

การปรับปรุงการขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงโดยใช้ถาดสั่นสะเทือน

DEVELOPMENT OF A VIBRATING TRAY FOR TRANSPORTATION OF
PULVERIZED BIOMASS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF A VIBRATING TRAY FOR TRANSPORTATION OF
PULVERIZED BIOMASS



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
2019



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับปรุงการขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงโดยการใช้ถาดสั่นสะเทือน

นางสาวเกวลิ ชอบพานิช 59010146
นางสาวณัฐนรี พึ่งพรพรหม 59010435
นางสาววิราภานต์ กิตติวรกุล 59011237
รศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2562

บทคัดย่อ

การปรับปรุงระบบการขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นส่วนหนึ่งของ “โครงการพัฒนาและประเมินสมรรถนะสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นเพื่อการใช้งานในระยะยาวสำหรับภาคอุตสาหกรรม”

ปริญญานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการตกค้างของเชื้อเพลิงไม้ชนิดผงในท่อลำเลียงส่วนที่หนึ่ง เพื่อขนส่งเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้สำหรับห้องปฏิบัติการ โดยการใช้ถาดสั่นสะเทือนร่วมกับระบบนิวเมติกส์ (Pneumatic) ที่อัตราการเผาไหม้ต่ำกว่า 300 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ใช้ความเร็วลมในการขนส่งเชื้อเพลิง 0.015 0.02 และ 0.025 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (15% 20% และ 25% ของลมทั้งหมดที่ใช้ในการเผาไหม้) ถาดสั่นสะเทือนใช้ประกอบท่อลำเลียงที่ถูกวางเอียง 8 องศา กับแนวระดับ ใช้สปริงที่มีค่าคงที่ 53.27 นิวตันต่อเมตรสองตัวและแท่งข้อต่อยึดถาดสั่นสะเทือนกับระบบท่อ ถูกทำให้สั่นด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากำลัง 0.02 กิโลวัตต์ ความถี่ 3600 รอบต่อนาที ทำให้สั่นด้วยหลักการเสียสมดุลขณะหมุนมวลที่ใช้ในการทำให้เสียสมดุล 0.08 กิโลกรัม จะได้แรงในการสั่นสะเทือน 159.016 นิวตัน ผลการทดลองพบว่าพลังงานจากมอเตอร์ถูกถ่ายเทไปยังข้อต่อระหว่างถาดสั่นและข้อต่อยึดทำให้เกิดความเสียหาย จึงมีการปรับเปลี่ยนโดยใช้สปริงแทนข้อต่อยึด สปริงสองตัวบริเวณด้านบนของถาดสั่นสะเทือนมีค่าคงที่สปริงเท่ากับ 2144.79 นิวตันต่อเมตร และสปริงสองตัวบริเวณด้านล่างของถาดสั่นสะเทือนมีค่าคงที่สปริงเท่ากับ 350.54 นิวตันต่อเมตร จากการทดลองสังเกตเห็น จุดไม่สั่นสะเทือน 2 จุด (Dead Zone) และได้ทำการทดสอบการทำงานของถาดสั่นสะเทือนเบื้องต้นนอกเหนือจากขอบเขตที่ได้ตั้งไว้ จากนั้นได้ทำการศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนของคาน ซึ่งเป็นรูปแบบการเคลื่อนที่เปลี่ยนเป็นการสั่นสะเทือนของคาน (beam vibration) ใน mode shape ที่ 2 เพื่อเสนอเป็นแนวทางปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของถาดสั่นสะเทือนภายใต้ขอบเขตที่ได้ตั้งไว้ ได้แก่ การเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคาน I เพื่อปรับเปลี่ยนความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนของคานและการเพิ่มค่าความแข็งของสปริง K เพื่อปรับเปลี่ยนความถี่ธรรมชาติของระบบมวลสปริงให้ได้รูปแบบการสั่นที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF A VIBRATING TRAY FOR TRANSPORTATION OF PULVERIZED
BIOMASS

Kevallee Choppanich 59010146
Natnaree Phungpornprom 59010435
Wirakarn Kittibawornkul 59011237
Assoc.Prof. Dr. Jaruwat Charoensuk Advisor
Year 2562

ABSTRACT

The improvement of the biomass fuel transportation system is part of the project "Biomass burner development in industrial boilers"

The aim of this work was to decrease the residue of pulverized biomass in the primary pipe. Vibrating tray and Pneumatic is used under 300 kW of the combustion rate. Primary air for transport is 0.015 0.02 and 0.025 m³/s. Vibrating tray is used to support the inclined primary pipe with 8 degrees of angle to the horizontal level. Springs are used to hold the vibrating tray attached with the connecting rod. The two spring with 53.27 N/m of stiffness were used. The input power 0.02 kW of electric motor has a frequency 3600 rpm is vibrated by the principle of unbalance mass. The mass has a weight of 0.08 kilogram and 159.016 N of force. Results showed that the energy from motor was absorbed by joints between the tray and the rod, causing desirable damage. Modification was made by replacing the connecting rods with springs as suspenders. Two springs with 2144.79 N/m were attached upstream and two springs with 350.54 N/m of stiffness were attached downstream. According to elastic beam vibration theory ,the beam exhibited elastic nature with second mode of vibration. Preliminary tests were carried out beyond the designate condition. Recommendation for improvement of beam section moment of inertia (I) were given to increases natural frequency of the beam and stiffness of spring (k) to improve mode of spring-mass movement for desirable mode of motion which will improve transportation performance of the vibrating tray .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อประกอบการเรียนวิชา PROJECT ให้นักศึกษาได้นำความรู้ความสามารถในภาคทฤษฎีมาทำการปฏิบัติการ เป็นการเพิ่มพูนความรู้ ความสามารถ และประสบการณ์ ให้แก่นักศึกษาได้เป็นอย่างดี

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ดีก็เพราะความกรุณาที่ให้ความช่วยเหลือของ รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความรู้และเป็นที่ปรึกษาตลอดระยะเวลาที่ได้ทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำเพิ่มเติม และช่วยให้ความรู้ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ช่วงเหลือแก้ไขให้คำแนะนำ รวมทั้งเมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ซึ่งมีส่วนช่วยเหลือให้นักศึกษาเข้าใจปัญหานั้น ขอขอบคุณเพื่อนพี่น้องนักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่าง ๆจนสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการทำปริญญานิพนธ์ครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีมาจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นางสาวเกวลิ	ชอบพานิช	59010146
นางสาวณัฐนรี	พึงพรพรหม	59010435
นางสาววิราภานต์	กิตติบวรกุล	59011237

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการทดลอง.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2 การขนถ่ายวัสดุ (Materials Handling).....	5
2.2.1 ชนิดของวัสดุขนถ่าย.....	5
2.2.2 มุมกองพื่น.....	5
2.2.3 การขนถ่ายวัสดุด้วยลม.....	6
2.3 อุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือน (Vibrator).....	7
2.3.1 อุปกรณ์สั่นสะเทือนระบบลม (Pneumatic vibrator).....	8
2.3.2 สายพานลำเลียงแบบสั่น (Vibrating conveyor).....	8
2.4 หลักการพื้นฐานของกลไก (Basic Mechanisms).....	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 ระบบขึ้นต่อโยง (Linkage).....	11
2.4.2 รูปแบบของ 4-bar linkage).....	12
2.5 การสั่นสะเทือนทางกล (Mechanical vibration).....	14
2.5.1 การสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free vibration).....	15
2.5.2 ชิ้นส่วนยืดหยุ่น (Elastic component).....	16
2.5.3 การสั่นสะเทือนแบบบังคับ (Force vibration).....	19
2.5.4 การสั่นพ้อง (Resonance).....	21
2.5.5 การสั่นสะเทือนจากความไม่สมดุลจากการหมุน (Rotating unbalance).....	23
2.6 มอเตอร์ไฟฟ้า (Electric motor).....	24
2.7 สปริง (Spring).....	25
2.7.1 วัสดุที่ใช้ทำสปริง.....	27
2.7.2 การคำนวณเพื่อการออกแบบสปริงเบื้องต้น.....	28
2.8 โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia).....	29
2.8.1 การเคลื่อนย้ายแกนโมเมนต์ความเฉื่อย.....	30
2.9 การสั่นสะเทือนในคาน (Beam vibration).....	31
2.9.1 ทฤษฎีการวิเคราะห์คานของ Euler-Bernoulli (Euler-Bernoulli Beam Theory).....	31
2.9.2 ลักษณะการสั่นสะเทือนของคานในขอบเขตปลายอิสระทั้งสองด้าน.....	32
บทที่ 3 การออกแบบและการคำนวณ.....	36
3.1 การวิเคราะห์ข้อควรปรับปรุงของระบบเดิมในส่วนของการลำเลียงเชื้อเพลิง.....	36
3.2 การออกแบบ.....	38
3.2.1 การออกแบบตำแหน่งติดตั้งถาดสั่นสะเทือน.....	39
3.2.2 การออกแบบถาดสั่นสะเทือน.....	40
3.2.3 การออกแบบท่อ.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การคำนวณเพื่อการออกแบบ.....	42
3.3.1 การเลือกมอเตอร์สำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดแรงในการสั่นสะเทือน.....	42
3.3.2 การคำนวณรูปแบบจำลองการเคลื่อนที่.....	44
บทที่ 4 การติดตั้ง และการแก้ปัญหาการติดตั้งเพื่อทำการทดลอง.....	48
4.1 การวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงการทำงานของภาคสั่นสะเทือนหลังการติดตั้ง.....	49
4.2 การออกแบบเพื่อการปรับปรุงภาคสั่นสะเทือน.....	50
4.2.1 การคำนวณแรงกระทำบนภาคสั่นสะเทือน.....	52
4.2.2 การคำนวณระยะยึดและความยาวของสปริงหลังการติดตั้ง.....	53
บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัญหา.....	54
5.1 ผลการทดลองการลำเลียงเชื้อเพลิงด้วยภาคสั่นสะเทือนกรณีไม่มีลมไหลภายในท่อ.....	54
5.2 ผลการทดลองเบื้องต้นการลำเลียงเชื้อเพลิงด้วยภาคสั่นสะเทือนกรณีมีลมไหลภายในท่อ.....	55
5.3 สรุปผลการทดลองเบื้องต้น.....	56
5.4 การวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นหลังจากปรับปรุงภาคสั่นสะเทือน.....	56
บทที่ 6 สรุปผล การปรับปรุง และข้อเสนอแนะ.....	59
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	59
6.2 การปรับปรุง.....	60
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	60
6.4 แผนการในอนาคต.....	63
6.4.1 ขั้นตอนการวัดการสั่นสะเทือน.....	63
6.4.2 วิธีการทดลองเพื่อสังเกตการณ์ตกค้างของเชื้อเพลิงภายในท่อลำเลียง.....	64
เอกสารอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก.....	68
ภาคผนวก ก. แบบจำลองและอุปกรณ์ในการติดตั้งภาคสั่นสะเทือน.....	69
ภาคผนวก ข. ตารางที่ใช้ในการคำนวณ.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์หรือสื่ออื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่นำไปทำสปริง.....	28
2.2 สูตรการหาโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่รูปทรงเรขาคณิตอย่างง่าย.....	30
2.3 คำตอบรูปทั่วไปของการสั่นสะเทือนของคานในขอบเขตปลายอิสระทั้งสองด้าน.....	34
3.1 ผลการทดลองการลำเลียงเชื้อเพลิงที่ความเร็วลมต่างๆ.....	37
3.2 รายการวัสดุที่ใช้.....	40
4.1 รายการวัสดุของภาคสั่นสะเทือนหลังจากปรับปรุง.....	50
5.1 ผลการทดลองเบื้องต้นของการขนส่งเชื้อเพลิงผ่านท่อลำเลียงเชื้อเพลิงขณะเปิดเครื่องสั่นสะเทือน.....	55
5.2 ตารางแสดงการเปลี่ยนของความถี่ธรรมชาติเมื่อค่า β_n เปลี่ยน.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การติดตั้งอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือน.....	7
2.2 การติดตั้งอุปกรณ์ให้เกิดการสั่นรอบทิศทางและแนวเส้นตรง.....	8
2.3 สายพานลำเลียงแบบสั้น.....	9
2.4 ลิฟต์แบบกรรไกร (Hydraulic scissors lifting platform).....	9
2.5 การเคลื่อนที่บนระนาบ.....	10
2.6 การเคลื่อนที่บนระนาบแบบทั่วไป.....	11
2.7 ชนิดของขั้วต่อโยงแบ่งตามจำนวนของโหนด (Node)	11
2.8 ชนิดของขั้วต่อโยงในชุดกลไก.....	12
2.9 Crank-rocker.....	13
2.10 Drag-link หรือ Double-crank.....	13
2.11 Double-rocker.....	13
2.12 Change point condition (Singularity)	14
2.13 Non-Grashof mechanism.....	14
2.14 Parallelogram linkage.....	14
2.15 แสดงมวลติดสปริงแบบระดับชั้นเสรีเดี่ยวและ Free body diagram.....	15
2.16 การสั่นสะเทือนอย่างอิสระที่ไม่มี การหน่วง.....	16
2.17 แสดงตำแหน่งสมดุลของระบบที่ไม่มีมวลและเมื่อเพิ่มมวลขึ้นตามลำดับ.....	16
2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยืดหดของสปริง.....	17
2.19 การต่อสปริงแบบขนาน.....	17
2.20 การต่อสปริงแบบอนุกรม.....	17
2.21 ระบบการสั่นสะเทือนที่มีแรงกระตุ้นแบบฮาร์มอนิกกระทำกับระบบ.....	19
2.22 การสั่นพ้องเมื่อเงื่อนไขค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์.....	23
2.23 แบบจำลองการสั่นสะเทือนจากความไม่สมดุล.....	23
2.24 Free body diagram ของการเสียสมดุลขณะหมุน.....	24
2.25 สปริงดีด – สปริงดัด.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26 สปริงตึง.....	26
2.27 สปริงกด.....	27
2.28 แหวนสปริงงาน.....	27
2.29 การย้ายแกนโมเมนต์ความเฉื่อย.....	31
2.30 อธิบายการเคลื่อนที่ทางกลศาสตร์ของหน้าตัดที่พิจารณาภายใต้ผลเนื่องจากการตัด.....	32
2.31 ลักษณะคลื่นนิ่ง(a standing wave).....	33
2.32 รูปร่างการสั่นสะเทือนของคานภายใต้เงื่อนไขปลายอิสระทั้งสองด้าน 1-5 รูปแบบแรก.....	35
3.1 ระบบการลำเลียงเชื้อเพลิงชนิดผงแบบเดิม.....	36
3.2 เชื้อเพลิงกองภายในท่อ.....	37
3.3 แผนผังการทำงาน.....	38
3.4 ตำแหน่งติดตั้งถาดสั่นสะเทือนกับคานรับน้ำหนัก.....	39
3.5 มุมเอียงของถาดสั่นสะเทือน.....	39
3.6 ถาดสั่นสะเทือน.....	41
3.7 อะแดปเตอร์ (adaptor).....	41
3.8 แผนภาพวัตถุอิสระของถาดสั่นสะเทือน.....	42
3.9 มวลที่ใช้ในการทำให้เสียสมดุลขณะหมุนของมอเตอร์.....	44
3.10 แผนภาพวัตถุอิสระของระบบ.....	44
3.11 กราฟแสดงแบบจำลองของการสั่นสะเทือนเมื่อใช้มวล 4 แผ่นน้ำหนัก 0.08 กิโลกรัม.....	47
4.1 แผนผังการทำงาน.....	48
4.2 รูปถาดสั่นสะเทือนหลังการติดตั้ง.....	49
4.3 แรงจากการสั่นสะเทือน.....	49
4.4 ถาดสั่นสะเทือนปรับปรุงใหม่.....	51
4.5 การติดตั้งถาดสั่นสะเทือนปรับปรุงใหม่.....	51
4.6 แบบจำลองการติดตั้งถาดสั่นสะเทือน.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 แผนภาพวัตถุอิสระของแบบจำลองการติดตั้งถาดสันสะเทือน.....	52
5.1 การกองของเชื้อเพลิงภายในท่อ.....	54
5.2 การลำเลียงเชื้อเพลิงด้วยถาดสันสะเทือนแบบไม่มีลมไหลภายในท่อ.....	55
5.3 mode shape.....	58
6.1 ชุดอุปกรณ์แบบโครงถัก.....	61
6.2 กราฟการเคลื่อนที่แบบมวล-สปริง.....	63
6.3 กราฟการสันสะเทือนแบบบังคับหลังเปลี่ยนความถี่มอเตอร์.....	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการด้านพลังงานเพิ่มสูงขึ้น ประกอบกับวิกฤตด้านราคาของพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลก็มีการปรับราคาเพิ่มสูงขึ้นตามความต้องการ พลังงานทดแทนจึงเข้ามามีบทบาทอย่างมากในสังคม การปรับปรุงระบบการขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นส่วนหนึ่งของโครงการ “การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับผลิตไอน้ำในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร” มีจุดประสงค์เพื่อนำเชื้อเพลิงชีวมวลของแข็ง (Solid biomass) มาใช้ในการให้ความร้อน โดยเลือกใช้เชื้อเพลิงไม้อัดแท่ง (Wood pellet) บดให้อยู่ในลักษณะที่เป็นผง (pulverize) ลำเลียงด้วยระบบนิวเมติกส์ (Pneumatic) ไปยังห้องเผาไหม้ช่วย (Pre Chamber) พบปัญหาการตกค้างของเชื้อเพลิงที่ความเร็วลมต่ำ จากการใช้เชื้อเพลิงในการรับน้ำหนักท่อลำเลียงเชื้อเพลิงเฉพาะจุด เนื่องจากท่อพลาสติกที่ไม่คงรูปและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบริเวณภายในผิวสัมผัสของท่อและตัวเชื้อเพลิงทำให้เกิดการตกค้างของเชื้อเพลิงภายในท่อลำเลียงได้ ส่งผลให้การเผาไหม้ไม่มีประสิทธิภาพดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลในการปรับปรุงระบบการขนส่งเชื้อเพลิงในส่วนนี้ ในส่วนของวิธีแก้ปัญหานั้นสามารถทำได้หลายวิธี หากคำนึงถึงความเหมาะสมและข้อจำกัดต่างๆแล้วจึงพบว่า วิธีหนึ่งที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการแก้ปัญหาคือการใช้ถาดสั่นสะเทือนที่ออกแบบให้สามารถใช้ร่วมกับระบบนิวเมติกส์ได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อนำเอาถาดสั่นสะเทือนติดมอเตอร์มาใช้ร่วมกับระบบนิวเมติกส์ในการขนส่งเชื้อเพลิงได้
2. วิเคราะห์รูปแบบการเคลื่อนที่ของถาดสั่นสะเทือน
3. ช่วยลดการโค้งงอของท่อลำเลียง
4. เพื่อทำการทดสอบการลดการตกค้างของเชื้อเพลิงไม้อัดแท่งชนิดผงบริเวณท่อลำเลียงที่อัตราการไหลเชิงมวลเทียบเท่าอัตราการเผาไหม้ของความร้อนที่ 300 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง

หมายเหตุ วัตถุประสงค์ในข้อที่ 4 นั้นไม่สามารถทำได้ เนื่องจากสถานการณ์โควิด-19 ทำให้ไม่สามารถทำการทดลองควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลด้วยระบบ PLC ได้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การใช้ชุดการสั่นมาช่วยในการลำเลียงเชื้อเพลิงร่วมกับระบบนิวเมติกส์จะสามารถลดการตกค้างของเชื้อเพลิงบริเวณท่อลำเลียงได้ และชุดอุปกรณ์จะช่วยลดการโค้งงอของท่อลำเลียง โดยสภาพสั่นสะเทือนจะมีการเคลื่อนที่แบบมวล-สปริง

1.4 ขอบเขตของการทดลอง

1. ปรับปรุงการขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงบริเวณท่อลำเลียงจากสกรูขนถ่ายวัสดุถึงทางเข้าห้องเผาไหม้ช่วย
2. ใช้มอเตอร์เขย่า (Vibration motor) เป็นแหล่งให้กำเนิดแรงสั่นกับชุดการสั่น
3. ใช้ถาดสั่นในการแก้ไขปัญหาการตกค้างของเชื้อเพลิงภายในท่อลำเลียง ที่อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง 300 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง
4. กำหนดให้ลมที่ใช้ระบบลำเลียงเท่ากับ 15 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ของลมทั้งหมด

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาการทำงานและปัญหาที่เกิดขึ้นของระบบการขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดแข็งแบบผง
2. กำหนดขอบเขตในการดำเนินงาน
3. ศึกษาทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งกำหนดค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ต้องทำการจัดเก็บ
4. ออกแบบชุดการสั่นสะเทือนโดยใช้มอเตอร์เขย่า (Vibration motor) และเขียนแบบทางวิศวกรรมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (CAD)
5. จัดหาวัสดุอุปกรณ์ และทำการสร้างถาดสั่นสะเทือนตามที่ได้ออกแบบไว้
6. ทดสอบการทำงานของถาดสั่นสะเทือน และวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นเบื้องต้น
7. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาปรับปรุงถาดสั่นสะเทือน
8. ปรับปรุงถาดสั่นสะเทือน และทำการทดสอบการทำงานหลังจากการปรับปรุง
9. วิเคราะห์การทำงานและรูปแบบการเคลื่อนที่ของถาดสั่นสะเทือน เพื่อเสนอแนะประเด็นที่จะต้องทำการพัฒนาต่อไป
10. สรุปผลการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้ชุดการสั้นสะเทือนสำหรับแก้ไขปัญหาการตกค้างของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง บริเวณท่อลำเลียง
2. ทำให้การเผาไหม้มีเสถียรภาพโดยการควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิงให้เข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วยอย่างต่อเนื่องไม่ติดขัด
3. ทำให้ระบบการลำเลียงเชื้อเพลิงสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง
4. ลดระยะเวลาในการซ่อมบำรุงส่วนท่อลำเลียงเชื้อเพลิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทนี้ จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและนำเสนอถึงทฤษฎีต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณเพื่อ ออกแบบชุดการสั่น ได้แก่ การขนถ่ายวัสดุด้วยลม มอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานในการสั่นของ ชุดการสั่น นอกจากนี้จะกล่าวถึง การสั่นสะเทือนแบบบังคับด้วยแรงภายนอกจากการสั่นของมอเตอร์ และถูกเพิ่มแรงให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยหลักการเสียดสมดุขณะหมุน เพื่อให้เห็นถึงหลักการทำงาน ของชุดการสั่น

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จิระเมธา สังข์เกษม และคณะ ได้ทำการศึกษาออกแบบชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลและกลศาสตร์ ของไหล เพื่อสร้างเครื่องล้างเมล็ดพริกไทยแบบถาดสั่นสะเทือนสำหรับล้างเปลือกของเมล็ดพริกไทย เพื่อผลิตพริกไทยขาว โดยการออกแบบได้หาขนาดของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่เล็กที่สุดที่สามารถใช้งาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น ลูกเบี้ยวเตะถาดสั่น และขนาดของท่อฉีดน้ำ ซึ่งทุกชิ้นส่วนมีความสำคัญ ต่อปัจจัยตัวแปรของการออกแบบที่สำคัญมากที่สุดคือขนาดมอเตอร์ และขนาดของปั้มน้ำ เนื่องจากมี ผลต่อต้นทุนค่าไฟฟ้าในระยะยาวตลอดอายุการใช้งานของเครื่องจักรกล ถ้าผู้ออกแบบใช้การลองผิด ลองถูก โดยไม่ได้คำนึงถึงหลักของการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและกลศาสตร์ของไหล กล่าวคือ ถ้ามอเตอร์ขนาดเล็กเกินไปถาดสั่นของเครื่องจักรจะไม่สามารถขับเคลื่อนได้ หรือถ้าขับเคลื่อนได้ใน กรณีที่มีขนาดใหญ่เกินไปจริงจะทำให้สิ้นเปลืองมาก การออกแบบได้แยกออกเป็นสองส่วนโดยมีการหา อัตราการไหลต่ำสุดของน้ำที่ฉีดให้เมล็ดพริกไทยสะอาด โดยกำหนดอัตราการผลิตที่สามารถล้างเมล็ด พริกไทยได้ไม่น้อยกว่า 200 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จึงได้นำมาออกแบบลูกเบี้ยว ชุดพู่เลย์ สายพาน เกียร์ ทด และขนาดต้นกำลังขับเคลื่อนของมอเตอร์ เป็นอันดับสุดท้าย ผลการทดลองได้มีการเปรียบเทียบเชิง ต้นทุนค่าไฟฟ้าของการออกแบบที่ใช้หลักของพลศาสตร์ และการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลกับ วิธีการลองผิดลองถูกที่ขนาดของมอเตอร์ต่างๆ ที่ระยะเวลาการใช้งานของเครื่องจักรต่างๆ กัน

ธีระศักดิ์ พรพงษ์ธร และธีระพงษ์ ว่องรัตนะไพศาล บทความนี้นำเสนอกลไกลดความถี่ ธรรมชาติของระบบแยกการสั่นสะเทือนในแนวตั้งแบบคานในแนวราบ โดยศึกษาถึงผลของแรงกดใน แนวแกนของคานต่อความถี่ธรรมชาติของระบบ แบบจำลองตามทฤษฎีของออยเลอร์-แบร์นูลลีถูก นำมาใช้ในการศึกษา โดยมีเงื่อนไขขอบของคานที่ศึกษาสองกรณี คือ หนึ่งเป็นแบบยึดแน่นทั้งสองข้าง ปลายข้างหนึ่งยึดแน่นกับภาวะที่ต้องการนำมาแยกการสั่นและปลายอีกข้างหนึ่งยึดแน่นกับฐานของ แท่นแยกการ สั่นสะเทือนหรือชุดทดสอบ และสองแบบปลายคานข้างหนึ่งยึดแน่นกับภาวะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นเดียวกับกรณีทีหนึ่งและปลายอีก ข้างหนึ่งยึดติดกับฐานของชุดทดสอบด้วยตัวรองรับแบบสลัก ความถี่ธรรมชาติหรือแรงกตในแนวแกนของคานใน เริงทฤษฎีสามารถหาได้โดยใช้วิธีการแก้ปัญหาแบบ eigenvalue problem พร้อมกับวิธีเชิงตัวเลข ผลการวิเคราะห์ เริงทฤษฎีพบว่าความถี่ธรรมชาติของระบบลดลงเมื่อแรงกตเพิ่มขึ้น และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อแรงกตเข้าใกล้แรง กตวิกฤต ความถี่ธรรมชาติของระบบมีค่าน้อยที่สุดหรือใกล้เคียงศูนย์เมื่อแรงกตในแนวแกนมีค่าเท่ากับแรงกตการ โกงวิกฤต ผลการทดสอบของชุดทดสอบที่สร้างขึ้นพบว่ามีความโน้มไปทางเดียวกันกับทฤษฎี

พีรพัฒน์ เทพลิบ โครงการต่อเนื่องจากโครงการ “การพัฒนาหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลในหม้อน้ำอุตสาหกรรม” ที่ใช้ไม้อัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง โดยมีจุดมุ่งหมายในการพัฒนาระบบการเตรียมเชื้อเพลิงให้เป็นแบบอัตโนมัติ และสามารถลำเลียงเชื้อเพลิงให้เข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง โดยใช้ Sensor และ PLC ในการตรวจวัด และควบคุมอุปกรณ์ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือช่วยลดขั้นตอนและบุคลากรในการเตรียมเชื้อเพลิงลง เป็นการช่วยอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้วิจัยหัวเผาในการเก็บค่าพารามิเตอร์เพื่อพัฒนาหัวเผาได้ อีกทั้งยังกล่าวถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ซึ่งมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพและเสถียรภาพของเปลวไฟ และได้แสดงผลการใช้พลังงานในการเตรียมเชื้อเพลิงเทียบกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ผลิตได้

2.2 การขนถ่ายวัสดุ (Materials Handling)

เป็นกรรมวิธีที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายวัสดุในกระบวนการผลิต นับตั้งแต่เป็นวัตถุดิบจนกระทั่งเป็นสินค้าถึงมือผู้บริโภค เป็นการเตรียมวัสดุ การวาง การกำหนดที่วางและการลำเลียงในทุกขั้นตอนการผลิต ยกเว้นกรรมวิธีในการแปรสภาพ เช่น การตัดชิ้นวัสดุ การปิดฝากระป๋อง การให้ความร้อนต่อวัสดุ เป็นต้น

2.2.1 ชนิดของวัสดุขนถ่าย

ปัจจัยสำคัญในการกำหนดลักษณะสร้างและขีดความสามารถของระบบขนถ่ายวัสดุ คือ ชนิดและสมบัติทางกายภาพของวัสดุขนถ่าย วัสดุขนถ่ายนั้นมีหลายชนิด เช่น ของแข็ง กึ่งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ การขนถ่ายวัสดุที่เป็นของเหลวและก๊าซ ต้องการเทคโนโลยีทางอุปกรณ์เฉพาะอย่าง ในที่นี้จะกล่าวถึง 2 ลักษณะ คือ วัสดุที่มีลักษณะเป็นชิ้น (Individual Unit) และ วัสดุปริมาณมวล (Bulk material)

2.2.2 มุมกองพื้น

เป็นมุมที่วัสดุกองตัวบนพื้นราบ มุมนี้มี 2 ประเภท คือมุมกองพื้นขณะหยุดนิ่งกับมุมกองพื้นขณะลื่นไหล ค่าของมุมกองพื้นนี้แสดงถึงความสามารถในการไหล (Flowability) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การไหลคล่องตัวมาก (Very free flowing) จะมีมุมกองพื้นขณะหยุดนิ่งถึง 30 องศา
2. การไหลคล่องตัว (Free flowing) จะมีมุมกองพื้นขณะหยุดนิ่งตั้งแต่ 30-45 องศา
3. การไหลไม่คล่องตัว (Sluggish) จะมีมุมกองพื้นขณะหยุดนิ่งมากกว่า 45 องศา

