

การพัฒนาชุดลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั่นเชิงโครงสร้าง  
STRUCTURAL DEVELOPMENT OF VIBRATING TRAY  
FOR SOLID PARTICLE TRANSPORT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต


ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิศวกรรมขนส่งทางราง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STRUCTURAL DEVELOPMENT OF VIBRATING TRAY  
FOR SOLID PARTICLE TRANSPORT

The seal of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang is a circular emblem. It features a central five-tiered umbrella (parasol) with a sunburst above it. The umbrella is flanked by two smaller, similar structures. The entire emblem is surrounded by a decorative border with Thai script. The text inside the seal reads "สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง" (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang).

THAMONWAN WIMONRATCHATAPORN  
WORALERT AINNANTHA  
SIRAWICH PHUNKAEW

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
MAJOR RAIL TRANSPORTATION ENGINEERING SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG 2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ปริญญาโทปีการศึกษา 2564

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิศวกรรมขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาชุดลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั่นเชิงโครงสร้าง

STRUCTURAL DEVELOPMENT OF VIBRATING TRAY FOR

SOLID PARTICLE TRANSPORT

ผู้จัดทำ

นางสาวธมลวรรณ วิมลรัชตากรณ์

รหัสนักศึกษา 61010481

นายวรเลิศ อินันนทะ

รหัสนักศึกษา 61010935

นายศิริวิชญ์ พันธุ์แก้ว

รหัสนักศึกษา 61011016



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การพัฒนาชุดลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั้นเชิงโครงสร้าง

นางสาวมลวรรณ วิมลรัชตากรณ์	61010481
นายวรเลิศ อินันนทะ	61010935
นายศิริวิชญ์ พันธุ์แก้ว	61011016
รศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2564	

### บทคัดย่อ

การพัฒนาชุดลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั้นเชิงโครงสร้างเป็นส่วนหนึ่งของ “โครงการพัฒนาและประเมินสมรรถนะสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงเพื่อการใช้งานในระยะยาวสำหรับภาคอุตสาหกรรม” ซึ่งโครงสร้างก่อนการปรับปรุงนั้นมีการพัฒนาประสิทธิภาพการลำเลียงและแก้ปัญหาการตกค้างของอนุภาคในท่อลำเลียงให้คงเหลือน้อยที่สุด แต่ยังมีข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับความแข็งแรงเชิงโครงสร้างเมื่อมีการใช้งานไปในระยะหนึ่ง จึงได้จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และพัฒนาโครงสร้างชุดลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั้นอีกทั้งพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับรูปแบบการสั้น เพื่อเพิ่มความแข็งแรงทนทานจากความล้าในโครงสร้างชุดลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั้น ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการลำเลียงเชื้อเพลิงแข็งต้องยังคงเดิมหรือดีกว่าเดิม จากการออกแบบและใช้วิธีการ Finite Element Analysis โดยโปรแกรม SolidWorks และ ANSYS โดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยมวลของโครงสร้างและเพิ่มตัวสลักเกลียวบริเวณตัวดันทานการสั้นสะท้อน เพื่อลดทิศทางการเคลื่อนที่ให้อยู่ในแนวตั้ง ที่จะส่งผลให้เชื้อเพลิงแข็งสามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้ และทำการเสริมโครงสร้างของคานที่ยึดกับท่อลำเลียง รวมถึงเพิ่มความแข็งแรงและความลาดเอียงของโครงสร้างคาน พร้อมทั้งศึกษาการวัดค่าการเคลื่อนที่ของชุดลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั้นเพื่อทำการวิเคราะห์ในการออกแบบดังกล่าวเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลำเลียงเชื้อเพลิงแข็งและทิศทางการสั้นหลังจากแก้ไขโครงสร้างให้มีความแข็งแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## STRUCTURAL DEVELOPMENT OF VIBRATING TRAY FOR SOLID PARTICLE TRANSPORT

THAMONWAN WIMONRATCHATAPORN	61010481
WORALERT AINNANTHA	61010935
SIRAWICH PHUNKAEW	61011016
Assoc.Prof.Dr. JARRUWAT CHAROENSUK	ADVISOR

### ABSTRACT

The structural development of a vibrating tray for solid particle transport is a part of “Biomass Burner Development in Industrial Boilers”, which the previous structure has improved the issues of the transportation efficiency and solved the problem of particle residues in conveying pipe to be the least, yet the problem on fatigue strength of the structure still exists. Therefore, this thesis aims to analyze and develop the structure of the vibrating tray for solid particles and to develop sensors for detecting the vibration of the beam to increase the fatigue strength of the structure, while the transportation efficiency must remain the same or better. Finite Element Analysis Method was implemented by using SolidWorks and ANSYS program. The mass moment of inertia of the structure will be increased and the suspension part will be added with studs to reduce the unwanted direction of movement to be only vertical, which will benefit the solid particle to move forward. Moreover, reinforces the structure attached to the conveying pipe and increases the slope of the conveying pipe. The displacement measurements of the vibrating solid particle conveyor were also studied to analyze the newly designed structure to compare the transportation efficiency and the direction of the vibration beam.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์จัดทำเพื่อประกอบการเรียนในรายวิชา PROJECT IN RAIL TRANSPORTATION ENGINEERING โดยให้นักศึกษาได้นำความรู้ ความสามารถทักษะต่าง ๆ ที่ได้สั่งสมมาในภาคทฤษฎีมาทำการปฏิบัติการ เป็นการเพิ่มพูนความรู้ ทักษะ ความสามารถต่าง ๆ และประสบการณ์ในด้านอื่น ๆ ให้แก่นักศึกษาได้เป็นอย่างดี เพื่อในภายภาคหน้าเมื่อนักศึกษาสำเร็จ การศึกษาและต้องออกปฏิบัติงานจริง

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะความกรุณาในการให้ความช่วยเหลือ แนะนำ และชี้แนวทางของ รศ.ดร.จาร์วัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้จัดทำจึงขอกราบขอบ พระคุณเป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความกรุณานี้มาโดยตลอดในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ และ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้ให้คำชี้แนะเพิ่มเติมรวมถึงข้อผิดพลาด ต่าง ๆ จนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้ความช่วยเหลือเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ รวมถึงคำชี้แนะข้อผิดพลาดเพิ่มเติมต่าง ๆ ซึ่งทำให้ผู้จัดทำรับทราบและเข้าใจปัญหานั้น ๆ และสามารถแก้ไขได้ทันที่ ขอบคุณเพื่อนพี่น้องนักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่าง ๆ จน ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ บริษัท ชัยถาวรรุ่งเรืองกิจ จำกัด บริษัท ออนิวิสเตป จำกัด และ บริษัท ชุมทอง ค้าเหล็ก จำกัด ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์ วัสดุ เหล็ก เซนเซอร์ MPU9250 ที่ใช้ในปริญญาานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ โรงกลึงช่างเตี้ยลาดกระบัง รวมถึงนายสัมฤทธิ์ ชูเชิด ผู้ให้คำแนะนำ สนับสนุน อุปกรณ์ และได้ให้ความรู้แก่ผู้จัดทำ

นอกจากนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ รุ่นพี่ผู้ร่วมในปริญญาานิพนธ์เรื่องการพัฒนาชุดลำเลียง อนุภาคของแข็งแบบสั้นของท่านอาจารย์จาร์วัตร เจริญสุข ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำปริญญา นิพนธ์นี้เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้ทุนและสนับสนุน การทำปริญญาานิพนธ์ครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ผู้จัดทำขอมอบให้แก่ผู้มิพระคุณทุกท่าน

นางสาวธมลวรรณ วิมลรัชตากรณี	61010481
นายวรเลิศ อินันนทะ	61010935
นายศิริวิชญ์ พันธุ์แก้ว	61011016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VIII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา .....	2
1.4 ขอบเขตของการทดลอง .....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการ .....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีการสันสะเทือน.....	4
2.1.1 ทฤษฎีการสันสะเทือนแบบอิสระ .....	4
2.1.2 ทฤษฎีการสันสะเทือนแบบมีแรงบังคับ .....	5
2.1.3 การสันสะเทือนของระบบที่มีองศาอิสระมากกว่าหนึ่ง .....	7
2.1.4 การสั่นพ้อง.....	8
2.1.5 การสั่นแบบงอของคาน.....	9
2.2 การโก่งตัวของคาน .....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.1 การโค้งตัวของคานภายใต้น้ำหนักที่มากกระทำ.....	12
2.2.2 สมการเส้นโค้งอีลาสติก.....	12
2.3 โมเมนต์ความเฉื่อย.....	13
2.3.1 โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่.....	13
2.3.2 ทฤษฎีแกนขนานของพื้นที่.....	14
2.4 ความล้า.....	15
2.5 สปริง.....	16
2.5.1 สปริงแรงบิด.....	16
2.5.2 สปริงแรงดึง.....	17
2.5.3 สปริงแรงอัด.....	17
2.6 Shock Absorbers.....	18
2.6.1 วัสดุที่ใช้ในการทำ Shock Absorbers.....	18
2.6.2 การใช้งาน.....	19
2.7 มอเตอร์ไฟฟ้า.....	19
2.7.1 มอเตอร์กระแสตรง.....	20
2.7.2 มอเตอร์กระแสสลับ.....	20
2.7.3 โครงสร้างมอเตอร์.....	21
2.8 Sensors MPU-9250.....	21
2.8.1 คุณสมบัติของ Gyroscope, Accelerometer และ Magnetometer.....	22
2.8.2 Block Diagram.....	23
2.8.3 ทิศแนวแกนของ Sensor.....	23
2.8.4 วิธีการต่อใช้งาน.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.9 Kalman Filter .....	25
2.9.1 Sensors Fusion ในโปรแกรม MATLAB .....	25
บทที่ 3 การออกแบบและการคำนวณ.....	28
3.1 ขั้นตอนการทำงาน .....	28
3.2 โครงสร้างชุดคำสั่งก่อนการปรับปรุง .....	29
3.3 ทดลองติดตามเซนเซอร์เพื่อศึกษาลักษณะการสั่นของคานลำเลียง .....	30
3.3.1 การเขียนชุดคำสั่งเพื่อกรองสัญญาณรบกวนจากเซนเซอร์ .....	34
3.3.2 คำนวณหาระยะจากการหาปริพันธ์เชิงตัวเลข โดยการใช้การประมาณค่าปริพันธ์โดยใช้ระเบียบวิธีสี่เหลี่ยมคางหมู .....	35
3.3.3 ขั้นตอนการติดตั้งเซนเซอร์ .....	36
3.4 การปรับปรุงโครงสร้างความแข็งแกร่งการติดตั้งสปริงและทิศทางการสั่นสะเทือน .....	36
3.4.1 แนวทางที่ 1 การเปลี่ยนอุปกรณ์ต้านทานการสั่นสะเทือน .....	36
3.4.2 แนวทางที่ 2 การปรับปรุงโครงสร้างบริเวณตัวต้านทานการสั่นสะเทือน .....	40
3.5 การปรับปรุงโครงสร้างความแข็งแกร่งของคาน .....	41
3.5.1 แนวทางที่ 1 การเพิ่มพื้นที่ยึดติดอุปกรณ์กับโครงสร้างคาน .....	41
3.5.2 แนวทางที่ 2 การเพิ่ม Moment of Inertia ของโครงสร้างด้วยเหล็กทรงน้ำ .....	43
3.6 แนวทางการเสริมสมรรถภาพการลำเลียงเชื้อเพลิง .....	48
3.7 ปัญหาที่พบและวิธีการแก้ไข .....	49
3.8 สรุปแนวทางการปรับปรุง .....	50
บทที่ 4 การติดตั้งและการแก้ปัญหาการติดตั้งเพื่อทำการทดลอง .....	51
4.1 กระบวนการติดตั้ง .....	51
4.1.1 การติดตั้งสปริงเข้ากับโครงสร้างคานและยึดติดอุปกรณ์ทั้งหมด .....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ปัญหาที่พบขณะติดตั้ง และการแก้ไขปัญหา.....	53
บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัญหา .....	54
5.1 การทดลองหาประสิทธิภาพการลำเลียง.....	54
5.2 การทดลองเพื่อหาทางงานจากการเคลื่อนที่ของกองเชื้อเพลิง.....	57
5.3 การตรวจวัดทิศทางการเคลื่อนที่ของชุดอุปกรณ์ด้วยเซนเซอร์.....	60
บทที่ 6 สรุปผล การปรับปรุง และข้อเสนอแนะ .....	63
6.1 สรุปผลการทดลอง .....	63
6.2 พัฒนาการการปรับปรุงโครงสร้าง .....	64
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	66
เอกสารอ้างอิง.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1	องค์ประกอบโครงสร้างชุดลำเลียงก่อนการปรับปรุง.....	29
ตารางที่ 3.2	โหมตการสันก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงโครงสร้างคาน.....	45
ตารางที่ 3.3	ตาราง International Plumbing Code (IPC).....	48
ตารางที่ 3.4	โหมตความถี่ในการสันและรูปแบบของการสันก่อนและหลังแก้ไข.....	50
ตารางที่ 5.1	ผลการทดลองเพื่อหาความเร็วเฉลี่ยของเชื้อเพลิงด้วยอัตราการใช้ 0.5 kg/s .....	56
ตารางที่ 5.2	แสดงค่าความเร็วเฉลี่ยของเชื้อเพลิงและกำลังงานเฉลี่ยที่อัตราการใช้ 0.5 kg/s.....	56
ตารางที่ 5.3	แสดงงานที่ใช้ระหว่างท่อเปล่ากับท่อใส่มวลเชื้อเพลิง.....	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	มวลภายใต้การกระจัดเสมือนและแผนภาพอิสระ.....	5
รูปที่ 2.2	แผนภาพของระบบหนึ่งองศาอิสระที่ถูกกระทำโดยแรงภายนอก.....	6
รูปที่ 2.3	ระบบสององศาอิสระอย่างง่ายประกอบด้วยมวลที่ต่อกันด้วยสปริงแบบอนุกรม.....	7
รูปที่ 2.4	แผนภาพอิสระโดยพิจารณาแต่ละมวล ของรูปที่ 2.3.....	7
รูปที่ 2.5	การสั้นพ้อง.....	9
รูปที่ 2.6	สมมติฐานระนาบตัดให้เป็นระนาบ.....	10
รูปที่ 2.7	ผลกระทบจากการเสียรูปแบบเฉือนต่อ element ของคานาคัด.....	11
รูปที่ 2.8	การเสียรูปของคานา.....	12
รูปที่ 2.9	Deformation of a differential element of beam axis.....	12
รูปที่ 2.10	พิกัดเชิงขั้ว.....	14
รูปที่ 2.11	พิกัดเลื่อนแกนขนาน.....	14
รูปที่ 2.12	S-N curve.....	16
รูปที่ 2.13	สปริงบิด.....	17
รูปที่ 2.14	สปริงแรงดึง.....	17
รูปที่ 2.15	สปริงแรงอัด.....	18
รูปที่ 2.16	Shock Absorbers.....	18
รูปที่ 2.17	มอเตอร์กระแสตรง.....	20
รูปที่ 2.18	มอเตอร์กระแสสลับ.....	20
รูปที่ 2.19	โครงสร้างมอเตอร์.....	21
รูปที่ 2.20	Block Diagram MPU-9250.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.21 การวางแผนของแกนและขั้วของการหมุนสำหรับ AccelerometerและGyroscope ....	24
รูปที่ 2.22 การวางแผนแกนของเข็มทิศ .....	24

## สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.23 วิธีการเชื่อม MPU-9250 กับ Arduino UMO R3 .....	24
รูปที่ 2.24 อธิบายการวนซ้ำแบบเฟรมเดียวกันผ่านอัลกอริทึม.....	27
รูปที่ 3.1 Flow Chart ขั้นตอนการทำงาน .....	28
รูปที่ 3.2 โครงสร้างส่วนประกอบชุดลำเลียงก่อนปรับปรุง.....	29
รูปที่ 3.3 โครงสร้างโมเดลสามมิติก่อนการปรับปรุง.....	30
รูปที่ 3.4 ชุดทดลองการจำลองการเคลื่อนที่ .....	30
รูปที่ 3.5 ความเร่งที่ได้จากการทดลอง.....	31
รูปที่ 3.6 ความเร็วเชิงมุมที่ได้จากการทดลอง.....	31
รูปที่ 3.7 ค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดลอง .....	31
รูปที่ 3.8 ความเร่งที่ได้จากการทดลองเมื่อผ่านการกรองสัญญาณรบกวน.....	32
รูปที่ 3.9 ความเร็วเชิงมุมที่ได้จากการทดลองเมื่อผ่านการกรองสัญญาณรบกวน.....	33
รูปที่ 3.10 ค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดลองเมื่อผ่านการกรองสัญญาณรบกวน.....	33
รูปที่ 3.11 Flow Chart ขั้นตอนการเขียนชุดคำสั่งเพื่อกรองสัญญาณรบกวนจากเซนเซอร์.....	34
รูปที่ 3.12 ข้อมูลความเร่งที่ได้จากการทดลอง.....	35
รูปที่ 3.13 ข้อมูลระยะทางที่ได้จากการทดลอง.....	35
รูปที่ 3.14 ติดตั้งเซนเซอร์และเก็บผล .....	36
รูปที่ 3.15 การกำหนด Fixed Support และ Displacement.....	37
รูปที่ 3.16 การ Mesh โครงสร้างเดิม.....	37
รูปที่ 3.17 ค่าจำเพาะของวัสดุชนิด Structural Steel.....	37
รูปที่ 3.18 ความเค้น Von-Mises .....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.19	Cross Section แสดงบริเวณที่เกิดค่า Maximum Stress .....	38
รูปที่ 3.20	โมเดลสามมิติการติดตั้ง Shock Absorber.....	39

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 3.21	ความเค้น Von-Mises ของการติดตั้ง Shock Absorber .....	39
รูปที่ 3.22	โครงสร้าง inlet แนวทางที่ 2.....	40
รูปที่ 3.23	โครงสร้าง outlet แนวทางที่ 2.....	40
รูปที่ 3.24	ความเค้น Von-Mises ของการติดตั้งเพิ่มสลักเกลียว inlet .....	40
รูปที่ 3.25	ความเค้น Von-Mises ของการติดตั้งเพิ่มสลักเกลียว outlet.....	41
รูปที่ 3.26	โครงสร้างโมเดลสามมิติหลังการปรับปรุงแนวทางที่ 1 .....	42
รูปที่ 3.27	โหมดการสั้นที่ 1.....	42
รูปที่ 3.28	โหมดการสั้นที่ 2.....	42
รูปที่ 3.29	โหมดการสั้นที่ 3.....	43
รูปที่ 3.30	โหมดการสั้นที่ 4.....	43
รูปที่ 3.31	เหล็กกรงน้ำ 3D Model.....	44
รูปที่ 3.32	โครงสร้างโมเดลสามมิติหลังการปรับปรุงแนวทางที่ 2 .....	44
รูปที่ 3.33	Mass Moments of Inertia 1 .....	44
รูปที่ 3.34	Mass Moments of Inertia 2 .....	44
รูปที่ 3.35	Mass Moments of Inertia 3 .....	45
รูปที่ 3.36	โหมดการสั้นที่ 1 .....	45
รูปที่ 3.37	โหมดการสั้นที่ 2.....	46
รูปที่ 3.38	โหมดการสั้นที่ 3.....	46
รูปที่ 3.39	โหมดการสั้นที่ 4.....	46
รูปที่ 3.40	โหมดการสั้นที่ 5.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.41 โหมตการสั้นที่ 6 .....	47
รูปที่ 3.42 การออกแบบบังคับทิศทางการสั้นของมอเตอร์ .....	49
รูปที่ 3.43 ติดตั้งท่อใส่เข้ากับโครงสร้าง .....	49
รูปที่ 3.44 สรุปรูปโครงสร้างโมเดลสามมิติหลังการปรับปรุง .....	50
รูปที่ 4.1 แผนผังขั้นตอนการติดตั้งและการทดลอง.....	51
รูปที่ 4.2 โครงสร้างชุดสปริงของอุปกรณ์.....	52
รูปที่ 4.3 โครงสร้างคานของอุปกรณ์สำหรับยึดติดท่อลำเลียงและติดตั้งมอเตอร์ .....	52
รูปที่ 4.4 โครงสร้างของอุปกรณ์ชุดลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั้นเชิงโครงสร้าง.....	52
รูปที่ 4.5 แผ่นเหล็กด้านข้าง.....	53
รูปที่ 4.6 แผ่นเหล็กด้านข้างตัดแบ่งช่อง .....	53
รูปที่ 5.1 การทดลองเพื่อหางานจากการเคลื่อนที่ของก้อนเชื้อเพลิง .....	58
รูปที่ 5.2 การทดลองเพื่อหางานจากการเคลื่อนที่ของก้อนเชื้อเพลิง 2 .....	58
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยกของท่อเปล่า .....	59
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยกเมื่อใส่มวลเชื้อเพลิง .....	59
รูปที่ 5.5 ทิศในแนวแกนอุปกรณ์ .....	60
รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ในแนวแกน Z .....	61
รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ในแนวแกน X .....	61
รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ในแนวแกน Y.....	61
รูปที่ 6.1 ชุดขนส่งลำเลียงสารชีวมวลด้วยเครื่องสั้น รุ่นที่ 1 .....	64
รูปที่ 6.2 ชุดขนส่งลำเลียงสารชีวมวลด้วยเครื่องสั้น รุ่นที่ 2 .....	65
รูปที่ 6.3 ชุดอุปกรณ์ลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั้นเชิงโครงสร้าง.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากโครงการก่อนหน้าหัวข้อ การพัฒนาภาคต้นสำหรับการขนส่งมวลชีวภาพบด ในระหว่างการขนส่งเชื้อเพลิงแข็งไปยังห้องเผาไหม้พบปัญหาการตกค้างของเชื้อเพลิงแข็งเนื่องจากท่อลำเลียงเกิดการเสียดสีที่ผิวภายในของท่อส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ลดลง การปรับปรุงระบบขนส่งเชื้อเพลิงบดเป็นวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากที่สุดวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาเชื้อเพลิงบดตกค้าง จากสถานะภาพล่าสุดของระบบลำเลียงเชื้อเพลิงพบว่าการใช้กลไกการสั่นสามารถแก้ปัญหาเชื้อเพลิงกองได้และทำให้การลำเลียงมีความสม่ำเสมอ แต่พบว่าโครงสร้างของระบบลำเลียงและจุดยึดยังต้องมีการพัฒนา ให้มีความแข็งแรง ทดทาน เนื่องจากช่วงความถี่ในการสั่นส่งผลต่อโครงสร้าง และเพิ่มหรือคงที่ประสิทธิภาพในการลำเลียงของอุปกรณ์

คณะผู้จัดทำจึงได้นำโครงการนี้มาพัฒนาต่อเพื่อปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น โดยทำการปรับแต่งโครงสร้างของคาน ตำแหน่งรอยเชื่อมหรือออกแบบจุดเชื่อมต่อใหม่ เสริมจุดยึดเพื่อไม่ให้เกิดการสั่นสะเทือน ค่ามวลช่วงความถี่ที่เหมาะสม และปรับระดับความลาดชันของท่อลำเลียง โดยจากการออกแบบและทดสอบผ่านโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์รูปแบบความเสียหายของอุปกรณ์และนำข้อมูลจาก Sensors มาวิเคราะห์รูปแบบการสั่นสะเทือนเพื่อพัฒนาจุดดังกล่าวในข้างต้น จึงเป็นที่มาของโครงการนี้

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อวิเคราะห์จุดด้อยของระบบในเชิงความแข็งแรง
2. เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างชุดลำเลียงโดยยังคงประสิทธิภาพการลำเลียงเดิม
3. เพื่อพัฒนาอุปกรณ์สำหรับการตรวจรูปแบบการสั่น

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การวิเคราะห์และปรับปรุงพัฒนาโครงสร้างของภาคสั้นสำหรับการขนส่งชีวมวลบดในเชิงความแข็งแรง สามารถช่วยลดปัญหาความเสียหายของโครงสร้างที่อาจเกิดขึ้น เมื่อระบบทำงานเป็นระยะเวลานาน โดยที่ยังคงประสิทธิภาพการขนส่งให้คงเดิมหรือดีกว่าเดิมได้ รวมถึงสามารถพัฒนาและติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับการสั่น ให้สามารถวัดระยะการสั่นของคานเพื่อนำค่าจากการทดลองไปวิเคราะห์ต่อไปได้

### 1.4 ขอบเขตของการทดลอง

1. วิเคราะห์จุดด้อยของระบบที่มีอยู่ในเชิงความแข็งแรงทนทานจากการล้า เมื่อระบบทำงานเป็นระยะเวลานาน
2. พัฒนาและปรับปรุงโครงสร้างเพื่อแก้ปัญหาเดิมที่มีอยู่ และวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับปรุงโครงสร้างดังกล่าวต่อลักษณะการตอบสนองของระบบต่อแรงเฉยที่ใช้เดิม
3. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เช่น Beam Vibration Mode Shape และ Sensor MPU 9250 เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับการสั่น
4. เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทดลองก่อนและหลังปรับปรุงโครงสร้าง
5. ดำเนินการทดสอบโครงสร้างที่ปรับปรุงแล้วเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพตามที่ยกแบบไว้

### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินการ

1. กำหนดขอบเขตการดำเนินการ
2. ศึกษาโครงสร้างของอุปกรณ์ลำเลียงแบบสั้นสำหรับการขนส่งมวลชีวภาพบดเดิม
3. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง Beam Vibration Mode Shape และ Arduino SensorMPU9250
4. ศึกษาโปรแกรมที่ใช้ร่วมกับตัววัดการเคลื่อนที่ (Sensor) เพื่อทำการทดลองหาวิธีการ
5. เขียนแบบทางวิศวกรรมของโครงสร้างอุปกรณ์ขนส่งลำเลียงแบบสั้นจากโครงสร้างจริงในห้องปฏิบัติการ ลงบนโปรแกรม SolidWorks
6. วิเคราะห์ ด้วย Finite Element Method ซึ่งครอบคลุมการทำ Model Simulation และ Meshing Model ด้วยโปรแกรม Ansys

