแรงสั่นสะเทือน

ติดตั้งตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือนจะช่วยดูดซับพลังงานการสั่นสะเทือน เหมาะกับการแก้ปัญหาคารสั่นสะเทือนที่มีความถี่แคบ

ติดตั้งตัวแยกแรงสั่นสะเทือนจะช่วยป้องกันไม่ให้ความสั่นสะเทือนจากเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ส่งผ่านไปยังโครงสร้าง

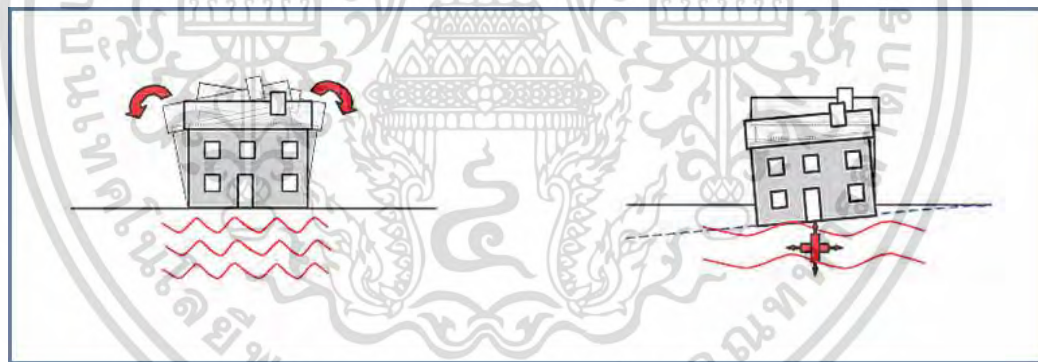
ใช้แผ่นยางหรือวัสดุกันกระแทกจะช่วยลดแรงสั่นสะเทือนที่ส่งผ่านมายังโครงสร้าง

3. การควบคุมการสั่นสะเทือน

ใช้ระบบควบคุมการสั่นสะเทือนแบบ Active จะใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับการสั่นสะเทือนและส่งสัญญาณไปยังตัวกระตุ้นเพื่อสร้างแรงสั่นสะเทือนที่ตรงข้ามกับแรงสั่นสะเทือนที่มีอยู่ เหมาะกับการแก้ปัญหาคารสั่นสะเทือนที่มีความถี่หลากหลาย แต่มีข้อเสียคือมีราคาแพงและซับซ้อน

ใช้ระบบควบคุมการสั่นสะเทือนแบบ Passive จะใช้ตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือนแบบปรับแต่งหรือตัวแยกแรงสั่นสะเทือนแบบปรับแต่ง เหมาะกับการแก้ปัญหาคารสั่นสะเทือนที่มีความถี่แคบ

อย่างไรก็ตาม การติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับแรงสั่นสะเทือนเพิ่มเติมเพื่อลดแรงสั่นสะเทือนเป็นวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาคารสั่นสะเทือนที่นิยมเนื่องจากมีประสิทธิภาพและต้นทุนไม่ได้สูงมากเท่าวิธีอื่น จึงทำให้อุปกรณ์ลดแรงสั่นสะเทือนชนิดนี้ (Vibration absorbers) เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน แต่ปัญหาหลักของอุปกรณ์ประเภทนี้ก็คือเมื่อใช้งานกับแรงที่ไม่สมดุลและมีความแปรผันหลายแบบ ประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนจะลดลงเนื่องจากพารามิเตอร์ไม่เหมาะสมสำหรับการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องแก้ปัญหาคารโดยการปรับพารามิเตอร์ของตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือนให้เหมาะสมกับการสั่นสะเทือนของระบบเมื่อเวลาผ่านไปเพื่อรักษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับไว้การสั่นสะเทือนไว้ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนให้ใช้งานในช่วงความถี่ให้กว้างขึ้น



รูปที่ 1.1 ผลกระทบของอาคารจากการสั่นสะเทือนทั้งทางตรง (ภาพถ่าย) และทางอ้อมพื้นดินทรุด (ภาพขวา)

(ที่มา: <https://www.jsheld.com/insights/articles/the-impact-of-construction-vibration-on-adjacent-structures>)

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือนแบบอัตโนมัติ ที่สามารถปรับค่าให้เหมาะสมกับแรงสั่นสะเทือนที่หลากหลาย โดยใช้คานโค้งเป็นตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อลดการสั่นสะเทือนจากแรงที่ไม่สมดุลด้วยตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือนแบบอัตโนมัติ ในช่วงความถี่ของการสั่นสะเทือนที่ต่างกันออกไป
2. เพื่อออกแบบและสร้างตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือนแบบอัตโนมัติ ที่ใช้คุณสมบัติของคานโค้งเป็นตัวดูดซับ
3. เพื่อศึกษาความสามารถของคานโค้งที่ถูกใช้เป็นตัวเก็บและปลดปล่อยพลังงานศักย์อัตโนมัติ ในช่วงความถี่ของการสั่นสะเทือนที่ต่างกันออกไป

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. ตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้ มีประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนจากแรงที่ไม่สมดุล
2. คานโค้งมีประสิทธิภาพในการเก็บและปลดปล่อยพลังงานศักย์มากกว่าระบบคานทั่วไป
3. การออกแบบระบบควบคุมร่วมกับตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือน จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1. เครื่องให้กำเนิดการสั่นสะเทือนถูกจำกัดการเคลื่อนที่ให้เคลื่อนที่ได้หนึ่งมิติ
2. คานโค้งถูกใช้แทนสปริงในการทำหน้าที่เป็นตัวเก็บและปลดปล่อยพลังงานศักย์
3. มวลของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนมีค่าไม่เกินร้อยละ 25 ของมวลเครื่องจักรหมุน
4. ความถี่ของการสั่นสะเทือนอยู่ในช่วงตั้งแต่ 10 ถึง 30 รอบต่อวินาที
5. ระบบควบคุมอัตโนมัติใช้ระบบควบคุมพีไอดีปรับค่าความแข็งสปริง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถลดการสั่นสะเทือนได้โดยอัตโนมัติแม้ช่วงความถี่ของการสั่นสะเทือนมีการเปลี่ยนแปลงไปจากแรงที่ไม่สมดุลที่เกิดขึ้น
2. เพิ่มขีดความสามารถในการแก้ปัญหาการสั่นสะเทือนที่ใช้ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนจากเดิมที่สามารถทำได้เพียงแค่ช่วงที่จำกัด
3. สามารถประยุกต์ใช้ระบบควบคุมกับอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนสำหรับแก้ปัญหาการสั่นสะเทือนของระบบในหนึ่งมิติ
4. สามารถนำไปใช้จริงได้โดยจะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมและบำรุงรักษาเครื่องจักร

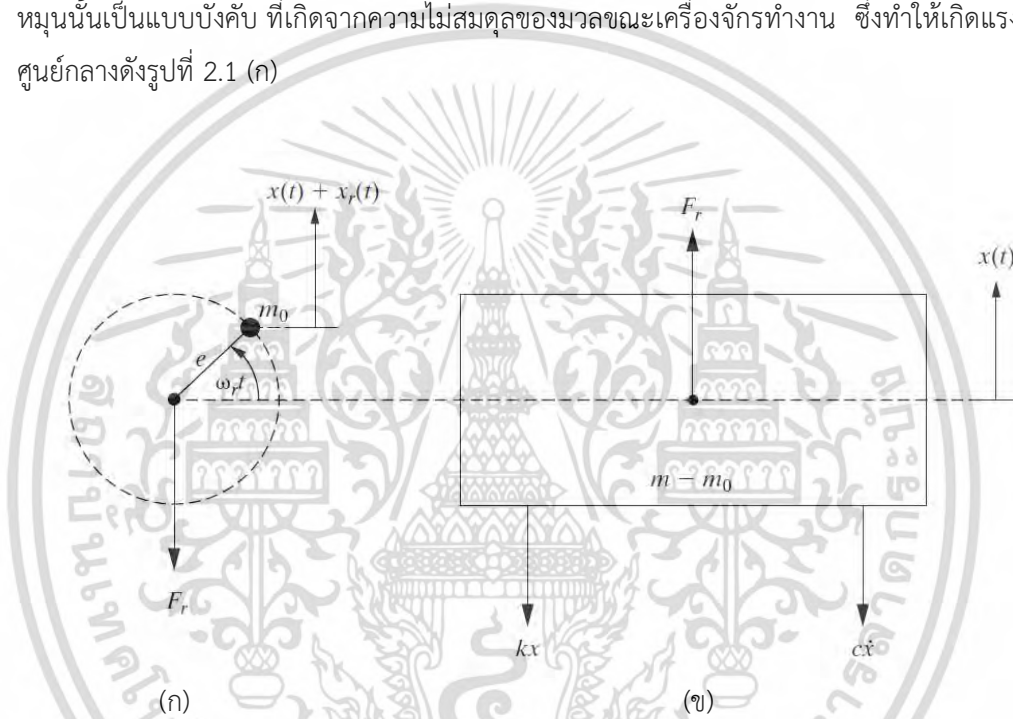
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีระบบการสั่นสะเทือนในเครื่องจักร

การสั่นสะเทือนส่วนมากถูกแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การสั่นสะเทือนโดยอิสระ (Free Vibration) และการสั่นสะเทือนแบบบังคับ (Force vibration) สำหรับการสั่นสะเทือนในเครื่องจักรหมุนนั้นเป็นแบบบังคับ 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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m_0 e \omega_r^2 \sin\omega_r t \quad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.4) ทำให้ทราบได้ว่า พจน์ $m_0 e \omega_r^2 \sin\omega_r t$ แสดงถึงแรงภายนอกที่กระทำต่อระบบ หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า $F_r = m_0 e \omega_r^2 \sin\omega_r t$ หากพิจารณาถึงการตอบสนองของระบบที่สภาวะคงตัว ผลจากแรงภายนอกจะเป็นตัวกำหนดลักษณะของผลลัพธ์ดังนี้

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

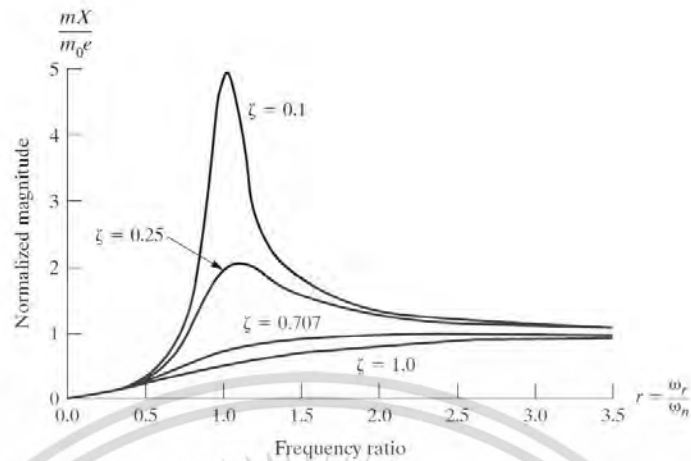
โดยกำหนดให้ $r = \omega_r / \omega_n$ ทำให้ได้ระยะขจัดสูงสุดเท่ากับสมการที่ (2.6)

$$X = \frac{m_0 e}{m} \frac{r^2}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.6)$$

และมุมเฟสเท่ากับสมการที่ (2.7)

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

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2.6) จะเห็นว่าที่อัตราส่วนความถี่ธรรมชาติและความถี่เครื่องจักรหมุนที่มีค่าใกล้เคียงกัน หรือ r เข้าใกล้ 1 ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนมากดังรูปที่ 2.2

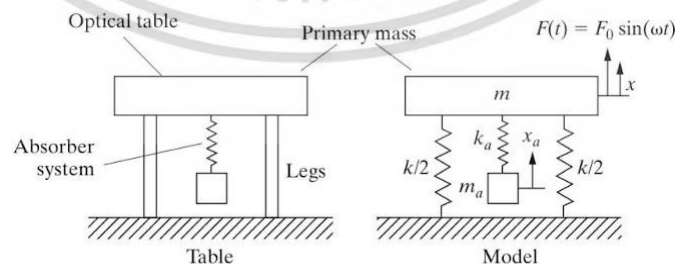


รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของระบบขจัดและอัตราส่วนระหว่างความถี่เครื่องจักรหมุนและความถี่ธรรมชาติ (ที่มา: Daniel J. Inman, 2014)

2.2 ทฤษฎีการดูดซับการสั่นสะเทือน

วิธีการลดการสั่นสะเทือนทำได้โดยการหยุดหรือตัดแปลงแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือน แต่การหยุดการสั่นสะเทือนจากแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนเป็นไปได้ยาก หรืออาจเป็นไปได้เลย เนื่องจากชิ้นส่วนของเครื่องจักรมีการเคลื่อนที่ และเกิดความเร่งขึ้นจากการเปลี่ยนทิศทางเคลื่อนที่ 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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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) ลงในสมการที่ (2.8) จะได้

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

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X \\ X_a \end{bmatrix} &= \frac{1}{(k + k_a - m\omega^2)(k_a - m_a\omega^2) - k_a^2} \begin{bmatrix} k_a - m_a\omega^2 & k_a \\ k_a & k + k_a - m\omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{(k + k_a - m\omega^2)(k_a - m_a\omega^2) - k_a^2} \begin{bmatrix} (k_a - m_a\omega^2)F_0 \\ k_a F_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.12)$$

ใช้วิธีการหาคำตอบทางเมทริกซ์จะได้ผลเฉลยของขนาดการเคลื่อนที่ของมวลระบบ 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

การจะทำให้ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนสามารถดูดซับการสั่นสะเทือนได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยอย่างอย่าง 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

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

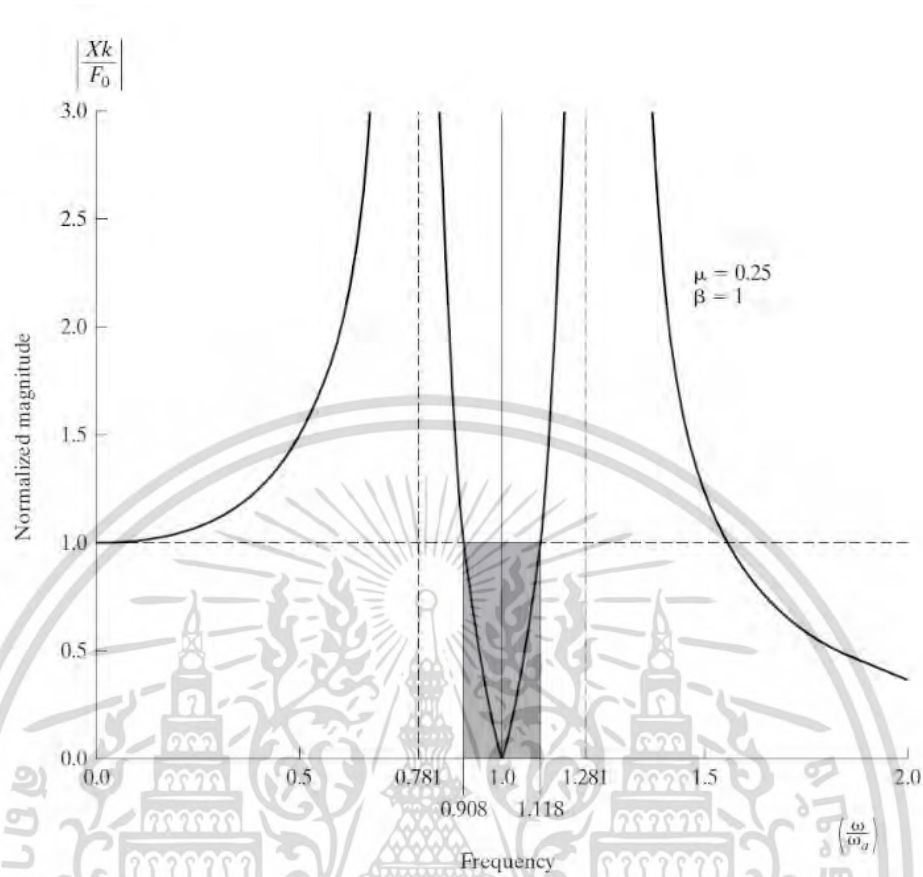
$$\omega_a = \sqrt{\frac{k_a}{m_a}} \quad (2.21)$$

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 $\mu = 25$ และ $\beta = 1$ จะพบว่าช่วงที่แสดงส่วนการแรงแงเป็นช่วงที่ขนาดการสั่นสะเทือนน้อยกว่าระยะยุบตัวสถิตของระบบที่เกิดจากแรง F_0 ซึ่งเป็นช่วงการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน ($0.908\omega_a < \omega < 1.118\omega_a$) และในการเลือกค่ามวลของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน m_a กับค่านิสสปริงของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน k_a นั้นจะต้องเลือกให้อยู่ในช่วงการแรงแงนี้ และระวังไม่ให้ค่า r มีค่าตรงกับหรือใกล้กับ 0.781 หรือ 1.28 ซึ่งจะทำให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonance)