2.2.3 การขนถ่ายวัสดุด้วยลม

โดยทั่วไปแล้วการขนถ่ายวัสดุด้วยลมจะใช้สำหรับการขนถ่ายวัสดุแห้งที่มีลักษณะเป็นเม็ดหรือผงผ่านท่อขนถ่ายวัสดุไปยังปลายทางที่ต้องการ มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการขนถ่ายวัสดุด้วยอุปกรณ์ลำเลียงทางกลต่างๆ ไป เช่น สายพานลำเลียง โซ่ลำเลียง และสกรูลำเลียง เป็นต้น มีข้อดีดังนี้

1. ประหยัดค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวกับภาวะบรรจุและคนงานที่ใช้ในการขนถ่ายวัสดุ
2. ลดการสูญเสียวัสดุจากการขนถ่ายเนื่องจากวัสดุตกหล่นหรือรั่ว
3. สามารถควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติไปยังปลายทางหลายแห่งได้
4. สามารถเก็บวัสดุปริมาณมากๆ ได้ โดยใช้ไซโลขนาดใหญ่
- 5.ปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานในกรณีทีวัสดุขนถ่ายเป็นอันตราย
6. ลดการปนเปื้อนของวัสดุขนถ่าย

โดยทั่วไปแล้วการขนถ่ายวัสดุด้วยลมจะเหมาะกับวัสดุแห้งที่มีลักษณะเป็นเม็ดหรือผง ซึ่งคุณสมบัติอื่นๆ ของวัสดุจะมีผลต่อระบบการขนถ่ายวัสดุด้วยลม และการเลือกใช้ระบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ขนาดของวัสดุ (Particle size) การขนถ่ายวัสดุด้วยลมนั้นสามารถขนถ่ายวัสดุที่มีขนาดตั้งแต่มีหน่วยเป็นไมครอน ไปจนถึงก้อนหินขนาด 2 นิ้วได้ ซึ่งขนาดและรูปร่างตามธรรมชาติของวัสดุขนถ่ายนั้นจะมีผลต่อการออกแบบระบบขนถ่ายวัสดุ และมีผลต่อค่าใช้จ่ายในการขนถ่ายวัสดุอีกด้วย

2. ความหนาแน่น (Density) วัสดุที่เป็นผงจะมีค่าความหนาแน่นน้อย ส่วนความหนาแน่นของวัสดุบางชนิดจะมีค่าสูงมาก ความหนาแน่นของวัสดุนี้จะมีผลต่อความเร็วลมในการขนถ่ายวัสดุ การออกแบบ และการเลือกใช้ชนิดของระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลม

3. อุณหภูมิ (Temperature) โดยทั่วไปแล้วข้อจำกัดของอุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับความสามารถของชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆ ที่จะทนอุณหภูมิสูงๆ ได้ ตามปกติแล้วอุณหภูมิวัสดุไม่ควรสูงเกิน 400 องศาเซลเซียส แต่ในบางกรณีอาจสูงได้ถึง 950 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้อุปกรณ์ที่สามารถทนอุณหภูมิสูงๆ ได้ด้วย

4. ความคมของวัสดุ (Abrasiveness) วัสดุที่มีความคมมาก เช่น ซีเมนต์ สามารถขนถ่ายด้วยลมได้ โดยการออกแบบให้ใช้ระบบที่มีความเร็วในการขนถ่ายวัสดุต่ำ (Dense phase system) พร้อมทั้งเลือกอุปกรณ์ในระบบที่สามารถทนการกัดกร่อนจากวัสดุได้ดี

5. วัสดุที่มีลักษณะกรอบและแตกหักง่าย (Friability) โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่มีลักษณะกรอบและแตกหักง่ายจะไม่เหมาะสมกับการใช้ระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลม แต่สามารถใช้ได้ในระบบที่มีความเร็ว

ขนถ่ายวัสดุต่ำ (Dense phase system)

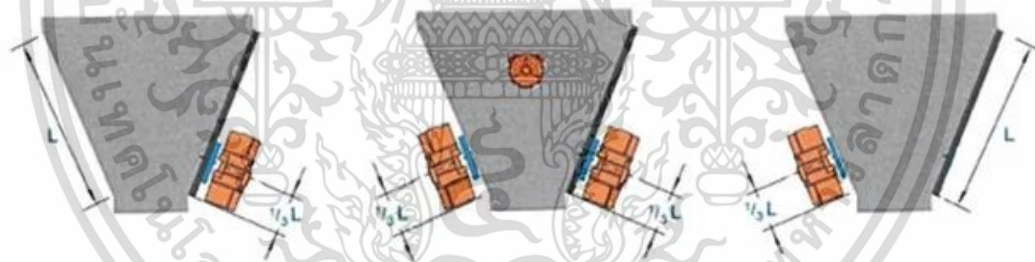
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 อุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือน (Vibrator)

อุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือน (Vibrator) สำหรับงานอุตสาหกรรม โดยใช้หลักการของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ใช้กับงานที่ต้องการการการเคาะ สั่น และเขย่า ช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการใช้แรงคนในการทำงาน และปัญหาที่เกิดขึ้นกับตัวเครื่องจักรและอุปกรณ์ อุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือนมีทั้งแบบสั่งการด้วยลมและสั่งการด้วยไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม ลักษณะงาน และความสะดวกของผู้ใช้

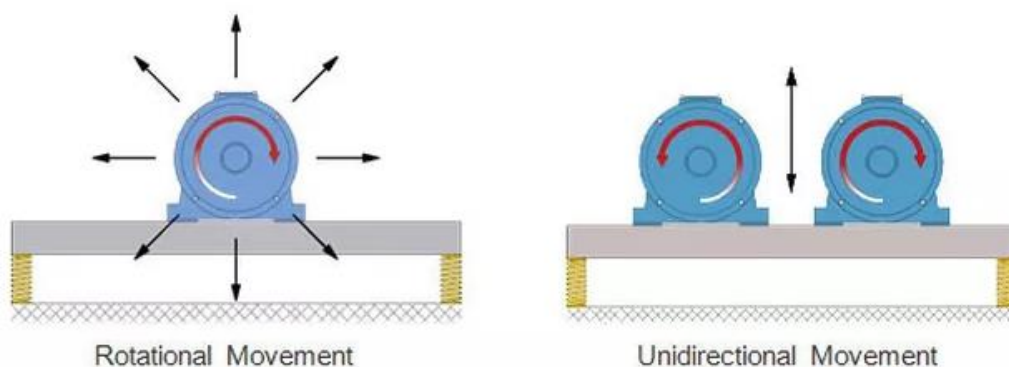
โดยทั่วไปใช้ในการเขย่าวัสดุที่ติดตาม Silo/Hopper ให้ไหลลงมา รูปแบบการติดแบ่งได้ 4 แบบ คือ แบบวัสดุอัดติดกันแน่น (COMPACTION) แบบติดตามด้านข้างเป็นช่องยาวตรงกลาง (RAT HOLE) แบบติดขัดบริเวณปากทางออก (BRIDGING) และสุดท้ายแบบติดอยู่เล็กน้อย (REMAINDERS) ถ้าจะทำให้วัสดุที่ติดอยู่ไหลออกโดยการเคาะ ทุบ ตี อาจทำให้ตัว Silo/Hopper ได้รับความเสียหาย และคนที่ทำอาจได้รับบาดเจ็บได้

ตัวอุปกรณ์จะถูกนำไปติดตั้งที่ตัว Silo/Hopper ที่ระยะ 1 ใน 3 ของความสูงนับจากปากทางออก ถ้าติดมากกว่า 1 ตัว ตำแหน่งต่อไปติดที่ระดับเดียวกันแต่ฝั่งตรงกันข้าม และตัวต่อมาติดที่ระยะ 2 ใน 3 ของความสูงนับจากปากทางออก ระหว่างตัวที่ 1 กับ 2 และตัวต่อไปติดฝั่งตรงกันข้าม ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การติดตั้งอุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือน

โดยทั่วไปอุปกรณ์สร้างแรงสั่นจะสร้างแรงสั่นจากตัวรอบทิศทาง เราสามารถดัดแปลงการติดตั้ง โดยการติดตั้งอุปกรณ์สร้างแรงสั่นให้มีทิศทางการหมุนสวนทางกันไว้ด้วยกัน จะทำให้เกิดแรงสั่นในแนวเส้นตรง ลักษณะงานที่ใช้การสั่นแนวเส้นตรง คือ การแยกขนาดวัสดุ และการลำเลียงวัสดุ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การติดตั้งอุปกรณ์ให้เกิดการสั่นรอบทิศทางและแนวเส้นตรง

2.3.1 อุปกรณ์สั่นสะเทือนระบบลม (Pneumatic vibrator)

เป็นอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ก่อให้เกิดการสั่นในตำแหน่งที่ติดตั้งโดยใช้ลมในลักษณะเดียวกับอุปกรณ์นิวเมติกส์ มีทั้งหมด 5 ประเภท ได้แก่

1. Ball Vibrator , K series
2. Roller Vibrator , R series
3. Turbine Vibrator , GT series
4. Piston Vibrator , FP series
5. Impact Hammer , SX series, PS series

ข้อดีของอุปกรณ์สั่นระบบลม ได้แก่

1. มีประสิทธิภาพสูง
2. โครงสร้างเป็นอะลูมิเนียมทำความสะอาดง่าย และทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี
3. ใช้ลมน้อย แรงสั่นและความถี่สามารถปรับได้จากแรงลมที่ป้อนเข้าไป
4. โครงสร้างแข็งแรง การบำรุงรักษาต่ำ
5. มีรุ่นให้เลือกใช้มาก
6. ไม่ก่อให้เกิดประกายไฟ รองรับ ATEX STANDARD

2.3.2 สายพานลำเลียงแบบสั่น (Vibrating conveyor)

ใช้มอเตอร์เป็นแหล่งพลังงานในการสั่นสะเทือนส่งผ่านสปริงและไคต์ร้อด เพื่อทำการสั่นให้วัสดุที่ขนส่งเกิดการสั่นและเคลื่อนที่ไปด้านหน้า โครงสร้างของสายพานลำเลียงแบบสั่นประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

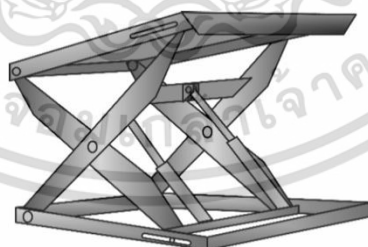
1. รางลำเลียง
2. เครื่องสั้น หรือมอเตอร์สั้น เป็นแหล่งพลังงานของระบบสั้นลำเลียง
3. หลักการสั้นสะเทือนสปริง และแยกการสั้นสะเทือนสปริง
4. ไกด์ร้อด



รูปที่ 2.3 สายพานลำเลียงแบบสั้น

2.4 หลักการพื้นฐานของกลไก (Basic Mechanisms)

เครื่องจักร (Machine) หมายถึง อุปกรณ์ทางกลที่ใช้ส่งถ่ายการเคลื่อนที่และพลังงาน (Transmit motion and energy) โดยใช้กลไกเป็นเครื่องมือในการส่งถ่ายการเคลื่อนที่ ดังนั้น กลไก (Mechanisms) หมายถึง ชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลที่ใช้ส่งถ่ายการเคลื่อนที่ (Transmit motion) ตัวอย่างเช่น ลิฟต์แบบกรรไกร (Hydraulic scissors lifting platform)



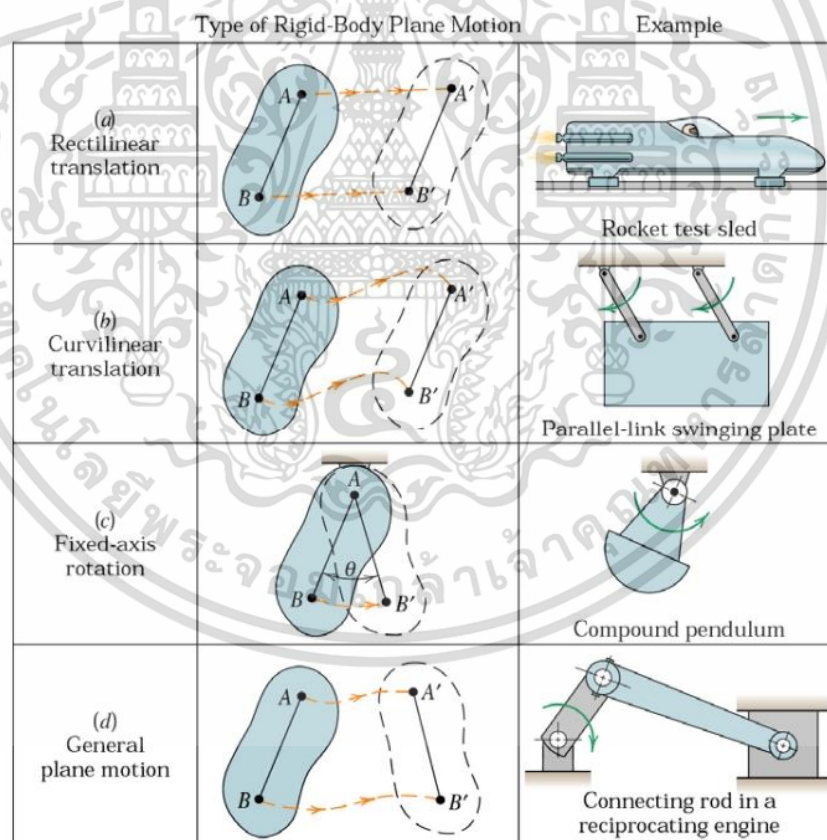
รูปที่ 2.4 ลิฟต์แบบกรรไกร (Hydraulic scissors lifting platform)

การเคลื่อนที่ของวัตถุอย่างอิสระในปริภูมิสามมิติ โดยทั่วไปจะเป็นการเคลื่อนที่แบบ Complex Motion นั่นคือ วัตถุมีการเลื่อนพิกัดตำแหน่งไปตามแนวแกนและหมุนรอบแกนไปพร้อมกัน สำหรับการเคลื่อนที่ในระนาบจะสามารถเคลื่อนที่ไปตามแนวแกนและหมุนรอบแกนที่ตั้งฉากกับระนาบ ในที่นี้จะขอกล่าวถึงการเคลื่อนที่แบบทั่วไปบนระนาบ (General plane motion) เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่ในระนาบเกิดขึ้นเมื่อทุกๆ ส่วนของวัตถุเคลื่อนที่ในระนาบที่ขนานกัน หรืออาจกล่าวว่าเป็นปัญหาการเคลื่อนที่ในระนาบเป็นปัญหาการเคลื่อนที่ในสองมิติ โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่

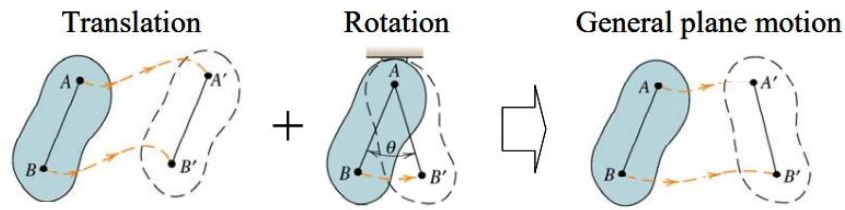
1. การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ (Translation) เป็นการเคลื่อนที่ซึ่งทุกๆ เส้นใดๆ ในวัตถุจะเคลื่อนที่ขนานกับตำแหน่งเริ่มแรกของเส้นนั้นเสมอ การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่จึงเป็นการเคลื่อนที่ที่ไม่มีการหมุน สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ในแนวเส้นตรง (Rectilinear translation) และการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ในแนวเส้นโค้ง (Curvilinear translation) ดังแสดงในรูปที่ 2.5(a) และ 2.5(b) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของจุดใดๆ ในวัตถุที่เคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ จะเหมือนกัน ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาการเคลื่อนที่ของวัตถุในกรณีนี้เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้
2. การเคลื่อนที่แบบหมุนรอบจุดยึด (Fixed-axis rotation) การหมุนรอบจุดยึดแสดงดังรูปที่ 2.5(c) จะพบว่าจุดใดๆ ในวัตถุจะเคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบแกนหมุน และหมุนด้วยมุมที่เท่ากันในเวลาเดียวกัน



รูปที่ 2.5 การเคลื่อนที่บนระนาบ

3. การเคลื่อนที่แบบทั่วไปบนระนาบ (General plane motion) การเคลื่อนที่แบบนี้เป็นการเคลื่อนที่ที่ผสมกันระหว่างการเลื่อนที่และการหมุน ดังแสดงในรูปที่ 2.5(d) และรูปที่ 2.6 ซึ่งการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ของวัตถุสามารถแบ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ในช่วงแรก และค่อยเคลื่อนที่แบบหมุนในช่วงต่อมา

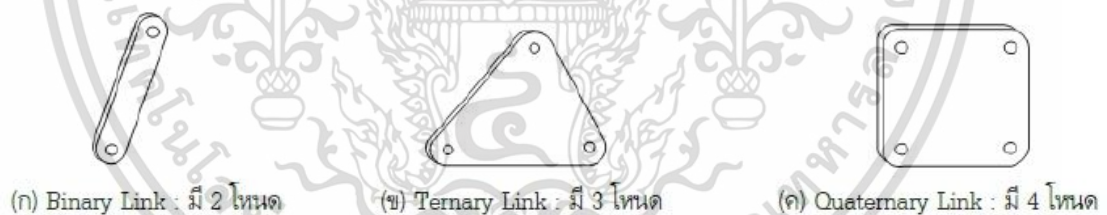


รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่บนระนาบแบบทั่วไป

2.4.1 ระบบขั้วต่อโยง (Linkage)

ระบบขั้วต่อโยง คือกลไกที่ประกอบด้วยชิ้นส่วน (Link) ที่เชื่อมต่อกัน (Joint) เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบลูกโซ่หรือแบบต่อเนื่อง ประกอบด้วย

1. ขั้วต่อโยง (link) คือ วัตถุเกร็ง (Rigid body) ที่เป็นชิ้นส่วนแต่ละชิ้นของกลไก มีจุดต่ออย่างน้อย 2 จุด ซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อกับขั้วต่อโยงชิ้นอื่นๆ เพื่อถ่ายเทการเคลื่อนที่และแรงระหว่างกัน ชนิดของขั้วต่อโยงสามารถแบ่งได้ตามจำนวนโหนด (Node) ของขั้วต่อโยงได้แก่ Binary link มี 2 โหนด Ternary link มี 3 โหนด และ Quaternary link มี 4 โหนด



(ก) Binary Link : มี 2 โหนด

(ข) Ternary Link : มี 3 โหนด

(ค) Quaternary Link : มี 4 โหนด

รูปที่ 2.7 ชนิดของขั้วต่อโยงแบ่งตามจำนวนของโหนด (Node)

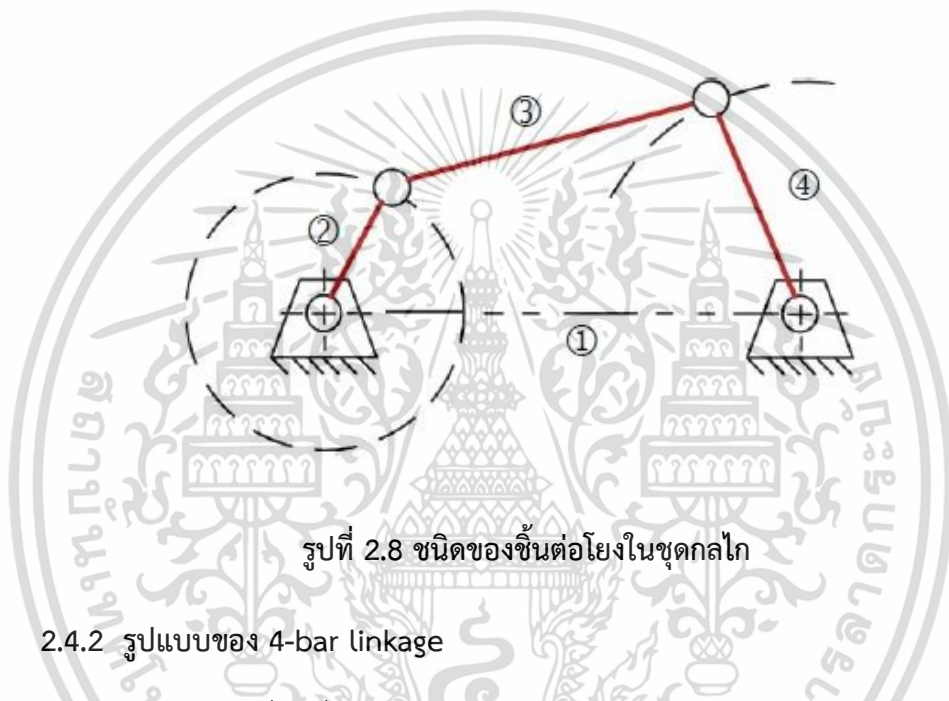
2. ข้อต่อ (Joint) คือจุดเชื่อมต่อระหว่างขั้วต่อโยงสองชิ้นหรือมากกว่า ซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันระหว่างขั้วต่อโยง ชนิดของข้อต่อแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ คู่สัมผัสระดับต่ำ (Lower pair) ซึ่งมีการเชื่อมต่อกันแบบผิวสัมผัสผิวกับผิว (Surface contact) และสัมผัสระดับสูง (Higher pair) มีการเชื่อมต่อแบบจุด หรือเส้น (Point or line contact)

สายโซ่คิเนมาติกส์ (Kinematics chain) คือขั้วต่อโยงที่นำมาต่อกันโดย Input link จะทำการควบคุมการเคลื่อนที่ของ Output และกลไก (Mechanisms) คือสายโซ่คิเนมาติกส์ที่มีอย่างน้อย 1 ขั้วต่อโยงติดอยู่กับ Ground หรือ Reference frame

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามของขั้วต่อโยงในชุดกลไก

1. Ground หมายถึงขั้วต่อโยงที่ถูกยึดติดอยู่กับ Reference frame
2. ข้อเหวี่ยง (Crank) หมายถึงขั้วต่อโยงที่สามารถเคลื่อนที่ครบรอบรอบจุดที่ยึดติดอยู่กับ Ground
3. Coupler หรือ Complex link หมายถึงขั้วต่อโยงที่มี Complex motion และไม่มีจุดที่ยึดติดกับ Ground
4. Rocker หมายถึงขั้วต่อโยงที่แกว่งไปมา หรือโยกไปมารอบจุดยึดที่ติดอยู่กับ Ground



รูปที่ 2.8 ชนิดของขั้วต่อโยงในชุดกลไก

2.4.2 รูปแบบของ 4-bar linkage

รูปแบบการเคลื่อนที่ของ 4-bar linkage สามารถจัดจำแนกออกได้เป็น 4 แบบ ได้แก่ Crank-rocker Double-rocker Parallelogram linkage และ Drag-link or Double-crank สามารถทำนายรูปแบบการเคลื่อนที่ได้หากทราบความยาวของขั้วต่อโยงของกลไก โดยใช้ทฤษฎีของ Grashoff ที่กล่าวไว้ว่า “ถ้าผลบวกของความยาวของขั้วต่อโยงที่สั้นที่สุดกับขั้วต่อโยงที่ยาวที่สุดมีค่าน้อยกว่าผลบวกของความยาวของขั้วต่อโยงที่เหลือรวมกัน จะทำให้มีการหมุนสัมพันธ์อย่างต่อเนื่องของขั้วต่อโยงหนึ่งเทียบกับอีกขั้วต่อโยงหนึ่ง”

กำหนด s คือความยาวของขั้วต่อโยงที่สั้นที่สุด

l คือความยาวของขั้วต่อโยงที่ยาวที่สุด

p และ q คือความยาวของขั้วต่อโยงที่ยาวมากกว่า s และน้อยกว่า l

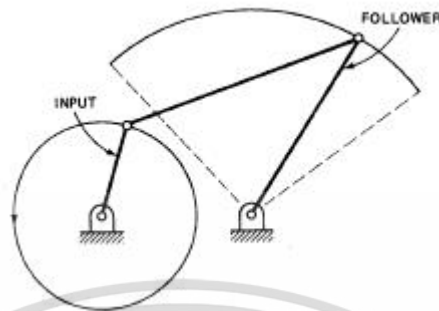
ถ้า $l+s < p+q$ จะเป็นแบบ Crank-rocker เมื่อ s เป็น Crank และติดอยู่กับ Ground

จะเป็นแบบ Double-crank เมื่อ s เป็น Ground

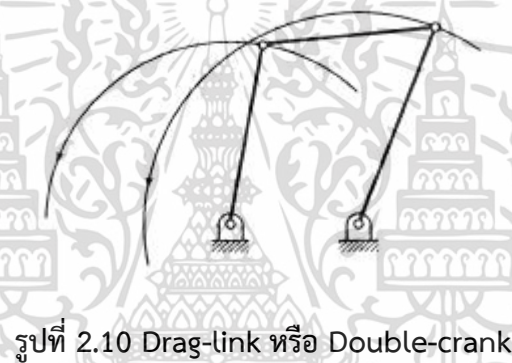
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเป็นแบบ Rocker-crank เมื่อ s เป็น Follower

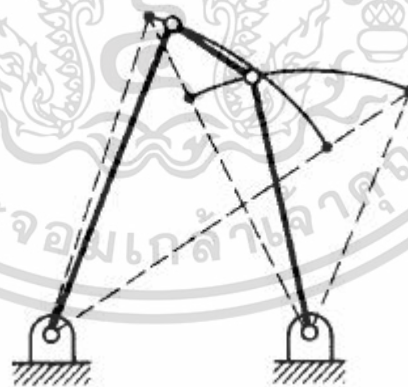
จะเป็นแบบ Double-rocker เมื่อขึ้นต่อโยงตรงข้าม s เป็น Ground



รูปที่ 2.9 Crank-rocker



รูปที่ 2.10 Drag-link หรือ Double-crank



รูปที่ 2.11 Double-rocker

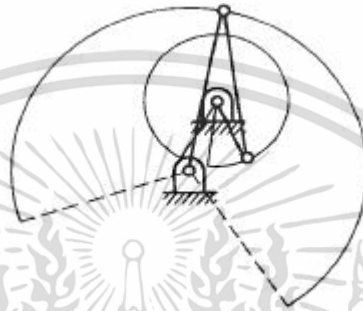
ถ้า $l+s = p+q$ จะได้เหมือนกรณีก่อนหน้าแต่จะเกิด Change point condition (Singularity) หรือขึ้นต่อโยงเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



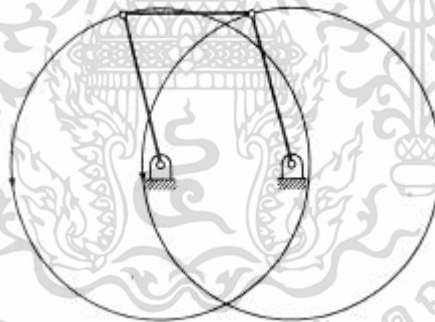
รูปที่ 2.12 Change point condition (Singularity)

ถ้า $l+s > p+q$ จะเป็น Non-Grashof mechanism เมื่อไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของ Grashof จะได้ Four-bar mechanism ที่จะโยกไปมา (Rocker) เท่านั้น



รูปที่ 2.13 Non-Grashof mechanism

ถ้า $s = p$ และ $q = l$ จะเป็น Deltoid หรือ Parallelogram linkage



รูปที่ 2.14 Parallelogram linkage

2.5 การสั่นสะเทือนทางกล (Mechanical vibration)

อุปกรณ์ ชิ้นส่วนทางกล หรือเครื่องจักรกลทั่วไปที่มีทั้งสภาพด้านการเคลื่อนที่ เช่น มวล หรือ โมเมนต์ความเฉื่อย และสภาพยืดหยุ่น เช่น ค่าคงตัวของสปริง ระบบทางกลนั้นจะสามารถ สั่นสะเทือนได้เสมอ ถ้าระบบทางกลนั้นถูกกระตุ้นให้สั่นด้วยความถี่ค่าหนึ่ง หรืออาจถูกทำให้สั่นด้วย แรงภายนอกโดยตรง แล้วทำให้ระบบทางกลมีการสั่น หรือเคลื่อนที่แบบซ้ำลักษณะเดียวกันอย่าง สม่ำเสมอในคาบที่พิจารณาเดียวกัน จะเรียกการเคลื่อนที่เช่นนี้ว่า การสั่นสะเทือนทางกล (Mechanical vibration)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสั่นสะเทือนทางกลนี้จำแนกออกเป็นสองแบบ ได้แก่ การสั่นสะเทือนอย่างอิสระ (Free vibration) และการสั่นสะเทือนแบบบังคับ (Force vibration) การสั่นสะเทือนแบบอิสระจะเกิดขึ้นเมื่อระบบทางกลนั้นถูกกระตุ้นให้สั่นอย่างต่อเนื่องด้วยความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ค่าหนึ่ง หรือหลายค่า โดยไม่ต้องอาศัยแรงกระตุ้นภายนอกอย่างต่อเนื่อง สมบัติของระบบทางกลที่นำไปสู่การสั่นสะเทือน ได้แก่ มวล และสภาพยืดหยุ่นได้ของระบบทางกลนั้น การสั่นสะเทือนแบบบังคับ จะเกิดขึ้นภายใต้การกระตุ้นระบบทางกลด้วยแรงภายนอกอย่างต่อเนื่อง ระบบจะสั่นด้วยความถี่ค่าเดียวกับความถี่ของแรงภายนอกที่มากระตุ้นนั้น ถ้าความถี่ของแรงภายนอกที่มากระตุ้นตรงกับความถี่ธรรมชาติของระบบทางกล จะทำให้ระบบทางกลดังกล่าวอยู่ภายใต้ภาวะของการสั่นพ้อง (Resonance) จึงทำให้เกิดการสั่นอย่างรุนแรง และอาจเกิดความเสียหายต่อระบบทางกลนั้นได้ เช่น การสั่นสะเทือนอันเกิดจากการเสียดสีขณะหมุนของชิ้นส่วนในเครื่องจักรกล หรือการสั่นสะเทือนของอาคารสิ่งก่อสร้างขณะแผ่นดินไหว ดังนั้นในระบบทางกลหนึ่งๆ จึงจำเป็นต้องคำนวณความถี่ธรรมชาติให้ได้