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. จัดหาวัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการตรวจจับการสั่นของคาน
8. ทดลองสร้างอุปกรณ์ตรวจจับการสั่นของคาน โดยการเขียนคำสั่งจากโปรแกรม MATLAB พร้อมกับการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์
9. จำลองการเสริมความแข็งแรงของตัวคานผ่านโปรแกรม Workbench ANSYS
10. สรุปรูปแบบการเสริมความแข็งแรงของตัวคานและการติดตั้งสปริง
11. จัดหาวัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการประกอบชุดการสั่น พร้อมประกอบชิ้นส่วน
12. ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ใหม่จากข้อมูลรูปแบบการเสริมความแข็งแรง
13. ทดสอบอุปกรณ์หลังจากติดตั้งบันทึกข้อมูลและวิเคราะห์ผลด้วยเซนเซอร์
14. ทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลำเลียงของอุปกรณ์ บันทึกข้อมูลและวิเคราะห์ผล
15. สรุปรูปแบบการดำเนินการ

#### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถปรับปรุงความแข็งแรงของอุปกรณ์ภาคสั่นสำหรับการขนส่งมวลชีวภาพบดให้มี ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและคงประสิทธิภาพเดิม
2. สามารถใช้ Sensor ในการตรวจจับรูปแบบการสั่นได้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีการสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือนเป็นปรากฏการณ์ทางกลที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัตถุเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงที่หยุดนิ่ง โดยการสั่นสะเทือนสามารถพบได้ในชีวิตประจำวันมากมาย ตัวอย่างที่พบได้ในธรรมชาติคือการสั่นสะเทือนของคลื่นเสียงในการได้ยินเสียงของมนุษย์ และแผ่นดินไหว หรือตัวอย่างทางวิศวกรรมโดยทั่วไปเช่นการแกว่งของลูกตุ้ม และการสั่นของเส้นเชือก แต่ในระบบและโครงสร้างทางกลนั้น การสั่นสะเทือนเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการ หรือไปจนถึงต้องการที่จะกำจัด เนื่องจาก การสั่นสะเทือนอาจทำให้ระบบที่เราสนใจนั้นสูญเสียพลังงานไปโดยไม่จำเป็นหรือก็คือประสิทธิภาพการทำงานของระบบจะลดลงนั่นเอง

#### 2.1.1 ทฤษฎีการสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free Vibration)

การสั่นสะเทือนแบบอิสระ หมายถึง การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีแรง หรือแรงบิดมา รบกวนสถานะสมดุลในตอนแรกเริ่มเท่านั้นที่ทำให้เริ่มเกิดการสั่นสะเทือน แต่ขณะที่สั่นสะเทือนนั้นจะ เป็นการสั่นอย่างอิสระ นั่นคือการที่ไม่มีแรงหรือแรงบิดภายนอกใดมากระทำต่อระบบเลย ตัวอย่างเช่นการแกว่งของลูกตุ้มในนาฬิกาแบบลูกตุ้ม

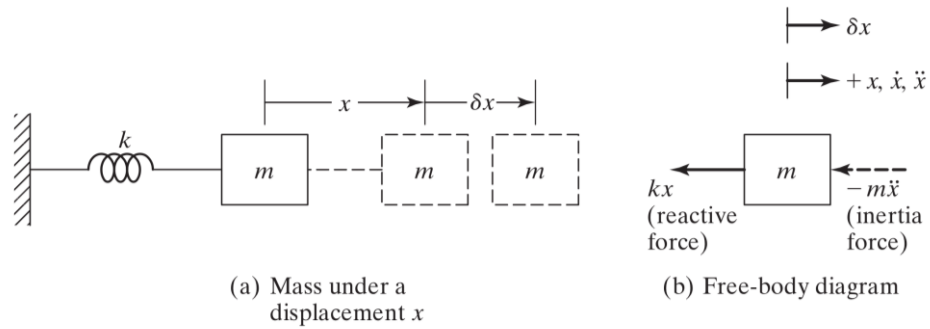
##### 2.1.1.1 สมการการเคลื่อนที่ของการสั่นแบบอิสระ

โดยสมการการเคลื่อนที่ของระบบสั่นสะเทือนใด ๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการ

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (2-1)$$

พิจารณาสถานการณ์การสั่นสะเทือนแบบไม่มีแรงบังคับ ดังนั้น  $F(t)$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์ สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (2-2)$$



รูปที่ 2.1 (a) มวลภายใต้การกระจัดเสมือน

(b) แผนภาพอิสระ

จากรูปที่ 2.1 เป็นตัวอย่างของระบบมวลติดสปริงระดับชั้นความอิสระ 1 โดยที่ไม่มีตัวหน่วง สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sum F_x = m\ddot{x} \quad (2-3)$$

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (2-4)$$

$$\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0 \quad (2-5)$$

$$\ddot{x} + \omega_n^2 x = 0 \quad (2-6)$$

จากสมการที่ 2-3 และ 2-4 เป็นสมการของการเคลื่อนที่เชิงอนุพันธ์ของระบบที่มีการสั่นอย่างอิสระที่ไม่มีตัวหน่วงด้วยความถี่ธรรมชาติคงที่ จะได้ว่า

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m} \quad \text{หรือ} \quad \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2-7)$$

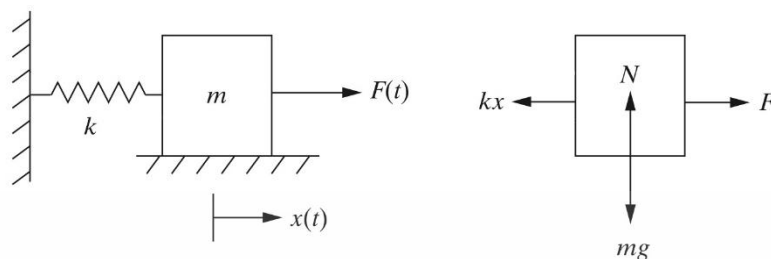
โดยสามารถเขียนในรูปแบบคำตอบของสมการการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกได้ดังนี้

$$x(t) = A \sin(\omega_n t + \varphi) \quad (2-8)$$

### 2.1.2 ทฤษฎีการสั่นสะเทือนแบบมีแรงบังคับ (Forced Vibration)

การสั่นสะเทือนแบบบังคับ หมายถึง การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากพลังงานภายนอกกระทำกับระบบระหว่างการสั่นสะเทือน ซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งในรูปแบบของแรง แรงบิด หรือการขจัดเพื่อบังคับให้เกิดการสั่น ตัวอย่างของการสั่นสะเทือนแบบบังคับเช่นการหมุนของพัดลมจากการส่งผ่านกำลังของมอเตอร์

### 2.1.2.1 สมการการเคลื่อนที่และผลเฉลยของการสั่นสะเทือนแบบมีแรงบังคับที่ไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน



รูปที่ 2.2 แผนภาพของระบบหนึ่งองศาอิสระที่ถูกกระทำโดยแรงภายนอก

จากรูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างของระบบมวลติดสปริงแบบมีแรงบังคับ โดยที่ไม่มีตัวหน่วง สามารถเขียนเป็นสมการการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = F_0 \cos \omega t \quad (2-9)$$

หรือ

$$m\ddot{x}(t) + \omega_n^2 x(t) = F_0 \cos \omega t \quad (2-10)$$

ซึ่งคำตอบของผลเฉลย  $x(t)$  จะเกิดจากสองส่วนได้แก่  $x_h(t)$  คือ Homogeneous Solution และ  $x_p(t)$  คือ Particular Solution หรือก็คือ

$$x(t) = x_h(t) + x_p(t) \quad (2-11)$$

โดย  $x_h(t)$  เป็นคำตอบของสมการ  $m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0$  ดังนั้นสามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$x_h(t) = A \sin(\omega_n t + \varphi) \quad (2-12)$$

ส่วน  $x_p(t)$  ซึ่งเป็นคำตอบของสมการ  $m\ddot{x}(t) + kx(t) = F_0 \cos \omega t$  ระบบเกิดจากการกระตุ้นด้วยแรง  $F_0 \cos \omega t$  ที่ความถี่เท่ากับ  $\omega$  ในรูปของฟังก์ชัน  $\cosine$  จึงสามารถเขียนสมการคำตอบได้เป็น

$$x_p(t) = X \cos \omega t \quad (2-13)$$

โดย  $X$  เป็นขนาดของ  $x_p(t)$  ซึ่งสามารถหาได้จากการแทนค่าในสมการ (2-5) สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$X = \frac{F_0}{k - m\omega^2} \quad (2-14)$$

ดังนั้น

$$x_p(t) = \frac{F_0}{k - m\omega^2} \cos \omega t \quad (2-15)$$

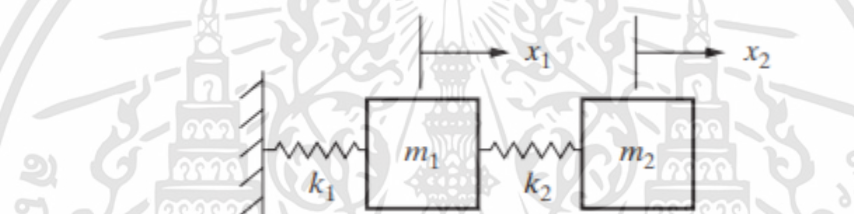
ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการคำตอบของ  $x(t)$  ได้ดังนี้

$$x(t) = A \sin(\omega_n t + \varphi) + \frac{F_0}{k - m\omega^2} \cos \omega t \quad (2-16)$$

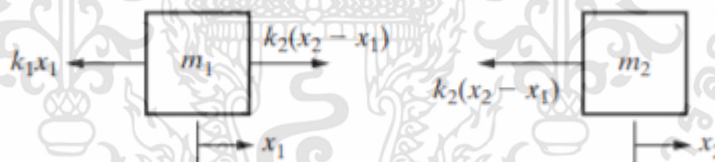
### 2.1.3 การสั่นสะเทือนของระบบที่มีองศาอิสระมากกว่าหนึ่ง (Multiple Degree of Freedom Systems)

ในการสร้างแบบจำลองการสั่นสะเทือนลักษณะสั้นหลายๆครั้ง จึงต้องสร้างให้แบบจำลองมีจำนวนองศาอิสระมากกว่าหนึ่ง เพื่อให้ผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ที่เข้าใจลึกซึ้งความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

#### 2.1.3.1 การสั่นสะเทือนของระบบที่มีสององศาอิสระ ไม่มีตัวหน่วง (Two Degree of Freedom Model, Undamped)



รูปที่ 2.3 ระบบสององศาอิสระอย่างง่ายประกอบด้วยมวลที่ต่อกันด้วยสปริงแบบอนุกรม



รูปที่ 2.4 แผนภาพอิสระโดยพิจารณาแต่ละมวล ของรูปที่ 2.3

จากรูปแผนผังวัตถุอิสระเขียนสมการการเคลื่อนที่ของมวลแต่ละก้อนได้ดังนี้

$$m_1 \ddot{x}_1 = -k_1 x_1 + k_2 (x_2 - x_1) \quad (2-17)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = k_2 (x_2 - x_1) \quad (2-18)$$

รวมทั้งสองสมการได้

$$m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 = 0$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - k_2 x_1 + k_2 x_2 = 0 \quad (2-19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขียนสมการเป็นรูปเมทริกซ์ได้

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

หรืออาจเขียนได้ว่า

$$M\ddot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (2-20)$$

จากสมการ (2-19) ประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสองด้วยกับค่าสัมประสิทธิ์ที่คงที่ ซึ่งจะต้องมีเงื่อนไขเริ่มต้นสองเงื่อนไขในการแก้คำตอบสมการ ดังนั้นสมการทั้งสองจึงอยู่ภายใต้เงื่อนไขเริ่มต้นดังนี้

$$x_1(0) = x_{10} \quad \dot{x}_1(0) = \dot{x}_{10} \quad x_2(0) = x_{20} \quad \dot{x}_2(0) = \dot{x}_{20} \quad (2-21)$$

#### 2.1.4 การสั่นพ้อง (Resonance)

การสั่นพ้อง คือ ปรากฏการณ์ที่วัตถุสั่นด้วยความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติ ซึ่งจำทำให้ขนาดของการสั่นมีค่ามากขึ้น ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายถึงชีวิตได้ ตัวอย่างของการสั่นพ้องเช่น สะพานที่มีลมพัดด้วยความเร็วคงที่เป็นเวลานาน และแรงลมนั้นมีค่าความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติของสะพาน จะทำให้เกิดการสั่นพ้อง เมื่อเกิดการสั่นอย่างรุนแรงก็จะทำให้สะพานขาดลงได้

เนื่องจากการสั่นพ้องจะเกิดจากการที่ขนาดของการสั่นค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จึงสามารถเขียนสมการคำตอบได้ดังนี้

$$x_p(t) = tX \sin \omega t \quad (2-22)$$

โดย  $X$  แสดงถึงความรวดเร็วในการเพิ่มขึ้นของการสั่นสะเทือน สามารถหาได้จากการ แทนค่า  $x_p$  และ  $\ddot{x}_p$  ลงในสมการ (2-10) จะได้  $X = \frac{f_0}{2\omega}$

ดังนั้น

$$x_p(t) = \frac{f_0}{2\omega} t \sin \omega t \quad (2-23)$$

สามารถรวมคำตอบของสมการได้ดังนี้ ( $\omega = \omega_n$ )

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + \frac{f_0}{2\omega} t \sin \omega t \quad (2-24)$$

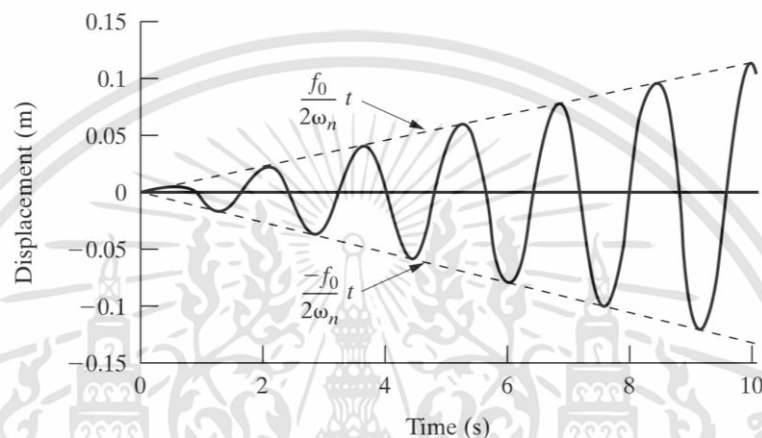
หรือ

$$x(t) = A_1 \sin \omega t + A_2 \cos \omega t + \frac{f_0}{2\omega} t \sin \omega t \quad (2-25)$$

กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น  $x_0$  และ  $v_0$  สามารถเขียนได้เป็น

$$x(t) = \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t + x_0 \cos \omega t + \frac{f_0}{2\omega} t \sin \omega t \quad (2-26)$$

โดยสามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่า  $x(t)$  เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีขอบเขต จึงอาจก่อให้เกิดการขาดหรือเสียหายของสปริงนั่นเอง



รูปที่ 2.5 การสั่นพ้อง

### 2.1.5 การสั่นแบบงอของคาน (Bending Vibration of a Beam)

พิจารณาการสั่นของตัวคาน โดยการสั่นของคานในทิศทางตั้งฉากกับความยาวของตัวคานที่สนใจนั้น ถูกเรียกว่า การสั่นตามขวาง (Transverse Vibration) หรือการสั่นแบบดัด (Flexural Vibration) เพราะเป็นการเคลื่อนที่ตามแนวขวางของความยาวคาน ซึ่งการสั่นตามขวางนี้สามารถพบได้ทั่วไปตัวอย่างเช่น ตอนที่คนเราเดินข้ามสะพาน

#### 2.1.5.1 Euler-Bernoulli Beam Theory

โดยทฤษฎีของ Euler-Bernoulli นั้นสมมติให้ระนาบหน้าตัดยังคงเป็นระนาบ โดยไม่คำนึงถึงความเสียหายจากการบิดเบี้ยวและแรงเฉือนตามขวาง ซึ่งสมมติฐานเหล่านี้สามารถใช้ได้สำหรับคานเรียว (Slender Beam) เท่านั้น ในส่วนของคานตัน (Stocky Beam) และคานประกอบ (Composite Beam) จะไม่คำนึงถึงแรงเฉือนตามแนวขวาง

นอกจากนี้สมมติฐานระนาบหน้าตัดให้เป็นระนาบยังรวมถึงสมมติฐานที่ว่า หากระนาบใดของคานตั้งฉากกับแนวแกนกลางก่อนการเสียรูปของคาน ความเป็นฉากต่อแนวแกนกลางนั้นจะยังคงอยู่หลังเกิดการเสียรูปของคาน

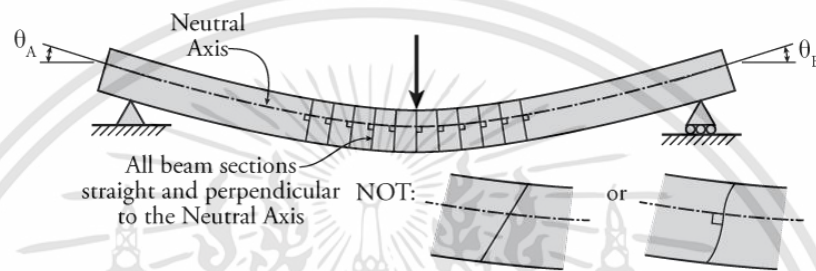
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถัดมา หากสมมติให้มุมของการเสียรูป (ความชัน) ของคานานั้นเล็กมาก (แสดงโดย  $\theta$  ในรูปที่ 2.6) โดยถ้า  $x$  แสดงถึงตำแหน่งตามความยาวของคาน และ  $\Delta x$  แสดงถึงระยะการเสียรูปของคานที่ตำแหน่ง  $x$  แล้วจะได้ความชัน ( $\theta$ ) ของคานเท่ากับ

$$\theta = \frac{d\Delta}{dx} \quad (2-27)$$

เมื่อมุม  $\theta$  มีขนาดเล็กมาก ดังนั้น

$$\theta^2 = \left(\frac{d\Delta}{dx}\right)^2 = 0 \quad (2-28)$$



รูปที่ 2.6 สมมติฐานระนาบตัดให้เป็นระนาบ

จากสมมติฐานที่กล่าวมาข้างต้น จะได้สมการ Euler-Bernoulli Beam คือ

$$\frac{d^2\Delta}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (2-29)$$

เมื่อ  $\frac{d^2\Delta}{dx^2}$  คือ อนุพันธ์อันดับสองของการเสียรูปของคาน  $\Delta$  ตามความยาวคาน  $x$

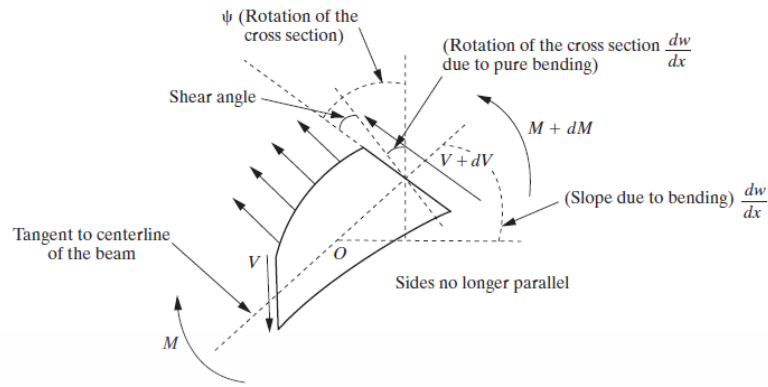
$M$  คือ โมเมนต์ภายในคานที่ตำแหน่ง  $x$

$E$  คือ ค่า Young's Modulus ของคาน

$I$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดคาน

### 2.1.5.2 Timoshenko Beam Theory

ทฤษฎีของ Timoshenko นั้นเป็นการทำอนุพันธ์ของสมการการเคลื่อนที่ให้อยู่ในรูปอย่างง่าย โดยการสมมติให้ความเครียดเฉือนมีความสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด ซึ่งจะมีค่าตัวแปรการแก้ไขความเครียด (Shear Correction Factor) เพื่อที่จะอธิบายให้เข้าใจอย่างง่าย และค่าของตัวแปรนี้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของพื้นที่หน้าตัดคาน



รูปที่ 2.7 ผลกระทบจากการเสียรูปแบบเนื่องต่อ element ของคานตัด

เมื่อคานงอ จะเกิดมุมเอียงขึ้น ซึ่งความยาวคานจะลดลงเมื่อเทียบกับความกว้างของคาน สำหรับคานยาว การเกิดขึ้นของแรงเฉือนส่งผลสำคัญต่อ element รูปทรงสี่เหลี่ยมของคาน ทำให้เกิดการเสียรูปและบิดเบี้ยวจนมีรูปทรงเกือบคล้ายเพชร ดังรูปที่ 2.7 มุมเอียงแสดงด้วย  $\varphi$  และ  $\frac{dw}{dx}$  คืออนุพันธ์ระหว่างมุมตัดโดยรวมกับความชันของของเส้นแนวกลางของคาน ซึ่งแสดงถึงผลจากการเสียรูปแบบเอียง พิจารณาได้เป็นสมการโมเมนต์ตัดดังนี้

$$EI = \frac{d\varphi(x,t)}{dx} = M(x,t) \tag{2-30}$$

และสมการแรงเฉือนคือ

$$\kappa^2 AG [\varphi(x,t) - \frac{dw(x,t)}{dx}] = V(x,t) \tag{2-31}$$

- โดย  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของคาน
- $V$  คือ แรงเฉือน
- $G$  คือ Shear Modulus
- $\kappa$  คือ Timoshenko shear coefficient

## 2.2 การโก่งตัวของคาน (Deflection of Beams)

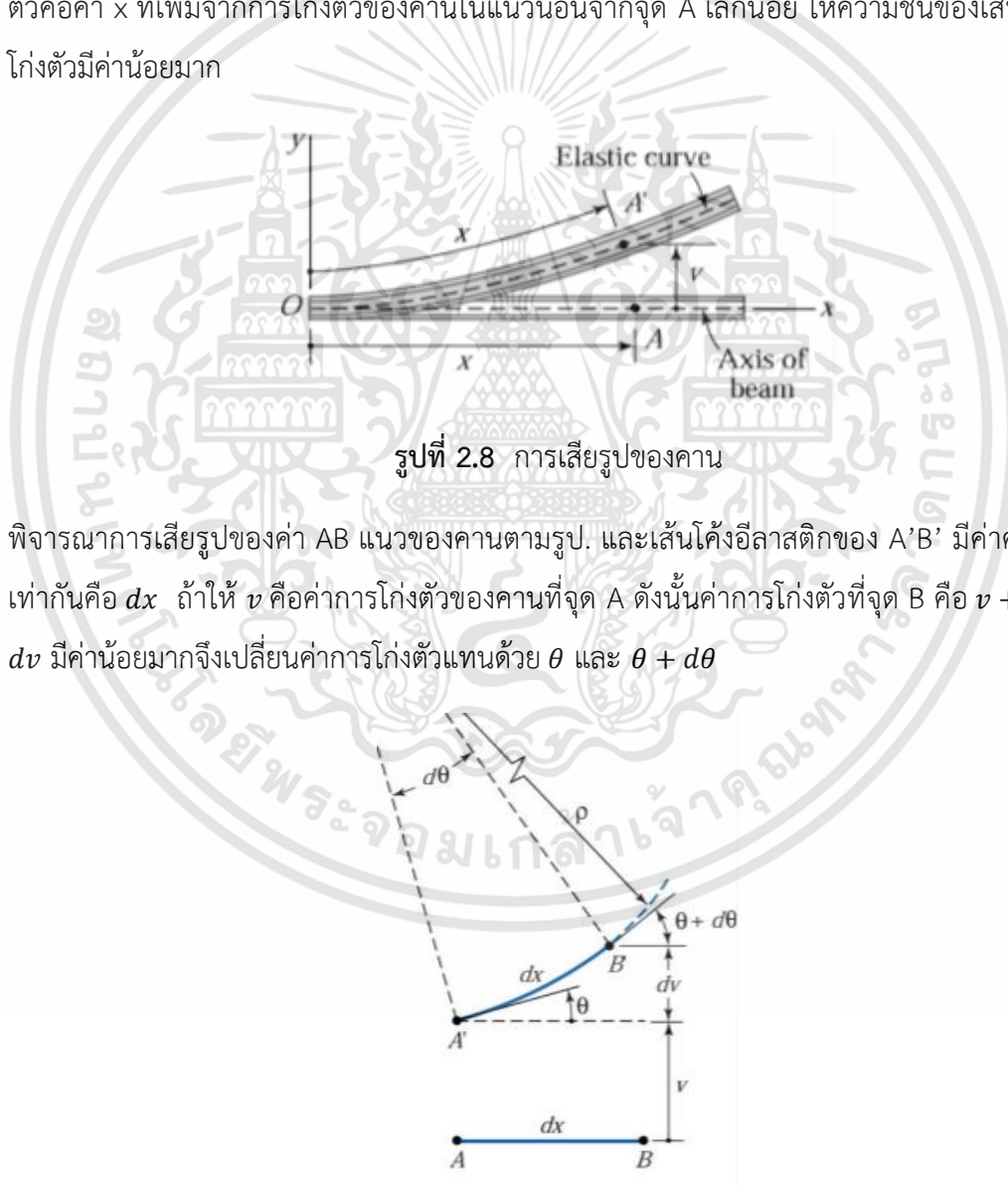
การโก่งตัวของคานเกิดขึ้นจากคานซึ่งเป็นส่วนโครงสร้างในการรับน้ำหนักมีแรงภายนอกมากระทำทั้งโมเมนต์ตัด และแรงเฉือน จึงทำให้เกิดการโก่งงอหรือแอ่นลงของตัวคานขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำ

