

การออกแบบตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้ด้วยคานโค้ง
สำหรับเครื่องจักรชนิดหมุน

SEMI-ACTIVE VIBRATION ABSORBER DESIGN WITH CURVED BEAM
FOR ROTATING MACHINE



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุที่เบี่ยงเบนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2563

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

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

การออกแบบตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้ด้วยคานโค้ง
สำหรับเครื่องจักรชนิดหมุน

SEMI-ACTIVE VIBRATION ABSORBER DESIGN WITH CURVED BEAM
FOR ROTATING MACHINE



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุที่เบี่ยงเบนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2563

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

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

Semi-active vibration absorber design with curved beam
for rotating machine



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับปริญญาโทเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ปริญญาโทปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้ด้วยคานโค้ง
สำหรับเครื่องจักรชนิดหมุน

SEMI-ACTIVE VIBRATION ABSORBER DESIGN WITH CURVED BEAM
FOR ROTATING MACHINE

ผู้จัดทำ

1. นาย ฤทธิ คมไธสง

รหัสประจำตัว 60010875

2. นาย วิทวัส ศรีมา

รหัสประจำตัว 60010936



อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

การออกแบบตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้ด้วยคานโค้งสำหรับเครื่องจักรชนิดหมุน

นาย ฤทธิ	คมไธสง	60010875
นาย วิทวัส	ศรีมา	60010936
ผศ.ดร. ณัฐวุฒิ เตไปวา	อาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา 2563		

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้สำหรับลดปัญหาการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรหมุนที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบหรือความถี่ของการสั่นขณะใช้งานในช่วง 15 ถึง 35 รอบต่อวินาที สำหรับหนึ่งมิติ

ในการควบคุมความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนได้ใช้อุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก STM32F103C8T6 - Black Pill และเกอท์ควบคุมแบบปรับความถี่ซิมซิปสำหรับปรับความแข็งของสปริง โดยสปริงถูกออกแบบให้อยู่ในลักษณะของคานโค้งเพื่อให้อุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนมีขนาดเล็ก ติดตั้งง่าย มีช่วงใช้งานที่กว้างและตอบสนองต่อภาระที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งตัวสปริงจะถูกปรับความแข็งให้เหมาะสมด้วยการเปลี่ยนแปลงความยาวของคานโค้งจากการปรับตำแหน่งของแขนยึดคานที่ทำให้ความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นตรงกับความถี่การสั่นของระบบเพื่อลดการสั่นของระบบลง โดยได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งสปริงกับความยาวของคานโค้งเพื่อหาฟังก์ชันตำแหน่งของแขนยึดคานสำหรับใช้ระบุมุมของเพลตามอเตอร์ รวมถึงได้ทำการทดลองสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของทฤษฎี ในด้านการออกแบบคานโค้งได้มีการคำนึงถึงลักษณะและวัสดุของคานที่เหมาะสมต่อช่วงความถี่ที่ต้องการ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ถูกวัดผลผ่านการทดสอบบนโปรแกรมจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของระบบ โดยเปรียบเทียบขนาดการสั่นของเครื่องจักรหมุนที่ติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้และไม่ได้ติดตั้ง พบว่าสามารถลดการสั่นสะเทือนได้สูงสุดถึง 65.49 เปอร์เซ็นต์ที่ความถี่ใช้งาน 15 รอบต่อวินาที โดยความถี่ใช้งานดังกล่าวอยู่ในใกล้ความถี่ธรรมชาติของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

SEMI-ACTIVE VIBRATION ABSORBER DESIGN WITH CURVED BEAM FOR ROTATING MACHINE

Ruthai Komthaisong 60010875
Wittawat Srirama 60010936
Asst.Prof. Dr.Nattawoot Depaiwa Advisor
Year 2020

ABSTRACT

The project aims to design and create the semi-active vibration absorber in order to reduce vibration in rotating machine which can change revolutions speed or vibration frequency while working in range of 15 to 35 hertz for one-dimension.

To control natural frequency of vibration absorber, the micro controller STM32F103C8T6 - Black Pill and absorption frequency controlling criteria has been used, to adjust spring stiffness. The spring was designed to be curve beam in order that the absorber was going to be small, simple to use, wide working range and timely action on changing load. The spring stiffness was adjusted appropriately by changing curve beam length from changing locker arm's position so that it produced natural frequency of absorber as equal as vibration frequency of system to reduce system vibration. Thus, the relation between spring stiffness and curve beam length has been analyzed to obtain function of locker arm's position for specifying angle of motor's shaft, including experiment to examine correctness of theory and method. In curve beam design part, the possible fracture of curve beam while carrying load and the suitable curve beam's character for working frequency range has been considered. The vibration absorber efficiency was assessed by testing on ADAMS motion simulation software. The efficiency was defined as a percentage reduction in vibration amplitude of primary system while mounting vibration absorber. The testing result has provided the maximum vibration reduction of 65.49 percentage at 15 hertz operating frequency which is close to natural frequency of primary system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ ต้องขอขอบคุณบุคคลต่าง ๆ ที่คอยช่วยเหลืออย่างดี ทั้ง คำแนะนำ ข้อมูลวิชาการ และรวมถึงกำลังใจ ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ เตไปวา อาจารย์ที่ปรึกษา ขอขอบคุณที่ให้ทั้งความรู้วิชาการ ขอเสนอแนะ คำปรึกษาในทุก ๆ ด้าน และช่วยทำให้ปริญญาานิพนธ์สมบูรณ์ที่สุด

และขอบคุณอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุก ๆ ท่านที่มีส่วนในการให้คำแนะนำ และให้หยิบยืมอุปกรณ์ รวมถึงเพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจ ให้การช่วยเหลือเสมอมา

ฤไท คมไธสง
วิหวัศ ศรีมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	V
สารบัญตาราง.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 ส่วนประกอบของปริญญานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 งานวิจัยและปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การสันสະเทือนในเครื่องจักรหมุน.....	4
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับอุปกรณ์ดูดซับการสันสະเทือน.....	6
2.3 การคำนวณการโก่งตัวของคานโค้ง.....	8
2.4 ทฤษฎีพื้นฐานการควบคุม.....	12
2.5 ปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 แผนการดำเนินงานและการออกแบบ.....	17
3.1 ผังการออกแบบอุปกรณ์ดูดซับการสันสະเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้.....	17
3.2 ระบบหลักสำหรับการทดสอบ.....	19
3.3 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ดูดซับการสันสະเทือน.....	21
3.4 การออกแบบอุปกรณ์ดูดซับการสันสະเทือน.....	25
3.5 การวิเคราะห์ภาระที่เกิดขึ้นบนคานโค้งเนื่องจากแรงภายนอก กระทำที่ปลายคานสำหรับระยะความยาวคานใด ๆ	27
3.6 การวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิด ที่เกิดขึ้นบนคานโค้งเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งของแขนยึดคาน.....	30
3.7 การวิเคราะห์ภาระที่เกิดขึ้นบนคานโค้งอันเนื่องมาจากน้ำหนักของคานสำหรับ ระยะความยาวคานใด ๆ	32
3.8 การหาฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างมุมกวาดของแขนยึดคาน กับความถี่ธรรมชาติของระบบดูดซับการสันสະเทือน.....	35
บทที่ 4 ระบบควบคุม.....	42
4.1 แบบจำลองการควบคุมแบบกึ่งปรับค่าได้ตามความถี่ซับซ้อน.....	42
4.2 อุปกรณ์ในระบบควบคุมและการต่อใช้งาน.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์เป็นของคณะวิศวกรรมศาสตร์ และสงวนสิทธิ์ในเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 การทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดหาความถี่ใช้งาน.....	44
4.4 การทำงานของระบบควบคุม.....	51
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	54
5.1 การทดลองสำหรับหาค่านิจสปริงของคานโค้งซึ่งขึ้นกับมุมหมุนของแขนยึดคาน.....	54
5.2 การทดสอบหาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้.....	58
บทที่ 6 สรุปผลการดำเนินการและข้อเสนอแนะ.....	65
6.1 สรุปผลการดำเนินการ.....	65
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	65
บรรณานุกรม.....	66
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบทั้งหมดของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่น และไม่ได้ติดตั้งที่ได้จากโปรแกรมจำลองพฤติกรรมของระบบ.....	67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองและแผนภาพวัตถุอิสระของเครื่องจักรหมุน.....	4
(ก) แบบจำลองของเครื่องจักรหมุนที่ถูกแรงไม่สมดุลกระทำ.....	4
(ข) แผนภาพวัตถุอิสระของระบบหลัก.....	4
รูปที่ 2.2 กราฟการตอบสนองของระบบที่มีการหมุนไม่สมดุล.....	5
รูปที่ 2.3 แสดงแบบจำลองและแผนภาพวัตถุอิสระของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่น.....	6
(ก) แบบจำลองระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน.....	6
(ข) แผนภาพวัตถุอิสระของระบบหลัก.....	6
(ค) แผนภาพวัตถุอิสระของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน.....	6
รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของคานโค้งและวิธีการวิเคราะห์.....	8
(ก) คานโค้ง (พื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ) โค้งเป็นรูปทรง 1 ใน 4 ของวงรี.....	8
(ข) นิยามรูปทรงเรขาคณิตของคาน.....	8
(ค) โมเมนต์ผสม : M_b โมเมนต์ดัด และ M_t โมเมนต์บิด (ทอร์ก) ซึ่งผลของแรงเฉือนที่มีต่อการเสียรูปของคานนั้นน้อยมาก (แรงเฉือนจึงไม่ถูกแสดงในรูป).....	8
รูปที่ 2.5 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมวงเปิด.....	12
รูปที่ 2.6 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมวงปิด.....	13
รูปที่ 2.7 แผนภาพบล็อกของตัวควบคุมเชิงสัดส่วน.....	13
รูปที่ 2.8 แผนภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบอินทิกรัล.....	14
รูปที่ 2.9 แผนภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์.....	14
รูปที่ 3.1 ผังแนวทางการออกแบบอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้.....	17
รูปที่ 3.2 แบบจำลองระบบหลัก.....	19
รูปที่ 3.3 แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน.....	21
รูปที่ 3.4 มอเตอร์กระแสตรง (DC motor).....	22
รูปที่ 3.5 จุดยึดคาน (Locker point).....	22
รูปที่ 3.6 คานโค้ง.....	23
รูปที่ 3.7 แขนยึดคาน (Locker arm).....	23
รูปที่ 3.8 มวลถ่วงน้ำหนัก (Concentrate mass).....	24
รูปที่ 3.9 โครงฐานสำหรับอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน (Base frame).....	24
รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการควบคุม.....	25
รูปที่ 3.11 แสดงการออกแบบการถ่วงมวลและการควบคุมตำแหน่งของคานโค้ง.....	25
รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะของจุดยึดคาน.....	26
รูปที่ 3.13 แสดงแบบจำลองของตัวคานกับแขนยึดคานและจุดยึดตำแหน่งคาน บนระบบพิกัดหลัก $X'Y'$	27
รูปที่ 3.14 แสดงแบบจำลองคานโค้งส่วนซ้ายที่มีความยาว S และกวาดเป็นมุม θ ใด ๆ บนระบบพิกัดหลัก $X'Y'$ และระบบพิกัดตรง xy	28
รูปที่ 3.15 แผนภาพอิสระของคานโค้งส่วนซ้ายบนระบบพิกัดตรง xy	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอสงวนสิทธิ์ในนามของสถาบันวิจัยและเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is for educational purposes only and is not to be used for commercial purposes.

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\sin\theta$ และ $1 - \cos\theta$ กับมุม θ	30
รูปที่ 3.17 (ก) กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลง ของโมเมนต์ตัดและโมเมนต์บิดกับมุม θ	31
(ข) กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งในการเปลี่ยนแปลง ของโมเมนต์ตัดและโมเมนต์บิดกับมุม θ	31
รูปที่ 3.18 แผนภาพอิสระของคานโค้งส่วนซ้ายที่สนใจเฉพาะผลจากน้ำหนักของคาน บนระบบพิกัดตรง (Local coordinate system) xy	32
รูปที่ 3.19 แผนภาพประกอบการวิเคราะห์หาแรงจุดเทียบเท่าจากน้ำหนักของคานโค้ง ซึ่งขึ้นกับมุมหมุน.....	33
รูปที่ 3.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกวาดของแขนยึดคาน θ กับค่านิจสปริงของคานโค้ง.....	38
รูปที่ 3.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านุมกวาดของแขนยึดคาน θ กับความถี่ธรรมชาติของระบบมวลสปริง 1 ฝั่ง.....	39
รูปที่ 3.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกวาดของแขนยึดคาน θ กับความถี่ธรรมชาติรวมของระบบดูดซับการสั่น.....	40
รูปที่ 3.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่านุมกวาดที่ได้จากการคำนวณ และฟังก์ชันค่าประมาณที่ได้จากการหาสมการเส้นโค้งตัวแทน.....	40
รูปที่ 4.1 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมในอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน.....	42
รูปที่ 4.2 แผนภาพบล็อกแสดงการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์.....	42
รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงการต่อใช้งานระบบควบคุม.....	43
รูปที่ 5.1 สปริงคานโค้ง.....	54
รูปที่ 5.2 อุปกรณ์วัดระยะ.....	54
รูปที่ 5.3 มวลถ่วง.....	55
รูปที่ 5.4 ตัวยึดคาน.....	55
รูปที่ 5.5 แสดงการจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์สำหรับการทดลองหาค่านิจสปริง.....	55
รูปที่ 5.6 แสดงการติดมวลถ่วงสำหรับการทดลองหาค่านิจสปริง.....	56
รูปที่ 5.7 การทดลองหาค่านิจสปริง.....	56
รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบค่านิจสปริงของคานโค้งระหว่างค่าทางทฤษฎี กับค่าจากการทดลอง.....	57
รูปที่ 5.9 อุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้.....	58
รูปที่ 5.10 อุปกรณ์จำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรหมุน.....	59
รูปที่ 5.11 แบบจำลองตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ.....	59
รูปที่ 5.12 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบในโปรแกรมจำลอง.....	59
รูปที่ 5.13 ตำแหน่งการวัดการสั่นสะเทือนของระบบในโปรแกรมจำลอง.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาและวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้เพื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงแหล่งที่มาทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.14 การระบุตัวแปรของสปริงในกับระบบ.....	60
รูปที่ 5.15 การระบุตัวแปรความเร็วรอบของจานหมุนไม่สมดุล.....	61
รูปที่ 5.16 แบบจำลองของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้ในโปรแกรมจำลอง.....	61
รูปที่ 5.17 แสดงตัวอย่างกราฟผลการทดสอบของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้และระบบที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้ที่ความถี่ใช้งานเดียวกัน 15 รอบต่อวินาที.....	63
รูปที่ 5.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนและความถี่ใช้งานของระบบหลักที่ติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้และระบบที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้.....	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของระบบหลัก.....	19
ตารางที่ 3.2 แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้.....	21
ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงผลการทดลองสำหรับหาค่านิจสปริงของคานโค้งที่ขึ้น กับมุมหมุนของแขนยึดคาน.....	57
ตารางที่ 5.2 แสดงตารางข้อมูลผลการเปรียบเทียบขนาดการสั่นสะเทือนของระบบหลัก ที่ติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้และระบบที่ ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้.....	63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

เครื่องจักรหมุนคือเครื่องจักรที่มีชิ้นส่วนหรือโครงสร้างอย่างน้อยหนึ่งส่วนเคลื่อนที่รอบจุดหมุนใดจุดหนึ่งในทิศทางเดียวกันอย่างต่อเนื่อง โดยเครื่องจักรหมุนถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในระดับครัวเรือนไปจนถึงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ มีการประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้าน เช่น เครื่องซักผ้า ปั่นน้ำ เทอร์โบน์ ระบบปรับอากาศ รวมถึงเครื่องจักรขนาดเล็กและขนาดใหญ่ในโรงงาน หนึ่งในปัญหาหลักที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรหมุนส่วนใหญ่คือการสั่นสะเทือนเนื่องจากความไม่สมดุลภายในร่วมกับการหมุนเป็นวัฏจักรขณะใช้งานทำให้เกิดการสั่นอย่างต่อเนื่องเป็นวัฏจักร การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นสร้างความเสียหายต่อเครื่องจักรให้มีอายุการใช้งานน้อยกว่าที่ควรจะเป็น รวมถึงสร้างเสียงรบกวนและความล้าต่อวัสดุโครงสร้างอีกด้วย

การป้องกันการสั่นสะเทือนในปัจจุบันจำแนกตามวิธีการได้ 2 วิธี วิธีที่หนึ่ง การถ่วงดุล (Balancing) คือการสร้างและออกแบบเครื่องจักรให้มีความสมบูรณ์โดยไม่ให้มีแรงลัพธ์กระทำออกมานอกระบบไม่ว่าระบบจะมีชิ้นส่วนที่กำลังเคลื่อนที่หรือไม่ก็ตาม ถึงแม้ว่าการสร้างและผลิตเครื่องจักรให้มีความสมบูรณ์นั้นมีโอกาสและสามารถกระทำได้ แต่ในความเป็นจริง การผลิตเครื่องจักรให้มีความสมบูรณ์จะมีความยุ่งยากและค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงทั้งในการออกแบบ ผลิต และการบำรุงรักษา วิธีที่สอง การออกแบบและใช้อุปกรณ์ช่วยลดการสั่นสะเทือนต่าง ๆ มาควบคุมการสั่นสะเทือน โดยยอมให้ระบบมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นภายใต้ขอบเขตที่กำหนดหรือยอมรับได้ ซึ่งการป้องกันการสั่นสะเทือนวิธีนี้เป็นที่นิยมในปัจจุบัน และสามารถกระทำได้โดย ควบคุมความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของระบบไม่ให้ตรงกับความถี่ธรรมชาติของแรงกระทำจากภายนอก ติดตัวหน่วงเพิ่มเข้าไปในระบบเพื่อลดขนาดการสั่น และใช้อุปกรณ์ช่วยลดการสั่นสะเทือนต่าง ๆ ได้แก่ ฉนวนการสั่นสะเทือน (Vibration Isolator) และอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน (Vibration Absorber)

ซึ่งการป้องกันการสั่นสะเทือนโดยการควบคุมความถี่ธรรมชาติและการเพิ่มตัวหน่วงในระบบสามารถกระทำได้โดย การเปลี่ยนแปลงมวล วัสดุของส่วนต่าง ๆ จุดรองรับ (Support) และลักษณะของข้อต่อ (Joint) แต่ในความเป็นจริง คุณสมบัติ ลักษณะ และการทำงานของเครื่องจักรถูกกำหนดขึ้นมาอย่างแน่นอนและเปลี่ยนแปลงได้ยาก ทำให้การป้องกันการสั่นสะเทือนสองวิธีข้างต้นกระทำได้ยาก

สำหรับการป้องกันการสั่นสะเทือนโดยใช้ฉนวนการสั่นสะเทือน (Vibration Isolator) นั้น อุปกรณ์ช่วยลดการสั่นสะเทือนนี้ถูกออกแบบมาสำหรับย่านความถี่ใช้งานช่วงหนึ่งเท่านั้น เมื่อความถี่ของการสั่นสะเทือนเปลี่ยนไปอยู่นอกย่านความถี่ใช้งาน ฉนวนการสั่นสะเทือนจะไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการในการใช้งานได้ และในการติดตั้งฉนวนการสั่นสะเทือนในระบบขนาดใหญ่ จะมีความยุ่งยากเกิดขึ้น เนื่องจากน้ำหนักและขนาดของเครื่องจักรที่มากทำให้การติดตั้งและเปลี่ยนฉนวนการสั่นสะเทือนเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานกระทำได้ยาก เช่น การติดตั้งฉนวนการสั่นสะเทือนในระบบทำความเย็นขนาดใหญ่

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

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

สำหรับการป้องกันการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน (Vibration Absorber) ซึ่งสามารถติดตั้งบนตัวเครื่องจักรภายหลังติดตั้งเครื่องจักรได้ จึงเป็นวิธีที่มีความสะดวกและเหมาะสมวิธีหนึ่งสำหรับการป้องกันการสั่นสะเทือน โดยอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน (Vibration Absorber) ถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้น มีทั้งแบบลักษณะตายตัว (Passive Vibration Absorber) คือไม่สามารถปรับค่าได้ และแบบลักษณะที่สามารถปรับค่าได้ (Active Vibration Absorber) ซึ่งแต่ละแบบมีจุดเด่นแตกต่างกันตามการประยุกต์และวัตถุประสงค์ในการใช้งาน

อย่างไรก็ตาม ในระบบทางกลโดยทั่วไปเครื่องจักรมีโครงสร้างแบบหลายองศาอิสระ (degree of freedom) ทำให้การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นประกอบด้วยการสั่นหลายความถี่พร้อมกัน และระบบทำงานบนหลายช่วงความถี่ แรงที่เกิดขึ้นจึงเป็นแรงพลวัตที่ความถี่ของแรงและขนาดของแรงไม่คงตัว ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษา ออกแบบ และสร้างอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้ (Active Vibration Absorber) โดยการใช้คานโค้ง (Curve Beam) ในการทำหน้าที่เป็นสปริงและใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Control) สำหรับการปรับค่าความแข็งสปริง (Stiffness) ของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. เพื่อลดการสั่นสะเทือนในเครื่องจักรหมุนด้วยอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้
2. เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้ด้วยสปริงคานโค้ง
3. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่านิจสปริงกับความยาวของคานโค้ง

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ลักษณะของสปริงที่ใช้สำหรับอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนใช้เป็นรูปแบบคานโค้งที่มีลักษณะการโค้งตามส่วนโค้งของวงกลม
2. ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับปรับค่าความแข็งสปริงของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนให้เหมาะสมจะใช้เป็นระบบควบคุมพีไอดี
3. ระบบจะถูกควบคุมการสั่นสะเทือนในหนึ่งมิติ
4. เครื่องจักรหมุนมีความถี่ใช้งานในช่วง 25 ถึง 35 รอบต่อวินาที
5. มวลของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนไม่เกินร้อยละ 25 ของมวลเครื่องจักรหมุน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การออกแบบอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนรูปแบบใหม่
2. วิธีการควบคุมการสั่นสะเทือนที่มีประสิทธิภาพ
3. วิธีการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมกับอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน
4. ทักษะการแก้ปัญหาในงานออกแบบอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

1.5 ส่วนประกอบของปริญญาโท

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบไปด้วย 5 บท ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของโครงการ รวมถึงแนวคิด วัตถุประสงค์ และรายละเอียดแบบสรุปของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกล่าวถึงหลักการ ทฤษฎีต่าง ๆ เกี่ยวกับการสิ้นสະเทือนและการควบคุม รวมถึงปริทัศน์วรรณกรรม

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีดำเนินงาน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และรวมถึงแบบจำลองของอุปกรณ์ดูดซับการสิ้นสະเทือน

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบระบบควบคุมที่ใช้กับอุปกรณ์ดูดซับการสิ้นสະเทือน

บทที่ 5 ผลการดำเนินงานกล่าวถึงผลการทดสอบระบบ ผลการทดสอบอุปกรณ์ดูดซับการสิ้นสະเทือน และรวมถึงผลการนำระบบควบคุมมาประยุกต์ใช้