2.5.1 การสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free vibration)



รูปที่ 2.15 แสดงมวลติดสปริงแบบระดับชั้นเสรีเดี่ยวและ Free body diagram

$$\downarrow + \Sigma F_x = m\ddot{x} \quad (2.1)$$

$$-kx = m\ddot{x} \quad (2.2)$$

$$\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0 \quad (2.3)$$

$$\ddot{x} + \omega_n^2 x = 0 \quad (2.4)$$

สมการ (2.1) เป็นสมการของการเคลื่อนที่เชิงอนุพันธ์ของระบบที่มีการสั่นอย่างอิสระที่ไม่มีการหน่วงด้วยความถี่ธรรมชาติเชิงมุม (ω_n) คงที่ ทั้งนี้กำหนดให้

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m} \rightarrow \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.5)$$

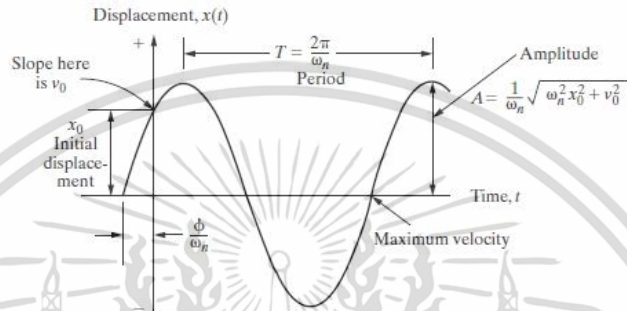
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ธรรมชาติ

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{2.6}$$

รูปสมการของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกจะเขียนในรูปของ

$$x(t) = A \sin(\omega_n t + \phi) \tag{2.7}$$



รูปที่ 2.16 การสั่นสะเทือนอย่างอิสระที่ไม่มีการหน่วง

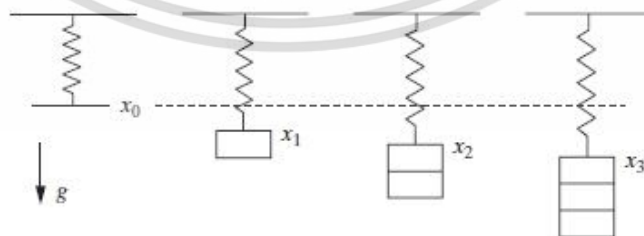
2.5.2 ชิ้นส่วนยืดหยุ่น (Elastic component)

ชิ้นส่วนยืดหยุ่นทำหน้าที่เก็บและปล่อยพลังงานศักย์ระหว่างการสั่นสะเทือน ตัวอย่างของชิ้นส่วนยืดหยุ่น ได้แก่ สปริงชนิดต่างๆ รวมถึงชิ้นส่วนอื่นๆ ที่ทำหน้าที่คล้ายสปริง จากกฎของฮุค (Hooke's law) แรงดึงสปริงจะแปรผันตรงกับระยะที่สปริงเปลี่ยนจากแนวสมดุล

$$F \propto x$$

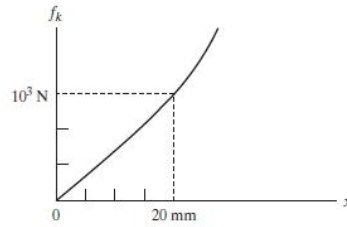
จากรูปที่ 2.17 จะได้ว่าแรงในสปริงมีความสัมพันธ์กับแรงภายนอกและระยะยืดดังสมการ

$$f_k = kx \tag{2.8}$$



รูปที่ 2.17 แสดงตำแหน่งสมดุลของระบบที่ไม่มีมวลและเมื่อเพิ่มมวลขึ้นตามลำดับ

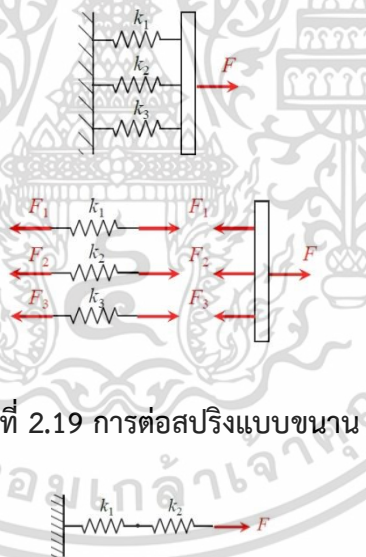
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



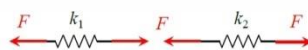
รูปที่ 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยืดหดของสปริง

โดย k คือค่าคงที่สปริง (Spring stiffness) ซึ่งอาจทราบค่าได้จากการทดลอง ค่าคงที่สปริงนี้จะทำให้ทราบว่าสปริงเสียรูปได้ง่ายหรือยากเพียงใดเมื่อมีแรงหรือแรงบิดมากระทำ โดยหากค่า k น้อยแสดงว่าสปริงเสียรูปง่าย หรืออาจเรียกว่าสปริงอ่อน แต่ถ้า k มีค่ามากแสดงว่าสปริงเสียรูปได้ยาก หรืออาจเรียกว่าสปริงแข็ง

ในระบบการสั่นสะเทือนนั้นอาจประกอบด้วยชิ้นส่วนยืดหยุ่นต่างๆ ประกอบอยู่ด้วยกัน ในการวิเคราะห์จะพิจารณาการประกอบกันของชิ้นส่วนยืดหยุ่น เป็นเช่นเดียวกับการต่อกันของสปริง ซึ่งมีรูปแบบการต่อพื้นฐานอยู่ 2 แบบ ได้แก่ การต่อแบบขนาน และการต่อแบบอนุกรม



รูปที่ 2.19 การต่อสปริงแบบขนาน



รูปที่ 2.20 การต่อสปริงแบบอนุกรม

การต่อสปริงแบบขนานจะเห็นว่าระยะยืดของสปริงทุกๆ ตัวจะมีค่าเท่ากัน และเมื่อพิจารณาแรงที่กระทำจะพบว่า ผลรวมของแรงที่กระทำกับสปริงแต่ละตัวจะมีค่าเท่ากับแรงรวมที่กระทำกับระบบดังแสดงด้วยสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \quad (2.9)$$

แทนความสัมพันธ์ของแรงกับค่าคงที่สปริงและระยะยืดลงในสมการ จะได้

$$k_{eq}\delta = k_1\delta + k_2\delta + k_3\delta \quad (2.10)$$

จะได้ว่า

$$k_{eq} = k_1 + k_2 + k_3 \quad (2.11)$$

โดย k_{eq} หมายถึงค่าคงที่สปริงของระบบรวมทั้งหมด จะเห็นว่าในการต่อแบบขนานนั้น ค่าคงที่สปริงจะเท่ากับผลบวกของค่าคงที่สปริงแต่ละตัว และสามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังสมการ

$$k_{eq} = \sum_{i=1}^n k_i \quad (2.12)$$

โดย n คือจำนวนสปริง

ในกรณีการต่อสปริงแบบอนุกรมนี้แรงที่กระทำกับสปริงแต่ละตัวจะมีค่าเท่ากัน แต่ระยะยืดของสปริงแต่ละตัวจะต่างกันหากค่าคงที่ของสปริงไม่เท่ากัน โดยระยะยืดรวมจะเท่ากับผลรวมระยะยืดของสปริงแต่ละตัว ดังนั้น

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \quad (2.13)$$

แทนความสัมพันธ์ของแรงกับค่าคงที่สปริงและระยะยืด จะได้

$$\frac{F}{k_{eq}} = \frac{F}{k_1} + \frac{F}{k_2} + \frac{F}{k_3} \quad (2.14)$$

จะได้ว่า

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \quad (2.15)$$

หรือเขียนในรูปทั่วไปได้ดังสมการ

$$k_{eq} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \right)^{-1} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การต่อกันของชิ้นส่วนยืดหยุ่นในระบบการสั่นสะเทือนมักจะพิจารณาเป็นการต่อกันแบบขนาน หรืออนุกรม อย่างไรก็ตามหากการต่อกันไม่สอดคล้องกับรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง ค่าคงที่ของสปริงรวมก็จะต้องหาได้โดยการพิจารณาความสัมพันธ์ของแรง ระยะยืดหด โดยตรง

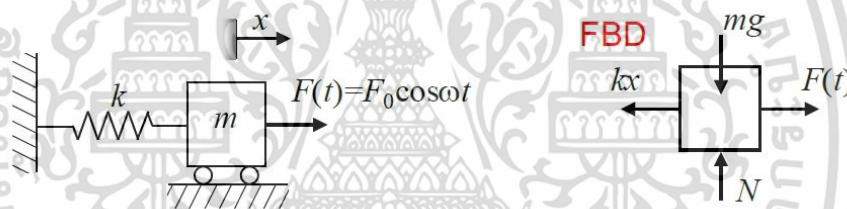
2.5.3 การสั่นสะเทือนแบบบังคับ (Force vibration)

รูปที่ 2.21 แสดงระบบการสั่นสะเทือนอย่างง่ายที่ไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน และมีแรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิกกระทำกับระบบ และแผนผังแรงที่กระทำกับมวล m สำหรับระบบในรูปจะสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้ดังสมการ

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = F_0 \cos \omega t \quad (2.17)$$

หรือ

$$\ddot{x}(t) + \omega_n^2 x(t) = F_0 \cos \omega t \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.21 ระบบการสั่นสะเทือนที่มีแรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิกกระทำกับระบบ

คำตอบหรือผลเฉลย $x(t)$ ของสมการ (2.17) และสมการที่ (2.18) ซึ่งแสดงลักษณะการสั่นสะเทือนของระบบ สามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วน ดังสมการด้วยสมการ

$$x(t) = x_h(t) + x_p(t) \quad (2.19)$$

โดย $x_h(t)$ เรียกว่า Homogeneous solution เป็นคำตอบของสมการ $m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0$ และ $x_p(t)$ เรียกว่า Particular solution เป็นคำตอบของสมการ $m\ddot{x}(t) + kx(t) = F_0 \cos \omega t$

เนื่องจาก $x_h(t)$ เป็นคำตอบของสมการ $m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0$ ซึ่งเป็นสมการแสดงการสั่นสะเทือนอย่างอิสระ ดังนั้น $x_h(t)$ จึงมีรูปแบบเช่นเดียวกับการสั่นสะเทือนแบบอิสระของระบบที่ไม่มีตัวหน่วงการสั่นสะเทือน ดังแสดงด้วยสมการ

$$x_h(t) = A_1 \sin \omega_n t + A_2 \cos \omega_n t \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$x_h(t) = A \sin(\omega_n t + \phi) \quad (2.21)$$

สำหรับ $x_p(t)$ ซึ่งเป็นคำตอบของสมการ (2.17) นั้น จากการสังเกตพฤติกรรมการสั่นสะท้อนของวัตถุเมื่อมีการกระตุ้นที่ความถี่ ω มากพอแล้ว วัตถุนั้นจะสั่นที่ความถี่ ω ด้วย และเนื่องจากการกระตุ้นอยู่ในรูปของฟังก์ชัน \cos ลักษณะคำตอบของสมการจึงต้องเป็นฟังก์ชัน \cos ด้วย ถึงจะทำให้เมื่อแทนคำตอบ $x_p(t)$ เข้าไปในสมการ (2.17) สมการจึงเป็นจริง ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้ว่า $x_p(t)$ ซึ่งแสดงถึงลักษณะการสั่นสะท้อนจะสามารถเขียนได้ในรูปของสมการ

$$x_p(t) = X \cos \omega t \quad (2.22)$$

โดย X เป็นขนาดของ $x_p(t)$ ซึ่งสามารถหาได้โดยการแทนค่า $x_p(t)$ ลงในสมการ (2.17) เมื่อแทนค่าแล้วจะได้

$$-\omega^2 m X \cos \omega t + k X \cos \omega t = F_0 \cos \omega t \quad (2.23)$$

$$X = \frac{F_0}{k - m\omega^2} \quad (2.24)$$

ดังนั้นค่า $x_p(t)$ คือ

$$x_p(t) = \frac{F_0}{k - m\omega^2} \cos \omega t \quad (2.25)$$

เมื่อรวมคำตอบทั้งสองส่วนเข้าด้วยกัน จะได้ลักษณะการสั่นสะท้อนเมื่อมีการกระตุ้นด้วยความถี่ ω มากพอทำกับระบบดังสมการ

$$\begin{aligned} x(t) &= x_h(t) + x_p(t) \\ &= A_1 \sin \omega_n t + A_2 \cos \omega_n t \\ &\quad + \frac{F_0}{k - m\omega^2} \cos \omega t \end{aligned} \quad (2.26)$$

โดยค่าคงที่ A_1 และ A_2 สามารถหาได้จากเงื่อนไขค่าเริ่มต้น

สำหรับสมการที่ (2.26) แสดงให้เห็นว่าเมื่อให้การกระตุ้นที่ความถี่ ω กับระบบ ระบบจะสั่นที่ความถี่สองความถี่ ได้แก่ ความถี่ธรรมชาติ ω_n และความถี่ที่เท่ากับความถี่ที่มากกระตุ้น ω โดยขนาดของการสั่นที่เท่ากับความถี่ที่มากกระตุ้น ω จะขึ้นอยู่กับขนาดของการกระตุ้น และสมบัติของ

ระบบ ได้แก่ความแข็งสปริง และมวล ส่วนขนาดของการสั่นที่ความถี่ธรรมชาติ ω_n จะขึ้นกับสภาวะเริ่มต้นของการสั่นเท่านั้น

ขนาดของการสั่นสะท้อนเนื่องจากการกระตุ้นภายนอก $x_p(t)$ จะขึ้นอยู่กับขนาดของการกระตุ้น และสมบัติของระบบ อย่างไรก็ตามขนาดการสั่นสะท้อน $x_h(t)$ จะขึ้นกับเงื่อนไขเริ่มต้นการสั่นสะท้อน ดังแสดงด้วยเทอมค่าคงที่ A_1 และ A_2 ในสมการ (2.26) ค่าคงที่เหล่านี้สามารถหาได้ดังวิธีแสดงในตัวอย่างต่อไปนี้

สมมติให้เงื่อนไขเริ่มต้น เมื่อเริ่มสั่นสะท้อน วัตถุอยู่ที่ตำแหน่ง x_0 และวัตถุมีความเร็ว v_0 จะสังเกตว่า ค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่าในสมการที่ (2.26) มีทั้งหมด 2 ตัว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เงื่อนไขค่าเริ่มต้น 2 ตัวในการแก้ปัญหานี้ เมื่อแทนเงื่อนไข x_0 ลงในสมการ (2.26) จะได้

$$A_2 = x_0 - \frac{F_0}{k - m\omega^2} \quad (2.27)$$

ความเร็วการเคลื่อนที่หาได้โดยอนุพันธ์ของสมการที่ (2.27) ดังนี้

$$\dot{x}(t) = A_1 \omega_n \cos \omega_n t - A_2 \omega_n \sin \omega_n t - \frac{F_0 \omega}{k - m\omega^2} \sin \omega t \quad (2.28)$$

แทนเงื่อนไข v_0 ลงสมการ (2.28) จะได้

$$A_1 = \frac{v_0}{\omega_n} \quad (2.29)$$

แทนค่า A_1 และ A_2 ที่หาได้ลงในสมการ (2.26) จะได้สมการแสดงการเคลื่อนที่ดังนี้

$$x(t) = \frac{v_0}{\omega_n} \sin \omega_n t + \left(x_0 - \frac{f_0}{\omega_n^2 - \omega^2} \right) \cos \omega_n t + \frac{f_0}{\omega_n^2 - \omega^2} \cos \omega t \quad (2.30)$$

2.5.4 การสั่นพ้อง (Resonance)

เมื่อความถี่ของการกระตุ้นมีค่าเท่ากับความถี่ธรรมชาติของระบบ ขนาดของการสั่นสะท้อนจะมีค่ามาก เรียกว่า การสั่นพ้อง (Resonance) ในระบบจริงเมื่อให้การกระตุ้นที่ความถี่ธรรมชาติขนาดการสั่นสะท้อนจะค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเกินกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุยืดหยุ่นจะรับไว้ได้ระบบจะพังลง ในกรณีการสั่นพ้องสมการซึ่งแสดงค่า x_p สามารถเขียนได้ดังนี้

$$x_p(t) = tX \sin \omega t \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย X คือตัวแปรที่แสดงความเร็วในการเพิ่มขึ้นของขนาดการสั่นสะเทือน ส่วนความถี่ $\omega = \omega_n$ จากสมการที่ (2.26) จะได้

$$\dot{x}_p(t) = X\sin\omega t + t\omega X\cos\omega t \quad (2.32)$$

$$\ddot{x}_p(t) = 2\omega X\cos\omega t - t\omega^2 X\sin\omega t \quad (2.33)$$

ค่า X หาได้โดยการแทนค่า x_p และ \ddot{x}_p ลงในสมการการเคลื่อนที่ (2.17) จะได้

$$2\omega X\cos\omega t - t\omega^2 X\sin\omega t + \omega^2 tX\sin\omega t = f_0\cos\omega t \quad (2.34)$$

$$X = \frac{f_0}{2\omega} \quad (2.35)$$

$$x_p(t) = \frac{f_0}{2\omega} t\sin\omega t \quad (2.36)$$

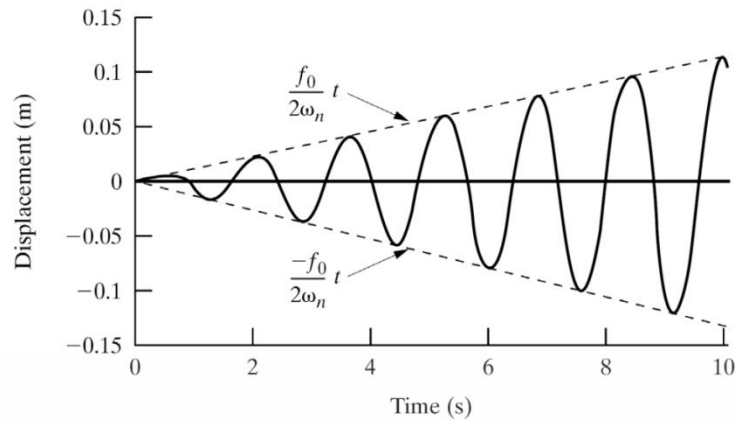
เมื่อรวมการสั่นสะเทือนทั้งหมดซึ่งเป็นผลมาจาก x_p ในสมการ (2.20) และ x_p ในสมการ (2.31) โดยความถี่ $\omega = \omega_n$ หากกำหนดเงื่อนไขค่าเริ่มต้นให้ $x(0) = x_0$ และ $\dot{x}(0) = v_0$ จะสามารถหาค่าคงที่ A_1 และ A_2 ได้จากการแทนเงื่อนไขเริ่มต้นลงในสมการ (2.32) และ (2.33)

$$x = A_1\sin\omega t + A_2\cos\omega t + \frac{f_0}{2\omega} t\sin\omega t \quad (2.37)$$

$$\dot{x} = A_1\omega\cos\omega t - A_2\omega\sin\omega t + \frac{f_0}{2\omega}\sin\omega t + \frac{f_0}{2}t\cos\omega t \quad (2.38)$$

จะได้ $A_2 = x_0$ และ $A_1 = \frac{v_0}{\omega}$ เมื่อแทนค่าคงที่ที่ได้ลงในสมการ (2.32) จะได้สมการ

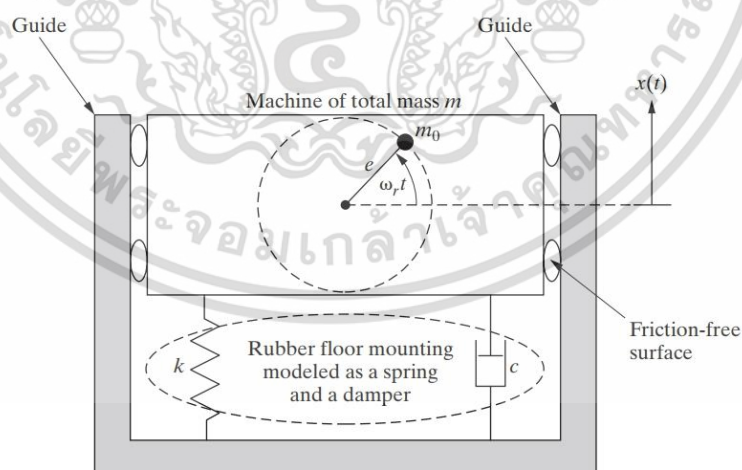
$$x = \frac{v_0}{\omega}\sin\omega t + x_0\cos\omega t + \frac{f_0}{2\omega}t\sin\omega t \quad (2.39)$$



รูปที่ 2.22 การสั่นพ้องเมื่อเงื่อนไขค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์

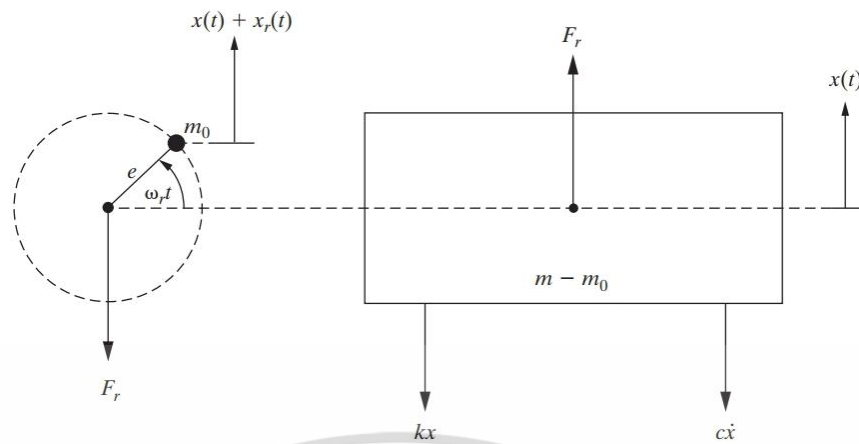
2.5.5 การสั่นสะเทือนจากความไม่สมดุลจากการหมุน (Rotating unbalance)

ในการหมุนนั้น หากชิ้นส่วนมีความไม่สมดุลจะเกิดแรงหนีศูนย์กลางขึ้น แรงนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างมากในชิ้นส่วนที่หมุนด้วยความเร็วรอบสูง และเป็นต้นเหตุสำคัญของปัญหาการสั่นสะเทือนสามารถจำลองได้ด้วยแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 2.23 โดยกลองสี่เหลี่ยมแทนเครื่องจักรที่เกิดความไม่สมดุล (มวลนี้รวมมวลที่ไม่สมดุลอยู่ด้วย) โดยมวลนี้ถูกรองรับด้วยสปริง และตัวหน่วงการสั่นสะเทือน เช่นเดียวกับระบบการสั่นสะเทือนโดยทั่วไป ส่วนความไม่สมดุลจากการหมุนสามารถแทนได้ด้วยมวล m_0 ซึ่งหมุนรอบแกนกลางของเครื่องจักร โดยตำแหน่งที่มีมวลไม่สมดุลติดอยู่เกิดที่ตำแหน่งห่างจากจุดหมุน e วัดตามแนวรัศมี ความเร็วรอบการหมุน ω



รูปที่ 2.23 แบบจำลองการสั่นสะเทือนจากความไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 Free body diagram ของการเสียดสมดุลขณะหมุน

จากรูปที่ 2.24 สามารถเขียนสมการแสดงการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$m_0(\ddot{x} + \ddot{x}_r) = -F_r \quad (2.40)$$

$$(m - m_0)\ddot{x} = F_r - c\dot{x} - kx \quad (2.41)$$

$$x_r = e \sin \omega_r t \quad (2.42)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.40) ถึงสมการที่ (2.42) จะได้สมการการเคลื่อนที่ของการสั่นสะเทือนจากการหมุนที่ไม่สมดุลดังสมการ

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m_0 e \omega_r^2 \sin \omega_r t \quad (2.43)$$

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปความถี่ธรรมชาติ และอัตราส่วนการหน่วงได้ดังสมการ

$$\ddot{x} + 2\delta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x = \frac{m_0 e}{m} \omega_r^2 \sin \omega_r t \quad (2.44)$$

สมการที่ (2.43) หรือ (2.44) อยู่ในรูปแบบของสมการการสั่นสะเทือนแบบบังคับโดยทั่วไป

2.6 มอเตอร์ไฟฟ้า (Electric motor)

มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ประกอบด้วยขดลวดที่พันรอบแกนโลหะที่วางอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็ก โดยเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังขดลวดที่อยู่ระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้วแม่เหล็ก จะทำให้ขดลวดหมุนไปรอบแกน ใช้ในการควบคุมเครื่องจักรกลต่างๆ แบ่งตามลักษณะการใช้งานกระแสไฟฟ้าได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current motor) หรือ ดี.ซี. มอเตอร์ (D.C. motor) เป็นมอเตอร์ที่ใช้กับระบบไฟฟ้ากระแสตรง มีข้อดีคือ สามารถควบคุมแรงบิด และความเร็วได้ง่าย การปรับความเร็วสามารถทำได้ในช่วงกว้าง และมีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current motor) หรือ เอ.ซี. มอเตอร์ (A.C. motor) เป็นมอเตอร์ที่ใช้กับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ มีข้อดีคือ เป็นที่นิยมสามารถหาซื้อได้ง่าย ประสิทธิภาพสูง ราคาต่ำ ลักษณะโครงสร้างไม่ซับซ้อน และเล็กกว่าเมื่อเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในพิกัดกำลังเท่ากัน แบ่งออกเป็นสองชนิด ได้แก่ ชนิดหนึ่งเฟส (Single-Phase) และชนิดสามเฟส (Three-phase)

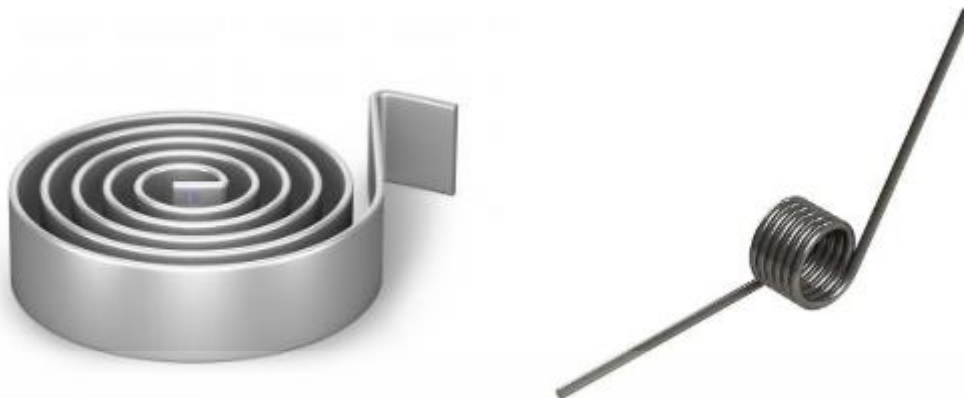
2.7 สปริง (Spring)

สปริงเป็นชิ้นส่วนที่มีความยืดหยุ่น ใช้ในการให้แรงหรือแรงบิด ในขณะเดียวกันก็ใช้สำหรับเก็บพลังงานได้เช่นกัน แรงที่เกิดขึ้นอาจเป็นแรงผลัก แรงดึง หรือแรงในแนวรัศมี สปริงจะเก็บพลังงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความยาวหรือรูปร่างตามชนิดของสปริงที่เลือกใช้ และถ่ายเทพลังงานออกมาเมื่อมีการคืนรูปเดิม

สปริงมีลักษณะเป็นลวดนำมาขดเป็นวงรูปทรงกระบอก มีคุณสมบัติยืดหยุ่นได้เมื่อมีแรงกระทำ โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด เส้นผ่านศูนย์กลางของสปริง ความยาว และวัสดุที่ใช้ สปริงถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานหลายประเภทแล้วแต่ความเหมาะสม สามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่ สปริงตืด สปริงดึง สปริงกด และแหวนสปริงงาน

1 สปริงตืด (Torsion spring)

สปริงตืดเป็นสปริงที่รับแรงกดหรือแรงบีบในลักษณะที่เป็นแนวเส้นรอบวง รูปร่างลักษณะเป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่ตายตัว สามารถออกแบบรูปร่างของสปริงให้เหมาะสมกับงานได้เป็นอย่างดี เหมาะสำหรับงานพวกชิ้นส่วนอะไหล่เครื่องจักร ยานยนต์ และชิ้นส่วนอะไหล่เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ



รูปที่ 2.25 สปริงดัด - สปริงดัด

2 สปริงดึง (Tension spring)

สปริงดึงเป็นสปริงที่ใช้สำหรับรับแรงดึง โดยสปริงชนิดนี้จะมีคุณสมบัติคือลักษณะการขดตัวของสปริงจะมีความหนาแน่นกว่าสปริงชนิดอื่น ปลายทั้ง 2 ข้างจะเป็นตะขอหรือห่วงเพื่อใช้สำหรับเกี่ยวหรือแขวนกับอุปกรณ์อื่น ลักษณะการทำงานเมื่อมีแรงดึง สปริงจะยืดตัวออกในระยะห่างที่เท่ากัน



รูปที่ 2.26 สปริงดึง

3 สปริงกด (Compression spring)

สปริงกด หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สปริงดัน เป็นสปริงที่ใช้สำหรับรับแรงกดหรือแรงดัน โดยลักษณะของเกลียวลวดจะมีระยะห่างที่เท่ากัน งานที่ใช้สปริงกดส่วนใหญ่จะเป็นงานชิ้นส่วนอะไหล่ยานยนต์ เครื่องจักรอุตสาหกรรม เฟอร์นิเจอร์ และเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 2.27 สปริงกวด

4 แหวนสปริงจาน (Disc spring)

แหวนสปริงจาน หรือแหวนดิสสปริง มีลักษณะคล้ายแหวนรองน็อต แต่แหวนสปริงจานจะมีลักษณะโค้งเหมาะกับการรับแรงสูงใช้ในที่แคบได้ดี การติดตั้งสามารถวางลงในชิ้นงานได้หลากหลายรูปแบบ ช่วยให้สามารถรับแรงได้จากหลายทิศทาง



รูปที่ 2.28 แหวนสปริงจาน

2.7.1 วัสดุที่ใช้ทำสปริง

วัสดุที่ใช้ทำสปริงนั้นมีส่วนสำคัญสำหรับการออกแบบให้สปริงมีคุณสมบัติเป็นไปตามที่ต้องการ ประกอบด้วยคาร์บอนธรรมดา (Plain carbon steels) โลหะอัลลอยด์ (Alloy steels) และเหล็กกล้าต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion-resisting steels) รวมทั้งโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก เช่น โลหะสัมฤทธิ์ (Phosphor bronze) ทองเหลือง (Brass) ทองแดงเบริลเลียม (Beryllium copper) และนิกเกิลอัลลอยด์ (Various nickel alloys) เป็นต้น คุณสมบัติของสปริงที่ทำมาจากวัสดุเบื้องต้น แสดงดังตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่นำไปทำสปริง

Name of Material	Similar Specifications	Description
Music wire, 0.80–0.95C	UNS G10850 AISI 1085 ASTM A228-51	This is the best, toughest, and most widely used of all spring materials for small springs. It has the highest tensile strength and can withstand higher stresses under repeated loading than any other spring material. Available in diameters 0.12 to 3 mm (0.005 to 0.125 in). Do not use above 120°C (250°F) or at subzero temperatures.
Oil-tempered wire, 0.60–0.70C	UNS G10650 AISI 1065 ASTM 229-41	This general-purpose spring steel is used for many types of coil springs where the cost of music wire is prohibitive and in sizes larger than available in music wire. Not for shock or impact loading. Available in diameters 3 to 12 mm (0.125 to 0.500 in), but larger and smaller sizes may be obtained. Not for use above 180°C (350°F) or at subzero temperatures.
Hard-drawn wire, 0.60–0.70C	UNS G10660 AISI 1066 ASTM A227-47	This is the cheapest general-purpose spring steel and should be used only where life, accuracy, and deflection are not too important. Available in diameters 0.8 to 12 mm (0.031 to 0.500 in). Not for use above 120°C (250°F) or at subzero temperatures.
Chrome-vanadium	UNS G61500 AISI 6150 ASTM 231-41	This is the most popular alloy spring steel for conditions involving higher stresses than can be used with the high-carbon steels and for use where fatigue resistance and long endurance are needed. Also good for shock and impact loads. Widely used for aircraft-engine valve springs and for temperatures to 220°C (425°F). Available in annealed or pretempered sizes 0.8 to 12 mm (0.031 to 0.500 in) in diameter.
Chrome-silicon	UNS G92540 AISI 9254	This alloy is an excellent material for highly stressed springs that require long life and are subjected to shock loading. Rockwell hardnesses of C50 to C53 are quite common, and the material may be used up to 250°C (475°F). Available from 0.8 to 12 mm (0.031 to 0.500 in) in diameter.