### 2.2.1 การโก่งตัวของคานภายใต้น้ำหนักที่มากกระทำ (Deformation of a Beam under Transverse Loading)

เมื่อคานถูกกระทำโดยแรงตามขวางแล้ว คานจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกิดขึ้นในลักษณะของการโก่งตัวเป็นเส้นโค้ง

### 2.2.2 สมการเส้นโค้งอีลาสติก (Equation of Elastic Curve)

การโก่งตัวในแนวตั้งของจุด A แทนด้วยค่า  $v$  ถือว่าเป็นค่าบวกชี้ไปในทิศทางแกน  $y$  จากรูปที่ 2.6 แกน Neutral อยู่บนพื้นผิวที่เป็นกลางทางความยาวของคาน ดังนั้นระยะทางวัดตามเส้นโค้งการโก่งตัวคือค่า  $x$  ที่เพิ่มจากการโก่งตัวของคานในแนวนอนจากจุด A เล็กน้อย ให้ความชันของเส้นโค้งการโก่งตัวมีค่าน้อยมาก



รูปที่ 2.8 การเสียรูปของคาน

พิจารณารูปการเสียรูปของคาน AB แนวของคานตามรูป. และเส้นโค้งอีลาสติกของ A'B' มีค่าความยาวเท่ากันคือ  $dx$  ถ้าให้  $v$  คือค่าการโก่งตัวของคานที่จุด A ดังนั้นค่าการโก่งตัวที่จุด B คือ  $v + dv$  โดย  $dv$  มีค่าน้อยมากจึงเปลี่ยนค่าการโก่งตัวแทนด้วย  $\theta$  และ  $\theta + d\theta$

รูปที่ 2.9 Deformation of a differential element of beam axis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dv}{dx} = \sin \theta \cong \theta \quad (2-32)$$

เพราะว่า  $\theta$  มีค่าน้อยมากจะได้สมการ

$$dx = \rho d\theta \quad (2-33)$$

จะได้ว่า  $\rho$  คือค่ารัศมีความโค้งของส่วนที่ผิดรูปจะเขียนสมการได้

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{dx} \quad (2-34)$$

จากสมการความสัมพันธ์  $\frac{d\theta}{dx} = \frac{d^2v}{dx^2}$  จะได้

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2v}{dx^2} \quad (2-35)$$

จากความสัมพันธ์สมการ  $\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI}$  จะได้

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (2-36)$$

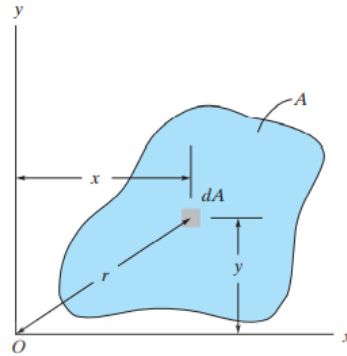
คือสมการ Equation of Elastic Curve

## 2.3 โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)

คือ ค่าความต้านทานของวัตถุต่อการเปลี่ยนแปลงของการที่วัตถุหมุน

### 2.3.1 โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (Area Moment of Inertia)

เมื่อพิจารณาความแข็งแรงของชิ้นส่วนที่ประกอบด้วยโครงสร้าง จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาถึงลักษณะพื้นที่หน้าตัดของวัตถุกรณีที่มีหน้าตัดขนาดแตกต่างกัน ย่อมทำให้เกิดความแข็งแรงหรือความสามารถในการรับน้ำหนักที่แตกต่างกัน และเมื่อมีแรงการกระจายอย่างต่อเนื่องกระทำต่อพื้นที่หน้าตัด จะทำให้ความเค้นของแรงที่เป็นสัดส่วนกับระยะทางจากแนวแรงถึงแกนของโมเมนต์ สมบัติของพื้นที่หน้าตัดที่มีผลต่อการกระจายของแรงเรียกว่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)



รูปที่ 2.10 พิกัดเชิงขั้ว

โมเมนต์ความเฉื่อยของผลต่างของพื้นที่  $dA$  ในแกน  $x$  และแกน  $y$  คือ  $dI_x = y^2 dA$  และ  $dI_y = x^2 dA$  จากรูปที่ 1

$$I_x = \int_A y^2 dA \quad (2-37)$$

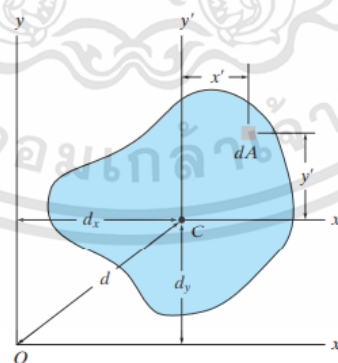
$$I_y = \int_A x^2 dA \quad (2-38)$$

นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดปริมาณเป็นโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้ว (polar moment of inertia) โดยกำหนดให้  $dJ_o = r^2 dA$  ที่คือระยะตั้งฉากจากแกน  $z$  ถึง  $dA$  พื้นที่ของโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้ว คือ

$$J_o = \oint_A r^2 dA = I_x + I_y \quad (2-39)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $J_o$  และ  $I_x, I_y$  คือ  $r^2 = x^2 + y^2$

### 2.3.2 ทฤษฎีแกนขนานของพื้นที่ (Parallel Axis Theorem)



รูปที่ 2.11 พิกัดเลื่อนแกนขนาน

ทฤษฎีแกนขนานของพื้นที่สามารถใช้หาโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่โดยแกนใด ๆ ที่ขนานกับแกนที่เคลื่อนผ่านจุดศูนย์กลางและทราบค่าโมเมนต์ความเฉื่อย ในรูปที่ 2 แกน  $x$  ในตอนเริ่มต้นเรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือก  $dA$  ที่ตั้งจากแกน  $y'$  ห่างจุดเซ็นทรอยดีในแกน  $x'$  ถ้าระยะทางระหว่างแกน  $x$  ขนานกับแกน  $x'$  คือ  $d$  ดังนั้นโมเมนต์ความเฉื่อยของ  $dA$  บนแกน  $x$  คือ  $dI_x = (y' + d_y)^2$  พื้นที่ทั้งหมดคือ

$$I_x = \int_A (y' + d_y)^2 dA \quad (2-40)$$

$$I_x = \int_A y'^2 dA + 2d_y \int_A y' dA + d_y^2 \int_A dA \quad (2-41)$$

โดยการอินทิกรอลตัวแรกแทนโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่รอบแกนกลาง  $\bar{I}_{x'}$ , อินทิกรอลตัวที่สองคือ 0

เพราะแกน  $x'$  ผ่านพื้นที่เซ็นทรอยด์ ;  $\int y' dA = \bar{y}' \int dA = 0$  และ  $\bar{y}' = 0$  ดังนั้นอินทิกรอลตัวที่สามแทนด้วยพื้นที่ทั้งหมดของ  $A$  , ผลที่ได้คือ

$$I_x = \bar{I}_{x'} + Ad_y^2 \quad (2-42)$$

นิพจน์ที่คล้ายกันเขียนได้ดังนี้

$$I_y = \bar{I}_{y'} + Ad_x^2 \quad (2-43)$$

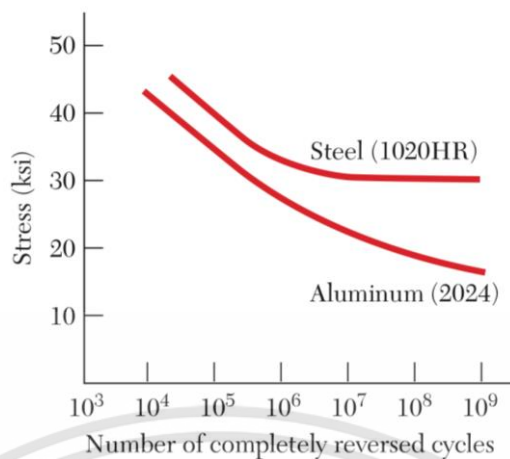
สุดท้ายนี้โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้ว คือ  $J_o = \bar{I}_{x'} + \bar{I}_{y'}$  และ  $d^2 = d_x^2 + d_y^2$

$$J_o = \bar{J}_c + Ad^2 \quad (2-44)$$

## 2.4 ความล้า (Fatigue)

ความล้า คือ การที่โลหะชนิดวัสดุเหนียวอ่อนถูกกระทำด้วยความเค้นหรือความเครียดที่มีค่าน้อยกว่า Yielding Stress หรือ Yielding Strain อย่างซ้ำไปซ้ำมาแบบเป็นคาบ จนทำให้เกิดความเสียหายแบบเปราะ กล่าวได้ว่าเมื่อวัสดุเกิดรอยแตกหรือรอยร้าวที่มีขนาดเล็กมาก ๆ หลังจากถูกกระทำภายใต้แรงอย่างซ้ำไปซ้ำมา รอยร้าวภายในนั้นจะมีการขยายตัวใหญ่ขึ้น จนในที่สุดพื้นที่หน้าตัดที่รับแรงจะมีขนาดเล็กถึงจนไม่สามารถที่จะรับแรงกระทำได้อีกต่อไป จึงทำให้เกิดการแตกหักแบบฉับพลันนั่นเอง

โดยในการกำหนดค่าความปลอดภัยของวัสดุภายใต้โหลดที่มีการกระทำซ้ำไปซ้ำมา จำเป็นต้องทราบถึงจำนวนรอบต่ำสุดที่ยอมให้ได้ ซึ่งพฤติกรรมของวัสดุที่เกิดการล้า สามารถศึกษาได้ด้วยการทดสอบซึ่งวัสดุจะถูกกระทำด้วยความเค้นแบบซ้ำไปซ้ำมาจนเกิดการแตกหัก จากนั้นนำข้อมูลมาเขียนอยู่ในรูปของกราฟของค่าความเค้นและจำนวนรอบที่ทำให้วัสดุเสียหาย เรียกว่า แผนภาพ S-N



รูปที่ 2.12 S-N curve

จากรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าวัสดุชนิดโลหะนอกกลุ่มเหล็ก เช่น อลูมิเนียม จะไม่มีค่าขีดจำกัดความทนทาน คือวัสดุจะเสียหายเมื่อมีแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมาที่มีจำนวนรอบเกินกว่าจำนวนรอบที่วัสดุนั้น ๆ จะสามารถรับได้ ส่วนวัสดุชนิดโลหะกลุ่มเหล็กจะมีค่าขีดจำกัดความทนทาน คือจะมีแรงที่สามารถรองรับได้โดยไม่เกิดการล้า ถ้าหากวัสดุได้รับแรงกระทำต่ำกว่าแรงที่สามารถรองรับได้ วัสดุจะไม่เกิดการแตกหักแบบล้าไม่ว่าจะถูกกระทำไปกี่รอบก็ตาม

## 2.5 สปริง (Spring)

คือ ขดลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นวงกลมหลายขนาดขดกันเป็นรูปทรงกระบอก โดยทั่วไปเรียกว่าสปริง หมายถึงการยืดออก หดเข้า หรือการบิดแล้วสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ โดยสปริงยังมีหลายประเภทขึ้นอยู่กับการใช้งาน

### 2.5.1 สปริงแรงบิด (Torsion spring)

สปริงแรงบิดเป็นสปริงที่ออกแรงบิดหรือแรงหมุนที่ปลายของสปริงบิดยึดกับส่วนอื่น ๆ และส่วนเหล่านั้นหมุนรอบจุดศูนย์กลางของสปริงทำให้สปริงจะพยายามดันตัวกลับเข้าที่ตำแหน่งคงเดิม สปริงแรงบิดจะอยู่ภายใต้ความเค้นดัดมากกว่าความเค้นบิดและสปริงจะสามารถกักเก็บและปล่อยพลังงานเชิงมุมหรือยึดกลไกให้อยู่กับที่โดยการเบี่ยงเบนเข้าแกนกลางของสปริง สปริงแรงบิดมักใช้ในที่หนีบผ้า ประตูบานพับ การคืนคันโยก เป็นต้น



รูปที่ 2.13 สปริงบิด

### 2.5.2 สปริงแรงดึง (Tension spring)

สปริงแรงดึงจะดูดซับและกักเก็บพลังงานรวมทั้งสร้างแรงต้านต่อแรงดึง ที่ปลายทั้งสองข้างจะเป็นส่วนต่อขยายที่ยึดติดสปริงกับส่วนประกอบอื่นๆ เมื่อส่วนประกอบเหล่านี้แยกออกจากกันสปริงที่จะพยายามสร้างแรงดึงส่วนประกอบเข้าหากัน



รูปที่ 2.14 สปริงแรงดึง

### 2.5.3 สปริงแรงอัด (Compression spring)

เป็นสปริงเกลียวเปิดแบบขดลวดเปิดที่พันแผลสร้างขึ้นเพื่อต้านแรงกดอัดเชิงเส้นตามแนวแกนของสปริงเป็นสปริงที่นิยมใช้งานทั่วไป คอยล์สปริงเหล่านี้สามารถทำงานได้แบบอิสระแม้ว่าจะมีแกนใส่ในนำหรือไม่มีเลยก็ตาม เมื่อมีโหลดแรงมากกระทำตัวสปริงจะพยายามออกแรงดันเพื่อจะกลับไปสู่สถานะคงเดิม



รูปที่ 2.15 สปริงแรงอัด

## 2.6 Shock Absorbers

ในรูปแบบทั่วไป Shock Absorbers คือปั๊ม(น้ำมัน)ไฮดรอลิก ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยควบคุมการกระแทกและการเต็งกลับไปกลับมาของสปริงและระบบกันสั่นสะเทือนของยานพาหนะ โดยการทำงานจากการนำพลังงานจลน์ หรือการเคลื่อนที่ของระบบกันสั่นสะเทือน มาแปลงเป็นพลังงานความร้อนแล้วปล่อยเข้าสู่ชั้นบรรยากาศ



รูปที่ 2.16 Shock Absorber

### 2.6.1 วัสดุที่ใช้ในการทำ Shock Absorbers

สำหรับวัสดุที่ใช้ในการทำ Shock Absorbers มีหลากหลายชนิดมาก ทั้งวัสดุสำหรับภายในและภายนอกที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความต้องการ สำหรับวัสดุภายนอกเป็นได้ทั้งยาง อะลูมิเนียม เหล็ก หรือวัสดุคอมโพสิต ส่วนวัสดุสำหรับภายใน สามารถเป็นได้ทั้งของเหลว หรืออากาศ ซึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของการนำไปใช้งาน

## 2.6.2 การใช้งาน

### 2.6.2.1 ด้านยานยนต์

ในอุตสาหกรรมยานยนต์ Shock Absorbers ถูกใช้เพื่อสร้างพลังงานให้กับรถยนต์ โดยในการสร้างพลังงานและผลิตไฟฟ้านั้นสำหรับ Shock Absorbers ในรถยนต์ การออกแบบ Shock Absorbers แบบท่อกู่จะมีประสิทธิภาพสูง และของเหลวภายในจะทำให้เกิดแรงหน่วง โดยแรงหน่วงที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดพลังงานจลน์ที่สามารถกักเก็บไปใช้งานได้ภายหลังเพิ่มขึ้น

### 2.6.2.2 ด้านยานพาหนะทางน้ำ

สำหรับได้นำันเสียงที่เกิดจากการสั่นสะเทือนถือเป็นปัญหาใหญ่สำหรับเรือของกองทัพหรือเรือดำน้ำที่ไม่ต้องการที่จะถูกตรวจจับได้ ทำให้ผู้ผลิตเริ่มทำการติดตั้ง Shock Absorbers ไปกับระบบเพลาถูกเบี้ยว

### 2.6.2.3 ด้านการบินและอวกาศ

ในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ Shock Absorbers ถูกใช้สำหรับเกียร์ที่ใช้ในการลงจอด ซึ่ง Shock Absorbers จะต้องรองรับแรงกระแทกและกระจายพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เพื่อให้กระบวนการลงจอดเป็นไปอย่างปลอดภัย

### 2.6.2.4 ด้านโครงสร้าง

วิศวกรโยธามีการใช้ Shock Absorbers ที่เมืองศาอิสระมากกว่าหนึ่งเพื่อลดผลกระทบจากแผ่นดินไหวต่อโครงสร้างอาคาร รวมถึงช่วยลดความเสียหาย Shock Absorbers จึงควรที่จะสามารถทนต่อแรงสั่นสะเทือนได้มากกว่าหนึ่งองศาอิสระ

## 2.7 มอเตอร์ไฟฟ้า (Electric motor)

เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังทางกล การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเกิดจากการทำงานของสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กในตัวมอเตอร์และสนามแม่เหล็กจากตัวขดลวดทำให้เกิดแรงดูดและแรงผลักของสนามแม่เหล็กทั้งสอง ทั้งนี้มอเตอร์ไฟฟ้ายังสามารถทำงานได้ทั้งสร้างพลังงานกลและการผลิตพลังงานไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้าถูกนำไปใช้ในหลากหลายงานเช่น พัดลม ครัวเป่าลม ปั้มน้ำ เครื่องปั่นไฟ เป็นต้น

### 2.7.1 มอเตอร์กระแสตรง (Direct current motor)

เป็นมอเตอร์ที่ใช้กับระบบไฟกระแสตรง สามารถควบคุมความเร็วมอเตอร์หรือแรงบิดมอเตอร์ได้ง่าย การปรับค่าสามารถปรับช่วงได้กว้างและมีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้เร็ว



รูปที่ 2.17 มอเตอร์กระแสตรง

### 2.7.2 มอเตอร์กระแสสลับ (Alternating current motor)

เป็นมอเตอร์ที่ใช้กับระบบไฟกระแสสลับ เป็นที่นิยมหาซื้อได้ง่าย ประสิทธิภาพสูง ราคาต่ำ โครงสร้างมอเตอร์ไม่ซับซ้อน มีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับมอเตอร์กระแสตรงในกำลังที่เท่ากัน มอเตอร์กระแสสลับสามารถได้ทั้งไฟหนึ่งเฟสและสามเฟส



รูปที่ 2.18 มอเตอร์กระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.3 โครงสร้างมอเตอร์



รูปที่ 2.19 โครงสร้างมอเตอร์

#### 2.7.3.1 โรเตอร์ (Rotor)

คือ ส่วนที่เคลื่อนที่ในมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งจะหมุนเพลาเพื่อจ่ายพลังงานกล โดยโรเตอร์จะมีขดลวดตัวนำพันอยู่โดยรอบ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดพลังงานแม่เหล็กไปเหนี่ยวนำกับสนามแม่เหล็กถาวรของสเตเตอร์ทำให้เพลาหมุนได้

#### 2.7.3.2 สเตเตอร์ (Stator)

เป็นส่วนที่อยู่กับที่ประกอบไปด้วยโครงของมอเตอร์ แกนเหล็กสเตเตอร์และขดลวด

#### 2.7.3.3 ช่องว่างอากาศ (Air gap)

โดยระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์จะมีช่องว่างสำหรับอากาศ ซึ่งจะต้องเป็นช่องที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่ได้ ถ้าช่องว่างยังมีขนาดใหญ่จะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพทำงานของมอเตอร์

#### 2.7.3.4 ขดลวด (Coil)

ขดลวดจะพันโดยรอบแกนแม่เหล็กก่อนที่เคลื่อนบนวน เพื่อให้เป็นขั้วแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไฟฟ้า

## 2.8 Sensors MPU-9250

MPU-9250 เป็นโมดูลแบบหลายชิปที่ประกอบด้วย module 2 ตัวที่รวมอยู่ในแพ็คเกจ QFN (quad flat no-lead package) ประกอบด้วย ไจโรสโคปแบบ 3 แกน และมาตรความเร่งแบบ 3 แกน และเครื่องวัดค่าความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก ดังนั้น MPU-9250 จึงเป็นการติดตามการเคลื่อนไหวแบบ 9 แกน ทั้งหมดมีขนาดเล็ก 3x3x1 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MPU-9250 ได้รับการออกแบบเพื่อเชื่อมต่อกับเซนเซอร์ดิจิทัลหลายตัว เช่น เซนเซอร์ความดัน บนตัวช่วยของ module I พอร์ต 2C MPU-9250 มีตัวแปลงอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) 16 บิตสามตัวสำหรับการแปลงเอาต์พุตใจโรสโคปเป็นดิจิทัล สามตัว ADC 16 บิตสำหรับการแปลงเอาต์พุตของมาตรการความเร่งเป็นดิจิทัล และ ADC 16 บิตสามตัวสำหรับการแปลงค่าสนามแม่เหล็กเป็นดิจิทัล เอาท์พุท สำหรับการติดตามที่แม่นยำของการเคลื่อนไหวที่รวดเร็วและซ้ำ ชิ้นส่วนเหล่านี้มีโปรแกรมที่ผู้ใช้ตั้งโปรแกรมได้ ใจโรสโคปช่วงเต็มสเกล  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$  และ  $\pm 2000^\circ/\text{วินาที}$  ซึ่งเป็นมาตรการความเร่งที่ผู้ใช้ตั้งโปรแกรมได้ ช่วงเต็มพิสัยของ  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$  และ  $\pm 16g$  และเครื่องวัดค่าความเข้มขึ้นของสนามแม่เหล็กแบบเต็มช่วง  $\pm 4800\mu T$

## 2.8.1 คุณสมบัติของ Gyroscope , Accelerometer และ Magnetometer

### 2.8.1.1 คุณสมบัติของ Gyroscope

Gyroscope แบบสามแกนใน MPU-9250 มีคุณสมบัติ ดังนี้

1. เซนเซอร์วัดอัตราเชิงมุมแกน X , Y และ Z Axis เอาต์พุตดิจิทัล (Gyroscope) ที่มีช่วงเต็มสเกลที่ผู้ใช้ตั้งโปรแกรมได้  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$  และ  $\pm 2000^\circ/\text{วินาที}$  และ ADC 16 บิตในตัว
2. ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำแบบตั้งโปรแกรมได้แบบดิจิทัล
3. Gyroscope กระแสไฟทำงาน : 3.2mA
4. Sleep mode current :  $8\mu A$
5. มาตรฐานความไวที่มาตรฐานผ่านจากโรงงาน
6. Self-test

### 2.8.1.2 คุณสมบัติของ Accelerometer

Accelerometer (มาตรการความเร่ง) แบบสามแกนใน MPU-9250 มีคุณสมบัติ ดังนี้

1. มาตรการความเร่งสามแกนเอาต์พุตดิจิทัลพร้อมช่วงเต็มสเกลที่ตั้งโปรแกรมได้  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$  และ  $\pm 16g$  และ ADC 16 บิตในตัว
2. กระแสไฟทำงานปกติของมาตรการความเร่ง :  $450\mu A$
3. โหมดมาตรการความเร่งพลังงานต่ำ :  $8.4\mu A$  ที่ 0.98Hz,  $19.8\mu A$  ที่ 31.25Hz
4. Sleep mode current :  $8\mu A$
5. ผู้ใช้ตั้งโปรแกรมให้หยุดรับค่าได้
6. Self-test

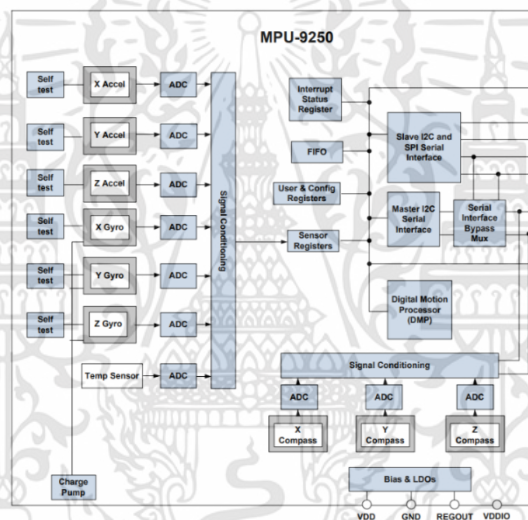
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.1.3 คุณสมบัติ Magnetometer

เครื่องวัดค่าความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก แบบสามแกนใน MPU-9250 มีคุณสมบัติ ดังนี้

1. เซ็นเซอร์แม่เหล็ก Hall-effect ซิลิคอน 3 แกนพร้อมหัวแม่เหล็ก
2. ช่วงการวัดไดนามิกกว้างและความละเอียดสูงโดยใช้กระแสไฟต่ำ
3. ความละเอียดของข้อมูลเอาต์พุต 14 บิต ( $0.6\mu\text{T/LSB}$ )
4. ช่วงการวัดเต็มสเกลคือ  $\pm 4800\mu\text{T}$
5. กระแสไฟทำงานปกติของ Magnetometer :  $280\mu\text{A}$  ที่อัตราการทำซ้ำ 8H
6. ฟังก์ชันทดสอบตัวเองด้วยแหล่งกำเนิดแม่เหล็กภายในเพื่อยืนยันการทำงานของเซ็นเซอร์

### 2.8.2 Block Diagram

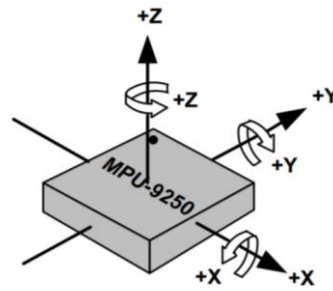


รูปที่ 2.20 Block Diagram MPU-9250

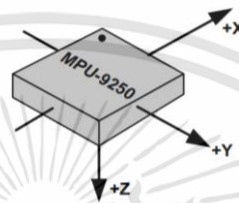
### 2.8.3 ทิศแนวแกนของ Sensor

ในส่วนนี้ให้แนวทางทั่วไปสำหรับการประกอบอุปกรณ์ InvenSense Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS) ที่บรรจุอยู่ในวงจรรวมแบบติดตั้งบนพื้นผิว quad flat no-lead package (QFN)