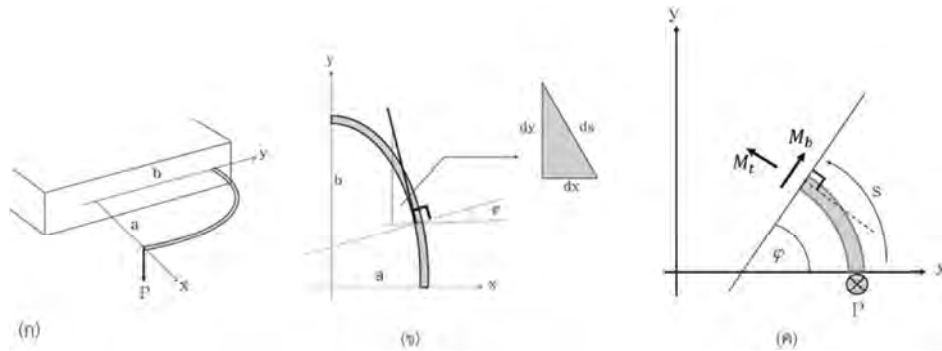


รูปที่ 2.4 แสดงการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบหลักที่ติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน
(ที่มา: Daniel J. Inman, 2014)

2.3 การคำนวณการโก่งตัวของคานโค้ง

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ ทฤษฎีของ Castigliano (Castigliano's second theorem) จะถูกใช้ร่วมกับ ขั้นตอนวิธีเชิงตัวเลข (numerical integration algorithm) เพื่อแก้ปัญหาที่ไม่สามารถแก้โดยใช้วิธีเชิงวิเคราะห์ (analytical methods) หรือระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) ได้โดยง่าย

โดยให้รูปทรงของคานโค้งที่ได้ทำการวิเคราะห์มีรูปทรงเป็น 1 ใน 4 ของวงรี ระยะครึ่งแกนของวงรีถูกกำหนดเป็น a และ b โดยปลายข้างหนึ่งของคานโค้งถูกยึดไว้และปลายอีกข้างถูกปล่อยอิสระที่มีภาระแรง P กระทำตั้งฉากกับระนาบคาน (ระนาบ XY)



รูปที่ 2.5 (ก) คานโค้ง (พื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ) โค้งเป็นรูปทรง 1 ใน 4 ของวงรี

(ข) นิยามรูปทรงเรขาคณิตของคาน

(ค) โมเมนต์ผสม : M_b โมเมนต์ดัด และ M_t โมเมนต์บิด ซึ่งผลของแรงเฉือนที่มีต่อการเสียรูปของคานนั้นน้อยมาก (แรงเฉือนจึงไม่ถูกแสดงในรูป)

(ที่มา: TORE DAHLBERG, 2004)

การวิเคราะห์สามารถแบ่งตามกรณีได้ดังนี้

กรณีที่ 1 เมื่อระยะครึ่งแกนใดแกนหนึ่งของวงรี (a หรือ b) มีแนวโน้มเป็นศูนย์แล้ว คานโค้งจะมีแนวโน้มเป็นคานตรง ($a = b$)

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI} \quad (2.24)$$

เมื่อ L คือความยาวของคาน และ EI คือค่าโมเมนต์ดัดของคานตรง

กรณีที่ 2 เมื่อระยะครึ่งแกนของวงรีทั้งสอง (a และ b) เท่ากัน ($a = b = R$) รูปทรงของคานโค้งจะเป็น 1 ใน 4 ของวงกลม โดยการคำนวณการโก่งตัวของคานที่ปลายอิสระในกรณีนี้จะสามารถพบเจอได้ในตัวอย่างของหนังสือ Roark's formulas for stress and strain ซึ่งมีสมการเป็น

$$\delta = \frac{\pi PR^3}{4EI} + \left(\frac{3\pi}{4} - 2\right) \frac{PR^3}{GK_t} \quad (2.25)$$

โดยค่า R จะต้องมีค่ามากกว่าเส้นทแยงมุมของพื้นที่หน้าตัดคานมากๆหรือกล่าวได้ว่า $R \gg I^{1/4}$

เมื่อ R คือรัศมีความโค้งของคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I คือค่าโมเมนต์ที่สองของพื้นที่หน้าตัดคาน

EI คือค่านิจการดัดของคานตรง

GK_t คือค่าความแข็งแรงการบิดของคาน

กรณีที่ 3 เมื่อระยะครึ่งแกนของวงรีทั้งสอง (a และ b) ไม่เท่ากัน ทำให้รูปทรงคานอยู่ในรูป 1 ใน 4 ของวงรี และการโก่งตัวของคานโค้งที่ปลาย (จุดที่แรง P กระทำ) ในกรณีนี้จะถูกหา โดยกำหนดให้แรง P กระทำตั้งฉากกับระนาบคาน (ระนาบ xy) และให้แกน $b = \beta a$ เมื่อ β สามารถมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า 1

ขั้นแรก สมการของวงรีถูกแสดงไว้ดังนี้

$$\frac{x^2}{a^2} = \frac{y^2}{b^2} \quad (2.26)$$

กำหนดให้คานที่ศึกษาตั้งอยู่ในจุดภาคที่ 1 ของระบบแกน (coordinate system) ดังนั้น $0 \leq x \leq a$ และ $0 \leq y \leq b$ เมื่อ a และ b คือระยะครึ่งแกนของวงรีในแกน x และ y ตามลำดับ จากนั้น จัดรูปสมการ (2.26) สำหรับ y จะได้

$$y = b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} = \beta a \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad (2.27)$$

เมื่อ $b = \beta a$

ทำการหาอนุพันธ์สมการที่ (2.27) เทียบกับ x จะได้

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{\beta x}{a}}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} \quad (2.28ก)$$

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{b^2 x}{a^2 y} \quad (2.28ข)$$

สังเกตว่า ความชันของคาน (dy/dx) จะมีความชันเป็นลบเสมอตามที่แสดงในสมการ (2.28)

(กำหนดให้ dx มีค่าเป็นลบแทน dy) และความยาว ds ของชิ้นส่วนคานจะเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$ds = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} = -dx \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad (2.29)$$

สังเกตว่ามีเครื่องหมายข้างหน้ารากที่สองมีค่าเป็นลบเนื่องจาก dx มีค่าเป็นลบขณะที่ความยาว ds เป็นบวก จากนั้น $\cos \varphi$ และ $\sin \varphi$ จะสามารถหาได้ ดังนี้

$$\sin \varphi = \frac{dx}{ds} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} \quad (2.30ก)$$

และ

$$\cos \varphi = -\frac{dy}{ds} = -\frac{\frac{dy}{dx}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} \quad (2.30ข)$$

โดยค่ามุม φ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ $\frac{\pi}{2}$ ทำให้ค่าของ $\cos \varphi$ และ $\sin \varphi$ เป็นบวกเสมอต่อไปเราจะทำการศึกษาหน้าตัดคานที่วางตัวทำมุม φ กับแกน X โดยหน้าตัดคานที่มุมนี้ โมเมนต์ดัด M_b และโมเมนต์บิด M_t จะกระทำบนคานดังรูปที่ (2.5ก) และแรงเฉือนจะถูกกระทำไว้เนื่องจากผลของแรงเฉือนที่มีต่อการเสีรูปของคานนั้นค่อนข้างน้อย ทำให้เราได้สมการสมดุลของการหมุนตามแกน x และ y ดังนี้

$$M_b \cos \varphi - M_t \sin \varphi + Py = 0 \quad (2.31ก)$$

$$M_b \sin \varphi + M_t \cos \varphi + P(a - x) = 0 \quad (2.31ข)$$

จากนั้นแก้สมการสำหรับ M_b และ M_t จะได้

$$M_b = -Pycos\varphi - P(a - x)\sin\varphi \quad (2.32ก)$$

$$M_t = +Pysin\varphi - P(a - x)\cos\varphi \quad (2.32ข)$$

และพลังงานที่ถูกกักเก็บไว้ในคานเนื่องจากความเครียดที่เกิดขึ้นจากการเสีรูปของคานในช่วงยืดหยุ่นสามารถถูกกำหนดไว้ได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U = \frac{1}{2EI} \int_0^L M_b^2 ds + \frac{1}{2GK_t} \int_0^L M_t^2 ds \quad (2.33)$$

โดยที่ L คือ ความยาวของคาน ซึ่งจะไม่ถูกนำมาคำนวณในการหาปริพันธ์จำกัดเขต เพราะเราจะทำการหาปริพันธ์จำกัดเขตโดยขอบเขตขึ้นกับตัวแปร x

และในส่วนผลของแรงเฉือนต่อพลังงานความเครียดสะสม U ได้ถูกละเว้นไว้ จากนั้นทฤษฎีของแคสติกลีอาโน (ทฤษฎีข้อที่สอง) ถูกนำมาใช้เพื่อหาการโก่งตัวของคาน δ ที่ซึ่งถูกภาระ P กระทำ ได้สมการเป็น

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{1}{2EI} \int_0^L 2M_b \frac{\partial M_b}{\partial P} ds + \frac{1}{2GK_t} \int_0^L 2M_t \frac{\partial M_t}{\partial P} ds \quad (2.34)$$

แทน $M_b, \frac{\partial M_b}{\partial P}, M_t$ และ $\frac{\partial M_t}{\partial P}$ จากสมการ (2.32) ลงในสมการที่ (2.34) จะได้

$$\delta = \frac{P}{EI} \int_0^L (-y \cos \varphi - (a-x) \sin \varphi)^2 ds + \frac{P}{GK_t} \int_0^L (y \sin \varphi - (a-x) \cos \varphi)^2 ds \quad (2.35)$$

จากนั้นแทนค่า $\cos \varphi, \sin \varphi, y, dy$ และ ds ที่ได้แสดงไว้ตั้งแต่สมการที่ (2.27) ถึง (2.30) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปร X ลงในสมการที่ (2.35) ทำให้ปริพันธ์จำกัดเขตตลอดความยาว ds จาก 0 ถึง L กลายเป็นปริพันธ์จำกัดเขตตลอดความยาว dx จาก a ถึง 0 (เนื่องจากกำหนดให้ dx มีค่าเป็นลบ) จากนั้นเปลี่ยนเครื่องหมายของปริพันธ์จำกัดเขต เพื่อเปลี่ยนขอบเขตของปริพันธ์จำกัดเขตเป็นจาก 0 ถึง a แทน

จากความสัมพันธ์ $b = \beta a$ ที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น ทำการย้าย a^3 ออกจากปริพันธ์จำกัดเขต ทำให้ได้ตัวแปรไร้มิติสำหรับการหาปริพันธ์จำกัดเขตตลอดความยาวและขอบเขตใหม่ คือ ตลอดความยาว $d(\frac{x}{a})$ และขอบเขตของปริพันธ์จาก 0 ถึง 1 ซึ่งจะได้สมการการโก่งตัวของคานโค้งเป็นดังนี้

$$\delta = \frac{Pa^3}{EI} I_1(\beta) + \frac{Pa^3}{GK_t} I_2(\beta) \quad (2.36)$$

โดยที่ปริพันธ์จำกัดเขต I_1 และ I_2 เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับค่า β ($\beta = b/a$) เพียงอย่างเดียว ดังนี้

$$I_1(\beta) = \int_0^1 \left(\frac{\beta \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \frac{dy}{dx} - \frac{(1-x)}{a}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} \right)^2 \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} d\left(\frac{x}{a}\right) \quad (2.36\text{ข})$$

และ

$$I_2(\beta) = \int_0^1 \left(\frac{\beta \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} + \frac{(1-x) \frac{dy}{dx}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} \right)^2 \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} d\left(\frac{x}{a}\right) \quad (2.36\text{ค})$$

เทอม I_1 และเทอม I_2 ของสมการที่ (2.36) แสดงถึงผลของการตัดและการบิดต่อระยะโค้งของคานโค้งตามลำดับ

สำหรับคานโค้งที่มีหน้าตัด จะใช้อัตราส่วนพัวซองเป็น 0.3 จะได้

$$GK_t = -\frac{E}{2(1+\nu)} 2I = \frac{1}{1.3} EI \quad (2.37)$$

แทนสมการที่ (2.37) ในสมการที่ (2.36ก) จะได้

$$\delta = \frac{Pa^3}{EI} (I_1(\beta) + 1.3I_2(\beta)) = k(\beta) \frac{Pa^3}{EI} \quad (2.38)$$

$$\text{เมื่อ } k(\beta) = I_1(\beta) + 1.3I_2(\beta)$$

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

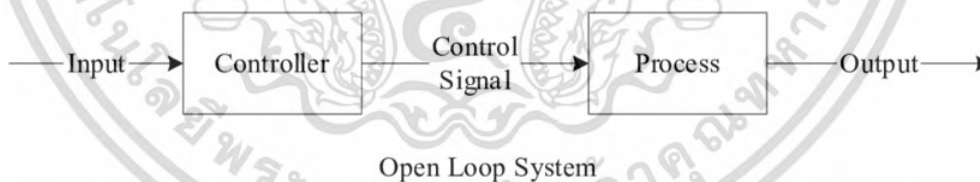
ระบบเวลาต่อเนื่อง ถ้าระบบเกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา และสัญญาณเอาต์พุตและอินพุตไม่มีการเปลี่ยนแปลง คือ ระบบเวลาดีสครีต

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

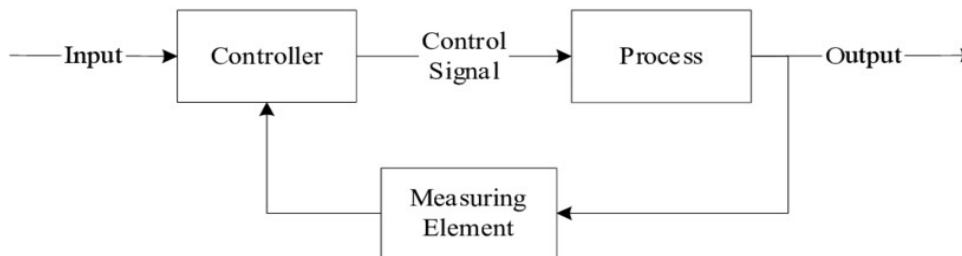
ระบบควบคุมสามารถแบ่งได้ 2 แบบตามการส่งสัญญาณย้อนกลับ (Feedback) ดังนี้

1. ระบบควบคุมแบบเปิด (Open Loop Control System) คือ ระบบที่มีการป้อนอินพุตเข้าไปให้กับระบบ (System) และได้สัญญาณเอาต์พุตออกมาแต่ไม่มีการนำสัญญาณป้อนกลับมาสู่ระบบซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงถึงระบบควบคุมแบบเปิดสัญญาณเอาต์พุตจะไม่มีป้อนกลับมาสู่ระบบ

2. ระบบควบคุมแบบปิด (Close loop Control System) คือ ระบบที่มีการป้อนอินพุตเข้าไปให้กับระบบ (System) และได้สัญญาณเอาต์พุตออกมา แต่มีอุปกรณ์เครื่องมือวัด (Measurement) ในการนำสัญญาณเอาต์พุตกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตเพื่อปรับปรุงแก้ไขให้มีความผิดพลาดลดลงอยู่ตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.7



Closed Loop System

รูปที่ 2.7 แสดงถึงระบบควบคุมแบบป้อนสัญญาณเอาต์พุตจะถูกวัดโดยอุปกรณ์วัด และป้อนสัญญาณกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต

2.5 งานวิจัยและปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

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) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางวัสดุโดยกล่าวถึงความยืดหยุ่นและแรงในสปริง (ที่มา: Singiresu S. Rao, 2018)

โทมัส ยัง (Thomas Young) (ค.ศ. 1807) ได้ศึกษาสภาพยืดหยุ่นของวัสดุ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด 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) ได้ถูกนำมาใช้ในปริปัญานีพจน์นี้

เมื่อการศึกษาการสั่นสะเทือนได้รับความสนใจมากขึ้น องค์ความรู้ ความเข้าใจต่าง ๆ ในการสั่นสะเทือนทำให้เกิดความพยายามในการแก้ปัญหาที่เกิดจากการสั่นสะเทือนโดยได้มีการคิดค้นการแก้ปัญหาด้วยวิธีการต่าง ๆ มากมายแต่วิธีหนึ่งที่ใช้ได้อย่างแพร่หลาย และถูกนำมาศึกษาในปริญญาโทนี่คือการลดการสั่นสะเทือนด้วยตัวดูดซับการสั่นสะเทือน (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) ได้มีการแก้ปัญหาลมการสั่นสะเทือนของอาคารด้วยการใช้ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนติดตั้งกับแบบจำลองอาคาร 4 ชั้น (ที่มา: Franchek M.A., Ryan M.W. และ Bernhard R.J., 1996)