2.7.2 การคำนวณเพื่อการออกแบบสปริงเบื้องต้น

ในการออกแบบสปริงนั้นจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่หลากหลาย และมีความครอบคลุมมากที่สุด เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการใช้งาน หากเป็นการออกแบบเบื้องต้นเพื่อให้ได้สปริงที่มีความเหมาะสมกับชุดอุปกรณ์หรือระบบนั้น โดยส่วนใหญ่จะทำการคำนวณเพื่อหาค่าคงที่ของสปริง เนื่องจากเป็นตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์แรงที่สปริงจะสามารถรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ของสปริงสามารถหาได้จากสมการ

$$k = \frac{d^4 G}{8D^3 N} \quad (2.45)$$

เมื่อกำหนดให้ k คือ ค่าคงที่ของสปริง (Stiffness constant or Spring rate)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดสปริง (Wire diameter)

G คือ โมดูลัสสภาพยืดหยุ่นเฉือน (Torsional modulus of elasticity)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของสปริง (Mean coil diameter)

N คือ จำนวนขดของสปริง (Number of coils)

อีกหนึ่งตัวแปรที่สำคัญสำหรับการออกแบบสปริงคือ ค่าดัชนีสปริง (Spring index) มีค่าแนะนำ 4 – 12 สามารถหาได้จากสมการ

$$c = \frac{D}{d} \quad (2.46)$$

เมื่อกำหนดให้ c คือ ค่าดัชนีสปริง (Spring index)

2.8 โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia)

การพิจารณาถึงความแข็งแรงของชิ้นส่วนที่ประกอบเป็นโครงสร้างจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อพิจารณาถึงรูปลักษณะพื้นที่หน้าตัดของคาน ถ้ากรณีพื้นที่หน้าตัดมีขนาดต่างกันย่อมทำให้ความแข็งแรงหรือความสามารถในการรับน้ำหนักแตกต่างกัน และเมื่อมีการกระจายอย่างต่อเนื่องกระทำต่อพื้นที่หน้าตัดจะทำให้ความเค้นของแรงเป็นสัดส่วนกับระยะทางจากแนวแรงถึงแกนของโมเมนต์สมบัติของพื้นที่หน้าตัดที่มีผลต่อการกระจายของแรงดังกล่าวนี้เรียกว่า โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (Area Moment of Inertia)

ในการหาโมเมนต์ความเฉื่อยสามารถหาได้จากสมการ

$$I_x = \int y^2 dA \quad (2.47)$$

$$I_y = \int x^2 dA \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

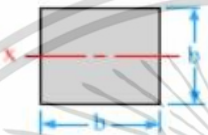


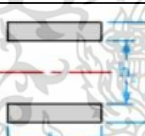
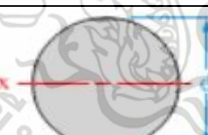

เมื่อกำหนดให้ I_x คือ โมเมนต์ความเฉื่อยในแนวแกน x

I_y คือ โมเมนต์ความเฉื่อยในแนวแกน y

A คือ พื้นที่ (Area)

สำหรับการหาโมเมนต์ความเฉื่อยของรูปทรงเรขาคณิตอย่างง่ายได้แสดงดังตารางที่ 2.2

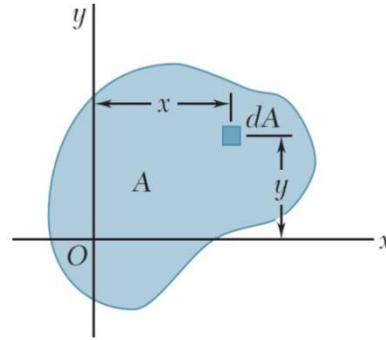
ตารางที่ 2.2 สูตรการหาโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่รูปทรงเรขาคณิตอย่างง่าย

รูปพื้นที่หน้าตัด	โมเมนต์ความเฉื่อย (I)
	$I_x = \frac{b^4}{12}$
	$I_x = \frac{bh^3}{12}$
	$I_x = \frac{bh^3 - b_1h_1^3}{12}$
	$I_x = \frac{b(h^3 - h_1^3)}{12}$
	$I_x = \frac{\pi d^4}{12}$
	$I_x = \frac{\pi(d^4 - d_1^4)}{12}$

2.8.1 การเคลื่อนย้ายแกนโมเมนต์ความเฉื่อย

ปกติแล้วแกนหมุนสำหรับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ใดๆ จะผ่านจุดศูนย์กลางมวล (Center of mass) ของพื้นที่นั้นๆ แต่ถ้าหากแกนหมุนไม่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล ดังรูปที่ 2.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 การย้ายแกนโมเมนต์ความเฉื่อย

สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยของแกนหมุนใหม่นี้กับโมเมนต์ความเฉื่อยซึ่งมีแกนหมุนผ่านจุดศูนย์กลางมวลได้ แต่ต้องมีเงื่อนไขว่าแกนหมุนใหม่จะต้องขนานกับแกนหมุนที่ผ่านจุดศูนย์กลาง (Centroid) ของพื้นที่นั้นเสมอ โดยใช้ทฤษฎีแกนขนาน (Parallel-axis theorem)

$$I_x = \bar{I}_x' + Ad^2 \quad (2.49)$$

เมื่อกำหนดให้ I_x คือ โมเมนต์ความเฉื่อยใหม่ในแนวแกน x

\bar{I}_x' คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเดิมในแนวแกน x

A คือ พื้นที่ (Area)

d คือ ระยะห่างระหว่างแกนหมุนทั้งสอง

2.9 การสันสะท้อนในคาน

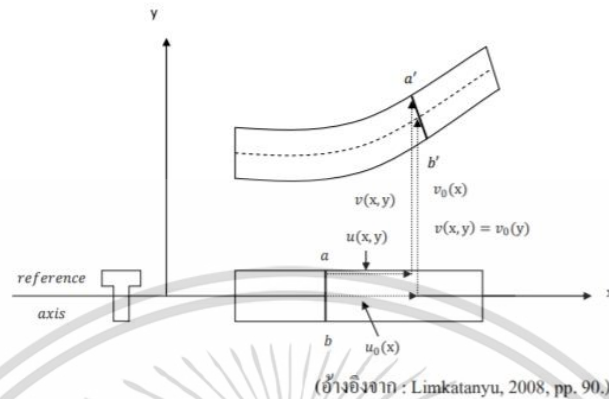
จะมีการกล่าวถึงเมื่อมีการใช้ในการวิเคราะห์หลังการติดตั้งชุดทดลอง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในบทที่ 5 ต่อไป

2.9.1 ทฤษฎีการวิเคราะห์คานของ Euler-Bernoulli (Euler-Bernoulli Beam Theory)

ทฤษฎีการวิเคราะห์คานของ Euler-Bernoulli มีสมมุติฐาน คือระนาบหน้าตัดของ คาน ยังคงเป็นระนาบเดิม หลังจากเกิดการเปลี่ยนรูปเนื่องจากการดัด (Plane Section Remain Plane) และระนาบยังคงตั้งฉากกับหน้าตัดตามแกนแนวยาวของคานที่เราพิจารณาก่อนเกิดการเปลี่ยนรูป เนื่องจากการดัด (Plane Section Normal to the Longitudinal Axis) การเคลื่อนที่ทางกลศาสตร์สามารถอธิบายการเปลี่ยนรูปของหน้าตัดคานที่พิจารณาได้ดังแสดงในรูปที่ 2.30 ซึ่งจากรูปจุด ab

เป็นจุดที่พิจารณาก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงรูป โดยที่หลังจากเกิดการเปลี่ยนแปลงรูป จุดที่เราเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาเปลี่ยนแปลง ณ จุด 'a' 'b' จะสังเกตได้ว่า จุด 'a' 'b' ยังคงอยู่ระยะนาบเดิมและตั้งฉากกับแนวอ้างอิงตามยาวของหน้าตัด (อ้างอิงจาก Limkatanyu, 2008)



รูปที่ 2.30 อธิบายการเคลื่อนที่ทางกลศาสตร์ของหน้าตัดที่พิจารณาภายใต้ผลเนื่องจากการตัด

2.9.2 ลักษณะการสั่นสะเทือนของคานในขอบเขตปลายอิสระทั้งสองด้าน

โมเมนต์ตัดเป็นผลที่เกิดจากการที่คานถูกแรงเฉือนพยายามเฉือนให้คานขาดออกจากกันจนเกิดการโค้งงอของคาน เราสามารถอธิบาย The bending vibrations of a beam ดังสมการที่ 2.50

$$\frac{\partial^2 \omega(x, t)}{\partial t^2} + c^2 \frac{\partial^4 \omega(x, t)}{\partial x^4} = 0, c = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2.50)$$

การเคลื่อนที่ที่จะเป็นแบบ free vibration เมื่อไม่มีแรงภายนอกมากระทำกับระบบและค่า $EI(x)$ และ $A(x)$ เป็นค่าคงที่ โดยค่า E คือ the Young Modulus I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัด (second moment of area of the cross section) ρ คือ ความหนาแน่น (density) A คือ พื้นที่หน้าตัดของคาน (cross section area of the beam) L คือ ความยาวของคาน (the length of the beam)

ผลเฉลยของสมการที่ 2.50 สามารถเขียนการเคลื่อนที่ของคลื่นนิ่งอยู่ในรูปแบบฟังก์ชัน $y(x, t) = X(x)u(t)$ ซึ่งผลเฉลยจะขึ้นอยู่กับ 2 ฟังก์ชันคือฟังก์ชันเชิงพื้นที่และฟังก์ชันของเวลา และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นไปตามสมการลักษณะเฉพาะ (characteristic equation) ที่เกี่ยวข้องกับความเร็ว ω และจำนวนลูกคลื่นต่อระยะทาง β ดังสมการที่ 2.51

$$\beta^4 = \frac{\omega^2}{c^2} = \frac{\rho A \omega^2}{EI} \text{ (so that } \omega = \beta^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \text{ rad/s)} \quad (2.51)$$

ดังนั้นสมการผลเฉลยเชิงพื้นที่ที่สามารถเขียนได้เป็นดังสมการที่ 2.52

$$X(x) = a_1 \sin \beta x + a_2 \cos \beta x + a_3 \sinh \beta x + a_4 \cosh \beta x \quad (2.52)$$

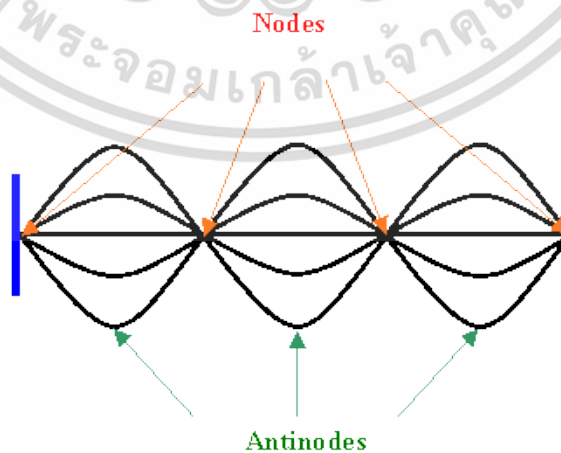
ในที่นี้ค่า β และ 3 ใน 4 ค่าคงที่ a_1, a_2, a_3 และ a_4 ของผลเฉลยสามารถหาได้จากเงื่อนไขขอบ (Boundary conditions) และเงื่อนไขค่าเริ่มต้น $t=0$ (Initial conditions) และเงื่อนไขการสั่นสะเทือนของคานแบบ free-free นั้นจะมีเงื่อนไขเมื่อไม่คิดค่าแรงและโมเมนต์

ดังต่อไปนี้

$$\begin{cases} x'(0) \\ x''(0) \\ x''(L) \\ x''(L) \end{cases} \text{ จะได้ } \begin{cases} -a_2 + a_4 = 0 \\ -a_1 + a_3 = 0 \\ -a_1 \sin(\beta L) - a_2 \cos(\beta L) + a_3 \sinh(\beta L) + a_4 \cosh(\beta L) = 0 \\ -a_1 \cos(\beta L) + a_2 \sin(\beta L) + a_3 \cosh(\beta L) + a_4 \sinh(\beta L) = 0 \end{cases}$$

คลื่นนิ่ง (standing wave or stationary wave) ที่เป็นผลลัพธ์ของการสั่นสะเทือนของคานดังสมการที่ 2.53 นั้นเป็นผลมาจากผลรวมของคลื่นที่เหมือนกันสองคลื่นที่เคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้ามดังรูปที่ 2.31

$$\begin{aligned} y(x, t) &= y_+(x, t) + y_-(x, t) \\ &= Y_0 \sin(\omega t - kx) + Y_0 \sin(\omega t + kx) \\ &= 2Y_0 \sin(kx) \cos(\omega t) \\ &= w(x)u(t) \end{aligned} \quad (2.53)$$



รูปที่ 2.31 ลักษณะคลื่นนิ่ง (a standing wave)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำสมการที่ 2.52 และ 2.53 มาจัดให้อยู่ในรูปเมทริกซ์จะได้เป็นดังสมการที่ 2.54

$$\begin{bmatrix} \sinh(\beta L) - \sin(\beta L) & \cosh(\beta L) - \cos(\beta L) \\ \cosh(\beta L) - \cos(\beta L) & \sin(\beta L) + \sinh(\beta L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

และผลเฉลยของเมทริกซ์นี้เป็นผลเฉลยไม่ซัด (non-trivial solution) และเพื่อให้ค่าคงที่ a_1, a_2 เป็นจริงดีเทอร์มิแนนต์(determinant) ของระบบต้องไม่มีค่าหรือถูกกำจัดออกไปตามสมการที่ 2.55

$$\cosh(\beta L) \cos(\beta L) = 1 \quad (2.55)$$

จากหลักการของสมการที่ 2.55 นั้นจะมีผลเฉลยที่มีมากมาย (infinite solution) ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยวิธี numerically ซึ่งคำตอบ 5 ค่าแรกจะเป็นไปตามตารางที่ 2.3 ในเงื่อนไขคือการสั่นสะเทือนของคานในขอบเขตปลายอิสระทั้งสองด้าน (free-free)

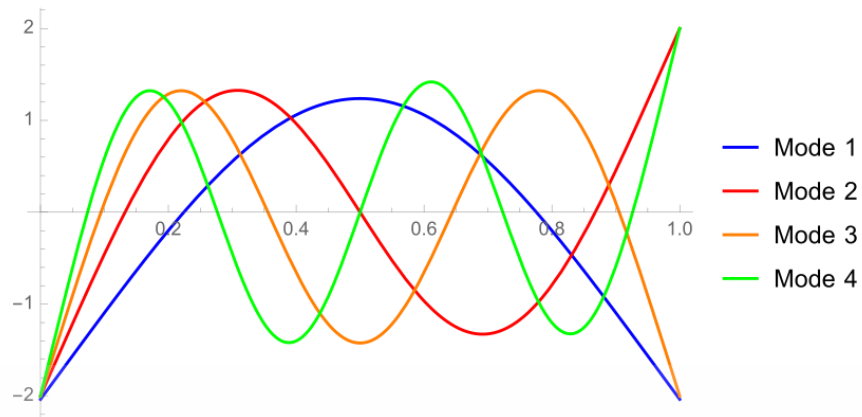
ตารางที่ 2.3 คำตอบรูปทั่วไปของการสั่นสะเทือนของคานในขอบเขตปลายอิสระทั้งสองด้าน

Mode order n	$\beta_n L$
1	4.73
2	7.8532
3	10.9956
4	14.1371

จากสมการที่ 2.55 สามารถหา ความถี่ธรรมชาติ ω_n ได้เป็นไปตามสมการที่ 2.56

$$\omega_n = \beta_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \text{ rad/s} , \text{ and } f_n = \frac{\beta_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \text{ Hz} \quad (2.56)$$

นำค่าที่ได้มาจากตารางที่ 2.3 เงื่อนไขการเคลื่อนที่แบบ ปลายอิสระทั้งสองด้าน (free-free) ใส่กลับเข้าไปในสมการที่ 2.55 จะได้ รูปร่างการสั่นสะเทือน (mode shape) ของคานภายใต้เงื่อนไขปลายอิสระทั้งสองด้าน ที่ตรงกับความถี่ธรรมชาติ ω_n ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 รูปร่างการสั่นสะเทือนของคานภายใต้เงื่อนไขปลายอิสระทั้งสองด้าน 1-4 รูปร่างแรก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการคำนวณ

เนื่องจากโครงการนี้เป็นโครงการต่อเนื่อง จึงขออ้างอิงการศึกษาข้อควรปรับปรุงของระบบเดิม ในส่วนของการลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง ตั้งแต่บริเวณที่ออกจากสกรูลำเลียงถึงทางเข้าห้องเผาไหม้ช่วย เพื่อที่จะสามารถคำนวณและออกแบบพัฒนาชุดทดลองให้สามารถทำงานได้ต่อเนื่อง ในหัวข้อนี้จะนำเสนอถึงการออกแบบโครงสร้างและตำแหน่งติดตั้งของภาคสันสะเทือน รวมไปถึงรายละเอียดการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีต่างๆ ที่ได้เสนอในบทที่ 2 ได้แก่ การสันสะเทือนทางกล และการออกแบบสปริง เป็นต้น

3.1 การวิเคราะห์ข้อควรปรับปรุงของระบบเดิมในส่วนของการลำเลียงเชื้อเพลิง

ในการลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงตั้งแต่ออกจากสกรูลำเลียงถึงทางเข้าห้องเผาไหม้ช่วยของระบบเดิมนั้น จะใช้ท่อคูดอเนกประสงค์ทึนน้ำมัน ทำจากวัสดุ PVC อ่อนเสริมลวดสปริง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว ต่อจากสกรูลำเลียงเข้าห้องเผาไหม้ช่วย และใช้เชือกผุยดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบการลำเลียงเชื้อเพลิงชนิดผงแบบเดิม

ลมที่ใช้ในระบบทั้งหมดเมื่อคิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ จะถูกแบ่งออกเป็นสามส่วน โดยลมส่วนแรกจะใช้ในการลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ระบบ ลมส่วนที่สองจะถูกบ่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพื่อใช้ในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เผาไหม้ และลมส่วนที่สามจะถูกป้อนเข้าสู่เตาเพื่อใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เหลือจากการเผาไหม้ในช่วงแรก จากการทดลองให้ลมที่ใช้ในระบบลำเลียงเท่ากับ 15 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ของลมทั้งหมดที่อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง 300 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมงแล้ว จะพบว่าเกิดปัญหาเชื้อเพลิงกองคืดเป็นเปอร์เซ็นต์ดังตารางที่ 3.1 เนื่องจากแนวท่อมีลักษณะโค้งงอด้วยน้ำหนักที่มากและการใช้เชือกพยุงเป็นการรับน้ำหนักเฉพาะจุดเท่านั้น

ตารางที่ 3.1 ผลการทดลองการลำเลียงเชื้อเพลิงที่ความเร็วลมต่างๆ

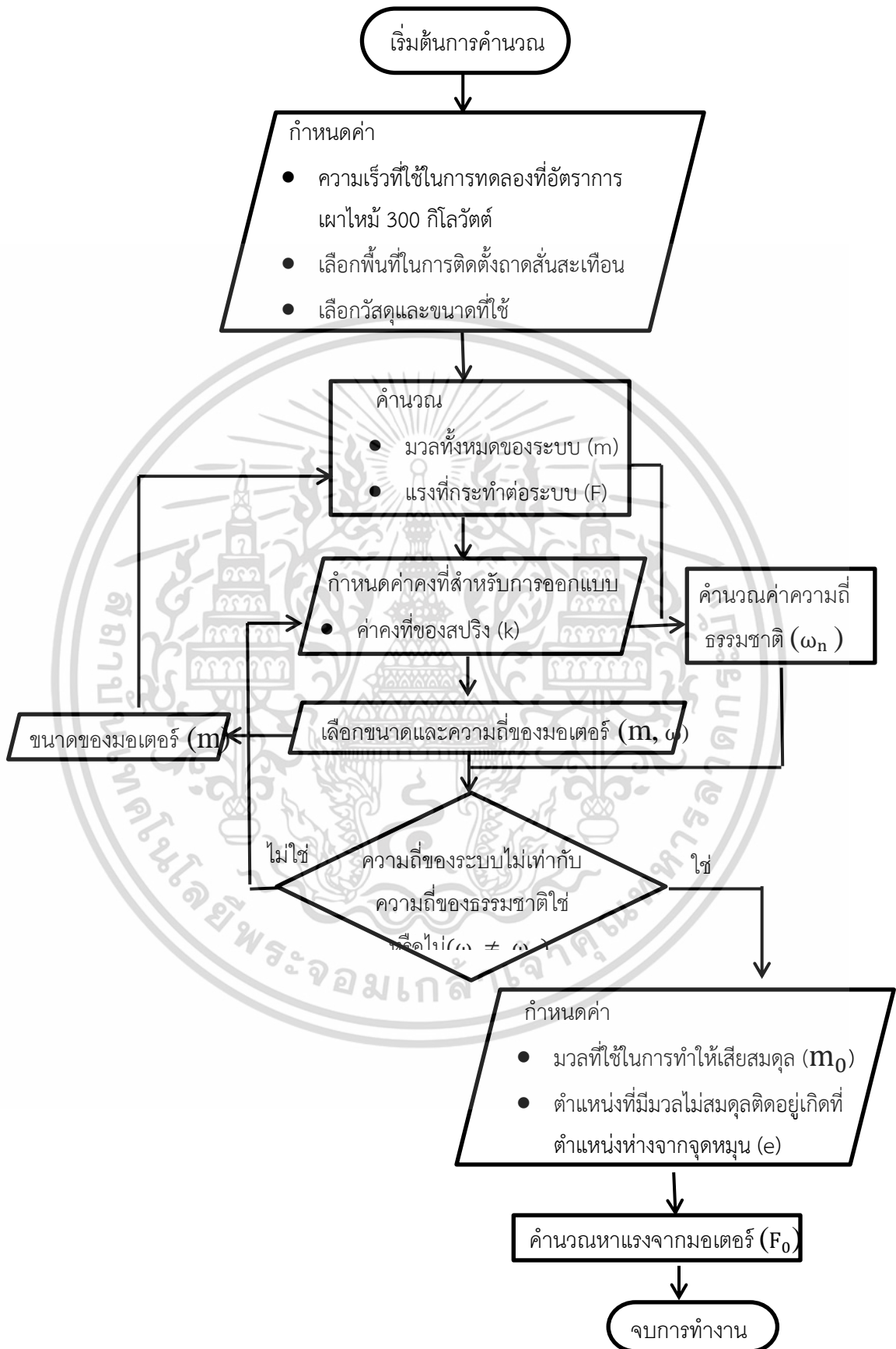
อัตราส่วนของลมที่ใช้ในระบบทั้งหมด 100 % (ลม1:ลม2:ลม3)	ความเร็วลมที่ใช้ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)			การตกค้างของเชื้อเพลิง (เปอร์เซ็นต์)			
	ลม 1	ลม 2	ลม 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
15:75:10	0.015	0.077	0.011	40	45	40	41.67
20:70:10	0.02	0.072	0.01	25	20	25	23.33
25:65:10	0.025	0.068	0.01	15	15	12	14



รูปที่ 3.2 เชื้อเพลิงกองภายในท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบ



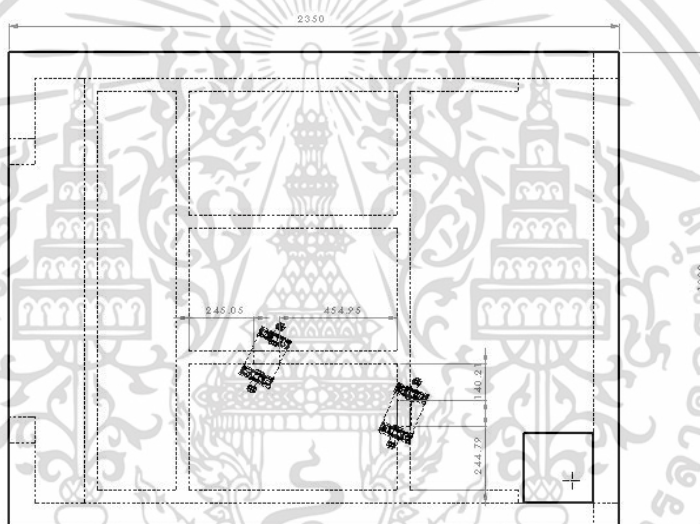
รูปที่ 3.3 แผนผังการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบจำเป็นต้องคำนึงถึงโครงสร้างเดิมที่มีอยู่เพื่อให้ถาดสันสะเทือนสามารถทำงานได้อย่างเหมาะสม และมีความคุ้มค่ามากที่สุด โดยจะแบ่งการออกแบบเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การออกแบบตำแหน่งติดตั้งถาดสันสะเทือน การออกแบบถาดสันสะเทือน และการออกแบบแนวท่อที่ใช้ในการลำเลียง

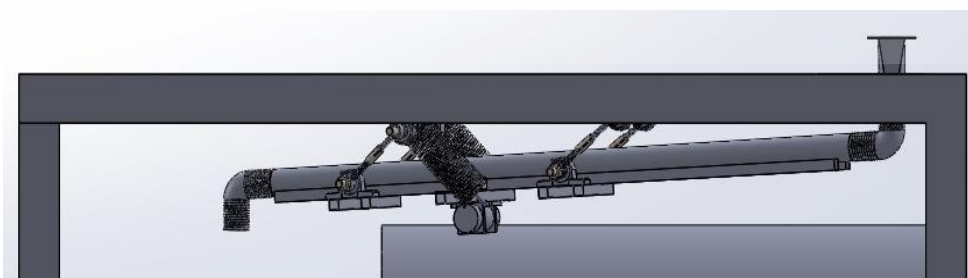
3.2.1 การออกแบบตำแหน่งติดตั้งถาดสันสะเทือน

ในส่วนของโครงสร้างเดิมนั้นมีระยะของช่องว่างบริเวณเหนือห้องเผาไหม้ถึงโครงสร้างซึ่งเป็นคานรับน้ำหนักเท่ากับ 23 เซนติเมตร ออกแบบให้ถาดสันติดตั้งอยู่กับคานรับน้ำหนัก โดยมีระยะดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งติดตั้งถาดสันสะเทือนกับคานรับน้ำหนัก