การวางแนวของแกนแผนภาพด้านล่างแสดงการวางแนวของแกนของความไวและชี้ของการหมุนสังเกตพิน 1 ตัวระบุ (•) ในรูป



รูปที่ 2.21 การวางแนวของแกนและขั้วของการหมุนสำหรับ Accelerometer และ Gyroscope



รูปที่ 2.22 การวางแนวแกนของเข็มทิศ

#### 2.8.4 วิธีการต่อใช้งาน

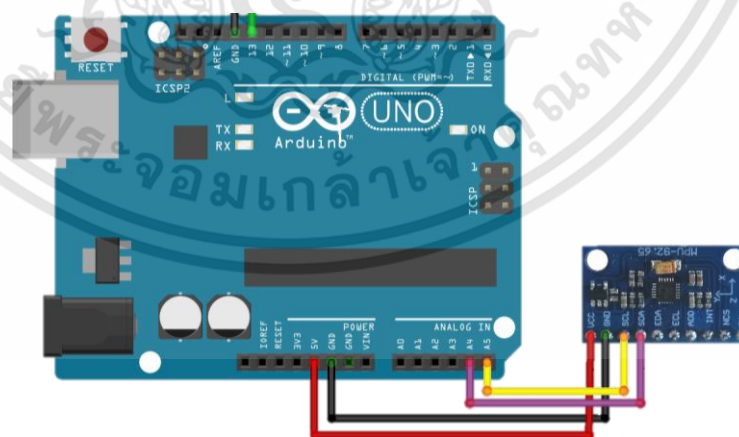
MPU-9250 เชื่อมต่อกับ Arduino UNO R3

VCC เชื่อมกับ 5V,3V

GND เชื่อมกับ GND

SDA เชื่อมกับ A4

SCL เชื่อมกับ A5



รูปที่ 2.23 วิธีการเชื่อม MPU-9250 กับ Arduino UNO R3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 Kalman Filter

ตัวกรองคาลมานเป็นอัลกอริทึมที่ประเมินสถานะของระบบจากข้อมูลที่วัดได้ ได้รับการพัฒนาโดยวิศวกรชาวฮังการี Rudolf Kalman ซึ่งเป็นผู้ตั้งชื่อตัวกรอง อัลกอริทึมของตัวกรองเป็นกระบวนการทฤษฎีคาลมานที่เรียกว่าเป็นเชิงเส้นกำลังสองประมาณค่า เป็นอัลกอริทึมที่ใช้ชุดของการวัดสังเกตในช่วงเวลาที่มีสัญญาณรบกวนทางสถิติและความไม่ถูกต้องอื่น ๆ และประมาณการของตัวแปรที่ไม่รู้จักที่มีแนวโน้มที่จะมีมากขึ้น แม่นยำกว่าการวัดเพียงครั้งเดียวโดยการประมาณการแจกแจงความน่าจะเป็นร่วมกับตัวแปรสำหรับแต่ละกรอบเวลา ตัวกรองคาลมาน มีการใช้งานเทคโนโลยีในคำแนะนำการนำทางและการควบคุมยานพาหนะโดยเฉพาะเครื่องบินยานอวกาศและเรือที่อยู่ในตำแหน่งแบบไดนามิก นอกจากนี้ตัวกรองคาลมาน เป็นแนวคิดที่นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ที่ใช้ในสาขาต่าง ๆ เช่นการประมวลผลสัญญาณ ตัวกรองคาลมานยังเป็นหนึ่งในหัวข้อหลักในการวางแผนการเคลื่อนไหว ตัวกรองคาลมานใช้ในการสร้างแบบจำลองการควบคุมการเคลื่อนไหวของระบบประมวลผลส่วนกลาง เนื่องจากการหน่วงเวลาระหว่างการออกคำสั่งมอเตอร์และการรับการตอบสนองทางประสาทสัมผัส การใช้ตัวกรองคาลมานจึงสนับสนุนแบบจำลองที่เหมือนจริงสำหรับการประมาณสถานะปัจจุบันของระบบมอเตอร์และการออกคำสั่งที่อัปเดต อัลกอริทึมทำงานในกระบวนการมี 2 ขั้นตอน ในขั้นตอนการคาดคะเนตัวกรองคาลมานจะสร้างค่าประมาณของตัวแปรสถานะปัจจุบันพร้อมกับความไม่แน่นอน เมื่อพบผลลัพธ์ของการวัดครั้งต่อไป ค่าประมาณเหล่านี้จะได้รับการอัปเดตโดยใช้ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก โดยให้น้ำหนักมากขึ้นในการประมาณการด้วยความไม่แน่นอนที่สูง อัลกอริทึมเป็น recursive สามารถทำงานแบบเรียลไทม์โดยใช้เฉพาะการวัดอินพุตปัจจุบันและสถานะที่คำนวณก่อนหน้าและเมทริกซ์ความไม่แน่นอน

### 2.9.1 Sensors Fusion ในโปรแกรม MATLAB

การใช้ฟังก์ชัน AHRS เพื่ออ่านค่า accelerometer, gyroscope และ magnetometer AHRS ใช้ 9 แกน ใน Kalman Filter อธิบาย อัลกอริทึมพยายามติดตามข้อผิดพลาดในการเริ่มต้นรับค่าของความเร่ง (Accelerometer) ไจโรสโคป (Gyroscope) และการรบกวนทางสนามแม่เหล็ก (Magnetometer) และ Kalman Filter จะจำลองกระบวนการรับข้อมูลที่ผิดพลาดโดยมีการอัปเดตแบบวนซ้ำ (Loop)

$$X_k = \begin{bmatrix} \theta_k \\ b_k \\ a_k \\ d_k \end{bmatrix} = F_k \begin{bmatrix} \theta_{k-1} \\ b_{k-1} \\ a_{k-1} \\ d_{k-1} \end{bmatrix} + w_k \quad (2-45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $x_k$  คือเวกเตอร์ ประกอบด้วย

- $\theta_k$     เวกเตอร์การวางแนวผิดพลาด ในหน่วยองศา ณ เวลา  $k$
  - $b_k$     เวกเตอร์ gyroscope ในหน่วย deg/s ณ เวลา  $k$
  - $a_k$     เวกเตอร์ acceleration error ในเฟรมเซ็นเซอร์ ในหน่วย g ณ เวลา  $k$
  - $d_k$     เวกเตอร์ magnetic disturbance error ในเฟรมเซ็นเซอร์ ในหน่วย  $\mu T$  ณ เวลา  $k$
- และโดยที่  $w_k$  คือเวกเตอร์สัญญาณรบกวน และ  $F_k$  คือแบบจำลองการเปลี่ยนสถานะ

เนื่องจาก  $x_k$  ถูกกำหนดให้เป็นกระบวนการของข้อผิดพลาด การประมาณค่าล่วงหน้าจึงเป็นศูนย์เสมอ ดังนั้นแบบจำลองการเปลี่ยนสถานะ  $F_k$  จึงเป็นศูนย์ ส่งผลให้สมการคาลมานมาตรฐานดังต่อไปนี้

สมการ Kalman มาตรฐาน

$$x_k^- = F_k x_{k-1}^+ \quad (2-46)$$

$$P_k^- = F_k P_{k-1}^+ F_k^T + Q_k \quad (2-47)$$

$$y_k = z_k - H_k x_k^- \quad (2-48)$$

$$S_k = R_k + H_k P_k^- H_k^T \quad (2-49)$$

$$K_k = P_k^- H_k^T (S_k)^{-1} \quad (2-50)$$

$$x_k^+ = x_k^- + K_k y_k \quad (2-51)$$

$$P_k^+ = P_k^- - K_k H_k P_k^- \quad (2-52)$$

สมการ Kalman ที่ใช้ในฟังก์ชัน AHRS ในอัลกอริทึมนี้

$$x_k^- = 0 \quad (2-53)$$

$$P_k^- = Q_k \quad (2-54)$$

$$y_k = z_k \quad (2-55)$$

$$S_k = R_k + H_k P_k^- H_k^T \quad (2-56)$$

$$K_k = P_k^- H_k^T (S_k)^{-1} \quad (2-57)$$

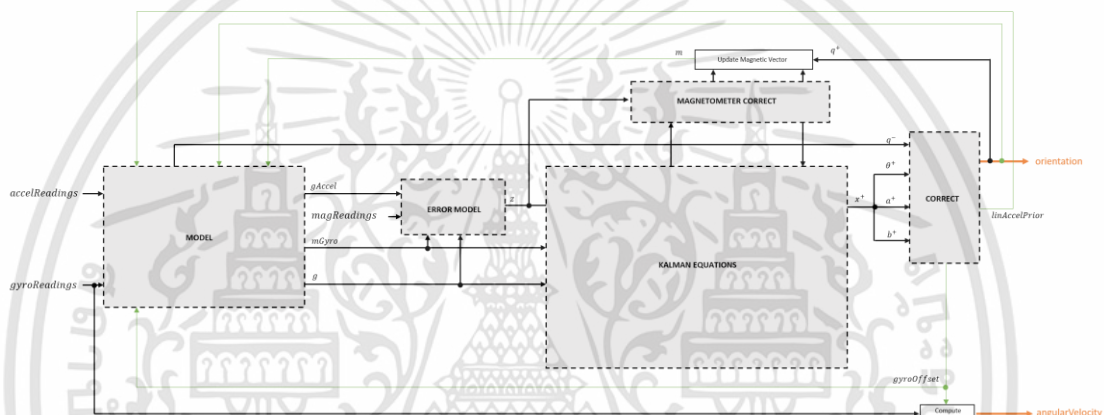
$$x_k^+ = K_k y_k \quad (2-58)$$

$$P_k^+ = P_k^- - K_k H_k P_k^- \quad (2-59)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $x_k^-$  คือ การคาดการณ์ล่วงหน้าของผลที่ผิดพลาด  
 $P_k^-$  คือ การคาดการณ์การประมาณความแปรปรวน  
 $y_k$  คือ การปรับปรุง  
 $S_k$  คือ ความแปรปรวนของการปรับปรุง  
 $K_k$  คือ Kalman gain  
 $x_k^+$  คือ อัปเดตหลังการคาดการณ์ล่วงหน้า  
 $P_k^+$  คือ อัปเดตการคาดการณ์การประมาณความแปรปรวน

$k$  แทนการวนซ้ำ ด้วย  $+$  แทนค่าประมาณค่าอัปเดต และ ด้วย  $-$  แทนการประมาณค่าเบื้องต้น



รูปที่ 2.24 อธิบายการวนซ้ำแบบเฟรมเดียวผ่านอัลกอริทึม

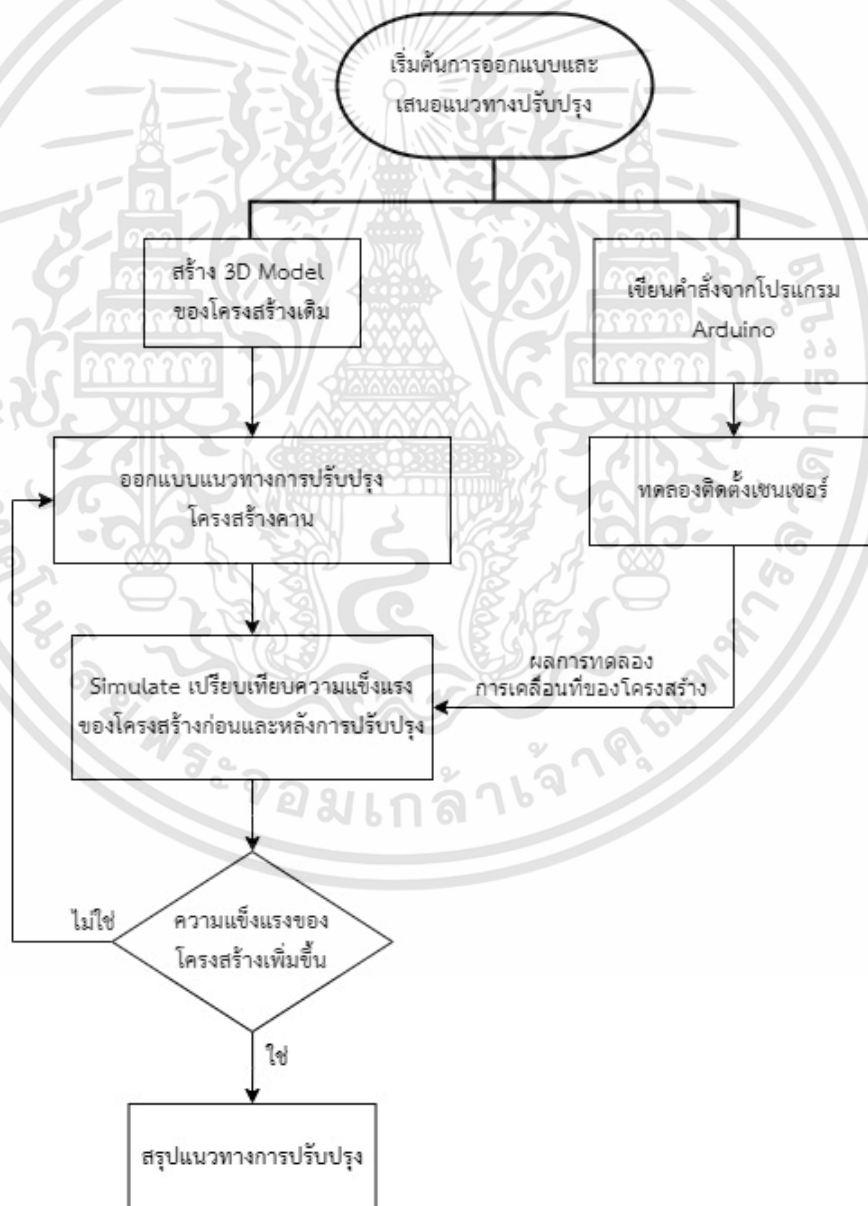
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบและการคำนวณ

ในบทนี้ จะกล่าวถึงการพัฒนาปรับปรุงโครงสร้างของคานและจุดเชื่อมต่อ ที่เป็นตำแหน่งของคาน สปริง รวมถึงวิธีการวัดค่าทดลองสร้างอุปกรณ์ตรวจจับการสั่นของคาน โดยการเขียนคำสั่งจาก โปรแกรม Arduino และ MATLAB พร้อมกับการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ อีกทั้งยังบอกถึง วิธีการแก้ปัญหาที่พบระหว่างการทำงาน

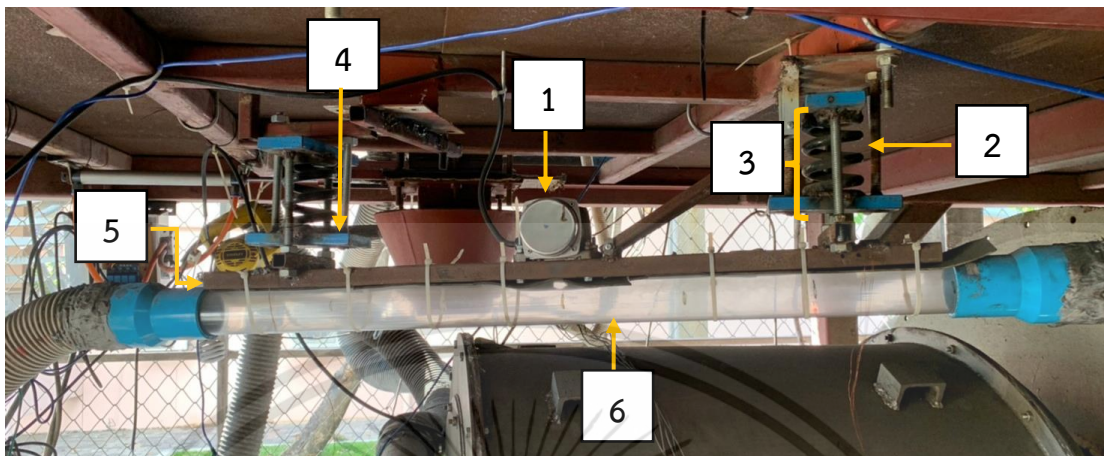
#### 3.1 ขั้นตอนการทำงาน



รูปที่ 3.1 Flow Chart ขั้นตอนการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 โครงสร้างชุดลำเลียงก่อนการปรับปรุง

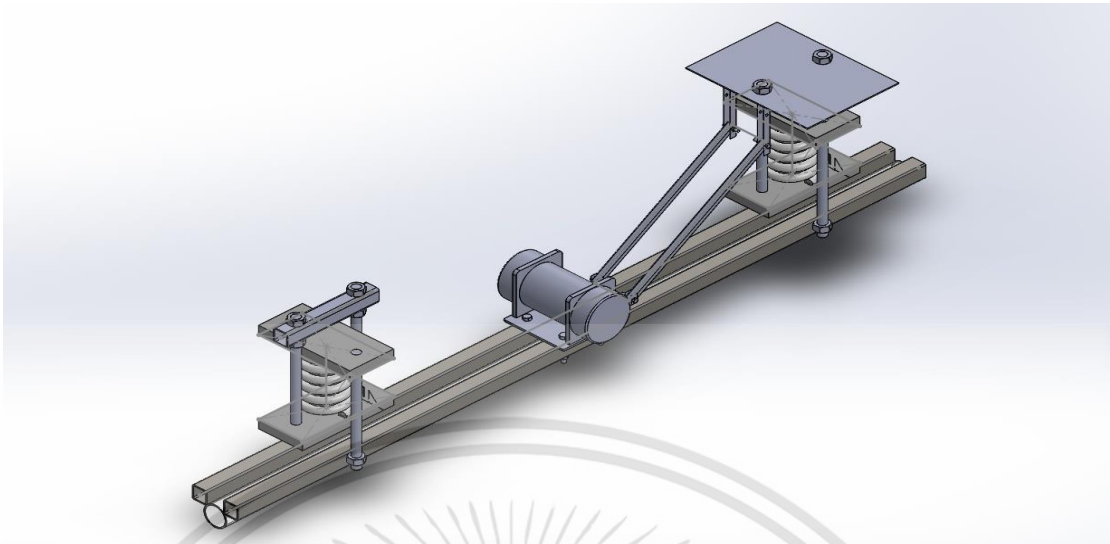


รูปที่ 3.2 โครงสร้างส่วนประกอบชุดลำเลียงก่อนการปรับปรุง

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบโครงสร้างชุดลำเลียงก่อนการปรับปรุง

หมายเลข	ส่วนประกอบ	ขนาด
1	มอเตอร์	ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที
2	สปริง	ค่านิจสปริง 240,544 N/m
3	สตัท	1/2 นิ้ว ยาว 17 เซนติเมตร
4	แผ่นเหล็ก	6.5x15 เซนติเมตร หนา 16 มิลลิเมตร
5	เหล็กกล่อ	1x1 นิ้ว หนา 2.3 มิลลิเมตร ยาว 1.130 เมตร
6	ท่ออะคลิลิกใส	เส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ยาว 1 เมตร

แล้วจึงสามารถสร้างโมเดล 3 มิติ อ้างอิงจากโครงสร้างจริงในห้องปฏิบัติการโดยโปรแกรม SolidWorks ได้ดังรูปที่ 3.3

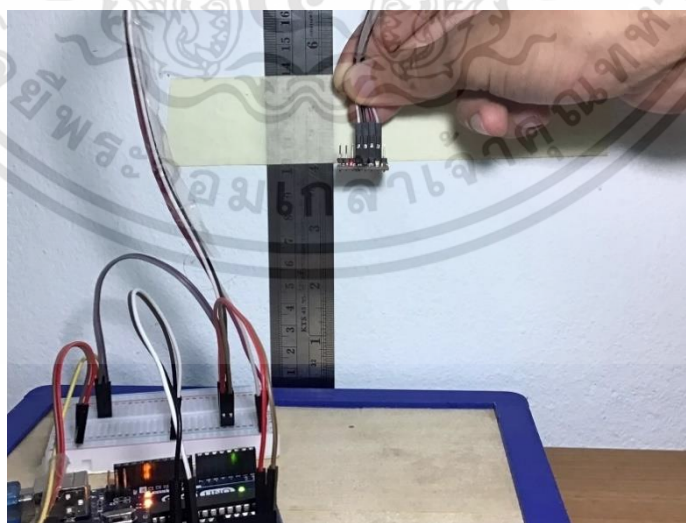


รูปที่ 3.3 โครงสร้างโมเดลสามมิติก่อนการปรับปรุง

### 3.3 ทดลองติดตั้งเซ็นเซอร์เพื่อศึกษาลักษณะการสั่นของคานลำเลียง

ทำการศึกษา Sensor MPU-9250 เพื่อติดตั้งที่ตำแหน่งที่ต้องการศึกษานกของอุปกรณ์ ใน การศึกษาระยะการสั่นสะเทือนวิเคราะห์รูปแบบการสั่นของคานเพื่อศึกษาแนวทางการออกแบบที่ สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ท่อน้ำสำหรับการขนส่งเชื้อเพลิงชนิดผงเข้าสู่ห้องเผาไหม้

สามารถทำได้โดยการศึกษาชุดคำสั่งและทดลองจำลองขึ้นมาเพื่อพิสูจน์การทำงาน โดยใช้ เซ็นเซอร์วัดความเร่ง (MPU9250) 3 แกน ในการสร้างชุดจำลองการเคลื่อนที่

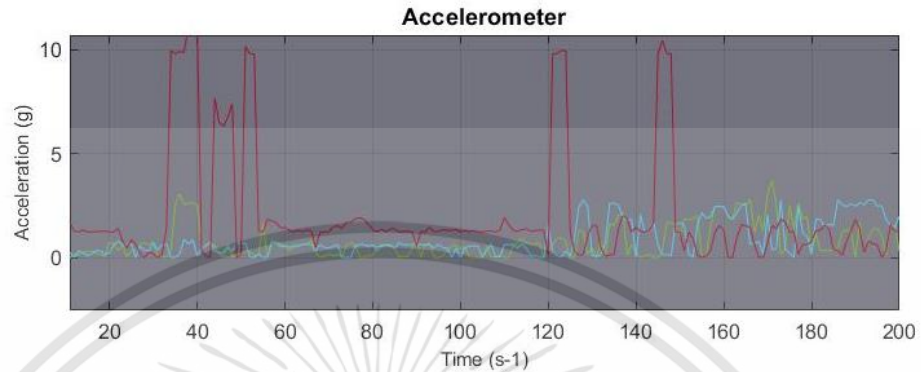


รูปที่ 3.4 ชุดทดลองการจำลองการเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

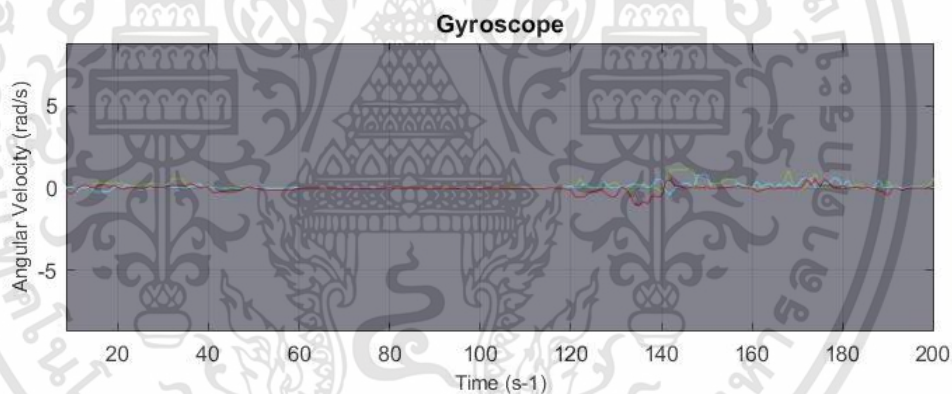
จากขั้นตอนการทดสอบวัดค่าจากเซนเซอร์เพื่อวัดค่าทั้ง 9 แกน แล้วนั้น จะผลที่แสดงดังต่อไปนี้

1. ค่าความเร่ง (Accelerometer) อ่านได้ของทั้ง 3 แกน กำหนด สีเขียว คือ แกน X , สีฟ้า คือ แกน Y และสีแดง คือ แกน Z



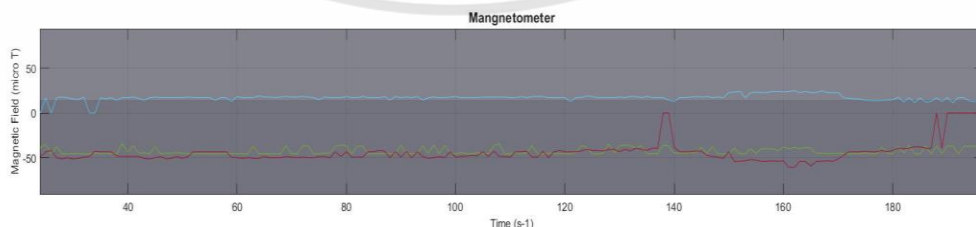
รูปที่ 3.5 ความเร่งที่ได้จากการทดลอง

2. ค่าความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) อ่านได้ของทั้ง 3 แกน กำหนดสีเขียว คือ แกน X , สีฟ้า คือ แกน Y และสีแดง คือ แกน Z



รูปที่ 3.6 ความเร็วเชิงมุมที่ได้จากการทดลอง

3. ค่าสนามแม่เหล็ก (Magnetometer) อ่านได้ของทั้ง 3 แกน กำหนดสีเขียว คือ แกน X , สีฟ้า คือ แกน Y และสีแดง คือ แกน Z