มีด (Mead) (ค.ศ. 1999) ได้เผยแพร่หนังสือ Passive Vibration control ในหนังสือได้นำเสนอเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับการตอบสนองฮาร์โมนิกของคานสามเหลี่ยมที่ความถี่สูง แม้ว่าหลักการและสมการจะมาจากวิเคราะห์คานเมื่อเกิดการสั่นที่ความถี่สูงบนหลังการการดัดของคลื่น (Flexural Wave) แต่ในความคิดเห็นเพิ่มเติมของ Mead บอกว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับ ความถี่ปานกลาง และต่ำได้เช่นกัน (ที่มา: Passive Vibration Control by David J. Mead, 1999)

ดาห์ลเบิร์ก (Dahlberg) (2004) นำเสนอเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีการคำนวณระยะขจัดของคานโค้งเมื่อมีแรงมากระทำ โดยแบ่งเป็นสองกรณี กรณีแรกคานวงรียึดไว้หนึ่งด้านอีกด้านปล่อยอิสระ กรณีที่สองคานวงรียึดสองด้าน โดยใช้ทฤษฎีข้อที่สองของ Castigliano (Castigliano's second theorem) ร่วมกับคุณสมบัติความยืดหยุ่นในวัสดุ ในการวิเคราะห์สมการระยะขจัดที่เกิดบนคานโค้ง (ที่มา: Deflections of Beams with Variable Curvature by T. Dahlberg, 2004)

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

บทที่ 3

แผนการดำเนินงานและอุปกรณ์

บทนี้กล่าวถึงแผนการดำเนินงานและรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลในปริภูมิพันธะฉบับนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีการสั่นสะเทือนในเครื่องจักรและวิธีการดูดซับการสั่นสะเทือน
2. ศึกษาการโก่งตัวของคานโค้ง
3. ศึกษาระบบควบคุมและการวัด
4. ศึกษาวิธีการและคำสั่งการทำงานสำหรับเขียนโปรแกรมควบคุม
5. ออกแบบโครงสร้างสำหรับเครื่องจักรหมุนจำลองการสั่นสะเทือน ตรวจสอบการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงสำหรับการหมุน
6. ออกแบบวิธีการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้
7. ออกแบบโมเดลของระบบและจำลองพฤติกรรมในโปรแกรม ADAMS Simulation เพื่อประเมินผลลัพธ์ที่คาดหวัง
8. วางแผนการจัดซื้ออุปกรณ์สำหรับสร้างเครื่องจักรหมุนจำลองการสั่นสะเทือนและตัวดูดซับการสั่นสะเทือน
9. ตรวจสอบการทำงานของระบบหลักให้เป็นไปตามที่กำหนด
10. ทดสอบคานโค้งสำหรับการใช้แทนสปริง หาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างคานโค้งสปริงและมุมหมุน
11. เขียนคำสั่งควบคุมการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้ด้วยโปรแกรม Arduino
12. ทดสอบความสามารถในการดูดซับการสั่นสะเทือนของตัวดูดซับแบบปรับค่าได้
13. วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไข
14. สรุปผลการดำเนินงานและจัดทำรูปเล่มรายงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องจักรหมุนจำลองการสันสะเทือน

3.2.1 ส่วนประกอบและการทำงานของระบบหลัก

1. โครงสร้างสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์และแบบจำลอง

อุปกรณ์สำหรับการรองรับน้ำหนักของเครื่องจักร ประกอบไปด้วย แผ่นอลูมิเนียมขนาด 30x30 เซนติเมตร สำหรับการติดตั้งระบบการหมุนติดตั้งบนสปริงและมีการติดตั้งลูกปืนสไลด์ เพื่อที่จะควบคุมการเคลื่อนที่ได้เฉพาะแนวตั้ง และแผ่นอลูมิเนียมขนาด 30x30 เซนติเมตร สำหรับการติดตั้งตัวดูดซับการสันสะเทือน



รูปที่ 3.1 โครงสร้างสำหรับการติดตั้งตัวดูดซับการสันสะเทือน

2. ระบบการหมุน

เป็นอุปกรณ์สำหรับสร้างการหมุนในระบบหลัก ประกอบด้วย มอเตอร์กระแสตรง 350 วัตต์ 24 โวลต์ ระบบกระแสไฟฟ้าจากตัวต้านทานปรับค่าได้ทำให้สามารถปรับความเร็วรอบได้ตั้งแต่ 10 จนถึง 30 รอบต่อวินาที ต่อเข้ากับสายพานเพื่อที่จะส่งกำลังไปยังเพลลาสำหรับการหมุน



รูปที่ 3.2 มอเตอร์กระแสตรงขนาด 350 วัตต์ 24 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สปริง

อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและเป็นปัจจัยที่กำหนดความถี่ธรรมชาติของระบบหลัก ประกอบด้วยสปริงรับแรงกด 4 ชั้น มีค่าความแข็งที่ 12.784 นิวตันต่อมิลลิเมตร ติดตั้งที่ฐานเพื่อรองรับโครงสร้างหลัก



รูปที่ 3.3 สปริงรับแรงกด

4. จานหมุนและมวลไม่สมดุล

เป็นอุปกรณ์สำหรับสร้างแรงไม่สมดุลประกอบด้วย จานไม่สมดุล แผ่นเหล็กทรงกลม หนา 0.6 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 เซนติเมตร เจาะรูศูนย์กลางวงกลมสำหรับติดตั้งเพลลา และที่ระยะห่าง 3.75 เซนติเมตร สำหรับการติดตั้งมวลไม่สมดุล ประกอบด้วย แผ่นเหล็กกลม หนา 0.35 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 เซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น โดยมีน้ำหนักรวมเท่ากับ 0.10 กิโลกรัม



รูปที่ 3.4 จานหมุนและมวลไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ความถี่ธรรมชาติของระบบหลัก

ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบจะช่วยในการออกแบบระบบหลักและความเร็วรอบในการหมุนของมอเตอร์เพื่อไม่ให้เกิดการสั่นสะเทือนที่มากจนเกินไป โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.1)

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

เมื่อแทนค่ามวลทั้งหมดที่สปริงต้องรับภาระ เท่ากับ 10.94 กิโลกรัม และค่านิจสปริงรวมทั้ง 4 ชั้นที่ต่อแบบขนาน เท่ากับ 51.137 นิวตันต่อมิลลิเมตร ทำให้ได้ค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ

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

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

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

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 กิโลกรัม

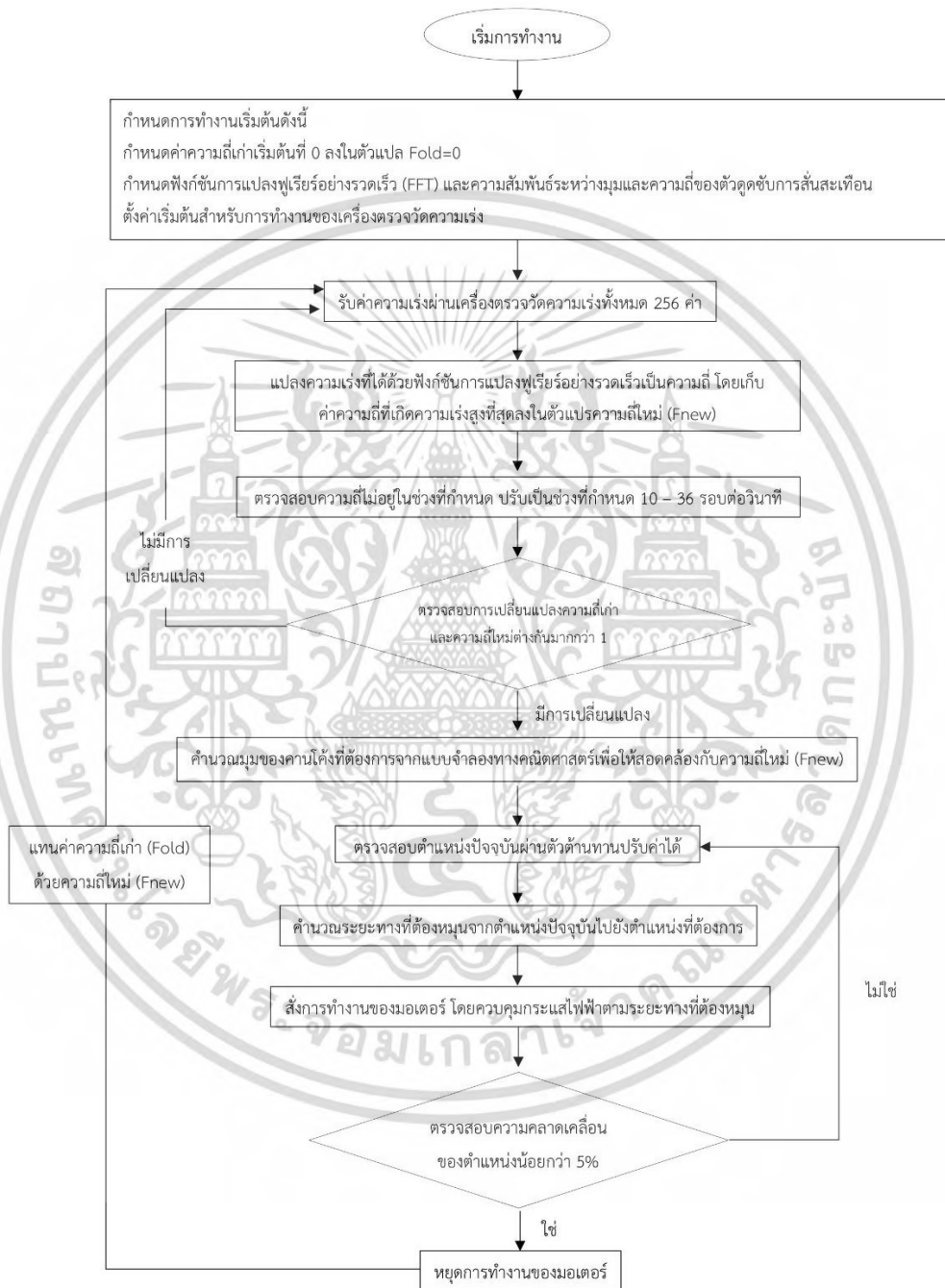
e คือ ระยะห่างระหว่างมวลไม่สมดุลจนถึงจุดศูนย์กลางเพลลาเท่ากับ 3.75 เซนติเมตร

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

ดังนั้น จากสมการที่ (3.2) ขนาดของแรงที่กระทำกับระบบหลักสูงสุดจะอยู่ในช่วง 14.799 ถึง 133.189 นิวตัน

3.3 ตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

3.3.1 ผังแสดงภาพรวมของการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้



รูปที่ 3.5 ผังแสดงภาพรวมของการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ส่วนประกอบและการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้

1. โครงสร้างตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

เป็นอุปกรณ์สำหรับติดตั้งคานโค้ง มวลถ่วง และชุดควบคุม โดยสร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติ และถูกยึดไว้ร่วมกับโครงสร้างในระบบหลักเพื่อให้เคลื่อนที่ไปด้วยกัน



รูปที่ 3.6 โครงสร้างตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

2. คานโค้ง

อุปกรณ์สำหรับการใช้ในการดูดซับการสั่นสะเทือนซึ่งทำหน้าที่แทนสปริง โดยจะทำจากอลูมิเนียม มีพื้นที่หน้าตัดคานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หน้า 0.3 เซนติเมตร กว้าง 1 เซนติเมตร รัศมีคานโค้งเท่ากับ 5 เซนติเมตร ติดอยู่กับมอเตอร์กระแสตรงสามารถหมุนปรับระยะความยาวของคานโค้งเพื่อให้ได้คานึงสปริงที่เหมาะสม



รูปที่ 3.7 คานโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. มวลดูดซับการสั่นสะเทือน

มวลถ่วงน้ำหนัก 0.5 กิโลกรัม ทำจากเหล็กทรงกระบอกตันรัศมี 9 มิลลิเมตร สูง 45 มิลลิเมตร ทำหน้าที่เป็นมวลสำหรับการดูดซับการสั่นสะเทือนผ่านคานโค้ง



รูปที่ 3.8 มวลดูดซับการสั่นสะเทือน

4. ชุดควบคุม

อุปกรณ์สำหรับการควบคุมองศาของคานโค้งเพื่อให้คานโค้งมีคุณสมบัติค่านิจสปริงตามที่ต้องการ โดยจะประกอบด้วย

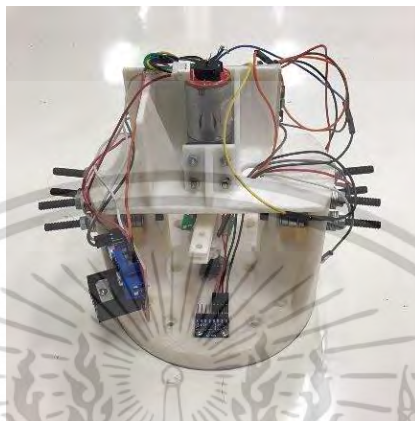
4.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ทำหน้าที่ควบคุมและสั่งการทำงานของอุปกรณ์ทั้งหมด โดยใช้ STM32 รุ่น STM32F103C8T6 Blackpill ที่สามารถเขียนโปรแกรมผ่าน Arduino IDE ได้ โดยใช้ไฟฟ้าขาเข้าแรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ สามารถรับส่งได้ทั้งสัญญาณดิจิทัล (Digital) และอนาล็อก (Analog) แบบ Pulse Width Modulation (PWM)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

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

4.3 อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ ทำหน้าที่กำหนดปริมาณทางไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เพื่อควบคุมความเร็วให้ได้องศาตามที่ต้องการ โดยใช้มอเตอร์ชนิด H-Bridge รุ่น L298N H-Bridge Dual Motor Controller Module รับไฟฟ้าขาเข้าแบบกระแสตรง 3.2 ถึง 40 โวลต์ และรองรับการทำงานบนไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้งาน

4.4 มอเตอร์กระแสตรง (DC motor) ขนาด 12 โวลต์ ทำหน้าที่หมุนคานโค้ง

4.5 ตัวต้านทานปรับค่าได้ ทำหน้าที่ ส่งตำแหน่งปัจจุบันกลับไปยัง ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผล โดยใช้ WH148 Series B10K สามารถปรับความต้านทานสูงสุด 10 กิโลโอห์ม และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ต่อเข้ากับแกนหมุน 6 มิลลิเมตร

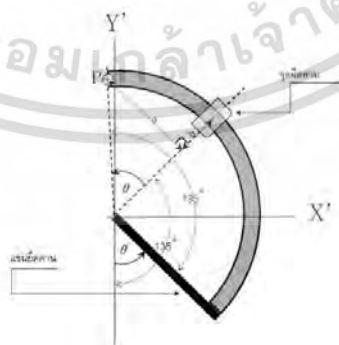


รูปที่ 3.9 ชุดควบคุม

3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่สปริงและมุมหมุนของคานโค้งทางทฤษฎี

3.4.1 ภาวะที่เกิดขึ้นจากมวลถ่วงที่กระทำกับปลายคานสำหรับองศาการหมุนใด ๆ

ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนในส่วนของสปริงที่ทำหน้าที่เก็บและปล่อยพลังงานศักย์ถูกใช้แทนด้วยคานโค้ง โดยปลายคานโค้งด้านหนึ่งติดอยู่กับแกนยึดคานโค้ง และใช้ตำแหน่งของจุดยึดคานในการกำหนดระยะเวลาความยาวของคานโค้ง ซึ่งสัมพันธ์กับมุมกวาดของแกนยึดคาน โดยที่มุมกวาดและระยะเวลาความยาวของคานโค้งนั้นจะส่งผลต่อค่านิจสปริง ซึ่งมุม θ นั้นทำมุมกับแกน Y' ที่ $42^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$ ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงแบบจำลองการทำงานของคานโค้ง จุดยึดคาน และแกนยึดคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ P คือ แรงกระทำจากน้ำหนักของมวลถ่วง โดยยึดติดไว้ที่ปลายคาน (N)