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

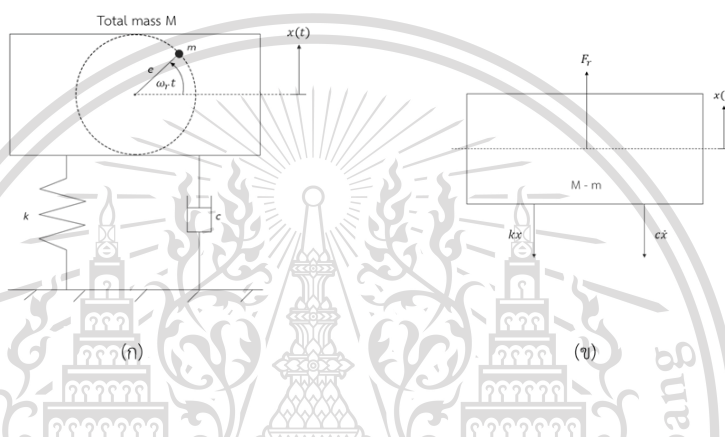
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2

งานวิจัยและปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 การสั่นสะเทือนในเครื่องจักรหมุน (Vibration in rotating machine)

เครื่องจักรหมุนส่วนใหญ่มีสาเหตุการสั่นสะเทือนมาจากความไม่สมดุลภายในซึ่งก่อให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางขึ้น ดังรูป 2.1(ก) แรงนี้เองทำให้ระบบเคลื่อนที่ตามทิศทางของแรงทำให้ตาเรามองเห็นเป็นการสั่นสะเทือน ยิ่งเครื่องจักรมีความเร็วรอบการหมุนสูงจะทำให้เห็นการสั่นกลับไปมาเร็วมากขึ้น



รูปที่ 2.1 (ก) แบบจำลองของเครื่องจักรหมุนที่ถูกแรงไม่สมดุลกระทำ
(ข) แผนภาพวัตถุอิสระของระบบหลัก

พิจารณาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยกำหนดให้มีการเคลื่อนที่เฉพาะในแนวตั้ง ทำให้ได้แผนภาพวัตถุอิสระของระบบดังรูป 2.1(ข) จะได้สมการการเคลื่อนที่ดังนี้

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_r \quad (2.1)$$

สมมุติให้มวลไม่สมดุลหมุนด้วยความถี่คงที่, ω_r และสร้างแรงหนีศูนย์กลางสูงสุดขนาด $m\omega_r^2$ ดังนั้นแรงที่กระทำกับระบบ คือ

$$F_r = m\omega_r^2 \sin \omega_r t \quad (2.2)$$

แทนสมการ (2.2) เข้าไปในสมการ (2.1) จะได้ว่า

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m\omega_r^2 \sin \omega_r t \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด จากสมการ (2.3) พบว่าที่สภาวะคงตัวมีผลการตอบสนองของระบบ ดังนี้ เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

$$x_p(t) = X \sin(\omega_r t - \phi) \quad (2.4)$$

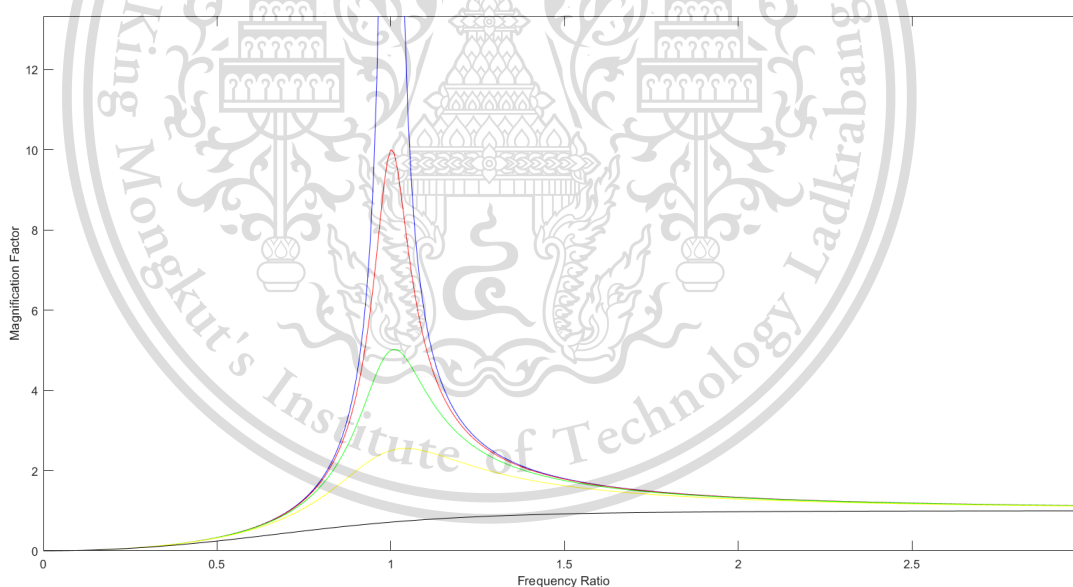
เมื่อ $r = \omega_r / \omega_n$ จะได้ว่าระยะขจัดสูงสุด, X คือ

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

และมีมุมเฟส (Phase angle) เท่ากับ

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2\zeta r}{1-r^2} \quad (2.6)$$

พิจารณาสมการ (2.5) พบว่า เมื่อความถี่การหมุนของมวลไม่สมดุลเท่ากับความถี่ธรรมชาติของระบบจะทำให้เกิดการสั่นพ้องขึ้น ($r = 1$) เมื่อเกิดในระบบที่มีค่าอัตราส่วนหน่วงต่ำ (ζ) จะทำให้เกิดขนาดระยะขจัดสูงมากสร้างการสั่นอย่างรุนแรงให้กับระบบ ดังแสดงในรูป 2.2 และระบบเกิดความเสียหายในที่สุด นี่คือนิยามสำคัญที่ไม่ควรถูกมองข้าม



รูปที่ 2.2 กราฟการตอบสนองของระบบที่มีการหมุนไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

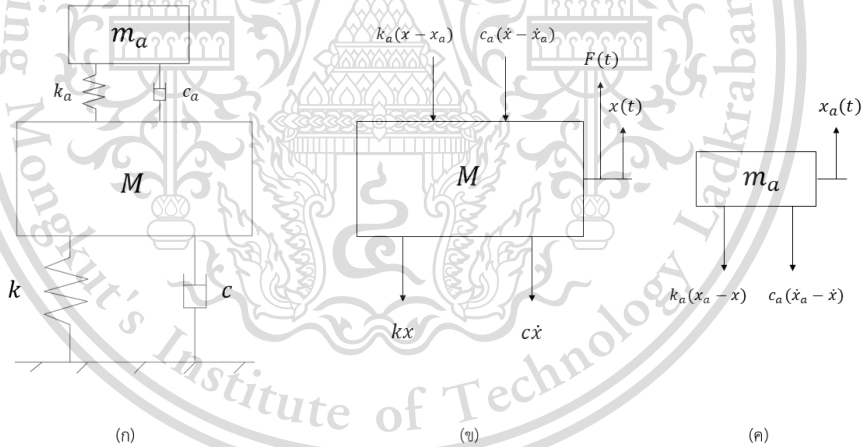
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน (Vibration Absorbers)

การเกิดแรงกระทำแบบฮาร์โมนิกส์บนเครื่องจักรส่งผลให้เครื่องจักรเกิดการสั่นสะเทือน ในเครื่องจักรหมุนขนาดของแรงคือแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากความไม่สมดุลมวลซึ่งมีค่าคงที่ สิ่งที่ทำให้ระบบเกิดการสั่นมากหรือน้อยมีปัจจัยมาจากความถี่ของแรงกระทำหรือความถี่การหมุนในเครื่องจักร ยิ่งเครื่องจักรหมุนที่ความถี่ใช้งานใกล้กับความถี่ธรรมชาติของระบบมาก ขนาดการสั่นจะยิ่งมากขึ้น

อุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน (Vibration Absorbers) ถูกออกแบบมาให้สามารถลดขนาดการสั่นสะเทือนของระบบหลักในช่วงความถี่ที่เครื่องจักรทำงาน ตามทฤษฎีที่กล่าวในหัวข้อ 2.1 พบว่าระบบที่มีระดับขั้นความเสรี (Degree of Freedom, DOF) เท่ากับ 1 จะพบความถี่วิกฤตหนึ่งค่าอยู่ที่ความถี่ธรรมชาติของระบบ แต่เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน (Vibration Absorbers) เข้าไปจะทำให้ระบบมีระดับขั้นความเสรี (Degree of Freedom, DOF) เท่ากับ 2 และจะมีความถี่วิกฤตสองค่า ถึงแม้ว่าความถี่วิกฤตจะเพิ่มขึ้น แต่จะพบว่าเมื่อความถี่ของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนตรงกับความถี่ใช้งานจะทำให้ขนาดการสั่นในระบบหลักสั่นน้อยที่สุด

พิจารณาสมการการเคลื่อนที่ของระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน (Vibration Absorbers) ด้วยแบบจำลองดังที่แสดงในรูปที่ 2.3(ก) เมื่อ M, k และ c คือ มวล ค่าความแข็งของสปริง และค่าความหน่วงของระบบหลัก ตามลำดับ และ m_a, k_a และ c_a คือ มวล ค่าความแข็งของสปริง และค่าความหน่วงของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน ตามลำดับ จากนั้นเขียนแผนภาพวัตถุอิสระของแต่ละระบบได้ดังรูปที่ 2.3(ข) และ รูปที่ 2.3(ค)



รูปที่ 2.3 (ก) แบบจำลองระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน

(ข) แผนภาพวัตถุอิสระของระบบหลัก

(ค) แผนภาพวัตถุอิสระของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน

จากรูปที่ 2.3 (ข) เมื่อระบบหลักถูกแรงกระทำ $F(t) = F_0 \sin \omega t$ จะมีสมการการเคลื่อนที่ ดังนี้

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx + c_a(\dot{x} - \dot{x}_a) + k_a(x - x_a) = F_0 \sin \omega t \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

จากรูปที่ 2.3 (ค) พิจารณาสมการเคลื่อนที่ของระบบได้ ดังนี้

$$m_a \ddot{x}_a + c_a (\dot{x}_a - \dot{x}) + k_a (x_a - x) = 0 \quad (2.8)$$

จากสมการ (2.7) และ (2.8) นำมาเขียนเป็นสมการการเคลื่อนที่ของระบบได้ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & m_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}(t) \\ \ddot{x}_a(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c + c_a & -c_a \\ -c_a & c_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{x}_a(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k + k_a & -k_a \\ -k_a & k_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x_a(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0 \\ 0 \end{bmatrix} \sin \omega t \quad (2.9)$$

สมมติให้คำตอบของสมการที่สภาวะคงตัว คือ

$$x(t) = X e^{j\omega t} = \begin{bmatrix} X \\ X_a \end{bmatrix} e^{j\omega t} \quad (2.10)$$

เมื่อ X คือขนาดการสั่นของระบบหลัก และ X_a คือขนาดการสั่นของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน แทนสมการ (2.10) ลงในสมการ (2.9)

$$\begin{bmatrix} (k + k_a - M\omega^2) + (c + c_a)\omega j & -k_a - c_a\omega j \\ -k_a - c_a\omega j & (k_a - m_a\omega^2) + c_a\omega j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ X_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

ใช้กรรมวิธีทางเมทริกซ์หาผลเฉลยของ X และ X_a ของสมการ (2.11) ได้ผลเฉลย ดังนี้

$$X = \frac{[(k_a - m_a\omega^2) + c_a\omega j] F_0}{\det(K - \omega^2 M + \omega j C)} \quad (2.12)$$

$$X_a = \frac{(k_a + c_a\omega j) F_0}{\det(K - \omega^2 M + \omega j C)} \quad (2.13)$$

โดยที่ M, C และ K เป็นสัมประสิทธิ์เมทริกซ์ พิจารณาสมการ (2.12) เพื่อให้ระบบหลักไม่เกิดการสั่นสะเทือน ($X = 0$) จะสามารถทำได้ เมื่อ

$$c_a = 0 \quad (2.14)$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

เมื่อกำหนดให้ ω_a เป็นความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน จัดรูปสมการ (2.15) ใหม่ จะได้ว่า

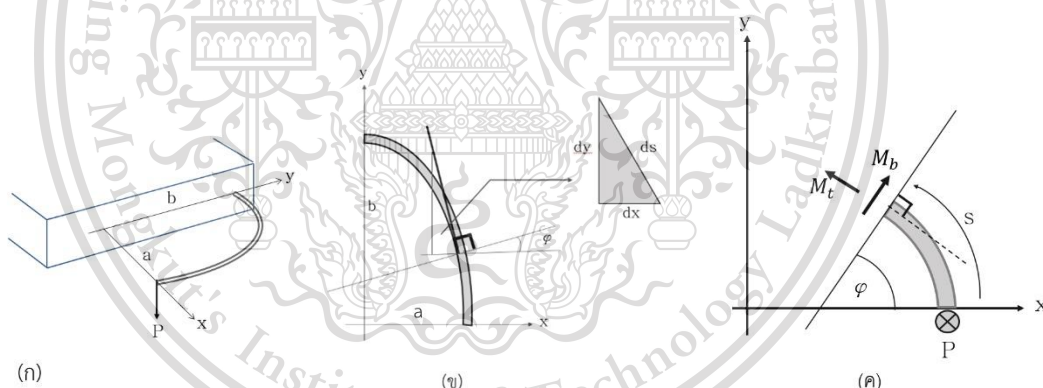
$$\omega_a = \omega \quad (2.16)$$

สมการ (2.14) และ (2.16) แสดงให้เห็นว่าวิธีการลดการสั่นสะเทือนของระบบหลักด้วยอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนจะทำได้เมื่อ อุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนไม่มีตัวหน่วง และค่าความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน (ω_a) ต้องมีค่าตรงกับความถี่ที่เครื่องจักรทำงาน (ω)

2.3 การคำนวณการโก่งตัวของคานโค้ง

ในงานวิจัยนี้ 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 2.4 (ก) คานโค้ง (พื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ) โค้งเป็นรูปทรง 1 ใน 4 ของวงรี

(ข) นิยามรูปทรงเรขาคณิตของคาน

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

การวิเคราะห์สามารถแบ่งตามกรณีได้ดังนี้

กรณีที่ 1 เมื่อระยะครึ่งแกนใดแกนหนึ่งของวงรี (a หรือ b) มีแนวโน้มเป็นศูนย์แล้ว คานโค้ง

จะมีแนวโน้มเป็นคานตรง ($a = b$) เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI} \quad (2.17)$$

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

$$\delta = \frac{\pi PR^3}{4 EI} + \left(\frac{3\pi}{4} - 2\right) \frac{PR^3}{GK_t} \quad (2.18)$$

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

เมื่อ R คือรัศมีมีความโค้งของคาน
 I คือค่าโมเมนต์ที่สองของพื้นที่หน้าตัดคาน
 EI คือค่าโมเมนต์ดัดของคานตรง
 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

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \quad (2.19)$$

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 (2.19) สำหรับ y จะได้

$$y = b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} = \beta a \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad (2.20)$$

เมื่อ $b = \beta a$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ทำการหาอนุพันธ์สมการที่ (2.20) เทียบกับ x จะได้

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-\frac{\beta x}{a}}{\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}} \quad (2.21ก)$$

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{b^2 x}{a^2 y} \quad (2.21ข)$$

สังเกตว่า ความชันของคาน (dy/dx) จะมีความชันเป็นลบเสมอตามที่แสดงในสมการ (2.21) (กำหนดให้ dx มีค่าเป็นลบแทน dy) และความยาว ds ของชิ้นส่วนคานจะเท่ากับ

$$ds = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} = -dx \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad (2.22)$$

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

$$\sin \varphi = -\frac{dx}{ds} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} \quad (2.23ก)$$

และ

$$\cos \varphi = -\frac{dy}{ds} = -\frac{\frac{dy}{dx}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} \quad (2.23ข)$$

โดยค่ามุม φ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ $\frac{\pi}{2}$ ทำให้ค่าของ $\cos \varphi$ และ $\sin \varphi$ เป็นบวก

เสมอ

ต่อไปเราจะทำการศึกษาคานที่วางตัวทำมุม φ กับแกน x โดยหน้าตัดคานที่มุมนี้ โมเมนต์ดัด M_b และโมเมนต์บิด M_t จะกระทำบนคานดังรูปที่ (2.4ก) และแรงเฉือนจะถูกกระทำไว้เนื่องจากผลของแรงเฉือนที่มีต่อการเสียรูปของคานนั้นค่อนข้างน้อย ทำให้เราได้สมการสมดุลของการหมุนตามแกน x และ y ดังนี้

$$M_b \cos \varphi - M_t \sin \varphi + P_y = 0 \quad (2.24ก)$$

$$M_b \sin \varphi + M_t \cos \varphi + P(a - x) = 0 \quad (2.24ข)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

จากนั้นแก้สมการสำหรับ M_b และ M_t จะได้

$$M_b = -Pycos\varphi - P(a-x)\sin\varphi \quad (2.25ก)$$

$$M_t = +Pysin\varphi - P(a-x)\cos\varphi \quad (2.25ข)$$

และพลังงานที่ถูกกักเก็บไว้ในคานเนื่องจากความเครียดที่เกิดขึ้นจากการเสียรูปของคานในช่วงยึดหยุ่นสามารถถูกกำหนดไว้ได้ ดังนี้

$$U = \frac{1}{2EI} \int_0^L M_b^2 ds + \frac{1}{2GK_t} \int_0^L M_t^2 ds \quad (2.26)$$

โดยที่ L คือ ความยาวของคาน ซึ่งจะไม่ถูกนำมาคำนวณในการหาปริพันธ์จำกัดเขต เพราะเราจะทำการหาปริพันธ์จำกัดเขตโดยขอบเขตขึ้นกับตัวแปร x

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

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{1}{2EI} \int_0^L 2M_b \frac{\partial M_b}{\partial P} ds + \frac{1}{2GK_t} \int_0^L 2M_t \frac{\partial M_t}{\partial P} ds \quad (2.27)$$

แทน M_b , $\frac{\partial M_b}{\partial P}$, M_t และ $\frac{\partial M_t}{\partial P}$ จากสมการ (2.25) ลงในสมการที่ (2.27) จะได้

$$\delta = \frac{P}{EI} \int_0^L (-ycos\varphi - (a-x)\sin\varphi)^2 ds + \frac{P}{GK_t} \int_0^L (ysin\varphi - (a-x)\cos\varphi)^2 ds \quad (2.28)$$

จากนั้นแทนค่า $\cos\varphi$, $\sin\varphi$, y , dy และ ds ที่ได้แสดงไว้ตั้งแต่สมการที่ (2.20) ถึง (2.23) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปร x ลงในสมการที่ (2.28) 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\delta = \frac{Pa^3}{EI} I_1(\beta) + \frac{Pa^3}{GK_t} I_2(\beta) \quad (2.29ก)$$
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

$$I_1(\beta) = \int_0^1 \left(\frac{\beta \sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}} \frac{dy}{dx}}{\sqrt{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} - \frac{\left(1-\frac{x}{a}\right)}{\sqrt{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} \right)^2 \sqrt{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2} d\left(\frac{x}{a}\right) \quad (2.29\text{ข})$$

และ

$$I_2(\beta) = \int_0^1 \left(\frac{\beta \sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}}{\sqrt{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} + \frac{\left(1-\frac{x}{a}\right) \frac{dy}{dx}}{\sqrt{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} \right)^2 \sqrt{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2} d\left(\frac{x}{a}\right) \quad (2.29\text{ค})$$

เทอม I_1 และเทอม I_2 ของสมการที่ (2.29) แสดงถึงผลของการตัดและการบิดต่อระยะโค้งของคานโค้งตามลำดับ จากนั้นทำการจัดรูปสมการที่ (13a) โดยใช้อัตราส่วนพัวของเป็น 0.3 จะได้

$$GK_t = \frac{E}{2(1+\nu)} 2I = \frac{1}{1.3} EI \quad (2.30)$$

แทนสมการที่ (14) ในสมการที่ (13a) จะได้

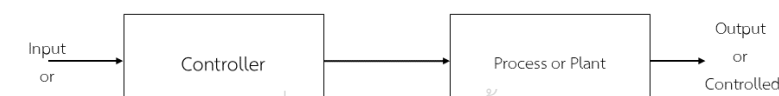
$$\delta = \frac{Pa^3}{EI} (I_1(\beta) + 1.3I_2(\beta)) = k(\beta) \frac{Pa^3}{EI} \quad (2.31)$$

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

2.4 ทฤษฎีพื้นฐานการควบคุม

2.4.1 ระบบควบคุมวงเปิด (Open-Loop Systems)

ระบบควบคุมวงเปิดมีโครงสร้างการทำงานดังรูปที่ 2.5 เริ่มต้นกระบวนการด้วยการรับอินพุต ซึ่งมักจะเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ผ่านระบบควบคุม (Controller) เข้าสู่ระบบ (System) แล้วออกมาเป็นเอาต์พุต (Output) ข้อเสียของระบบควบคุมวงเปิดคือไม่สามารถจัดการกับสิ่งรบกวนได้ส่งผลให้ค่าเอาต์พุตที่ได้คาดเคลื่อน



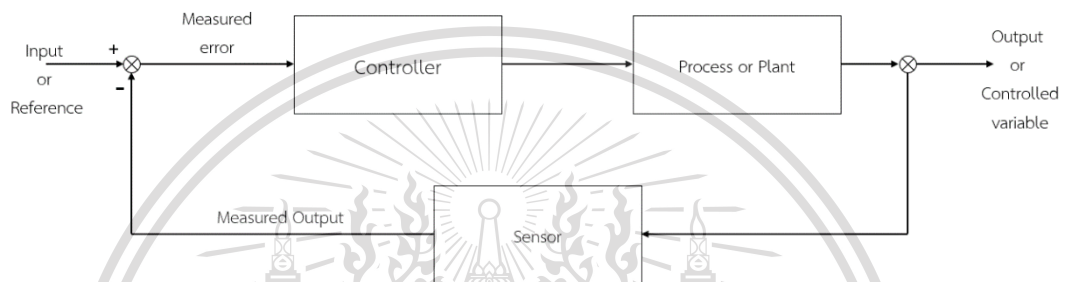
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ให้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ลงเนื้อหา และเนื้อหาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.4.2 ระบบควบคุมวงปิด (Closed-Loop (Feedback Control) Systems)

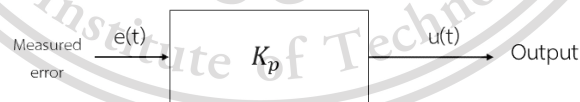
ระบบควบคุมวงปิดช่วยเพิ่มความเสถียรของระบบให้ได้ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่แม่นยำ การทำงานของระบบควบคุมวงปิด มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.6 เริ่มที่รับสัญญาณอินพุตเข้ามาผ่านระบบควบคุม (Controller) เข้าสู่ระบบ (System) แล้วออกมาเป็นเอาต์พุต (Output) จากนั้นป้อนกลับค่าเอาต์พุตเข้าสู่เครื่องมือวัด (sensor) นำสัญญาณที่ออกมาจากเครื่องมือวัดไปหักล้างกับค่าอ้างอิงอินพุต (Reference input) ค่าที่ได้เรียกว่า สัญญาณความคลาดเคลื่อน (Measured error) นำสัญญาณนี้กลับเข้าไปกระตุ้นการทำงานของระบบอีกรอบ ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะไม่มีสัญญาณความคลาดเคลื่อน หรือสัญญาณความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยมาก ๆ



รูปที่ 2.6 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมวงปิด

2.4.3 ระบบควบคุมเชิงสัดส่วน (Proportional control, P-control)

การควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.7 สัญญาณควบคุมจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสัญญาณความผิดพลาดที่เกิดจากผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณอ้างอิง



รูปที่ 2.7 แผนภาพบล็อกของตัวควบคุมเชิงสัดส่วน

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณความผิดพลาดเป็นไปตามสมการ

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.32)$$

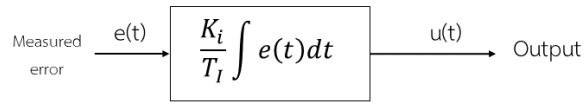
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เมื่อ $u(t)$ รับ คือ ค่าเอาต์พุต การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 $e(t)$ คือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากผลต่างสัญญาณเอาต์พุตและสัญญาณอ้างอิง
 K_p คือ อัตราขยายสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่าได้

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

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

2.4.4 การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control)

การควบคุมแบบอินทิกรัลมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.8 เทอมอินทิกรัลหรือความผิดพลาดสะสม มาจากผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา จากนั้นนำค่าความผิดพลาดสะสมที่ได้คูณอัตราขยายจะให้ผลลัพธ์เป็นเอาต์พุตที่ต้องการ



รูปที่ 2.8 แผนภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.8 สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

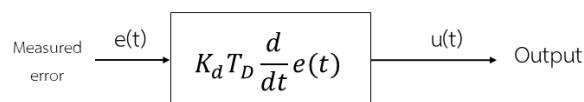
$$u(t) = \frac{K_i}{T_i} \int e(t) dt \quad (2.33)$$

เมื่อ $u(t)$ คือ ค่าเอาต์พุต
 $e(t)$ คือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากผลต่างสัญญาณเอาต์พุตและสัญญาณอ้างอิง
 K_i คือ อัตราขยายอินทิกรัล, ตัวแปรปรับค่าได้
 $\frac{1}{T_i}$ คือ reset rate

การควบคุมแบบอินทิกรัลจะเร่งกระบวนการให้เข้าสู่จุดที่ต้องการเร็วขึ้นและลดความผิดพลาดที่สถานะคงตัว (steady state)

2.4.5 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)

การควบคุมแบบอนุพันธ์มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.9 ผลลัพธ์เอาต์พุตเกิดจากค่าความชันของความผิดพลาดทุก ๆ เวลา คูณด้วยอัตราขยายอนุพันธ์



รูปที่ 2.9 แผนภาพบล็อกของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.9 สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$u(t) = K_d T_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.34)$$

เมื่อ	$u(t)$	คือ ค่าเอาต์พุต
	$e(t)$	คือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากผลต่างสัญญาณเอาต์พุตและสัญญาณอ้างอิง
	K_d	คือ อัตราขยายอนุพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้
	T_D	คือ ช่วงเวลาอนุพันธ์

เทอมอนุพันธ์จะชะลออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาต์พุตของระบบควบคุมและช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่จุดที่ต้องการ แต่อย่างไรก็ตามอนุพันธ์ของสัญญาณรบกวนที่ถูกขยายในระบบควบคุมจะไวมากต่อการรบกวนในเทอมของความผิดพลาดและสามารถทำให้กระบวนการไม่เสถียรได้ ถ้าสัญญาณรบกวนและอัตราขยายอนุพันธ์มีขนาดใหญ่เพียงพอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.5 ปรัชญาวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง

การสั่นสะเทือนได้รับความสนใจและอยู่ในชีวิตประจำวันผู้คนมาอย่างยาวนานสังเกตได้จากที่พวกเขานำมาประยุกต์ใช้ในเครื่องดนตรีเพื่อให้เกิดเสียงที่หลากหลาย เช่นใน กีตาร์ วัสดุและขนาดของสายแต่ละเส้นจะให้เสียงที่แตกต่างกันไป หรือ กลอง ขนาดแรงและตำแหน่งที่ตีก็จะให้เสียงที่แตกต่างกันไป จุดนี้เองที่เป็นจุดเริ่มทำให้ผู้คนสนใจในการศึกษาการสั่นสะเทือน

Galileo (1590) ค้นพบความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของเชือกผูกลูกตุ้มกับเวลาที่ใช้ในการแกว่งกลับไปกลับมาของลูกตุ้ม ต่อมาจึงได้ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของระดับเสียงกับการสั่นสะเทือนจนสามารถอธิบายได้อย่างชัดเจน

หลังจากนั้นก็ยังมีนักวิทยาศาสตร์และนักคณิตศาสตร์อีกหลายท่านพยายามอธิบายลักษณะกายภาพของการสั่นที่เกิดขึ้นในวัสดุด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ เริ่มจาก Hooke (1676) ได้นำเสนอทฤษฎีเกี่ยวกับความยืดหยุ่นในวัสดุ ปัจจุบันสมการที่เขาคิดยังถูกนำมาประยุกต์ใช้ Euler (1744) และ Bernoulli (1751) ได้นำเสนอสมการที่อธิบายการสั่นที่เกิดขึ้นบนปลายคานและระยะโค้งตัวของคาน Coulomb (1784) ได้ศึกษาทั้งทฤษฎีและทำการทดลองเกี่ยวกับการสั่นเมื่อให้แรงบิดกับเหล็กทรงกระบอก

ไม่นานองค์ความรู้เกี่ยวกับการสั่นสะเทือนก็ได้รับความสนใจจากเหล่าวิศวกร ตั้งแต่อดีตพวกเขาทำความเข้าใจและประยุกต์ใช้เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือน ทั้งนี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะในส่วนของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นเท่านั้น (Vibration absorbers)

Frahm (1909) แก้ปัญหาการสั่นสะเทือนของเพลลาใบพัดของเรือกลไฟที่เกิดจากแรงบิดด้วยการเพิ่มมวลติดสปริงเข้าไปต้านการสั่นในระบบหลัก

Ormondroyd & den Hartog (1928) กล่าวถึงทฤษฎีการลดการสั่นสะเทือนของระบบมวลสปริงไร้ตัวหน่วงเมื่อถูกแรงที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของระบบมากระทำ โดยการใช้อุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน (Vibration absorbers) พวกเขาเป็นกลุ่มแรกที่เผยแพร่แนวคิดนี้ผ่านหนังสือ Mechanical Vibrations (1940) โดย den Hartog

Hunt (1979) ศึกษาแนวคิดเกี่ยวกับอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้ และนำมาประยุกต์ใช้กับระบบไฮดรอลิกระหว่างใบพัดหลักและลำตัวของเฮลิคอปเตอร์

Mead (1999) ได้เผยแพร่หนังสือ Passive Vibration control ในหนังสือได้นำเสนอเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับการตอบสนองฮาร์โมนิกของคานสม่ำเสมอที่ความถี่สูง แม้ว่าหลักการและสมการจะมาจากทฤษฎีการวิเคราะห์คานเมื่อเกิดการสั่นที่ความถี่สูงบนหลังการการดัดงอของคลื่น (Flexural Wave) แต่ในความคิดเห็นเพิ่มเติมของ Mead บอกว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับ ความถี่ปานกลาง และต่ำได้เช่นกัน

Dahlberg (2004) นำเสนอเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีการคำนวณระยะขจัดของคานโค้งเมื่อมีแรงมากระทำ โดยแบ่งเป็นสองกรณี กรณีแรกคานวงรียึดไว้หนึ่งด้านอีกด้านปล่อยอิสระ กรณีที่สองคานวงรียึดสองด้าน โดยใช้ทฤษฎีข้อที่สองของ Castigliano (Castigliano's second theorem) ร่วมกับคุณสมบัติความยืดหยุ่นในวัสดุ ในการวิเคราะห์สมการระยะขจัดที่เกิดบนคานโค้ง

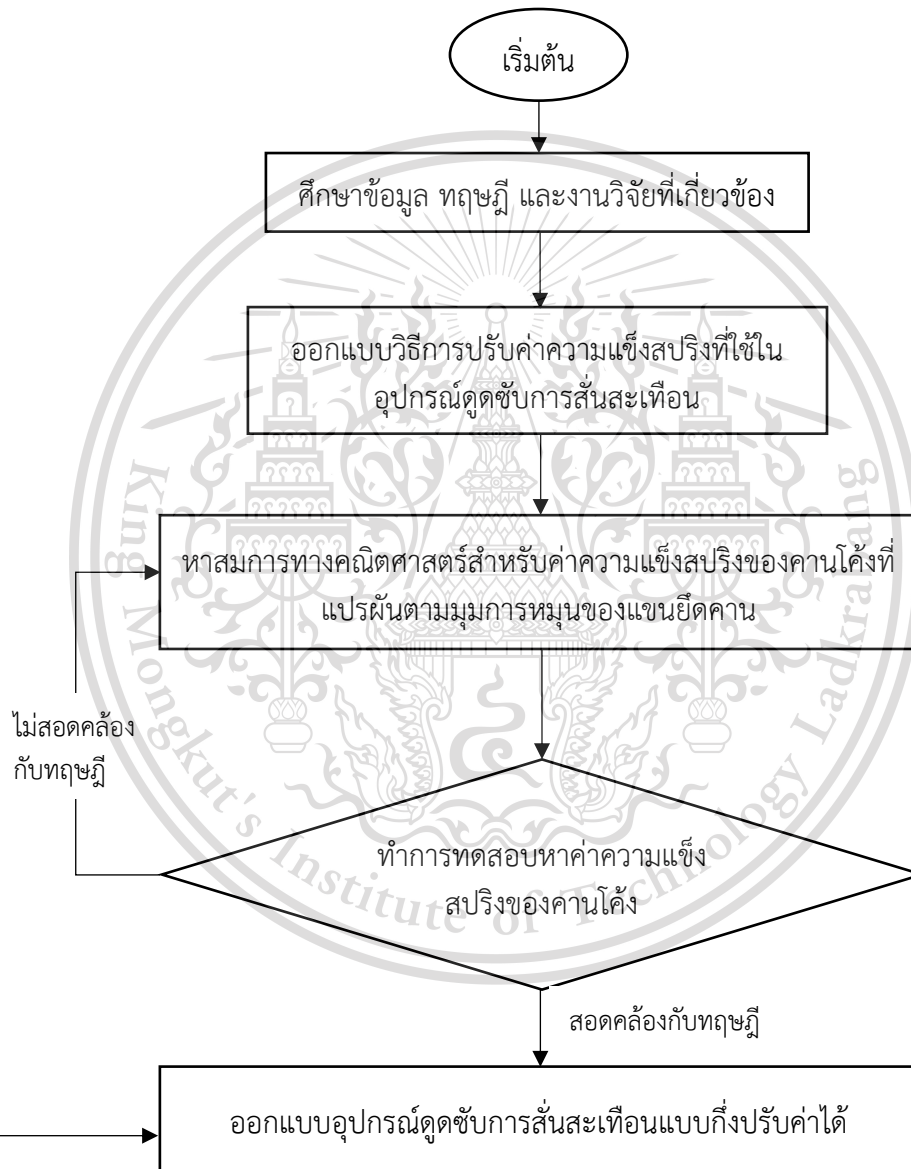
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บทที่ 3 แผนการดำเนินงานและการออกแบบ

3.1 ผังการออกแบบอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



ลดการสั่นได้น้อยกว่า
เกณฑ์ที่กำหนด

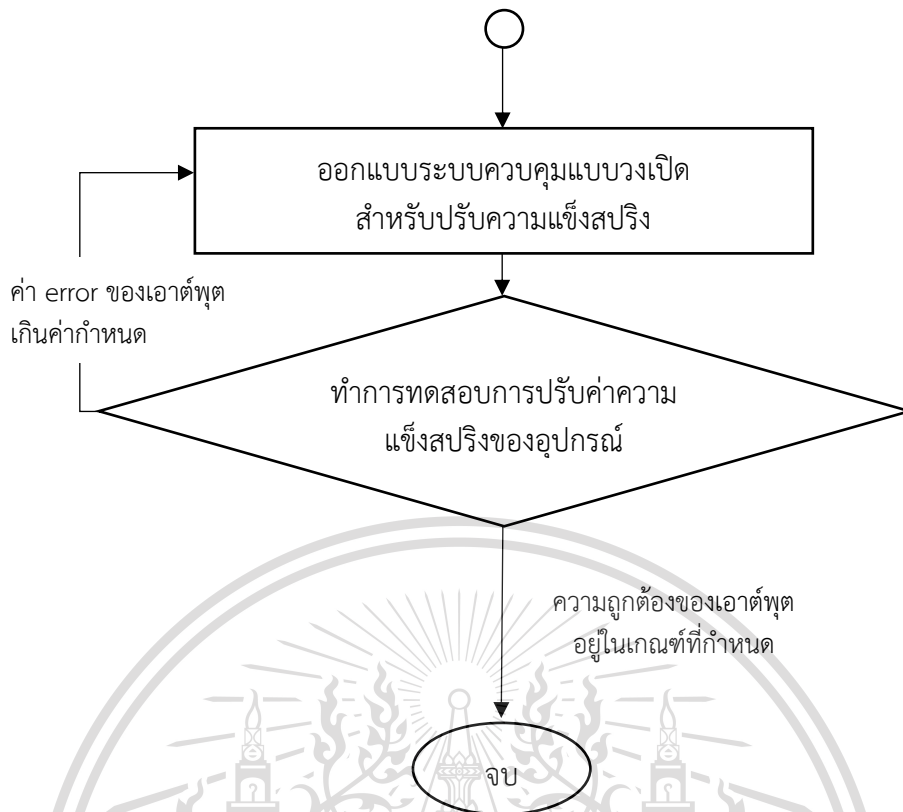
ทำการทดสอบอุปกรณ์กับเครื่องจักร
หมุนไม่สมดุลผ่านโปรแกรมจำลอง

สามารถลดการสั่นได้มากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาระดับสูงเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 3.1 ผังแนวทางการออกแบบอุปกรณ์ชุดขับเคลื่อนแบบกึ่งปรับค่าได้

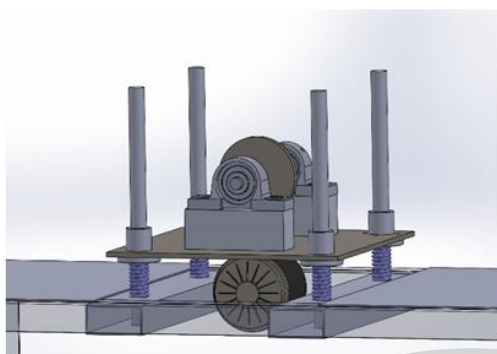
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3.2 ระบบหลักสำหรับการทดสอบ

3.2.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของแบบจำลองระบบหลัก



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.2 (ก) แบบจำลองอุปกรณ์จำลองการสั่นสะเทือน

(ข) อุปกรณ์จำลองการสั่นสะเทือน

อุปกรณ์จำลองการสั่นสะเทือนดังรูป 3.2 ถูกนำไปใช้เป็นระบบหลักในการทดลอง ระบบนี้สร้างแรงสั่นสะเทือนจากความไม่สมดุลของมวลถ่วงที่เชื่อมกับเฟลตามอเตอร์และเพื่อให้ระบบเกิดการสั่นเฉพาะในแนวตั้ง จึงติดตั้งลูกปืนสไลด์ไว้กับระบบหลักเพื่อบังคับให้ระบบหลักเคลื่อนที่ได้เฉพาะในแนวตั้ง มีส่วนประกอบดังนี้

ลำดับ	ชื่อชิ้นส่วน	จำนวน
1	แผ่นอลูมิเนียม 30*30 ซม.	1
2	ตลับลูกปืนตุ๊กตา	2
3	มอเตอร์กระแสตรง 350 วัตต์ 24 โวล	1
4	เฟลา 12 มม.	1
5	มู่เล่ย์	2
6	สายพาน	1
7	แผ่นจานแบบไม่สมดุล	1
8	ลูกปืนสไลด์	4
9	เฟลา 20 มม.	4
10	สปริง	4
11	ไม้ฉาก	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาตัวโครงนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดตารางที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของระบบหลักออกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3.2.2 ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบหลัก

ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบจะช่วยให้เราประมาณการได้ว่าช่วงความถี่ที่มากกระทำช่วงไหนจะทำให้ระบบเกิดความเสียหาย ยิ่งความถี่ที่มากกระทำใกล้กับความถี่ธรรมชาติของระบบจะทำให้ระบบยิ่งสั่นมากขึ้น โดยความถี่ธรรมชาติของระบบใด ๆ จะมีค่าเท่ากับ

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.15)$$

ซึ่งมวลรวมของระบบหลักมีค่า $m = 7 \text{ kg}$ และมีค่าคงที่สปริงรวม $k = 51.137 \text{ N/mm}$ ดังนั้นระบบหลักนี้จะมีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ

$$\omega = \sqrt{\frac{51.137 \cdot 1000}{7}}$$

$$\omega = 85.471 \text{ rad/s}$$

หรือ ระบบนี้มีความถี่ธรรมชาติตรงกับ 13.6 Hz

3.2.3 แรงที่กระทำกับระบบหลัก

แรงที่กระทำกับระบบหลักเกิดขึ้นจากการติดตั้งมวลไม่สมดุลบนเพลามอเตอร์ แรงที่เกิดขึ้นเป็นแรงหนีศูนย์กลาง ดังนั้นแรงที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับสมการ (2.2)

$$F_r = me\omega_r^2 \sin \omega_r t \quad (3.19)$$

เมื่อ m คือ ขนาดของมวลถ่วง มีขนาดเท่ากับ 0.1 kg
 e คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเพลาลึงจุดศูนย์กลางมวล คือ 3.75 cm
 ω_r คือ ความถี่ใช้งานมอเตอร์ในขณะนั้น

จากข้อมูลข้างต้นแรงที่กระทำกับระบบหลัก คือ

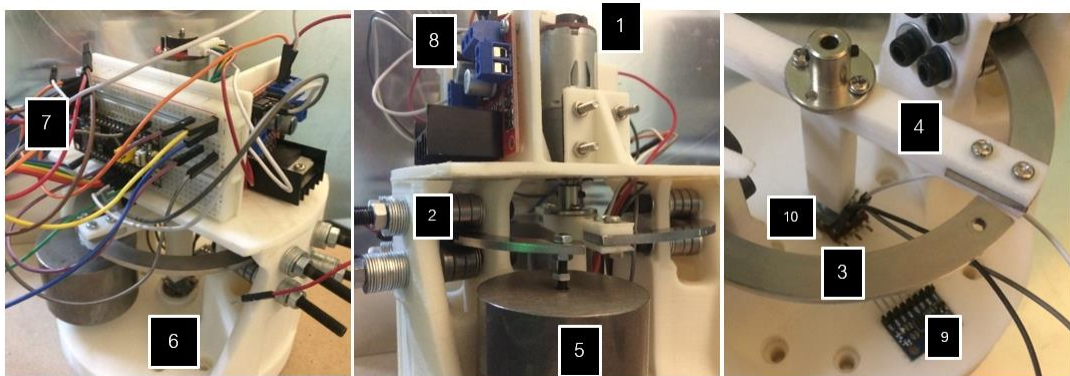
$$F_r = 0.00375\omega_r^2 \sin \omega_r t$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3.3 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน



รูปที่ 3.3 แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน

หมายเลขชิ้นส่วน	ชื่อชิ้นส่วน	จำนวน
1	มอเตอร์กระแสตรง	1
2	จุดยึดคาน	2
3	คานโค้ง	2
4	แขนยึดคาน	1
5	มวลถ่วง	2
6	โครงฐาน	1
7	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	1
8	โมดูลขับมอเตอร์กระแสตรง	1
9	อุปกรณ์ตรวจจับความเร่ง	1
10	ตัวต้านทานปรับค่าได้	1

ตารางที่ 3.2 แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

1. มอเตอร์กระแสตรง (DC motor)



รูปที่ 3.4 มอเตอร์กระแสตรง (DC motor)

เพลลาของมอเตอร์กระแสตรง (DC motor) จะถูกยึดติดกับแขนยึดคานเพื่อใช้ควบคุมการหมุนของคานโค้ง โดยมอเตอร์กระแสตรง (DC motor) จะถูกควบคุมความเร็วรอบและตำแหน่งผ่านชุดควบคุม

2. จุดยึดคาน (Locker point)



รูปที่ 3.5 จุดยึดคาน (Locker point)

จุดยึดคาน (Locker point) ประกอบไปด้วยชุดแปรง 695zz จำนวน 4 ชุด ชุดละ 3 วง ซึ่งแต่ละชุดจะถูกสวมเข้ากับโบลท์ขนาด M5 ที่ซึ่งถูกยึดเข้ากับตัวโครงฐาน(Base frame) โดยจุดยึดคานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้สำหรับกำหนดระยะความยาวของคานโค้งในส่วนปลายอิสระ (ส่วนที่เกิดการสั่น) ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3. คานโค้ง (Curved beam)



รูปที่ 3.6 คานโค้ง

คานโค้งทั้งสองถูกใช้ทำหน้าที่เป็นสปริงในอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel 304) โดยปลายคานฝั่งหนึ่งถูกยึดเข้ากับแขนยึดคานและปลายอีกฝั่งถูกติดมวลถ่วงไว้ โดยมีลักษณะและขนาดดังรูปที่ 3.6

4. แขนยึดคาน (Locker arm)



รูปที่ 3.7 แขนยึดคาน (Locker arm)

แขนยึดคานมีหน้าที่จับยึดคานโค้งสำหรับการปรับเปลี่ยนตำแหน่งมุมของคานโค้งให้มีค่านิจสปริงตามที่ต้องการ โดยถูกออกแบบให้มีลักษณะเหมือนไม้กางเขน ซึ่งแขนในแนวนอนทั้งสองทำหน้าที่สำหรับจับยึดคานโค้งทั้งสองข้าง ในขณะที่แขนบนทำหน้าที่จับยึดกับเพลาของมอเตอร์กระแสตรง (DC motor) และแขนล่างทำหน้าที่จับยึดกับตัวต้านทานปรับค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เช่าได้เห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

5. มวลถ่วงน้ำหนัก



รูปที่ 3.8 มวลถ่วงน้ำหนัก (Concentrate mass)

มวลถ่วงน้ำหนัก 0.5 kg จะถูกตัดไว้ที่ปลายคานโค้งทั้งสองคานและทำหน้าที่เป็นมวลในระบบดูดซับการสั่น โดยถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกตันซึ่งทำมาจากเหล็ก มีขนาดรัศมีวงกลม 9 มม. ยาว 45 มม.