รูปที่ 3.7 ค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดลอง

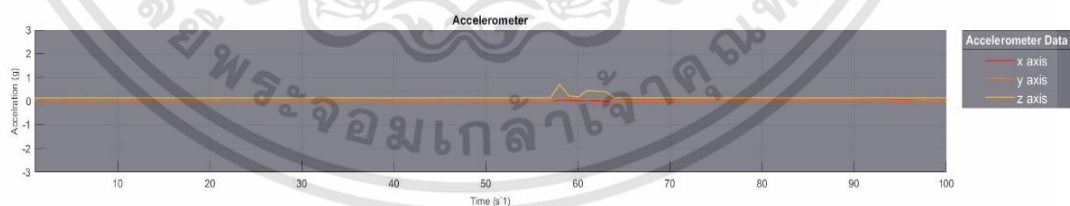
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นและไม่สามารถวัดค่าตามจริงได้ และค่าความผิดพลาดเกิดจากสัญญาณรบกวนผ่านในตัวของเซนเซอร์เอง ดังนั้นวิธีการที่จะปรับปรุงแก้ไขสัญญาณที่รบกวนจึงต้องประยุกต์ใช้วิธีการ sensors fusion ซึ่ง MPU -9250 ที่มี 9 แกน คือ วัดความเร่ง (Accelerometer) วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) และวัดสนามแม่เหล็ก (Magnetometer) อย่างละ 3 แกน ที่ทำมุมตั้งฉากกันในแนวแกน x,y,z และในการทดลองวัดค่าความเร่งออกมาในหน่วย G ความเร็วเชิงมุมเป็นหน่วย rad/s และสนามแม่เหล็กในหน่วยไมโครเทสลา (micro T) โดยใช้ Kalman Filter ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการทำนายหรือประมาณการผลลัพธ์ถัดไปตามข้อมูลก่อนหน้า กระบวนการคล้ายกับการกำจัดสัญญาณรบกวนจากสัญญาณจึงเรียกว่าตัวกรองคาลมานระบบในตัวกรองคาลมานจะถือว่าเป็นระบบเชิงเส้น ตัวกรองคาลมานย่อค่าเฉลี่ยให้น้อยที่สุดค่าความผิดพลาดในการประมาณค่าสำหรับระบบเชิงเส้นตรงแบบสุ่มโดยใช้เซ็นเซอร์สัญญาณรบกวนเชิงเส้น สามารถใช้งานได้ผ่าน MATLAB, Arduino หรือแหล่งการเขียนโปรแกรมอื่น

สัญญาณรบกวนภายในเซนเซอร์ความเร่งจะใช้ Low-Pass filter กรองสัญญาณที่มีความถี่สูงออก และทำการเปรียบเทียบความเร่ง (Accelerometer) ในแนวแกน z กับสัญญาณที่ไม่ผ่าน Kalman Filter

จากขั้นตอนการทดสอบวัดค่าจากเซนเซอร์เพื่อวัดค่าทั้ง 9 แกน โดยผ่านการใช้ Kalman Filter ได้ผลที่แสดง ดังต่อไปนี้

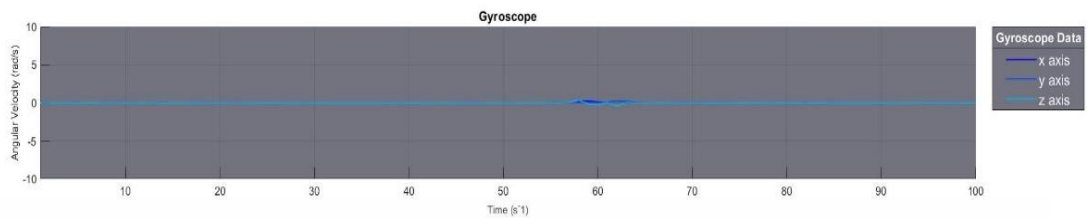
1. ค่าความเร่ง (Accelerometer) อ่านได้ทั้ง 3 แกน เมื่อผ่านการกรองสัญญาณรบกวนจากการใช้ฟังก์ชันชุดคำสั่งในโปรแกรม



รูปที่ 3.8 ความเร่งที่ได้จากการทดลองเมื่อผ่านการกรองสัญญาณรบกวน

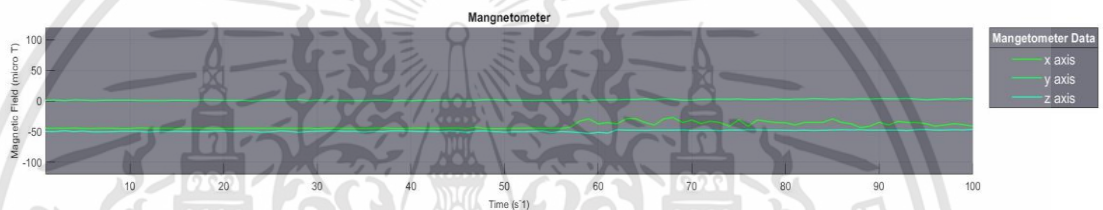
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่าความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) อ่านได้ทั้ง 3 แกน เมื่อผ่านการกรองสัญญาณรบกวนจากการใช้ฟังก์ชันชุดคำสั่งในโปรแกรม



รูปที่ 3.9 ความเร็วเชิงมุมที่ได้จากการทดลองเมื่อผ่านการกรองสัญญาณรบกวน

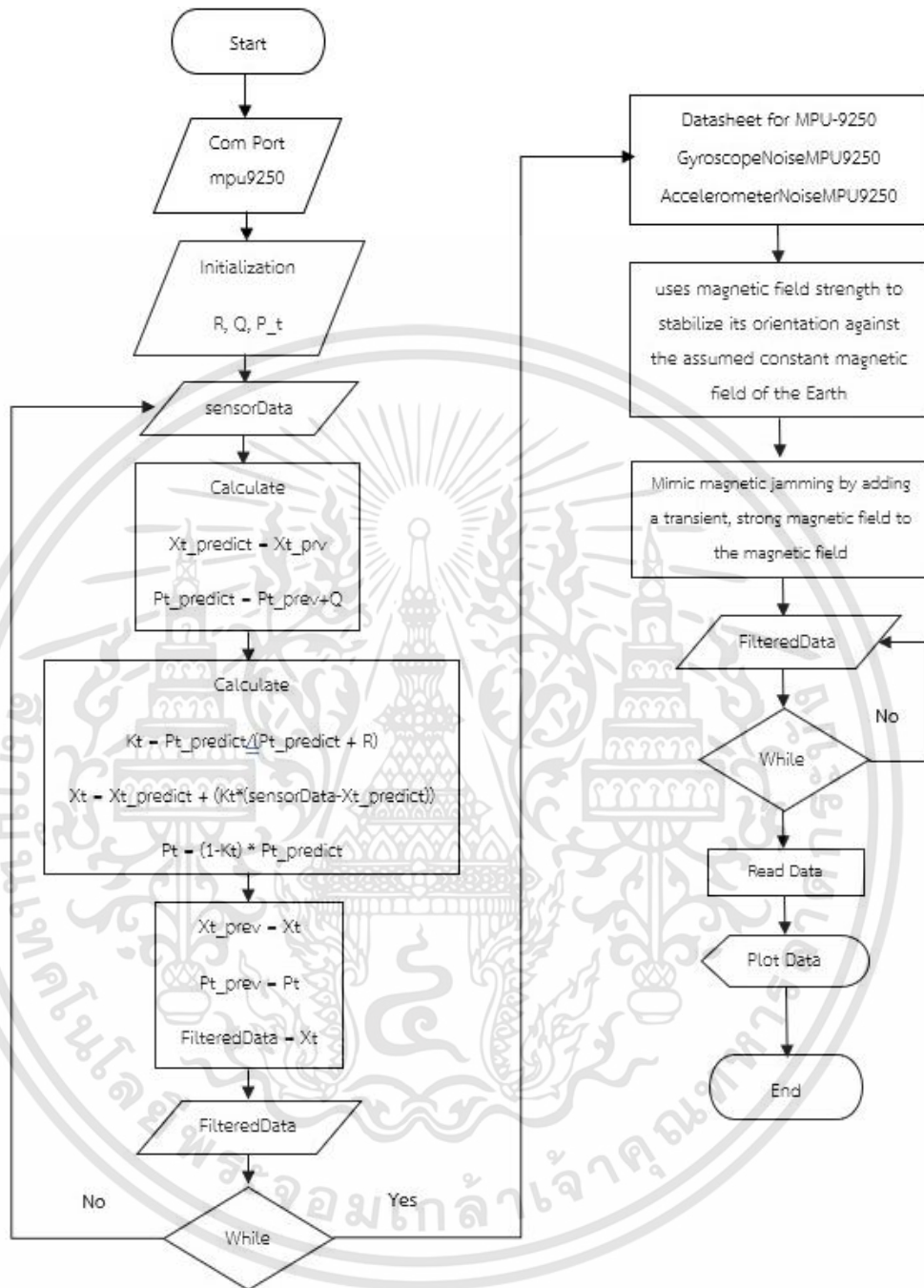
3. ค่าสนามแม่เหล็ก (Magnetometer) อ่านได้ทั้ง 3 แกน เมื่อผ่านการกรองสัญญาณรบกวนจากการใช้ฟังก์ชันชุดคำสั่งในโปรแกรม



รูปที่ 3.10 ค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดลองเมื่อผ่านการกรองสัญญาณรบกวน

จากที่มีการนำสัญญาณข้อมูลที่วัดได้ผ่านการกรองสัญญาณรบกวน สังเกตได้ว่าการทำให้สัญญาณราบเรียบขึ้น

### 3.3.1 การเขียนชุดคำสั่งเพื่อกรองสัญญาณรบกวนจากเซนเซอร์



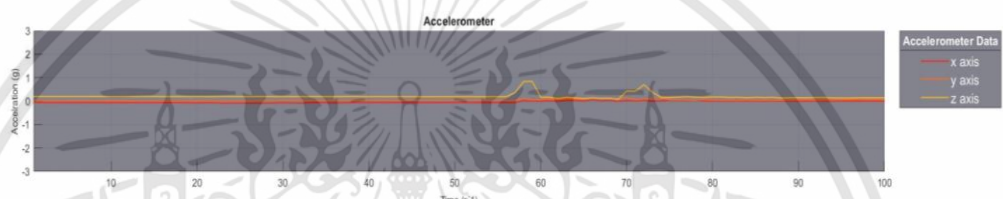
รูปที่ 3.11 Flow Chart ขั้นตอนการเขียนชุดคำสั่งเพื่อกรองสัญญาณรบกวนจากเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

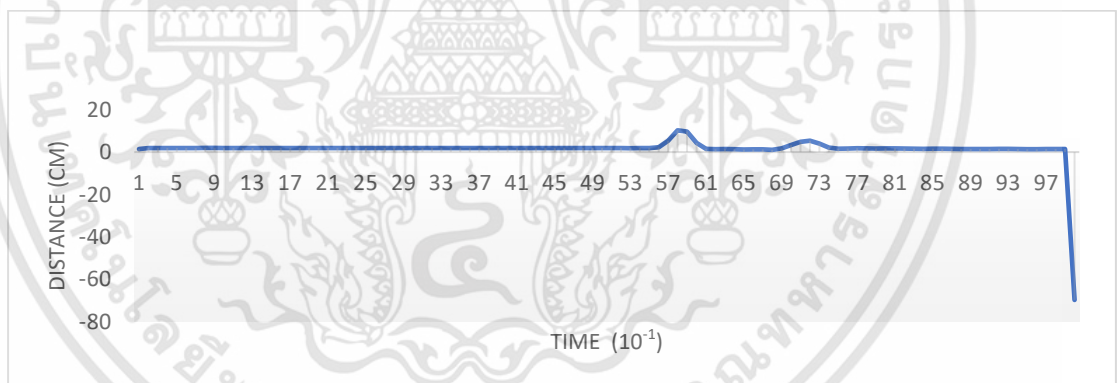
### 3.3.2 คำนวณหาระยะจากการหาปริพันธ์เชิงตัวเลข โดยการใช้การประมาณค่าปริพันธ์โดยใช้ ระเบียบวิธีสี่เหลี่ยมคางหมู

คำนวณหาระยะจากข้อมูลความเร่ง (Accelerometer) ในแนวแกน Z ที่ผ่านการกรองสัญญาณ โดยการใช้การประมาณค่าปริพันธ์โดยใช้ระเบียบวิธีสี่เหลี่ยมคางหมูในโปรแกรม Microsoft Excel แสดงผลได้ ดังนี้

จาก รูปที่ 3.22 ชุดทดลองการจำลองการเคลื่อนที่ ที่ทำการทดลองยกเซนเซอร์ ขึ้น - ลง ในระยะ 10 เซนติเมตร พบว่ากราฟและข้อมูลของความเร่ง (Accelerometer) แสดงผลออกมาได้ ดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.12 ข้อมูลความเร่งที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 3.13 ข้อมูลระยะทางที่ได้จากการทดลอง

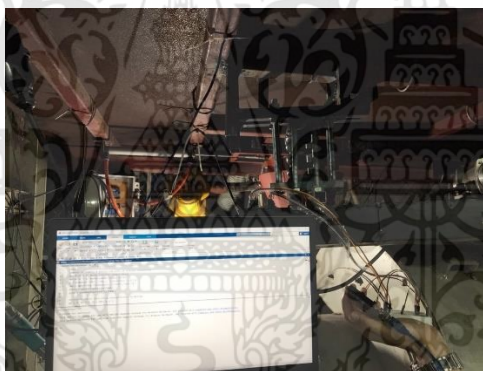
จากผลลัพธ์ระยะของแกน Z ที่ได้ ค่าสูงสุดที่สามารถคำนวณได้จากเซนเซอร์ด้วยวิธีการประมาณค่าปริพันธ์โดยใช้ระเบียบวิธีสี่เหลี่ยมคางหมู มีค่า 10.2446 เซนติเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่ทดลองยกเซนเซอร์ที่วัดในตำแหน่งความสูง 10 เซนติเมตร

### 3.3.3 ขั้นตอนการติดตั้งเซนเซอร์

จากขั้นตอนการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของเซนเซอร์เสร็จสิ้นแล้ว ขั้นตอนถัดมาคือการติดตั้งเพื่อวัดทิศทางการ ระยะ ของการเคลื่อนที่อุปกรณ์ เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผล โดยทำการเก็บข้อมูลในชุดอุปกรณ์เดิมและอุปกรณ์ใหม่ที่ออกแบบเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้าง

โดยขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

1. ทำการวัดความยาวของคานทั้งหมดและแบ่งออกเป็น 3 ช่วง เพื่อเป็นจุดที่ติดตั้งเซนเซอร์
2. ทำการวัดทิศทางการสั่นจุดที่ 1 ทางออกของท่อลำเลียงที่ยึดกับสปริง จุดละ 3 ครั้ง
3. ทำการวัดทิศทางการสั่นจุดที่ 2 ตรงกึ่งกลางของท่อลำเลียงที่ยึดกับมอเตอร์ จุดละ 3 ครั้ง
4. ทำการวัดทิศทางการสั่นจุดที่ 3 ทางเข้าของท่อลำเลียงที่ยึดกับสปริง จุดละ 3 ครั้ง
5. เก็บค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์ในช่วงเวลา 10 วินาที ผ่านจอโปรแกรมคอมพิวเตอร์
6. บันทึกผลและสรุปผลเพื่อนำไปวิเคราะห์



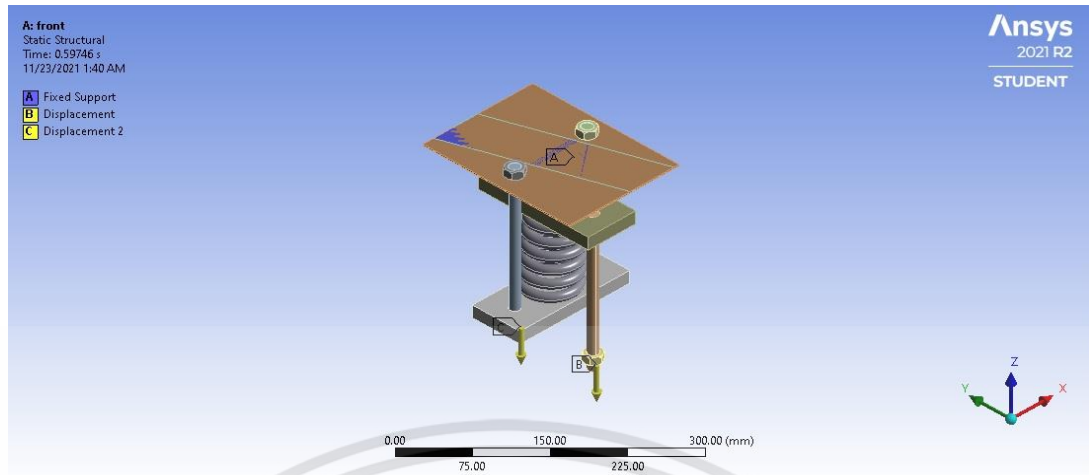
รูปที่ 3.14 ติดตั้งเซนเซอร์และเก็บผล

## 3.4 การปรับปรุงโครงสร้างความแข็งแรงการติดตั้งสปริงและทิศทางการสั่นสะเทือน

### 3.4.1 แนวทางที่ 1 การเปลี่ยนอุปกรณ์ด้านทานการสั่นสะเทือน

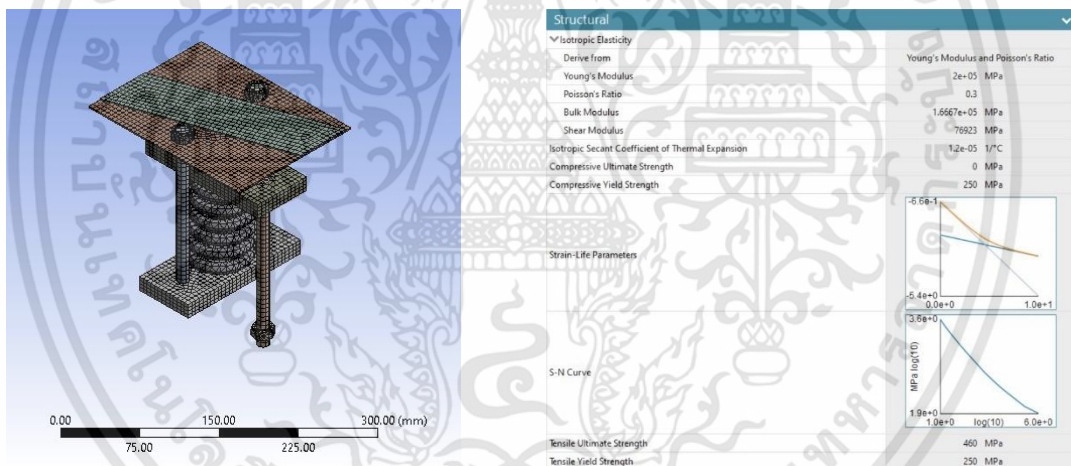
#### 3.4.1.1 หาจุดบกพร่องการติดตั้งสปริงของโครงสร้างก่อนการปรับปรุง

วิเคราะห์ด้วยวิธีการ Finite Element เพื่อทำการ Simulation โดยใช้โปรแกรม ANSYS เพื่อหาจุดบกพร่องของการติดตั้งสปริงของโครงสร้างก่อนการปรับปรุง โดยกำหนด Fixed Support ตามพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมคางหมูโดยอ้างอิงจากรอยเชื่อมจริง และกำหนด Displacement จากค่าผลการทดลองที่ได้ในหัวข้อที่ 3.3.3



รูปที่ 3.15 การกำหนด Fixed Support และ Displacement

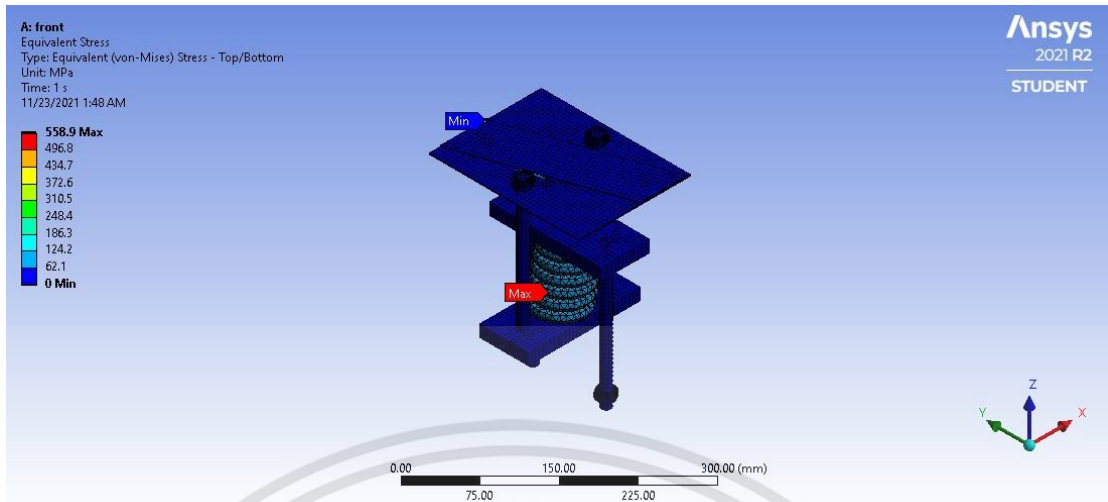
จากนั้นทำการ Mesh โมเดล รวมถึงกำหนดวัสดุเป็น Structural Steel แล้วจึงทำการ Simulate



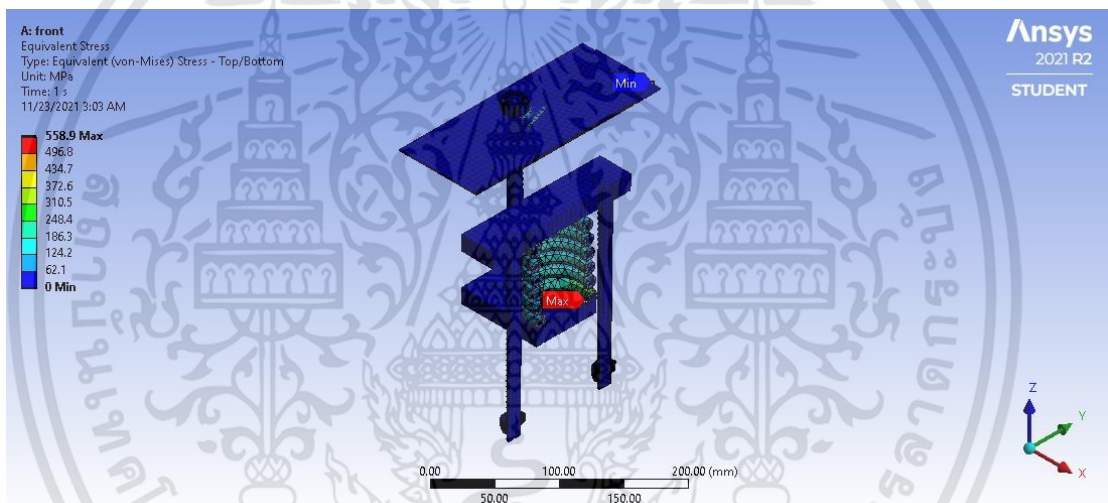
รูปที่ 3.16 การ Mesh โครงสร้างเต็ม รูปที่ 3.17 ค่าจำเพาะของวัสดุชนิด Structural Steel

จากการ Simulation พบว่าโครงสร้างการติดตั้งสปริงก่อนการปรับปรุง มีความเค้น Von Mises Stress สูงสุดเท่ากับ 558.9 MPa ที่บริเวณระหว่างรอยเชื่อมสปริงและฐานสปริง ซึ่งมากกว่าค่า Yield Strength ของวัสดุ หมายความว่าอาจเกิดการเสียรูปของวัสดุได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



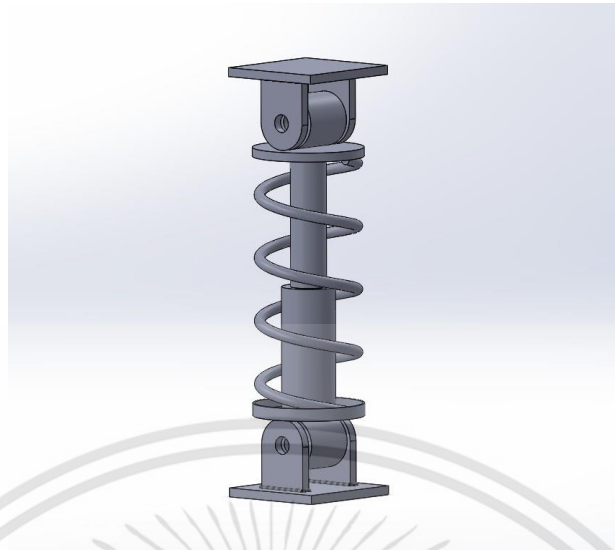
รูปที่ 3.18 ความเค้น Von-Mises



รูปที่ 3.19 Cross Section แสดงบริเวณที่เกิดค่า Maximum Stress

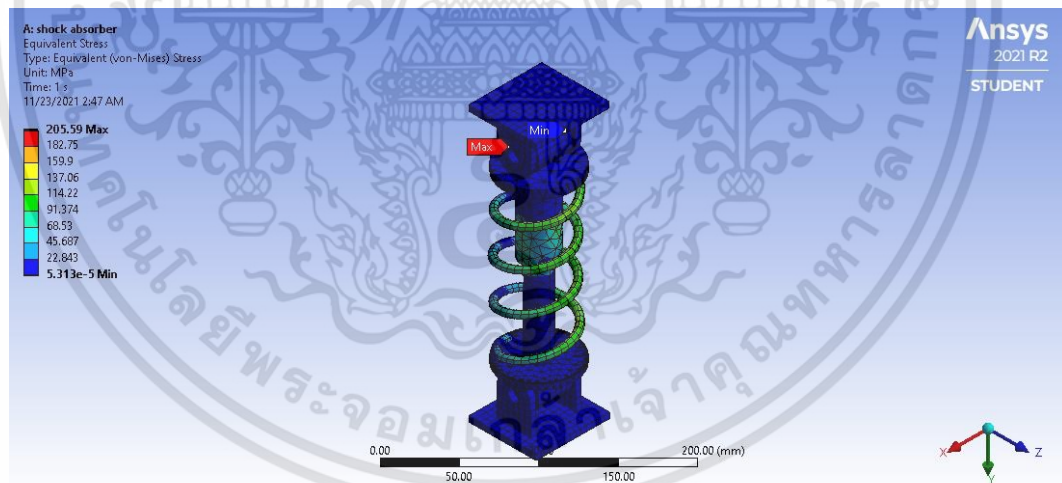
#### 3.4.1.2 เสนอแนวทางการปรับปรุงการติดตั้งสปริง