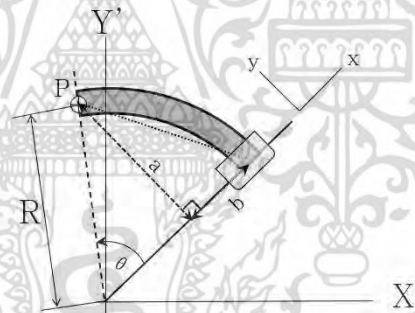
θ คือ มุมที่แขนยึดคานกวาดไปจากแกนอ้างอิง Y' (องศา)

a คือ ระยะที่วัดจากจุด P ถึงจุดตัดตั้งฉาก (mm)

b คือ ระยะจากจุดตัดตั้งฉากถึงหน้าตัดของคานที่วางตัวทำมุม θ กับ แกน Y' (mm)

เมื่อมุมที่แขนยึดคานกวาดไปจากแกนอ้างอิง Y' ระยะของคานโค้งจากจุดยึดคานจะเปลี่ยนแปลงไป โดยส่วนของคานโค้งที่ถัดจากจุดยึดคานไปถือว่าเป็นส่วนอิสระ และมีหน้าที่ในการดูดซับและปลดปล่อยพลังงานศักย์ ซึ่งค่าจิสสปริงจะเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งต่าง ๆ ที่คานโค้งเคลื่อนที่ไป

จากทฤษฎีบทลำดับที่สองของคาสติเกลียโน (Castigliano's Second Theorem) ดังที่กล่าวไว้ว่าการคำนวณจากรูปทรงของคานโค้งที่มีลักษณะเป็น $1/4$ ของวงรี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะไม่สามารถใช้ทฤษฎีดังกล่าวได้โดยตรง เนื่องจากมีการใช้คานโค้งในลักษณะที่เป็นวงกลม จึงจำเป็นต้องประยุกต์ใช้ทฤษฎีดังกล่าวในการหาค่าการโก่งตัวของคานโค้ง รวมทั้งการหาความสัมพันธ์ของมุมกวาด θ ซึ่งส่งผลต่อค่าจิสสปริง



รูปที่ 3.11 แสดงการทำงานของคานโค้งที่ยื่นจากจุดยึดคานเป็นระยะ S ที่ θ ใด ๆ บนระบบพิกัดหลัก $X'Y'$ และระบบพิกัดรอง xy

โดยที่ R คือ รัศมีความโค้งของคานโค้ง (mm)

s คือ ระยะของคานโค้งที่ยื่นจากจุดยึดคานไปถึงมวลถ่วง (mm)

จากรูปที่ 3.11 แสดงให้เห็นว่าระยะ a และ b มีความสัมพันธ์กับ θ ดังนี้

$$a = R \sin \theta \quad (3.3)$$

$$b = R(1 - \cos \theta) \quad (3.4)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของคานโค้ง S และมุม θ คือ

$$s = R\theta \quad (3.5)$$

เมื่อวิเคราะห์แรงและโมเมนต์ที่กระทำกับคานโค้งที่ยื่นไปจากจุดยึดคาน จะเห็นได้ว่าแรง P ที่เป็นแรงกระทำจากน้ำหนักของมวลถ่วงจะทำให้เกิดแรงเฉือนภายในและโมเมนต์ปฏิกิริยาขึ้นที่คานโค้งส่วนที่เป็นอิสระ ดังแสดงที่รูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงแผนภาพอิสระของคานโค้งอิสระ (ส่วนที่ยื่นออกไปจากจุดยึดคาน) โดยแรงกระทำเกิดจากมวลถ่วง

จากรูปที่ 3.12 แสดงโมเมนต์ตัด $M_{b,P}$ และโมเมนต์บิด $M_{t,P}$ ที่กระทำกับคานโค้ง ณ จุด O ที่เป็นจุดยึดคาน โดยสามารถละเว้นแรงเฉือนภายในที่หน้าตัดของคานโค้งได้ เนื่องจากมีผลต่อการเสียรูปของคานน้อย

ในการวิเคราะห์การหมุนของคานโค้งอิสระ ณ จุด O ที่แกน x และ y ในรูปที่ 3.12 จะได้สมการสมดุลการหมุนที่แกน x ดังนี้

$$M_{b,P} - Pa = 0 \quad (3.6)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (3.3) ในสมการ (3.6) จะได้

$$M_{b,P} = PR\sin\theta \quad (3.7)$$

จากรูปที่ 3.12 ได้สมการสมดุลการหมุนที่แกน y ดังนี้

$$M_{t,p} - Pb = 0 \quad (3.8)$$

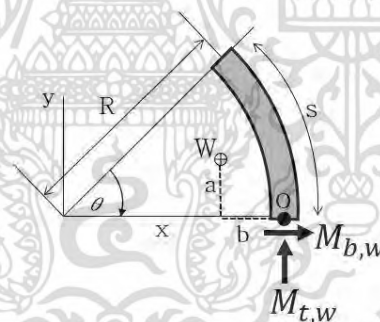
เมื่อแทนค่าสมการ (3.4) ในสมการ (3.8) จะได้

$$M_{t,p} = PR(1 - \cos\theta) \quad (3.9)$$

- ดังนั้นการเสียรูปของคานโค้งสามารถเกิดได้ 2 รูปแบบ คือ 1. การเสียรูปจากโมเมนต์บิด
2. การเสียรูปจากโมเมนต์ดัด ซึ่งแสดงในสมการ (3.7) และ (3.9) ตามลำดับ

3.4.2 ภาระที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของคานสำหรับองศาการหมุนใด ๆ

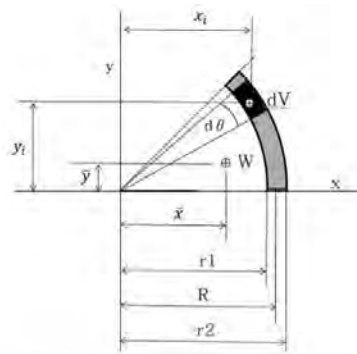
ในการวิเคราะห์ภาระที่เกิดขึ้นกับคานโค้งอันเนื่องมาจากน้ำหนักของคานโค้ง น้ำหนักของคานโค้งจะกระทำ ณ จุด O ซึ่งเป็นจุดยึดคาน โดยจะพิจารณาเฉพาะน้ำหนักคานเพียงเท่านั้น ไม่สนใจแรงภายนอกอื่น ๆ ซึ่งสามารถเขียนแผนภาพอิสระได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.13 แสดงแผนภาพอิสระของคานโค้งที่มีแรงกระทำ คือ น้ำหนักของคานเพียงเท่านั้น

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

แรงจุดเทียบเท่าของน้ำหนักคานประกอบไปด้วยขนาดของแรงจุดและจุดศูนย์ถ่วง ซึ่งขนาดของแรงจุดสามารถหาได้จากน้ำหนักของคานโค้งส่วนอิสระ



รูปที่ 3.14 แสดงการวิเคราะห์หาค่าแรงจุดเทียบเท่าของคานโค้ง

โดยที่ dV คือ ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นขนาดกณิกนันต์

$d\theta$ คือ มุมที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นขนาดกณิกนันต์

W คือ น้ำหนักของคานโค้งส่วนปลายอิสระ (kg)

r_1 คือ รัศมีในของคานโค้ง (mm)

r_2 คือ รัศมีนอกของคานโค้ง (mm)

\bar{x} คือ จุดศูนย์กลางถ่วงคานบนแกน x (mm)

\bar{y} คือ จุดศูนย์กลางถ่วงคานบนแกน y (mm)

t คือ ความหนาของคานโค้ง (mm)

x_i คือ ตำแหน่งบนแกน x ของมวลขนาดกณิกนันต์ใด ๆ (mm)

y_i คือ ตำแหน่งบนแกน y ของมวลขนาดกณิกนันต์ใด ๆ (mm)

จะสามารถหาปริมาตรคานโค้งในส่วนที่เป็นอิสระได้ดังนี้

$$V = \int_V dV \quad (3.10)$$

โดยที่

$$dV = \left(\frac{1}{2} r_2^2 d\theta - \frac{1}{2} r_1^2 d\theta \right) t \quad (3.11)$$

แทนค่าสมการ (3.11) ในสมการ (3.10) จะได้

$$V = \frac{1}{2} t \left[\int_0^\theta r_2^2 d\theta - \int_0^\theta r_1^2 d\theta \right] \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = \frac{1}{2}t\theta[r_2^2 - r_1^2] \quad (3.13)$$

โดยที่ W และ V มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$W = mg = \rho Vg \quad (3.14)$$

นำสมการที่ (3.13) มาแทนค่าในสมการที่ (3.14) จะได้

$$W = \frac{1}{2}\rho g t \theta (r_2^2 - r_1^2) \quad (3.15)$$

จากรูปที่ 3.14 ตำแหน่ง x_i และ y_i เป็นฟังก์ชันของมุม θ ดังนี้

$$x_i = R \cos \theta \quad (3.16)$$

$$y_i = R \sin \theta \quad (3.17)$$

จากรูปที่ 3.14 แสดงให้เห็นว่าจุดศูนย์กลางของคานโค้งประกอบด้วยจุดศูนย์กลางบนแกน x และ แกน y ซึ่งสามารถหาค่าได้จาก

$$V\bar{x} = \int x_i dV \quad (3.18)$$

$$V\bar{y} = \int y_i dV \quad (3.19)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (3.11), (3.13), (3.16) และ (3.17) ในสมการที่ (3.18) และ (3.19) จะ
ได้

$$\bar{x} = \frac{R}{\theta} \int_0^\theta \cos \theta d\theta \quad (3.20)$$

$$\bar{y} = \frac{R}{\theta} \sin \theta \quad (3.21)$$

จะได้โมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิดที่กระทำบนคานโค้งอันเนื่องมาจากน้ำหนักคาน ดังนี้

$$M_{b,w} = W \cdot a = W \cdot \bar{y} \quad (3.22)$$

$$M_{b,w} = \frac{1}{2} \rho g t R (r_2^2 - r_1^2) (1 - \cos \theta) \quad (3.23)$$

$$M_{t,w} = W \cdot b = W (R - \bar{x}) \quad (3.24)$$

$$M_{t,w} = \frac{1}{2} \rho g t R (r_2^2 - r_1^2) (\theta - \sin \theta) \quad (3.25)$$

3.4.3 ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมหมุนของคานโค้งจากทฤษฎีบทลำดับที่สองของคาสติเกลียโน (Castigliano's Second Theorem)

สมการ (3.26) ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ 1. ส่วนที่แสดงถึงพลังงานสะสมจากการดัด 2. ส่วนที่แสดงถึงพลังงานสะสมที่เกิดจากการบิด โดยโมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิดเป็นผลมาจากแรงจากน้ำหนักของลูกตุ้มและน้ำหนักของคาน ซึ่งโมเมนต์ดังกล่าวแสดงในสมการ (3.27) และ (3.28) ตามลำดับ

$$U = \int_0^L \frac{M_b^2}{2EI} dx + \int_0^L \frac{M_t^2}{2GK_t} dx \quad (3.26)$$

$$M_{b,all} = PR \sin \theta + \frac{1}{2} \rho g t R (r_2^2 - r_1^2) (1 - \cos \theta) \quad (3.27)$$

$$M_{t,all} = PR (1 - \cos \theta) + \frac{1}{2} \rho g t R (r_2^2 - r_1^2) (\theta - \sin \theta) \quad (3.28)$$

นำทฤษฎีบทลำดับที่สองของคาสติเกลียโน (Castigliano's Second Theorem) มาใช้เพื่อหาการโก่งตัวของคาน δ จากภาระ P กระทำ ณ จุดที่ภาระกระทำ โดยหาอนุพันธ์ย่อยของพลังงาน U เทียบกับแรงภายนอก P จะได้สมการ (3.29)

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{1}{2EI} \int_0^L 2M_{b,all} \frac{\partial M_{b,all}}{\partial P} ds + \frac{1}{2GK_t} \int_0^L 2M_{t,all} \frac{\partial M_{t,all}}{\partial P} ds \quad (3.29)$$

ทำการหาอนุพันธ์ย่อยของโมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิดเทียบกับแรงภายนอก P จะได้สมการ (3.30) และ (3.31) ซึ่งเป็นของโมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิดตามลำดับ

$$\frac{\partial M_{b,all}}{\partial P} = R \sin \theta \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial M_{t,all}}{\partial P} = R(1 - \cos \theta) \quad (3.31)$$

ทำการหาอนุพันธ์ความยาวของคานโค้งอิสระจากสมการ (3.5) ได้

$$ds = R d\theta \quad (3.32)$$

เมื่อแทนค่า $M_{b,all}$, $M_{t,all}$, $\frac{\partial M_{b,all}}{\partial P}$, $\frac{\partial M_{t,all}}{\partial P}$ และ ds จากสมการ (3.27), (3.28), (3.30), (3.31) และ (3.32) ตามลำดับในสมการ (3.29) จะได้

$$\delta = R \left[\frac{1}{EI} \int_0^\theta \left\{ PR \sin \theta + \frac{1}{2} \rho g t R (r_2^2 - r_1^2) (1 - \cos \theta) \right\} R \sin \theta d\theta + \frac{1}{GK_t} \int_0^\theta \left\{ PR (1 - \cos \theta) + \frac{1}{2} \rho g t R (r_2^2 - r_1^2) (\theta - \sin \theta) \right\} R (1 - \cos \theta) d\theta \right] \quad (3.33)$$

ทำการหาปริพันธ์จำกัดเขตจะได้

$$\delta = R^3 \left[P \left\{ \frac{1}{2EI} (\theta - \sin \theta \cos \theta) + \frac{1}{2GK_t} (3\theta - 4 \sin \theta + \sin \theta \cos \theta) \right\} + \frac{1}{2} \rho g t (r_2^2 - r_1^2) \left\{ \frac{1}{2EI} (2 - 2 \cos \theta - \sin^2 \theta) + \frac{1}{2GK_t} (\theta(\theta - 2 \sin \theta) + \sin^2 \theta) \right\} \right] \quad (3.34)$$

จากกฎของฮุก

$$\sum F = k\delta \quad (3.35)$$

ถูกนำมาใช้เพื่อแปลงระยะเสีयरูปของคานโค้งที่เปลี่ยนไปตามตำแหน่งต่าง ๆ เป็นค่านิจสปริงที่เปลี่ยนตามตำแหน่งของคานโค้ง ซึ่งจะได้สมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k = \frac{\sum F}{\delta} = \frac{P + \frac{1}{2} \rho g t \theta (r_2^2 - r_1^2)}{\delta} \quad (3.36)$$

จากสมการ (3.34) และ (3.36) ค่าตัวแปรที่เป็นคุณสมบัติของคานโค้ง คือ R , EI และ GK_t
 โดยที่ R คือ รัศมีความโค้งของคาน
 EI คือ ค่านิจการดัด
 GK_t คือ ความแข็งแรงแรงการบิด

ใช้วัสดุของคานโค้งเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม 304 พื้นที่หน้าตัดคานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หน้า 0.3 เซนติเมตร กว้าง 1 เซนติเมตร และมีรัศมีความโค้งของคาน 5 เซนติเมตร

$$\text{มอดุลัสสภาพยืดหยุ่น (E)} = 89.46 \text{ GPa}$$

$$\text{อัตราส่วนปัวซอง (v)} = 0.29$$

$$\text{มอดุลัสแรงเฉือน (G)} = 35.22 \text{ GPa}$$

$$\text{ความหนาแน่น (\rho)} = 7900 \text{ kg/m}^3$$

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

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

$$\text{โมเมนต์ที่สองเชิงขั้วของพื้นที่ (K_t)} = I_x + I_z = 2.75 \cdot 10^{-1} \text{ m}^4$$

เมื่อแทนค่าคุณสมบัติต่าง ๆ และแทนค่าสมการ (3.34) ในสมการ (3.36) จะได้

$$k = \frac{(392.4 + 9.3\theta) \cdot 10^{-4}}{6.6\theta^2 + 2054\theta - 94 \sin \theta \cos \theta - 22 \sin^2 \theta - 13.2\theta \sin \theta - 1114 \sin \theta - 57.75 \cos \theta + 57.75} \quad (3.37)$$

สมการ (3.37) แสดงความสัมพันธ์ค่านิจสปริงสำหรับคานโค้งเมื่อ θ กวาดไปที่มุมต่าง ๆ โดยที่ความสัมพันธ์ค่านิจสปริงของคานโค้งกับ θ

นำความถี่ของการสั่นที่ตรวจวัดได้ไปใช้ในการระบุความถี่ธรรมชาติและค่านิจสปริงของคานโค้ง จากนั้นใช้ค่านิจสปริงที่หาได้เพื่อหาค่า θ ที่เหมาะสมในการปรับตำแหน่งของคานโค้ง โดยตัวดูดซับการสั่นสะเทือนได้ถูกออกแบบไว้ให้มีมวลถ่วงทั้งหมด 2 ก้อน ก้อนละ 0.5 กิโลกรัม นำไปใช้ในการคำนวณในสมการที่ (3.38) เพื่อนำไปหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมระหว่างค่านิจสปริงและมุม θ ที่ต้องกวาดไปสำหรับมวลสปริงหนึ่งข้าง