6. โครงฐาน



รูปที่ 3.9 โครงฐานสำหรับอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน (Base frame)

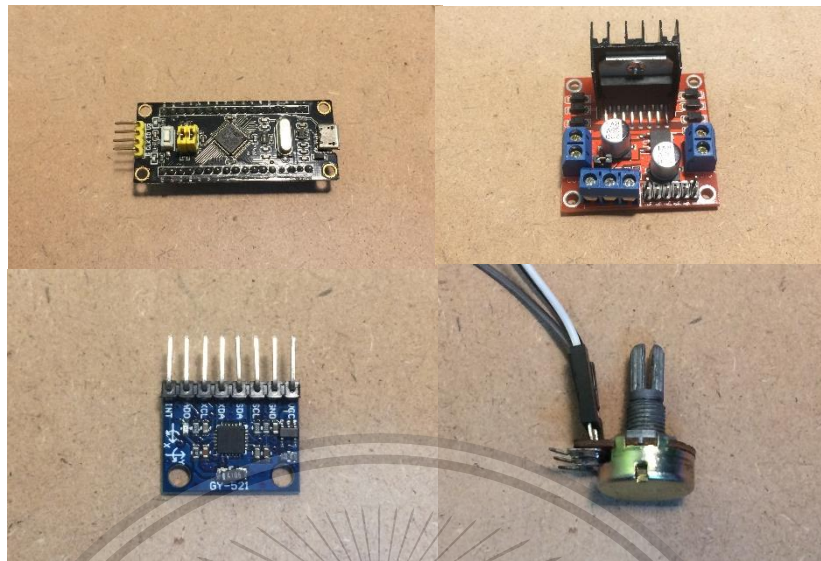
โครงฐานสำหรับรองรับอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยมีพื้นที่ว่างตรงกลางภายในสำหรับรองรับระบบทางกลและพื้นที่ส่วนด้านบนสำหรับรองรับระบบควบคุม เนื่องจากต้องการลดความยุ่งยากในการสร้าง น้ำหนักเบา และประหยัดจึงสร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติ โดยถูกออกแบบให้มีความแข็งแรง และสามารถรองรับภาระแบบดัดและบิดได้ดี เพื่อให้ตัวโครงฐานเกิดการเสียรูปเนื่องจากแรงกระทำน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

6. ชุดควบคุม



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการควบคุม

อุปกรณ์สำหรับระบบควบคุมประกอบไปด้วย บอร์ดควบคุม อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ ความเร็ว โมดูลเฉพาะสำหรับมอเตอร์กระแสตรง (DC motor) ตัวต้านทานปรับค่าได้และแบตเตอรี่ ซึ่งรายการทั้งหมดจะกล่าวถึงอย่างละเอียดในบทถัดไป

3.4 การออกแบบกลไกการทำงานสำหรับอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน

3.4.1 การออกแบบการถ่วงมวลและการควบคุมตำแหน่งของคานโค้ง

เพื่อให้เกิดระบบมวล-สปริงของระบบดูดซับการสั่นสะเทือน มวลถ่วงจะถูกยึดเข้ากับปลายสปริงคานโค้งด้วยน็อตและสลักเกลียวตรงตำแหน่งที่เจาะรูไว้เพื่อให้แรงกระทำที่ปลายคานเนื่องจากภาระความเฉื่อยของมวลถ่วงเป็นแบบแรงจุด (Concentrate force) และปลายอีกฝั่งของคานโค้งจะถูกยึดเข้ากับแขนยึดคานที่ซึ่งถูกยึดเข้ากับเพลาของมอเตอร์ การปรับเปลี่ยนค่านิสสปริงของคานโค้งสามารถทำได้จากการปรับเปลี่ยนระยะความยาวของคานในส่วนที่เกิดการสั่นจากการควบคุมตำแหน่งคาน โดยการควบคุมตำแหน่งคานนี้จะถูกกระทำโดยผ่านการควบคุมตำแหน่งการหมุนของเพลามอเตอร์ซึ่งถูกควบคุมโดยระบบควบคุม ลักษณะและการจัดวางที่กล่าวมาข้างต้นแสดงดังรูปที่ 3.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ทางเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.11 แสดงการออกแบบการถ่วงมวลและการควบคุมตำแหน่งของคานโค้ง

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

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

3.4.2 ออกแบบจุดยึดคาน

จุดยึดคานถูกใช้สำหรับกำหนดระยะความยาวของคานโค้งในส่วนปลายอิสระ (ส่วนที่เกิดการสั่น) เพื่อให้คานนิจสปริงที่ได้จากคานโค้งสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ตามที่ต้องการ โดยจุดยึดคานประกอบไปด้วยชุดแบริ่งจำนวน 4 ชุด ชุดละ 3 วง ซึ่งแต่ละชุดจะถูกสวมเข้ากับโบลท์ซึ่งติดอยู่กับโครงฐาน (Base frame) เพื่อให้คานโค้งสามารถที่จะเปลี่ยนตำแหน่งและถูกจำกัดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งในเวลาเดียวกันได้ตลอดเวลา โดยชุดแบริ่ง 2 ชุดอยู่บนคานโค้งและอีก 2 ชุดอยู่ที่คานโค้ง การประกบชุดแบริ่งเหนือและใต้คานโค้งแบบแน่นพอดีจะทำให้คานโค้งถูกจำกัดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและเกิดการต้านการบิดที่จุดยึดคานขึ้น การวางชุดแบริ่งในตำแหน่งหน้าและหลังจะทำให้เกิดการต้านการดัดตัวของคานโค้งที่จุดยึดคานขึ้น ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะของจุดยึดคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

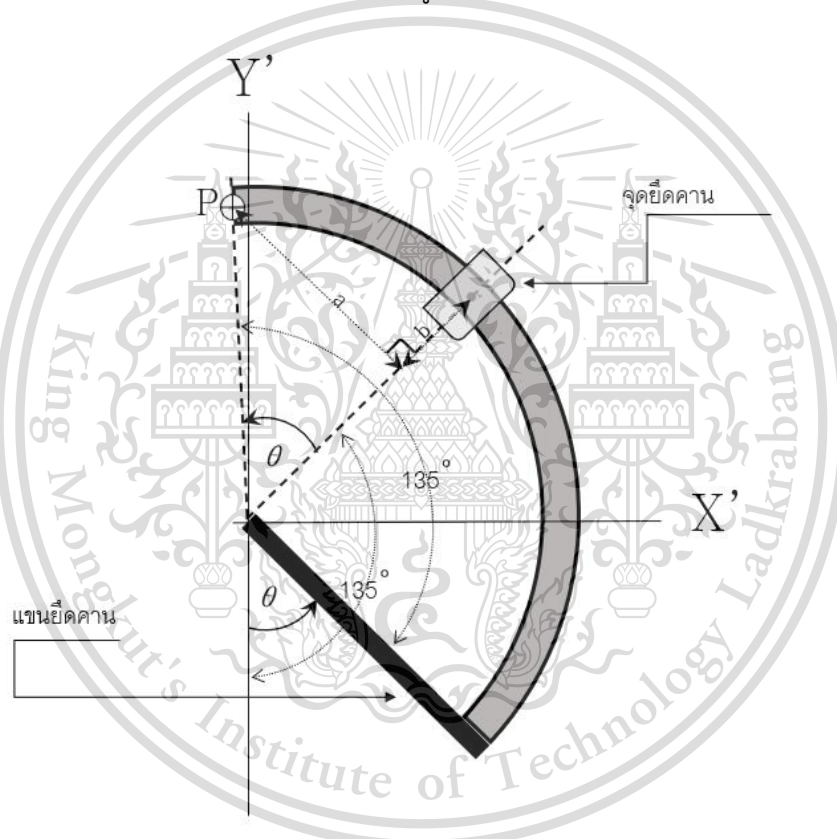
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

3.5 การวิเคราะห์ภาระที่เกิดขึ้นบนคานโค้งเนื่องจากแรงภายนอกกระทำที่ปลายคาน สำหรับระยะความยาวคานใด ๆ

จากแบบจำลองของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้น เราใช้คานโค้งที่มีลักษณะการโค้งแบบวงกลมเป็นสปริง โดยที่ปลายคานข้างหนึ่งติดอยู่กับแขนยึดคานสำหรับหมุนคานไปยังตำแหน่งต่าง ๆ และใช้จุดยึดคานเพื่อกำหนดความยาวของคานส่วนปลายอิสระ จะเห็นได้ว่าค่านิจสปริงของคานโค้งมีความสัมพันธ์กันกับมุมกวาดของแขนยึดคาน เนื่องจากค่านิจสปริงของคานโค้งสามารถถูกปรับเปลี่ยนได้จากการเปลี่ยนแปลงระยะความยาวของคานซึ่งขึ้นกับมุมกวาดของแขนยึดคาน ที่ทำมุม θ กับแกน Y' (เมื่อ $0^\circ \leq \theta \leq 135^\circ$)

เมื่อทำการร่างโครงสร้างจำลองของตัวคานโค้ง แขนยึดคานและจุดยึดคานบนระบบพิกัดหลัก (Global coordinate system) $X'Y'$ จะได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงแบบจำลองของตัวคานกับแขนยึดคานและจุดยึดตำแหน่งคานบนระบบพิกัดหลัก $X'Y'$

โดยที่ P คือแรงกระทำภายนอกเนื่องจากน้ำหนักของมวลถ่วงที่ปลายคานซึ่งเป็นค่าคงที่
 θ คือมุมกวาดที่แขนยึดคานทำกับแกน Y'
 a คือระยะครึ่งแกนของคานโค้งที่วัดจากจุดที่แรงกระทำถึงจุดตัดตั้งฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 จากรูปที่ 3.13 จะเห็นว่าเมื่อแขนยึดคานเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ และทำมุม θ กับแกน Y' ทำให้คานโค้งทางด้านซ้ายของจุดยึดคาน (ส่วนปลายอิสระ) ทำหน้าที่เป็นสปริงที่มีค่านิจสปริง

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

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

เปลี่ยนไปตามระยะความยาวของคานโค้งส่วนซ้าย และหากเราสังเกตที่คานโค้งส่วนปลายอิสระนี้ (คานส่วนด้านซ้ายของจุดยึดคาน) จะเห็นว่าคานโค้งมีรูปทรงคล้าย 1 ใน 4 ส่วนของวงรีซึ่งมีระยะครึ่งแกน a และ b แต่เนื่องจากอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนที่เราได้ออกแบบไว้ข้างต้นใช้คานโค้งที่มีลักษณะการโค้งตามส่วนโค้งของวงกลม เราจึงไม่สามารถนำวิธีการคำนวณการโก่งตัวของคานโค้ง (หัวข้อ 2.3) มาใช้ได้โดยตรง ดังนั้นในหัวข้อนี้เราจะทำการวิเคราะห์การโก่งตัวของคานโค้งใหม่ให้มีความสอดคล้องกับรูปแบบคานโค้งที่เราใช้โดยนำวิธีการคำนวณการโก่งตัวของคานโค้งในหัวข้อที่ 2.3 มาประยุกต์ใช้ รวมถึงการหาฟังก์ชันความสัมพันธ์ของมุมกวาด θ ซึ่งขึ้นกับคานิจสปริงของคานโค้งจากการวิเคราะห์แบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้

หากเราทำการวิเคราะห์คานโค้งร่วมกับแกนยึดคานที่ตำแหน่ง θ ใด ๆ และกำหนดระบบพิกัดตรง (local coordinate system) xy ขึ้นบนคานโค้ง ณ ตำแหน่งจุดยึดคาน โดยแกน y ในระบบพิกัดตรงจะทำมุมตั้งฉากกับหน้าตัดคานเสมอ



รูปที่ 3.14 แสดงแบบจำลองคานโค้งส่วนซ้าย (ส่วนปลายอิสระ) ที่มีความยาว S และกวาดเป็นมุม θ ใด ๆ บนระบบพิกัดหลัก (Global coordinate system) $X'Y'$ และระบบพิกัดตรง (local coordinate system) xy

โดยที่ R คือรัศมีมีความโค้งของคาน

S คือความยาวของคานโค้งจากจุดถ่วงมวลถึงจุดยึดคาน

จากรูปที่ 3.14 จะเห็นว่าระยะ a และ b มีความสัมพันธ์กับมุม θ ของแกนยึดคาน ดังนี้

$$a = R \sin \theta \quad (3.20)$$

$$b = R(1 - \cos \theta) \quad (3.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ตีพิมพ์และมีความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของคานโค้งส่วนซ้าย S และมุม θ คือให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

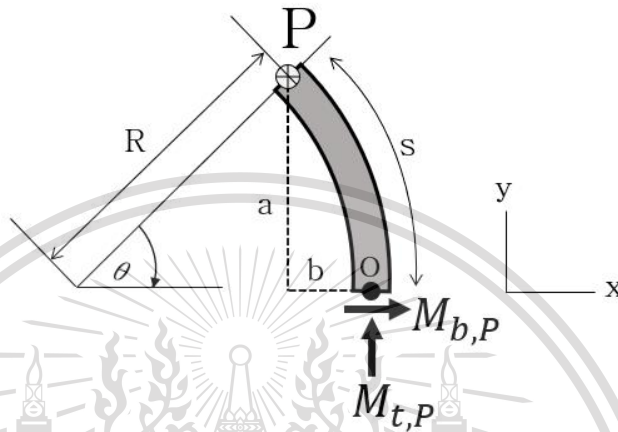
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = R\theta \quad (3.22)$$

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

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

จากนั้นเมื่อวิเคราะห์ระบบแรงและโมเมนต์ที่กระทำเฉพาะบนคานโค้งส่วนซ้าย (ส่วนปลายอิสระ) จะเห็นว่าแรงภายนอก P ที่กระทำบนปลายคานโค้งจะทำให้เกิดแรงเฉือนภายในและโมเมนต์ปฏิกิริยาขึ้นในเนื้อวัสดุบนหน้าตัดของคานโค้งส่วนซ้าย ณ ตำแหน่งจุดยึดคาน ซึ่งเขียนแผนภาพอิสระบนระบบพิกัดตรง (local coordinate system) xy ได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แผนภาพอิสระของคานโค้งส่วนซ้ายบนระบบพิกัดตรง (Local coordinate system) xy

จากรูปที่ 3.15 หน้าตัดคานโค้งที่ตำแหน่ง O (จุดยึดคาน) โมเมนต์ดัด $M_{b,P}$ และโมเมนต์บิด $M_{t,P}$ จะกระทำบนคานดังรูป และแรงเฉือนภายใน F_o บนหน้าตัดคานจะถูกกลบไว้เนื่องจากผลของแรงเฉือนที่มีต่อการเสียรูปของคานนั้นค่อนข้างน้อย

จากการวิเคราะห์สมดุลการหมุนของคานโค้งส่วนซ้ายรอบแกน x และ y ที่จุด O บนระบบพิกัดตรง (Local coordinate system) จะได้สมการสมดุลการหมุนตามระบบพิกัดตรงดังนี้

สำหรับสมดุลการหมุนรอบแกน x

$$M_{b,P} - Pa = 0 \quad (3.23)$$

แทนสมการที่ (3.20) ในสมการ (3.23) ได้

$$M_{b,P} = PR\sin\theta \quad (3.24)$$

สำหรับสมดุลการหมุนรอบแกน y

$$M_{t,P} - Pb = 0 \quad (3.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น แทนสมการที่ (3.21) ในสมการ (3.25) ได้อย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

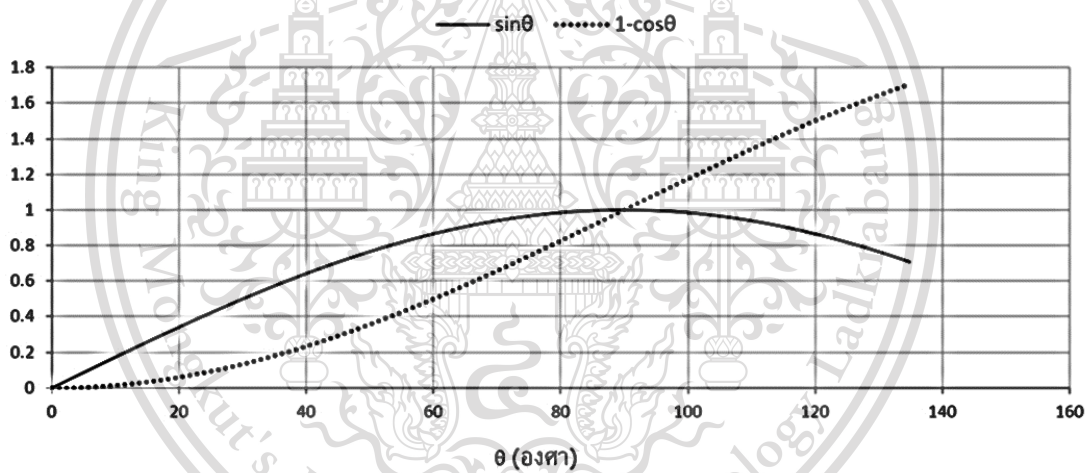
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$M_{t,p} = PR(1 - \cos\theta) \quad (3.26)$$

จากแผนภาพอิสระของคานโค้งส่วนซ้ายสำหรับมุมกวาด θ ใดๆ ในรูปที่ 3.15 จะเห็นว่าการเสี้ยวรูปของคานโค้งเกิดจาก 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่การเสี้ยวรูปอันเนื่องมาจากการตัดและการเสี้ยวรูปอันเนื่องมาจากการบิด โดยสมการที่ (3.24) และ (3.26) แสดงให้เห็นว่าโมเมนต์ดัด $M_{b,p}$ และโมเมนต์บิด $M_{t,p}$ เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับมุมกวาด θ ของแขนยึดคาน

3.6 การวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นบนคานโค้งเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งของแขนยึดคาน

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าโมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นบนคานสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\sin\theta$ และ $(1-\cos\theta)$ กับมุมกวาด θ ตามลำดับซึ่งสามารถเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ได้ดังนี้



รูปที่ 3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\sin\theta$ และ $1 - \cos\theta$ กับมุม θ

สมการที่ (3.24) และ (3.26) แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าโมเมนต์ดัด $M_{b,p}$ ขึ้นกับค่า $\sin\theta$ และการเปลี่ยนแปลงของค่าโมเมนต์บิด $M_{t,p}$ จะขึ้นกับค่า $1-\cos\theta$ ดังนั้นกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 3.16 สามารถเป็นตัวแทนในการแสดงถึงความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของค่าโมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิดบนคานโค้งได้ โดยจะนิยามค่า $\sin\theta$ ว่าปัจจัยตัวคูณของโมเมนต์ดัด และค่า $1-\cos\theta$ ว่าปัจจัยตัวคูณของโมเมนต์บิด ซึ่งเป็นตัวแทนในการแสดงถึงความเปลี่ยนแปลงของค่าโมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิด ตามลำดับ

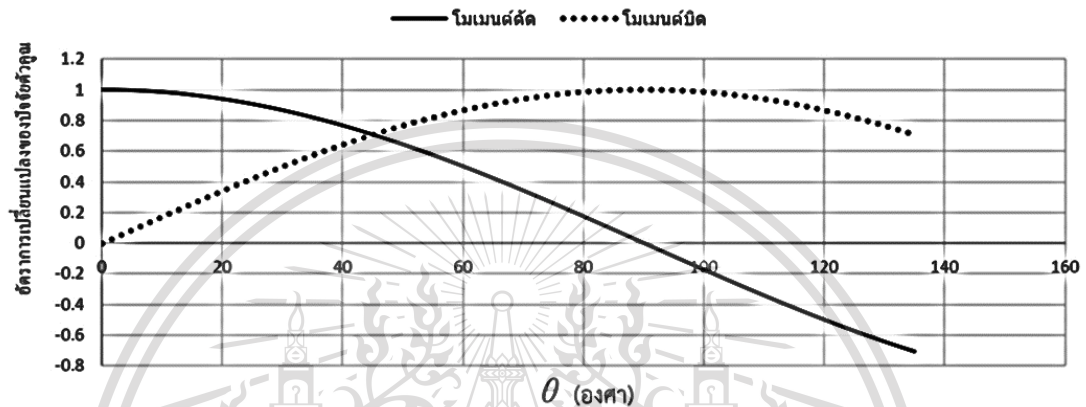
จากรูปที่ 3.16 จะเห็นว่าในช่วงมุมกวาด θ น้อย ๆ การเสี้ยวรูปของคานโค้งส่วนใหญ่จะมาจากโมเมนต์ดัด ในขณะที่ผลกระทบจากโมเมนต์บิดจะค่อนข้างน้อย ซึ่งเมื่อมุมกวาดเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเมื่อมุมกวาด $\theta = 90^\circ$ ค่าโมเมนต์บิดจะเพิ่มขึ้นจนเท่ากับ

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

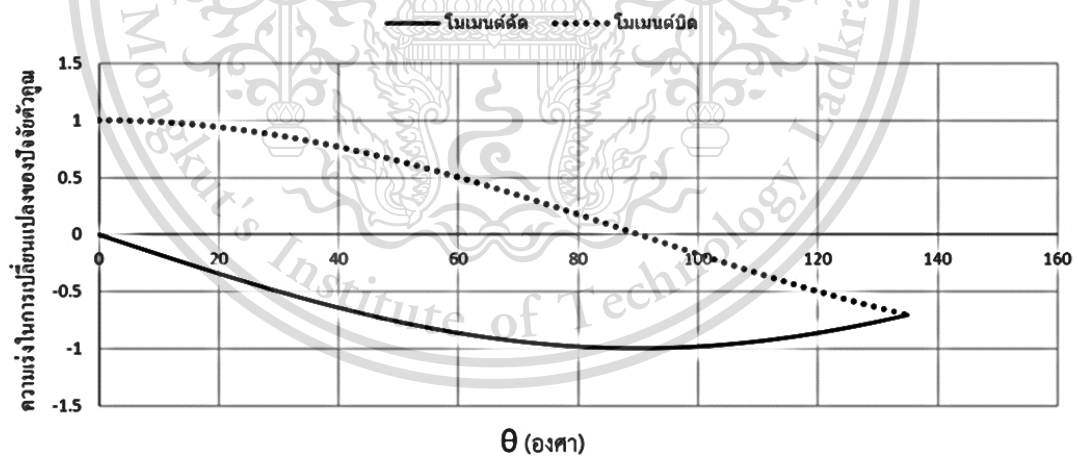
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โมเมนต์ดัดและโมเมนต์ดัดเริ่มที่จะมีค่าลดลง ทำให้ในช่วงที่มุมกวาด $90^\circ < \theta < 135^\circ$ ค่าโมเมนต์ดัดจะมากกว่าโมเมนต์ดัด แต่ในช่วงมุม $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ค่าโมเมนต์ดัดจะมากกว่าโมเมนต์ดัดเสมอ

เมื่อทำการหาอนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองสำหรับปัจจัยตัวคูณของทั้งโมเมนต์ดัดและโมเมนต์ดัดเทียบกับมุมกวาดเพื่อศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงและความเร่งในการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ดัดและโมเมนต์ดัด จะได้กราฟแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงและกราฟแสดงความเร่งในการเปลี่ยนแปลงดังนี้



รูปที่ 3.17(ก) กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ดัดและโมเมนต์ดัดกับมุม θ



รูปที่ 3.17(ข) กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งในการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ดัดและโมเมนต์ดัดกับมุม θ

จากรูปที่ 3.16 และ 3.17 จะเห็นว่าที่มุม $\theta = 0^\circ$ โมเมนต์ดัดและโมเมนต์ดัดจะมีค่าเริ่มต้นที่เท่ากัน คือ 0 นิวตันเมตร แต่เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ดัดที่สูงกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ดัดทำให้ในช่วงแรกการเสียรูปของคานโค้งส่วนใหญ่มาจากโมเมนต์ดัด แต่ความเร่งในการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ดัดจะมากกว่าความเร่งในการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ดัด

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

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

ตลอดช่วงมุม θ (เมื่อ $0^\circ \leq \theta \leq 135^\circ$) โดยจะมีค่ามากที่สุดเมื่อ $\theta = 0^\circ$ เนื่องจากความเร่งในการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ตัดมีค่าเป็นลบตลอดช่วงมุม θ ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ตัดลดลงตลอดช่วงมุม θ และมีค่าเป็นลบเมื่อมุม $\theta > 90^\circ$ ส่งผลให้ค่าโมเมนต์ตัดลดลงในช่วงนี้ ในขณะที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์บิดเพิ่มขึ้น และเมื่อมุม $\theta = 45^\circ$ อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์บิดจะเพิ่มขึ้นจนเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ตัดและจะมีค่ามากกว่าเมื่อ $\theta > 45^\circ$ หรือกล่าวได้ว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนต์บิดจะมีค่าสูง เมื่อมุม θ มากกว่า 45° เป็นต้นไป