เนื่องจากจุดบกพร่องการติดตั้งสปริงของโครงสร้างเกิดที่รอยเชื่อมระหว่างสปริงและฐานสปริง จึงได้ทำการเปลี่ยนการติดตั้งสปริงให้เป็น Loose Contact และเพิ่ม Shock Absorber เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการจับยึดให้แข็งแรงยิ่งขึ้น โดยแทนที่น้ำมันในกระบอกสูบด้วยอากาศ ซึ่งสามารถสร้างโมเดลสามมิติจากโปรแกรม SolidWorks ได้ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 โมเดลสามมิติการติดตั้ง Shock Absorber

จากนั้นใช้วิธีการ Finite Element Analysis รูปแบบเดียวกับหัวข้อที่ 3.3.1 พบว่าค่าความเค้น Von Mises สูงสุดเท่ากับ 205.59 MPa ซึ่งน้อยกว่าค่า Yield Strength ของวัสดุ และมีค่า Safety Factor ขณะเกิดแรงอัดมากกว่า 1 แต่ผลของการ Simulate ขณะสปริงมีแรงดึงพบว่าค่า Safety Factor ตรงบริเวณสปริงน้อยกว่า 0



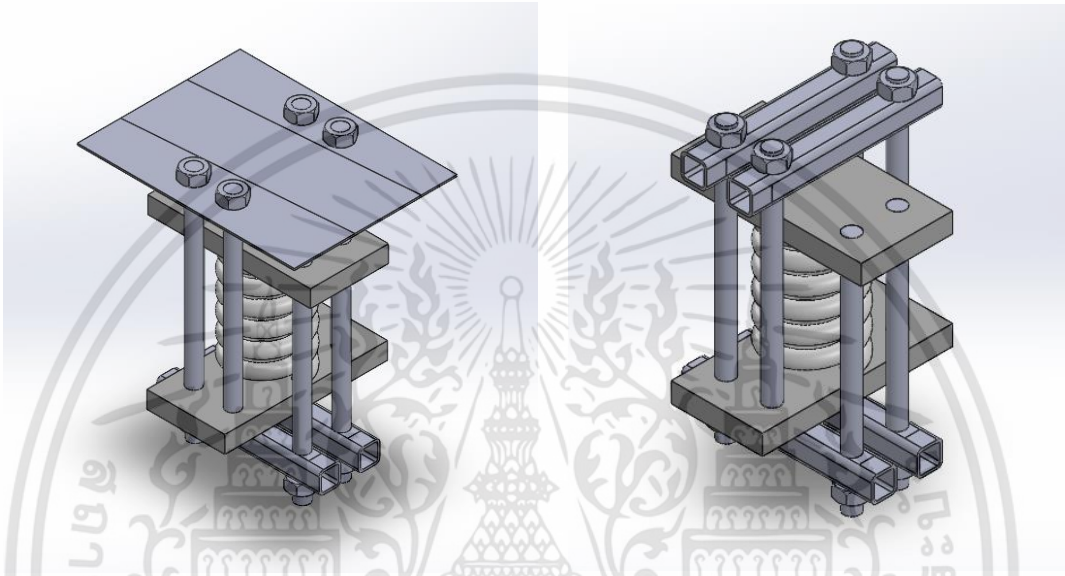
รูปที่ 3.21 ความเค้น Von-Mises ของการติดตั้ง Shock Absorber

เนื่องจากข้อจำกัดในด้านระยะเวลา พื้นที่ในการติดตั้ง และจากการวัดทิศทางเคลื่อนที่ ซึ่งมีทั้ง แกน x y z ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการผลลัพธ์ในการออกแบบเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ดังนั้น shock absorber จึงไม่สามารถบังคับทิศทางได้ตามที่ต้องการ และสรุปได้ว่าการออกแบบโดยใช้อุปกรณ์ชนิดนี้มีแนวโน้มที่จะทำให้ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการเพิ่มความแข็งแรงและประสิทธิภาพของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 แนวทางที่ 2 การปรับปรุงโครงสร้างบริเวณตัวต้านทานการสั่นสะเทือน

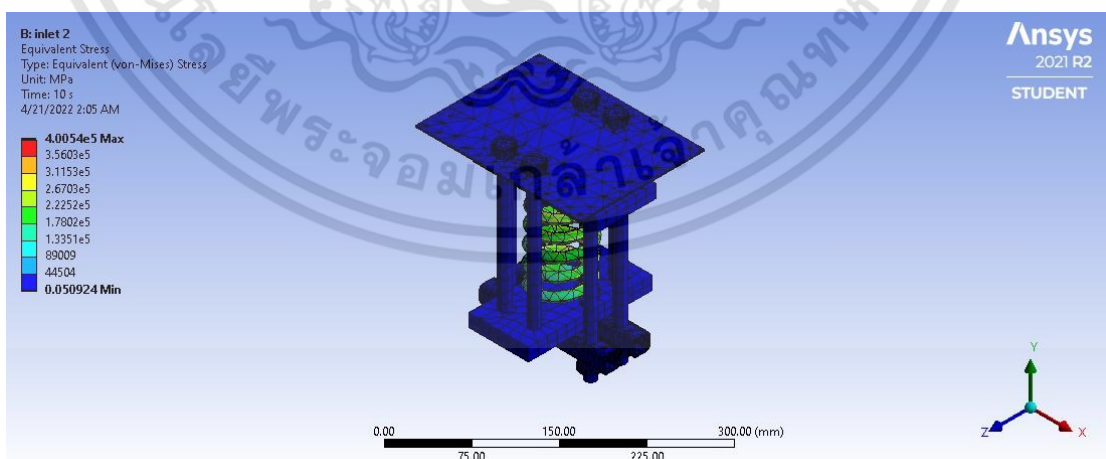
จากผลการทดลองการติดตั้งเซนเซอร์ใน หัวข้อที่ 3.3 ทำให้ทราบถึงลักษณะการสั่นของโครงสร้าง ซึ่งมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ไม่ต้องการมากเกินไปตามแนวแกนในสมมติฐานที่ออกแบบจึงได้ออกแบบโครงสร้างโดยการเพิ่มสลักเกลียว (Stud) ทั้งทางด้าน Inlet และ Outlet เพื่อต้านการเคลื่อนที่ดังกล่าว เพื่อให้เกิดการสั่นของโครงสร้างที่ทำให้เชื้อเพลิงแข็งเคลื่อนที่ไปข้างหน้า



รูปที่ 3.22 โครงสร้าง inlet แนวทางที่ 2

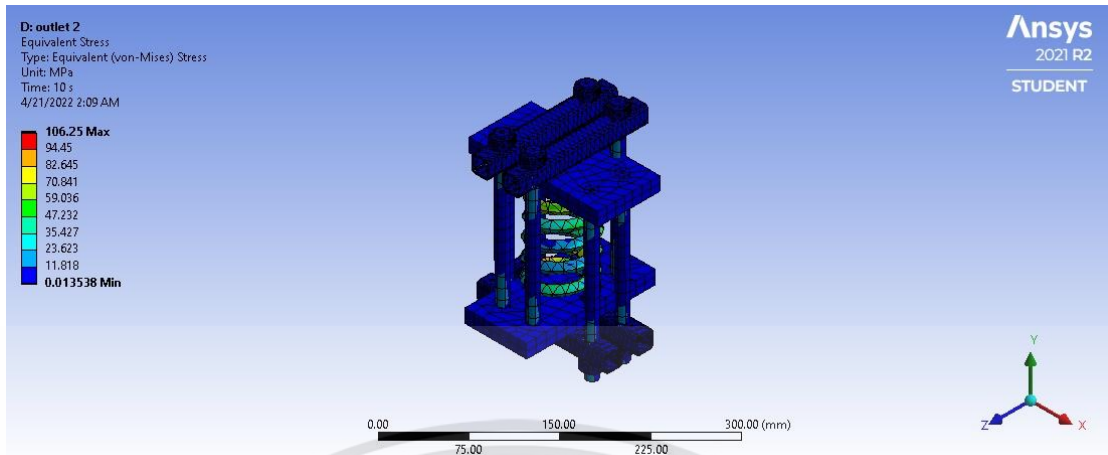
รูปที่ 3.23 โครงสร้าง outlet แนวทางที่ 2

จากนั้นทำการ Simulate ด้วยโปรแกรม ANSYS โดยค่า Equivalent Stress สูงสุดของโครงสร้างทางด้าน Inlet และ Outlet มีค่าน้อยกว่า Yield Strength ของวัสดุ



รูปที่ 3.24 ความเค้น Von-Mises ของการติดตั้งเพิ่มสลักเกลียว inlet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



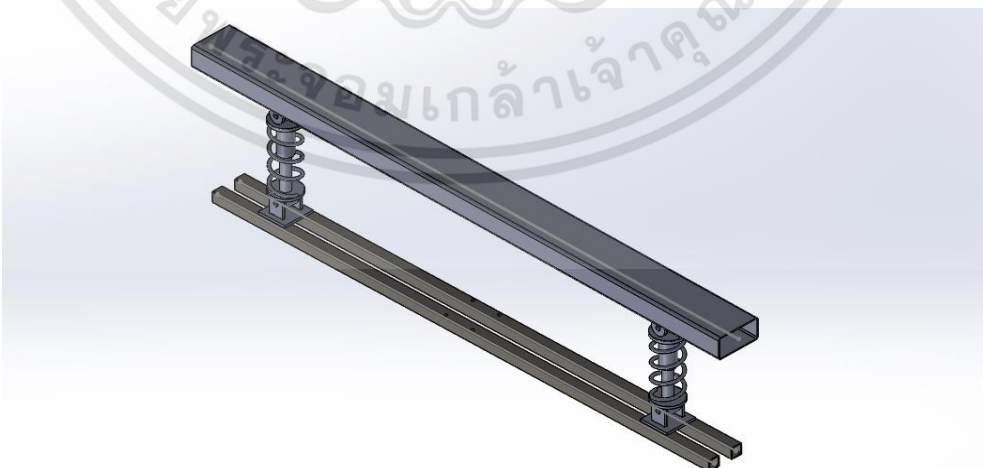
รูปที่ 3.25 ความเค้น Von-Mises ของการติดตั้งเพิ่มสลักเกลียว outlet

ดังนั้น การออกแบบนี้มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความแข็ง Rigid ให้กับโครงสร้าง

### 3.5 การปรับปรุงโครงสร้างความแข็งแรงของคาน

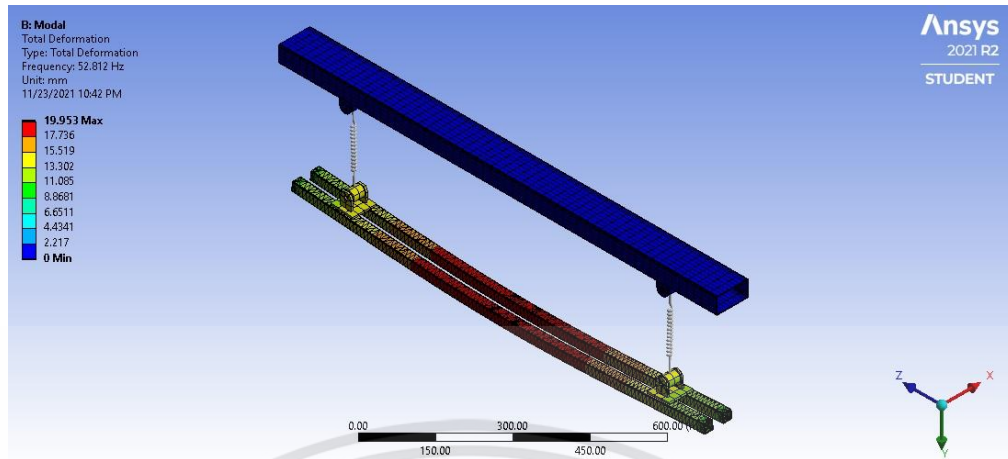
#### 3.5.1 แนวทางที่ 1 การเพิ่มพื้นที่ยึดติดอุปกรณ์กับโครงสร้างคาน

เพื่อแก้จุดยึดจากของเดิมที่เป็นจุดเชื่อมกันที่ฐานหน้าและฐานหลังเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นการเชื่อมติดจากคานด้านบนลงมา โดยการเปลี่ยนจุดยึดทั้งสองเป็นคานเหล็กกล่องยาวแทน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของฐานยึดให้ทนทานต่อแรงกระแทกมากยิ่งขึ้นและเพิ่มความทนทานต่อความล้าจากการใช้วัสดุเดิมที่มีการเชื่อมติดกันหลายชิ้นเข้าด้วยกัน โดยความล้าที่เกิดจากแรงกระแทกของมอเตอร์กระทำซ้ำ ๆ เป็นเวลานานทำให้วัสดุและรอยเชื่อมเกิดความเค้นสะสมนำไปสู่การแตกหัก



รูปที่ 3.26 โครงสร้างโมเดลสามมิติหลังการปรับปรุงแนวทางที่ 1

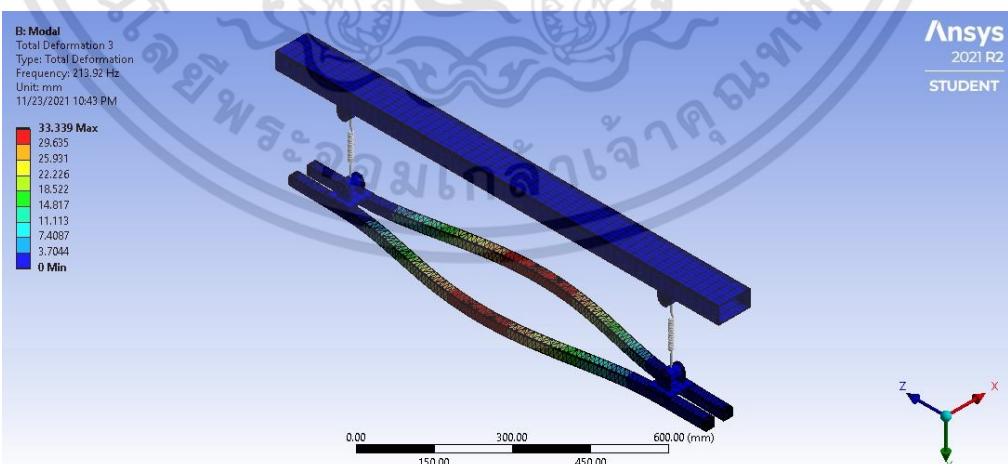
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 โหมดการสั่นที่ 1

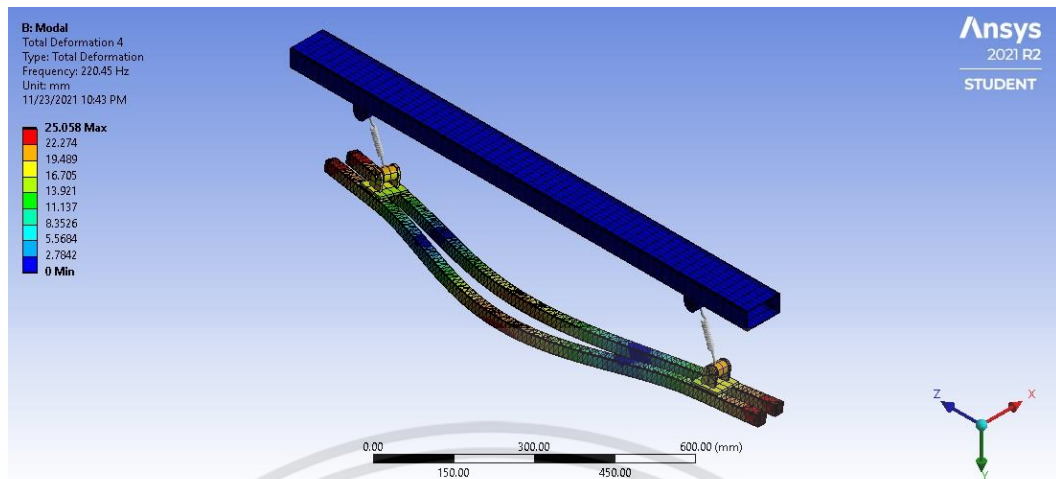


รูปที่ 3.28 โหมดการสั่นที่ 2



รูปที่ 3.29 โหมดการสั่นที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

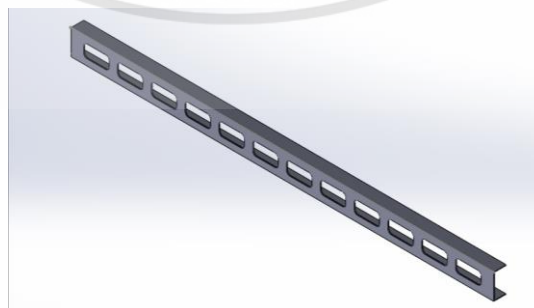


รูปที่ 3.30 โหมดการสั่นที่ 4

จากผลการทดสอบด้วยโปรแกรม ANSYS พบว่าค่าความถี่ของการปรับปรุงโครงสร้างคานใหม่ในโหมดการสั่นที่ 1 มีค่าใกล้เคียงความถี่ของมอเตอร์ ซึ่งเป็นโหมดของการสั่นที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างทั้งหมด อีกทั้งยังสามารถทำให้โครงสร้างยึดติดและอุปกรณ์ชุดลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั่นเกิดข้อผิดพลาดหรือพังเสียหายได้ง่าย

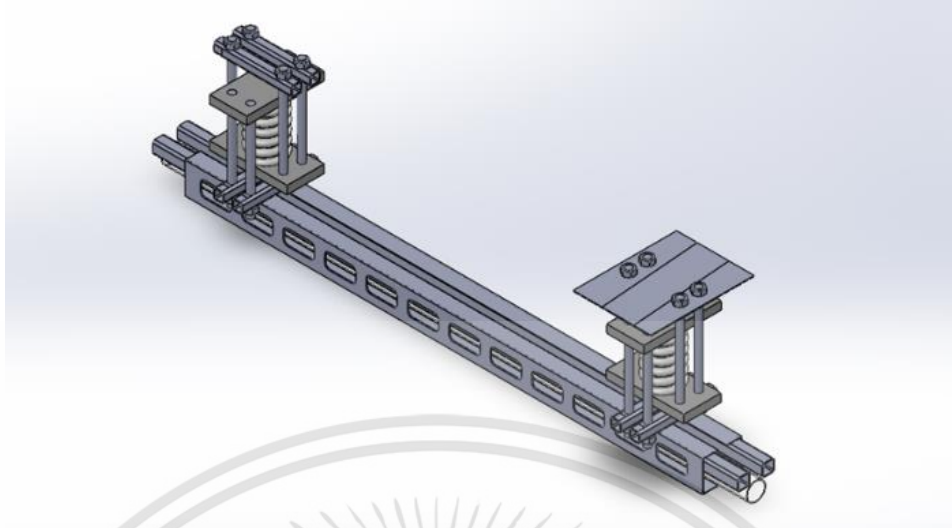
### 3.5.2 แนวทางที่ 2 การเพิ่ม Moment of Inertia ของโครงสร้างด้วยเหล็กทรงน้ำ

เนื่องจากโมเมนต์ความเฉื่อยของมวล (Mass Moments of Inertia) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการต้านทานการเกิดความเร่งของการเคลื่อนที่หมุน (Rotational Acceleration) ดังนั้นการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยของมวลจะสามารถช่วยต้านทานการสั่นในทิศทางที่ไม่ต้องการได้ และเลือกใช้เหล็กทรงน้ำเนื่องจากจากการวิเคราะห์หมีโครงสร้างที่ต้านทานการเคลื่อนที่หมุนได้และมีมวลที่เหมาะสมในการออกแบบและนำมาใช้



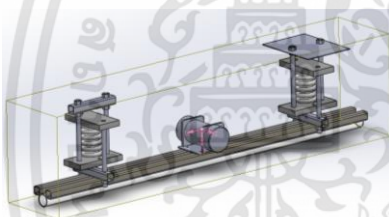
รูปที่ 3.31 โครงสร้างเหล็กทรงน้ำ 3D Model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 โครงสร้างโมเดลสามมิติหลังการปรับปรุงแนวทางที่ 2

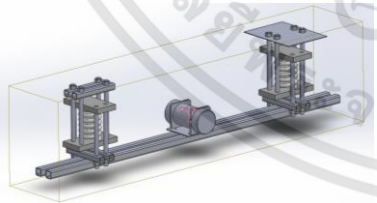
หลังจากที่สร้าง 3D Model ของเหล็กรางน้ำเรียบร้อยแล้วจึงนำมาต่อเข้ากับโครงสร้าง และหาค่า Mass Moments of Inertia ด้วยโปรแกรม SolidWorks ได้ดังรูปที่ 3.33, 3.34 และ 3.35



Moments of inertia: ( kilograms \* square centimeters )  
Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

Lxx = 2632.24	Lxy = 0.13	Lxz = 0.56
Lyx = 0.13	Lyy = 2535.60	Lyz = -14.80
Lzx = 0.56	Lzy = -14.80	Lzz = 153.36

รูปที่ 3.33 Mass Moments of Inertia 1

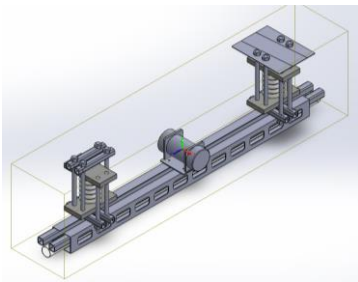


Moments of inertia: ( kilograms \* square centimeters )  
Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

Lxx = 2637.62	Lxy = 0.00	Lxz = 0.31
Lyx = 0.00	Lyy = 2556.85	Lyz = -5.45
Lzx = 0.31	Lzy = -5.45	Lzz = 141.86

รูปที่ 3.34 Mass Moments of Inertia 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Moments of inertia: ( kilograms \* square centimeters )  
 Taken at the center of mass and aligned with the output coordinate system.