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{0.5}} \quad (3.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นหาความถี่ธรรมชาติของระบบมวลสปริงรวม โดยแต่ละฝั่งของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนมีการกำหนดค่าความถี่ธรรมชาติไว้เท่ากัน ดังนั้นจะได้ความถี่ธรรมชาติรวมทั้งระบบของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนดังนี้

$$\frac{1}{\omega_a^2} = \frac{1}{\omega_1^2} + \frac{1}{\omega_2^2} \quad (3.39)$$

$$\omega_a = \frac{\omega_{a1-2}}{\sqrt{2}} \quad (3.40)$$

จากนั้นทำการหาสมการเพื่อใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลในจุดต่าง ๆ โดยการหาสมการเส้นโค้งได้ดังสมการที่ (3.41)

$$\theta(\omega_a) = 999.99\omega_a^{-0.835} \quad (3.41)$$

3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมหมุนของคานโค้งจากการทดลอง

3.5.1 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมหมุนของคานโค้ง

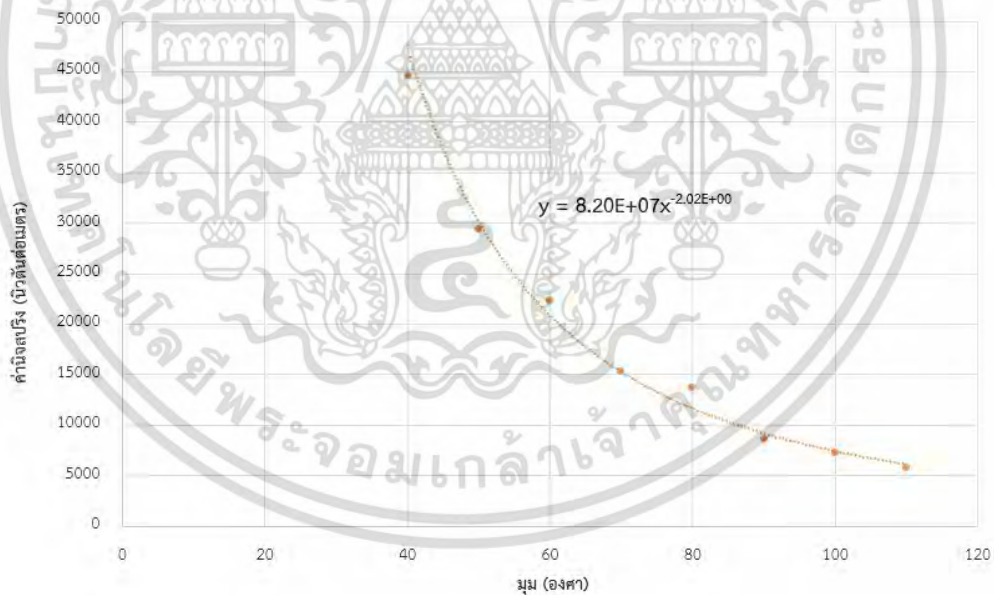
3.5.1.1 วิธีการทดลอง

1. ทำการติดตั้งคานโค้งโดยยึดไว้กับโต๊ะทดลอง ปลายคานยื่นออกมาทำมุมเริ่มต้น 40 องศากับศูนย์กลางคานโค้ง
2. ติดตั้งมวลถ่วง 0.5 กิโลกรัมไว้ที่ปลายของคานโค้งโดยใช้เชือกยึดคานโค้งและมวลถ่วงไว้ด้วยกัน
3. ติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะ (Dial Indicator) ที่ปลายของคานโค้ง
4. ยกมวลถ่วงขึ้นเล็กน้อย จากนั้นตั้งค่าระยะโก่งตัวของอุปกรณ์วัดระยะให้เป็นศูนย์
5. ทำการปล่อยมวลอย่างช้า ๆ เพื่อให้เกิดภาวะที่ปลายคาน เมื่อระยะโก่งตัวคงที่ทำการอ่านค่าบนหน้าปัดอุปกรณ์
6. ปรับองศาการหมุนทีละ 10 องศาและดำเนินการซ้ำตามขั้นตอนที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ

3.5.1.2 ผลการทดลอง

ตารางที่ 3.1 แสดงผลการทดลองของค่านิจสปริงเปรียบเทียบกับมุมหมุนของคานโค้งที่ 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 และ 110 องศาตามลำดับ

มุม (องศา)	ระยะโก่งตัว (มิลลิเมตร)				ค่านิจสปริง (นิวตันต่อ เมตร)
	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 3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมหมุนของคานโค้ง

3.5.2 ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมหมุนของคานโค้งจากการทดลอง

จากผลการทดลองทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงและมุมของคานโค้งด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Method) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_a = (8.20 \cdot 10^7)(\theta^{-2.02}) \quad (3.42)$$

3.6 ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างมุมของคานโค้งและความถี่ที่ใช้งานในตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

สำหรับค่านิจสปริงที่นำมาใช้จะถูกอ้างอิงตามสมการที่ (3.42) และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านความเร็วในการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนจึงแปลงความสัมพันธ์ระหว่างมุมหมุนกับค่านิจสปริงเป็นความถี่ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนและค่านิจสปริงได้ดังนี้

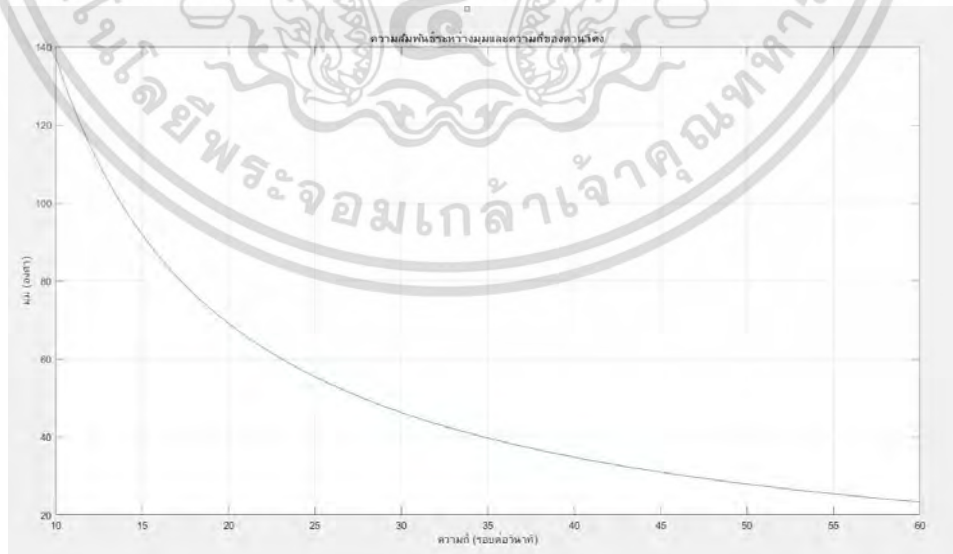
สำหรับคานหนึ่งด้านจะติดตั้งมวลถ่วง 0.5 กิโลกรัม และมีค่านิจสปริงตามสมการที่ (3.42) แทนลงในสมการที่ (3.38) ดังนั้นความถี่ธรรมชาติของคานดูดซับการสั่นสะเทือน คือ

$$\omega_a = \sqrt{\frac{(8.20 \cdot 10^7)(\theta^{-2.02})}{0.5}} \quad (3.43)$$

เมื่อคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างมุมในหน่วยองศาและความถี่ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน เช่นเดียวกับทฤษฎีจากสมการ (3.41)

$$\theta(\omega_{a,total}) = 1341.75\omega_{a,total}^{-0.99} \quad (3.44)$$

เมื่อนำสมการที่ (3.44) มาสร้างกราฟผ่านโปรแกรม Matlab ความละเอียด 0.1 ในช่วง 10 ถึง 60 รอบต่อวินาที ได้ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมและความถี่ของคานโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 อุปกรณ์สำหรับเก็บข้อมูล

3.7.1 เครื่องตรวจวัดความเร่ง (Accelerometer)

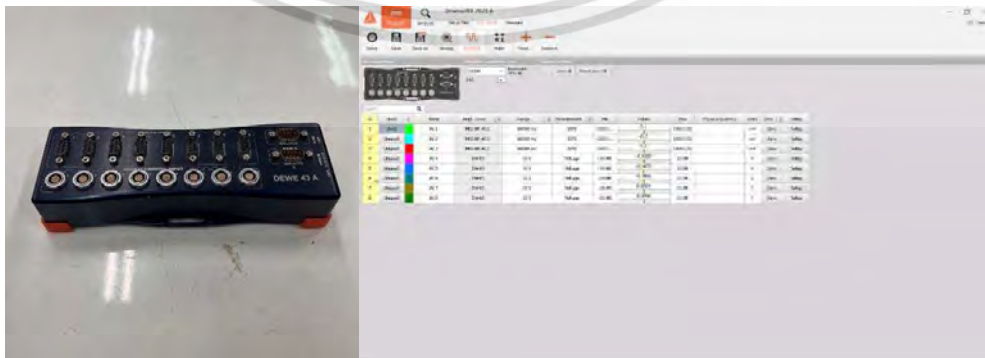
เครื่องตรวจวัดความเร่งเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าเชิงกลที่ใช้วัดแรงในการเร่ง โดยตรวจจับความเร่งจากพีโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ที่มีคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจากแรงในการเร่ง สำหรับปริญญาโทนี้ ใช้เครื่องตรวจวัดความเร่งสามแกน รหัส 8692C50 จากบริษัท KISTLER ตามรูปที่ 3.17 โดยมีช่วงการทำงานสูงสุดที่ 50 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก มีค่าความไวที่ 100 มิลลิโวลต์ต่อความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก และมีความคลาดเคลื่อน 5 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.17 เครื่องตรวจวัดความเร่ง

3.7.2 ระบบการเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Acquisition System (DAQ))

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



รูปที่ 3.18 ระบบเก็บรวบรวมข้อมูล DEWE43A (ซ้าย) และ DEWESoftX (ขวา)

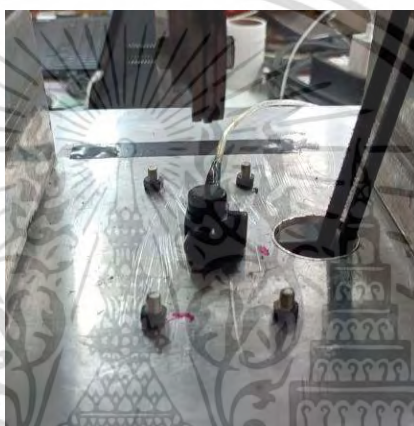
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3 วิธีการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมจะถูกส่งมาในรูปสัญญาณไฟฟ้าและจะนำไปวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม DEWESoftX เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เข้าใจได้ง่ายขึ้น

1. การติดตั้งเครื่องตรวจวัดความเร่ง

ติดตั้งเครื่องตรวจวัดความเร่งที่กึ่งกลางฐานของเครื่องจักรหมุนจำลองการสั่นสะเทือนโดยใช้แม่เหล็กยึด ดังรูปที่ 3.19 ต่อสายเข้ากับอุปกรณ์ DEWE43A และคอมพิวเตอร์ 3.20 ตามลำดับ



รูปที่ 3.19 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องตรวจวัดความเร่ง

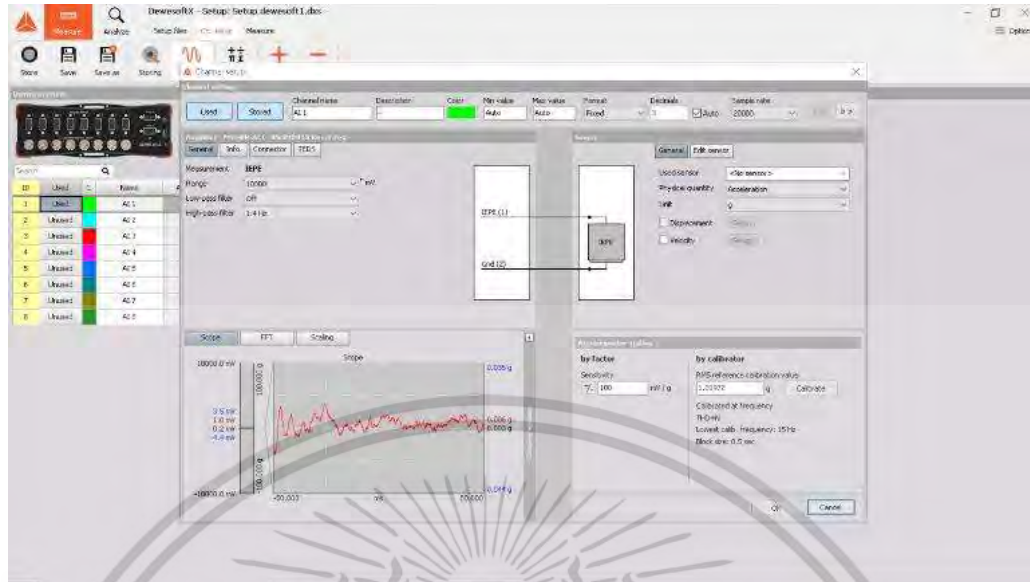


รูปที่ 3.20 การต่อสายระหว่างอุปกรณ์

2. การตั้งค่าข้อมูลความเร่ง

ความเร่งที่ได้จากเครื่องตรวจวัดความเร่งจะส่งสัญญาณทางไฟฟ้ามายังอุปกรณ์รับข้อมูลและแปลงสัญญาณทางไฟฟ้ากลับเป็นความเร่งตั้งค่าความไวที่ 100 mV/g ดังรูปที่ 3.21

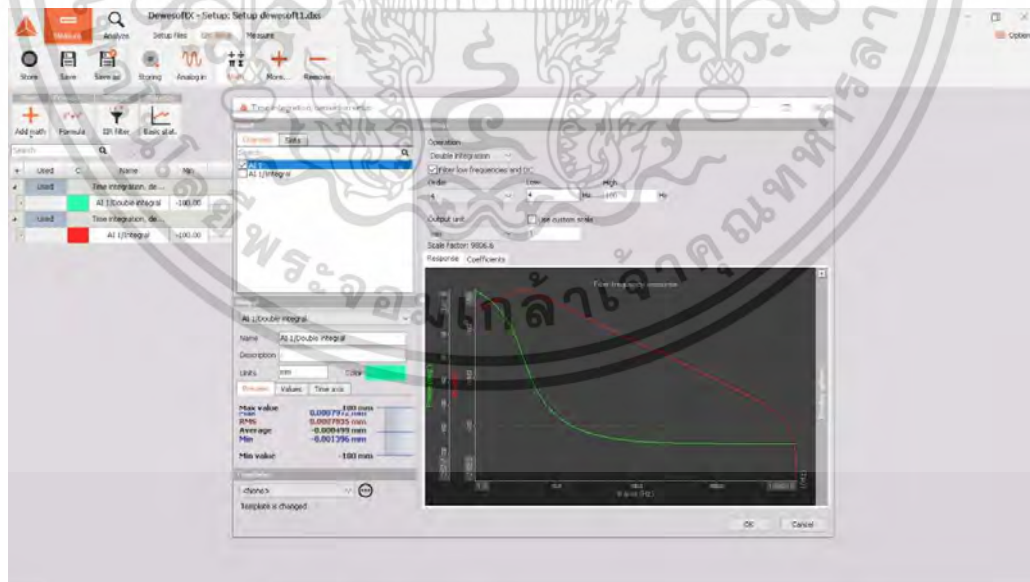
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 การตั้งค่าสัญญาณความเร่งในโปรแกรม DEWESoftX

3. การแปลงข้อมูลความเร่งเป็นขนาดการสั่นสะเทือน

ใช้ฟังก์ชันปริพันธ์สองชั้นของโปรแกรมในการแปลงข้อมูลความเร่งที่ได้เป็นขนาดของการสั่นสะเทือน โดยใช้ตัวคูณ 9806.6 ในการเปลี่ยนหน่วยจากค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเป็นมิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.22