ด้วยข้อกำหนดเกี่ยวกับระยะช่องว่างที่มี จะได้ถาดสันสะเทือนที่ทำมุม 3 องศา กับแนวระดับดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 มุมเอียงของถาดสันสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การออกแบบภาคต้นสะเทือน

ในการออกแบบภาคต้นสะเทือน จำเป็นต้องคำนึงถึงตำแหน่งที่จะติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับโครงสร้างเดิมที่มีอยู่ เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น และให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ โดยออกแบบให้ภาคต้นสะเทือนมีความยาวทั้งหมด 150 เซนติเมตร น้ำหนักทั้งหมด 13.648 กิโลกรัม

จากทฤษฎีของ Grashoff ในบทที่ 2 จะได้ความยาวของชิ้นต่อโยงที่สั้นที่สุด (s) เท่ากับ 180 เซนติเมตร ความยาวของชิ้นต่อโยงที่ยาวที่สุด (l) เท่ากับ 570 เซนติเมตร และความยาวของชิ้นต่อโยงที่เหลือ (p และ q) เท่ากับ 180 และ 570 จะได้การเคลื่อนที่ของ 4-bar linkage แบบ Parallelogram linkage โดยใช้วัสดุดังแสดงในตารางที่ 3.2

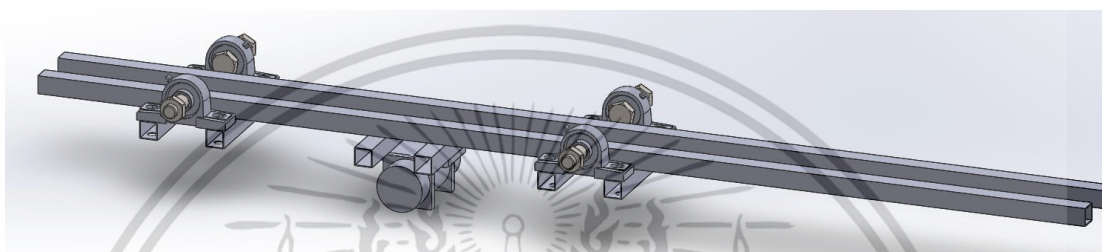
ตารางที่ 3.2 รายการวัสดุที่ใช้

ลำดับที่	ส่วนประกอบ	ขนาด	จำนวน
1	ตลับลูกปืน (Bearing)	UCP 204	8
2	น็อต (Bolt และ Nut)	4 หุน	16
		M20	8
4	แหวนรอง (Collar)	4 หุน	32
		M20	24
5	ตะขอเกลียว	4 หุน	8
6	Nut stud	4 หุน	4
7	สปริง	K มีค่า 1750 N/m	2
8	ท่อดุดอกเนกประสงค์ทึบไม่แบน	2 นิ้ว ความยาว 155 เซนติเมตร	1
9	มอเตอร์เขย่า (Vibrating motor)	เฟสเดียว ความถี่ 3600 RPM	1
10	เหล็กกล่อง บน	1 x 1 นิ้ว ความยาว 150 เซนติเมตร	2
11	เหล็กกล่อง ล่าง	1 x 1 นิ้ว ความยาว 20 เซนติเมตร	4
12	ท่ออ (flexible aluminum)	เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ส่วนประกอบ	ขนาด	จำนวน
13	เหล็กแผ่น (รับโครงสร้าง)	120 x 200 มิลลิเมตร	2
14	เหล็กแผ่น (รับโครงสร้าง) ตัวที่ 1	5 x 5 นิ้ว	1
15	เหล็กแผ่น (รับโครงสร้าง) ตัวที่ 2	5 x 8.3 นิ้ว	1

ประกอบเข้าด้วยกันดังรูปที่ 3.6

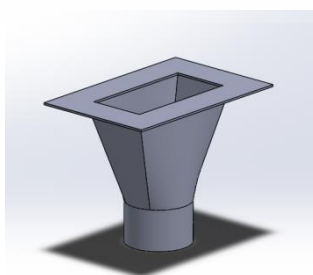


รูปที่ 3.6 ถาดสั่นสะเทือน

ทำการออกแบบให้เชื้อเพลิงมีการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ในแนวเส้นโค้ง (Curvilinear translation) ให้เชื้อเพลิงสัมผัสกับผิวของท่ออย่างน้อยที่สุด เพื่อลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลให้เกิดการตกค้างของเชื้อเพลิง

3.2.3 การออกแบบท่อ

ในการออกแบบท่อ จำเป็นต้องคำนึงถึงระบบการลำเลียงเชื้อเพลิงที่มีอยู่เดิม โดยใช้ระบบลมช่วยในการลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ช่วย และเนื่องจากบริเวณทางออกของสกรูลำเลียงมีหน้าตัดสี่เหลี่ยม ซึ่งมีความแตกต่างจากหน้าตัดของท่อที่เป็นวงกลม จึงต้องมีเครื่องปรับหน้าตัด หรือที่เรียกว่า อะแดปเตอร์ (Adaptor) ในการเชื่อมต่อระหว่างทางออกของสกรูลำเลียงและท่อที่ใช้ในการลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าด้วยกัน เพื่อไม่ให้เกิดการรั่วไหลของมวลในระบบ



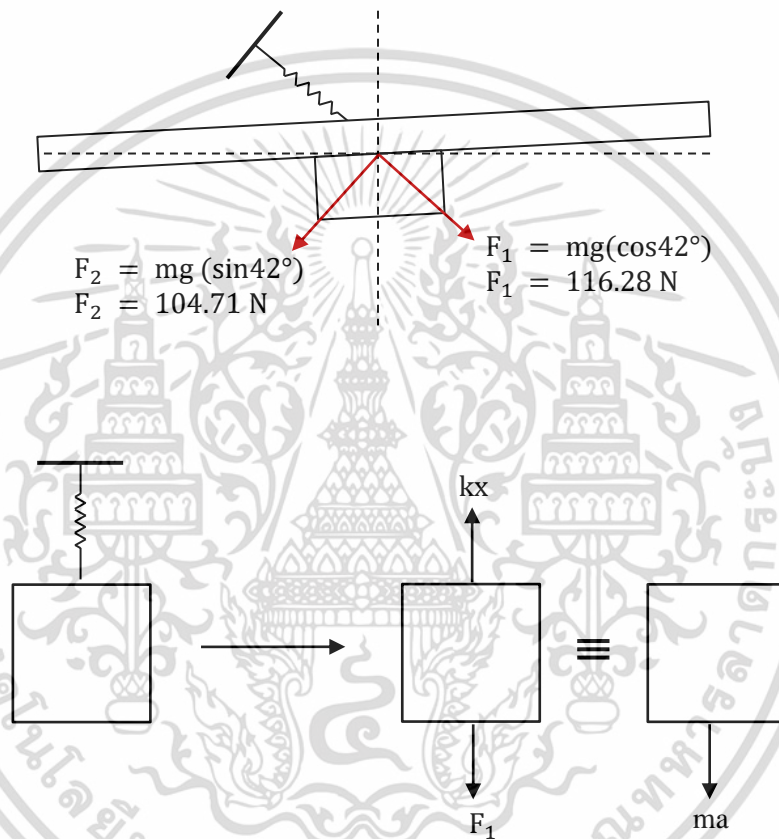
รูปที่ 3.7 อะแดปเตอร์ (adaptor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ท่อเชื่อมต่อกันระหว่างอะแดปเตอร์กับท่อคูตอเนกประสงค์ทึบไม้แบน ซึ่งเป็นท่อ PVC อ่อนแบบใสเสริมด้วยขดพลาสติก PET ขนาด 2 นิ้ว ติดตั้งกับถาดสี่เหลี่ยม และบริเวณที่มีการเปลี่ยนมุมของแนวท่อก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้

3.3 การคำนวณเพื่อการออกแบบ

3.3.1 การเลือกมอเตอร์สำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดแรงในการสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.8 แผนภาพวัตถุอิสระของถาดสี่เหลี่ยม

จากกฎข้อที่สองของนิวตันช่วงสมดุลสถิตย์

$$\Sigma F = ma = 0$$

$$F = [(13.648 + 2)\cos 42](9.81)$$

$$F = 116.28 \text{ N}$$

ใช้สปริง 2 ตัว โดยติดตั้งแบบขนาน ผลรวมของแรงที่กระทำกับสปริงแต่ละตัวจะมีค่าเท่ากับแรง

รวมที่กระทำกับระบบ ดังนั้นแรงที่กระทำกับสปริงแต่ละตัวจะเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = \frac{116.28}{2}$$

$$F = 58.14 \text{ N}$$

น้ำหนักทั้งหมด 13.648 กิโลกรัม และกำหนด $k = 1750 \text{ N/m}$ คำนวณความถี่ธรรมชาติ (ω_n) จากสมการ

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.1)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{3500}{15.648}}$$

$$\omega_n = 16.01 \text{ rad/s}$$

จากกฎของฮุก (Hooke's law) จะได้ว่า

$$F = kx$$

จากการกำหนดค่าคงที่สปริงเท่ากับ 1750 นิวตันต่อเมตร และทำการคำนวณจากกฎของฮุก จะสามารถหาความยาวที่เปลี่ยนไปของสปริงหลังจากติดตั้งชุดอุปกรณ์ได้เท่ากับ 3 เซนติเมตร

$$x = \frac{F}{k}$$

$$x = \frac{58.4}{1750}$$

$$x = 0.0337 \text{ m}$$

จากนั้นเลือกมอเตอร์สำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดแรงในการสั่นสะเทือน โดยใช้เป็นมอเตอร์เขย่า (Vibration motor) มีความถี่เท่ากับ 3600 รอบต่อนาที หรือ 376.8 rad/s โดยความถี่นี้คือความถี่จากการเสียดสมดุขณะหมุน (ω_r) ได้มวลที่ใช้ในการทำให้เสียดสมดุสำหรับมอเตอร์ (m_0) เท่ากับ 0.08 กิโลกรัม มวลทั้งหมดที่ใช้ในการคำนวณได้จากมวลของถาดสั่นสะเทือนรวมกับมวลของมอเตอร์เท่ากับ 15.648 กิโลกรัม ตำแหน่งที่มีมวลไม่สมดุติดอยู่เกิดที่ตำแหน่งห่างจากจุดหมุน (e) ในที่นี้ให้เป็นรัศมีของแผ่นมวลที่ใช้ในการทำให้เสียดสมดุมีค่าเท่ากับ 0.014 เมตร ซึ่งเป็นมอเตอร์ที่ตรงตามเงื่อนไขการหลีกเลี่ยง resonance เพราะมอเตอร์มีความถี่มีค่าห่างไกลจากความถี่ธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 มวลที่ใช้ในการทำให้เสียสมดุลขณะหมุนของมอเตอร์

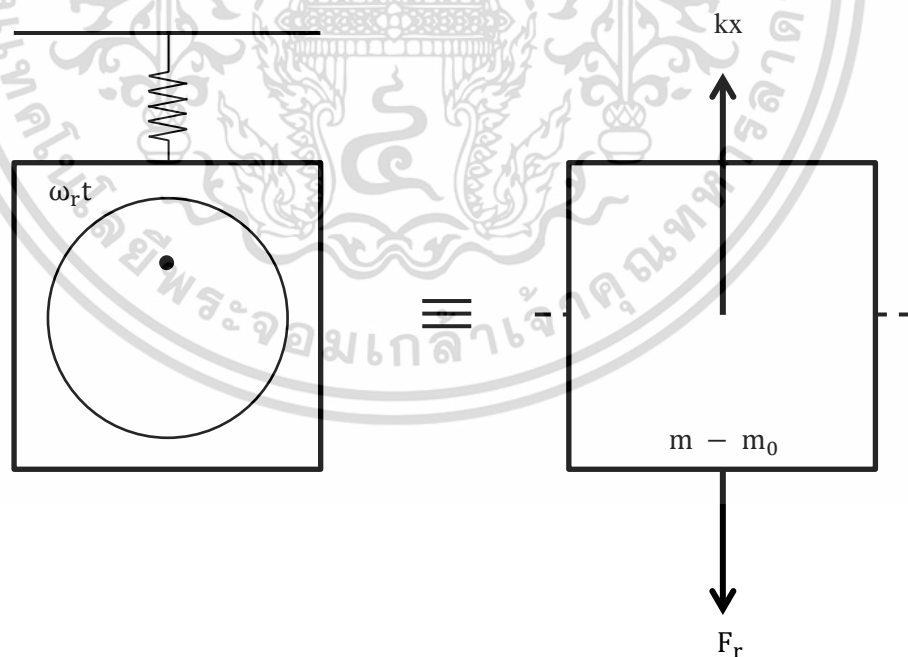
คำนวณแรงที่ได้จากมอเตอร์โดยใช้หลักการเสียสมดุลขณะหมุนจากสมการ

$$F_0 = m_0 e \omega_r^2$$

$$F_0 = (0.08)(0.014)(376.8)^2$$

$$F_0 = 159.016 \text{ N}$$

3.3.2 การคำนวณรูปแบบจำลองการเคลื่อนที่



รูปที่ 3.10 แผนภาพวัตถุอิสระของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน

$$\Sigma F = ma$$

จากแผนภาพวัตถุอิสระจะได้สมการ

$$-kx = (m + m_0)\ddot{x} + m_0(\ddot{x} - \omega^2 e \cos \omega t) \quad (3.2)$$

เขียนสมการการเคลื่อนที่ได้

$$m\ddot{x} + kx = m_0 e \omega^2 \cos \omega t \quad (3.3)$$

ผลเฉลยของการสั่นสะเทือน

$$x(t) = x_h(t) + x_p(t) \quad (3.4)$$

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

จะได้ผลเฉลยว่า $x_h(t) = A_1 \sin \omega_n t + A_2 \cos \omega_n t$

x_p เป็นคำตอบของสมการ $m\ddot{x}(t) + kx(t) = F_0 \cos \omega_r t$ (3.5)

กำหนดให้

$$x_p = X \cos \omega_r t \quad (3.6)$$

$$\dot{x}_p = -X \omega \sin \omega_r t \quad (3.7)$$

$$\ddot{x}_p = -X \omega^2 \cos \omega_r t \quad (3.8)$$

ให้ $F_0 = m e \omega^2$ แทนค่าสมการที่ (3.6) และ (3.8) ในสมการ (3.5) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} -m \omega^2 X \cos \omega_r t + k X \cos \omega_r t &= m e \omega^2 \cos \omega_r t \\ -(0.08)(376.8)^2 X \cos(376.8)t + (3500) X \cos(376.8)t & \\ &= (0.08)(0.014)(376.8)^2 \cos(376.8)t \end{aligned}$$

$$X = \frac{F_0}{k - m \omega_r^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X = \frac{159.016}{3500 - (15.648)(376.8)^2}$$

$$X = 0.000072$$

เมื่อแทนค่าตอบที่ได้ลงในสมการ (3.6)

$$x_p(t) = (0.000072) \cos(376.8) t$$

จากสมการที่ (3.4) เมื่อแทนผลเฉลยของ x_h และ x_p จะได้ว่า

$$\begin{aligned} x(t) &= A_1 \sin \omega_n t + A_2 \cos \omega_n t \\ &+ X \cos \omega_r t \end{aligned} \quad (3.9)$$

หาค่า A_1 และ A_2 จากการสมมติเงื่อนไขเริ่มต้น โดยเงื่อนไขแรกเมื่อเริ่มต้นสั่นสะเทือน วัตถุอยู่ที่ตำแหน่ง $x(t = 0) = x_0 = 0$ และเงื่อนไขที่สองความเร็วเริ่มต้นเท่ากับ $\dot{x}(t = 0) = \dot{x}_0 = v_0$

เมื่อแทนค่าเงื่อนไขแรก $x(t = 0) = x_0 = 0$

$$0 = A_2 \cos(14.9556) (0) + (0.000018) \cos(376.8) (0)$$

$$A_2 = -0.000072$$

ความสัมพันธ์การเคลื่อนที่หาได้โดยการหาอนุพันธ์ของสมการที่ (3.9)

$$\dot{x}(t) = A_1 \omega_n \cos \omega_n t - A_2 \omega_n \sin \omega_n t - X \sin \omega_r t$$

เมื่อแทนค่าเงื่อนไขที่สอง $\dot{x}(t = 0) = \dot{x}_0 = v_0$

$$0 = A_1 (14.9556) \cos(14.9556) (0) - (-0.000018) (14.9556) \sin(14.9556) (0) - (0.000018) \sin(376.8) (0)$$

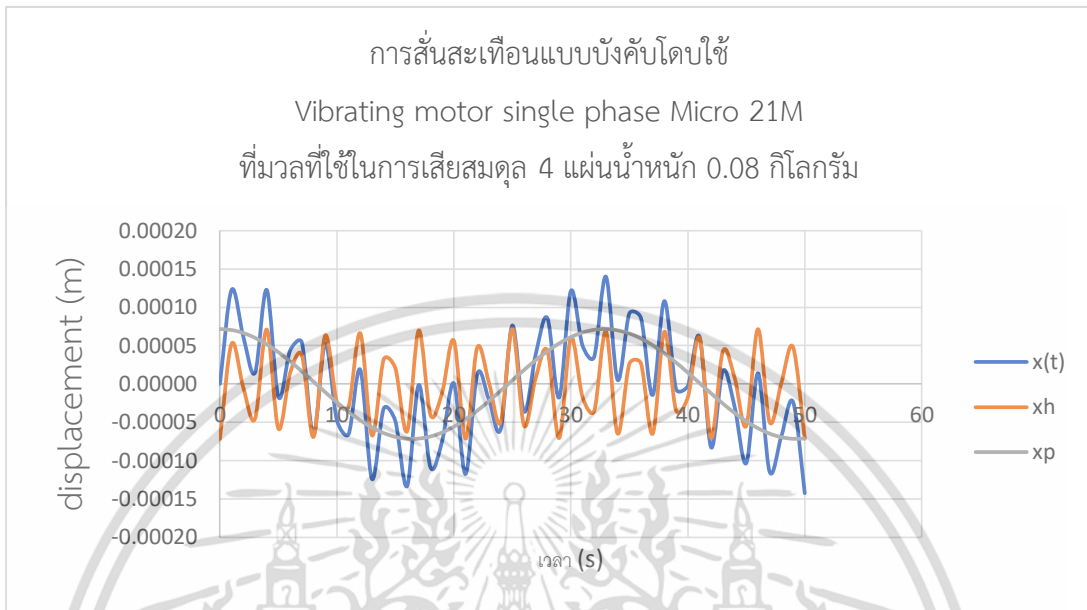
$$A_1 = \frac{v_0}{\omega_n} = 0$$

แทนค่า A_1 และ A_2 ในสมการ (3.9)

$$x(t) = (-0.000072) \cos(14.9556) (t) + (0.000072) \cos(376.8) (t)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีกราฟแสดงผลของการสั่นสะเทือนดังรูปที่ 3.11 มีแอมพลิจูดสูงสุดเท่ากับ 0.00012 เมตร ที่เวลา 4 วินาที



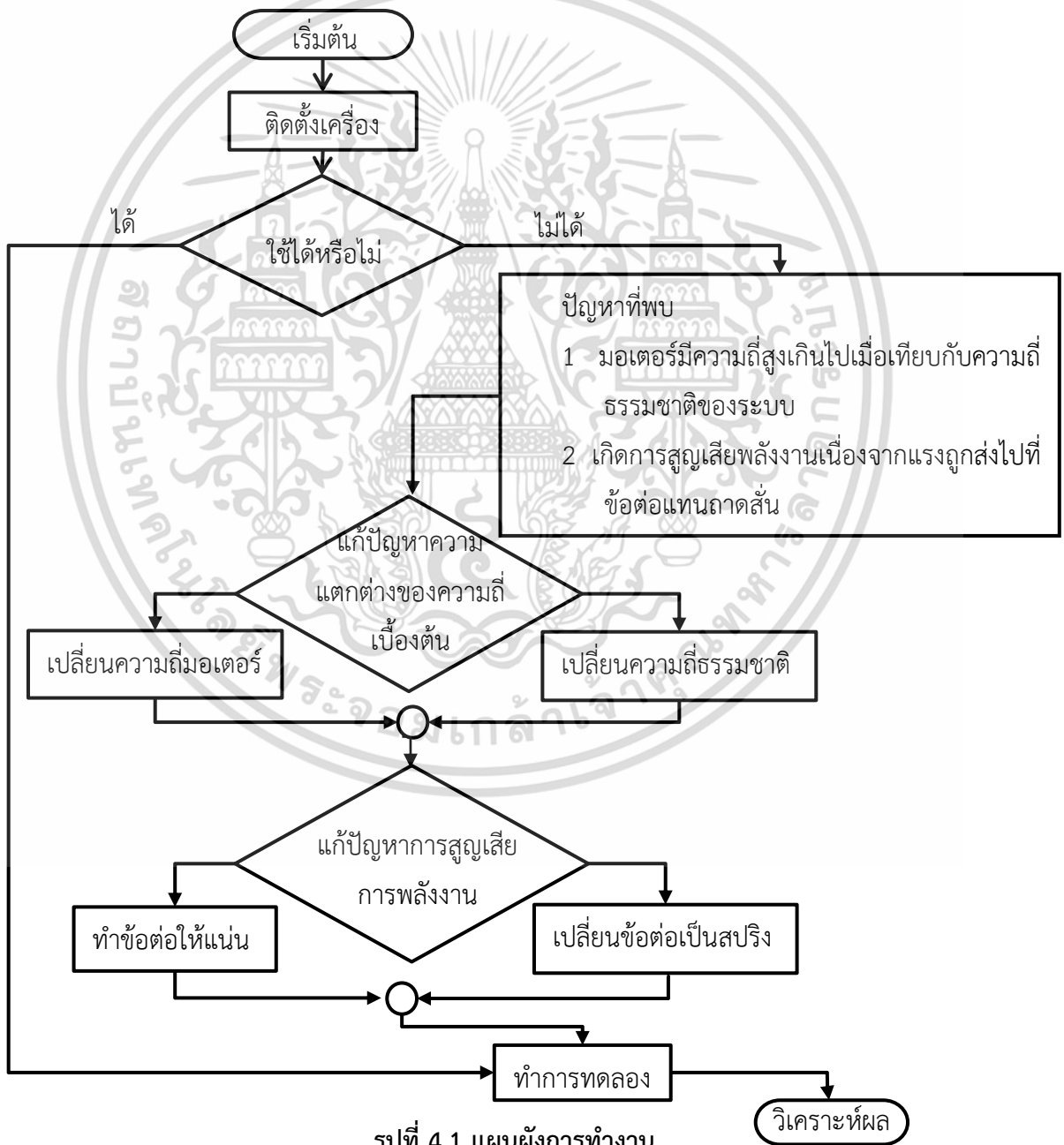
รูปที่ 3.11 กราฟแสดงแบบจำลองของการสั่นสะเทือนเมื่อใช้มวล 4 แผ่นน้ำหนัก 0.08 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การติดตั้ง และการแก้ไขปัญหาการติดตั้งเพื่อทำการทดลอง

จากรูปที่ 4.1 อธิบายได้ว่า หลังจากทำการออกแบบและติดตั้งภาคต้นสะเทือนเสร็จสมบูรณ์ ดังรูปที่ 4.2 จะมีขั้นตอนต่อไปคือการทดสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ โดยมีเงื่อนไขว่า หากสามารถใช้ได้จะทำการทดลองการลำเลียงเชื้อเพลิงเพื่อเก็บผลต่อไป หากไม่สามารถใช้ได้จะเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ปัญหาที่พบ และหาแนวทางการแก้ไขปัญหาเพื่อทำการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.1 แผนผังการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 รูปกลาส่นสะเทือนหลังการติดตั้ง

4.1 การวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงการทำงานของกลาส่นสะเทือนหลังการติดตั้ง

เมื่อได้ทำการทดลอง นั้นพบว่า หลังจากติดตั้งกลาส่นสะเทือนและทดสอบการทำงานของอุปกรณ์พบว่า ไม่เป็นไปตามสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ กลาส่นสะเทือนไม่สามารถทำงานได้ตามที่ได้ออกแบบไว้ อุปกรณ์ไม่เคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ในแนวเส้นโค้ง (Curvilinear translation) เนื่องจากข้อต่อไม่มีความแน่นหนาพอ ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปที่จุดนั้น แรงที่ได้ไม่ถูกส่งไปยังกลาส่นสะเทือน ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แรงจากการสั่นสะเทือน

จากปัญหาที่เกิดขึ้นข้างต้น พบว่าสามารถแก้ไขปัญหาการสูญเสียพลังงานได้สองวิธี โดยวิธีแรก คือ การทำให้ข้อต่อมีความแน่นหนามากขึ้นและเพิ่มแรงจากมอเตอร์ เพื่อให้มีแรงมากพอที่จะทำให้ชุดอุปกรณ์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากใช้วิธีนี้จะสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวอย่างรวดเร็ว และมีความสะดวกสบาย แต่การเพิ่มแรงทำให้ต้องพึ่งพามอเตอร์ขนาดใหญ่ ความถี่ของมอเตอร์ จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนไป หรืออาจจะมีราคาสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มแรงมอเตอร์แล้วนั้น แรงจะถูกส่งไปที่ข้อต่อมากขึ้นทำให้เกิดความเสียหายบริเวณข้อต่อได้อาจไม่เหมาะที่จะทำงานภายใต้ข้อจำกัดที่มี จึงได้ใช้วิธีถัดไป โดยใช้สปริงสี่ตัวแทนชิ้นส่วนจับยึดทั้งหมดที่สุด สปริงที่ใช้แทนนั้นเป็นสปริงที่เรามีอยู่แล้วจากการติดตั้งเครื่อง ซึ่งเป็นการแก้ไขปัญหานี้ทางงานภายใต้เวลาที่จำกัดและเป็นการเปลี่ยนความถี่ธรรมชาติให้เข้าใกล้ความถี่ภายนอกเบื้องต้น

4.2 การออกแบบเพื่อการปรับปรุงประสิทธิภาพ

จากการทดลองลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงร่วมกับถาดสั่นสะเทือน โดยไม่ใช้ระบบนิวเมติกส์ร่วมด้วย พบว่าอุปกรณ์ไม่สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ จึงทำการปรับปรุงรูปแบบการทำงานของถาดสั่นสะเทือนใหม่ รายการวัสดุและชิ้นส่วนต่างๆ ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

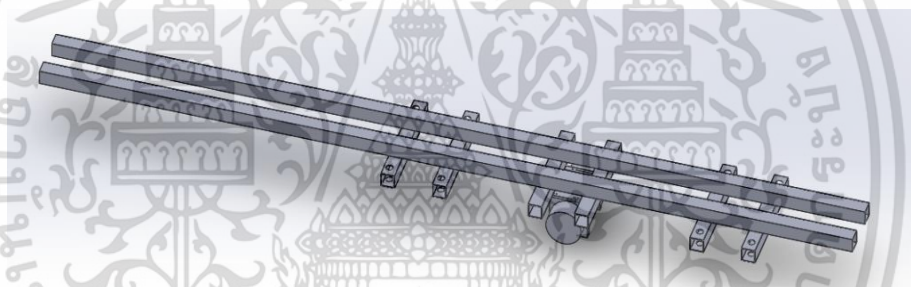
ตารางที่ 4.1 รายการวัสดุของถาดสั่นสะเทือนหลังจากปรับปรุง

ลำดับ	ส่วนประกอบ	ขนาด	จำนวน
1	ตลับลูกปืน (Bearing)	UCP 204	4
2	น็อต (Bolt และ Nut)	4 หุน	16
		M20	4
3	แหวนรอง (Collar)	4 หุน	16
		M20	4
4	สปริง (Spring)	ความยาว 21.59 เซนติเมตร ค่าคงที่สปริง 2144.79 นิวตันต่อเมตร	2
		ความยาว 15.24 เซนติเมตร ค่าคงที่สปริง 350.54 นิวตันต่อเมตร	2
5	ท่อคูตอเนกประสงค์ทึบไม่แบน	เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ความยาว 155 เซนติเมตร	1
6	มอเตอร์เขย่า (Vibrating motor)	หนึ่งเฟส ความถี่ 3600 RPM	1
7	เหล็กกล่อง บน	1 x 1 นิ้ว ความยาว 150 เซนติเมตร	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ	ส่วนประกอบ	ขนาด	จำนวน
8	เหล็กกล่อง ล่าง	1 x 1 นิ้ว ความยาว 20 เซนติเมตร	4
9	ท่ออ (flexible aluminum)	เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ความยาว 50 เซนติเมตร	1
10	เหล็กแผ่น (รับโครงสร้าง)	กว้าง 120 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร	2
11	เหล็กแผ่น (รับโครงสร้าง) ชั้นที่ 1	5 x 5 นิ้ว	1
12	เหล็กแผ่น (รับโครงสร้าง) ชั้นที่ 2	5 x 8.3 นิ้ว	1

ประกอบเข้าด้วยกันดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ภาตสันสะเทือนปรับปรุงใหม่

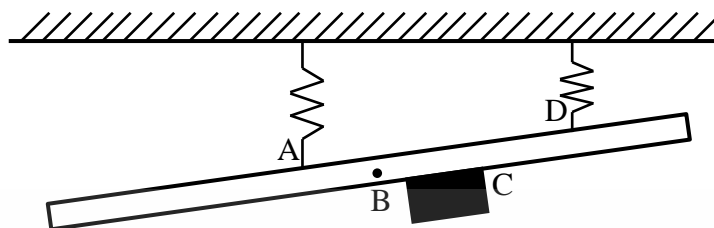
ในการปรับปรุงภาตสันสะเทือนได้มีการเปลี่ยนจุดยึดจากแบริง 4 จุดเป็นสปริง 4 จุด เมื่อติดตั้งจะมีมุมเอียงทั้งหมด 8 องศา ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การติดตั้งภาตสันสะเทือนปรับปรุงใหม่