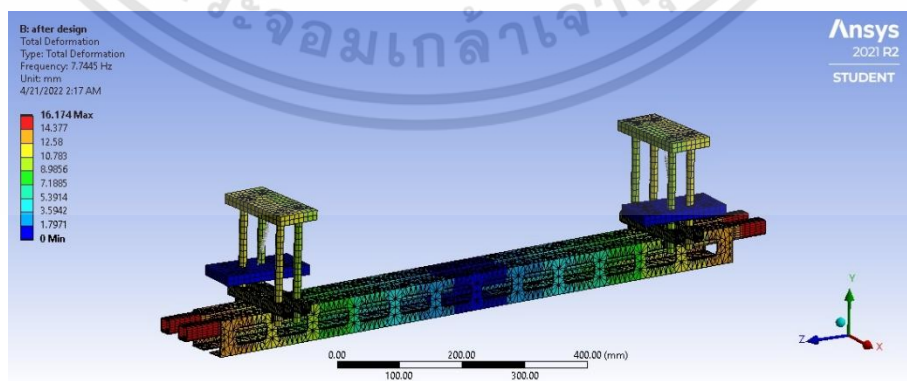
Lxx = 3308.56	Lxy = -0.01	Lxz = 0.46
Lyx = -0.01	Lyy = 3172.78	Lyz = -9.52
Lzx = 0.46	Lzy = -9.52	Lzz = 205.85

รูปที่ 3.35 Mass Moments of Inertia 3

จากนั้นใช้โปรแกรม ANSYS เพื่อดูค่าความถี่และรูปแบบการเสียรูป ( Deformation ) ของโครงสร้างในโหมดต่าง ๆ

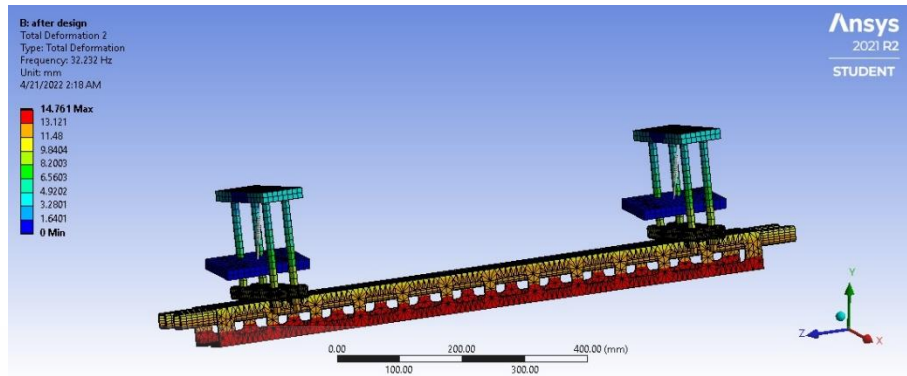
ตารางที่ 3.2 โหมดความถี่ในการสั่นและรูปแบบของการเสียรูปหลังจากติดเหล็กทรงน้ำ

โหมดการสั่น	ความถี่ (Hz)	รูปแบบการเสียรูป
1	7.7445	เสียรูปในแนวแกน X ที่ปลายคานทั้งสอง
2	32.232	การเสียรูปแบบ Rotation ตามแนวแกน Z จาก Unbalanced Force
3	35.081	เคลื่อนที่แบบ Translation ในทิศ Y เท่านั้น และมีการเสียรูปแบบเท่าเทียมทั้งโครงสร้าง
4	37.393	การกระดกเสียรูปแบบ Rigid เนื่องจากสปริงยุบตัว
5	107.97	การเสียรูปแบบ Torsion
6	127.89	เกิดพฤติกรรมการโก่งเดาะรูปแบบการโก่งเดาะแบบลูกคลื่น



รูปที่ 3.36 โหมดการสั่นที่ 1

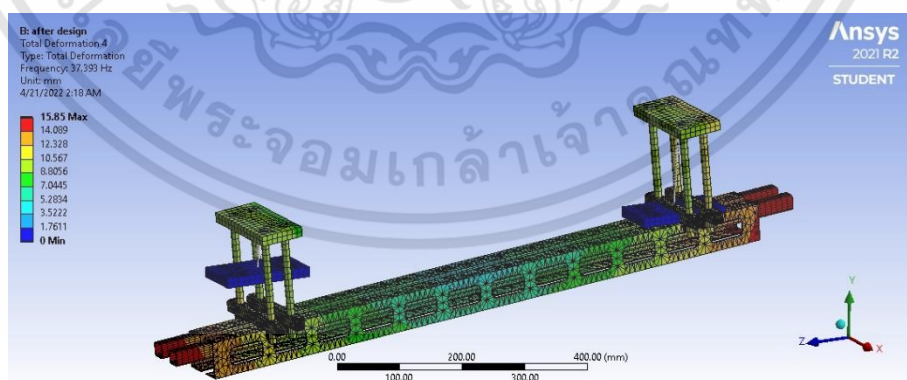
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.37 โหมดการสั่นที่ 2

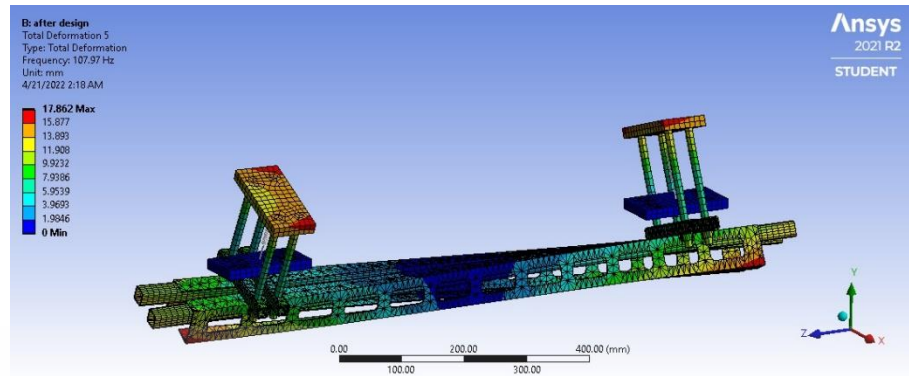


รูปที่ 3.38 โหมดการสั่นที่ 3



รูปที่ 3.39 โหมดการสั่นที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.40 โหมดการสั่นที่ 5



รูปที่ 3.41 โหมดการสั่นที่ 6

จาก Specification ของมอเตอร์ที่เลือกใช้ระบุความเร็วรอบเท่ากับ 3000 รอบต่อนาที แต่ค่าที่วัดได้จริงเท่ากับ 2005 รอบต่อนาที นั่นคือมอเตอร์มีความถี่เท่ากับ 33.42 Hz

ซึ่งในที่นี้โหมดของการสั่นที่ต้องการให้เกิดคือโหมดที่ 3 ซึ่งมีการเสียรูปเท่ากันทั้งโครงสร้าง และไม่มีการสะสมความเครียดในตัวคาน โดยความถี่เท่ากับ 35.081 Hz และโหมดของการสั่นที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นคือโหมดการสั่นที่ 6 เนื่องจากคานมีการสะสมความเครียด โดยมีความถี่เท่ากับ 127.89 Hz

ดังนั้น การออกแบบนี้ส่งผลให้โครงสร้างมีประสิทธิภาพการล้าเลียงที่ดีขึ้น เนื่องจากฮาร์โมนิกของ Excited Force นั่นคือมอเตอร์ ใกล้เคียงความถี่ของโหมดการสั่นที่ต้องการให้เกิด และไม่ตรงกับความถี่ของโหมดการสั่นที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น

### 3.6 แนวทางการเสริมสมรรถภาพการลำเลียงเชื้อเพลิง

เนื่องจากยังมีอนุภาคตกค้างอยู่เล็กน้อยจากการลำเลียงในโครงสร้างเดิม จึงได้ออกแบบเพิ่มความลาดเอียงเข้าไปในการปรับปรุงโครงสร้างคานใหม่ เพื่อจะลดการตกค้างของอนุภาคเชื้อเพลิงที่ยังคงค้างอยู่ในท่อ ดังนี้

$$\text{จากสมการ} \quad \sum F_x = ma \quad (3-1)$$

$$mg \sin \theta = ma \quad (3-2)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad a \propto \sin \theta \quad (3-3)$$

และจากข้อมูลของ International Plumbing Code (IPC)

ตารางที่ 3.3 ตาราง International Plumbing Code (IPC)

PIPE DIAMETER	MINIMUM SLOPE	MINIMUM SLOPE %
2 1/2" or smaller	1/4" per foot	2.08%
3" to 6"	1/8" per foot	1.04%
8" or larger	1/16" per foot	0.52%

จากตารางที่ 3.1 ขนาดท่อของอุปกรณ์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว และจากตารางที่ 3.3 ความลาดเอียงต่ำสุดที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน IPC เท่ากับ 2.08 เปอร์เซ็นต์ และท่ออุปกรณ์มีขนาดความยาวที่ 100 เซนติเมตร ดังนั้นจึงออกแบบให้การติดตั้งต่อมีระยะต่ำจากจุดเดิม 3.65 เซนติเมตร โดยเทียบจากอัตราส่วนตรีโกณมิติ เพื่อให้มีความลาดเอียงต่ำสุดที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน IPC

สรุปได้ว่าการหาความลาดเอียงที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการลำเลียงเชื้อเพลิงนอกเหนือจากการสั้นของอุปกรณ์ คือ การเพิ่มความลาดเอียงของแนวท่อที่ระยะ 3.65 เซนติเมตร จากระยะอ้างอิงส่วนหัวของท่อลำเลียงในการติดตั้ง

### 3.7 ปัญหาที่พบและวิธีการแก้ไข

#### 3.7.1 การออกแบบบังคับทิศทางการสั่นของมอเตอร์

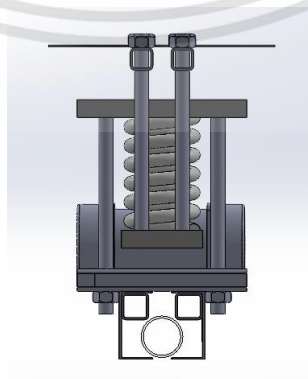
เนื่องจากการใส่แท่งเหล็กเพื่อยึดบังคับทิศทางการสั่นของมอเตอร์ ดังรูปที่ 3.42 ทำให้ลดประสิทธิภาพการสั่นของมอเตอร์มากเกินไป เนื่องจากการสูญเสียพลังงานตำแหน่งอื่นนอกเหนือจากจุดลำเลียง ทำให้เชื้อเพลิงภายในท่อไหลประสิทธิภาพด้อยลง



รูปที่ 3.42 การออกแบบบังคับทิศทางการสั่นของมอเตอร์

#### 3.7.2 การติดตั้งท่อใส่เข้ากับโครงสร้าง

เนื่องจากต้องคำนึงถึงความสะดวกในการติดตั้งและถอดการติดตั้งท่อใส่ในกรณีที่ต้องการซ่อมแซมหรือแก้ไขโครงสร้าง รวมถึงการสังเกตการณ์เคลื่อนที่ของเชื้อเพลิง ในที่นี้การใช้เหล็กทรงน้ำขนาดที่ได้ทำการออกแบบมาจะมีปัญหาที่ไม่สามารถสอดท่อใส่เข้าทางด้านใต้ได้ จึงได้เปลี่ยนมาใช้แผ่นเหล็กแทน

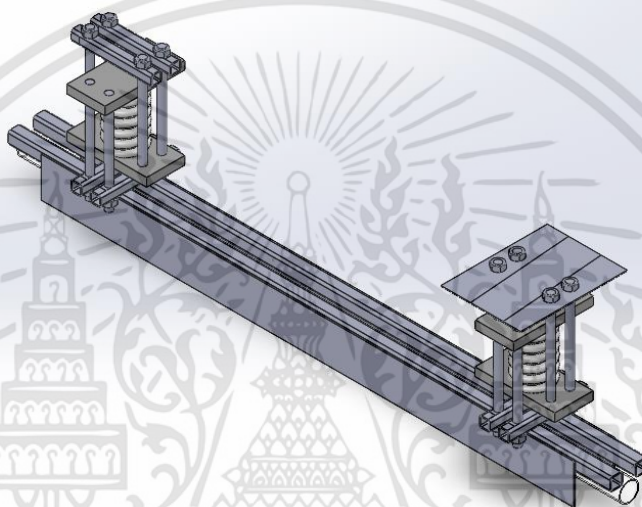


รูปที่ 3.43 ติดตั้งท่อใส่เข้ากับโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8 สรุปแนวทางการปรับปรุง

จากการ Simulate พบว่าแนวทางการปรับปรุงในหัวข้อที่ 3.4.2 การปรับปรุงโครงสร้างบริเวณตัวต้านทานการสั่นสะเทือน, หัวข้อ 3.5.2 การเพิ่ม Moment of Inertia ของโครงสร้างด้วยเหล็กกรางน้ำ และหัวข้อ 3.6 แนวทางการเสริมสมรรถภาพการลำเลียงเชื้อเพลิงโดยเพิ่มความลาดเอียง เป็นแนวทางที่สามารถเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างและประสิทธิภาพการลำเลียงเชื้อเพลิงได้ และจากปัญหาที่พบจึงทำการเปลี่ยนเหล็กกรางน้ำเป็นเหล็กแผ่นดังรูปที่ 3.44



รูปที่ 3.44 สรุปโครงสร้างโมเดลสามมิติหลังการปรับปรุง

โดยหลังจากทำการ Simulate ด้วยโปรแกรม ANSYS อีกครั้ง เพื่อให้ทราบถึงความถี่ในโหมดการสั่นต่าง ๆ พบว่าเหล็กแผ่นสามารถทดแทนเหล็กกรางน้ำได้เป็นอย่างดี ภายใต้ข้อจำกัดเดียวกัน แสดงผลดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 โหมดความถี่ในการสั่นและรูปแบบของการสั่นก่อนและหลังแก้ไข

โหมดการสั่น	ความถี่ (Hz)	
	ก่อนแก้ไข (เหล็กกรางน้ำ)	หลังแก้ไข (แผ่นเหล็ก)
1	7.7445	7.0177
2	32.232	26.616
3	35.081	35.522
4	37.393	35.509
5	107.97	95.947
6	127.89	121.08

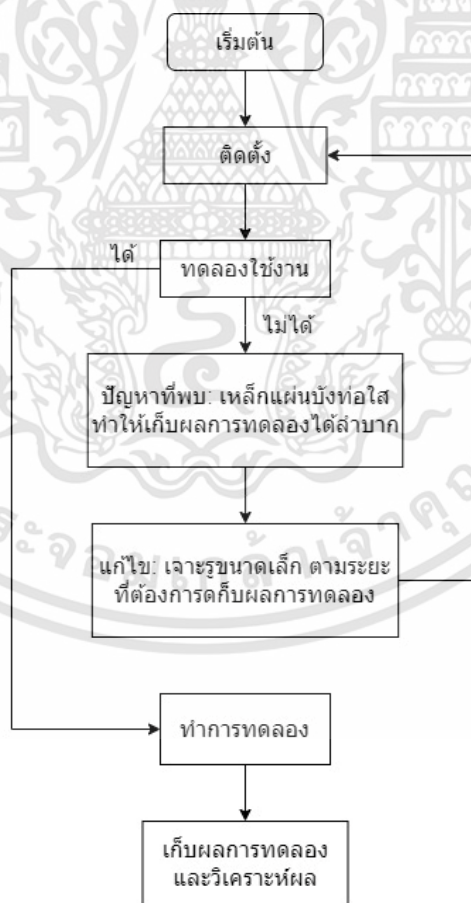
เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิชาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามาใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การติดตั้งและการแก้ปัญหาการติดตั้งเพื่อทำการทดลอง

จากการออกแบบและติดตั้งชุดลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั้นเชิงโครงสร้าง ขั้นตอนต่อไปคือการทดสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ โดยกำหนดเงื่อนไขในการทดลองหาประสิทธิภาพการลำเลียงของชุดอุปกรณ์ใหม่ และตรวจวัดทิศทางการเคลื่อนที่ของชุดอุปกรณ์ด้วยเซนเซอร์ หากมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นก็เข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ปัญหาที่พบและหาวิธีการแก้ไขปัญหาเพื่อทำการทดลองต่อไป หรือหากไม่พบข้อผิดพลาดก็สามารถนำไปทำการทดลองลำเลียงเชื้อเพลิงและทดลองการหาประสิทธิภาพจากที่กล่าวข้างต้นได้ โดยการหาประสิทธิภาพการลำเลียงหากการขนถ่ายเชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเกณฑ์ของรูปแบบเดิม จะต้องกลับเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ปัญหาที่เกี่ยวข้องและดำเนินการแก้ไขปัญหาเพื่อทำการทดลองต่อไปได้

#### 4.1 กระบวนการติดตั้ง



รูปที่ 4.1 แผนผังขั้นตอนการติดตั้งและการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

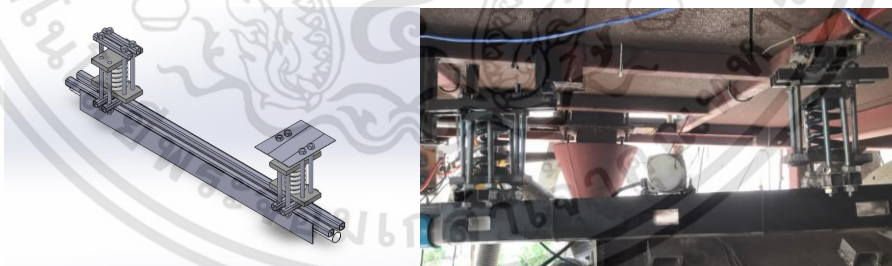
#### 4.1.1 การติดตั้งสปริงเข้ากับโครงสร้างคานและยึดติดอุปกรณ์ทั้งหมด



รูปที่ 4.2 โครงสร้างชุดสปริงของอุปกรณ์



รูปที่ 4.3 โครงสร้างคานของอุปกรณ์สำหรับยึดติดท่อลำเลียงและติดตั้งมอเตอร์



รูปที่ 4.4 โครงสร้างของอุปกรณ์ชุดลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั่นเชิงโครงสร้าง

จากรูปที่ 4.4 คือขั้นตอนการนำทุกองค์ประกอบมายึดเข้าด้วยกันเพื่อเป็นชุดอุปกรณ์ลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั่นเชิงโครงสร้างและติดตั้งเชื่อมติดเข้ากับโครงสร้างคานด้านบน เพื่อดำเนินการทดสอบการสั่นของโครงสร้างโดยการตรวจวัดระยะการเคลื่อนที่โดยเซนเซอร์หลังติดตั้งเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผล และดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพการลำเลียงเชื้อเพลิงของอุปกรณ์ในขั้นตอนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ปัญหาที่พบขณะติดตั้ง และการแก้ไขปัญหา

1. จากการติดตั้งพบปัญหาแผ่นเหล็กด้านข้างบดบังวิสัยการมองเห็นเชื้อเพลิงในท่อ ดังรูปที่ 4.5 ดังนั้น จึงต้องมีการตัดแบ่งช่วงเป็น 3 ช่อง ในรูปที่ 4.6 เพื่อดูรูปแบบการขนส่งมวลเชื้อเพลิงภายในท่อได้

2. ปัญหาการเชื่อมติดฐานกับคานหลักด้านบนมีความเอียงส่งผลให้ระดับฐานยึดของสปริงมีระดับการเอียงไปเล็กน้อย จึงต้องมีการยึดน็อตทุกตัวให้มีระดับที่ใกล้เคียงกับระนาบที่ต้องการโดยการใช้ไม้บรรทัดระดับน้ำสังเกตขณะเชื่อมติดตั้งอุปกรณ์



รูปที่ 4.5 แผ่นเหล็กด้านข้าง



รูปที่ 4.6 แผ่นเหล็กด้านข้างตัดแบ่งช่อง

## ผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัญหา

### 5.1 การทดลองหาประสิทธิภาพการลำเลียง

ในการทดลองหาประสิทธิภาพการลำเลียงของถาดสั้นสะท้อนนี้ มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถาดสั้นสะท้อนในการลำเลียงเชื้อเพลิงแข็งระหว่างโครงสร้างก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง ดังนั้น การกำหนดเงื่อนไขและวิธีการทดลองจึงดำเนินการตาม โครงงานก่อนหน้า การปรับปรุงชุดขนส่งลำเลียงสารชีวมวลด้วยเครื่องสั้นและการพัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์การสั้น เพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองได้

ซึ่งมีเงื่อนไขการทดลองดังนี้

ตัวแปรต้น : ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ (Hz)

ตัวแปรตาม : น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่ถูกป้อนสู่ภาชนะบรรจุ (kg)

ตัวแปรควบคุม : อัตราการไหลของเชื้อเพลิง (kg/s)

โดยการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของเชื้อเพลิงจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งจะมีการสะสมพลังงานกล ซึ่งเป็นพลังงานในรูปแบบพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) และสามารถหาประสิทธิภาพทางกลหรือ Efficiency ( $\eta$ ) ได้ดังนี้

(5-1)

จะสังเกตได้ว่ากำลังงานที่ได้จากระบบ (Output Power) และกำลังงานที่ใช้ในระบบ (Input Power) นั้นมีเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นกำลังงานที่ถูกพิจารณาในที่นี้ นั่นคือกำลังงานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของเชื้อเพลิง ซึ่งคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\text{Input Power: } P_{input} = I \times V \quad (5-2)$$

$$\text{Output Power: } \dot{E}_{output} = \dot{E}_{spring} + \dot{E}_{k,system} + \dot{E}_{k,powder-fuel} \quad (5-3)$$

เมื่อ P คือ กำลังงานที่มอเตอร์ใช้งาน หน่วยวัตต์ (W)

I คือ กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ หน่วยแอมป์ (A)

V คือ แรงดันไฟฟ้า หน่วยโวลต์ (V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\dot{E}_{output}$  คือ กำลังงานที่ได้จากระบบ หน่วยวัตต์ (W)

$\dot{E}_{k, powder-fuel}$  คือ กำลังงานเฉลี่ยที่ได้จากการเคลื่อนที่ของก้อนเชื้อเพลิง หน่วยวัตต์ (W)

โดย  $\dot{E}_{k, powder-fuel}$  สามารถคำนวณได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$\dot{E}_{k, powder-fuel} = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 \quad (5-4)$$

เนื่องจากประโยชน์ที่ได้รับจากระบบ ซึ่งเป็น Output Power ของระบบคือการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของเชื้อเพลิงแข็ง ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะกำลังงานที่ได้จากการเคลื่อนที่ ของเชื้อเพลิงแข็ง นั่นคือ  $\dot{E}_{k, powder-fuel}$  ซึ่งคำนวณได้จากสูตร 5.4 โดยจะสามารถหาความเร็วเฉลี่ยของเชื้อเพลิงแข็งในระหว่างลำเลียงด้วยถาดสั่นสะเทือนได้จากการทดลองต่อไปนี้

#### วิธีการทดลอง

1. ตั้งค่าระยะที่ต้องการวัดภายในท่อลำเลียงโดยกำหนดความยาว 90 เซนติเมตร และแบ่งออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน
2. นำก้อนกลมสำหรับการทดลองใส่ในท่อลำเลียงเพื่อดูตำแหน่งการเคลื่อนที่ภายในท่อ
3. ปลดปล่อยเชื้อเพลิงจาก Screw feed โดยกำหนดอัตราการไหลจากการทำงานในระบบผ่านเครือข่าย IoT โดยร่วมกับกลุ่ม การพัฒนาระบบประมวลผลข้อมูลด้านพลังงานของระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลบดละเอียดผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ที่อัตราการไหล 0.5 kg/s
4. ทำการบันทึกวิถีไอการเคลื่อนที่ของก้อนกลมในท่อเมื่อเคลื่อนที่ผ่านช่องระยะที่กำหนดที่ตำแหน่งเข้าช่อง - ออกช่อง พร้อมจับเวลา บันทึกผล
5. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ตามขั้นตอนในข้อที่ 2 - 4 ที่อัตราการไหลเดิมที่ 0.5 kg/s

เนื่องจากโครงการก่อนหน้าเรื่อง การปรับปรุงชุดขนส่งลำเลียงสารชีวมวลด้วยเครื่องสั่นและการพัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์การสั่น ได้มีการหาประสิทธิภาพในการลำเลียงเชื้อเพลิงที่อัตราการไหล 0.5 kg/s, 1.0 kg/s และ 1.5 kg/s ทำให้ทราบว่า การเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง โดยปลดปล่อยจาก Screw feed ส่งผลให้ประสิทธิภาพการลำเลียงเชื้อเพลิงของถาดสั่นสะเทือนสูงขึ้น

ดังนั้น ในการทดลองนี้จึงสนใจในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลำเลียงที่อัตราการไหลต่ำที่สุด นั่นคือ ที่อัตราการไหล 0.5 kg/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองเพื่อหาความเร็วเฉลี่ยของเชื้อเพลิงด้วยอัตราการไหล 0.5 kg/s

ช่วง	เวลาที่เชื้อเพลิงแข็งใช้ในการเคลื่อนที่ (s)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	1.48	1.37	1.50
2	1.82	1.63	1.41
3	1.78	1.70	1.81

จากนั้น หาความเร็วของเชื้อเพลิงได้จากสมการต่อไปนี้

$$v_i = \frac{\sum_{i=1}^3 (0.3 \times t_i)}{3} \quad (5-5)$$

เนื่องจากประโยชน์ที่ได้รับจากระบบ ซึ่งเป็น Output Power ของระบบคือการเคลื่อนที่ไป

เมื่อ  $v$  คือ ความเร็วเฉลี่ยของเชื้อเพลิง หน่วยเมตรต่อวินาที (m/s)

$t_i$  คือ เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในแต่ละช่วง หน่วยวินาที (s) โดยที่ค่า  $i = 1, 2, 3$

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าความเร็วเฉลี่ยของเชื้อเพลิงและกำลังงานเฉลี่ยที่ได้จากการเคลื่อนที่ของก้อนเชื้อเพลิง ที่อัตราการไหล 0.5 kg/s ที่ได้จากการคำนวณ

ครั้งที่	$v$ (m/s)	$\dot{E}_{k, powder-fuel}$ (W)
1	0.508	0.065
2	0.47	0.055
3	0.472	0.056
เฉลี่ย	0.483	0.059

ทั้งนี้กำลังงานที่ใช้ในระบบหรือกำลังที่ให้กับระบบ (Input Power) ซึ่งในที่นี้คือ มอเตอร์สั่นสะเทือน (Motor Vibrator) ยี่ห้อ OLI รุ่น MVE-21/3E ซึ่งมีกำลังงานที่ใช้ในรูปแบบ Rated Power Max = 0.044 kW (อ้างอิงจาก Catalogue Industrial Vibrators ของ OLI) หรือกำลังงานที่ใช้ในระบบมีค่าเท่ากับ 44 W

นั่นคือ ประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองที่อัตราการไหลเชิงมวลต่าง ๆ จะมีค่าดังต่อไปนี้

$$efficiency = \frac{\dot{E}_{k, powder-fuel}}{44} \quad (5-6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสามารถคำนวณประสิทธิภาพของภาคสั้นสะท้อนในการลำเลียงเชื้อเพลิงแข็ง ดังนี้

$$\text{ที่ } \dot{m} = 0.5 \text{ kg/s} \quad \text{มีประสิทธิภาพ } efficiency = \frac{0.059}{44} \times 100\% = 0.134\%$$

เนื่องจากประสิทธิภาพทางกลส่วนใหญ่มีค่าไม่เกิน 50% ซึ่งประสิทธิภาพที่คำนวณได้ในที่นี้ มีค่าน้อยมากเป็นผลมาจากกำลังงานที่พิจารณาในการคำนวณเป็นกำลังงานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงแข็งชนิดผงโดยไม่มีลมจาก primary air มาเกี่ยวข้อง

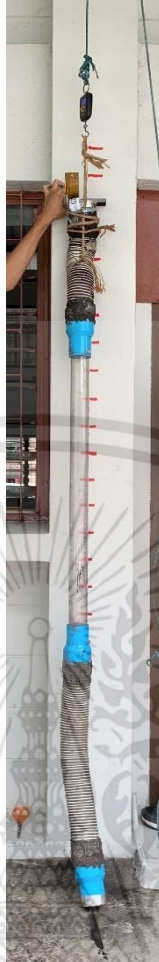
โดยในโครงการก่อนหน้าที่อัตราการไหล 0.5 kg/s ประสิทธิภาพของภาคสั้นสะท้อนในการลำเลียงเชื้อเพลิงแข็งชนิดผงเท่ากับ 0.0165% และหลังจากการปรับปรุงโครงสร้าง ประสิทธิภาพของภาคสั้นสะท้อนในการลำเลียงเชื้อเพลิงแข็งชนิดผงเท่ากับ 0.134% นั่นคือประสิทธิภาพในการลำเลียงเพิ่มขึ้นเป็น 8.1 เท่า