3.7 การวิเคราะห์ภาระที่เกิดขึ้นบนคานโค้งอันเนื่องมาจากน้ำหนักของคานสำหรับระยะความยาวคานใด ๆ

สำหรับในหัวข้อนี้จะดำเนินการการวิเคราะห์ภาระที่เกิดขึ้นบนคานโค้งอันเนื่องมาจากน้ำหนักของคานสำหรับคานที่มีลักษณะเช่นเดียวกับคานในหัวข้อที่ 3.5 ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นแผนภาพอิสระของคานโค้งส่วนซ้าย (ส่วนปลายอิสระ) บนระบบพิกัดรอง (Local coordinate system) xy ในรูปที่ 3.15 จะถูกนำมากล่าวถึงในหัวข้อนี้

จากรูปที่ 3.15 จะเห็นว่าคานถูกยึดไว้ที่ตำแหน่ง O ที่จุดยึดคาน น้ำหนักของคานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก W จะทำให้เกิดภาระบนคานโค้งที่ตำแหน่ง O นี้ โดยในหัวข้อนี้เราจะสนใจเฉพาะน้ำหนักคานและไม่สนใจแรงภายนอก P ที่กระทำ และเขียนแผนภาพอิสระใหม่ได้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แผนภาพอิสระของคานโค้งส่วนซ้ายที่สนใจเฉพาะผลจากน้ำหนักของคานบนระบบพิกัดรอง (Local coordinate system) xy

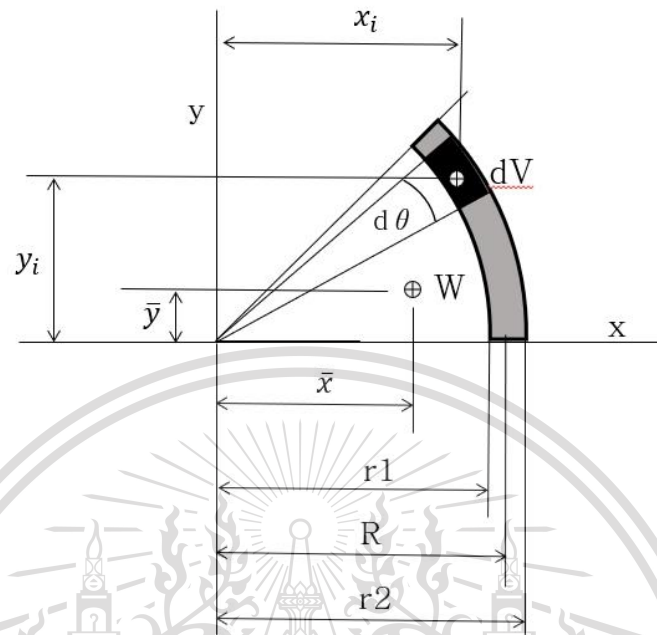
โดยทั่วไปแล้วน้ำหนักคานในลักษณะนี้จะอยู่ในรูปของแรงกระจาย (Distributed force) ที่มีการกระจายไปตามรูปทรงของวัตถุ ซึ่งขึ้นกับความหนาแน่นของวัตถุในแต่ละจุด ดังนั้นการวิเคราะห์ภาระที่เกิดขึ้นบนคานที่จุด O อันเนื่องมาจากน้ำหนักของคานจะกระทำโดยเริ่มจากการหาแรงจุดเทียบเท่าของน้ำหนักคาน (Equivalent concentrated force)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

แรงจุดเทียบเท่าของน้ำหนักรวมประกอบไปด้วยขนาดของแรงจุดและจุดศูนย์กลาง ขนาดของแรงจุดสามารถหาได้จากน้ำหนักของคานส่วนซ้าย (ส่วนปลายอิสระ) ได้ดังนี้



รูปที่ 3.19 แผนภาพประกอบการวิเคราะห์หาแรงจุดเทียบเท่าจากน้ำหนักของคานโค้งซึ่งขึ้นกับมุมหมุน

โดยที่ dV คือปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นขนาดกณิกนันต์
 $d\theta$ คือมุมที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นขนาดกณิกนันต์
 W คือน้ำหนักของคานโค้งส่วนปลายอิสระ
 r_1 คือรัศมีในของคานโค้ง
 r_2 คือรัศมีนอกของคานโค้ง
 \bar{x} คือจุดศูนย์กลางคานบนแกน x
 \bar{y} คือจุดศูนย์กลางคานบนแกน y
 t คือความหนาของคานโค้ง
 x_i คือตำแหน่งบนแกน x ของมวลขนาดกณิกนันต์ใด ๆ
 y_i คือตำแหน่งบนแกน y ของมวลขนาดกณิกนันต์ใด ๆ

จากรูปที่ 3.19 ปริมาตรคานโค้งส่วนซ้ายสามารถหาได้จากสมการที่ (3.27)

$$V = \int_V dV \quad (3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

โดยที่

$$dV = \left(\frac{1}{2}r_2^2 d\theta - \frac{1}{2}r_1^2 d\theta\right)t \quad (3.28)$$

แทนสมการที่ (3.28) ในสมการ (3.27) จะได้

$$V = \frac{1}{2}t \left[\int_0^\theta r_2^2 d\theta - \int_0^\theta r_1^2 d\theta \right] \quad (3.29)$$

$$V = \frac{1}{2}t\theta[r_2^2 - r_1^2] \quad (3.30)$$

เนื่องจาก

$$W = mg = \rho Vg \quad (3.31)$$

ดังนั้นแทนสมการที่ (3.30) ในสมการที่ (3.31) จะได้น้ำหนักคาน W ดังนี้

$$W = \frac{1}{2}\rho g t \theta (r_2^2 - r_1^2) \quad (3.32)$$

จากรูปที่ 3.19 จุดศูนย์กลางของคานโค้งประกอบด้วยจุดศูนย์กลางบนแกน x และบนแกน y ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้ (กำหนดให้ความหนาแน่นของคานโค้งคงที่ตลอดความยาวคาน)

$$V\bar{x} = \int x_i dV \quad (3.33)$$

$$V\bar{y} = \int y_i dV \quad (3.34)$$

จากรูปที่ 3.19 จะเห็นว่าตำแหน่ง x_i และ y_i เป็นฟังก์ชันของมุม θ ดังนี้

$$x_i = R\cos\theta \quad (3.35)$$

$$y_i = R\sin\theta \quad (3.36)$$

แทนสมการที่ (3.28), (3.30), (3.35), (3.36) ในสมการที่ (3.33) และ (3.34) จะได้

$$\bar{x} = \frac{R}{\theta} \int_0^\theta \cos\theta d\theta \quad (3.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา หรืออ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี (3.38) ไปใช้

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

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

$$\bar{y} = \frac{R}{\theta} \int_0^\theta \sin\theta \, d\theta \quad (3.39)$$

$$\bar{y} = \frac{R}{\theta} (1 - \cos\theta) \quad (3.40)$$

จากรูปที่ 3.18 จะเห็นว่า $a = \bar{y}$ และ $b = R - \bar{x}$ ดังนั้นจะได้โมเมนต์ตัดและโมเมนต์บิดที่กระทำบนคานโค้งอันเนื่องมาจากน้ำหนักคานดังนี้

$$M_{b,w} = W \cdot a = W \cdot \bar{y} \quad (3.41)$$

$$M_{b,w} = \frac{1}{2} \rho g t R (r_2^2 - r_1^2) (1 - \cos\theta) \quad (3.42)$$

$$M_{t,w} = W \cdot b = W (R - \bar{x}) \quad (3.43)$$

$$M_{t,w} = \frac{1}{2} \rho g t R (r_2^2 - r_1^2) (\theta - \sin\theta) \quad (3.44)$$

3.8 การหาฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างมุมกวาดของแขนยึดคานกับความถี่ธรรมชาติของระบบตุลขั้บการสั้นสะเทือน

เนื่องจากการเสีรูบของคานโค้งเกิดจาก 2 ภาคส่วนหลักๆ ได้แก่การเสีรูบอันเนื่องมาจากการตัดและการเสีรูบอันเนื่องมาจากการบิดดั่งที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้นพลังงานที่ถูกสะสมไว้ในคานเนื่องจากการเสีรูบของคานในช่วงยึดหยุ่นจึงสามารถจำแนกได้เป็น 2 ส่วนได้แก่ พลังงานสะสมจากการตัดและพลังงานสะสมจากการบิดซึ่งสามารถถูกกำหนดไว้ได้ดั่งสมการที่ (2.26) ในหัวข้อที่ 2.3

$$U = \frac{1}{2EI} \int_0^L M_b^2 ds + \frac{1}{2GK_t} \int_0^L M_t^2 ds \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.26) พลังงานสะสมในคาน U จะประกอบไปด้วย 2 เทอม ได้แก่เทอม $\frac{1}{2EI} \int_0^L M_b^2 ds$ และเทอม $\frac{1}{2GK_t} \int_0^L M_t^2 ds$ ซึ่งแสดงถึงพลังงานสะสมจากการตัดและการบิดตามลำดับ และในส่วนผลของแรงเฉือนต่อพลังงานความเครียดสะสม U ได้ถูกละเว้นไว้

โดยโมเมนต์ตัดและโมเมนต์บิดรวมที่เกิดขึ้นบนคานประกอบไปด้วยผลจากแรงภายนอก P และผลจากน้ำหนักคาน W ดังนั้นโมเมนต์ตัดและโมเมนต์บิดรวมเป็นผลจากการรวมกันของสมการที่ (3.24), (3.32) และ (3.26), (3.34) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

$$M_{b,all} = PR\sin\theta + \frac{1}{2}\rho g t R(r_2^2 - r_1^2)(1 - \cos\theta) \quad (3.45)$$

$$M_{t,all} = PR(1 - \cos\theta) + \frac{1}{2}\rho g t R(r_2^2 - r_1^2)(\theta - \sin\theta) \quad (3.46)$$

จากนั้นทฤษฎีของแคสติกลีอาโน (Castigliano's second theorem) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อหาการโก่งตัวของคาน δ ณ จุดที่ภาระ P กระทำ โดยการหาอนุพันธ์ย่อยของพลังงาน U เทียบกับแรงภายนอก P จะได้ดังสมการที่ (2.27) ในหัวข้อที่ 2.3

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{1}{2EI} \int_0^L 2M_{b,all} \frac{\partial M_{b,all}}{\partial P} ds + \frac{1}{2GK_t} \int_0^L 2M_{t,all} \frac{\partial M_{t,all}}{\partial P} ds \quad (2.27)$$

ทำการหาอนุพันธ์ย่อยของโมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิดจากสมการที่ (3.24) และ (3.26) ตามลำดับเทียบกับแรงภายนอก P จะได้

$$\frac{\partial M_{b,all}}{\partial P} = R\sin\theta \quad (3.47)$$

$$\frac{\partial M_{t,all}}{\partial P} = R(1 - \cos\theta) \quad (3.48)$$

ทำการหาอนุพันธ์ความยาวคานโค้งส่วนซ้ายจากสมการที่ (3.22) จะได้

$$ds = R d\theta \quad (3.49)$$

แทน $M_{b,all}$, $M_{t,all}$, $\partial M_{b,all}/\partial P$, $\partial M_{t,all}/\partial P$ และ ds จากสมการที่ (3.24), (3.26), (3.47), (3.48) และ (3.49) ลงในสมการที่ (2.27) ได้

$$\delta = R \left[\frac{1}{EI} \int_0^\theta \left\{ PR\sin\theta + \frac{1}{2}\rho g t R(r_2^2 - r_1^2)(1 - \cos\theta) \right\} R\sin\theta d\theta + \frac{1}{GK_t} \int_0^\theta \left\{ PR(1 - \cos\theta) + \frac{1}{2}\rho g t R(r_2^2 - r_1^2)(\theta - \sin\theta) \right\} R(1 - \cos\theta) d\theta \right] \quad (3.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ทำการหาปริพันธ์จำกัดเขตทั้งสองในสมการ (3.50) ได้

$$\delta = R^3 \left[P \left\{ \frac{1}{2EI} (\theta - \sin\theta\cos\theta) + \frac{1}{2GK_t} (3\theta - 4\sin\theta + \sin\theta\cos\theta) \right\} + \frac{1}{2} \rho g t (r_2^2 - r_1^2) \left\{ \frac{1}{2EI} (2 - 2\cos\theta - \sin^2\theta) + \frac{1}{2GK_t} (\theta(\theta - 2\sin\theta) + \sin^2\theta) \right\} \right] \quad (3.51)$$

จากสมการที่ (3.51) เราจะได้สมการระยะเสียรูปของคานซึ่งขึ้นกับมุมกวาด θ ของแขนยึดคาน และจากกฎของฮุก ความสัมพันธ์ $\sum F = k\delta$ จะถูกนำมาใช้เพื่อเปลี่ยนฟังก์ชันระยะเสียรูปของคานเป็นฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่านิสปริงของคานโค้งกับมุมกวาดของแขนยึดคาน ดังนั้นจากสมการที่ (3.51) จะได้

$$k = \frac{\sum F}{\delta} = \frac{P + \frac{1}{2}\rho g t (r_2^2 - r_1^2)}{\delta} \quad (3.52)$$

สมการความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.52) เป็นสมการที่จะถูกใช้สำหรับการหาฟังก์ชันค่านิสปริงของคานโค้งที่ขึ้นกับคุณสมบัติเฉพาะต่าง ๆ ของคาน จะสังเกตเห็นว่าตัวแปร R , EI และ GK_t ในสมการเป็นค่าคุณสมบัติของคานโค้งที่เราเลือกใช้ โดย R คือ รัศมีความโค้งของคาน EI คือ ค่านิสปริงการดัด และ GK_t คือ ความแข็งแรงของการบิด

โดยคานโค้งที่ใช้สำหรับอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนมีคุณสมบัติดังนี้
วัสดุของคานโค้งใช้เป็น เหล็กกล้าไร้สนิม 304

ค่ายังโมดูลัสความยืดหยุ่น (E) = 89.46 GPa

เป็นของแข็งที่มีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง

อัตราส่วนปัวซอง (ν) = 0.29

ค่ายังโมดูลัสของแรงเฉือน (G) = 35.22 GPa

ความหนาแน่น (ρ) = 7900 kg/m³

พื้นที่หน้าตัดคานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หนา 0.3 ซม. และ กว้าง 1 ซม.

โมเมนต์ที่สองของพื้นที่รอบแกนรอง x (I_x) = 2.25 · 10⁻¹¹ m⁴

โมเมนต์ที่สองของพื้นที่รอบแกนรอง z (I_z) = 2.50 · 10⁻¹⁰ m⁴

โมเมนต์ที่สองเชิงขั้วของพื้นที่ (K_t) = $I_x + I_z$ = 2.75 · 10⁻¹⁰ m⁴

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวารสารวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รัศมีความโค้งของคานเท่ากับ 5 ซม.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

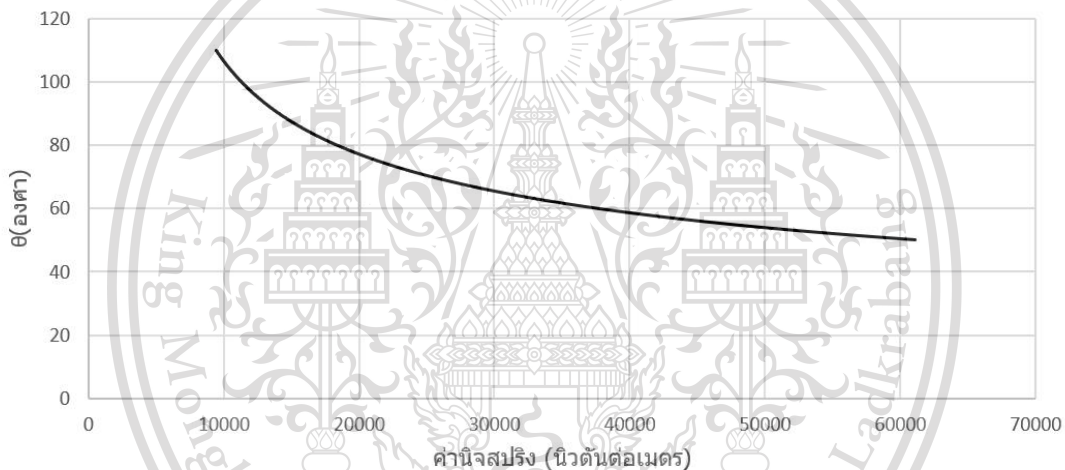
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากคุณสมบัติของคานโค้งข้างต้น ทำการหาฟังก์ชันค่านิจสปริงสำหรับคานโค้งที่มีคุณสมบัติเจาะจงได้จากการแทนค่าคุณสมบัติของวัสดุและลักษณะของคานโค้ง E , I_x , K_t , θ และ R ลงในสมการที่ (3.52) จะได้

$$k = \frac{(392.4+9.3\theta) \cdot 10^{-4}}{6.6\theta^2+2054\theta-940\sin\theta\cos\theta-22\sin^2\theta-13.2\theta\sin\theta-1114\sin\theta-57.75\cos\theta+57.75} \quad (3.53)$$

สมการที่ (3.53) คือฟังก์ชันค่านิจสปริงสำหรับคานโค้งเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่มีพื้นที่หน้าตัดคานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หนา 0.3 ซม. และ กว้าง 1 ซม. และรัศมีความโค้งของคานเท่ากับ 5 ซม.

เนื่องจากสมการที่ (3.53) เป็นฟังก์ชันค่านิจสปริงของคานโค้งซึ่งขึ้นกับมุมกวาด แต่ในการทำงานของระบบควบคุมในอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนที่ได้ออกแบบไว้ เราต้องการฟังก์ชันมุมกวาดซึ่งขึ้นกับความถี่ธรรมชาติของคานโค้ง เนื่องจากเราต้องนำความถี่ของการสั่นที่ตรวจวัดได้ไป



รูปที่ 3.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมกวาดของแขนยึดคาน θ กับค่านิจสปริงของคานโค้ง

ระบุความถี่ธรรมชาติและค่านิจสปริงของคานโค้งของอุปกรณ์ดูดซับการสั่น และใช้ค่านิจสปริงที่ได้ระบุมุมกวาดของแขนยึดคาน มากกว่านั้นสมการที่ (3.53) มีความยุ่งยากสำหรับการนำไปใช้งาน เนื่องจากสมการมีความซับซ้อนในระดับหนึ่ง อาจทำให้คอมพิวเตอร์ใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้น ส่งผลให้การตอบสนองต่อภาระที่เปลี่ยนไปของระบบช้าลง จึงนำสมการที่ (3.53) มาคำนวณในโปรแกรม Matlab สำหรับมุมกวาดของแขนยึดคาน $20^\circ \leq \theta \leq 135^\circ$ ที่ความละเอียด 0.1 องศา และนำค่านิจสปริงของคานโค้งสำหรับแต่ละมุมกวาดมาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับมุมกวาดของแขนยึดคานได้ดังนี้

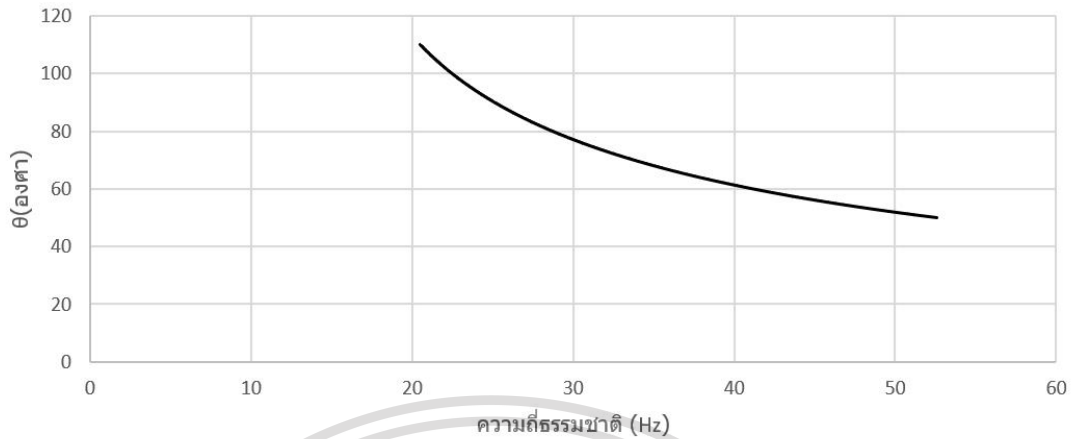
สำหรับอุปกรณ์ดูดซับการสั่นที่ได้ออกแบบไว้ มวลสำหรับถ่วงปลายคานแต่ละข้างจะเท่ากับ 500 กรัม ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างมุมกวาดกับความถี่ธรรมชาติของระบบมวลสปริงหนึ่งข้าง คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{0.5}}$ ไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีก (3.54) ใช้

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

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

เขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมกวาดของแขนยึดคาน θ กับความถี่ธรรมชาติของระบบมวลสปริง 1 ฝั่ง

จากการสูตรประมาณค่าความถี่ธรรมชาติรวมของระบบของคันเคอร์เลย์ (Dunkerley's formula)

$$\frac{1}{\omega_{\text{total}}^2} = \frac{1}{\omega_1^2} + \frac{1}{\omega_2^2} + \frac{1}{\omega_3^2} + \dots + \frac{1}{\omega_n^2} \quad (3.55)$$

เนื่องจากความถี่ธรรมชาติของระบบมวลสปริงแต่ละฝั่งในอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนที่ได้ ออกแบบไว้มีค่าเท่ากัน คือ $\omega_1 = \omega_2 = \omega_{a1-2}$ ดังนั้นความถี่ธรรมชาติรวมของระบบดูดซับการสั่นคือ

$$\frac{1}{\omega_a^2} = \frac{1}{\omega_1^2} + \frac{1}{\omega_2^2}$$

$$\frac{1}{\omega_a^2} = \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{\omega_1^2 \omega_2^2}$$

$$\omega_a^2 = \frac{\omega_1^2 \omega_2^2}{\omega_1^2 + \omega_2^2}$$

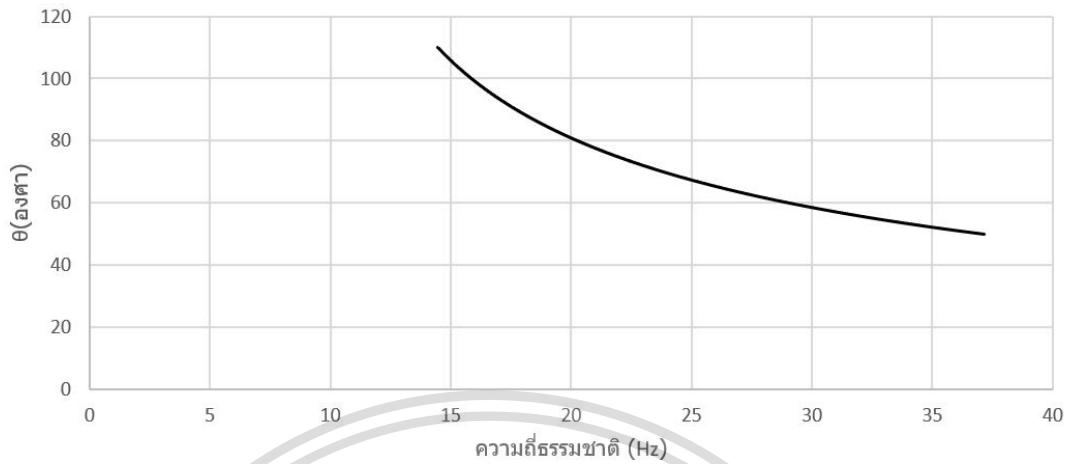
$$\omega_a = \frac{\omega_{a1-2}}{\sqrt{2}} \quad (3.56)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