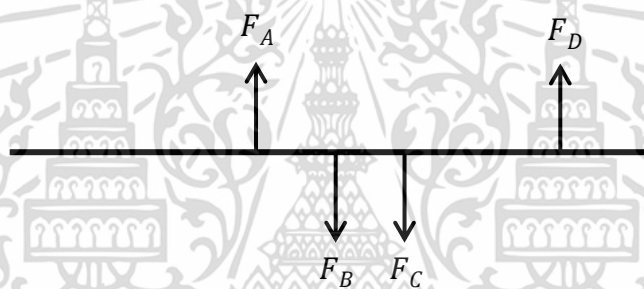
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การคำนวณแรงกระทำบนภาตสันสะเทือน



รูปที่ 4.6 แบบจำลองการติดตั้งภาตสันสะเทือน

จากรูป 4.6 แบบจำลองการติดตั้งภาตสันสะเทือน สามารถเขียนเป็นแผนภาพวัตถุอิสระได้ดังรูปที่ 4.7 เมื่อให้มุมในการติดตั้งเท่ากับ 5.34 องศาวัดจากชิ้นส่วนเดิมซึ่งมีการติดตั้งมาแล้ว 3 องศา



รูปที่ 4.7 แผนภาพวัตถุอิสระของแบบจำลองการติดตั้งภาตสันสะเทือน

โดยสปริงสองตัวมีแรงกระทำที่จุด A ห่างจากจุด D เป็นระยะ 66.48 เซนติเมตร ภาตสันสะเทือนมีน้ำหนักทั้งหมด 7.69 กิโลกรัม คิดเป็นแรง 74.70 นิวตัน กระทำที่จุด B มีระยะห่างจากจุด D 77.23 เซนติเมตร ที่จุด C มีแรงจากน้ำหนักของมอเตอร์ 19.53 นิวตัน ห่างจากจุด D เป็นระยะ 55.03 เซนติเมตร

จากสมดุลของโมเมนต์ เมื่อให้โมเมนต์รวมที่จุด D เท่ากับศูนย์ จะได้สมการ

$$F_A(66.48) - (74.7)(77.23) - (19.53)(55.03) = 0 \quad (4.1)$$

$$F_A = 102.95 \text{ N}$$

แรงจากสปริงที่กระทำที่จุด A เท่ากับ 102.95 นิวตัน ดังนั้นสปริงแต่ละตัวจะรับแรง 51.47 นิวตัน เมื่อคำนวณโดยให้โมเมนต์รวมที่จุด A เป็นศูนย์ และระยะจากจุด A ถึงจุด B เท่ากับ 9.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนติเมตร ระยะจากจุด A ถึงจุด C เท่ากับ 31.45 เซนติเมตร ระยะจาก A ถึง D เท่ากับ 66.48 เซนติเมตร จะได้สมการ

$$(74.7)(9.25) + (19.53)(31.45) - F_D(66.48) = 0 \quad (4.2)$$

$$F_D = 19.63 \text{ N}$$

แรงจากสปริงที่กระทำที่จุด D เท่ากับ 19.63 นิวตัน และสปริงแต่ละตัวจะรับแรง 9.815 นิวตัน

4.2.2 การคำนวณระยะยืดและความยาวของสปริงหลังการติดตั้ง

จากกฎของฮุก (Hook's law) จะได้ว่าแรงในสปริงมีความสัมพันธ์กับแรงภายนอกและระยะยืดดังสมการ

$$f_k = kx \quad (4.3)$$

ที่จุด A สปริงแต่ละตัวจะรับแรง 51.47 นิวตัน สปริงมีค่าคงที่เท่ากับ 2144.79 นิวตันต่อเมตร เมื่อนำไปแทนค่าในสมการ (4.3) จะได้ว่า

$$51.47 = (2144.79)(x)$$

$$x = 0.024$$

หลังการติดตั้งถาดสี่เหลี่ยมสปริงที่จุด A มีการยืดออกเป็นระยะ 0.024 เมตร หรือ 2.4 เซนติเมตร ทำการคำนวณระยะยืดของสปริงที่จุด D ด้วยสมการ (4.3) โดยมีแรงกระทำ 9.812 นิวตัน ค่าคงที่สปริงเท่ากับ 350.54 นิวตันต่อเมตร สปริงที่จุด D จะมีการยืดออกเป็นระยะ 0.028 เมตร หรือ 2.8 เซนติเมตร และจะมีค่าคงที่ของสปริงทั้งหมด 4990.66 นิวตันต่อเมตร

บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัญหา

ในการออกแบบภาคต้นสะเทือนเบื้องต้นนั้น เพื่อแก้ปัญหาการก้องของเชื้อเพลิงไม้ยางพาราอัดแท่ง ผ่านการบดให้อยู่ในลักษณะที่เป็นผง (pulverized) ที่อัตราการเผาไหม้ 300 kW และที่ความเร็วลมส่วนที่หนึ่งเท่ากับ 0.015 0.02 และ 0.025 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยควบคุมเงื่อนไขเหล่านี้ด้วยระบบ PLC แต่เนื่องจากสถานการณ์ Covid-19 ในปัจจุบัน ทำให้ไม่สามารถทำการทดลองด้วยระบบ PLC ได้ จึงได้ทำการทดลองเบื้องต้นด้วยการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ท่อลำเลียงด้วยมือผ่านอะแดปเตอร์เพื่อทดสอบการทำงานของภาคต้นสะเทือน ทั้งกรณีไม่มีลมช่วย และกรณีมีลมช่วยในการลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 ผลการทดลองการลำเลียงเชื้อเพลิงด้วยภาคต้นสะเทือนกรณีไม่มีลมไหลภายในท่อ

จากการทดลองลำเลียงเชื้อเพลิงด้วยภาคต้นสะเทือนแบบไม่มีลมไหลภายในท่อพบว่า สามารถลำเลียงเชื้อเพลิงได้ในปริมาณเล็กน้อย แต่เมื่อมีปริมาณเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดการก้องของเชื้อเพลิงสองจุดภายในท่อลำเลียง ลักษณะการก้องแสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การก้องของเชื้อเพลิงภายในท่อ

สามารถตั้งสมมติฐานจากผลการทดลองนี้ได้ว่า การเคลื่อนที่ของภาคต้นสะเทือนไม่ใช่รูปแบบของมวล-สปริง กล่าวคือไม่ได้มีการเคลื่อนที่ขึ้นลงในระยะที่เท่ากันตลอดทั้งแนวภาค แต่ได้เปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนที่ไปเป็นแบบ beam vibration ซึ่งจะเกิดจุดที่ไม่มีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นกับภาค ส่งผลให้มีเชื้อเพลิงก้องที่บริเวณนั้น

5.2 ผลการทดลองเบื้องต้นการลำเลียงเชื้อเพลิงด้วยถาดสันสะเทือนกรณีมีลมไหลภายในท่อ

ในการทดลองการทำงานของถาดสันสะเทือนกรณีมีลมไหลภายในท่อนั้น ได้ทดลองโดยการใส่เชื้อเพลิงด้วยมือที่อะแดปเตอร์ และจำลองระบบลมด้วยเครื่องดูดฝุ่น ChaoBao ซึ่งมีความเร็วลม 53 ลิตรต่อวินาที หรือคิดเป็น 0.0418 กิโลกรัมต่อวินาที ที่บริเวณทางออก ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การลำเลียงเชื้อเพลิงด้วยถาดสันสะเทือนแบบไม่มีลมไหลภายในท่อ

ทำการทดลองการลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงด้วยถาดสันสะเทือน โดยจับเวลาตั้งแต่ใส่เชื้อเพลิงมวล 1 กิโลกรัมเข้าสู่ระบบลำเลียงจนกระทั่งเชื้อเพลิงไหลผ่านท่อลำเลียงจนหมด ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย เทียบเป็นอัตราการไหลเชิงมวล จากการทดลองการขนส่งเชื้อเพลิงสามารถหาอัตราการไหลเชิงมวลโดยเฉลี่ยได้ 0.0510 กิโลกรัมต่อวินาทีและไม่พบการกองของเชื้อเพลิงในบริเวณท่อลำเลียง แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองเบื้องต้นของการขนส่งเชื้อเพลิงผ่านท่อลำเลียงเชื้อเพลิงขณะเปิดเครื่องสันสะเทือน

การทดลอง	มวลเชื้อเพลิง (kg)	เวลา (s)	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
1	1	19.7	0.0507
2	1	20.5	0.0487
3	1	18.66	0.0535

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองด้วยการควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิงด้วยระบบ PLC ได้ ส่งผลให้ไม่ทราบค่าอัตราการเผาไหม้ จึงทำการคำนวณหาอัตราการเผาไหม้จากผลการทดลองที่ได้ โดยใช้สมการ

$$\text{Thermal input (kW)} = \text{HHV (kJ/kg)} \times \dot{m} \text{ (kg/s) wet combustion} \quad (5.1)$$

ในการทดลองเผาไหม้จริงนั้น กำหนดให้น้ำหรือความชื้นของไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอยู่ในสถานะไอ (Vapor) จึงใช้ค่า lower heating value (LHV) ในการคำนวณในสมการข้างต้น โดยเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้คือ ไม้ยางพารา มีค่าความร้อนเท่ากับ 3560 kcal/kg เมื่อทำการคำนวณด้วยสมการที่ (5.1) จะได้ค่าอัตราการเผาไหม้เท่ากับ 824.38 kW ซึ่งอยู่นอกเหนือขอบเขตการทดลองที่ได้กำหนดไว้คือ 300 kW

5.3 สรุปผลการทดลองเบื้องต้น

หลังจากทำการปรับปรุงสภาพสันสะท้อนและทดสอบการทำงาน ภายใต้เงื่อนไขการลำเลียงเชื้อเพลิงด้วยมือ และไม่มีลมช่วยในการลำเลียงเชื้อเพลิงพบว่า เชื้อเพลิงสามารถเคลื่อนที่ได้หากมีปริมาณไม่มาก แต่เมื่อเชื้อเพลิงมีปริมาณเพิ่มขึ้นจะพบว่ามีกองของเชื้อเพลิงสองจุดภายในท่อลำเลียง เนื่องด้วยสถานการณ์การแพร่ระบาดของ Covid-19 ในปัจจุบันทำให้ไม่สามารถทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขอัตราการเผาไหม้ 300 kW ร่วมกับระบบนิวเมติกส์ได้ และผลการทดลองที่ได้ในกรณีที่มีลมช่วยในการลำเลียงเชื้อเพลิงนั้น เป็นเพียงการทดลองเพื่อทดสอบการทำงานเบื้องต้นของระบบเท่านั้น จึงไม่ได้มีการควบคุมเงื่อนไขการทดสอบ ให้เป็นไปตามขอบเขตที่ได้ตั้งไว้ ทั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นและจะเสนอเป็นแนวทางแก้ไขต่อไป

5.4 การวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นหลังจากปรับปรุงสภาพสันสะท้อน

เนื่องจากปัญหาการสูญเสียพลังงานที่บริเวณข้อต่อของชุดอุปกรณ์นั้น ได้ทำการแก้ปัญหาเบื้องต้นด้วยการเปลี่ยนชิ้นส่วนจับยึดของสภาพสันสะท้อนสุดเป็นสปริงทั้งหมดสี่ตัว เมื่อทำการทดลองกรณีไม่มีลมช่วยในการลำเลียงเชื้อเพลิงพบว่ายังคงมีเชื้อเพลิงกองภายในท่อสองจุด

เมื่อทำการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นโดยใช้หลักการของ The bending vibrations of a beam และจากเงื่อนไขการติดตั้งภาคอิสระที่พบว่าเป็นการอิสระของคานแบบ free-free สามารถหาความถี่ธรรมชาติ ω_n เป็นไปสมการที่ 5.2

$$\omega_n = \beta_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \text{ rad/s} , \text{ and } f_n = \frac{\beta_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \text{ Hz} \quad (5.2)$$

เมื่อ $\rho = 3.098 \text{ kg/m}^3$, $E = 20 \times 10^9 \text{ m}^3$, $A = 1.72 \text{ m}^2$, $L = 1.5 \text{ m}$. และที่ความยาวที่ 150 เมตรจะสามารถคำนวณค่า l ได้ 2.92×10^{-8} เมื่อนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการที่ 5.2 จะหาค่าความถี่ได้ดังต่อไปนี้

$$\omega_n = 3.15^2 \sqrt{\frac{2G(2.92 \times 10^{-8})}{3.098 \times 1.72}} \text{ rad/s}$$

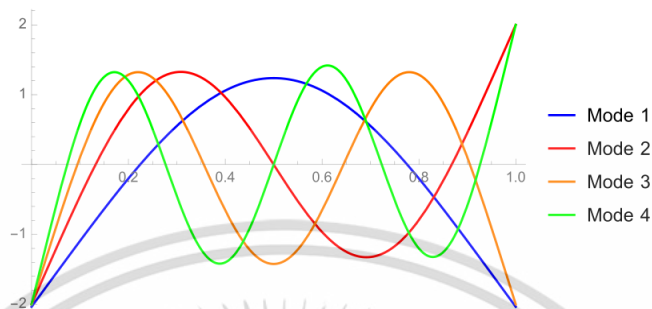
เมื่อเปลี่ยนค่า β_n ตามค่าจากตารางที่ 2.3 ในบทที่ 2 ค่า $\beta_n L$ ที่รูปร่างการอิสระที่นอน (mode shape) ของคานภายใต้เงื่อนไขอิสระทั้งสองด้านที่ 1 , 2 และ 3 มีค่าเป็น 4.73 , 7.853 และ 10.99 ตามลำดับจะได้ค่า β_n ที่รูปร่างการอิสระที่นอน (mode shape) ของคานภายใต้เงื่อนไขอิสระทั้งสองด้านที่ 1 , 2 และ 3 มีค่าเป็น 3.153 , 5.234 และ 7.330 ตามลำดับพบว่าค่าความถี่ธรรมชาติของระบบจะเปลี่ยนไปตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงการเปลี่ยนของความถี่ธรรมชาติเมื่อค่า β_n เปลี่ยน

รูปร่างการอิสระที่นอน	$\beta_n L$	β_n	ความถี่ธรรมชาติ ω_n (rad/s)
1	4.73	3.153	179.06
2	7.853	5.234	493.59
3	10.99	7.330	967.63

จากตารางจะเห็นว่าค่าความถี่ธรรมชาติที่คำนวณได้จะมีค่า 179.06 rad/s , 493.59 rad/s , 967.63 rad/s และเนื่องจากความถี่ภายนอกมีค่า 376.8 rad/s ซึ่งค่าใกล้เคียงกับ รูปแบบการเคลื่อนที่ (mode shape) ที่ 2 ทำให้ลักษณะการอิสระที่นอนดังกล่าวชัดเจนมากที่สุด เราจึงทราบว่ารูปแบบการเคลื่อนที่ของภาคอิสระคล้ายกับรูปร่างการอิสระที่นอน (mode shape) ที่ 2 ภายใต้เงื่อนไขการติดตั้งภาค

สันสะท้อนของคานแบบ free-free ซึ่งมีบริเวณที่ไม่เกิดการสั่น (Dead zone) 3 จุด mode shape เกิดขึ้น ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 mode shape

จากการศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับ beam vibration โดยกำหนดให้เงื่อนไขเริ่มต้นของระบบเป็นแบบ free-free จะพบว่าในการเกิด mode shape แต่ละแบบจะขึ้นอยู่กับความถี่ เมื่อความถี่ของมอเตอร์สูงกว่าความถี่ธรรมชาติของระบบจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบ beam vibration และเมื่อวิเคราะห์โดยอ้างอิงทฤษฎีเกี่ยวกับ beam vibration พบว่า ถาดสันสะท้อนมีการเคลื่อนที่แบบ mode ที่ 2 ส่งผลให้มีจุดที่ไม่เกิดการสั่นสะท้อน (Dead zone) ทำให้เกิดการกองของเชื้อเพลิงสองจุด ซึ่งมีจุดที่ไม่เกิดการสั่น 3 จุด แต่เนื่องจากความยาวของถาดมีความยาวเพียง 1.5 เมตร เราจึงสามารถมองเห็นจุดที่ไม่เกิดการสั่นเพียง 2 จุดเท่านั้น

สรุปผล การปรับปรุง และข้อเสนอแนะ

การออกแบบและติดตั้งถาดสันสะเทือนนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาระบบลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง จากสกรูลำเลียงถึงห้องเผาไหม้ช่วย เพื่อแก้ไขปัญหาการกองของเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้การเผาไหม้ไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร โดยได้เลือกใช้ไมยางพาราอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง ทำการบดให้มีลักษณะเป็นผงก่อนเข้าห้องเผาไหม้ ในการลำเลียงใช้ถาดสันสะเทือนร่วมกับระบบนิวเมติกส์ ภายใต้เงื่อนไขของการเผาไหม้ที่อัตราความร้อน 300 kW มีการใช้อากาศส่วนที่หนึ่งคิดเป็น 15 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ของอากาศทั้งหมดที่ใช้ในระบบการเผาไหม้

ในส่วนของการออกแบบ จำเป็นต้องคำนึงถึงข้อจำกัดเกี่ยวกับช่องว่างและระยะที่สามารถติดตั้งเครื่องได้ จึงทำการออกแบบให้ถาดสันสะเทือนมีมุมเอียง 3 องศา มีการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ในแนวเส้นโค้ง (Curvilinear translation) เพื่อให้เชื้อเพลิงสามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยหลักการของแรงโน้มถ่วงและสัมผัสกับผิวของท่ออย่างน้อยที่สุด

6.1 สรุปผลการทดลอง

หลังจากติดตั้งถาดสันสะเทือนและทดสอบการทำงานของอุปกรณ์พบว่า ถาดสันสะเทือนไม่สามารถทำงานได้ตามที่ได้ออกแบบไว้ อุปกรณ์ไม่เคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ในแนวเส้นโค้ง (Curvilinear translation) เนื่องจากข้อต่อไม่มีความแน่นหนาพอ ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปที่จุดนั้น แรงที่ได้ไม่ถูกส่งไปยังถาดสันสะเทือน

หลังจากทำการปรับปรุงถาดสันสะเทือนและทดสอบการทำงานของ ภายใต้เงื่อนไขการลำเลียงเชื้อเพลิงด้วยมือ และไม่มีระบบนิวเมติกส์ร่วมด้วยพบว่า เชื้อเพลิงสามารถเคลื่อนที่ได้หากมีปริมาณไม่มาก แต่เมื่อเชื้อเพลิงมีปริมาณเพิ่มขึ้นจะพบว่าการกองของเชื้อเพลิงสองจุดภายในท่อลำเลียง เนื่องด้วยสถานการณ์การแพร่ระบาดของ Covid-19 ในปัจจุบันทำให้ไม่สามารถทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขอัตราการเผาไหม้ 300 kW ร่วมกับระบบนิวเมติกส์ได้ แต่สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า หากทำการทดลองใช้ถาดสันสะเทือน

ร่วมกับระบบนิเวศกึ่งในการลำเลียงเชื้อเพลิงแล้วจะไม่พบปัญหาการกองของเชื้อเพลิง ทั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นและจะเสนอเป็นแนวทางแก้ไขต่อไป

6.2 การปรับปรุง

จากปัญหาที่เกิดขึ้นข้างต้น พบว่าสามารถแก้ไขปัญหาคือได้สองวิธี โดยวิธีแรกคือการทำให้ข้อต่อมีความแน่นหนามากขึ้นและเพิ่มแรงจากมอเตอร์ เพื่อให้มีแรงมากพอที่จะทำให้ชุดอุปกรณ์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากใช้วิธีนี้จะสามารถแก้ไขปัญหาคือได้อย่างรวดเร็วและมีความสะดวกสบาย แต่การเพิ่มแรงทำให้ต้องเพิ่มมอเตอร์ขนาดใหญ่ หรือที่มีราคาสูงขึ้น อาจไม่เหมาะที่จะทำงานภายใต้ข้อจำกัดที่มี จึงได้ใช้วิธีถัดไป โดยใช้สปริงสี่ตัวแทนชิ้นส่วนจับยึดทั้งหมดสี่จุด สปริงสองตัวความยาว 21.59 เซนติเมตร ค่าคงที่สปริง 2144.79 นิวตันต่อเมตร ถูกแทนที่ชิ้นส่วนที่ใกล้กับสกรูลำเลียง และสปริงสองตัวความยาว 15.24 เซนติเมตร ค่าคงที่สปริง 350.54 นิวตันต่อเมตร ถูกแทนที่ชิ้นส่วนถัดไป ทำให้มุมเอียงเปลี่ยนแปลงเป็น 8 องศาจากแนวระดับ

จากการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นพบว่า เมื่อใช้สปริงแทนชิ้นส่วนจับยึดของถาดสั้นสะเทือน สังเกตการเคลื่อนที่เปลี่ยนไปจากที่คาดการณ์ไว้ โดยเป็นการเคลื่อนที่แบบ beam vibration เกิดจุดที่ไม่เกิดการสั้นสะเทือน (Dead zone) และมีเชื้อเพลิงกองที่จุดดังกล่าวสองจุด จากการศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับ beam vibration โดยกำหนดให้เงื่อนไขเริ่มต้นของระบบเป็นแบบปลายอิสระทั้งสองด้านจะพบว่าในการเกิด mode shape แต่ละแบบนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia) มอดูลัสของยัง (Young's modulus) และความยาวของคาน ซึ่งล้วนส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติของระบบเปลี่ยนแปลงทั้งสิ้น เนื่องจากความถี่ของมอเตอร์เท่ากับ 376.8 rad/s เป็นค่าที่เข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติแบบ mode shape ที่สองของการเคลื่อนที่แบบ beam vibration จึงปรากฏให้เห็นการเคลื่อนที่ในลักษณะดังกล่าว

6.3 ข้อเสนอแนะ

ในหัวข้อนี้จะเสนอแนวทางแก้ไขปัญหาที่พบในการใช้ถาดสั้นสะเทือนลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผง เพื่อปรับปรุงการทำงานของชุดอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จากการศึกษาเกี่ยวกับ Beam vibration พบว่าในแต่ละ mode shape จะมี dead zone ซึ่งจะเป็นจุดที่ไม่มีการสั้นสะเทือนเกิดขึ้นทำให้เชื้อเพลิงกอง จึงจำเป็นที่จะต้องหลีกเลี่ยงโดยการทำให้ถาดสั้นสะเทือนทำงานแบบมวล-สปริง คือมีการ

สั่นขึ้นลงเท่ากันตลอดทั้งแนวของภาคสั้นสะเทือน มีหลักการคือปรับความถี่ธรรมชาติของระบบให้มีความใกล้เคียงกับความถี่ของมอเตอร์ แต่ต้องระวังไม่ให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ ในการปรับความถี่ธรรมชาติสามารถทำได้ดังนี้

1. การปรับปรุงโครงสร้างของภาคสั้นสะเทือน จากการวิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่แบบ beam vibration โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นปลายอิสระทั้งสองด้านแล้วจะพบว่า ความถี่ของระบบในการสั่นสะเทือนนั้นตัวแปรที่มีผลในการสั่น มากที่สุดนั่นคือค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) เพราะเมื่อเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) ค่าความถี่ของระบบจะสูงขึ้น ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการปรับปรุงโครงสร้างให้มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มความถี่ให้สูงขึ้น

ตัวอย่างในการออกแบบเพื่อเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยนั้น สามารถทำได้โดยการทำให้โครงสร้างเป็นรูปแบบของโครงถัก ตัวอย่างดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ชุดอุปกรณ์แบบโครงถัก

ในการออกแบบเบื้องต้นภาคสั้นสะเทือนมีโมเมนต์ความเฉื่อยเท่ากับ $2.92 \times 10^{-8} \text{ m}^4$ และมีความถี่เท่ากับ 179.06 rad/s เมื่อเพิ่มเหล็กกล่องที่มีขนาดและความยาวเท่ากันจำนวน 2 ชั้น วางในรูปแบบสมมาตรที่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส จะสามารถหาโมเมนต์ความเฉื่อยได้จากทฤษฎีแกนขนาน (Parallel-Axis Theorem) เมื่อ $I_x = \bar{I}_x + Ad^2$ โดยมีระยะห่างจากแกน x เท่ากับ 37.7 มิลลิเมตร และพื้นที่หน้าตัด 1.72 ตารางเซนติเมตร เมื่อแทนค่าในสมการข้างต้นจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_x = (2.92 \times 10^{-8}) + (1.72 \times 10^{-4})(37.7 \times 10^{-3})^2$$

$$I_x = 5.47 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

จะเห็นว่าค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ $5.47 \times 10^{-7} \text{ m}^4$ ทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบเพิ่มเป็น 775.23 rad/s และเมื่อวิเคราะห์ร่วมกับความถี่ของมอเตอร์จะพบว่า ค่าความถี่ที่คำนวณได้นี้ มีค่ามากกว่าความถี่จากมอเตอร์ซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบ mode shape จึงสามารถตั้งสมมติฐานเพื่อรอการพิสูจน์ต่อไปได้ว่า ระบบจะเปลี่ยนจากการเคลื่อนที่แบบ beam vibration เป็นแบบวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid) คือมีการเคลื่อนที่ขึ้น-ลง พร้อมกันตลอดแนวความยาว

การคำนวณนี้เป็นเพียงตัวอย่างการคำนวณการออกแบบเพื่อปรับปรุงโครงสร้างให้มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเพิ่มขึ้น ด้วยการเสริมโครงถักให้กับชุดอุปกรณ์ หากวิเคราะห์จากสมการจะพบว่าค่าโมเมนต์ความเฉื่อยนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยสามอย่าง ได้แก่ รูปร่าง พื้นที่หน้าตัด และระยะห่างจากแกน ดังนั้นเมื่อเพิ่มหรือลด ค่าใดค่าหนึ่งต่อไปนี้ ล้วนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบทั้งสิ้น

2. การเปลี่ยนสปริง เนื่องจากความถี่ธรรมชาติของระบบที่ต่ำไปส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่แบบ beam vibration การเปลี่ยนสปริงโดยเลือกสปริงที่มีค่าคงที่ของสปริงที่เพิ่มขึ้นอย่างเหมาะสม โดยแนะนำค่าที่มากกว่า 1200000 นิวตันต่อเมตร (เนื่องจากชุดอุปกรณ์ใช้สปริงทั้งหมด 4 ตัว ดังนั้นสปริงแต่ละตัวจะต้องมีค่าคงที่สปริงมากกว่า 300000 นิวตันต่อเมตร) ซึ่งจะส่งผลให้ความถี่ของระบบเพิ่มขึ้นมากกว่า 352.67 rad/s และทำให้รูปแบบการเคลื่อนที่เปลี่ยนเป็นรูปแบบของมวล-สปริงได้

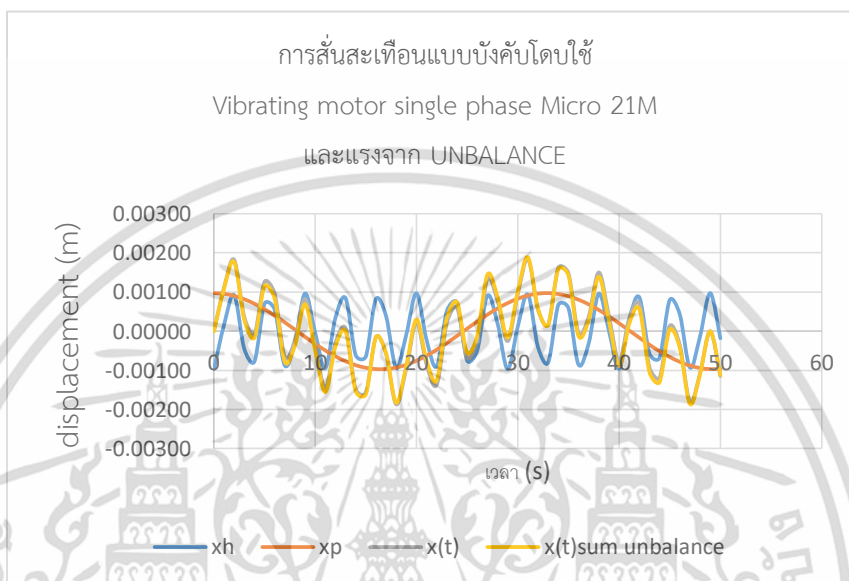
ในการออกแบบสปริงที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าคงที่ของสปริงตามที่ต้องการ จะใช้ดัชนีสปริงช่วยในการออกแบบ หาได้จากสมการ $c = \frac{D}{d}$ ค่าที่แนะนำจะอยู่ระหว่าง 4 ถึง 12 เลือกใช้วัสดุเป็น Oil-tempered wire ชนิด A239 มีค่า G เท่ากับ 77.2 GPa กำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดสปริงเท่ากับ 10 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของสปริงเท่ากับ 40 มิลลิเมตร จะได้ค่าดัชนีสปริงเท่ากับ 4 ซึ่งเป็นค่าที่แนะนำสำหรับออกแบบสปริง

จากนี้จะเป็นตัวอย่างในการคำนวณค่าคงที่ของสปริง ด้วยสมการ $k = \frac{d^4G}{8D^3N}$ กำหนดให้มีขดลวดจำนวน 5 ขด

$$k = \frac{(0.01)^4(77.2 \times 10^9)}{(8)(0.04^3)(5)}$$

$$k = 301562.5 \text{ N/m}$$

หากใช้สปริงที่มีขนาดข้างต้นทั้งหมด 4 ตัว จะได้ค่าคงที่สปริงเท่ากับ 1206250 นิวตันต่อเมตร และมีกราฟการเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 6.2