## 5.2 การทดลองเพื่อหางานจากการเคลื่อนที่ของกองเชื้อเพลิง

เป็นการทดลองหางานของมวลเชื้อเพลิงในท่อที่เคลื่อนเอาชนะแรงเสียดทานของผิวท่อ โดยใช้แรงโน้มถ่วงของโลกเป็นตัวแปร เพื่อศึกษาพลังงานของมวลเชื้อเพลิงที่วิ่งผ่านในท่อและบันทึกผลนำมาวิเคราะห์รูปแบบพลังงานที่ใช้และออกแบบอุปกรณ์เสริมให้สอดคล้องกัน

วิธีการทดลอง

1. นำท่อใสจากโครงสร้างมายกเพิ่มระดับความสูงที่ละ 10 เซนติเมตร แล้วใช้ Digital Force Gauge ในการวัดแรงที่ใช้ในการยกท่อเปล่าที่ระดับความสูงนั้น ๆ
2. ทำซ้ำตามข้อที่ 1 ทั้งหมด 3 ครั้ง ตั้งแต่ความสูงระดับ 10 เซนติเมตรถึง 220 เซนติเมตร
3. ใส่มวลเชื้อเพลิงจำนวนประมาณ 1 ใน 4 ของพื้นที่หน้าตัดท่อ เพื่อจำลองการไหลของก้อนเชื้อเพลิงจริง แล้วทำการทดลองตามข้อที่ 1-2

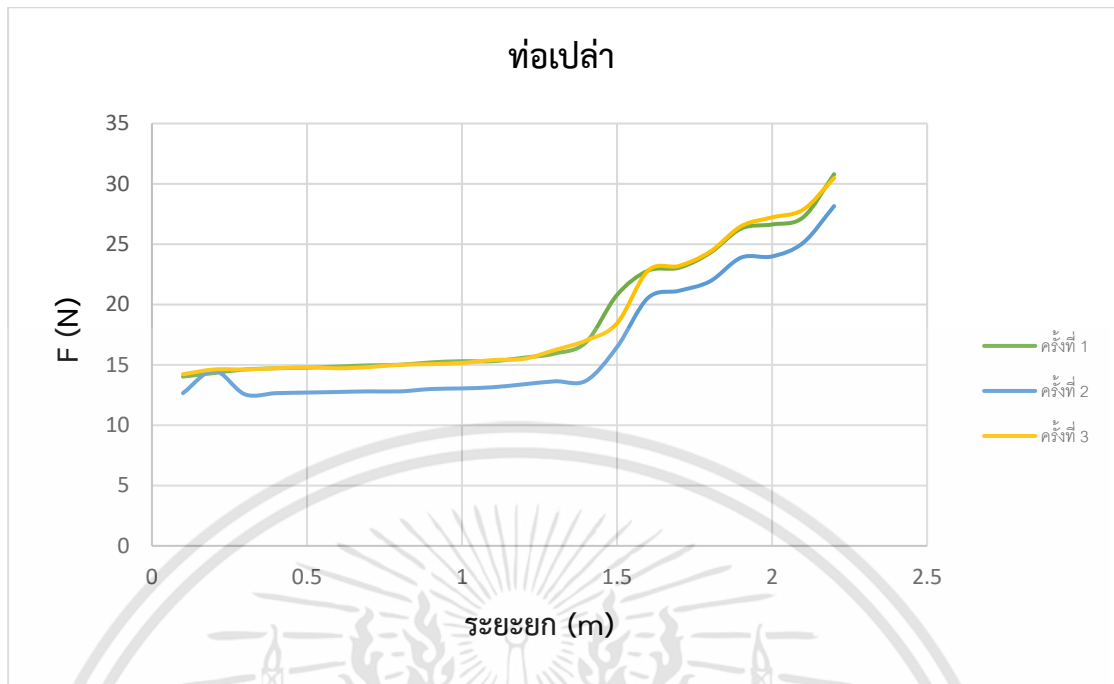


รูปที่ 5.1 การทดลองเพื่อหางานจากการเคลื่อนที่ของก้อนเชื้อเพลิง

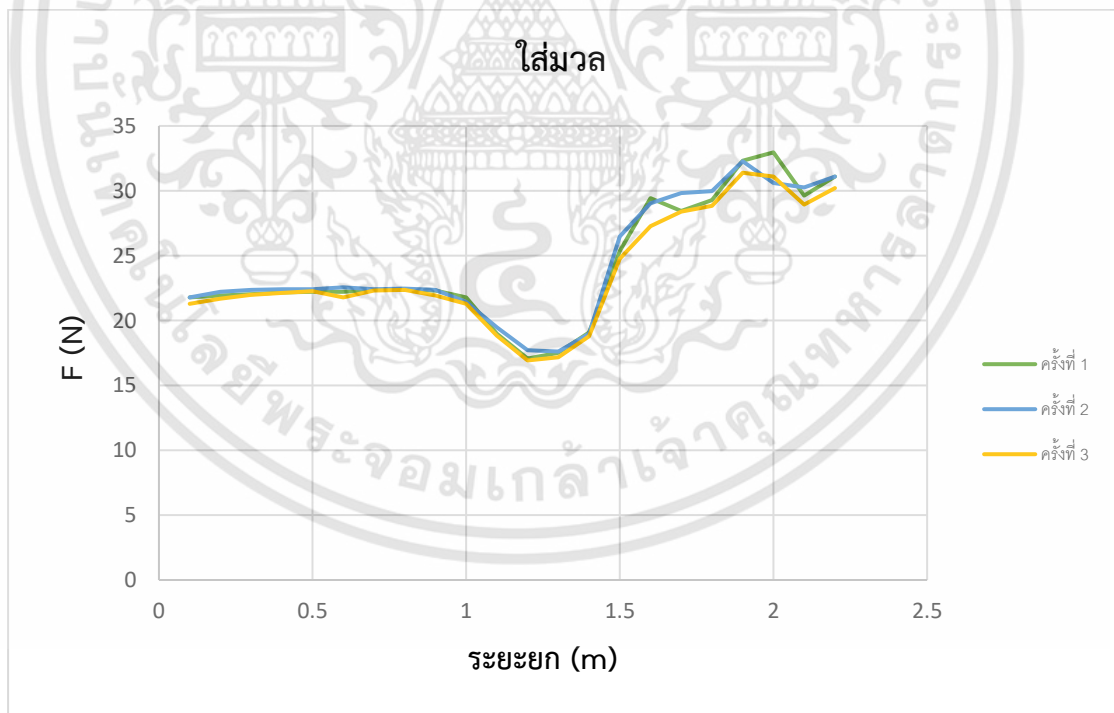


รูปที่ 5.2 การทดลองเพื่อหางานจากการเคลื่อนที่ของก้อนเชื้อเพลิง 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยกของท่อเปล่า



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยกเมื่อใส่มวลเชื้อเพลิง

จาก

$$W = \int F \cdot dh \quad (5-7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 แสดงงานที่ใช้ระหว่างท่อเปล่ากับท่อใส่มวลเชื้อเพลิง

	ท่อเปล่า	ใส่มวลเชื้อเพลิง
W (J)	37.519653	50.37108

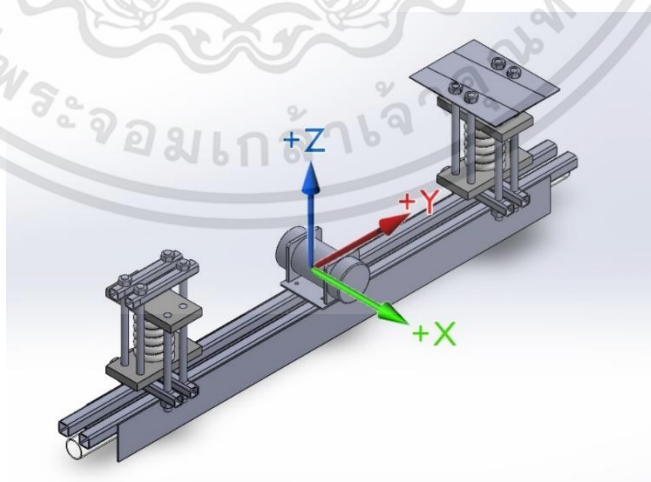
นั่นคือ งานที่มวลเชื้อเพลิงใช้ในการเอาชนะ friction ภายในท่อเพื่อเคลื่อนที่ผ่านท่อเท่ากับ 12.851 J โดยมวลเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 0.786 kg จะได้  $\dot{W} = 16.35 \text{ J/kg}$  และอัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิงจริงเท่ากับ 0.5 kg/s ดังนั้น พลังงานที่เชื้อเพลิงใช้ในการไหลผ่านท่อเท่ากับ 8.175 W

### 5.3 การตรวจวัดทิศทางการเคลื่อนที่ของชุดอุปกรณ์ด้วยเซนเซอร์

#### 5.3.1 เปรียบเทียบระยะเวลาการเคลื่อนที่

จากการวิเคราะห์ในการออกแบบพบว่าต้องการให้มีการเคลื่อนที่เพียงแค่ 2 แกน คือในแนวแกน Z และในแนวแกน Y เพื่อให้การสั่นของท่อลำเลียงเชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและหลีกเลี่ยงการสั่นในแนวแกน X เนื่องจากส่งผลให้โครงสร้างของอุปกรณ์และคานด้านบนเสียหายได้ และลดการสูญเสียพลังงานในทิศการเคลื่อนที่อื่นที่ไม่จำเป็นสำหรับการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิง

ดังนั้น จะได้กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาการเคลื่อนที่ของทั้ง 3 แกน ณ จุดจุดศูนย์กลางของคาน กำหนดให้ทิศทางของแกนดังรูปที่ 5.5

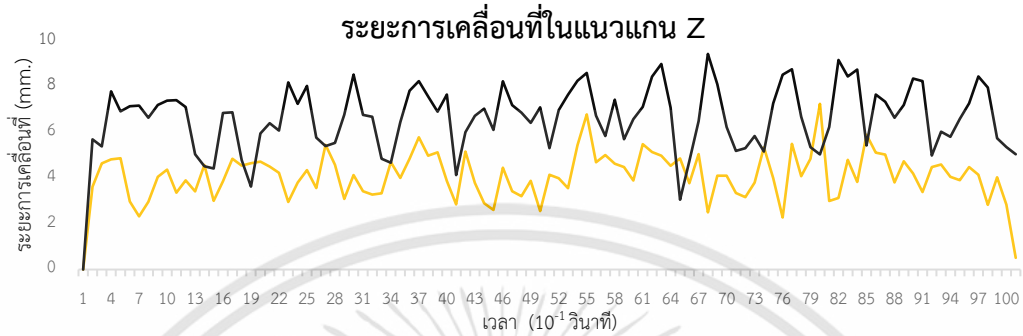


รูปที่ 5.5 ทิศในแนวแกนอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดให้ **เส้นสีดำ** คือ ชุดอุปกรณ์ลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั้นเชิงโครงสร้างออกแบบใหม่

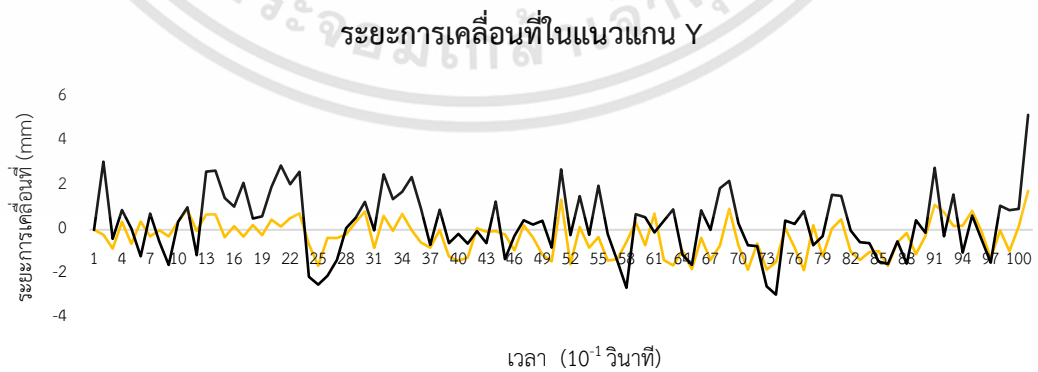
**เส้นสีเหลือง** คือ ชุดอุปกรณ์ลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั้นเชิงโครงสร้างเดิม



รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบระยะเวลาเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ในแนวแกน Z



รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบระยะเวลาเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ในแนวแกน X



รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบระยะเวลาเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ในแนวแกน Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.6, 5.7 และ 5.8 สรุปได้ว่าในแนວแกน Z และ Y ค่าระยะการเคลื่อนที่ในชุดอุปกรณ์ลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั้นเชิงโครงสร้างออกแบบใหม่มีค่าการเคลื่อนที่ที่มากกว่าแบบเดิม แสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ตามเงื่อนไขที่ออกแบบไว้ และในแนວแกน X กำหนดเงื่อนไขในการออกแบบให้มีการเคลื่อนที่น้อยที่สุดจนถึงศูนย์เพื่อลดการสูญเสียพลังงานโดยไม่จำเป็นสำหรับประสิทธิภาพการลำเลียงเชื้อเพลิงและลดความเสียหายของโครงสร้างอุปกรณ์ ดังนั้นชุดอุปกรณ์ที่ออกแบบใหม่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากกว่า แสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ตามเงื่อนไขที่ออกแบบไว้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผล การปรับปรุง และข้อเสนอแนะ

การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั้นเชิงโครงสร้าง มีจุดมุ่งหมายในการพัฒนาระบบลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงบดละเอียด จากถังบรรจุเชื้อเพลิงผ่านสกรูลำเลียงจนถึงห้องเผาไหม้ เพื่อช่วยแก้ไขปัญหาการกองของเชื้อเพลิงที่อาศัยเพียงเครื่องบีบลมเป่าให้เคลื่อนที่ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในห้องเผาไหม้ไม่มีประสิทธิภาพตามเกณฑ์ที่ออกแบบกำหนดไว้ และอุปกรณ์ลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั้นเชิงโครงสร้างได้มีการใช้จุดกำเนิดสันสะท้อนร่วมกับระบบลม

### 6.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองติดตั้งเซนเซอร์เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั้นเชิงโครงสร้าง พบว่าโครงสร้างรูปแบบเดิมมีการเคลื่อนที่ในทิศทางที่สูญเสียพลังงานโดยไม่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพการลำเลียง โดยมีการเคลื่อนที่ในแนวแกน X ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ไม่ต้องการในการออกแบบเพิ่มความแข็งแรงรวมถึงความถี่ของการสั่นเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างทั้งหมดส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้าง โดยโครงสร้างการติดตั้งสปริงก่อนการปรับปรุงมีความเค้น Von Mises Stress สูงสุดเท่ากับ 558.9 MPa ที่บริเวณรอยเชื่อมระหว่างสปริงและฐานสปริงซึ่งมีค่ามากกว่า Yield Strength ของวัสดุ โดยพิจารณาได้ว่าอาจเกิดความเสียหายของวัสดุได้

โดยผลของการ Simulate ด้วยโปรแกรม ANSYS พบว่าการปรับปรุงโครงสร้างโดยการเพิ่ม Moment of Inertia ของโครงสร้างด้วยเหล็กแผ่นและการเพิ่มสลักเกลียวทางด้าน Inlet และ Outlet ในโครงสร้างสปริง ส่งผลให้โครงสร้างมีความถี่ธรรมชาติห่างจากความถี่แหล่งกำเนิดมากยิ่งขึ้นและลดการเคลื่อนที่ในแนวแกน X ซึ่งเป็นแนวการเคลื่อนที่ที่สูญเสียพลังงานในโครงสร้าง และเพิ่มประสิทธิภาพการลำเลียงเชื้อเพลิงอ้างอิงความลาดเอียงตามมาตรฐาน IPC จากนั้นทำการ Simulate ด้วยโปรแกรม ANSYS อีกครั้ง เพื่อให้ทราบถึงความถี่ในโหมดการสั่นต่าง ๆ พบว่าเหล็กแผ่นสามารถทดแทนโครงสร้างเดิมหรือโครงสร้างที่ออกแบบด้วยเหล็กทรงน้ำได้เป็นอย่างดี ภายใต้ข้อจำกัดเดียวกัน

จากการทดลองหาประสิทธิภาพการลำเลียงของถาดสั้นสะเทือนนี้ นำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของอุปกรณ์ลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั้นเชิงโครงสร้างระหว่างโครงสร้างก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง โดยเงื่อนไขในโครงการก่อนหน้านี้กำหนดอัตราการไหล 0.5 kg/s ประสิทธิภาพของถาดสั้นสะเทือนในการลำเลียงเชื้อเพลิงแข็งชนิดผงเท่ากับ 0.0165% และหลังจากการปรับปรุงออกแบบโครงสร้างใหม่ พบว่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์ลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั้นเชิงโครงสร้างในการลำเลียงเชื้อเพลิงแข็งชนิดผงเท่ากับ 0.134% นั่นคือประสิทธิภาพในการลำเลียงเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 8.1 เท่าจากโครงสร้างเดิม

## 6.2 พัฒนาการการปรับปรุงโครงสร้าง

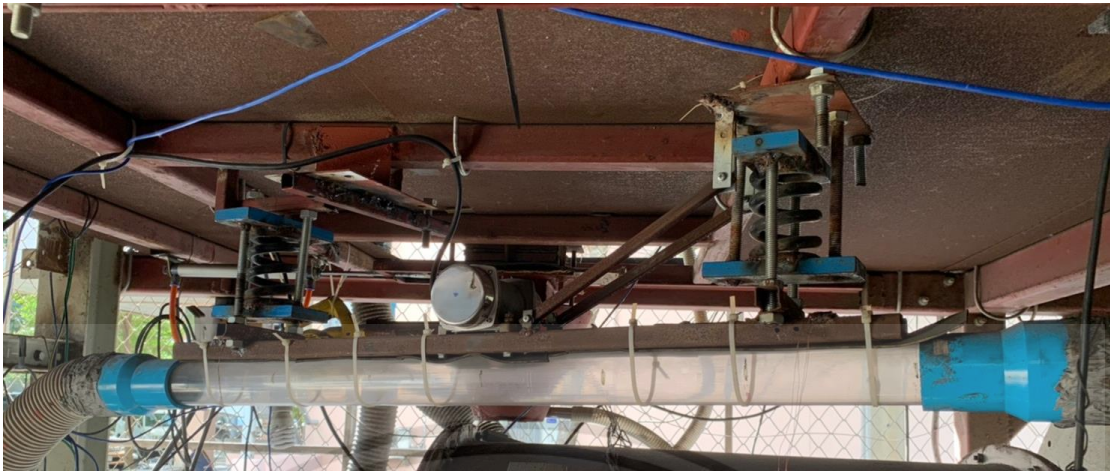
โครงการพัฒนาและประเมินสมรรถนะสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงเพื่อการใช้งานในระยะยาวสำหรับภาคอุตสาหกรรม ได้มีการศึกษาเพื่อพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพของถาดสั้นในการลำเลียงเชื้อเพลิงแข็งชนิดผงในปี 2563 ภายใต้โครงการ การปรับปรุงชุดขนส่งลำเลียงสารชีวมวลด้วยเครื่องสั่นและการพัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์การสั่น ซึ่งก่อนการปรับปรุงในโครงการก่อนหน้านี้ โครงสร้างของชุดลำเลียงมีความแข็งแรงต่ำและการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงแข็งมีความไม่เป็นระเบียบ โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ชุดขนส่งลำเลียงสารชีวมวลด้วยเครื่องสั่น รุ่นที่ 1

หลังการปรับปรุงโครงการปรับปรุงชุดขนส่งลำเลียงสารชีวมวลด้วยเครื่องสั่นในโครงการก่อนหน้านี้ ได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างของเหล็กกล่องที่รองรับการสั่นสะเทือน และเปลี่ยนสปริงให้เหมาะสมกับความต้องการ พบว่าสามารถพัฒนาประสิทธิภาพการลำเลียงและแก้ปัญหาค้างของอนุภาคในท่อลำเลียงให้คงเหลือน้อยที่สุด ทั้งนี้ยังคงพบปัญหาความแข็งแรงของโครงสร้างและการสูญเสียพลังงานไปกับการสั่นของโครงสร้างมากเกินไป โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 6.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 ชุดขนส่งลำเลียงสารชีวมวลด้วยเครื่องสั่น รุ่นที่ 2

ในส่วนของโครงการ การพัฒนาเครื่องลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั่นเชิงโครงสร้าง สามารถแก้ปัญหาความบกพร่องด้านโครงสร้างความแข็งแรงที่เกิดจากช่วงความถี่การสั่นและการสั่นในทิศทางที่ส่งผลต่อโครงสร้าง โดยการออกแบบเพิ่ม Moment of Inertia ของโครงสร้างด้วยเหล็กแผ่นและการเพิ่มสลักเกลียวเพื่อบังคับทิศทางเคลื่อนที่ และสามารถเก็บผลการเคลื่อนที่มาวิเคราะห์ได้ รวมถึงการเพิ่มความลาดเอียง ปรับช่วงความถี่การสั่น เพื่อสามารถพัฒนาประสิทธิภาพการลำเลียงให้เพิ่มขึ้นจากทุกรูปแบบก่อนหน้าได้



รูปที่ 6.3 ชุดอุปกรณ์ลำเลียงอนุภาคของแข็งแบบสั่นเชิงโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3 ข้อเสนอแนะ

1. ในการออกแบบโดยใช้เหล็กแผ่นติดด้านข้างเพื่อเพิ่มค่า Moment of Inertia ของชิ้นงาน อาจปรับเปลี่ยนโดยการติดตั้งชิ้นงานแบบอื่นหรือปรับเปลี่ยนตรงส่วนอื่นของชิ้นงานได้
2. จากการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการลำเลียงมวลเชื้อเพลิงในท่อ อาจจะใช้วิธีการแบบอื่นในการพิสูจน์หาค่าประสิทธิภาพได้แม่นยำยิ่งขึ้น
3. ตำแหน่งและวิธีการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่งเพื่อวิเคราะห์ข้อมูล อาจจะใช้รูปแบบและวิธีการติดตั้งแบบอื่นได้



## เอกสารอ้างอิง

- [1] คมสันต์ งามขำ. การทวนสอบระบบรองรับน้ำหนักแบบคานแข็ง. งานวิจัยสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (2558).
- [2] รัฐกร สุขชาติ, วณัฐกร เข้มกสิกรรม, อธิพัทธ์ หล้าไสบ. (2563). การปรับปรุง ชุดขนส่งลำเลียงสารชีวมวลด้วยเครื่องสั่นและการพัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์การสั่น. ปรินูญานิพนธ์ ปรินูญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] Abdul Gafar. (2016), **Self-Balancing Robot**, School of Electrical and Electronic Engineering The University of Manchester.
- [4] Alfian Ma'arif, Iswanto Aninditya Anggari, Nuryono Rio Ikhsan Alfiand. (2019), **Kalman Filter for Noise Reducer on Sensor Readings**, Department of Information Technology and Electrical Engineering, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia
- [5] Charlotte Treffers, Luc van Wietmarschen. (2016). **Position and orientation determination of a probe with use of the IMU MPU9250 and a ATmega328 micro controller**, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics, and Computer Science Department of Microelectronics. Technische Universiteit Delft Netherlands.
- [6] Daniel J. Inman. (2014). **Engineering Vibration. Fourth Edition**. United States: Pearson Prentice Hall.
- [7] Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston, Jr., John T. DeWolf and David F. Mazurek. (2012). **Mechanics of Materials. Seventh Edition**. New York: McGraw-Hill Education.
- [8] InvenSense Inc. (2016), **MPU-9250 Product Specification**. 1745 Technology Drive, San Jose, California U.S.A
- [9] Richard Wiebe, Paolo M. Calvi, Peter Mackenzie-Helnwein. (2016). **Characterization of Beam Vibration (Thesis)**. University of Washinton.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] Russell C Hibbeler. **Engineering Mechanics (Static), fifth Edition**
- [11] Shaun Spiteri. (2019). **Application of Shock Absorbers**. EJERS, European Journal of Engineering Research and Science.
- [12] Singiresu S. Rao. (2011). **Mechanical Vibrations. fifth Edition**. United States: Pearson Prentice Hall.
- [13] **มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <https://sites.google.com/site/khormulmorter/?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1>. (วันที่ค้นข้อมูล: 10 ตุลาคม 2564)
- [14] **มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <https://sites.google.com/site/nattadech5510122526011/home/mxtexr-fifa-khux-xari/hlak-kar-thangan-khxng-mxtexr/mxtexr-chnid-tang/mxtexr-fifakrasae-slab-ac-alternating-current-motor-hrux-xe-simxtex> (วันที่ค้นข้อมูล: 10 ตุลาคม 2564)
- [15] **Estimating Orientation using Inertial Sensor Fusion and MPU-9250**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [https://ww2.mathworks.cn/help/fusion/ug/Estimating-Orientation-Using-Inertial-Sensor-Fusion-and-MPU-9250.html?s\\_eid=PSM\\_15028](https://ww2.mathworks.cn/help/fusion/ug/Estimating-Orientation-Using-Inertial-Sensor-Fusion-and-MPU-9250.html?s_eid=PSM_15028) (วันที่ค้นข้อมูล 10 ตุลาคม 2564)
- [16] **Orientation from accelerometer, gyroscope, and magnetometer readings**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.mathworks.com/help/fusion/ref/ahrsfilter-system-object.html> (วันที่ค้นข้อมูล : 10 ตุลาคม 2564)