จากสมการที่ (3.56) เขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมกวาดกับความถี่ธรรมชาติรวมของระบบ ดูดซับการสั่นได้ดังนี้

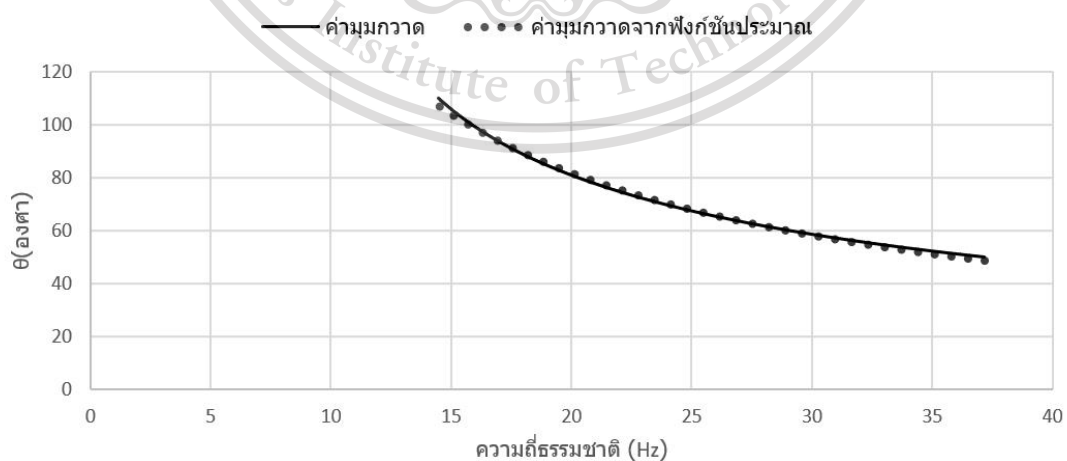


รูปที่ 3.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกวาดของแขนยึดคาน θ กับความถี่ธรรมชาติรวมของระบบดูดซับการสั่น

จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 3.22 ทำการหาสมการเส้นโค้งที่เหมาะสมเพื่อเป็นตัวแทนของข้อมูลในแต่ละจุด (curve fitting) ได้สมการเป็น

$$\theta(\omega_d) = 999.99\omega_d^{-0.835} \quad (3.57)$$

สมการที่ (3.57) คือฟังก์ชันประมาณค่ามุมกวาดซึ่งขึ้นกับความถี่ธรรมชาติรวมของระบบดูดซับการสั่นสะท้อน ทำการเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าระหว่างค่าจริงที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับค่าประมาณจากฟังก์ชันประมาณค่าที่ได้จากการหาสมการเส้นโค้งตัวแทน ได้ดังรูปที่ 3.23



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเอาไว้ใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ในใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่ามุมกวาดที่ได้จากการคำนวณและฟังก์ชันค่าประมาณที่
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น นี้ได้จากการหาสมการเส้นโค้งตัวแทน ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบในรูปที่ 3.23 จะเห็นว่าค่ามุมกวาดที่ได้จากฟังก์ชันประมาณค่ามีค่าใกล้เคียงกับค่ามุมกวาดที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีค่อนข้างมาก ดังนั้นในการคำนวณหามุมกวาดของแขนยึดคานสำหรับระบุรูปแบบของความต่างศักย์ที่ต้องจ่ายให้กับสเต็ปมอเตอร์ในระบบควบคุมในบทต่อไปเราจะใช้ฟังก์ชันค่าประมาณมุมกวาดจากสมการที่ (3.57) เป็นหลัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บทที่ 4

ระบบควบคุม

เพื่อให้อุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนเป็นแบบกึ่งปรับค่าได้จำเป็นต้องออกแบบระบบควบคุมให้กับระบบ และเพื่อให้อุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนดูดซับการสั่นสะเทือนที่เกิดจากเครื่องจักรหมุนที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่การหมุนได้อย่างมีประสิทธิภาพอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนจำเป็นต้องมีความถี่ธรรมชาติตรงกับความถี่การหมุนของเครื่องจักร โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าความแข็งของสปริงจากการปรับตำแหน่งของคานโค้ง ดังนั้นจุดประสงค์หลักของการออกแบบระบบควบคุมคือเพื่อควบคุมตำแหน่งของคาน

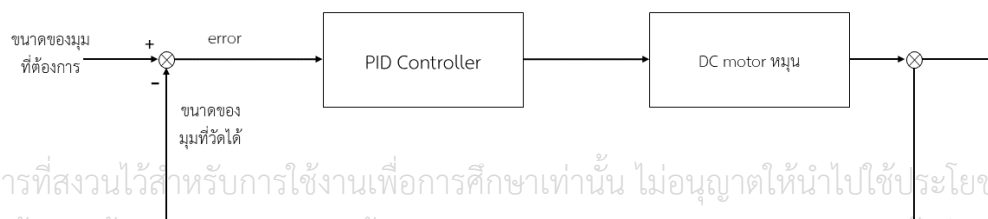
4.1 แบบจำลองการควบคุมแบบกึ่งปรับค่าได้ตามความถี่ซิมซบ

เพื่อให้ระบบมีการทำงานที่ไม่ซับซ้อนเกินไปจึงออกแบบระบบควบคุมเป็นแบบกึ่งปรับค่าได้ ดังแผนภาพการทำงานที่แสดงไว้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรหมุนแล้วนำค่าความถี่การหมุนที่ตรวจจับได้ส่งไปยังอุปกรณ์ควบคุมเพื่อออกคำสั่งให้มอเตอร์ทำการหมุนคานโค้งไปยังตำแหน่งที่ควรจะเป็นตามสมการที่ออกแบบไว้



รูปที่ 4.1 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมในอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือน

และเพื่อให้มั่นใจว่ามอเตอร์นั้นหมุนไปยังตำแหน่งที่ถูกต้องจึงใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ในการระบุตำแหน่งของการหมุนมอเตอร์ ดังนั้นแผนภาพบล็อกของระบบควบคุมจะเป็นดังนี้



รูปที่ 4.2 แผนภาพบล็อกแสดงการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

4.2 อุปกรณ์ในระบบควบคุมและการต่อใช้งาน

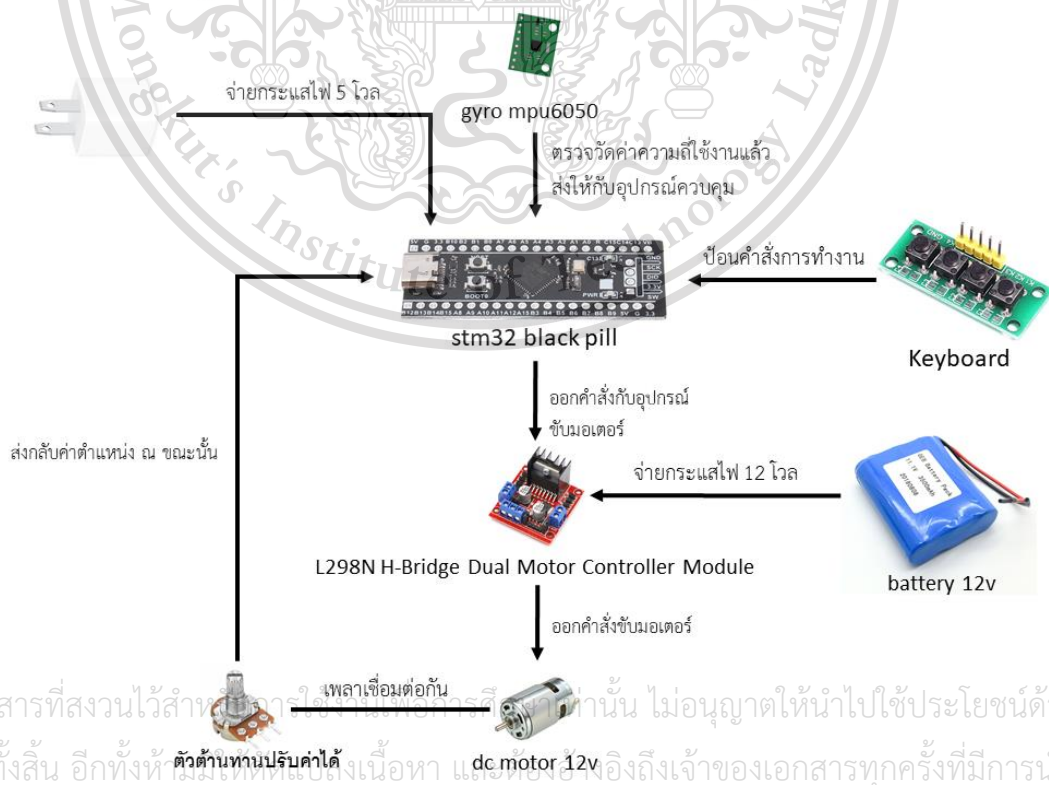
4.2.1 อุปกรณ์ในระบบควบคุม

อุปกรณ์ในระบบควบคุมนั้นประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) คืออุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็กสำหรับการประมวลผลคำสั่งต่าง ๆ และออกคำสั่งกับอุปกรณ์ที่ต้องการ ในที่นี้เลือกใช้ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32 black pill ซึ่งสามารถเขียนคำสั่งผ่านโปรแกรม Arduino IDE
2. อุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนไหวและความเอียง 3 แกน เลือกใช้ GY-521 MPU6050 สำหรับการตรวจจับความเร่งในแนวตั้ง แล้วนำค่าที่ได้ไปประมวลผลผ่านฟังก์ชันที่อยู่ในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งทำให้ทราบค่าความถี่การใช้งานของระบบหลัก
3. แป้นพิมพ์ (keyboard) ใช้สำหรับออกคำสั่งให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทำสิ่งต่าง ๆ ตามขั้นตอนที่ต้องการซึ่งจะอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อ 4.4
4. ชุดขับมอเตอร์ชนิด H-Bridge ใช้สำหรับส่งสัญญาณ PWM ให้กับมอเตอร์ เพื่อให้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้ซึ่งประยุกต์ใช้สำหรับการหมุนมอเตอร์ไปที่ตำแหน่งต่าง ๆ
5. มอเตอร์กระแสตรง 12 โวล ทำหน้าที่ในการหมุนแกน
6. ตัวต้านทานปรับค่าได้ ทำหน้าที่ในการบอกตำแหน่งของแกนที่กำลังอยู่ที่องศาที่เท่าไร เพื่อให้สามารถควบคุมตำแหน่งของแกนได้
7. แบตเตอรี่ 12 โวลสำหรับจ่ายให้กับชุดขับมอเตอร์เพื่อจ่ายกระแสให้กับมอเตอร์

4.2.2 การต่อใช้งานระบบควบคุม

การต่อใช้งานระบบควบคุมแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนตัวเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for personal use only. For commercial use.

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

4.3 การทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดหาความถี่ใช้งาน

เพื่อให้ทราบความถี่ใช้งานของเครื่องจักรหมุนสำหรับการนำไปใช้งานนั้นจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ ซึ่งในที่นี้เลือกใช้อุปกรณ์ตรวจวัดใจโรที่สามารถเก็บค่าพารามิเตอร์ความเร่งได้ และเพื่อให้ทราบความถี่การสั่นที่ชัดเจนและเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สามารถนำไปใช้งานต่อได้ จึงนำชุดข้อมูลของค่าพารามิเตอร์ความเร่งช่วงหนึ่งที่ได้ไปเข้าฟังก์ชันการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) โดยเขียนฟังก์ชันการทำงานผ่านโปรแกรม Arduino IDE ซึ่งมีลักษณะดังนี้

```
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]={7,6,6,5,5,5,4,4,4,4,3,3,3,3,3,3,2,2,2};

void setup()
{
  Serial.begin(250000);
}

void loop() {
}

//-----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;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

```

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_r[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;

for(int i;i<128;i++)          //scalling data from +512 to -512

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

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

if(data_mag>1024)
    {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีโทษปรับและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

```

    }
    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;
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
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ส่วนตัวเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$e=1024/\text{Pow}2[i+1]$; //1024 is equivalent to 360 deg

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

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

```

e=0-e;
n1=0;

for(int j=0;j<i10;j++)
{
    c=e*j; //c is angle as where 1024 unit is 360 deg
while(c<0){c=c+1024;}
while(c>1024){c=c-1024;}

    n1=j;

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

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ หากนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

```

    }
}
if(check==1){ // scalling the matrices if value higher
than 15000 to prevent varible from overflowing
for(int i=0;i<a;i++)
{
out_r[i]=out_r[i]>>1;
out_im[i]=out_im[i]>>1;
}
check=0;
scale=scale-1; // tracking overall scalling of input data
}
}
if(scale>128)
{scale=scale-128;
for(int i=0;i<a;i++)
{out_r[i]=out_r[i]>>scale;
out_im[i]=out_im[i]>>scale;
}
scale=0;
}
// revers all scalling we done till here,
else{scale=128-scale;} // in case of nnumber getting higher than
32000, we will represent in as multiple of 2^scale

/*
for(int i=0;i<a;i++)
{
Serial.print(out_r[i]);Serial.print("\t"); // un comment to print RAW o/p
Serial.print(out_im[i]);
Serial.print("i");Serial.print("\t");
Serial.print("2^");Serial.println(scale);
}
*/

//---> here onward out_r contains amplitude and our_in conntains frequency (Hz)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยี่ห้อมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 fstep=Frequency/N;

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

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

```

fstp=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]+fstp;
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];
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;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
if(quad==1){th= 512-th;}
```

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

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

```

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

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่มิมีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

```

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);
  }
}
//-----//

```

4.4 การทำงานของระบบควบคุม

การทำงานของระบบควบคุมจะถูกลำดับการทำงานผ่านเป็นพินิจโดยมี 3 ปุ่มการทำงาน ปุ่มที่ 1 เป็นการสั่งให้ระบบเก็บชุดข้อมูลพารามิเตอร์ความเร่งที่วัดจากอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งใจโร (Gyro mpu6050) ปุ่มที่ 2 เป็นการสั่งให้ระบบนำค่าชุดข้อมูลความเร่งมาวิเคราะห์และสั่งให้มอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งที่ทำให้ความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนตรงกับค่าความถี่ใช้งานที่วัดได้ ปุ่มที่ 3 เป็นการคืนค่าการทำงานให้กับระบบใหม่ทั้งหมด นอกจากนี้ยังใช้วิธีการควบคุมพีไอดีเข้ามาช่วยให้ระบบระบุตำแหน่งได้ตรงยิ่งขึ้นด้วย สำหรับข้อมูลการเขียนแสดงไว้ดังนี้

```

void loop() {
  float Lold, Hold, Lnew, Hnew;
  // input degree component//
  Lold = 10;
  Hold = 120;
  Lnew = 1245;
  Hnew = 2930;
  float f;
  // Check start//
  PL = analogRead(PB1);
  digitalWrite(PB12, HIGH);
  //Serial.println(analogRead(PB1));
  t1 = millis();
  if (digitalRead(PA5) == 0) {
    mpu6050.update();
    if (millis() - timer > 10)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นผู้ที่มีสิทธิ์ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

```

{
  timer = millis();
  Acc[num] = mpu6050.getAccZ() * 100 - 101;
  num += 1;
}
if (num > 256) {
  Serial.println(Approx_FFT(Acc, 256, 100));
  num = 0;
}
}
//===== Motor =====//
else if (digitalRead(PA4) == 0) {
  f = Approx_FFT(Acc, 256, 100);
  if (f < 27) {
    f = 27;
  }
  if (f > 50) {
    f = 50;
  }
  float Deg = 999.99 * pow(f, -0.835);
  Serial.print(Deg); Serial.println(";");
}
else if (digitalRead(PA3) == 0) {
  Posit(map(Deg, Lold, Hold, Lnew, Hnew));
}