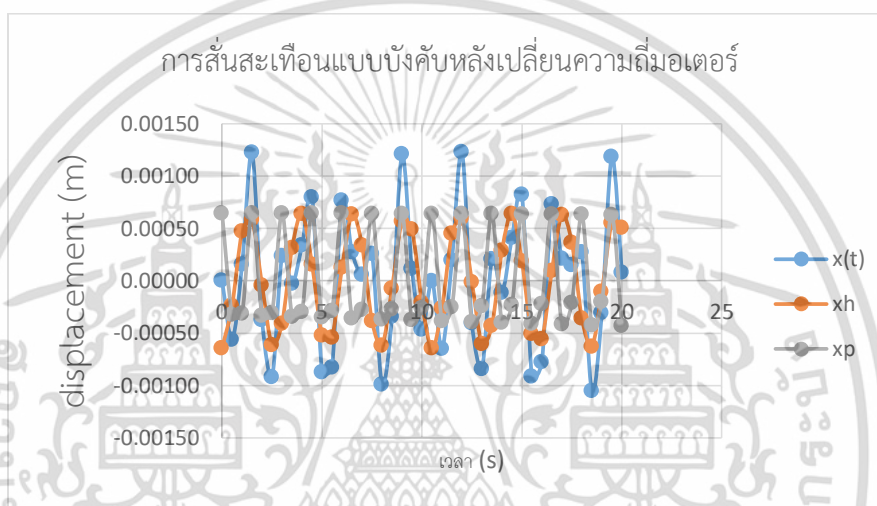


รูปที่ 6.2 กราฟการเคลื่อนที่แบบมวล-สปริง

สามารถคาดการณ์ได้ว่าระบบจะเคลื่อนที่ในรูปแบบมวล-สปริงโดยเมื่อเปลี่ยนค่าคงที่สปริงไปแล้วนั้นจะได้รับการเคลื่อนที่ที่มีระยะการสั่นจากการประมาณโดยการคำนวณอยู่ที่ 2 เซนติเมตร และในการออกแบบนั้นสามารถปรับเปลี่ยนค่าหรือขนาดต่างๆได้ตามความเหมาะสม ตามความสะดวกในการจัดหา และมีราคาที่ไม่สูงมากเกินไป

3. เลือกใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา เช่น อะลูมิเนียม สแตนเลส การเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ในการทำถาดสั่นสะเทือนให้มีน้ำหนักที่เบาลงนั้นจะช่วยลดความเสียหายที่จะเกิดกับโครงสร้างที่ใช้ในการรับน้ำหนักถาดสั่นสะเทือน อันเนื่องมาจากความล้าที่เกิดขึ้นในระหว่างที่ถาดสั่นสะเทือนทำงาน แต่ควรระมัดระวังในส่วนของความแข็งแรงของวัสดุที่นำมาใช้ และพื้นที่หน้าตัดของถาดสั่นสะเทือนที่เปลี่ยนไป อาจส่งผลกับรูปแบบการเคลื่อนที่ของถาดสั่นสะเทือนได้ ดังนั้นหากต้องการเปลี่ยนวัสดุ อาจจำเป็นที่จะต้องทำการออกแบบ และเปลี่ยนมอเตอร์ที่ใช้ร่วมด้วย รวมไปถึงต้นทุนที่อาจสูงขึ้นเนื่องจากราคาของวัสดุ

4. หากเลือกวิธีการเปลี่ยนมอเตอร์นั้นสามารถเลือกมอเตอร์ที่มีความถี่ประมาณ 200- 220 รอบต่อนาที เพราะช่วงความถี่ของมอเตอร์นี้นั้น สามารถใช้กับถาดสั่นที่ถูกออกแบบไว้ได้โดยไม่ต้องปรับแก้ค่าคงที่ของสปริงหรือมวลเลย แต่หากใช้มอเตอร์ความถี่ที่ประมาณเท่านั้นแรงที่ได้จากมอเตอร์นั้นจะไม่เพียงพอต่อการสั่นสะเทือนของทั้งถาดสั่นได้ หากต้องการปรับเปลี่ยนมอเตอร์ควรคำนึงถึงแรงในการส่งถ่ายพลังงานร่วมด้วยโดยแรงของการส่งถ่ายพลังงานไม่ควรต่ำกว่า 0.5 นิวตัน โดยแอมพลิจูด ที่ได้จะได้อยู่ที่ประมาณ 1 มิลลิเมตรดังกราฟที่ 6.3



รูปที่ 6.3 กราฟการสั่นสะเทือนแบบบังคับหลังเปลี่ยนความถี่มอเตอร์

6.4 แผนการในอนาคต

เนื่องมาจากผลกระทบจากโควิด-19 เป็นผลให้ไม่สามารถทำการทดลองได้ เมื่อเราสามารถทำการทดลองได้จึงเริ่มทำการทดลองดังนี้ เพื่อหาประสิทธิภาพการใช้งานเมื่อได้ทำการติดตั้งถาดสั่นสะเทือนเข้ากับระบบการทำงานที่มีอยู่เดิม

6.4.1 ขั้นตอนการวัดการสั่นสะเทือน

1. ติดตั้งถาดสั่นสะเทือนตามตำแหน่งที่ได้ออกแบบไว้
2. ประกอบอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือน ระบบไฟ เซนเซอร์ และสายสัญญาณเข้าด้วยกัน
3. ติดตั้งเซนเซอร์ที่ใช้วัดการสั่นสะเทือนบริเวณต้นและท้ายของถาดสั่นสะเทือน
4. เปิดการทำงานของถาดสั่นสะเทือน ทำการวัดค่าการสั่นสะเทือน และบันทึกผลที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำการวัดการสั่นสะเทือนทั้งหมดสามครั้ง โดยใช้เวลา 15 วินาทีในแต่ละรอบ และบันทึกผล

6. ทำกราฟที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหารูปแบบการเคลื่อนที่ของภาคสั่นสะเทือน

6.4.2 วิธีการทดลองเพื่อสังเกตการณ์ตักค่างของเชื้อเพลิงภายในท่อลำเลียง

การทดลองนี้มีจุดประสงค์ในการสังเกตการณ์ตักค่างของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดผงภายในท่อลำเลียง หลังจากติดตั้ง และเปิดใช้งานภาคสั่นสะเทือน เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของภาคสั่นสะเทือนในการลดการตักค่างของเชื้อเพลิงภายในท่อลำเลียง มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง
2. เปิดการทำงานของภาคสั่นสะเทือน
3. เปิดระบบลมส่วนที่หนึ่ง และปรับให้มีอัตราเร็วเชิงปริมาตร 0.015 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
4. ทำการเปิดระบบลำเลียงเชื้อเพลิงที่อัตราการเผาไหม้ 300 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง
5. สังเกตการณ์ตักค่างของเชื้อเพลิง และบันทึกผลที่ได้
6. ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 3-5 โดยเปลี่ยนอัตราเร็วเชิงปริมาตรเป็น 0.02 และ 0.025 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที แต่ละเงื่อนไขทำการทดลองสามครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย

เอกสารอ้างอิง

[1] จิระเมธา สังข์เกษม, ธนู ฉุยฉาย, สุรินทร์ ศรีณยนิตย์ และ ทวีศักดิ์ มั่นขวนนท์ (2561). รายงานการวิจัย การออกแบบโดยใช้พลศาสตร์เครื่องจักรกล และ กลศาสตร์ของไหลเพื่อลดต้นทุนค่าไฟฟ้าทางเศรษฐกิจศาสตร์ของมอเตอร์ **กรณีศึกษา: เครื่องล้างเมล็ดพริกไทยแบบถาดสั่นสะเทือน**, วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต, 1, มกราคม-เมษายน 2561, หน้า 57-70

[2] อีระศักดิ์ พรพงษ์ธร และอีระพงษ์ ว่องรัตน์ไพศาล (2552). **ผลของแรงกดในกลไกแบบคานสำหรับ ลดค่าความถี่ธรรมชาติของระบบแยกการสั่นสะเทือน**. ปรินญาณิพนธ์ปรินญาณวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[3] พีรพัฒน์ เทพลิบ. (2560). **การพัฒนากระบวนการไหลของอากาศและเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงแข็งชนิดผงขนาด 1MW**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[4] มนต์รี พิรุณเกษตร. (2551). **การสั่นสะเทือนทางกล**. กรุงเทพฯ : ท้อป.

[5] Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett (2015). **SHIGLEY'S MECHANICAL ENGINEERING DESIGN**. Tenth edition. New York : McGraw-Hill Education.

[6] Martin Clifford. (1990). **Modern Electric/Electronic Motors**. New Jersey : Prentice-Hall.

[7] Daniel J. Inman. **Engineering Vibration**. Fourth edition.

[8] Tony L. Schmitz l K. Scott Smith (2012). **Mechanical Vibrations Modeling and Measurement**. Springer New York Dordrecht Heidelberg London

[9] Robert L. Mott. (2004). **Remachine elements in mechanical design**. Fourth Edition New Jersey : Prentice- Hal

[10] บริษัท นิวแม็ก จำกัด. (2018). **Vibrator อุปกรณ์สร้างแรงสั่นสะเทือน**. [ออนไลน์].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าถึงได้จาก : <https://www.pneumax.co.th/article-vibrator>. (วันที่ค้นข้อมูล 20 กันยายน 2562)

[11] พรชัย จงจิตร์ไพศาล. บทบาทการขนถ่ายวัสดุ ด้วยลมในโรงงานอุตสาหกรรม. [ออนไลน์].
เข้าถึงได้จาก : http://library.dip.go.th/multim1/edoc/13965_pdf. (เข้าดูเมื่อวันที่ 30 สิงหาคม 2562)

[12] Sorada Khaengkarn. บทที่ 1 หลักการพื้นฐานของคิเนมาติกส์และกลไก. [ออนไลน์].
เข้าถึงได้จาก : https://www.academia.edu/38943534/บทที่_1_หลักการพื้นฐานของ_คิเนมาติกส์และกลไก. (วันที่ค้นข้อมูล : 25 สิงหาคม 2562)

[13] พลศาสตร์ (Dynamics) บทที่ 5 การเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็ง. [ออนไลน์].
เข้าถึงได้จาก : http://pioneer.netsew.chula.ac.th/~rchanat/2103213%20MechI/Dynamics/ch5/dynamics%20ch5%20_part%201_pdf. (วันที่ค้นข้อมูล 25 สิงหาคม 2562)

[14] โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (AREA MOMENT OF INERTIA) . [ออนไลน์].
เข้าถึงได้จาก : <https://ajmanut.com/attachments/article/10/บทที่%201%20โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่.pdf>. (วันที่ค้นข้อมูล : 16 มีนาคม 2563)

[15] Mauro Caresta .Vibrations of a Free-Free Beam [ออนไลน์].
เข้าถึงได้จาก : http://www.varg.unsw.edu.au/Assets/link%20pdfs/Beam_vibration.pdf. (วันที่ค้นข้อมูล : 11 มีนาคม 2563)

[16] ทฤษฎีของคานรับแรงและโมเมนต์ .[ออนไลน์].
เข้าถึงได้จาก : http://www.research-system.siam.edu/images/Mechanical_Engineering/AJ_Thanapot_3-2558/chalit/07_ch2.pdf. (วันที่ค้นข้อมูล : 17 มีนาคม 2563)

[17] Ministry of Tourism and Sports. (2563). อาชีพ. [ออนไลน์].
เข้าถึงได้จาก : <https://thailandtourismdirectory.go.th/th/content/page/detail/itemid>. (วันที่ค้นข้อมูล : 31 มีนาคม 2563)

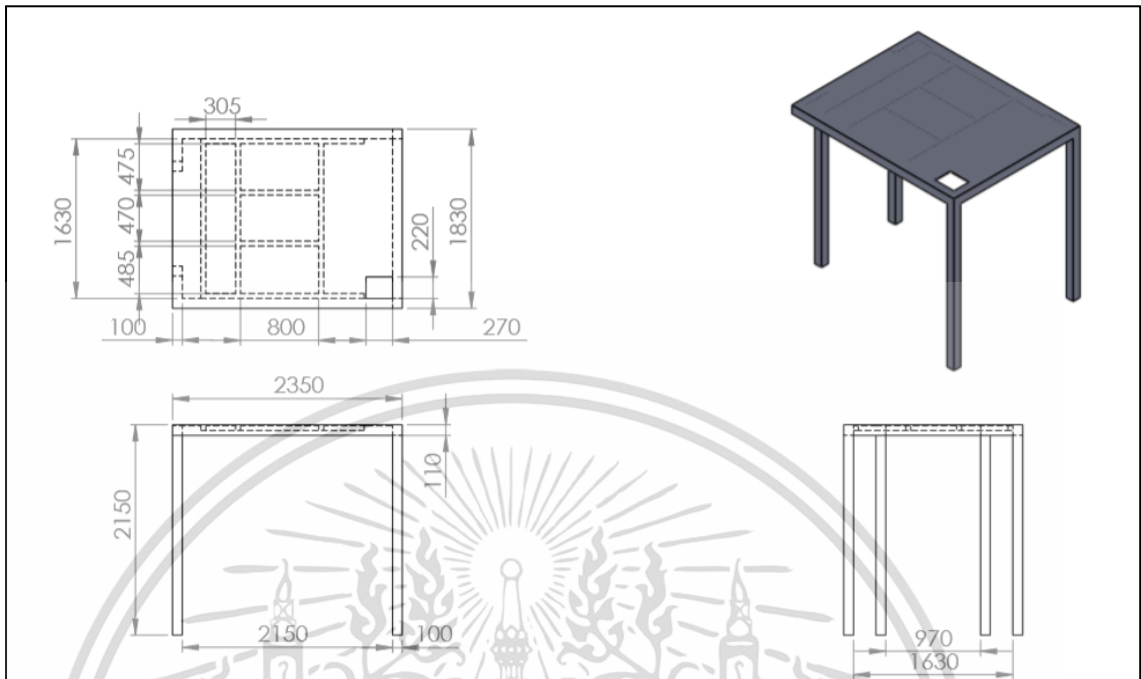


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

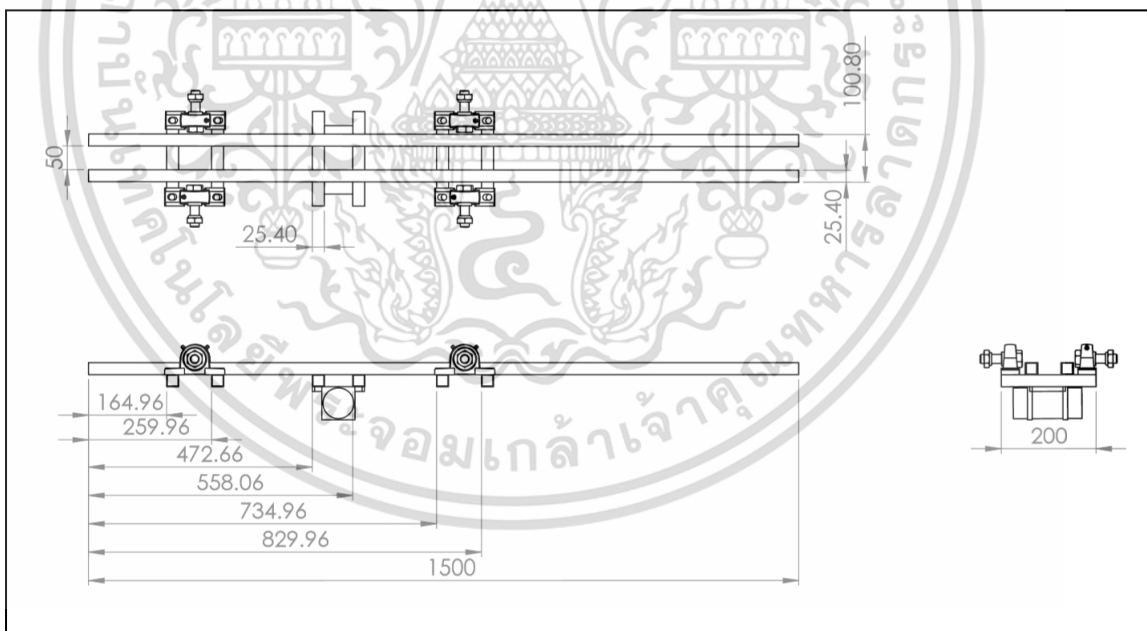


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปก.1 แบบแสดงขนาดโครงสร้าง

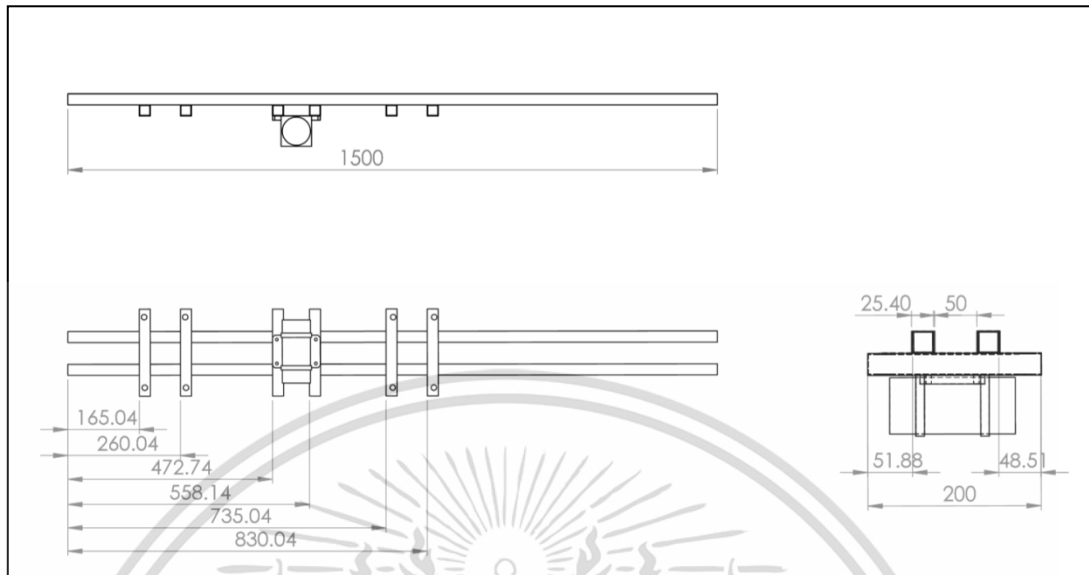


รูปก.2 แสดงขนาดแบบถาดสี่เหลี่ยมก่อนการแก้ไข

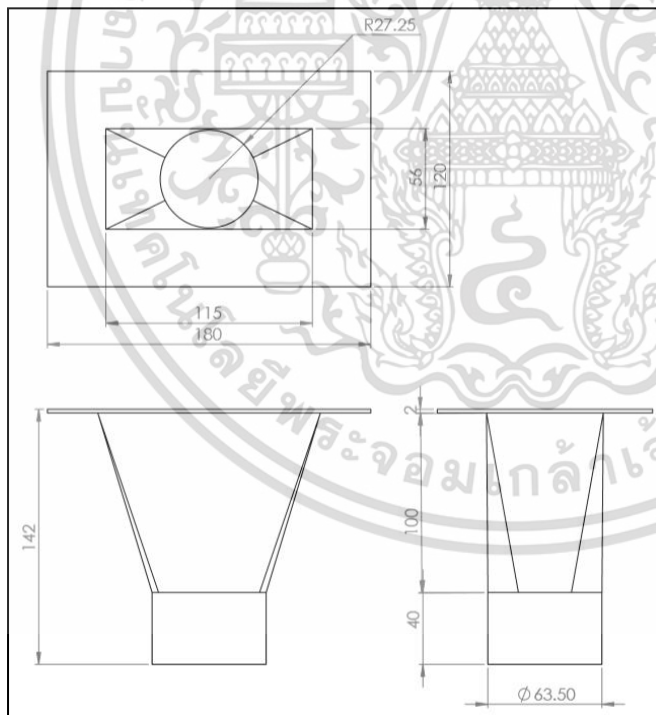


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

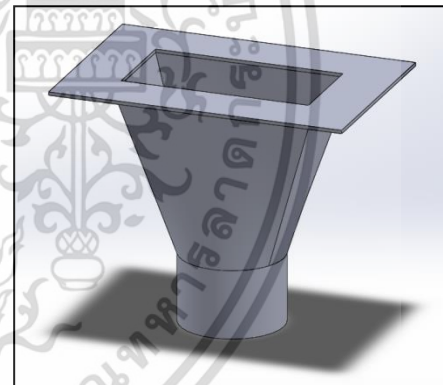
รูปก.3 แสดงขนาดแบบถาดสี่เหลี่ยมหลังทำการแก้ไข



รูปก.4ก แสดงขนาดอแดปเตอร์

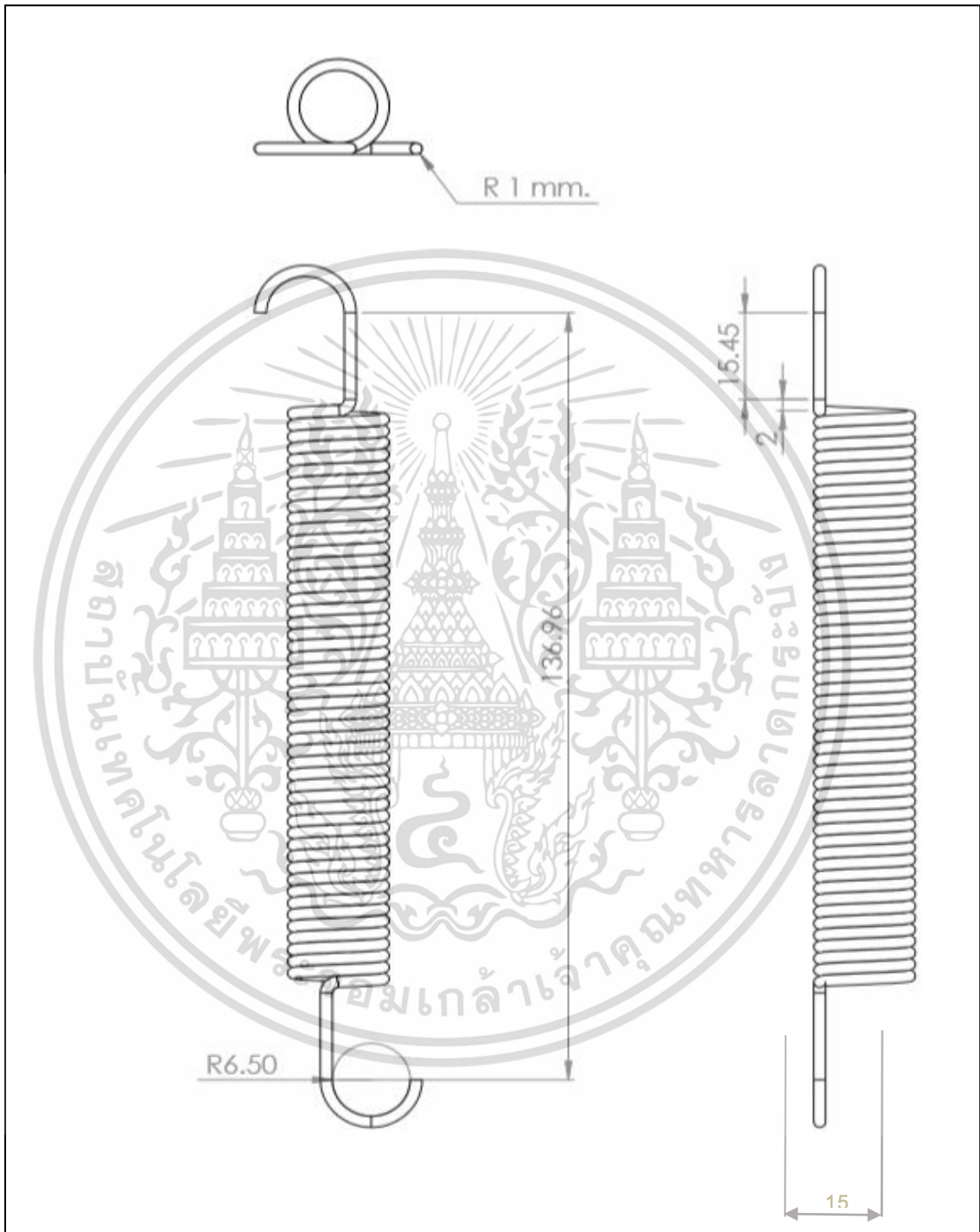


รูปก.4ข แสดงภาพจำลองอแดปเตอร์



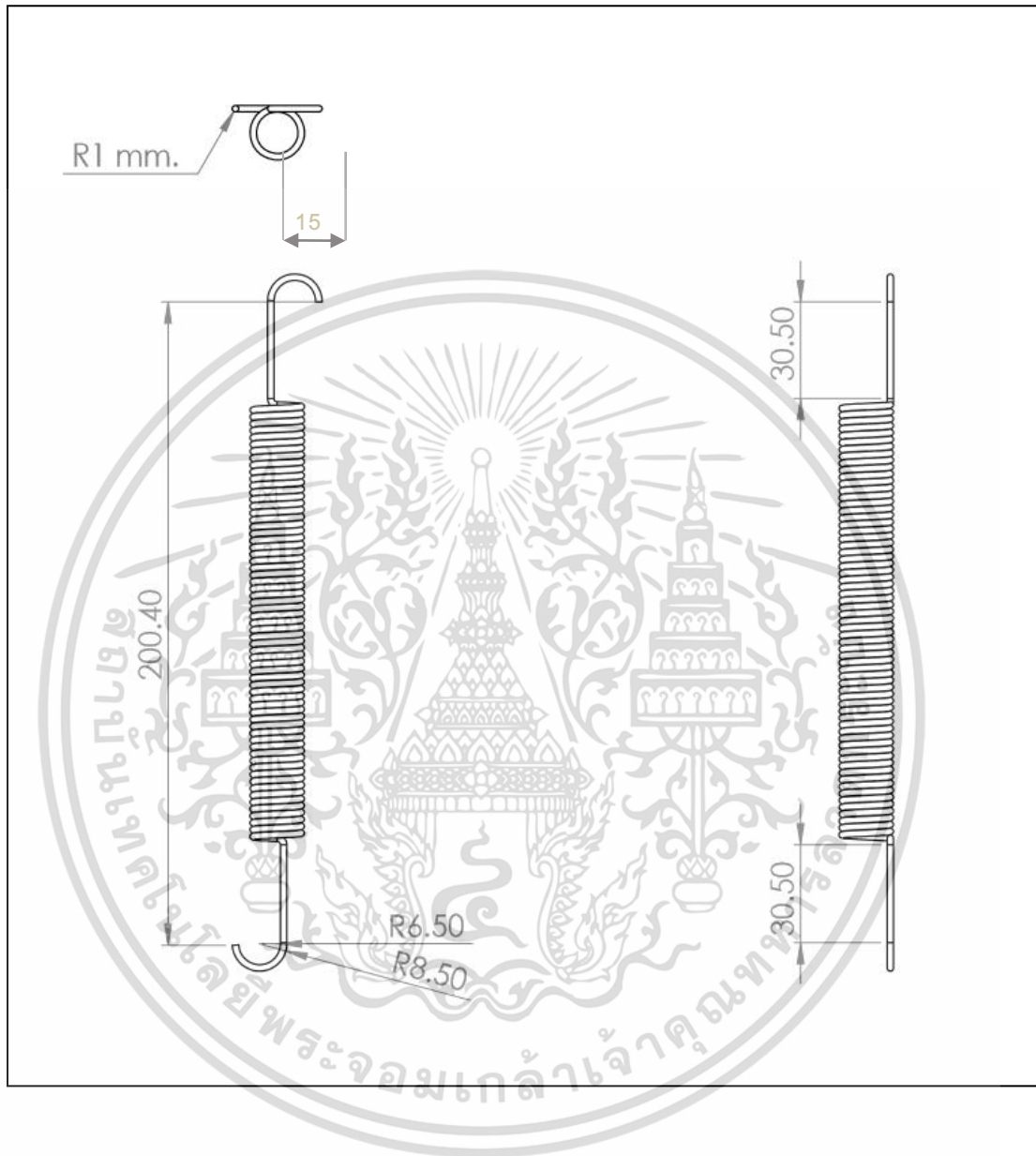
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปก.5 แบบแสดงขนาดสปริงขนาดความยาว 15.8 เซนติเมตร