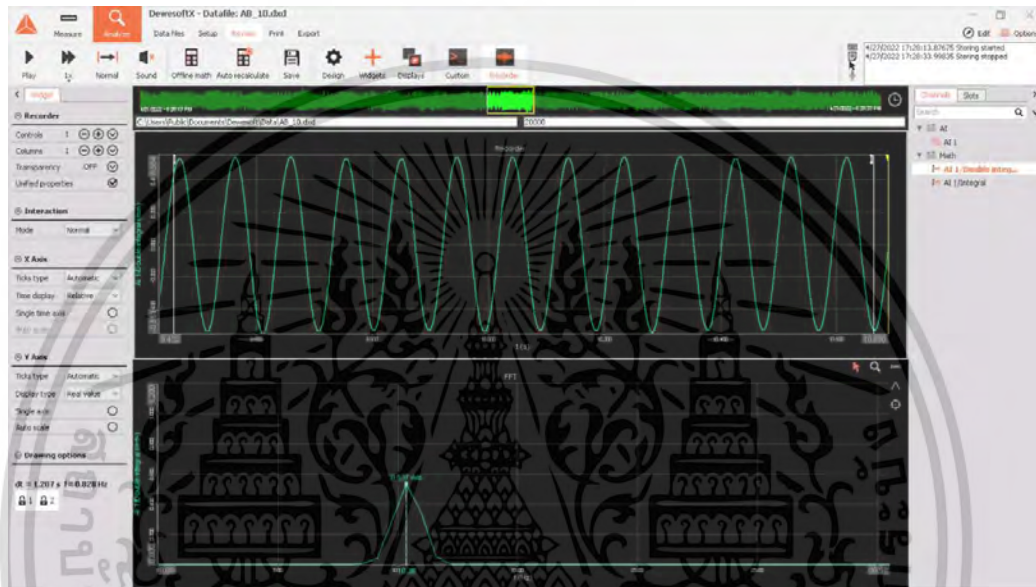


รูปที่ 3.22 การแปลงข้อมูลความเร่งเป็นขนาดการสั่นสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform)

การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับการแปลงข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่องในรูปองค์ประกอบของเวลา (Time Domain) ให้อยู่ในรูปองค์ประกอบของความถี่ (Frequency Domain) ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาขนาดการสั่นสะเทือนและความถี่ที่เกิดขึ้น ณ ขณะนั้น ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แสดงการแปลงฟูเรียร์จาก DEWESoft

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

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

4.1 การทดลองหาระยะขจัด (Normalized Magnitude) ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

4.1.1 วิธีการทดลองหาระยะขจัด (Normalized Magnitude) ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

1. ติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือนที่มีคานโค้งและมวลถ่วง ดังรูปที่ 4.1 โดยตั้งค่าความถี่ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนที่ 14 รอบต่อวินาที



รูปที่ 4.1 ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนที่มีคานโค้งและมวลถ่วง

2. ติดตั้งตัวรับรู้ (Sensor) ไว้ที่กึ่งกลางของฐานของเครื่องจักรจำลองการสั่นสะเทือน และตั้งค่าตัวรับรู้ตามบทที่ 3.7.3
3. เริ่มทำการหมุนเครื่องจักรจำลองการสั่นสะเทือนโดยเริ่มต้นที่ประมาณ 4 รอบต่อวินาที
4. เก็บค่าขนาดการสั่นสะเทือนในหน่วยมิลลิเมตรเป็นเวลา 20 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. แปลงข้อมูลที่ได้ โดยใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (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 รอบต่อวินาที จากนั้นดำเนินการตามขั้นตอนที่ 4 และ 5 ตามลำดับ จนกระทั่งความถี่เป็น 24 รอบต่อวินาที

4.1.2 ผลการทดลองหาระยะขจัด (Normalized Magnitude) ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของระยะขจัด (Normalized Magnitude) และอัตราส่วนความถี่ของเครื่องจักรหมุนและตัวดูดซับการสั่นสะเทือน (Frequency Ratio) ที่ความถี่ 14 รอบต่อวินาที

ความถี่การสั่นสะเทือน (รอบต่อวินาที)	ขนาดการสั่นสะเทือน (มิลลิเมตร)				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
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

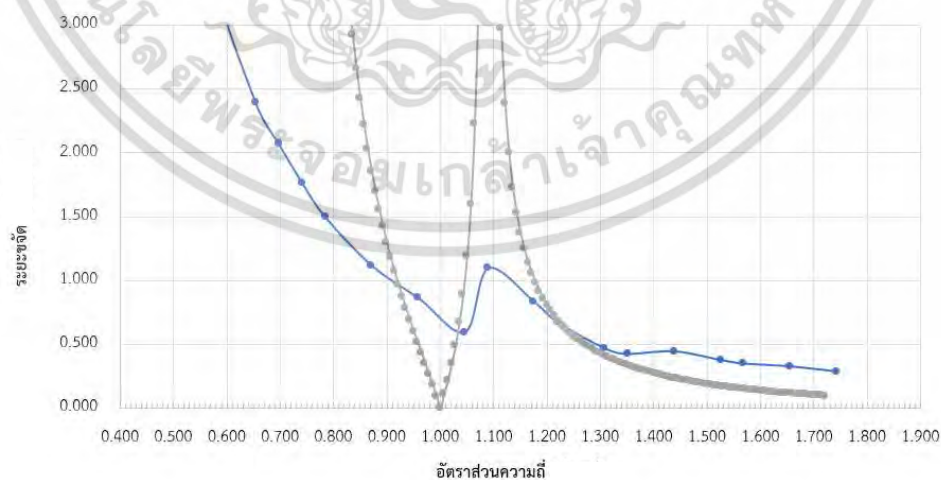
ตารางที่ 4.1 (ต่อ) แสดงผลการทดลองระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของระยะขจัด (Normalized Magnitude) และอัตราส่วนความถี่ของเครื่องจักรหมุนและตัวดูดซับ การสั่นสะเทือน (Frequency Ratio) ที่ความถี่ 14 รอบต่อวินาที

ความถี่การสั่นสะเทือน (รอบต่อวินาที)	ขนาดการสั่นสะเทือน (มิลลิเมตร)				อัตราส่วน ความถี่	ระยะขจัดไร้ หน่วย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
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 รอบต่อวินาที และระยะขจัดไร้หน่วยคำนวณจากผลคูณของขนาดการสั่นสะเทือนเฉลี่ยและค่านิจสปริงของระบบหารด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางตามสมการ (3.2) ซึ่งจะแสดงดังสมการที่ (4.1)

$$\frac{Xk}{F_0} = \frac{X_{avg} \times 51137}{0.1 \times 0.0375 \times \omega^2} \quad (4.1)$$

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะขจัดไร้หน่วยและอัตราส่วนความถี่จากการทดลอง (สีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับทางทฤษฎี (สีเทา) ได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้หน่วยของระยะขจัดและอัตราส่วนระหว่างความถี่เครื่องจักรหมุนและความถี่ธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 สรุปผลการทดลองหาระยะขจัด (Normalized Magnitude) ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระยะขจัดแบบไร้หน่วยและอัตราส่วนความถี่พบว่า อัตราส่วนความถี่ที่สามารถลดระยะขจัดแบบไร้หน่วยได้ต่ำที่สุดจากการทดลองและในทางทฤษฎี คือ 1.046 และ 1.000 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนมีความคลาดเคลื่อนของความถี่ที่ปรับเท่ากับ 4.6 เปอร์เซ็นต์ และขนาดระยะขจัดแบบไร้หน่วยต่ำสุดที่ 0.594 ในขณะที่ทางทฤษฎีสามารถลดได้จนถึง 0 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับการสั่นสะเทือนไม่สามารถลดขนาดการสั่นสะเทือนสูงสุดได้ตามทฤษฎี นอกจากนั้นช่วงที่มีขนาดระยะขจัดแบบไร้หน่วยน้อยกว่า 1 คือ 0.91 ถึง 1.07 นอกจากนั้นขนาดระยะขจัดแบบไร้หน่วยที่ 1.09 ไม่สามารถสูงขึ้นตามทฤษฎีได้คาดว่าเกิดจากความผิดระหว่างการเคลื่อนที่ ซึ่งทำให้ระบบเป็นการสั่นสะเทือนแบบไม่มีตัวหน่วงไม่สมบูรณ์

4.2 การทดลองหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ 10 - 30 รอบต่อวินาที

4.2.1 วิธีการทดลองหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ 10-30 รอบต่อวินาที

1. ติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือนโดยที่ไม่มีคานโค้งและมวลถ่วง
2. ติดตั้งตัวรับรู้ (Sensor) ไว้ที่กึ่งกลางของฐานของเครื่องจักรจำลองการสั่นสะเทือน และตั้งค่าอุปกรณ์ตามบทที่ 3.7.3
3. เริ่มทำการหมุนเครื่องจักรจำลองการสั่นสะเทือนโดยเริ่มต้นที่ประมาณ 10 รอบต่อวินาที
4. เก็บค่าขนาดการสั่นสะเทือนในหน่วยมิลลิเมตรเป็นเวลา 20 วินาที
5. แปลงข้อมูลที่ได้ โดยใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) ประมาณขนาดของการสั่นสะเทือนสูงสุดและความถี่ที่เกิดขึ้น
6. บันทึกผลการทดลองขนาดการสั่นสะเทือนที่ได้จากขั้นตอนที่ 5 โดยจะบันทึกที่ 3 ค่า คือที่เวลา 5 วินาที 10 วินาที และ 15 วินาที
7. ปรับความถี่เครื่องจักรจำลองการสั่นสะเทือน โดยเพิ่มขึ้นทีละประมาณ 1 รอบต่อวินาที จากนั้นดำเนินการตามขั้นตอนที่ 4 และ 5 ตามลำดับ จนกระทั่งความถี่เป็น 30 รอบต่อวินาที
8. ทำการติดตั้งคานโค้งและมวลถ่วงเข้าไปในระบบ จากนั้นตั้งค่าตัวดูดซับการสั่นสะเทือนให้ปรับค่าได้แบบอัตโนมัติ
9. ดำเนินการตามข้อ 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ

4.2.2 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสิ้นสะท้อนในช่วงความถี่ 10-30 รอบต่อวินาที

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของการสิ้นสะท้อนที่ความถี่ต่าง ๆ ในขณะที่ไม่มีตัวดูดซับการสิ้นสะท้อน

ความถี่ (รอบต่อวินาที)	ขนาดของการสิ้นสะท้อน (มิลลิเมตร)			
	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
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 4.3 แสดงขนาดของการสันสะท้อนที่ความถี่ 10 - 30 รอบต่อวินาที ในขณะที่มีตัวดูดซับ
การสันสะท้อน

ความถี่ (รอบต่อวินาที)	ขนาดของการสันสะท้อน (มิลลิเมตร)			
	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
29.300	0.485	0.486	0.485	0.485
29.910	0.478	0.479	0.476	0.478

เนื่องจากเครื่องจักรจำลองการสันสะท้อนไม่สามารถปรับความถี่โดยละเอียดได้ ทำให้ข้อมูลเกิดความไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นสำหรับการหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสันสะท้อนจะเก็บข้อมูลขนาดของการสันสะท้อนแต่ละความถี่ทั้งหมด 3 ครั้ง เพื่อนำมาเฉลี่ยกัน แล้วนำไปวิเคราะห์การถดถอย เพื่อนำสมการแนวโน้มที่ได้ไปใช้หาค่าที่จุดต่าง ๆ โดยมีความถี่ตั้งแต่ 10 ถึง 30 รอบต่อวินาที การเลือกใช้กำลังของสมการพหุนามนั้น จะเลือกใช้จากค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนองที่

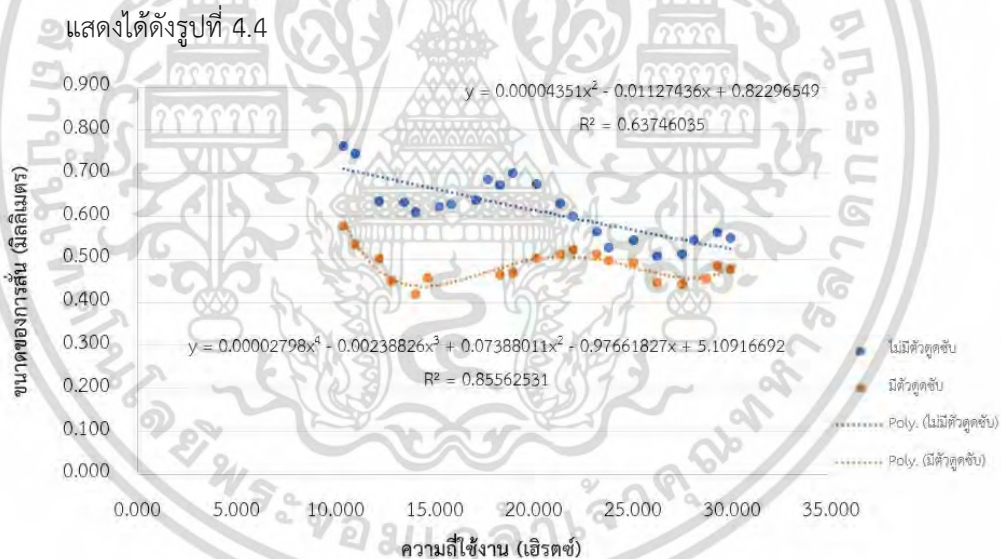
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถอธิบายได้มีอยู่ในตัวแบบเชิงเส้น (R-Squared) ในเกณฑ์อ้างอิงที่ 0.60 % ดังนั้นจึงเลือกใช้กำลังของสมการแนวโน้ม ที่กำลัง 2 สำหรับระบบที่ไม่มีการติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน และกำลัง 4 สำหรับระบบที่มีการติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน ซึ่งให้ค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนองที่สามารถอธิบายได้มีอยู่ในตัวแบบเชิงเส้น (R-Squared) สำหรับระบบที่ไม่มีตัวดูดซับการสั่นสะเทือน และสำหรับระบบที่มีตัวดูดซับการสั่นสะเทือนเท่ากับ 0.637 และ 0.856 ตามลำดับ โดยระบบที่ไม่มีตัวดูดซับการสั่นสะเทือนมีสมการแนวโน้ม ดังสมการที่ (4.2)

$$y = 0.00004351x^2 - 0.01127436x + 0.82296549 \tag{4.2}$$

ระบบที่มีตัวดูดซับการสั่นสะเทือนมีสมการแนวโน้ม ดังสมการที่ (4.3)

$$y = 0.00002798x^4 - 0.00238826x^3 + 0.07388011x^2 - 0.97661827x + 5.10916692 \tag{4.3}$$



รูปที่ 4.3 แสดงผลการลดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ในช่วง 10-30 รอบต่อวินาที โดยมีเส้นแนวโน้มพหุนามกำลัง 3

ในการหาประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนสามารถคิดได้จากขนาดการสั่นสะเทือนขณะไม่ได้ติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือน เทียบกับขนาดการสั่นสะเทือนเมื่อติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือนดังสมการที่ (4.4)

$$Eff = \frac{x_{na} - x_a}{x_{na}} \times 100 \quad (4.4)$$

จากการคำนวณประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนตามสมการที่ (4.4) จะได้ประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ในช่วง 10-30 รอบต่อวินาที

4.2.3 สรุปผลการทดลองหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ 10-30 รอบต่อวินาที

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับการสั่นสะเทือนจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการลดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ในช่วงก่อน 15 รอบต่อวินาที เนื่องจากช่วงดังกล่าวมีการสั่นสะเทือนเพียงแค่ 1 มิตี โดยจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อความถี่ใช้งานสูงขึ้นดังแสดงในช่วง 20 รอบต่อวินาทีเป็นต้นไป จากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในแกนอื่น ๆ นอกเหนือจากการเคลื่อนที่ขึ้นลง

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินการและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการ รวมถึงประดิษฐ์ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้ในช่วงความถี่ 10 ถึง 30 รอบต่อวินาที โดยใช้เครื่องจักรหมุนติดตั้งมวลไม่สมดุลในการจำลองการสั่นสะเทือนและใช้คานโค้งแทนสปริงในการทำหน้าที่เป็นตัวเก็บและปลดปล่อยพลังงานศักย์ อีกทั้งยังทดสอบประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้

สำหรับเครื่องจักรหมุนจำลองการสั่นสะเทือนถูกพัฒนาขึ้นสำหรับสร้างการสั่นสะเทือนให้กับระบบโดยจะติดตั้งตัวต้านทานแบบปรับค่าได้เพื่อปรับปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่เข้าสู่มอเตอร์ ซึ่งส่งผลต่อความเร็วรอบของเครื่องจักรให้อยู่ในช่วงประมาณ 0 ถึง 30 รอบต่อวินาที ติดตั้งมวลถ่วงขนาด 0.1 กิโลกรัมในรัศมี 3.75 เซนติเมตรห่างจากศูนย์กลางเพลลาทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง 14.799 ถึง 133.189 นิวตัน นอกจากนั้นยังมีการติดตั้งลิเนียร์บุชชิง (Linear Bushing) เข้ากับฐานของเครื่องจักร และฐานตัวดูดซับการสั่นสะเทือน เพื่อจำกัดการเคลื่อนที่ใน 1 มิติ