else {
  analogWrite(BL, 0);
  analogWrite(FL, 0);
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

```
//=====การควบคุมพีไอดี=====//
void Posit(float PS) {
  PL = analogRead(PB1);
  float kp, ki, kd;
  float PID, ERR, I_P, I_ERR;
  I_P = 0;
  kp = 3;
  ki = 5;
  kd = 0;

  if (t1 - t2 > 20) {

    ERR = PS - PL;
    if ((ERR>-5)&&(ERR<5)){
      I_ERR = 0;
    }
    else {
      I_ERR += ERR*0.02;
    }
    PID = ERR * kp + ki*I_ERR;
    if (PID > 255) {
      PID = 255;
    }
    if (PID < -255) {
      PID = -255;
    }
    if (PID > 0) {
      analogWrite(FL, PID);
      analogWrite(BL, 0);
    }
    else if (PID <= 0) {
      analogWrite(BL, -PID);
      analogWrite(FL, 0);
    }
    Serial.println(ERR);
  }
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

5.1 การทดลองสำหรับหาค่านิจสปริงของคานโค้งซึ่งขึ้นกับมุมหมุน(Rotating angle) ของแขนยึดคาน

สำหรับในหัวข้อนี้จะดำเนินการทำการทดลองหาค่านิจสปริงของคานโค้งซึ่งขึ้นกับมุมหมุนของแขนยึดคานโดยมีจุดประสงค์การทดลองคือ เพื่อนำรูปแบบค่านิจสปริงของคานโค้งที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีในหัวข้อที่ 3.7

5.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

1. สปริงคานโค้ง



รูปที่ 5.1 สปริงคานโค้ง

2. อุปกรณ์วัดระยะ (Dial indicator)



รูปที่ 5.2 อุปกรณ์วัดระยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3. มวลถ่วง



รูปที่ 5.3 มวลถ่วง

4. ตัวยึดคาน



รูปที่ 5.4 ตัวยึดคาน

5.1.2 วิธีดำเนินการทดลอง

1. ทำการจัดวางอุปกรณ์ โดยใช้ตัวยึดคานจับคานไว้ให้ไม่สามารถขยับได้ โดยให้ปลายคานฝั่งที่ใช้สำหรับติดมวลมีการไพล่ออกมาจากรูของตัวยึดคานและให้ขอบรูอยู่อยู่บนตำแหน่งที่ 50 องศาของคานโค้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.5 แสดงการจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์สำหรับการทดลองหาค่าโมเมนต์

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

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

2. ทำการติดตั้งชุดตัววัดคานกับคานโค้งที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ลงบนแผ่นโลหะและทำการติดมวลถ่วงไว้ที่ปลายคานตรงตำแหน่งที่ได้เจาะรูไว้



รูปที่ 5.6 แสดงการติดมวลถ่วงสำหรับการทดลองหาค่านิจสปริง

3. นำอุปกรณ์วัดระยะ (Dial indicator) ติดตั้งบนคานโค้งโดยให้หัวเข็มวัดวางอยู่บนคานโค้ง ณ จุดเดียวกันกับจุดที่ทำการถ่วงมวลไว้



รูปที่ 5.7 การทดลองหาค่านิจสปริง

4. ทำการยกมวลขึ้นเพื่อไม่ให้เกิดภาวะบนคานโค้ง และทำการตั้งค่าระยะเสียรูปบนหน้าปัดของอุปกรณ์วัดระยะให้มีค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์
5. ค่อยๆ ปล่อยทิ้งน้ำหนักมวลลงอย่างช้าๆ เพื่อให้เกิดภาวะบนคานโค้งขึ้น จากนั้นอ่านค่าระยะเสียรูปที่เปลี่ยนไปบนหน้าปัดอุปกรณ์วัดระยะและทำการจดบันทึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 2, 3, 4 และ 5 จนถึงตำแหน่งคานที่ 110 องศา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

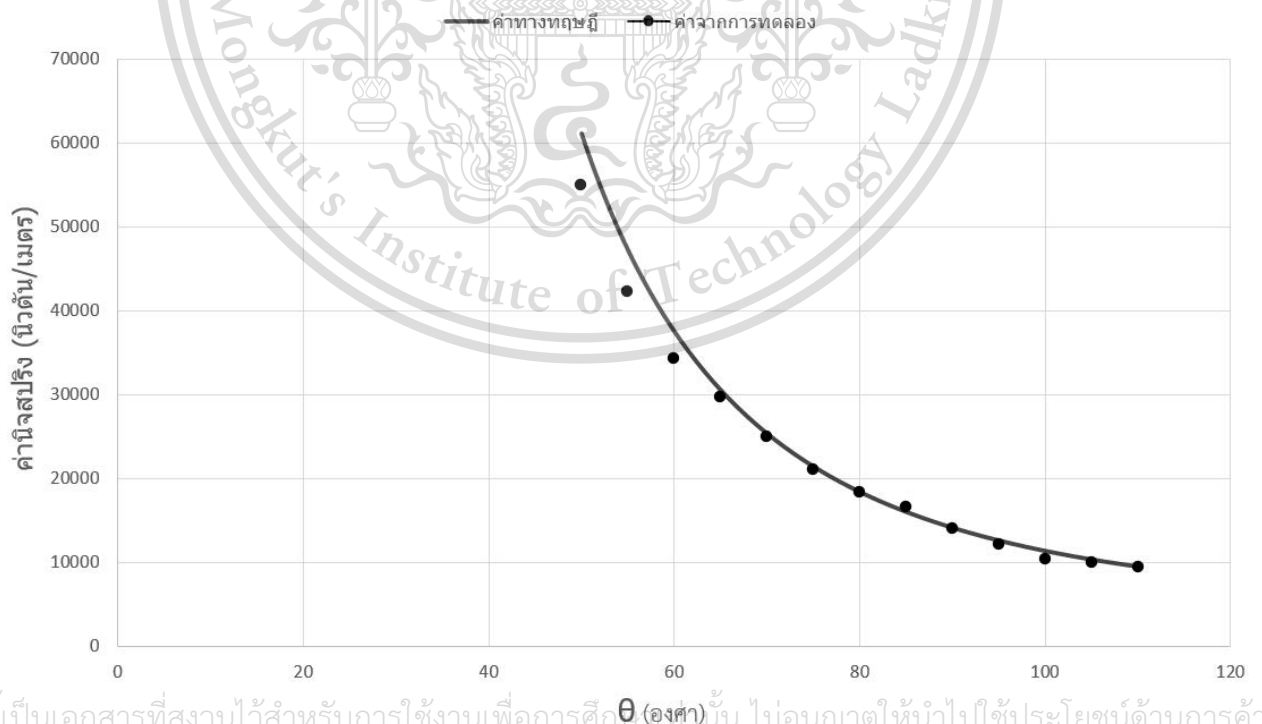
5.1.3 ผลการทดลอง

5.1.3.1 ตารางผลการทดลอง

มุม (องศา)	ระยะเสี้ยวรูป (มิลลิเมตร)				ค่านิจสปริง (นิวตัน/เมตร)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
50	0.09	0.11	0.1	0.1	53955
55	0.133	0.133	0.124	0.13	41503.84615
60	0.155	0.165	0.16	0.16	33721.875
65	0.18	0.188	0.187	0.185	29164.86486
70	0.23	0.23	0.2	0.22	24525
75	0.265	0.265	0.25	0.26	20751.92308
80	0.3	0.3	0.3	0.3	17985
85	0.32	0.325	0.345	0.33	16350
90	0.39	0.39	0.39	0.39	13834.61538
95	0.455	0.455	0.44	0.45	11990
100	0.54	0.535	0.515	0.53	10180.18868
105	0.55	0.55	0.55	0.55	9810
110	0.58	0.58	0.58	0.58	9302.586207

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงผลการทดลองสำหรับหาค่านิจสปริงของคานโค้งที่ขึ้นกับมุมหมุนของแขนยึดคาน

5.1.3.2 กราฟเปรียบเทียบค่านิจสปริงของคานโค้งระหว่างค่าทางทฤษฎีกับค่าจากการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบค่านิจสปริงของคานโค้งระหว่างค่าทางทฤษฎีกับค่าจากการทดลอง

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

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

5.1.3.3 สรุปผลการทดลอง

จากกราฟเปรียบเทียบค่านิจสปริงของคานโค้งข้างต้นจะเห็นว่าค่าจากทางทฤษฎีและค่าจากการทดลองค่อนข้างมีความใกล้เคียงกัน โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ที่ตำแหน่งคาน 50 องศา จากนั้นความคลาดเคลื่อนจะลดลงตามตำแหน่งองศาคานที่เพิ่มขึ้น

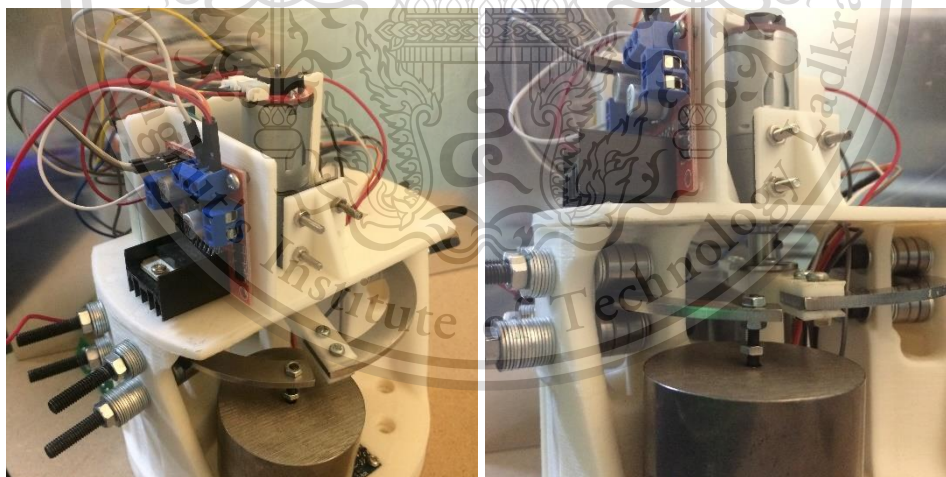
ดังนั้นสมการที่ 3.53 (ฟังก์ชันค่านิจสปริงของคานโค้ง) ที่ได้จากการคำนวณในบทที่ 3 สามารถใช้ประมาณค่าค่านิจสปริงของคานโค้งที่ตำแหน่งต่างๆ ได้ และสมการที่ 3.57 สามารถนำมาใช้หาตำแหน่งองศาของคานโค้งสำหรับระบบควบคุมในอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนได้

5.2 การทดสอบหาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

การทดสอบหาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้ ประกอบด้วยอุปกรณ์สองส่วนได้แก่ อุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้ และอุปกรณ์จำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 โดยเป็นการทดสอบเชิงเปรียบเทียบระหว่างขนาดการสั่นของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้ และขนาดการสั่นของระบบที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ โดยพิจารณาจากขนาดการขจัดของการสั่นสะเทือนในแนวตั้งของระบบหลักที่ความถี่ใช้งานต่าง ๆ ผ่านโปรแกรมจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของระบบ

5.2.1 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

1. อุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



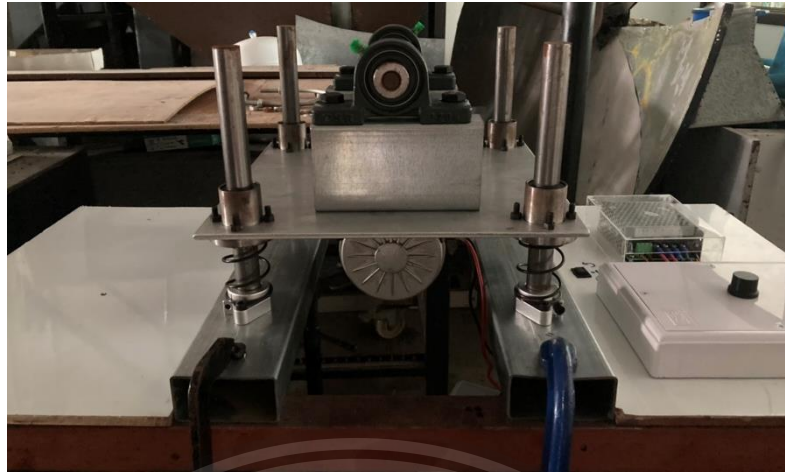
รูปที่ 5.9 อุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

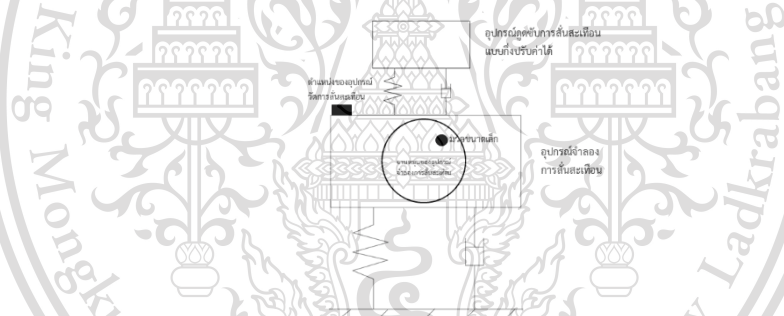
2. อุปกรณ์จำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรหมุน



รูปที่ 5.10 อุปกรณ์จำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรหมุน

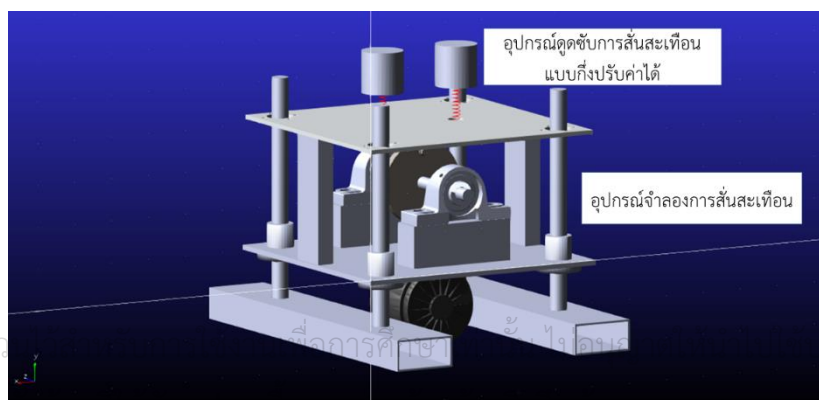
5.2.2 ลักษณะการวางตำแหน่งและวิธีการทดสอบอุปกรณ์ผ่านโปรแกรมจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของระบบ

1. แบบจำลองตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ



รูปที่ 5.11 แบบจำลองตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

2. ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบในโปรแกรมจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของระบบ



รูปที่ 5.12 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบในโปรแกรมจำลอง

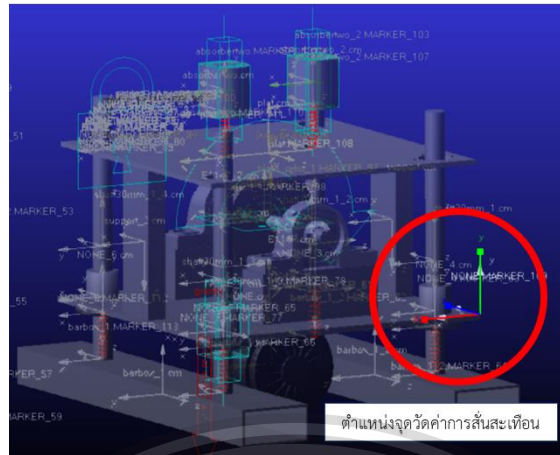
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารที่ทำการนำออกไปใช้

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

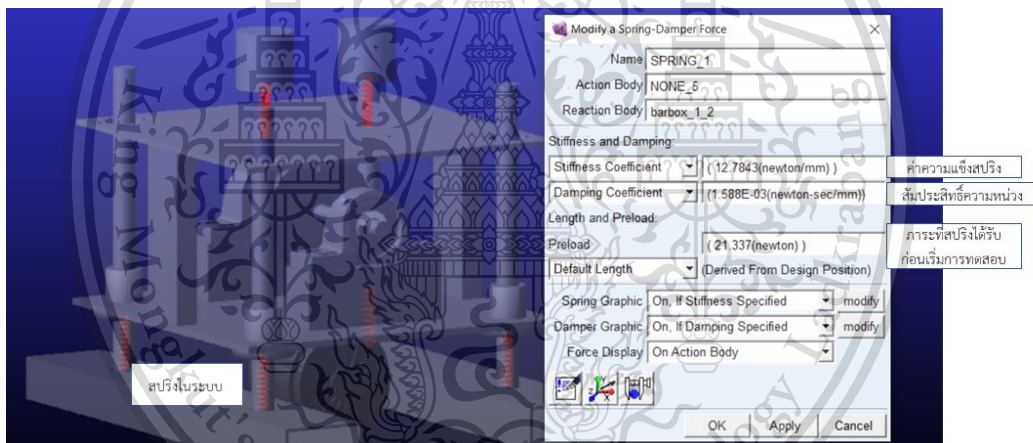
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3. ตำแหน่งการวัดการสั่นสะเทือนของระบบในโปรแกรมจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของระบบ



รูปที่ 5.13 ตำแหน่งการวัดการสั่นสะเทือนของระบบในโปรแกรมจำลอง

4. การระบุตัวแปรของสปริงในกับระบบ



รูปที่ 5.14 การระบุตัวแปรของสปริงในกับระบบ

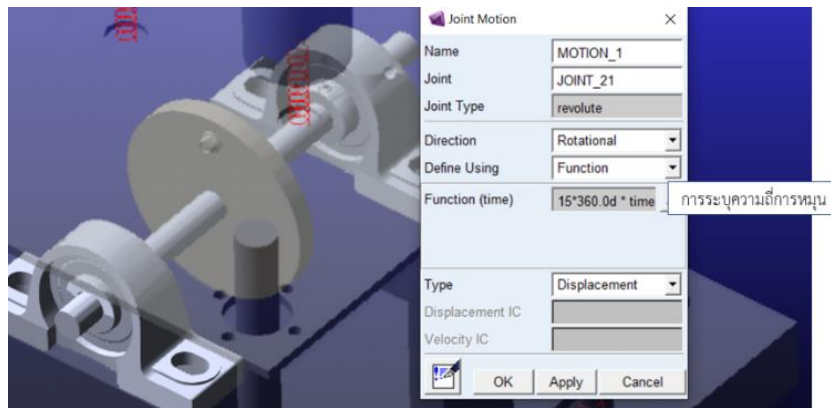
สำหรับโปรแกรมจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของระบบนั้นมีเครื่องมือสำหรับการออกแบบสปริงให้กับระบบ สำหรับแบบจำลองสปริงในโปรแกรมนั้นมีลักษณะเป็นเส้นเกลียวสีแดง ดังแสดงในรูป 5.14 และเครื่องมือดังกล่าวสามารถระบุตัวแปรความแข็งของสปริงและสัมประสิทธิ์ความหน่วง ซึ่งเป็นตัวแปรควบคุมสำคัญสำหรับการทดสอบอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

5. การระบุตัวแปรความเร็วรอบของงานหมุนไม่สมดุล



รูปที่ 5.15 การระบุตัวแปรความเร็วรอบของงานหมุนไม่สมดุล

การจำลองการหมุนของงานหมุนที่ไม่สมดุลผ่านโปรแกรมจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของระบบเริ่มต้นด้วยการใช้เครื่องมือระบุให้งานหมุนไม่สมดุลมีการเคลื่อนที่แบบหมุน จากนั้นระบุความเร็วการหมุนผ่านเครื่องมือกำหนดการเคลื่อนที่ดังรูป 5.15 ซึ่งจากตัวอย่าง $15 \cdot 360.0d \cdot \text{time}$ หมายถึง การกำหนดให้งานหมุนไม่สมดุลมีความถี่การหมุนที่ 15 รอบต่อวินาที

6. แบบจำลองของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้ในโปรแกรมจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของระบบ



รูปที่ 5.16 แบบจำลองของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้ในโปรแกรมจำลอง

เนื่องจากตัวโปรแกรมไม่สามารถจำลองพฤติกรรมยืดหยุ่นของตัววัสดุได้ ดังนั้นตัวคานโค้งในอุปกรณ์จำลองการสั่นสะเทือนซึ่งทำหน้าที่เป็นสปริงจึงถูกแปลงเป็นสปริงในตัวโปรแกรมดังแสดงในรูป 5.16 และปลายสปริงยึดอยู่กับระบบหลักและตุ้มน้ำหนักในอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

5.2.3 การทดสอบ

5.2.3.1 ตัวแปรควบคุม

1. ค่าความแข็งของสปริงแต่ละตัวในระบบหลักเท่ากับ 12.7843 นิวตันต่อมิลลิเมตร
2. ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของสปริงแต่ละตัวเท่ากับ 0.001588 นิวตัน-วินาทีต่อมิลลิเมตร
3. สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในลูกปืนสไลด์นั้นไม่มี
4. น้ำหนักของระบบหลักเท่ากับ 7 กิโลกรัม และโครงอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้เท่ากับ 0.5 กิโลกรัม
5. ความถี่ในการหมุนของจานหมุนไม่สมดุล
6. เวลาในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 20 วินาที

5.2.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ กรณีไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

1. ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบทั้งหมดตามแบบจำลองที่ออกแบบไว้
2. ปรับขนาดการหมุนของจานหมุนไม่สมดุลของอุปกรณ์จำลองการสั่นให้มีความเร็วรอบ 15 รอบต่อวินาที
3. แปลงข้อมูลขนาดการสั่นที่วัดได้เป็นกราฟการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier transform, FFT) บันทึกขนาดการสั่นสูงสุดและความถี่ที่ทำให้เกิดขนาดการสั่นสูงสุด
4. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2 แต่เพิ่มขนาดการหมุนของมอเตอร์ครั้งละ 1 รอบต่อวินาที
5. สิ้นสุดการทดสอบเมื่อความเร็วรอบอยู่ที่ 35 รอบต่อวินาที

5.2.3.3 ขั้นตอนการทดสอบ กรณีติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

1. ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบทั้งหมดตามแบบจำลองที่ออกแบบไว้
2. ปรับขนาดการหมุนของจานหมุนไม่สมดุลของอุปกรณ์จำลองการสั่นให้มีความเร็วรอบ 15 รอบต่อวินาที โดยยังคงปิดการทำงานของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้
3. แปลงข้อมูลขนาดการสั่นที่วัดได้เป็นกราฟการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier transform, FFT) อ่านค่าความถี่ที่ทำให้เกิดขนาดการสั่นสูงสุด
4. ปรับค่าความแข็งสปริงของอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้ให้สอดคล้องกับความถี่การสั่นที่ทำให้เกิดขนาดการสั่นสูงสุดจากการใช้สมการที่ (3.57) (ฟังก์ชันประมาณค่ามุกวาดซึ่งขึ้นกับความถี่ธรรมชาติรวมของระบบดูดซับการสั่นสะเทือน) โดยใช้ค่าความถี่ธรรมชาติรวมของระบบดูดซับการสั่นสะเทือนที่เท่ากับค่าความถี่การสั่นที่ได้จากการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วในขั้นตอนที่ 3
5. แปลงข้อมูลขนาดการสั่นที่วัดได้เป็นกราฟการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier transform, FFT) บันทึกขนาดการสั่นสูงสุดและความถี่ที่ทำให้เกิดขนาดการสั่นสูงสุด
6. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2 ถึง 5 โดยเพิ่มขนาดการหมุนของมอเตอร์ครั้งละ 1 รอบต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

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

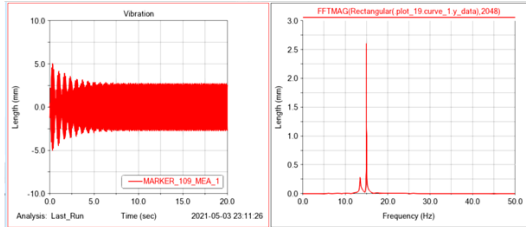
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.2.4 ผลการทดสอบ

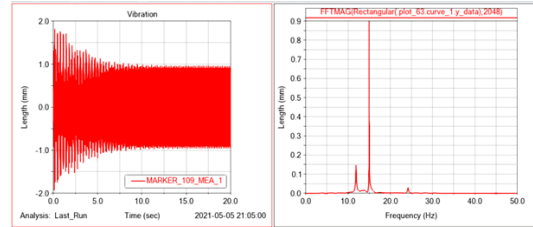
5.2.4.1 ตัวอย่างกราฟที่วัดได้จากการทดสอบ

15 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



รูปที่ 5.17 แสดงตัวอย่างกราฟผลการทดสอบของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้และระบบที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้ที่ความถี่ใช้งานเดียวกัน 15 รอบต่อวินาที

5.2.4.2 ตารางข้อมูลแสดงผลการทดสอบ

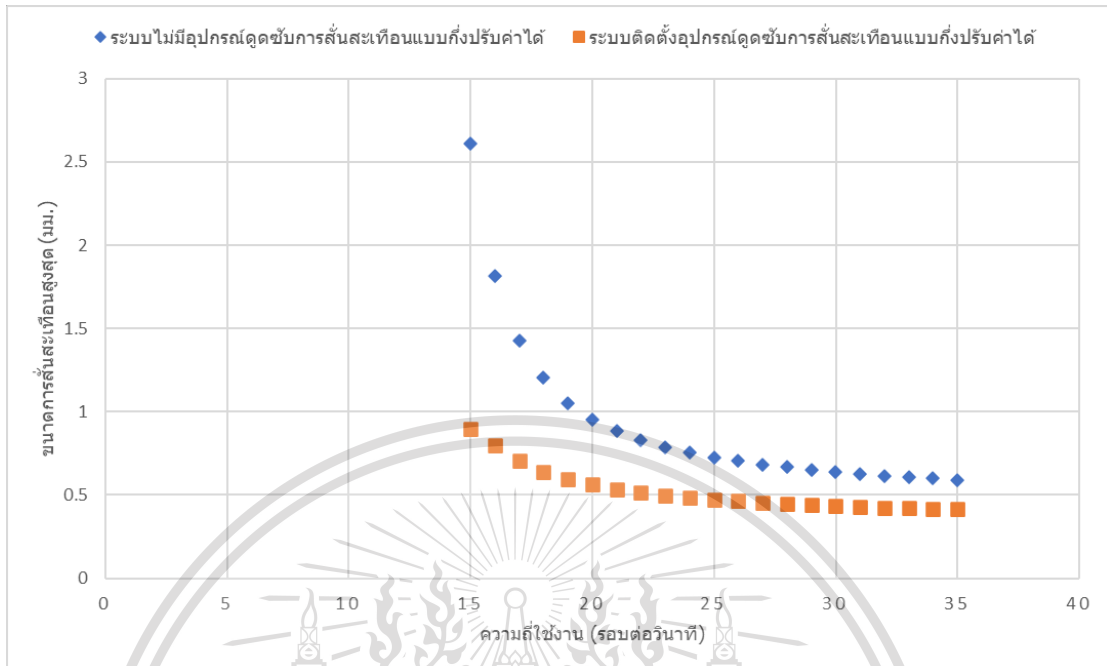
กำหนดความถี่งานหมุน ไม่สมดุล (รอบต่อวินาที)	ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้		ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้		% ที่ลดลง
	ความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นสูงสุด จากการวัด (รอบต่อวินาที)	ขนาดการสั่นสะเทือน สูงสุด (มม.)	ความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นสูงสุด จากการวัด (รอบต่อวินาที)	ขนาดการสั่นสะเทือน สูงสุด (มม.)	
15	14.9902	2.6075	14.9902	0.8999	65.49
16	15.9961	1.8131	15.9961	0.7981	55.98
17	16.9995	1.4279	16.9958	0.704	50.70
18	17.9968	1.2063	17.9956	0.6413	46.84
19	18.9954	1.0512	18.9954	0.5962	43.28
20	19.9951	0.9547	19.9951	0.5621	41.12
21	20.9949	0.8844	20.9949	0.5362	39.37