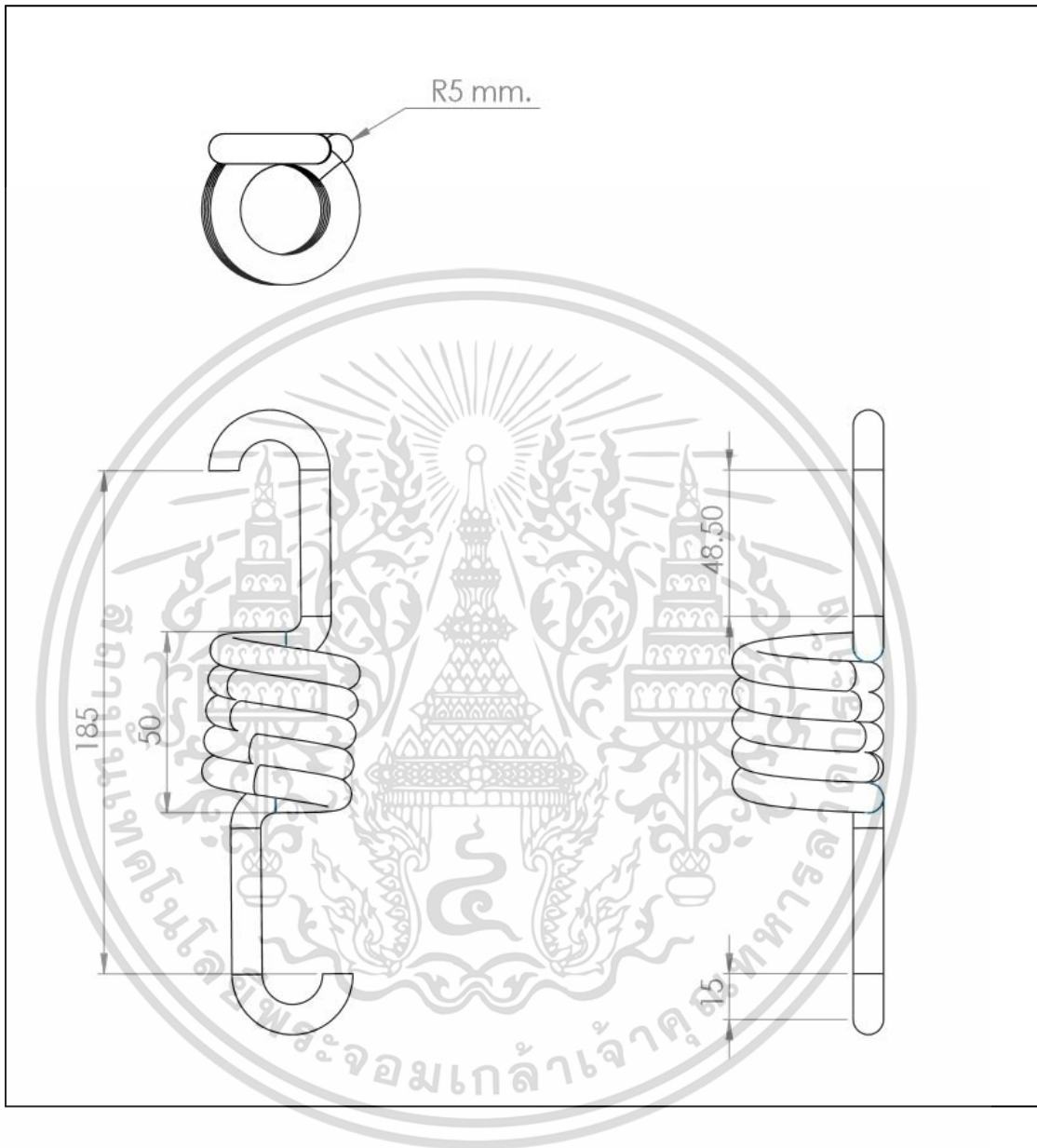
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปก.6 แบบแสดงขนาดสปริงขนาดความยาว 20.1 เซนติเมตร



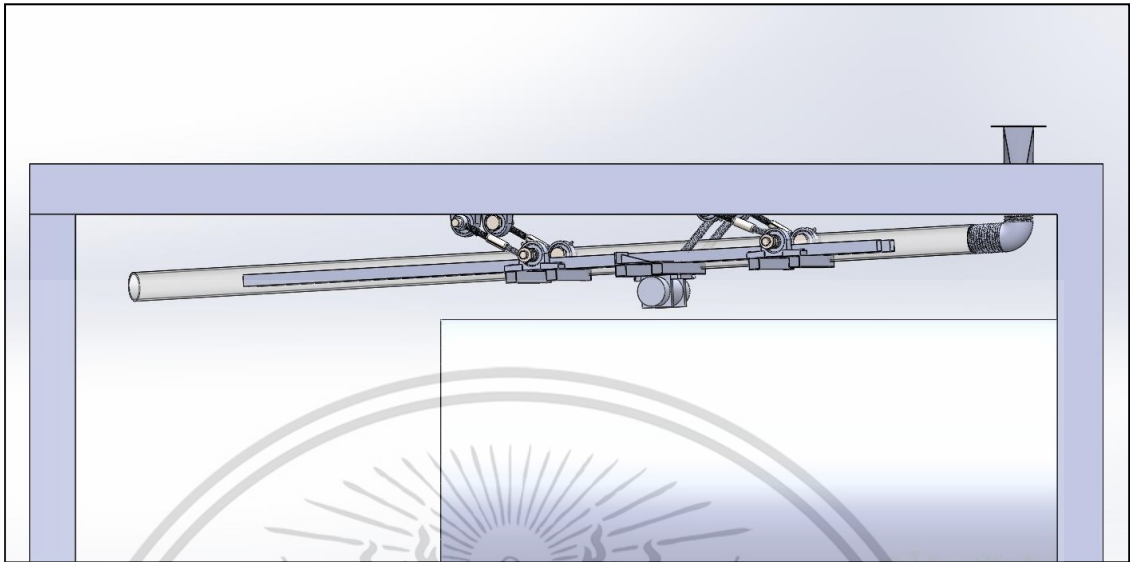
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปก.7 แสดงขนาดแบบสปริงที่ทำการออกแบบเพื่อแก้ไขปัญหาในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปก.8ก แสดงแบบจำลองการติดตั้งถาดล้นสะท้อนก่อนการแก้ไข

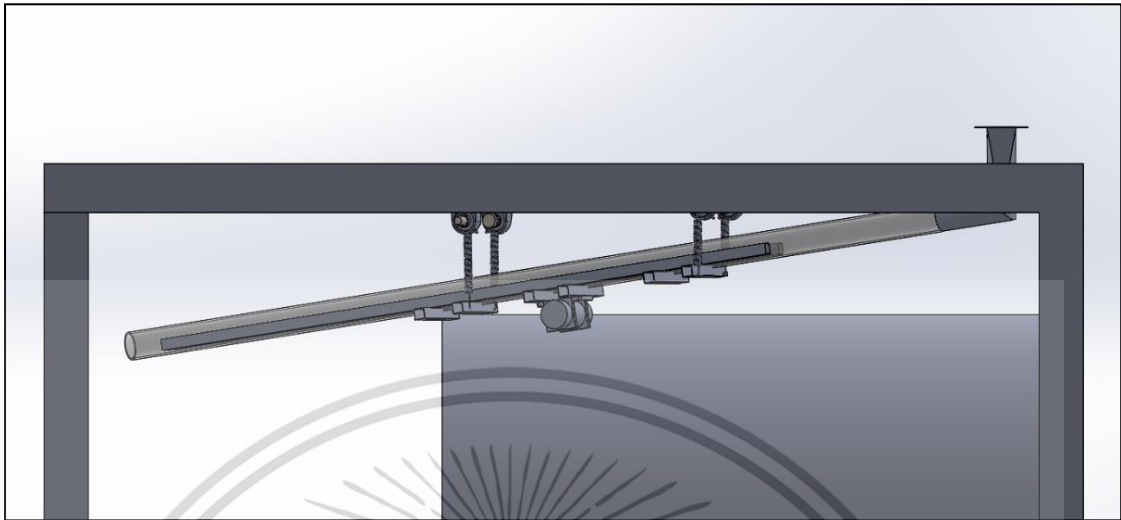


รูปก.8ข ภาพถาดล้นขณะติดตั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.9ก แสดงแบบจำลองภาคสั้นสะท้อนเมื่อทำการติดตั้ง (หลังทำการแก้ไข)

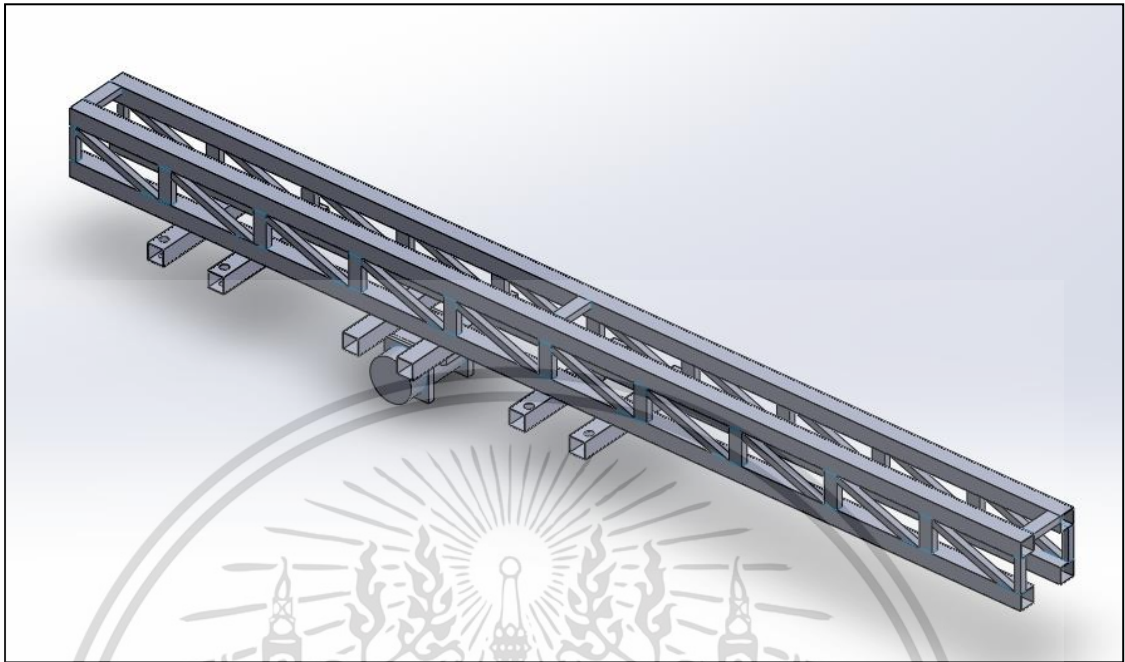


รูปก.9ข ภาพภาคสั้นขณะติดตั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปก.10ก แสดงแบบจำลองถาดสั่นสะเทือนเสริมโครงถัก

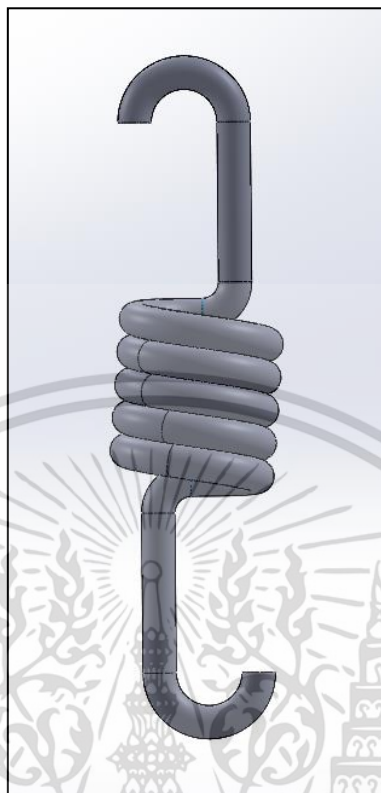


รูปก.10ข แสดงแบบจำลองถาดสั่นสะเทือนเสริมโครงถักเมื่อทำการติดตั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปก.11ก แสดงแบบจำลองสปริงที่ออกแบบขึ้นมา



รูปก.11ข แสดงแบบจำลองถาดสั่นสะเทือนใช้สปริงที่ออกแบบขึ้นมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปก.12 แสดงเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ



รูปก.13 แสดงสปริงที่ใช้ในการทดสอบ

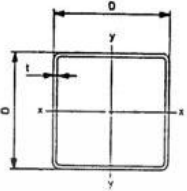


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.1 แสดงค่าคงที่ต่างๆของเหล็กกล่อง

STANDARD FOR HOLLOW STRUCTURAL STEEL SECTIONS								
SQUARE PIPES								
		Dimension Tolerance						
		Side Length : D,B ≤ 50 mm. +0.4 mm. -0.4 mm. : D,B > 50 mm. +0.8% , -0.8% Thickness : +10%, -10% Weight : +10%, -10% Length : +50 mm., 0						
Side Length	Thickness	Calculated Weight	Cross Sectional Area	Geometrical Moment of Inertia	Modulus of Section	Radius of Gyration	Standard Reference	
D x D	T	W	A	I _x , I _y	Z _x , Z _y	i _x , i _y		
in.	mm.	kg/m.	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm.		
3/4 x 3/4	19 x 19	1.2	0.66	0.77	0.43	0.45	0.75	BS
	20 x 20	1.6	0.88	1.02	0.53	0.56	0.72	
	25 x 25	2.0	1.02	1.30	0.66	0.66	0.71	
1 x 1	25 x 25	1.2	0.87	1.00	0.95	0.76	0.97	BS, TIS
	1.6	1.15	1.36	1.23	0.98	0.95		
	1.8	1.29	1.53	1.35	1.08	0.93		
	2.0	1.37	1.72	1.46	1.17	0.92		
	2.3	1.53	1.97	1.61	1.29	0.90		
	2.6	1.65	2.10	1.63	1.31	0.88		
	3.0	1.83	2.33	1.72	1.38	0.86		
3.2	1.91	2.44	1.75	1.40	0.85			
1 1/8 x 1 1/8	30 x 30	2.0	1.65	2.10	2.64	1.76	1.12	BS
	2.6	2.05	2.62	3.10	2.07	1.09	BS	
	3.0	2.30	2.93	3.33	2.22	1.07	BS	
	3.2	2.42	3.08	3.42	2.28	1.05	BS	
1 1/4 x 1 1/4	32 x 32	1.2	1.15	1.41	2.25	1.41	1.26	TIS
	1.6	1.54	1.84	2.86	1.79	1.25		
	1.8	1.73	2.04	3.12	1.95	1.24		
	2.0	1.92	2.24	3.37	2.11	1.23		
	2.3	2.04	2.60	3.71	2.32	1.20		
	3.2	2.69	3.42	4.54	2.84	1.15		
	3.2	2.69	3.42	4.54	2.84	1.15		
1 1/2 x 1 1/2	37 x 37	1.2	1.34	1.63	3.60	1.94	1.49	TIS
	1.6	1.72	2.15	4.60	2.49	1.46		
	1.8	2.08	2.48	5.48	2.89	1.48		
	2.0	2.31	2.79	5.93	3.12	1.46		
	2.3	2.47	3.15	6.54	3.44	1.44		
	3.2	3.29	4.19	8.18	4.30	1.40		
	3.2	3.29	4.19	8.18	4.30	1.40		
1 5/8 x 1 5/8	40 x 40	1.6	1.88	2.39	5.79	2.90	1.56	JIS
	2.0	2.28	2.90	6.80	3.40	1.53	BS	
	2.3	2.62	3.33	7.73	3.86	1.52	JIS	
	2.6	2.87	3.66	8.22	4.11	1.50	BS	
	3.0	3.24	4.13	9.01	4.51	1.48	BS	
	3.2	3.42	4.36	9.37	4.68	1.47	BS	
	3.6	3.77	4.80	10.00	5.00	1.44	BS	
4.0	4.09	5.21	10.50	5.26	1.42	BS		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.2 แสดงค่าคงที่ต่างๆของสปริง

Material	Elastic Limit, Percent of S_{ur}		Diameter d , in	E		G	
	Tension	Torsion		Mpsi	GPa	Mpsi	GPa
Music wire A228	65-75	45-60	<0.032	29.5	203.4	12.0	82.7
			0.033-0.063	29.0	200	11.85	81.7
			0.064-0.125	28.5	196.5	11.75	81.0
			>0.125	28.0	193	11.6	80.0
HD spring A227	60-70	45-55	<0.032	28.8	198.6	11.7	80.7
			0.033-0.063	28.7	197.9	11.6	80.0
			0.064-0.125	28.6	197.2	11.5	79.3
			>0.125	28.5	196.5	11.4	78.6
Oil tempered A239	85-90	45-50		28.5	196.5	11.2	77.2
Valve spring A230	85-90	50-60		29.5	203.4	11.2	77.2
Chrome-vanadium A231	88-93	65-75		29.5	203.4	11.2	77.2
			A232	29.5	203.4	11.2	77.2
Chrome-silicon A401	85-93	65-75		29.5	203.4	11.2	77.2
Stainless steel							
A313*	65-75	45-55		28	193	10	69.0
17-7PH	75-80	55-60		29.5	208.4	11	75.8
414	65-70	42-55		29	200	11.2	77.2
420	65-75	45-55		29	200	11.2	77.2
431	72-76	50-55		30	206	11.5	79.3
Phosphor-bronze B159	75-80	45-50		15	103.4	6	41.4
Beryllium-copper B197	70	50		17	117.2	6.5	44.8
	75	50-55		19	131	7.3	50.3
Inconel alloy X-750	65-70	40-45		31	213.7	11.2	77.2

ตาราง ข.3 แสดงค่าสำคัญต่างๆของมอเตอร์ที่ใช้

(Vibrating motor single phase Micro 21M)	
M mortar(kg)	2
m unbalance(kg)	0.08
e(m)	0.014
omega r(rad/s)	376.8
F0 (N)	159.0156
omega external force 5 Hz	376.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.4 แสดงค่าคงที่สปริงที่คำนวณได้

wire dia. (d)(m)	mean coil dia. (D)(m)	spring index (C)	N=5	N=4	outside dia. (mm)
			k	k	
0.008	0.032	4	241,250.0	301,562.5	36
	0.04	5	123,520.0	154,400.0	40
	0.048	6	71,481.5	89,351.9	48
	0.056	7	45,014.6	56,268.2	56
	0.064	8	30,156.3	37,695.3	64
	0.072	9	21,179.7	26,474.6	72
	0.08	10	15,440.0	19,300.0	80
	0.088	11	11,600.3	14,500.4	88
	0.096	12	8,935.2	11,169.0	96
0.009	0.036	4	271,406.3	339,257.8	40.5
	0.045	5	138,960.0	173,700.0	45
	0.054	6	80,416.7	100,520.8	54
	0.063	7	50,641.4	63,301.7	63
	0.072	8	33,925.8	42,407.2	72
	0.081	9	23,827.2	29,784.0	81
	0.09	10	17,370.0	21,712.5	90
	0.099	11	13,050.3	16,312.9	99
	0.108	12	10,052.1	12,565.1	108
0.01	0.04	4	301,562.5	376,953.1	45
	0.05	5	154,400.0	193,000.0	50
	0.06	6	89,351.9	111,689.8	60
	0.07	7	56,268.2	70,335.3	70
	0.08	8	37,695.3	47,119.1	80
	0.09	9	26,474.6	33,093.3	90
	0.1	10	19,300.0	24,125.0	100
	0.11	11	14,500.4	18,125.5	110
	0.12	12	11,169.0	13,961.2	120
0.011	0.044	4	331,718.8	414,648.4	49.5
	0.055	5	169,840.0	212,300.0	55
	0.066	6	98,287.0	122,858.8	0.066
	0.077	7	61,895.0	77,368.8	0.077
	0.088	8	41,464.8	51,831.1	0.088
	0.099	9	29,122.1	36,402.6	0.099
	0.11	10	21,230.0	26,537.5	0.11
	0.121	11	15,950.4	19,938.0	0.121
	0.132	12	12,285.9	15,357.3	0.132

ตาราง ข.5 แสดงค่าการคำนวณค่าความถี่ในรูปแบบการเคลื่อนที่ต่างๆ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่ให้ผู้ใดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I (m ⁴)	2.92E-08	5.4732E-07	7.2592E-07
Mode order n	w (rad/s)	w (rad/s)	w (rad/s)
1	179.06059	775.230458	892.798108
2	493.58741	2136.95261	2461.03237
3	967.62867	4189.28152	4824.60742

ตาราง ข.6 แสดงลักษณะการก้องของวัสดุในท่อที่เปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนอากาศของลมปฐมภูมิ

กำลังเครื่อง	Ratio Air 1	Valve air	Air 1 flow rate	Fuel	Phase Density	ลักษณะปรากฏ
KW	%	%	kg/s	kg/s		เชื้อเพลิงก้องในท่อ
300	25	51.2	0.0288	0.01856	0.64	0%
300	20	41.5	0.0231	0.01856	0.80	40%
300	15	37.5	0.0173	0.01856	1.07	60%

ตาราง ข.7 แสดงค่าคงที่ในการสั่นสะเทือนแบบบังคับโดยใช้ Vibrating motor single phase Micro 21M ที่มีมวลที่ใช้ในการเสียสมดุล 4 แผ่นน้ำหนัก 0.08 กิโลกรัม

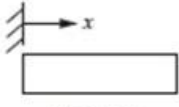
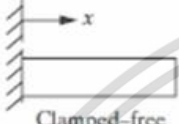



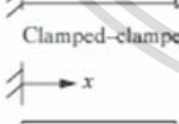
time	xh	xp	x(t)	xp(unbalance)	x(t)sum unbalance
0	-0.00097	0.00097	0.00000	0.00000	0.00000
1	0.00016	0.00095	0.00111	-0.00003	0.00108
2	0.00092	0.00090	0.00182	-0.00005	0.00177
3	-0.00045	0.00082	0.00037	-0.00007	0.00029
4	-0.00078	0.00070	-0.00008	-0.00009	-0.00017
5	0.00070	0.00056	0.00126	-0.00011	0.00115
6	0.00055	0.00040	0.00095	-0.00012	0.00083
7	-0.00088	0.00022	-0.00065	-0.00013	-0.00078
8	-0.00027	0.00004	-0.00023	-0.00013	-0.00036
9	0.00096	-0.00014	0.00082	-0.00013	0.00069
10	-0.00004	-0.00032	-0.00036	-0.00012	-0.00048
11	-0.00095	-0.00049	-0.00145	-0.00011	-0.00156
12	0.00034	-0.00064	-0.00030	-0.00010	-0.00040
13	0.00084	-0.00077	0.00007	-0.00008	0.00000
14	-0.00061	-0.00087	-0.00148	-0.00006	-0.00154
15	-0.00065	-0.00094	-0.00158	-0.00003	-0.00162
16	0.00082	-0.00097	-0.00015	-0.00001	-0.00016
17	0.00038	-0.00097	-0.00058	0.00002	-0.00056

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18	-0.00094	-0.00093	-0.00187	0.00004	-0.00183
19	-0.00008	-0.00086	-0.00094	0.00006	-0.00088
20	0.00097	-0.00076	0.00021	0.00009	0.00030
21	-0.00023	-0.00063	-0.00085	0.00010	-0.00075
22	-0.00090	-0.00047	-0.00137	0.00012	-0.00125
23	0.00051	-0.00030	0.00021	0.00013	0.00034
24	0.00073	-0.00012	0.00061	0.00013	0.00074
25	-0.00075	0.00006	-0.00069	0.00013	-0.00055
26	-0.00049	0.00025	-0.00024	0.00013	-0.00012
27	0.00091	0.00042	0.00133	0.00012	0.00145
28	0.00020	0.00058	0.00078	0.00010	0.00088
29	-0.00097	0.00072	-0.00025	0.00009	-0.00017
30	0.00011	0.00083	0.00094	0.00007	0.00101
31	0.00094	0.00091	0.00185	0.00004	0.00189
32	-0.00041	-0.00096	0.00055	0.00002	0.00057
33	-0.00080	0.00097	0.00017	-0.00001	0.00016
34	0.00067	0.00095	0.00162	-0.00003	0.00159
35	0.00059	0.00089	0.00148	-0.00006	0.00143
36	-0.00086	0.00080	-0.00005	-0.00008	-0.00013
37	-0.00032	0.00069	0.00037	-0.00010	0.00027
38	0.00096	0.00054	0.00150	-0.00011	0.00139
39	0.00001	0.00038	0.00039	-0.00012	0.00027
40	-0.00096	0.00020	-0.00076	-0.00013	-0.00089
41	0.00030	0.00002	0.00032	-0.00013	0.00018
42	0.00087	-0.00017	0.00070	-0.00013	0.00057
43	-0.00058	-0.00035	-0.00092	-0.00012	-0.00104
44	-0.00068	-0.00051	-0.00119	-0.00011	-0.00130
45	0.00079	-0.00066	0.00013	-0.00009	0.00004
46	0.00043	-0.00078	-0.00036	-0.00008	-0.00043
47	-0.00093	-0.00088	-0.00181	-0.00005	-0.00186
48	-0.00013	-0.00094	-0.00107	-0.00003	-0.00110
49	0.00097	-0.00097	0.00000	0.00000	0.00000
50	-0.00018	-0.00096	-0.00115	0.00002	-0.00113

ตาราง ข.8 แสดงค่าตัวอย่างค่าคงที่ต่อของคานในรูปแบบการเคลื่อนที่ต่างๆ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 6.6 SAMPLE OF VARIOUS BOUNDARY CONFIGURATIONS OF A SLENDER BEAM IN TRANSVERSE VIBRATION OF LENGTH l / ILLUSTRATING WEIGHTED NATURAL FREQUENCIES AND MODE SHAPES^a

Configuration	Weighted frequencies $\beta_n l$ and characteristic equation	Mode shape	σ_n
 Free-free	0 (rigid-body mode)	$\cosh \beta_n x + \cos \beta_n x$	0.9825
	4.73004074	$-\sigma_n (\sinh \beta_n x + \sin \beta_n x)^b$	1.0008
	7.85320462		0.9999
	10.9956078		1.0000
	14.1371655		0.9999
	17.2787597		1 for $n > 5$
$\frac{(2n+1)\pi}{2}$ for $n > 5$			
 Clamped-free	$\cos \beta l \cosh \beta l = 1$	$\cosh \beta_n x - \cos \beta_n x$	0.7341
	1.87510407	$-\sigma_n (\sinh \beta_n x - \sin \beta_n x)$	1.0185
	4.69409113		0.9992
	7.85475744		1.0000
	10.99554073		1.0000
	14.13716839		1.0000
$\frac{(2n-1)\pi}{2}$ for $n > 5$		1 for $n > 5$	
 Clamped-pinned	$\cos \beta l \cosh \beta l = -1$	$\cosh \beta_n x - \cos \beta_n x$	1.0008
	3.92660231	$-\sigma_n (\sinh \beta_n x - \sin \beta_n x)$	1 for $n > 1$
	7.06858275		
	10.21017612		
	13.35176878		
	16.49336143		
$\frac{(4n+1)\pi}{4}$ for $n > 5$			
 Clamped-sliding	$\tan \beta l = \tanh \beta l$	$\cosh \beta_n x - \cos \beta_n x$	0.9825
	2.36502037	$-\sigma_n (\sinh \beta_n x - \sin \beta_n x)$	1 for $n > 1$
	5.49780392		
	8.63937983		
	11.78097245		
	14.92256510		
$\frac{(4n-1)\pi}{4}$ for $n > 5$			
 Clamped-clamped	$\tan \beta l + \tanh \beta l = 0$	$\cosh \beta_n x - \cos \beta_n x$	0.982502
	4.73004074	$-\sigma_n (\sinh \beta_n x - \sin \beta_n x)$	1.00078
	7.85320462		0.999966
	10.9956079		1.0000
	14.1371655		1.0000
	17.2787597		1.0000
$\frac{(2n+1)\pi}{2}$ for $n > 5$		1 for $n > 5$	
 Pinned-pinned	$\cos \beta l \cosh \beta l = 1$	$\sin \frac{n\pi x}{l}$	none
	$n\pi$		
	$\sin \beta l = 0$		

^aHere the weighted natural frequencies $\beta_n l$ are related to the natural frequencies by equation (6.101) or $\omega_n = \beta_n^2 \sqrt{EI/\rho A}$, as used in Example 6.5.1. The values of σ_n for the mode shapes are computed from the formulas given in Table 6.5.

^bThere are two free-free mode shapes: $X_0 = \text{constant}$ and $X_0 = A(x - l/2)$; the first is translational, the second rotational.

ตาราง ข.9 แสดงค่าส่วนประกอบและค่าความร้อนในการเผาไหม้ของผงไม้ยางพารา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



๐๐.

คำขอบริการที่ ผทท.144/58 ที่ ผทท.พ. 452-05/58

รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์

ให้แก่

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การทดสอบ / วิเคราะห์ เรือเพลิงผงไม้ข่างหาร

วิธีทดสอบ / วิเคราะห์ ASTM D 7582, D 5373, D 4239 and D 5865

ภาวะการทดสอบ / วิเคราะห์: อุณหภูมิ - °C ความชื้นสัมพัทธ์ - %

ผลการทดสอบ / วิเคราะห์

คุณสมบัติ	สภาพแห้ง	สภาพน้ำหนักแห้ง
ความชื้น, %	5.81	-
สารระเหย, %	76.68	81.41
กำมะถัน, %	15.23	16.36
เถ้า, %	2.28	2.43
ไฮโดรเจน, %	6.31	6.01
คาร์บอน, %	45.42	48.22
ไนโตรเจน, %	0.45	0.48
ออกซิเจน, %	45.54	42.56
ซิงค์, %	0.00	0.00
ค่าความร้อนสูง, กิโลแคลอรี/กก.	4,180	4,440
ค่าความร้อนต่ำ, กิโลแคลอรี/กก.	3,860	4,100

ผู้ทดสอบ / วิเคราะห์

- 
- หญิงจรูญ อภิรมย์กุล

ผู้รับรอง



(ดร.รังษิณี ชัยธรรม)
รักษาการในตำแหน่ง
ผู้อำนวยการในตำแหน่ง

ผู้ตรวจสอบ



(ดร.ปวิษฐท์ จันทร์วงษ์ไพศาล)

ผู้อำนวยการ ฝ่ายเทคโนโลยีพลังงาน

วันที่ 21 พฤษภาคม 2558

ผลการทดสอบ/วิเคราะห์นี้ รับรองหากเฉพาะอย่างยิ่งที่ได้ทำการทดสอบ / วิเคราะห์เท่านั้น
ห้ามนำผลการทดสอบ / วิเคราะห์ ไปโฆษณาใดเพื่อรับอนุญาตเป็นกรณีพิเศษอื่นจาก วร.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

๑๕ หมู่ ๑๑ แขวงในจวน ๓ คลองเตย กรุงเทพมหานคร ๑๐๑๑๐๑

Tel. 0-2616-1616 หรือ 0-2616-1617 โทรสาร 0-2616-1618

E-mail : tistr@tistr.or.th Website : www.tistr.or.th

FM-ETD-21

ตาราง ข.10 แสดงคุณสมบัติของอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE A-15

Properties of air at 1 atm pressure

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Density $\rho, \text{kg/m}^3$	Specific Heat $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Thermal Conductivity $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Thermal Diffusivity $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Dynamic Viscosity $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Kinematic Viscosity $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Prandtl Number Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Note: For ideal gases, the properties c_p , k , μ , and Pr are independent of pressure. The properties ρ , ν , and α at a pressure P (in atm) other than 1 atm are determined by multiplying the values of ρ at the given temperature by P and by dividing ν and α by P .

Source: Data generated from the EES software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. Original sources: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198; and Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, and P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้