ในส่วนของคานโค้งถูกนำมาวิเคราะห์ถึงภาระที่กระทำกับคานทั้งที่เกิดจากภาระภายนอกขนาด 4.905 นิวตัน และภาระอันเนื่องมาจากน้ำหนักของคานในองศาใด ๆ โดยจะใช้วัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่มีรัศมีคานโค้ง 5 เซนติเมตร และหนา 0.3 เซนติเมตร นอกจากนั้นยังนำทฤษฎีบทลำดับที่สองของคาสติเกลียโน (Castigliano's Second Theorem) มาวิเคราะห์ขนาดการโก่งตัวของคานโค้ง และทดสอบขนาดการโก่งตัวของคานโค้งในทางปฏิบัติ เนื่องจากคานโค้งได้มีการรับภาระเป็นระยะเวลานาน ทำให้ทางคณะผู้จัดทำได้ใช้ความสัมพันธ์ทางปฏิบัติที่มีค่านิจสปริงน้อยกว่าทางทฤษฎี

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

การทดลองหาความสัมพันธ์ของระยะขจัดและอัตราส่วนความถี่ระหว่างตัวดูดซับการสั่นสะเทือนถูกออกแบบมาเพื่อยืนยันสมมติฐานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนเมื่อเทียบกับทฤษฎี ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าความถี่ของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนสามารถปรับได้ใกล้เคียงกับกับความถี่การหมุนของเครื่องจักร โดยมีความคลาดเคลื่อนที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นระยะขจัดแบบไร้หน่วยมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับทฤษฎีและต่ำสุดที่ 0.594

การทดลองหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ 10-30 รอบต่อวินาที พบว่าในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 - 15 รอบต่อวินาทีตัวดูดซับการสั่นสะเทือนจะมีประสิทธิภาพที่มากขึ้นในการลดการสั่นสะเทือน เนื่องจากช่วงดังกล่าวมีการสั่นสะเทือนเพียงแค่ 1 มิติ โดยจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อความถี่ใช้งานสูงขึ้นตั้งแต่ 20 รอบต่อวินาทีเป็นต้นไป เป็นผลมาจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในแกนอื่น ๆ นอกเหนือจากการเคลื่อนที่ขึ้นลง

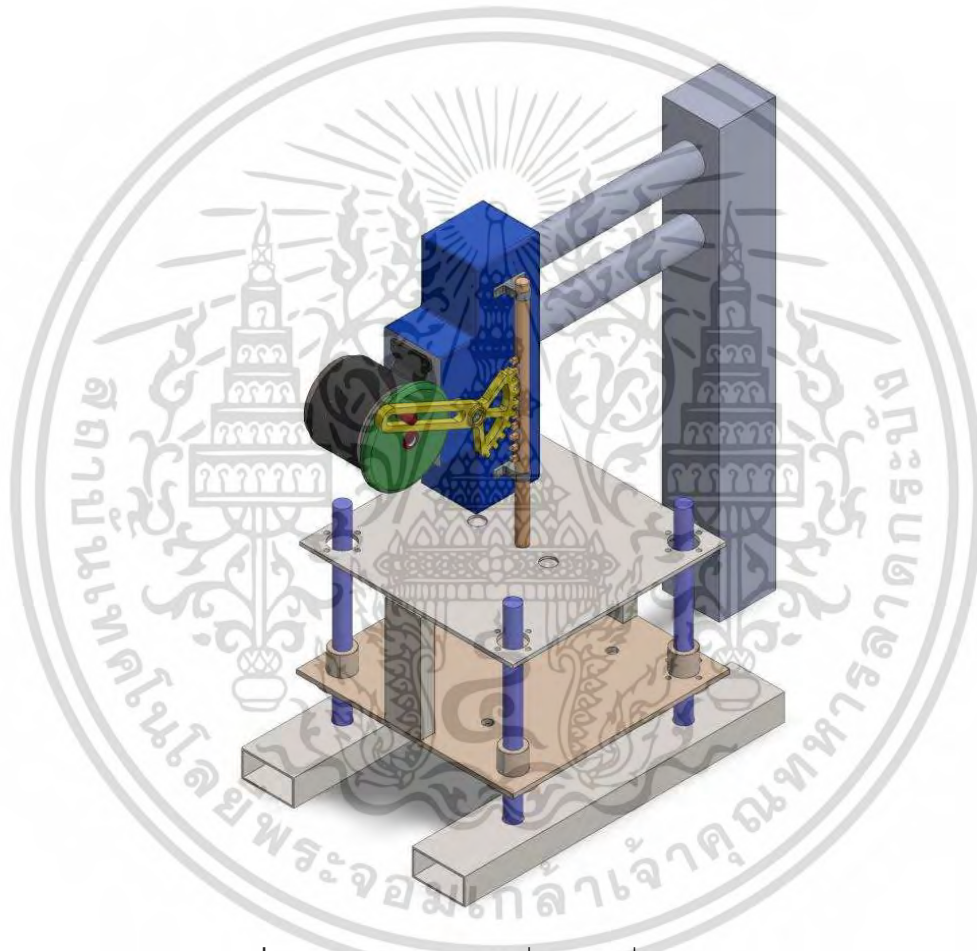
จากการทดลองต่าง ๆ ทำให้ทราบว่า ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนไม่สามารถลดการสั่นสะเทือนได้อย่างสมบูรณ์ตามทฤษฎี แต่มีประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนต่างกันไปในแต่ละช่วงซึ่งตรงตามทฤษฎีของตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. โครงสร้างตัวดูดซับการสั่นสะเทือนควรทำจากวัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่านี้ เนื่องจากต้องรับแรงจากการสั่นสะเทือน โดยเฉพาะส่วนยึดติดคานหมุนซึ่งพบร่องรอยความเสียหายระหว่างการใช้งาน
2. ควรหลีกเลี่ยงช่วงที่เกิดความถี่ธรรมชาติของระบบให้สามารถมั่นใจได้ว่าจุดที่เกิดการสั่นสะเทือนสูงสุดไม่ได้เกิดจากความถี่ธรรมชาติของระบบตรงกับความถี่การหมุนของเครื่องจักร จำลองการสั่นสะเทือน เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพการทำงานของตัวดูดซับการสั่นสะเทือนได้อย่างถูกต้อง
3. คานโค้งที่ทำหน้าที่แทนสปริงควรที่จะพิจารณาถึงความถี่และอายุการใช้งานจากการสั่นสะเทือน เพราะคานโค้งถูกแรงที่กระทำเป็นคาบ
4. การควบคุมมอเตอร์ในเครื่องจักรหมุนจำลองการสั่นสะเทือนควรมีความละเอียดและแม่นยำมากกว่านี้ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความต่อเนื่อง
5. ระบบการวัดในตัวดูดซับการสั่นสะเทือนควรพิจารณาถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ทั้งทางด้านของเวลาในการเก็บข้อมูลและการแปลงข้อมูลความถี่
6. ความคุ้มค่าทางด้านราคาควรถูกนำมาพิจารณาซึ่งถือเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญทางวิศวกรรม
7. สำหรับเครื่องจักรหมุนจำลองการสั่นสะเทือนควรออกแบบให้มีช่องว่างระหว่างแต่ละส่วนประกอบให้น้อยที่สุด หรือทำให้อุปกรณ์มีจำนวนชิ้นที่น้อยลงเนื่องจากในทางปฏิบัตินั้นอุปกรณ์

แต่ละชิ้นมีการสั่นสะเทือนเป็นของตัวเอง เมื่อมีช่องว่างที่ไม่พอดีแล้วนั้น จะเกิดการสั่นสะเทือนที่มากกว่าทฤษฎี และเมื่อทำการยึดส่วนประกอบต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ช่องว่างที่ไม่พอดินั้น จะทำให้เกิดความผิดปกติในการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรหมุนจำลองการสั่นสะเทือน ส่งผลให้การสั่นสะเทือนในระบบหลักไม่เป็นไปตามทฤษฎี

ทางเลือกอีกทางของระบบหลักที่พอจะช่วยนำเสนอเพื่อแก้ไขปัญหานี้คือการเปลี่ยนลักษณะของแหล่งกำเนิดการสั่นให้เป็นเชิงเส้นโดยตรงโดยเสนอหลักการทำ ดังรูปที่ 5.1 ต่อไปนี้



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างระบบหลักที่ป้อนการสั่นสะเทือนเป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- 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
- The Editors of Encyclopaedia Britannica, **Young's modulus**. Retrieve 19 January 2022 from: <https://www.britannica.com/science/Youngs-modulus>.
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. **Tacoma Narrows Bridge**. Retrieve 24 February 2022 from: <https://www.britannica.com/topic/Tacoma-Narrows-Bridge>

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>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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);
  }
}

```