22	21.9946	0.8309	21.9946	0.5156	37.95
23	22.9944	0.7889	22.9944	0.4993	36.71
24	23.9941	0.7558	23.9941	0.4851	35.82
25	24.9939	0.7278	24.9939	0.4737	34.91
26	25.9937	0.7039	25.9937	0.464	34.08
27	26.9934	0.6845	26.9934	0.4554	33.47
28	27.9932	0.6674	27.9932	0.448	32.87
29	28.9929	0.6525	28.9929	0.4418	32.29
30	29.9927	0.6393	29.9927	0.4361	31.78
31	30.9924	0.6273	30.9927	0.4306	31.36
32	31.9922	0.6169	31.9922	0.426	30.95
33	32.9919	0.6074	32.9919	0.4223	30.47
34	33.9917	0.5988	33.9917	0.4183	30.14
35	34.9915	0.591	34.9915	0.4145	29.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 5.2 แสดงตารางข้อมูลผลการเปรียบเทียบขนาดการสั่นสะเทือนของระบบหลักที่ติดตั้ง
อุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้และระบบที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการ
สั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

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

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

5.2.4.3 กราฟแสดงข้อมูลเปรียบเทียบขนาดการสั่นที่ความถี่ต่าง ๆ ของสองระบบ



รูปที่ 5.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนและความถี่ใช้งานของระบบหลักที่ติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้และระบบที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

5.2.5 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบที่แสดงข้อมูลเป็นดังตารางที่ 5.2 พบว่าระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้มีขนาดการสั่นสะเทือนสูงมาก โดยมีขนาดสูงสุดถึง 2.6 มิลลิเมตรที่ความถี่ใช้งาน 15 รอบต่อวินาที ในขณะที่ระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้มีขนาดการสั่นสะเทือนที่ต่ำ โดยที่ความถี่ใช้งาน 15 รอบต่อวินาที มีขนาดการสั่นสะเทือนสูงสุดเหลือเพียง 0.9 มิลลิเมตร ลดลงถึง 65.49 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 5.2 มาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนสูงสุดและความถี่ใช้งานพบว่าทั้งสองระบบมีขนาดการสั่นที่ลดลงแบบคู่เข้าค่าหนึ่ง ซึ่งแสดงดังรูป 5.18 และจากรูป 5.18 จะเห็นว่ากราฟของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้จะอยู่ใต้กราฟของระบบที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้ในทุกช่วงของความถี่ใช้งาน โดยที่ความถี่ 15 รอบต่อวินาทีมีความแตกต่างของขนาดการสั่นมากที่สุด ซึ่งหมายความว่าเมื่อความถี่ใช้งานลดลงมากที่สุดถึง 65.49 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อความถี่ใช้งานถูกปรับเพิ่มขึ้นพบว่าความแตกต่างของขนาดการสั่นสะเทือนของสองระบบกลับลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งหมายความว่าเมื่อความถี่ใช้งานมากขึ้นความสามารถในการลดขนาดการสั่นของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้จะลดลง โดยต่ำสุดที่ความถี่ใช้งาน 35 รอบต่อวินาที มีเปอร์เซ็นต์การลดขนาดการสั่นสะเทือนที่ 29.86 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่สู่สาธารณะ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตจากเจ้าของเอกสารหรือการละเมิดลิขสิทธิ์อื่น ๆ อาจก่อให้เกิดความเสียหายและต้องรับผิดชอบต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บทที่ 6

สรุปผลการดำเนินการและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการดำเนินการ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้บรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ตั้งใจไว้ทุกประการ ซึ่งมีข้อสรุปดังนี้
 ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อแก้ปัญหาการสิ้นสະเทือนของเครื่องจักรที่สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ใช้งานได้ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้ออกแบบอุปกรณ์ดูดซับการสิ้นสະเทือน โดยอุปกรณ์ดังกล่าวมีการออกแบบสปริงโดยการประยุกต์ใช้คานโค้ง ซึ่งผู้วิจัยได้แสดงให้เห็นความสอดคล้องของสมการความสัมพันธ์ระหว่างคานิจสปริงของคานและมุมกวาดของแขนยึดคานจากทฤษฎีในบทที่ 3 และผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างคานิจสปริงของคานและมุมกวาดของแขนยึดคานในบทที่ 5 ว่ามีความสอดคล้องกัน โดยสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวถูกนำมาใช้กับระบบควบคุมเพื่อให้อุปกรณ์ดูดซับการสิ้นสະเทือนเป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ

เพื่อหาประสิทธิภาพของอุปกรณ์จึงนำอุปกรณ์ดูดซับการสิ้นสະเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้ที่ถูกสร้างขึ้นตามที่ได้ออกแบบไว้ ไปทดสอบกับอุปกรณ์จำลองการสิ้นสະเทือนโดยอุปกรณ์ดังกล่าวถูกออกแบบให้สามารถปรับความถี่การใช้งานได้ นำอุปกรณ์ทั้งสองเข้าสู่โปรแกรมจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของระบบโดยการเปรียบเทียบขนาดการสิ้นสະเทือนของอุปกรณ์จำลองการสิ้นสະเทือนที่ติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสิ้นสະเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้และไม่ได้ติดตั้ง จากการทดสอบด้วยโปรแกรมจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของระบบพบว่าสามารถลดการสิ้นสະเทือนได้สูงสุดถึง 65.49 เปอร์เซ็นต์ที่ความถี่ใช้งาน 15 รอบต่อวินาที โดยความถี่ใช้งานดังกล่าวอยู่ใกล้ความถี่ธรรมชาติของระบบ

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับการใช้งานอุปกรณ์ดูดซับการสิ้นสະเทือนในแต่ละครั้ง สปริงคานโค้งมีการรับภาระผสมที่ขึ้นตลอดเวลาได้แก่ โมเมนต์ดัด โมเมนต์บิด และ แรงเฉือน จึงควรมีการคำนึงถึงความถี่และอายุการใช้งานของสปริงคานโค้งก่อนนำไปใช้งาน

2. ประสิทธิภาพของระบบควบคุมขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของตัวรับรู้ (sensor) และฟังก์ชันการกรองข้อมูลที่ได้รับจากตัวรับรู้ (sensor) ว่าสามารถตัดสัญญาณรบกวนได้มากน้อยแค่ไหน และเป็นหัวข้อที่น่าสนใจในการนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดูดซับการสิ้นสະเทือน

3. ผู้จัดทำคิดว่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์น่าจะลดลงหากนำไปทดสอบบนอุปกรณ์จริงอันเนื่องมาจากการจำลองผ่านโปรแกรมจำลองลดตัวแปรรบกวนมากเกินไป เช่นไม่มีการสิ้นในแนวระนาบ แรงเสียดทาน สัมประสิทธิ์ความหน่วงในคานโค้ง ซึ่งบางอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการลดการสิ้นได้และอาจทำให้ผู้จัดทำมองข้ามปัญหาบางอย่างไปได้

4. อุปกรณ์ดูดซับการสิ้นสະเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้นี้เป็นเพียงอุปกรณ์ต้นแบบเท่านั้น การนำไปใช้งานจริงยังคงต้องคำนึงถึงการออกแบบเพื่อนำไปใช้งานรวมถึงความปลอดภัยในการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

บรรณานุกรม

- เจิมธง ปรารณารักษ์. 2549. การลดการสั่นสะเทือนในคานด้วยอุปกรณ์ซับการสั่นทางพลวัตแบบปรับตัวได้. นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. 2556. การควบคุมระบบพลศาสตร์. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Beer, Johnston, DeWolf and Mazurek. 2012. **Mechanics of Materials**. 7th ed. New York : McGraw-Hill.
- Den Hartog, J.P. 1956. **Mechanical Vibration**. 2nd ed. New York : McGraw-Hill.
- Dunkerley, S. 1984. **On the Whirling and Vibration of Shafts**. Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 185, January 1894, pp. 279-360.
- Hunt, J.B. 1979. **Dynamic Vibration Absorbers**. Mechanical Engineering Publications, London.
- Inman, D.J. 2014. **Engineering Vibration**. 4th ed. New Jersey : Prentice-Hall.
- Mead, D.J. 1999. **Passive Vibration Control**. Chichester : John Wiley & Sons.
- Norman S. Nise. 2011. **Control Systems Engineering**. 6th ed. Chichester : John Wiley & Sons.
- Tore Dahlberg. 2004. **Procedure to calculate deflections of curved beams**. Linköping : Linköping University.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบทั้งหมดของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ดูซบการสั้นและไม่ได้ติดตั้งที่ได้จาก
โปรแกรมจำลองพฤติกรรมของระบบ

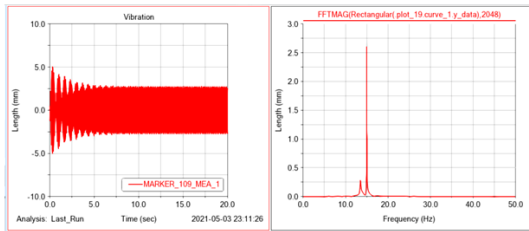
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

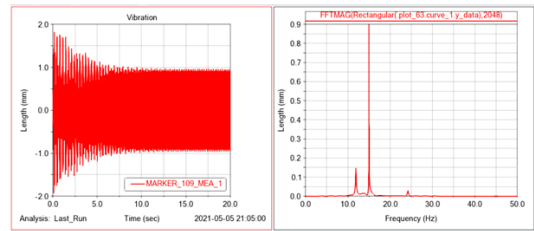
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

15 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

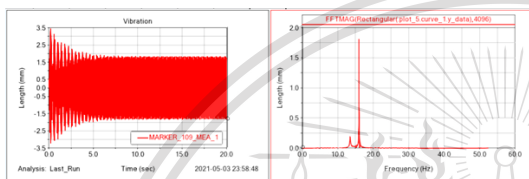


ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

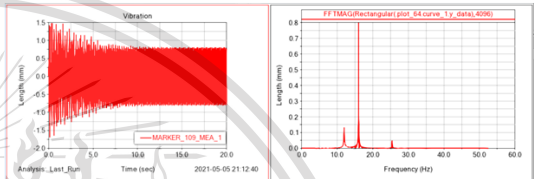


16 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

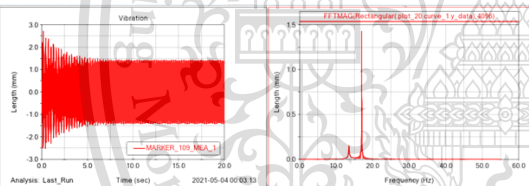


ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

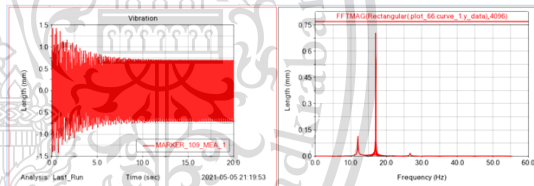


17 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

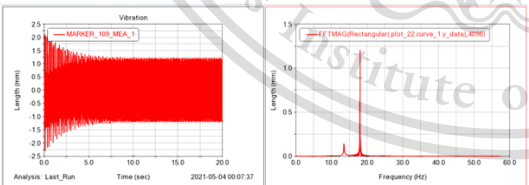


ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

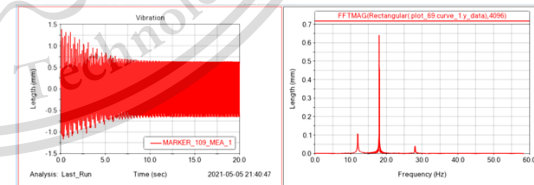


18 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

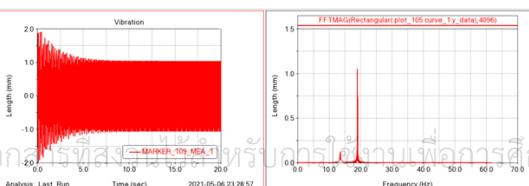


ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

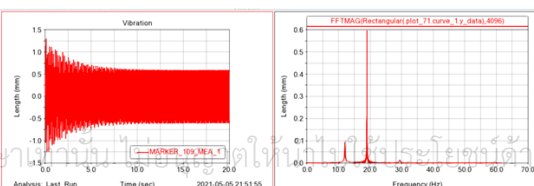


19 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

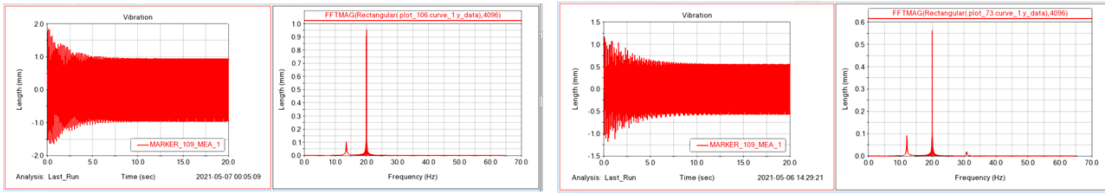
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

20 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

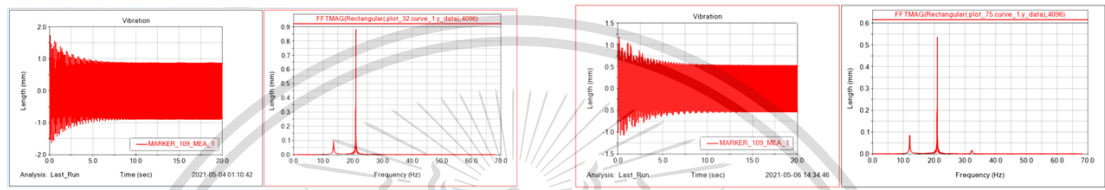
ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



21 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

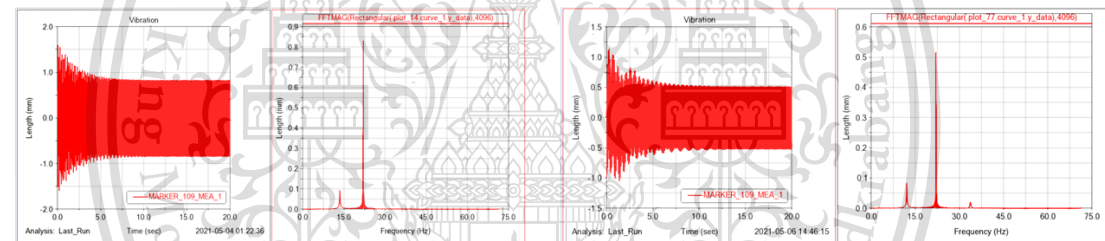
ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



22 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

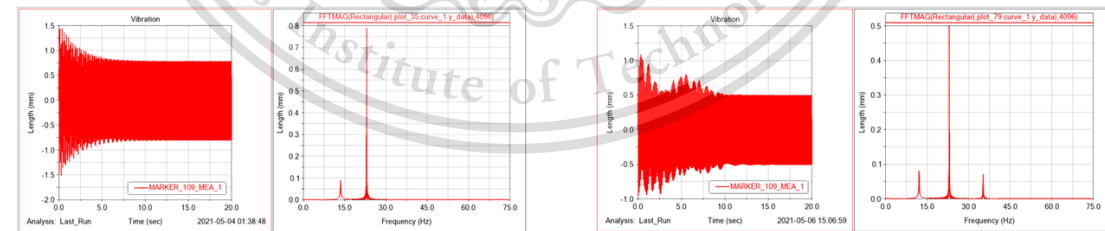
ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



23 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

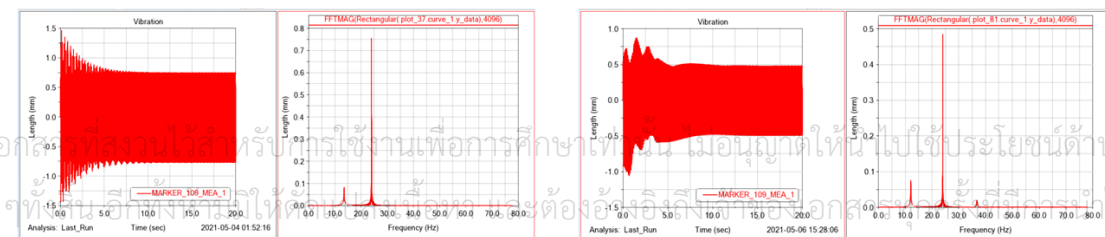
ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



24 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ในเชิงพาณิชย์
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 จะถือว่าผิดกฎหมายและต้องรับผิดชอบต่อผลกระทบที่เกิดขึ้น

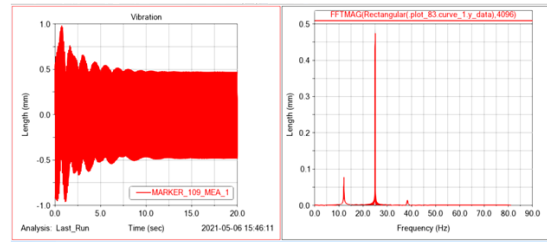
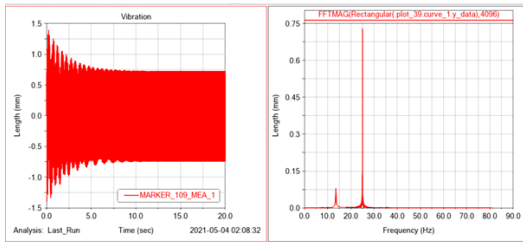
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

25 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

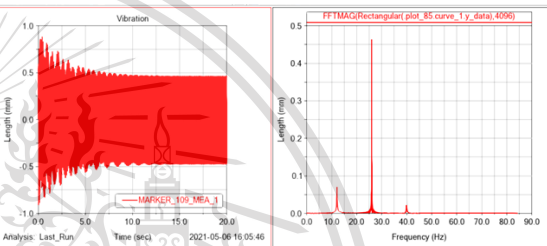
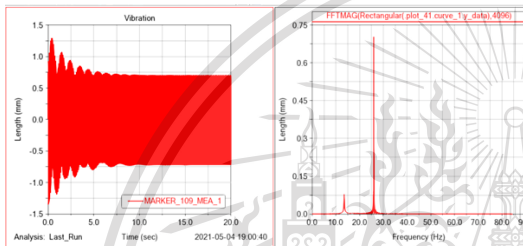
ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



26 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

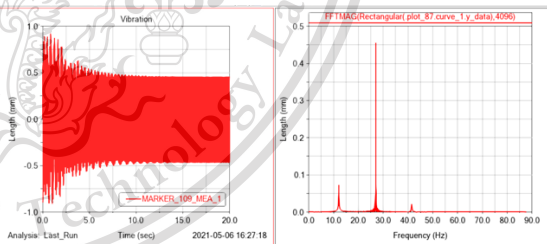
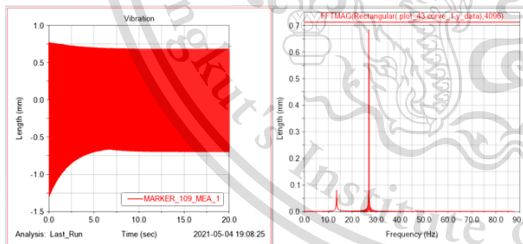
ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



27 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

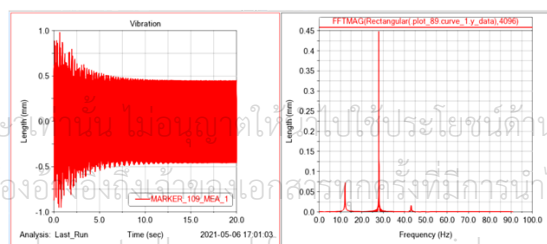
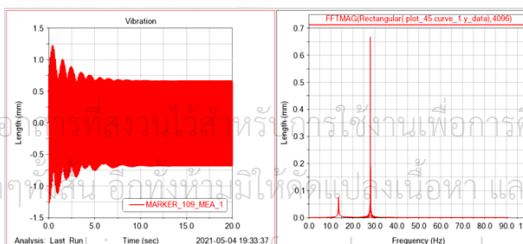
ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



28 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



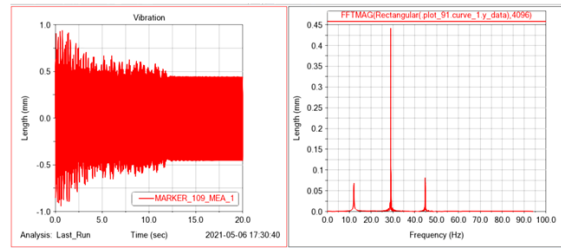
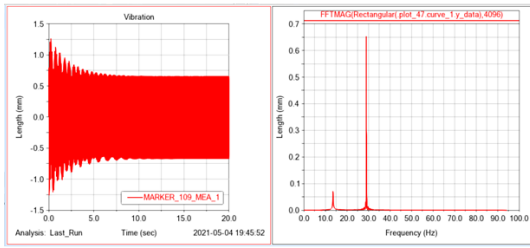
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำเพื่อประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงแหล่งเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

29 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

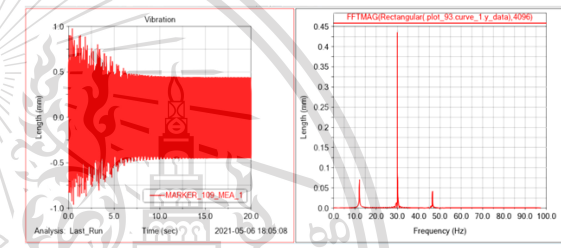
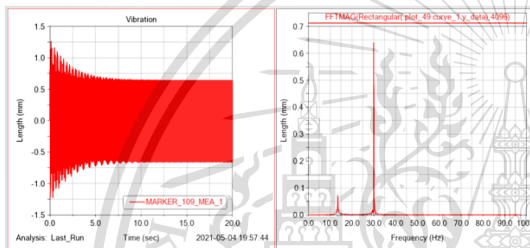
ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



30 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

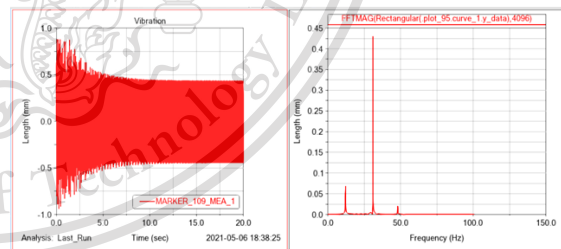
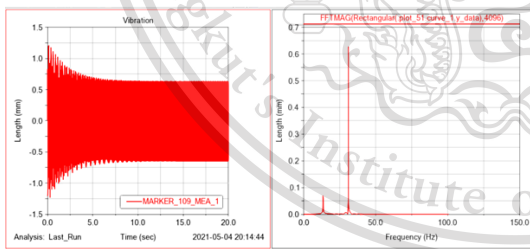
ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



31 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

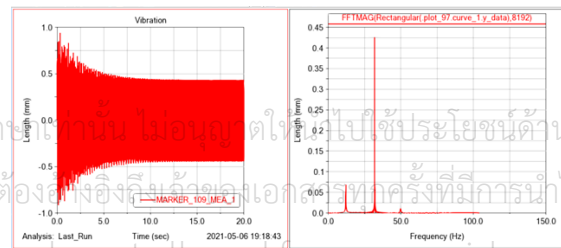
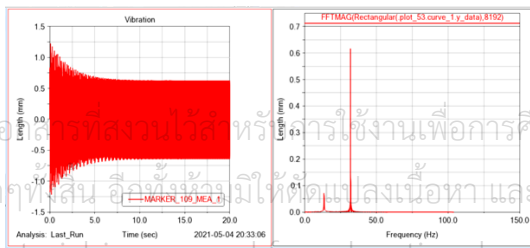
ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



32 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับสารใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังอาจมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

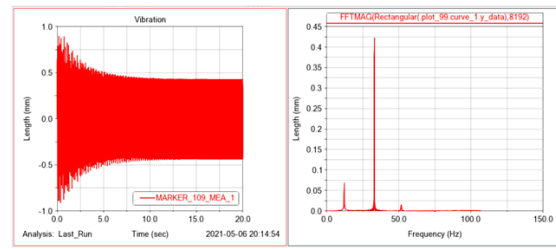
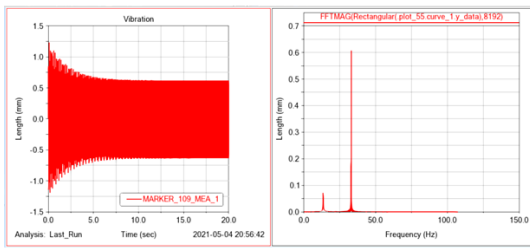
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

33 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

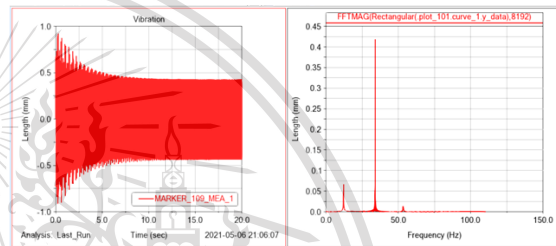
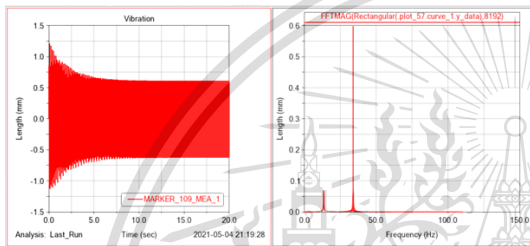
ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



34 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

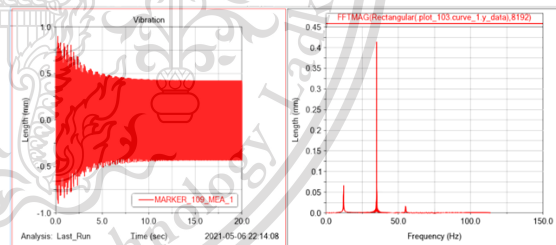
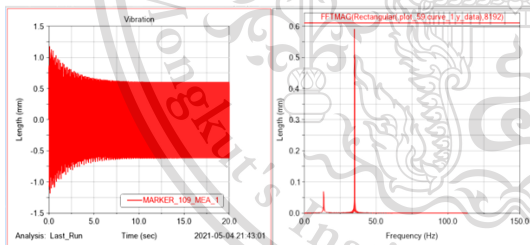
ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



35 Hz

ระบบไม่มีอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้

ระบบติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับการสั่นสะเทือนแบบกึ่งปรับค่าได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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