```

        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=");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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;
  }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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++)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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) {    // scaling the matrices if value
higher than 15000 to prevent variable from overflowing
for (int i = 0; i < a; i++)
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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);
}
}

```

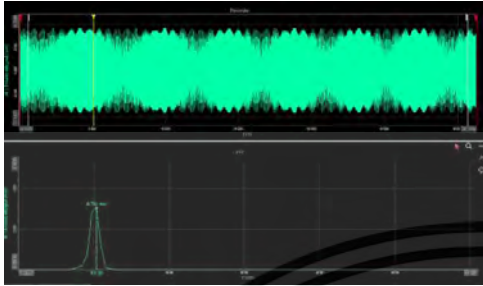
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



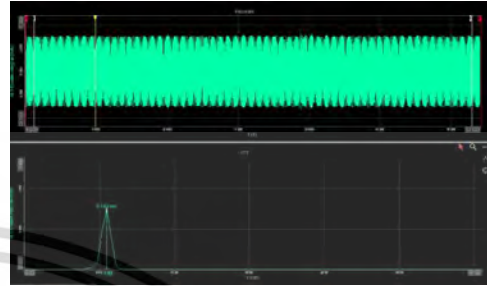
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ผลการทดสอบของระบบที่ไม่ได้ติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือนที่ได้จากโปรแกรม DEWESoftX

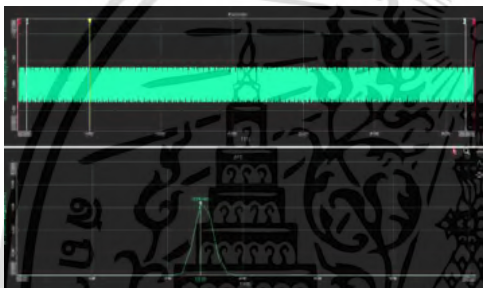
10.38 Hz



10.99 Hz



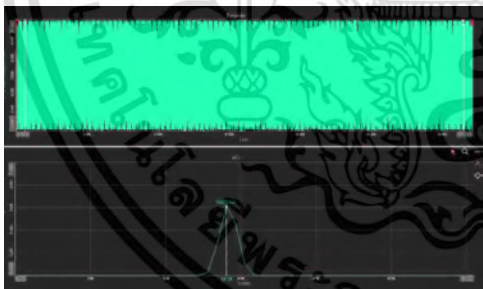
12.21 Hz



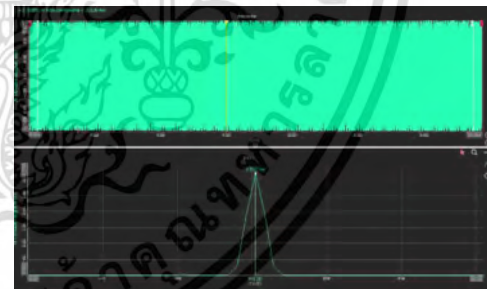
13.43 Hz



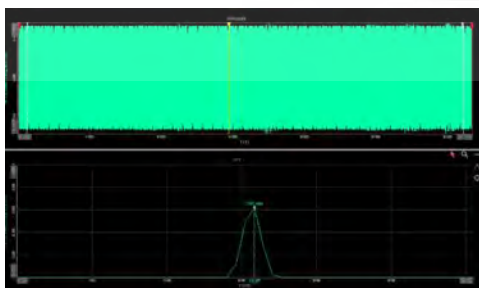
14.04 Hz



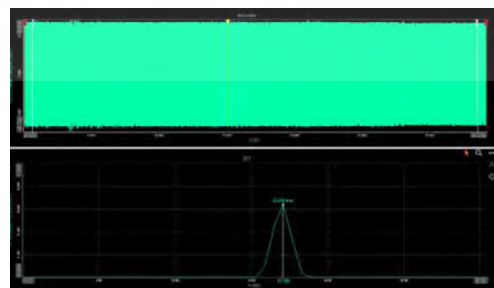
15.26 Hz



15.87 Hz

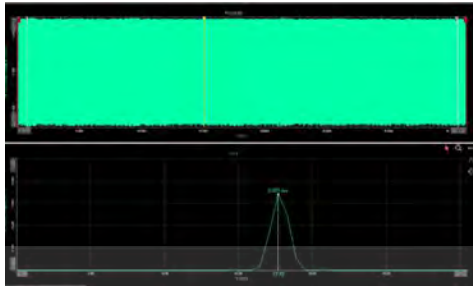


17.09 Hz

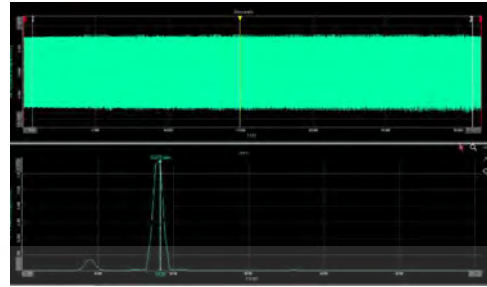


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

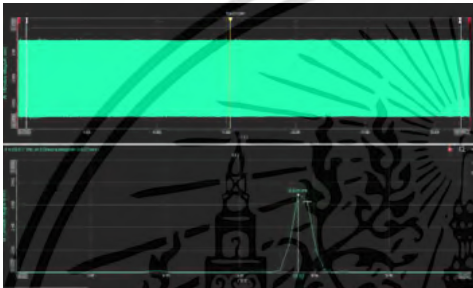
17.70 Hz



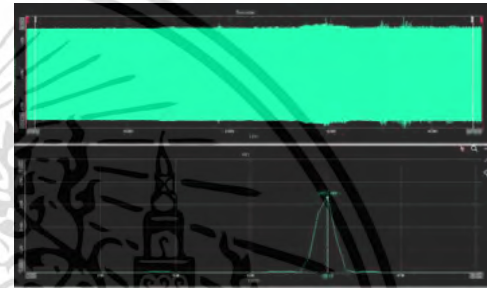
18.31 Hz



18.92 Hz



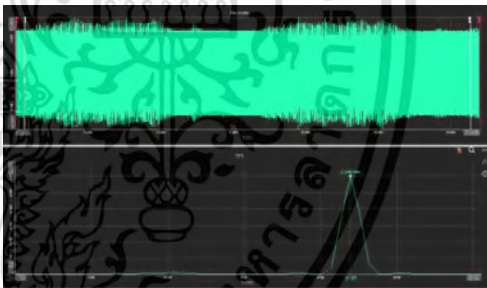
20.14 Hz



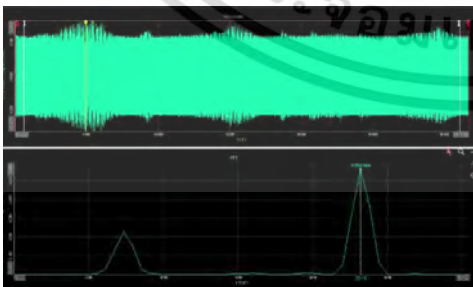
21.36 Hz



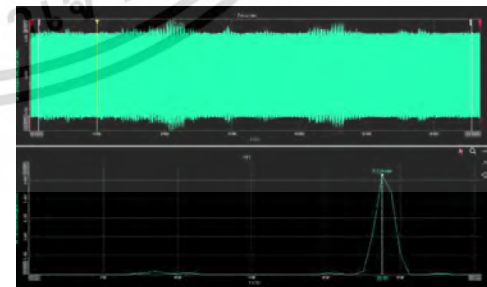
21.97 Hz



23.19 Hz

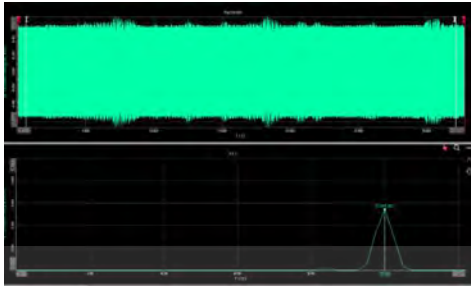


23.80 Hz

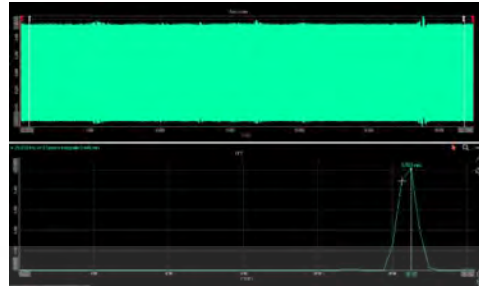


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

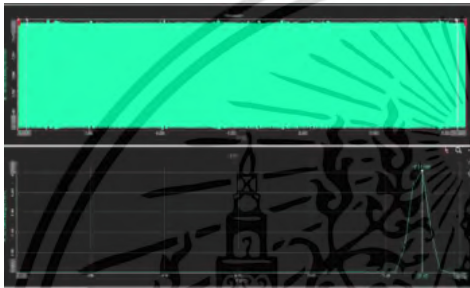
25.02 Hz



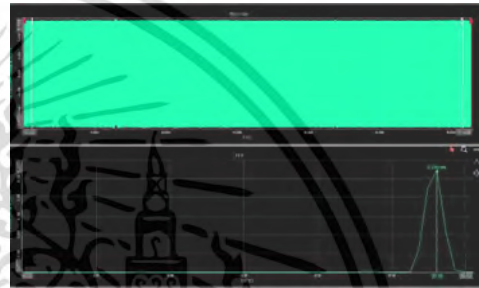
26.25 Hz



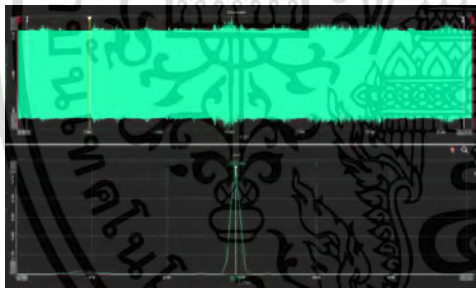
27.47 Hz



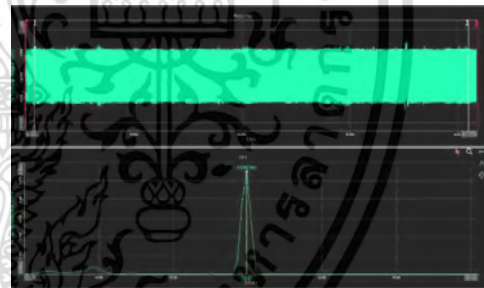
28.08 Hz



29.30 Hz

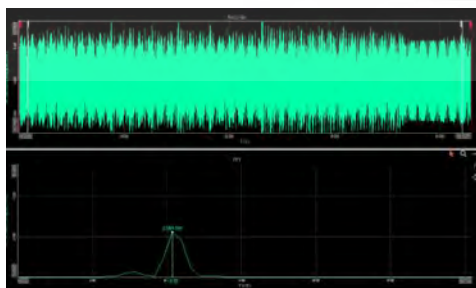


29.91 Hz

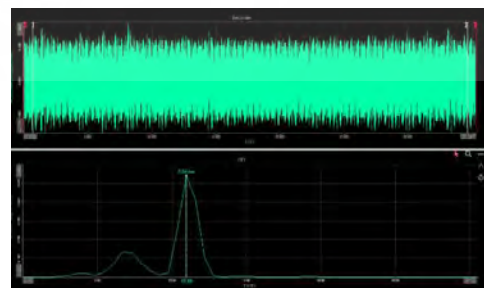


1. ผลการทดสอบของระบบที่ติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือนที่ได้จากโปรแกรม DEWESoftX

10.38 Hz

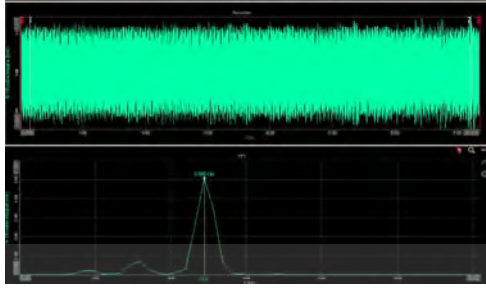


10.99 Hz

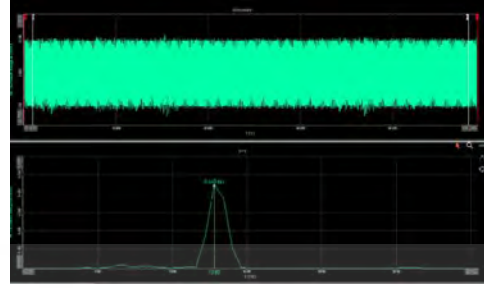


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

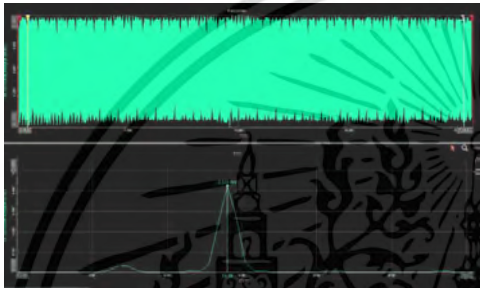
12.21 Hz



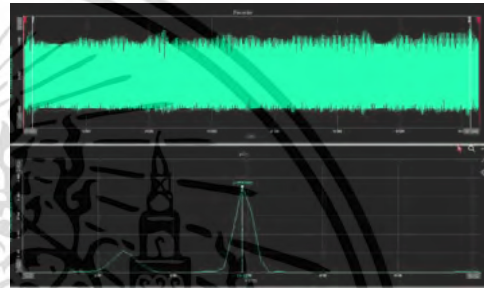
12.82 Hz



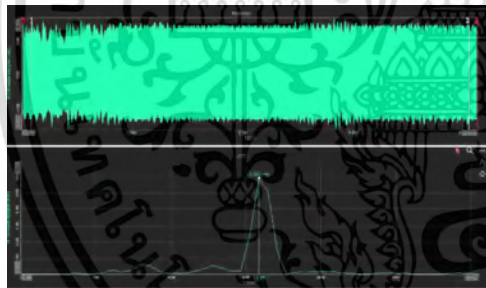
14.04 Hz



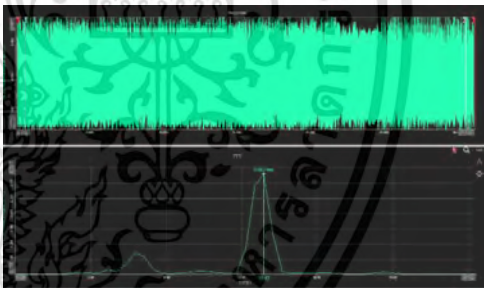
14.65 Hz



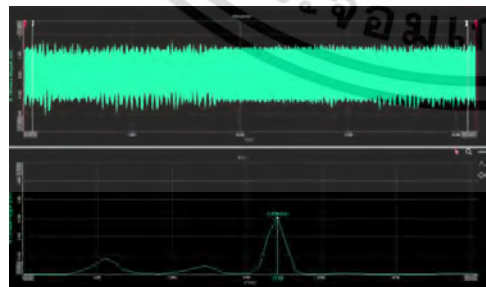
15.87 Hz



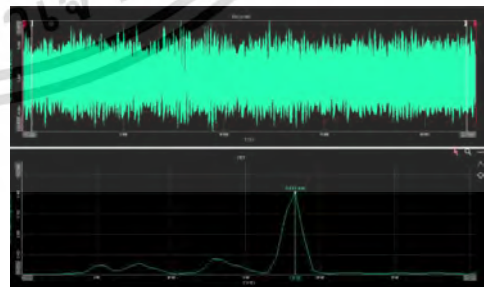
16.48 Hz



17.09 Hz

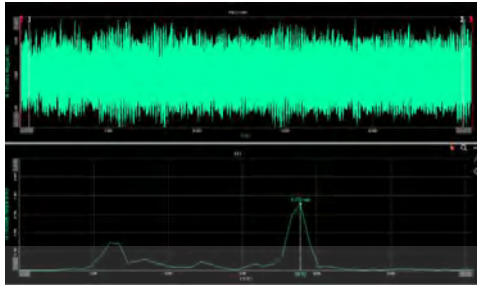


18.31 Hz

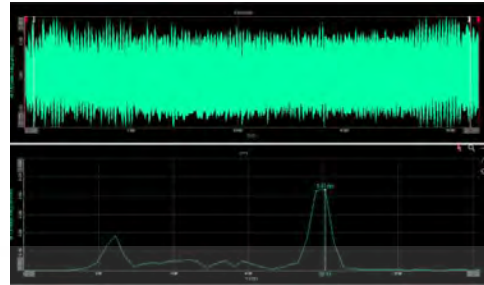


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

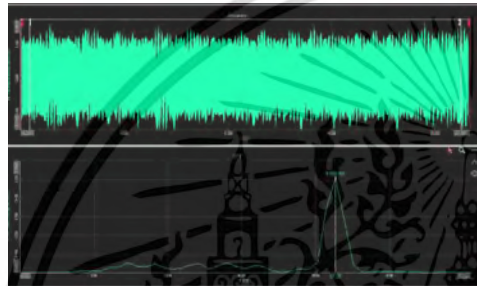
18.92 Hz



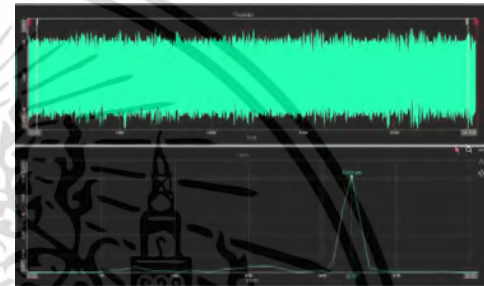
20.14 Hz



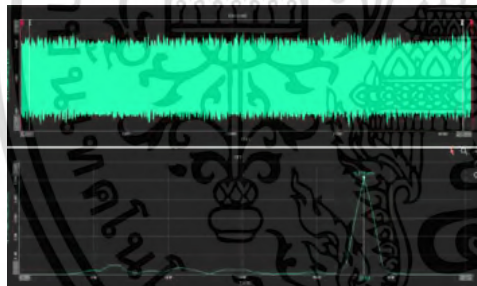
21.36 Hz



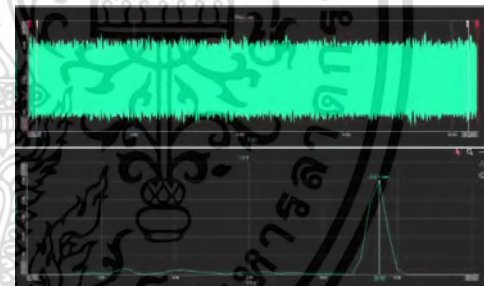
21.97 Hz



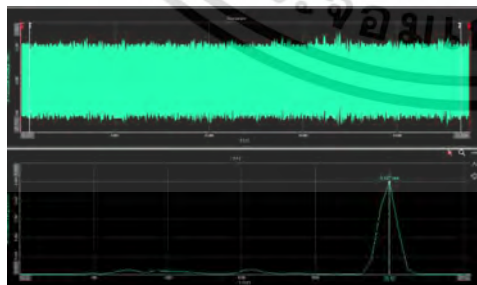
23.19 Hz



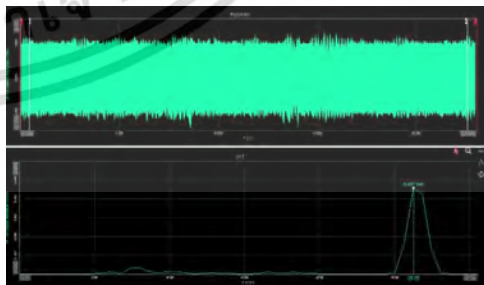
23.80 Hz



25.02 Hz

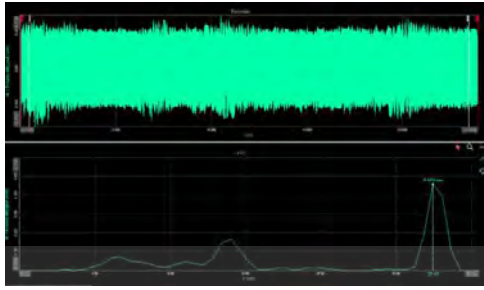


26.25 Hz

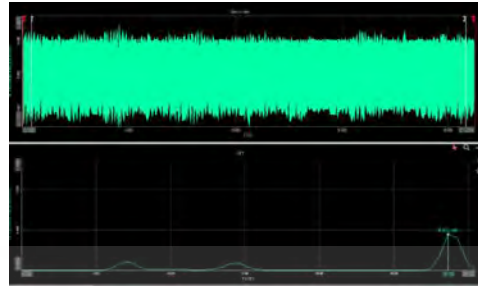


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

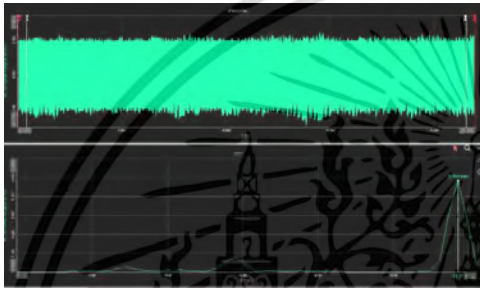
27.47 Hz



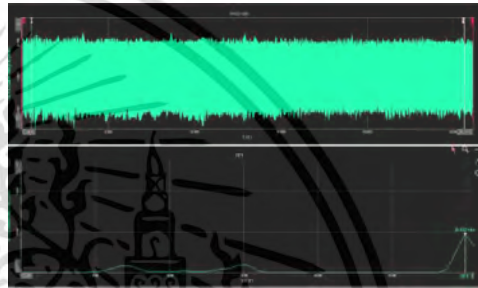
28.69 Hz



29.30 Hz




29.91 Hz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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=1k Hz		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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Handson Technology

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 5V - 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: $2.3V \leq V_{in} \leq V_{cc}$
- Enable signal input voltage range
 - Low: $-0.3 \leq V_{in} \leq 1.5V$ (control signal is invalid)
 - High: $2.3V \leq V_{in} \leq V_{cc}$ (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.

1 |
www.handsontec.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

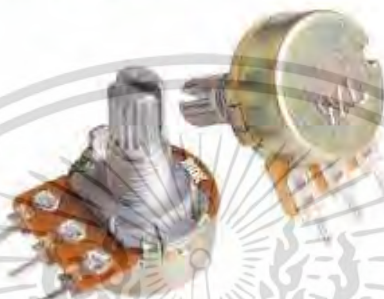


Handson Technology

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: 06mm
- Actuator Type: Knurled Shaft

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Acceleration - ATP

KISTLER

P. 1 - 2

Type 8692CS ... 8692CS0, 8692CSM1 ... 8692CS0M1

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 four colored 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	8692CS	8692CS0	8692CS0
		8692CSM1	8692CS0M1	8692CS0M1
Acceleration Range	g	±5	±10	±50
Acceleration Limit	g pk	±3	±6	±30
Threshold nom.	g rms	120	240	1000
Sensitivity ±5% @ 3 g _{rms} & 100Hz	mV/g	1000	500	100
Resonant Frequency mounted, nom.	kHz	9	22	20
Frequency Response ±3%	Hz	1 ... 3000	1 ... 6000	1 ... 6000
Phase Shift, <5°	Hz	4 ... 2000	4 ... 2000	4 ... 4000
Amplitude Non-linearity	%FSO	±1	±1	±5
Time Constant nom.	μs	1	1	1
Transverse Sensitivity	%	<1	<1	<1
Long Term Stability	%	±1	±1	±1
Environmental:				
Base Strain Sensitivity @ 250 μs	g/μs	<0.001	<0.001	<0.001
Shock Limit (0.2ms pulse width)	g _{pk}	3000	10000	10000
Temperature Coefficient of Sensitivity	%/°C	±0.02	±0.04	±0.04
Temperature Range Operating (4 mA supply current)	°F	32 ... 149	32 ... 149	32 ... 149
	°C	0 ... 65	0 ... 65	0 ... 65
Storage	°F	-10 ... 200	-10 ... 200	-10 ... 200
	°C	-23 ... 94	-23 ... 94	-23 ... 94
Output:				
Bias nom.	VDC		1	
Impedance	Ω		<500	
Voltage full scale	V		±5	
Current	mA		2	
Source:				
Voltage	VDC		20 ... 30	
Constant Current	mA		2 ... 20	
Impedance in	kΩ		100	

1 g = 9.80665 m/s², 1 inch = 25.4 mm, 1 gram = 0.00227 oz, 1 lb-ft = 0.1324 Nm

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

Kistler Instrument Corporation, 25 John Street Drive, Amherst NY 14228
Phone 716-491-5100, Fax 716-491-0226, e-mail: sales@kistler.com, www.kistler.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้